



RECURSOS NATURALES Y SOCIEDAD

REVISTA DIGITAL DE DIVULGACIÓN CIENTÍFICA



CENTRO DE INVESTIGACIONES
BIOLÓGICAS DEL NOROESTE, S.C.

Florecimientos algales nocivos: prevención, control y mitigación

David J. López Cortés¹, José J. Bustillos Guzmán^{1*}, Francisco, E. Hernández Sandoval¹,
Saúl Chávez López, Christine J. Band Schmidt², Erick, J. Núñez Vázquez¹.

Resumen

Las microalgas que forman florecimientos algales nocivos (FAN) han impactado negativamente los ecosistemas acuáticos, la industria de la maricultura, la salud animal y humana. Uno de los propósitos fundamentales que actualmente se investiga de los FAN es como prevenirlos y en caso de su presencia, cómo controlarlos y mitigar sus efectos. La detección temprana a través de la identificación de sus toxinas y su localización principalmente en moluscos bivalvos, han permitido tomar medidas precautorias como establecer vedas sanitarias y cuarentena para garantizar la inocuidad de alimentos de origen marino. Sin embargo, actualmente el uso de resinas sintéticas fabricadas con el polistireno-divinilbenceno que puede adherir diferentes tipos de biotoxinas, parece ser eficaz para la detección temprana de FAN. Con respecto al control de los FAN, diferentes métodos se han puesto a prueba siendo el más efectivo el empleado con arcillas, aunque el efecto de los flóculos (arcilla-microalga-toxinas) que se depositan en el piso marino, es poco conocido. Para la mitigación, después de que se ha detectado un FAN tóxico, las autoridades de salud implementan un plan ya establecido en la legislación federal de riesgos sanitarios para disminuir su impacto, que incluye la medición de biotoxinas y definir si no rebasa los límites máximos permisibles en los productos marinos principalmente de los moluscos bivalvos, este plan es más eficaz con la participación de científicos especializados en el tema, los cuales apoyan a las autoridades sanitarias para el establecimiento de vedas para la extracción, venta y consumo de productos marinos. Un complemento de este plan es la difusión del probable impacto de estos eventos tóxicos a través de los medios de comunicación masiva que realiza la autoridad de salud.

Palabras clave: Microalgas nocivas, prevención, control, mitigación.

Abstract:

Harmful algal blooms (HAB) have caused negative impacts on ecosystems, marine culture industry, and animal and human health. One of the main challenges of the scientific community is to forecast or prevent, control, and mitigate HAB events before, during, and after they have occurred. Both toxin identification and detection,

¹Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. Instituto Politécnico Nacional 195, Playa Palo de Santa Rita Sur. C.P. 23096

²Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, Ave IPN s/n. Col. Playa Palo de Santa Rita, La Paz B.C.S C.P. 23096

mainly in bivalve mollusks, have allowed taking precautionary measures such as sanitary closed seasons and quarantine to ensure seafood safety. To date, the use of synthetic resins such as polystyrene-divinylbenzene that may adhere different types of biotoxins is promissory for early detection of these events. Concerning the control of HAB, different methods have been performed but the most effective is the application of clays although little is known on the effect of the flock (clay-microalgae-toxins) on the sea floor. Concerning mitigation, besides federal legislation for maximal toxin content of bivalve, fish, and edible marine products seem to be more effective when scientific community is involved with decision-makers together with education and awareness programs for the population.

Key words: Harmful algae, prevention, control, mitigation.

Antecedentes

Las proliferaciones de microalgas marinas nocivas o tóxicas pueden afectar la salud humana y la de animales; causar mortandad masiva de peces e incluso contaminar diversos productos marinos alterando en forma negativa los ecosistemas. Debido a esto, a este fenómeno ambiental se le denomina, en inglés, “Harmful Algal Bloom” (HAB) y en español Florecimientos Algaes Nocivos (FAN), comúnmente conocidas como mareas rojas (Fig. 1). Sin embargo, estos eventos pueden manifestarse con otros colores distintos al rojo e, incluso, proliferar debajo de la superficie del agua y a nivel del piso marino. Un FAN toxico es la proliferación de microalgas productoras de toxinas y otros metabolitos como las sustancias reactivas de oxígeno conocidas como ROS que impactan en la salud de los animales y del humano. Los nocivos son FAN no tóxicos, que durante su máximo crecimiento pueden obstruir branquias de peces ocasionado su muerte por sofocación y cuando muere la población de microalgas, sus restos orgánicos se oxidan durante su hundimiento, agotando el oxígeno disuelto en la columna de agua, lo que origina la hipoxia y anoxia ocasionando la muerte de organismos que viven en el piso marino.



Fig. 1 Marea roja del Dinoflagelado *Noctiluca scintillans* en Bahía Concepción B.C.S. México (Imagen: Miguel A. Juárez)

A nivel mundial en las últimas tres décadas se ha registrado un incremento en la intensidad, duración y distribución geográfica de los FAN (Hallegraeff, 1993; Lee *et al.*, 2008). El estudio acerca del origen de estos florecimientos, su predicción, su control y su mitigación ésta inconcluso (Anderson *et al.*, 2012). Sin embargo, las investigaciones acerca de su formación en el ambiente se asocian a eventos naturales como escorrentía de los ríos y exceso atípicos de lluvias. Otras investigaciones apuntan hacia procesos de emersión de agua por corrientes marinas. También se relacionan con las actividades humanas; por ejemplo, por el aumento de compuestos químicos de aguas tratadas provenientes de las ciudades costeras y excedentes de fertilizantes agrícolas y acuícolas (Figs. 2 a-d), que son directa o indirectamente depositados en lagos, embalses, ríos y en aguas costeras marinas.



Fig. 2. Aporte directo e indirecto de compuestos químicos por actividades humanas. a) Planta de tratamiento de aguas residuales (Foto: A. Kana), b) aplicación de fertilizantes agrícolas (Foto: www. Kuhnknight.com), c) Granja de cultivo de peces (Foto: P. Glibert), d) Encierros para engorda de atún (Foto: D. López-Cortés)

El transporte de organismos que producen los FAN por actividades marítimas, principalmente por el agua de mar que usan para mantener en equilibrio las embarcaciones, también llamada agua de lastre, así como el traslado de mariscos para cultivo y comercio es otro mecanismo importante para su dispersión y permanencia en sitios donde encuentran condiciones óptimas para proliferar, incluyendo especies tóxicas, sin embargo han sido subestimadas. Los aspectos biológicos como la competencia entre especies por alimento, la defensa química

o alelopatía, la emersión de agua del fondo marino (surgencias) y periodos de post-emersión, los cambios repentinos de la temperatura del agua de mar y el cambio climático global son eventos relevantes que también contribuyen al aumento de los FAN (Glibert *et al.*, 2005).

En México los FAN son eventos frecuentes (Cortés-Altamirano *et al.*, 1995; Gárate-Lizárraga *et al.*, 2001). Por ejemplo, en el Golfo de California (Fig. 3) la aparición de estos florecimientos son recurrentes y algunas de las especies responsables son el protozooario fotosintético *Myrionecta rubra* (= *Mesodinium rubrum*); los dinoflagelados *Scripsiella trochoidea*, *Noctiluca scintillans*, *Cochlodinium polykrikoides* y *Prorocentrum rathymum* (Gárate-Lizárraga *et al.* 2001; 2004); las diatomeas *Rhizosolenia debyana*, *Chaetoceros debilis* y *Pseudo-nitzschia* (Gárate-Lizárraga *et al.* 2003; 2004; López-Cortés *et al.*, 2006) y la rafidoficea *Chattonella marina* (Band-Schmidt *et al.*, 2005; López-Cortés *et al.*, 2011).



Fig. 3. Especies nocivas y tóxicas más frecuentes en la región noroeste de México, principalmente en zonas de importancia turística, de pesca y acuicultura (Fuente: Manejo de la maricultura en el noroeste de México).

También se han registrado florecimientos asociados a especies productoras de toxinas paralizantes, por ejemplo: los dinoflagelados *Gymnodinium catenatum*, *Alexandrium catenella*, *A. tamijavanichii* y *Pyrodinium bahamense*. Esta última especie en sus dos variedades *bahamense* y *compresum* (Gárate-Lizárraga *et al.*, 2011, 2013). Otras especies productoras de toxinas son *Gambierdiscus toxicus* (productora de ciguatoxinas, Sierra-Beltrán *et al.*, 1998), *Prorocentrum lima*, *Dinophysis fortii*, *D. acuminata*, *D. mitra* y *D. tripos* (productoras de toxinas diarreicas (Gárate-Lizárraga *et al.*, 2001; Heredia-Tapia *et al.*, 2002; Okolodokov y Gárate-Lizárraga, 2006) (Fig. 4).

La presencia de estos eventos nocivos en muchas partes del mundo, incluyendo México, pueden impactar la salud animal y humana, la pesca y la acuicultura. Por ejemplo los dinoflagelados *Cochlodinium polykrikoides* (Fig. 5) y *Gymnodinium impudicum* causaron serios daños a la industria acuícola de Corea, con pérdidas de 60 millones de dólares anuales, donde el exceso de microalgas en el agua bloqueó las branquias de peces y causó su muerte (por asfixia) en menos de dos horas. En los Estados Unidos de Norte América, Europa y otros países asiáticos también se han registrado pérdidas anuales de millones de dólares (Anderson, 2009, Park *et al.*, 2013).

En México se han documentado pérdidas principalmente en la industria del camarón en Sinaloa (Alonso-Rodríguez *et al.*, 2003); en peces confinados en jaulas (Ensenada BC) y silvestres en las zonas de la Bahía de La Paz y en la zona Pacífico norte de B.C.S. (Garate-Lizárraga *et al.*, 2004, 2007, Guluarte-Castro y Bañuelos 2007; López-Cortés *et al.*, 2015). También se han visto perjudicadas especies de bivalvos, aves marinas, mamíferos y tortugas marinas (ver revisión de Núñez-Vázquez *et al.*, 2011).

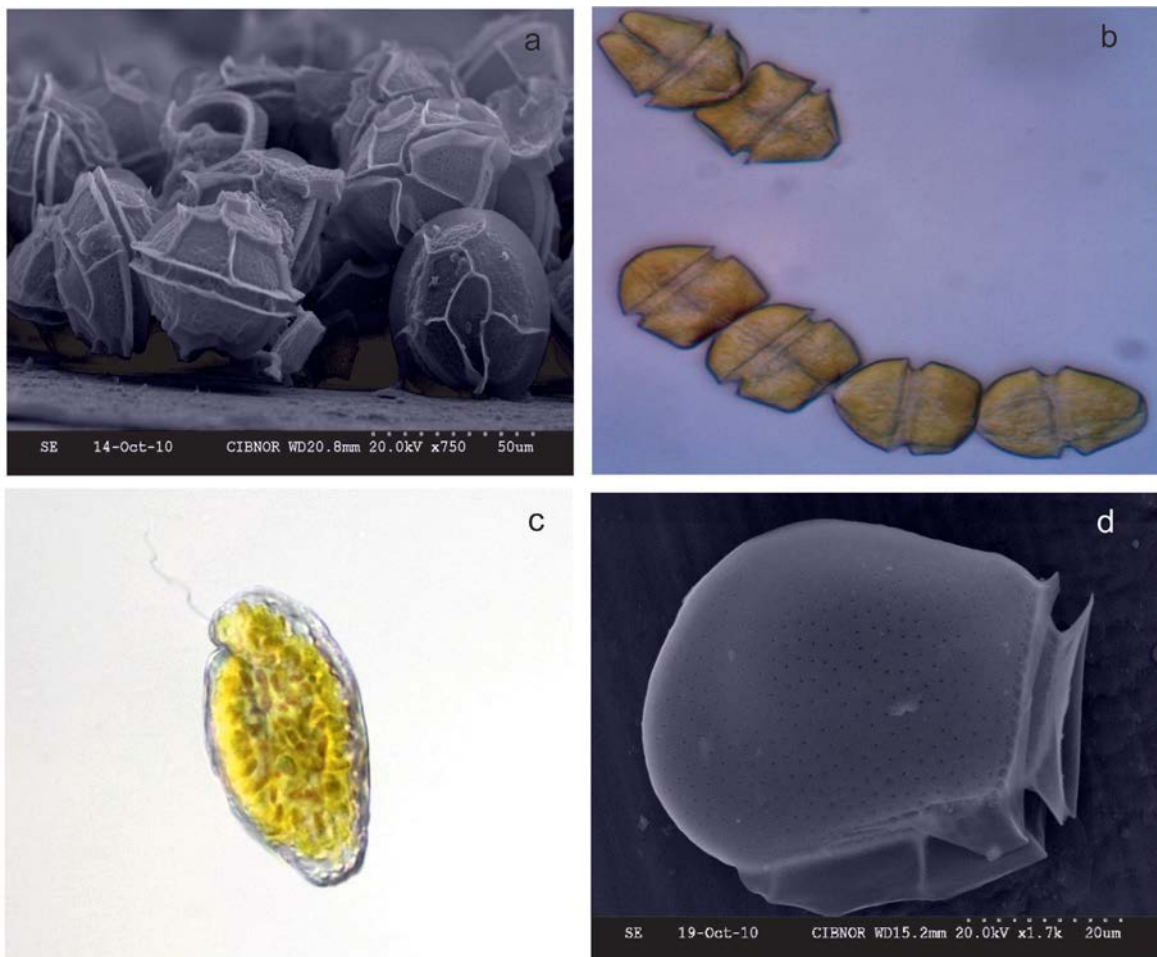


Fig. 4. a) *Pyrodinium babamense* var. *compressum* b) *Gymnodinium catenatum* de las costas del Pacífico c) *Chattonella* sp. d) *Dinophysis* sp. (Imágenes a,d Erick J. Núñez-Vázquez, b, Dulce V. Ramírez-Rodríguez, c, Raul González.

Debido a los impactos negativos en los ecosistemas acuáticos, la salud humana y animal y en la economía de la industria acuícola, se han propuesto estrategias para afrontar sus efectos los cuales incluyen la prevención, el control y la mitigación (Anderson, 2009)

La prevención, el control y la mitigación.

La prevención se refiere a la implementación de un sistema de monitoreo sistemático con la finalidad de identificar oportunamente la (s) especies problema, principalmente si son tóxicas.

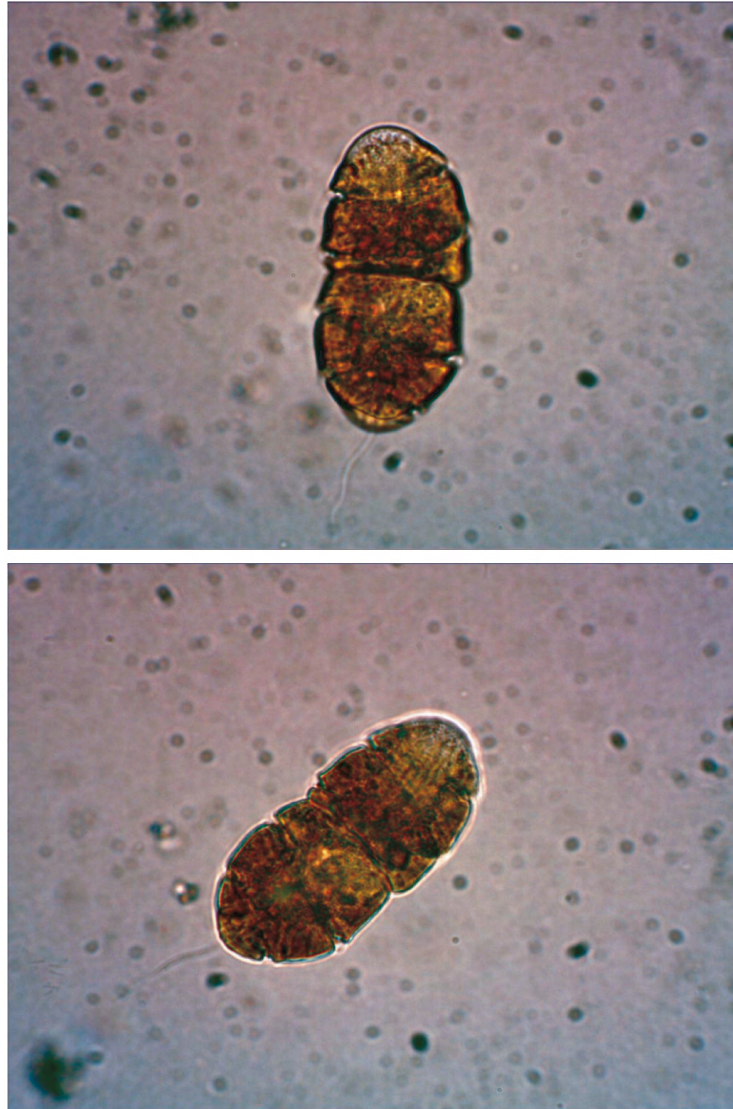


Fig. 5. *Cochlodinium polykrikoides*, especie ictiotóxica (Foto: L. J. Fernández Herrera)

Dada la asociación del aumento de los FAN con los aportes de nutrientes de origen humano se ha sugerido que se reduzcan como una acción preventiva. De esta forma, se ha logrado disminuir la cantidad y dispersión de compuestos nitrogenados y de fósforo provenientes de actividades humanas, con ello se redujo el número de FAN (Hodgkiss y Ho, 1997). De igual forma, se ha recomendado que se asegure el buen funcionamiento de las plantas de tratamiento de aguas residuales, se tenga una eficaz regulación de vertimiento de éstas aguas (GEOHAB, 2006) y la aplicación de técnicas innovadoras como los surfactantes y coagulantes artificiales los cuales químicamente atrapan compuestos orgánicos, metales pesados y traza como el hierro (Fe^{+3}), Cromo (Cr^{+3}),

Zinc (Zn^{+2}) y Níquel (Ni^{+3}), así como también algunas arcillas, para limpiar las aguas de deshecho, como otra forma de prevenir estos eventos (Ono *et al.*, 1998, Anderson, 2009)

La agricultura como una actividad altamente demandante de fertilizantes y plaguicidas, los cuales después de ser aplicados, sus excesos son transportados por ríos y agua de lluvia y depositados en lagunas de agua dulce, estuarios, bahías, lagunas costeras y en aguas costeras de mar abierto, favoreciendo el desarrollo del fenómeno FAN por lo que su regulación es imprescindible para limitar el aumento de compuestos orgánicos e inorgánicos y prevenir la alteración de las poblaciones de fitoplancton y especies que forman FAN. Finalmente, la regulación más estricta del vertimiento del agua de los contenedores que traen los barcos que se desplazan a diferentes continentes y que sirve para mantenerlos en equilibrio, conocidas como aguas de lastre y el traslado de productos para la acuicultura puede contribuir también en la prevención de los FAN.

Una estrategia preventiva cuando se utilizan jaulas o encierros para cultivo y engorda de peces, es hacer un plan de movilidad de estas unidades de cultivo para evitar el contacto con los FAN, el cual implica moverlas hacia abajo de la columna de agua o también desplazándolas de manera horizontal a otra área sin FAN.

Estas estrategias son practicadas durante las contingencias por florecimientos en la zona de maricultura en Japón, Corea y México. El conocimiento de la batimetría y dinámica de la zona es parte fundamental de estas estrategias para elegir sitios fuera del ámbito del FAN, de preferencia en mar abierto. En Baja California un florecimiento de *Ceratium furca* ocasionó la muerte masiva de atún aleta azul (*Thunnus orientalis*) de granjas atuneras ubicadas a 15 millas de la Bahía de Todos Santos, Ensenada B.C. con pérdidas de 12-15 millones de dólares (Orellana-Zepeda *et al.*, 2004).

La segunda estrategia se refiere al control del FAN e involucra métodos químicos, biológicos y físicos.

Control químico

En la década de los años cincuenta el sulfato de cobre fue utilizado a lo largo de las costas de Florida para combatir al dinoflagelado toxico *Karenia brevis*. Sin embargo, no sólo resulto altamente nocivo para el dinoflagelado, sino para otras especies pelágicas y bentónicas, por lo que su uso fue suspendido. Recientemente el peróxido de hidrogeno, radicales hidróxido, hidróxido de magnesio, ozono, desinfectantes, alguicidas y otros derivados biológicos como el quitosán, aponinas, soforolipidos, compuestos de cisteína, ácido octadecatetraenoico, fibras de cebada (Terlizzi *et al.*, 2002, Honjo *et al.*, 2004) han sido aplicados, sin embargo el gran problema es de que no son selectivos; además de tener un alto costo de fabricación y de dispersión, lo cual los colocan como inviables para el control de FAN en agua dulce y marina.

Control Físico

Se han probado diversos métodos para el control físico, principalmente en Japón, como ultrasonido, burbujeo de la columna de agua, recolecta mecánica de algas en la capa superficial del mar, electrolización del agua de mar, entre otras (Jeong *et al.*, 2002, Honjo *et al.*, 2004). Sin embargo en el ambiente estos métodos son inviables. Finalmente las arcillas por su naturaleza física y química, actualmente representan una alternativa potencial para el control de los FAN por su aparente bajo impacto en el ecosistema (Sengco y Anderson, 2004).

Las arcillas son partículas inorgánicas de $< 2 \mu\text{m}$, por su composición química y estructural se define como un mineral hidro-aluminosilicato que contienen hierro y elementos alcalis terrígenos, formando capas en estructuras cristalinas. Variación en el número, composición y arreglos de esas capas producen tipos muy variados de arcillas, algunos tienen la cualidad de flocular y acelerar el hundimiento de las algas productoras de FAN (Sengco *et al.*, 2001; Archambault *et al.*, 2003, Pan *et al.*, 2006).

Tabla 1. Uso de arcillas y otras sustancias en diferentes partes del mundo para controlar los florecimientos algales

Pais	Especie objeto	Arcilla	T. carga	Referencias
Japón	<i>Cochlodinium</i> sp. <i>Chattonella</i> spp. <i>Prorocentrum sigmoides</i>	Montmorilonita	1.3-400 g/m ²	Maruyama <i>et al.</i> , 1987; Shirota, 1989
China	<i>Noctiluca scintillans</i> <i>Prorocentrum minimum</i> <i>Microcystis aeruginosa</i>	Montmorilonita, bentonita, kaolinita, sepiolita arcillas locales cloruro de polialuminio		Yu, Zou y Ma, 1994; Pan <i>et al.</i> , 2006
Sur Korea	<i>Cochlodinium polykrioides</i> <i>A. tamarense</i> , <i>Scrippsiella trocoidea</i>	Arcilla amarillenta	400 g/m ² 10 g l ⁻¹	Na, Choi y Chu, 1996; Sun y Choi, 2004
USA	<i>Karenia brevis</i> <i>Aureococcus anophagefferens</i> <i>Pfiesteria piscicida</i> <i>Heterosigma akasbivo</i> <i>Alexandrium tamarense</i> <i>Heterocapsa triquetra</i>	Bentonita, arcilla fosfática, Kaolinita, cloruro de polialuminio Arcillas locales	0.10-4.0 g l ⁻¹	Sengco <i>et al.</i> , 2001; Sengco, 2001; Yu <i>et al.</i> , 2004 ; Beaulieu <i>et al.</i> , 2005
Suecia	<i>Prymnesium parvum</i>	Arcilla fosfática Bentonita, illita, kaolinita, Cloruro de polialuminio	0.10-4.0 g l ⁻¹	Hagstrom y Graneli, 2005; Sengco <i>et al.</i> , 2005
Australia	<i>Microcystis aeruginosa</i>	Phoslock		Atkins <i>et al.</i> , 2001
Canada	<i>Heterocapsa triquetra</i>	Arcilla fosfática	0.25 g l ⁻¹	Archambault <i>et al.</i> , 2003
Otros materiales				
USA	<i>Gymnodinium breve</i> <i>G. sanguineum</i> , <i>G. galatheanum</i> <i>H. triquetra</i> , <i>H. pygmea</i>	Sulfato de cobre Extracto de cebada	?? 9 ml	Rounsefell y Evans, 1958; Terlizzi <i>et al.</i> , 2002
Sur Korea	<i>G. impudicum</i> , <i>C. polykrykoides</i> , <i>A. affine</i> , <i>P. micans</i> , <i>G. catenatum</i> , <i>Akasbivo sanguinea</i> , <i>Lingulodinium polyedra</i> , <i>Skeletolema costatum</i> , <i>Thalassiosira rotula</i>	Hypoclorito de sodio (NaOCl)	0.10-10 ppm	Jeong <i>et al.</i> , 2002
China	Cianobacterias <i>Microcystis aeruginosa</i>	Chitosan-Kaolinita Chitosan-Sepiolita	1 mg chitosan y 10 mg arcilla	Pan <i>et al.</i> , I 2006; Zou <i>et al.</i> , 2006
India	Chlorella, Oscillatoria, Spirulina, Synechocystis	Chitosan	1.5-15 mg l ⁻¹	Divakaran y Pillai, 2002

Se ha demostrado que cuando se adhieren a las células de fitoplancton, los iones metálicos de las partículas de arcilla causan encogimiento y su ruptura por un desequilibrio iónico en su pared celular formándose partículas (arcilla-células) denominadas floculos, los cuales se hunden en el fondo marino; su impacto en el ecosistema

bentonico ha sido poco estudiado, por lo que no es completamente conocido el destino de las toxinas y se requiere más investigación al respecto.

Estas partículas de origen terrígeno fueron inicialmente usadas en Japón desde 1970, en el Mar de Yachishiro, su efectividad fue confirmada en 1979 sobre un florecimiento de *Cochlodinium* sp. Posteriormente se aplicó a un FAN de *Cochlodinium polykrikoides*, *Chattonella marina* y *karenia mikimotoi*. En Corea es común usar las arcillas para el control de *C. polykrikoides*, un dinoflagelado que afecta los cultivos de peces. La arcilla montmorillonita y arcilla amarilla es de las más eficientes y frecuentemente usada en los países asiáticos (Fig. 6). También otros autores probaron diferentes tipos de surfactantes demostrando, en el laboratorio, una alta eficiencia en la remoción de especies formadoras de FAN (Wu *et al.*, 2010)

En condiciones experimentales se demostró que los dinoflagelados *Karenia brevis* y *Heterocapsa triquetra* fueron floculados y sedimentados eficientemente aplicando la arcilla fosfática comercialmente conocida como IMC-P, a una concentración de 0.25 g L^{-1} y un flujo de agua bajo $< 2 \text{ cm s}^{-1}$ (Archambault *et al.*, 2003) aunque estos autores demostraron los efectos nocivos de los agregados arcilla-*H. triquetra* en las branquias de algunos bivalvos, sugiriendo realizar nuevas investigaciones acerca de los efectos en la fauna bentónica y los procesos de dispersión en los sedimentos. Sengco *et al.*, 2001 recomienda evaluar la aportación de fosfatos, los cuales en ecosistemas de agua dulce regulan el crecimiento del fitoplancton, aunque también algunas especies como *C. polykrikoides* se le ha vinculado con aguas ricas en ortofosfatos (Gárate-Lizárraga *et al.*, 2004, López-Cortés *et al.*, 2014).

El control de la Chrysoficea *Aureococcus anophagefferens* bajo condiciones experimentales se logró aplicando kaolinita (Yu *et al.*, 2004). La combinación de otros compuestos con arcillas también ha sido probada a nivel experimental, como es el caso de la bentonita combinada con cloruro de poli-aluminio, en donde la eficiencia de floculación para controlar a la Haptophyceae *Prymnesium parvum* ha sido entre un 80 y 100 % (Sengco *et al.*, 2005). El uso del polisacárido natural no tóxico conocido como quitosán el cual mezclado con algunas arcillas como la sepiolita, han demostrado tener un alto poder de floculación principalmente en florecimientos de la cianobacterias en lagos y estanques (Pan *et al.*, 2006). También se ha demostrado que algunas especies son removidas más eficientemente que otras y que su tasa de remoción depende de la clase y concentración de arcilla, características de la especie y su abundancia celular. (ver tabla 1).

Control Biológico

A nivel experimental se ha sugerido el uso de los copépodos y ciliados que se alimentan de dinoflagelados. Por ejemplo Palomares-García *et al.* (2006) alimentaron al copépodo *Acartia clausi* con células de *G. catenatum*, una especie productora de toxinas paralizantes, estos autores no encontraron efectos adversos y la producción de huevos del copépodo fue mayor y sugieren que probablemente tiene un papel relevante en el control de mareas rojas. Sin embargo la limitación en la producción masiva y frecuente de ciliados y copépodos para control biológico es inoperantes. Kim *et al.* (2006) mencionan que bacterias, virus y parásitos son más prometedores para el control de FAN, debido a que son específicos de ciertas especies de dinoflagelados, por ejemplo metabolitos producidos por algunas bacterias son eficaces contra el dinoflagelado *K. brevis*, las rafidoficeas *Chattonella antiqua* y *Heterosigma akashimo*.

Mitigación

La mitigación tiene como objetivo aminorar el impacto de florecimientos nocivos o tóxicos en la salud pública, los recursos naturales y economía de la zona. Así, en algunos países existe una legislación que regula las cantidades máximas permisibles de compuestos tóxicos en los productos provenientes de las zonas acuícolas marinas o dulceacuícolas. Además existen programas de monitoreo continuo en zonas donde frecuentemente se presentan los FAN y en el caso de México en los Estados que cuenten con recursos hídricos y marítimos. Sin embargo, las autoridades necesitan conocer datos confiables de la magnitud del FAN, las toxinas involucradas, la concentración en el medio y los organismos involucrados. Esto se logra a través de sobre-vuelos con aeroplanos, uso de imágenes obtenidas con sensores remotos satelitales, además de los análisis de muestras con microscopio para identificar adecuadamente a la especie, un aspectos fundamental son los análisis químicos o biológicos, con modelos animales para la determinación de la cantidad y tipo de toxinas.

La detección temprana de compuestos tóxicos y posteriormente la especie que los produce como medida preventiva, permite alertar a los sectores pesquero, acuícola y de salud pública sobre una inminente proliferación masiva lo que les permitirá tomar acciones de mitigación, como la reducción de la cosecha de moluscos, mantener en cuarentena a productos probablemente contaminados. Una estrategia clave para mitigar daños a la población humana es la divulgación constante acerca de los eventos FAN a través de diferentes medios de comunicación masiva orientada a la población potencialmente consumidora de peces y moluscos.

El uso de especies centinelas principalmente de moluscos bivalvos filtro-alimentadores es recomendable para la detección temprana de biotoxinas, sin embargo por su capacidad de depuración, de cambiar por su actividad metabólica la estructura de compuestos tóxicos, se recomienda el uso de resinas sintética poliestireno-divinilbenceno como centinela artificial (Mackenzie *et al.*, 2004), las cuales adsorben compuestos tóxicos disueltos en el agua dulce o marina en cantidades pequeñas (pico-gramos, nano-gramos) como las toxinas lipofílicas, hidrofílicas y cianotoxinas provenientes de especies de fitoplancton (Lane *et al.* 2010; Wood *et al.*, 2013).

Discusión

Los eventos de florecimientos algales nocivos y tóxicos están aumentando en el mundo incluyendo a México. Las especies toxicas que impactan los ecosistemas acuáticos, las granjas de producción acuícola y pesquera, así como la salud animal y humana, han propiciado que las investigaciones se enfoquen en estos organismos. Actualmente hay controversia por el uso de arcillas, y se argumenta que su aplicación requiere mayor investigación de campo y laboratorio para evaluar los impactos en organismos bénticos.

La caracterización de las toxinas provenientes de microalgas y cianobacterias, así como su detección principalmente en moluscos bivalvos, ha permitido tomar medidas precautorias como las vedas sanitarias y cuarentena para garantizar la inocuidad de alimentos de origen marino. Por lo que la prevención, control y mitigación son fundamentales para el manejo de estos eventos.

Como parte del monitoreo, los bivalvos filtro-alimentadores se utilizan rutinariamente para evaluar la presencia de organismos tóxicos, sin embargo debido a la interferencia en los resultado por su actividad metabólica en la depuración y transformación de toxinas, se ha sugerido el uso de resinas sintéticas llamadas SPATT (por

sus siglas en inglés, Solid Phase Adsorption Toxin Tracking) las cuales son inocuas para los organismos y son capaces de atrapar pequeñas cantidades de compuestos tóxicos disueltos en el agua de mar y dar señales de la presencia prematura de organismos tóxicos, por lo tanto su implementación durante los monitoreo es relevante.

Consideraciones finales

Es necesario abordar la interacción de las especies formadoras de FAN con el ambiente natural, para definir las condiciones que generan y mantienen estas poblaciones. Un monitoreo sistemático donde se detecten recurrentes FAN de especies nocivas debe ser implementado para explicar su aparición y tomar medidas preventivas para mitigar su presencia y evitar impactos negativos en la economía y la salud humana.

Los estudios experimentales con diferentes especies de dinoflagelados, diatomeas y rafidofíceas que forman FAN, son fundamentales para conocer el ciclo biológico de las especies y explicar su probable presencia en condiciones naturales. Se ha simulado por ejemplo condiciones de temperatura y nutrientes óptimas y no óptimas para el crecimiento de ciertas especies, demostrando cambios en su fisiología principalmente en su crecimiento y formación de toxinas. Profundizar los estudios de laboratorio de especies potencialmente tóxicas de cada región permitirá conocer más acerca de su biología y su respuesta a probables cambios ambientales.

Derivado de eventos FAN que han tenido impacto en la salud pública, en el ecosistema y en diversas actividades productivas en las costas del Pacífico Mexicano, en el CIBNOR (Programa de Planeación ambiental y Conservación) y el Centro Interdisciplinario de Ciencias del Mar del Instituto Politécnico Nacional -CICIMAR-IPN, han venido realizando investigaciones de estos eventos, trabajando con un amplio espectro de toxinas como las paralizantes, brevetoxinas, ciguatoxinas, toxinas diarreicas (ácido okadaico y análogos), amnésicas (ácido domoico y análogos); cianotoxinas como microcistinas, entre otras, realizando su detección por medio de bioensayos en ratón, pruebas bioquímicas, técnicas cromatográficas y espectrométricas así como evaluando su efecto en diversos modelos acuáticos y terrestres a distintos niveles (celular, histopatológico, bioquímico, inmunológico). Sin embargo aún es incipiente la infraestructura analítica, personal especializado y la integración de esfuerzos ante la presencia de eventos FAN y la aparición de nuevas toxinas, que están teniendo un impacto en la salud pública y animal así como en actividades productivas tales como la acuicultura, las pesquerías, vida silvestre e incluso el turismo. El uso potencial biotecnológico y la búsqueda de nuevos fármacos a partir de las toxinas marinas debe ser prioridad en la investigación de los FAN también para lo cual se requiere un nuevo enfoque integral de investigación multidisciplinaria.

Agradecimientos

Al Programa de Planeación Ambiental y Conservación del CIBNOR, proyecto PC 0.12, PC 0.11. A los árbitros por sus atinadas sugerencias. Los Autores agradecemos al Lic. Gerardo Hernández el diseño gráfico editorial y a la Ms.C. Diana Dorantes la revisión del Idioma Inglés del Abstract.

Bibliografía

Alonso-Rodríguez, R., F. Páez-Osuna, 2003. *Nutrients, phytoplankton and harmful algal blooms in shrimp: a review with special reference to situation in the Gulf of California*. *Aquaculture* 219: 317-336.



- Anderson, D.M. 2009. *Approaches to monitoring, control and management of harmful algal blooms (HABs)*. Ocean and Coastal Management 52: 342-347.
- Anderson D.M., A.D. Cembella y G.M. Hallegraeff. *Progress in Understanding Harmful Algal Blooms: Paradigm Shifts and New Technologies for Research, Monitoring, and Management*. Annual Review of Marine Science 4: 143-76.
- Archambault, M.C., J. Grant, V.M. Bricelj. 2003. *Removal efficiency of the dinoflagellate *Heterocapsa triquetra* by phosphatic clay, and implications for the mitigation of harmful algal blooms*. Marine Ecology Progress Series 253: 97-109
- Atkins, R., T. Rose, R.S. Brown, M. Robb. 2001. *The *Microcystis cyanobacteria* bloom in the Swan River- February 2000*. Water Science Technology 43 (9): 107-114.
- Band-Schmidt, C.J. A. Martínez-López y I. Gárate-Lizárraga. 2005. *First record of *Chattonella marina* in Bahía de La Paz, Gulf of California*. Harmful Algae News 28: 6-7.
- Beaulieu, S.E., M.R. Sengco, D.M. Anderson. 2005. *Using clay to control harmful algal blooms: Deposition and resuspension of clay/ algal flocs*. Harmful Algae 4: 123-138.
- Cortés-Altamirano, R. D.U. Hernández-Becerril, y R. Luna-Soria. 1995. *Mareas rojas en México, una revisión*. Revista Latinoamericana de Microbiología 37: 343-352.
- Divakaran, R., y V.N. Sivasankara-Pillai. 2002. *Flocculation of algae using chitosan*. Journal of Applied Phycology 14: 419-422.
- FAO. 2005. *Food and Nutrition: Marine Biotoxins*. Food and Agricultural Organization of the United Nation, Rome, Italy: 80: 97-135.
- Gárate-Lizárraga, I., M.L. Hernández-Orozco, C.J. Band-Schmidt, G. Serrano-Casillas. 2001. *Red tides along the coasts of Baja California Sur, México (1984 to 2001)*. Océanides 16 (2): 113-120.
- Gárate-Lizárraga, I., D.A. Siqueiros-Beltrones y V. Maldonado-López. 2003. *First Record of a *Rhizosolenia debyana* Bloom in the Gulf of California, México*. Pacific Science 57(2): 141-145.
- Gárate-Lizárraga, I., D.J. López-Cortés, J.J. Bustillos-Guzmán y F. E Hernández-Sandoval. 2004. *Blooms of *Cochlodinium polykrikoides* (Gymnodiniaceae) in the Gulf of California, Mexico*. Revista de Biología Tropical 52 (Suppl. 1): 51-58.
- Gárate-Lizárraga, I. y R. González-Armas. 2011. *Occurrence of *Pyrodinium bahamense* var. *compresum* along the southern coast of the Baja California Peninsula*. Marine Pollution Bulletin 62: 626-630.
- GEOHAB, 2006. *Global Ecology and Oceanography of Harmful Algal Blooms, Harmful Algal Blooms in Eutrophic Systems*. P. Glibert (ed.). IOC and SCOR, París and Baltimore, 74 pp.
- Glibert, P.M., D.M. Anderson, P. Gentin, E. Granéli y K.G. Sellner. 2005. *The global complex phenomena of harmful algal blooms*. Oceanography 18 (2): 137-209.
- Guluarte-Castro, A.L. y M.A. Bañuelos. 2007. *Florecimiento de algas nocivas (Marea roja) en la Bahía de La Paz, Baja California Sur*. Red Sanitaria 3: 1-4.
- Hagström, J.A., y E. Granéli. 2005. *Removal of *Prymnesium parvum* (Haptophyceae) cells under different nutrient condition by clay*. Harmful Algae 4: 249-260.
- Hallegraeff, G.M., 1993. *A review of harmful algal blooms and their apparent global increase*. Phycologia 32 (2): 79-99.
- Heredia-Tapia, A., B.O. Arredondo-Vega, E.J. Núñez-Vázquez, T. Yasumoto, M. Yasuda, y J.L. Ochoa. 2002.

- Isolation of Prorocentrum lima (Syn. Exuviaella lima) and diarrhetic shellfish poisoning (DSP) risk assessment in the Gulf of California, Mexico.* Toxicon 40: 1121-1127.
- Hodgkiss, I.J. y C. Ho. 1997. *Are changes in N:P ratios in coastal waters the key to increased red tide bloom?* Hidrobiologia 352: 141-147.
- Honjo, T., N. Imada, Y. Anraku, D-II. Kim, M. Muramatsu, y Y. Oshima. 2004. *Removal of Harmful Red Tide Plankton by Ozone Treatment.* pp. 525-527, En: Steidinger, K.A., J.H. Landsberg, C.R. Tomas, y G.A. Vargo (Eds.). Harmful Algae 2002. Florida and Wildlife Conservation Commission, Florida of Oceanography, and Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, París, Francia. Jeong, H.J, H.R. Kim, K.I. Kim et al., 2002. *NaOCl produced by electrolysis of natural seawater as a potential method to control marine red-tide dinoflagellates.* Phycologia 41 (6): 643-656.
- Lane, Q.J., C. Melling Roddam, G. W. Langlois, y R.M. Kudela. 2010. *Application of Solid Phase Adsorption Toxin Tracking (SPATT) for field detection of the hydrophilic phycotoxins domoic acid and saxitoxin in coastal California.* Limnology and Oceanography: Methods 8: 645-660
- López-Cortés, D.J., J.J. Bustillos Guzmán y I. Garate Lizárraga. 2006. *Inusual mortality of krill (Crustacea: Euphausiacea) in Bahía de La Paz, Gulf of California.* Pacific Science 60: 233-240.
- López-Cortés, D.J., I. Gárate-Lizárraga, C.J. Band-Schmidt, J.J. Bustillos-Guzmán, F.E. Hernández-Sandoval y E.J. Núñez-Vázquez. 2011. *Condiciones hidrográficas durante la presencia de Rafidofíceas en la Bahía de La Paz, Golfo de California.* Hidrobiológica 21 (2): 185-195
- López-Cortés, D.J., C. J. Band-Schmidt, J. J. Bustillos-Guzmán, F. E. Hernández-Sandoval, A. Flores Mendoza y E. J. Núñez-Vázquez. 2014. *Condiciones ambientales durante un florecimiento de Cochlodinium polykrikoides (Gymnodiniales, Dinophyceae) en la Ensenada de La Paz, Golfo de California.* Revista de Biología Marina y Oceanografía 49 (1): 97-110.
- López-Cortés, D. J., E.J. Núñez-Vázquez, C.J. Band-Schmidt, I. Gárate-Lizárraga, F.E. Hernández-Sandoval, y J.J. Bustillos-Guzmán, 2015. *Mass fish die-off during a diatom bloom in the Bahía de La Paz, Gulf of California.* Hidrobiológica 25 (1): 39-48.
- Maruyama, T., R. Yamada, K. Usui, H. Suzuchi y T. Yoshida. 1987. *Removal of marine red tide plankton with acids treated clay.* Nippon Suisan Gakkaishi/Bulletin Japan Society of Science Fisheries 53 (10): 1811-1819.
- Na, G., W. Choi, Y. Chun. 1996. *A study on red tide control with Loess suspension.* Journal Aquaculture 9: 239-245.
- Núñez-Vázquez, E.J. I. Gárate-Lizárraga, C. J. Band-Schmidt, A. Cordero-Tapia. D. J. López-Cortés, F. E. Hernández-Sandoval, A. Heredia-Tapia, y J.J. Bustillos-Guzmán, 2011. *Impact of harmful algal blooms on wild and cultured animals in the Gulf of California.* Journal Environmental Biology 32 (1/2): 413-423.
- Okolodokov, Y.B., I. Gárate-Lizárraga. 2006. *An annotated checklist of dinoflagellates (Dinophyceae) from the Mexican Pacific.* Acta Botánica Mexicana 72: 1-154
- Orellana-Cepeda, E., C. Granados-Machuca, y J. Serrano-Esquer. *Ceratium furca: One Possible Cause of Mass Mortality of Cultured Blue-Fin Tuna at Baja California, Mexico.* 2004 pp.514-516, En: Steidinger, K.A., J.H. Landsberg, C.R. Tomas, y G.A. Vargo (Eds.). Harmful Algae 2002, Florida Fish and Wildlife Conservation Commission, Florida Institute of Oceanography, and Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, Paris, Francia



- Ono, K., Y. Onoue, S. Matsumoto, H. Shihara, K. Takeda, M. Nakanishi, T. Yamaji, K. Uemura, y Y. Ogawa. 1998. *Synthetic surfactants for protecting cultured fish against toxic phytoplankton*. Aquaculture Research 29: 569-572.
- Pan, G., M.M. Zhang, H. Chen, H. Zou, H. Yan. 2006. *Removal of cyanobacterial bloom in Taihu Lake using local soil. I. Equilibrium and kinetic screening on the flocculation of Microcystis aeruginosa using commercially available clays and minerals*. Environmental Pollution 141: 195-200.
- Palomares-García, R., J. Bustillos Guzmán, C. J. Band-Schmidt, D. J. López-Cortés, B. Luckas. 2006. *Efecto del dinoflagelado tóxico Gymnodinium catenatum sobre el consumo, la producción de huevos y la tasa de eclosión del copépodo Acartia clausi*. Ciencias Marinas 32(1B): 111-119
- Park, T.G., W.Ae. Lim, Y.T.Park, C.K. Lee, H.J. Jeong. 2013. *Economic impact, management and mitigation of tides in Korea*. Harmful Algae 30: 131-143.
- Sengco, R.M., A. Li, K. Tugend, D. Kulis, D.M. Anderson. 2001. *Removal of red- and brown- tide cells using clay flocculation. I. Laboratory culture experiments with Gymnodinium breve and Aureococcus anophagefferens*. Marine Ecology Progress Series 210: 41-53
- Sengco, R.M., y D.M. Anderson. 2004. *Controlling Harmful Algal Blooms through clay flocculation*. Journal Eukaryotic Microbiology 51(2): 169-172
- Sengco, R.M., J.A. Hagström, E. Graneli, D.M. Anderson. 2005. *Removal of Prymnesium parvum (Haptophyceae) and its toxins using clay minerals*. Harmful Algae 4: 261-274.
- Shirota, A. 1989. *Red tide problem and countermeasures (1)* International Journal of Aquaculture and Fisheries Technology 1: 25-38.
- Sun, X.X., y J.K. Choi. 2004. *Recovery and fate of three species of marine dinoflagellates after yellow clay flocculation*. Hidrobiologia 519: 153-165.
- Terlizzi, D.E., M.D. Ferrier, E.A. Armbruster y K.A. Anlauf. 2002. *Inhibition of dinoflagellate growth by extracts of barley straw (Hordeum vulgare)*. Journal Applied Phycology 14: 275-280.
- Wood, S.A., P.T. Holland, L. MacKenzie. 2011. *Development of solid phase adsorption toxin tracking (SPATT) for monitoring anatoxin-a and homoanatoxin-a in river water*. Chemosphere 82: 888-894.
- Wu, T., X. Yan, X.Cai, S.Tan, H.Li, J.Liu, W. Yang. 2010. *Removal of Chattonella marina with clay mineral modified with a Gemini surfactant*. Applied Clay Science 50: 604-607
- Yu, Z., J. Zou, y X. Ma. 1994. *Application of clay to removal of red organisms-II. Application of clay to removal of red tide organisms-II. Coagulation of different species of red tide organism with montmorillonite and effects of clay pretraetament*. Journal Chine Oceanology and Limnology 12 (4): 316-324.
- Yu, Z, M.R., Sengco and D.M. Anderson. 2004. *Flocculation and removal of the brown tide organism, Aureococcus anophagefferens (Chrysophyceae), using clays*. Journal of Applied Phycology 16: 101-110
- Zou, H., G. Pan, H. Chen, X. Yuan. 2006. *Removal of cyanobacterial blooms in Taihu Lake using local soil. II. Effective removal of Microcystis aeruginosa using local soil and sediments modified by chitosan*. Environmental Pollution 141:201-205

Cita de este artículo

López Cortés, D., J. J. Bustillos Guzmán *, F. E. Hernández Sandoval, S. Chávez López, C. J. Band Schmidt y E., J. Núñez Vázquez. 2015. **Florecimientos algales nocivos: prevención, control y mitigación.** Recursos Naturales y Sociedad, Vol. 1 (35-49): DOI:10.18846/RENAYSOC.2015.01.01.01.0004

Sometido: 15 de septiembre de 2015

Revisado: 22 de octubre de 2015

Aceptado: 01 de diciembre de 2015

Editor asociado: Dr. Alfredo Ortega Rubio

Idioma Inglés Abstract: Ms.C. Diana Dorantes

Diseño gráfico editorial: Lic. Gerardo Hernández