



Vista panorámica del lago de Rincón del Bonete. Observatorio del agua en Uruguay (1/05/2018).  
Foto: Gonzalo Useta

# CIANOBACTERIAS: un desafío para la sostenibilidad de los sistemas de producción en aguas continentales

Dra. MSc María Teresa Federici<sup>1</sup>  
Dra. María Vallejos<sup>2</sup>  
Ing. Agr. PhD Pablo Rovira<sup>3</sup>,  
Ing. Agr. PhD Verónica Ciganda<sup>2</sup>  
Bioq. MSc Natalia Rigamonti<sup>4</sup>  
Biol. MSc Graciela Ferrari<sup>4</sup>

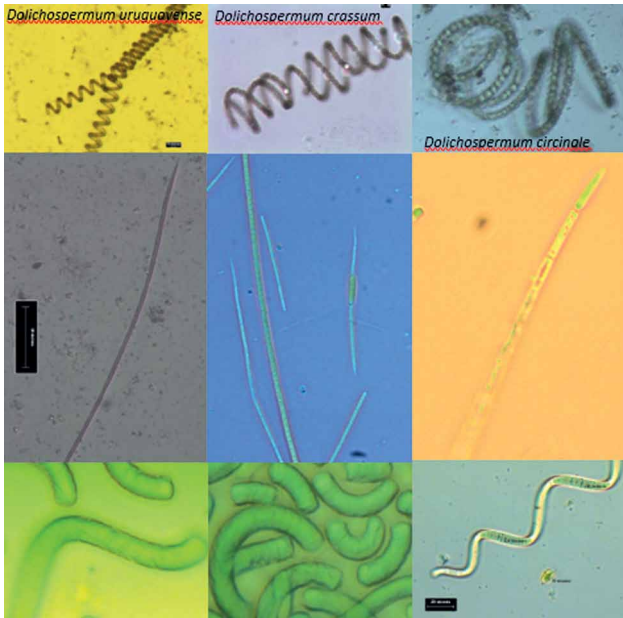
<sup>1</sup>Unidad de Biotecnología - INIA Las Brujas  
<sup>2</sup>INIA La Estanzuela  
<sup>3</sup>INIA Treinta y Tres  
<sup>4</sup>Departamento de Aguas y Evaluación Ambiental  
Laboratorio Tecnológico del Uruguay - LATU

En las últimas décadas el aumento de nutrientes provenientes de la escorrentía, junto al aumento de temperatura a nivel mundial, han favorecido la formación de floraciones de cianobacterias en los ambientes acuáticos. En el marco de un proyecto interinstitucional, INIA se plantea abordar el tema de las floraciones y la sostenibilidad de los sistemas de producción agropecuaria sobre aguas continentales en el embalse Rincón del Bonete, el cual recibe nutrientes provenientes de distintas actividades agropecuarias, principalmente la ganadería y la agricultura.

## CIANOBACTERIAS

Las cianobacterias son un grupo muy particular de organismos procariontes que poseen clorofila-a y llevan a cabo la fotosíntesis. Poseen además ficobilinas, un pigmento accesorio que solo se encuentran en las cianobacterias y les da el color típico verde azulado. Algunas especies son capaces de fijar el nitrógeno al agua gracias a células diferenciadas.

Son los organismos fotosintetizadores aeróbicos más antiguos del planeta ya que se originaron en el período Precámbrico hace unos 2700 millones de años y han sido los responsables de crear la atmósfera oxigénica que conocemos. La mayor parte de las especies son de vida libre y se encuentran principalmente en ecosistemas acuáticos marinos y continentales, si bien pueden también encontrarse en ecosistemas semi- acuáticos o terrestres.



**Figura 2** - Imágenes de especies de floraciones identificadas en Uruguay del Departamento de Aguas y Evaluación Ambiental del LATU. Franja superior- de derecha a izquierda: género *Dolichospermum* (especies *D. uruguayense*, *D. crassum* y *D. circinale*). Franja media- de derecha a izquierda: género *Raphidiopsis* (especie *Cylindrospermopsis*). Franja inferior- género *Arthrospira máxima* (especie *Spirulina platensis*)- cuadro izquierdo y medio: comercial, para alimentación; cuadro derecho: identificada en un lago salobre de Uruguay.

Hasta el presente han colonizado con éxito la mayor parte de los ecosistemas. Algunas especies son altamente tolerantes a condiciones extremas y pueden encontrarse en aguas termales a más de 60°, en lagos hipersalinos y hasta en regiones polares.

**FLORACIONES**

La floraciones de cianobacterias son aumentos abruptos de una población o algunas poblaciones en un período corto de tiempo, que ocurren naturalmente en los cuerpos de agua. Estas se han incrementado en las últimas décadas por la creciente eutrofización o aumento de nutrientes de los ambientes acuáticos, principalmente de nitrógeno y de fósforo, por el ingreso de desechos orgánicos provenientes de la industria o asentamientos humanos y por escorrentía de suelos con fertilizantes.

Las cianobacterias fueron las responsables de la formación de la atmósfera como la conocemos por liberación de O<sub>2</sub> a través de la fotosíntesis.

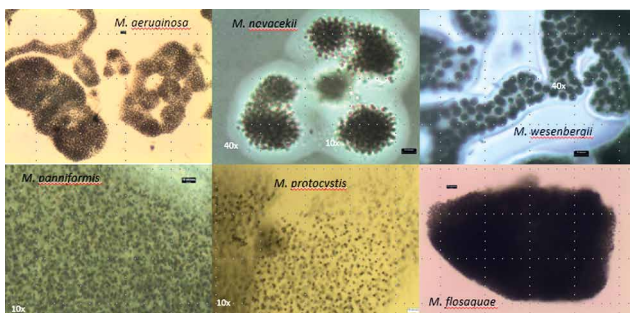
En las últimas décadas el aumento de nutrientes provenientes de los desechos orgánicos de la industria, de asentamientos humanos y de la escorrentía de suelos con fertilizante, junto al aumento de temperatura a nivel mundial, han favorecido la formación de floraciones de cianobacterias en los ambientes acuáticos.

Por otro lado, el cambio climático ha ocasionado un aumento de la temperatura a nivel mundial generando condiciones climáticas favorables a su formación.

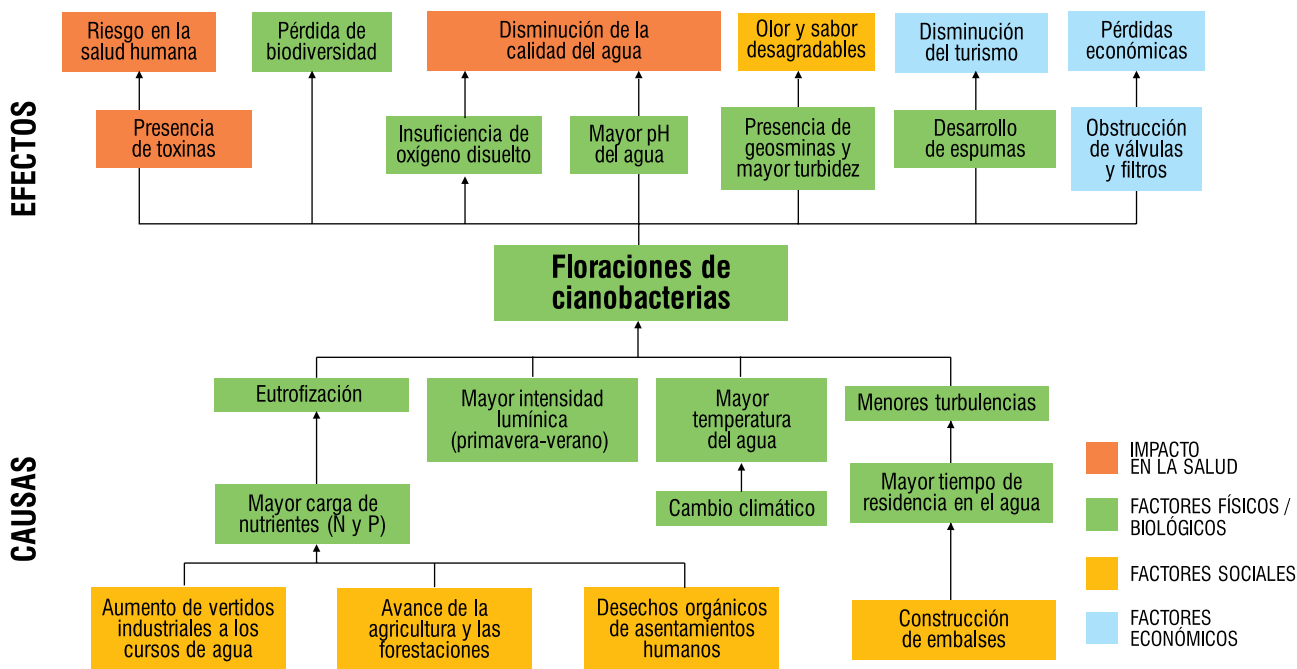
La principal preocupación por estas floraciones es que son capaces de sintetizar una variedad de metabolitos que se conocen con el nombre de cianotoxinas.

Algunos de estos son tóxicos y pueden causar la muerte tanto de animales acuáticos como terrestres; e incluso de seres humanos por la ingesta de alimentos o agua contaminada, o por exposición a cuerpos de agua con cianobacterias durante actividades recreacionales (Rigamonti, 2016).

En Uruguay se registraron floraciones de cianobacterias en el Río de la Plata y aguas continentales hace más de tres décadas, solo en 2018 estas alcanzaron las costas de Rocha. Se han encontrado floraciones tóxicas en el Río Uruguay y en el Río Negro, en los embalses de Salto Grande y del Río Negro, y en lagos y lagunas como Lago Javier, Laguna Blanca, Laguna de Rocha y Laguna de Castillos (Bonilla et al, 2015; Ferrari et al., 2011).



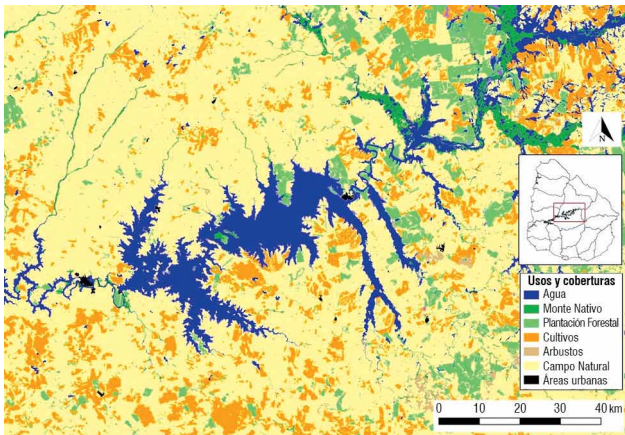
**Figura 3** - Especies del género *Microcystis* en floraciones de Uruguay: *M. aeruginosa*, *M. novacekii*, *M. wesenbergii*, *M. panniformis*, *M. protocystis* y *M. flosaquae*. Imágenes del Departamento de Aguas y Evaluación Ambiental del LATU.



**Figura 4** - Árbol de problemas que representa las causas y efectos de las floraciones de cianobacterias. Cada elemento del árbol- sea causa o efecto- es consecuencia de los elementos que aparecen debajo de él, y a su vez, es causante de los que están por encima.

Toxinas	Compuestos	Modo de acción	Principales géneros
<b>Hepato toxinas</b>			
Microcistinas	Hepatapéptidos cíclicos (más de 80 variantes)	Inhiben las proteínas-fosfatasa hepáticas, induciendo la hiperfosforilación de filamentos del citoesqueleto Daños hepáticos	<i>Microcystis</i> <i>Plankothrix</i> <i>Oscillatoria</i> <i>Anabaena</i> <i>Nostoc</i> <i>Anabaenopsis</i> <i>Aphanocapsa</i>
Nodularia	Pentapéptido cíclico (aprox. 8 variantes)	Similar a la microcistinas	<i>Nodularia</i>
Cylindrospermopsina (algunos autores la clasifican como "citotoxina")	Alcaloide guanidinico cíclico (aprox. 3 variantes)	Inhibe la síntesis proteica Efecto predominantemente hepatolítico Produce severas lesiones necróticas en hígado, riñón, pulmón, bazo e intestino de mamíferos	<i>Cylindrospermopsis</i> <i>Anabaena</i> <i>Aphanizomenon</i> <i>Raphidiopsis</i> <i>Lyngbya</i>
<b>Neuro toxinas</b>			
Saxitoxinas	Alcaloides carbamatos no sulfatados (saxitoxinas), monosulfatados (goniautoxinas) o disulfatados (C-toxinas) (aprox. 20 variantes)	Inhibe la transmisión nerviosa a través del bloqueo de los canales de sodio en las células induciendo parálisis muscular	<i>Anabaena</i> <i>Aphanizomenon</i> <i>Cylindrospermopsis</i> <i>Lyngbya</i> <i>Raphidiopsis</i>
Anatoxina-a/ Homoanatoxina a	Alcaloides (2 variantes)	Bloquea los receptores nicotínicos y colinérgicos postsinápticos neuromusculares Mimetizan la acción de la acetilcolina	<i>Planktothrix</i> <i>Oscillatoria</i> <i>Phormidium</i> <i>Anabaena</i> <i>Aphanizomenon</i> <i>Raphidiopsis</i>
Anatoxina-a (s)	Organofosforado natural	Inhibe la actividad de la acetilcolinesterasa, más tóxica que la anatoxina-a	<i>Anabaena</i>

**Figura 5** - Características de las hepatotoxinas y neurotoxinas producidas por cianobacterias de ambientes acuáticos continentales. Fuente: Bonilla y col. (2009).



**Figura 6** - Embalse Rincón del Bonete. En la figura se muestran los usos y coberturas del suelo (año 2015) elaborados por FAO-DINAMA en base al análisis de imágenes Landsat.



**Figura 7** - Técnicas moleculares utilizadas para el screening de las cianobacterias productoras de las principales toxinas.

## PRINCIPALES TOXINAS, MODO DE ACCIÓN Y GÉNEROS DE CIANOBACTERIAS PRODUCTORAS

Las cianotoxinas son metabolitos secundarios que se encuentran contenidos dentro de las cianobacterias o unidos a ellas y solo un pequeño porcentaje del total se halla disuelto en el agua. Esto último sucede cuando ocurre una lesión en la membrana celular de forma natural por la muerte de las células, por el ataque de los depredadores y patógenos o por tratamiento con alguicidas.

Existen más de 40 especies de cianobacterias que producen cianotoxinas en el mundo. Estas pueden producir varias toxinas simultáneamente, aunque usualmente solo una o dos son dominantes para una cepa específica. En Uruguay las cianobacterias tóxicas encontradas hasta el momento pertenecen a 15 géneros y se han registrado 26 especies de cianobacterias formadoras de floraciones en diversos ecosistemas, en su mayoría de alta toxicidad capaces de producir cilindrospermopsina, saxitoxina y anatoxina-a (Bonilla y col., 2009).

### RINCÓN DEL BONETE: CASO DE ESTUDIO

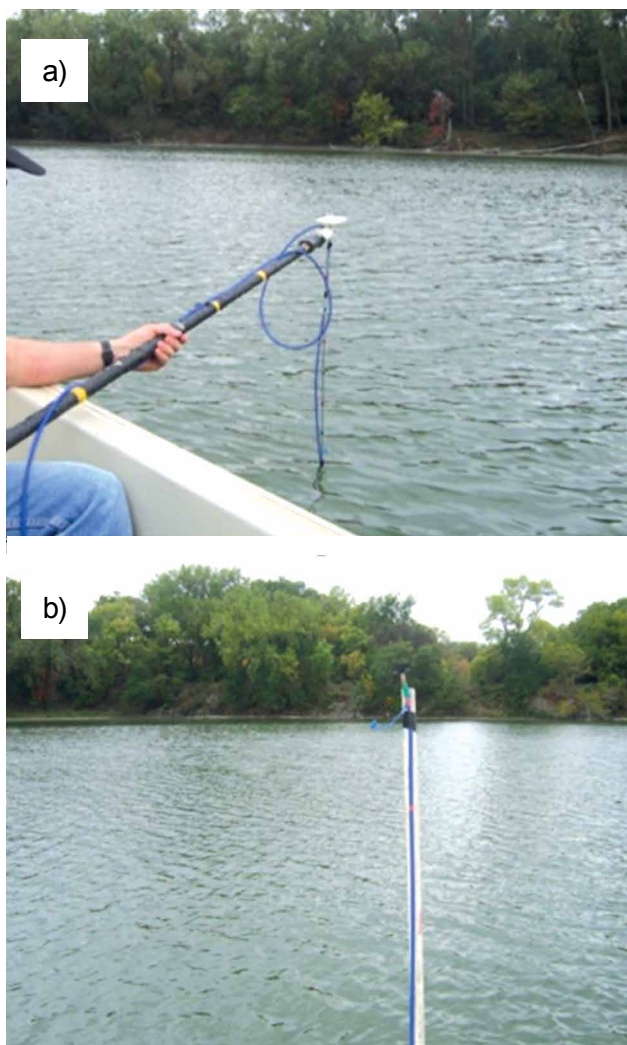
Los embalses son ambientes muy propicios para la formación de floraciones de cianobacterias, especialmente en el período estival por el aumento de la temperatura ya que reciben y acumulan el agua, dispersando luego las cianobacterias aguas abajo.

En el marco de un proyecto interinstitucional, nos hemos planteado abordar el tema de las floraciones y la sostenibilidad de los sistemas de producción agropecuaria sobre aguas continentales en el embalse Rincón del Bonete, que recibe nutrientes provenientes de distintas actividades agropecuarias, principalmente la ganadería y la agricultura.

### TÉCNICAS DE DETECCIÓN Y MONITOREO

Se aplicarán herramientas analíticas y moleculares para el estudio de las comunidades de cianobacterias presentes en muestras de agua y sedimento colectado en la zona de estudio.

Las cianobacterias son capaces de sintetizar una gran variedad de cianotoxinas, algunas de las cuales son tóxicas para animales y seres humanos, pudiendo incluso causar la muerte.



**Figura 8** - Técnica de medición de reflectancia de la luz del agua (a) y de la luz incidente utilizando sensor hiperespectral (b) Esta técnica permitirá calibrar y validar localmente índices espectrales para estimación de cianobacterias.

Se utilizarán técnicas inmunológicas, microscopía óptica y técnicas basadas en PCR para detección de cianotoxinas, identificación de cianobacterias productoras y microorganismos asociados a las floraciones.

Al mismo tiempo, y utilizando los cambios en las propiedades ópticas del agua que genera la presencia de cianobacterias debido a sus pigmentos, también se realizarán mediciones de la reflectancia de la luz *in situ* sobre la superficie del agua utilizando un sensor hiperespectral (Figura 8).

Estas mediciones se realizarán en un amplio rango de concentración de cianobacterias presentes en el agua, con distintos niveles de turbidez, las que generarán información para calibrar y validar los índices espectrales utilizados internacionalmente (e.g. Mishra y Mishra,

Para la generación de medidas de prevención y mitigación del fenómeno de las floraciones de cianobacterias es necesario contar con distintos abordajes y herramientas y generar conocimiento científico a nivel local.

2014; Ogashawara *et al.*, 2013) para estimar en forma remota (e.g. imágenes satelitales) la concentración de cianobacterias (e.g. Page *et al.*, 2018) para las condiciones locales.

En este estudio se espera generar aportes al conocimiento científico local existente en la determinación e identificación de cianobacterias en forma rápida y precisa a través de tecnologías de análisis de la información espectral de los cuerpos de agua y de determinaciones moleculares.

Estos resultados, y su asociación al uso del suelo de la zona de influencia, contribuirán a la definición de estrategias para fortalecer la sostenibilidad de nuestros sistemas de producción agropecuaria para que contribuyan a la prevención y mitigación de floraciones de cianobacterias.

**BIBLIOGRAFÍA**

Bonilla y col. Cianobacterias y cianotoxinas en ecosistemas límnicos de Uruguay. Revista del Laboratorio Tecnológico del Uruguay. INNOTEC 2015, 10 (9-22)- ISSN 1688- 3691-9.

Bonilla y col. Cianobacterias Planctónicas del Uruguay. UNESCO 2009. Manual para identificación y medidas de gestión. Documento Técnico PHI N°16. ISSN 98-9d2-9089-138-3.

Ferrari, G., del Carmen Pérez, M., Dabezies, M., Míguez, D., & Saizar, C. (2011). Planktic Cyanobacteria in the Lower Uruguay River, South America. *Fottea*, 11(1), 225-234. doi: 10.5507/fot.2011.021.

Mishra, S., Mishra, D. (2014) A novel remote sensing algorithm to quantify phycocyanin in cyanobacterial algal blooms. *Environmental Research Letters* 9.

Ogashawara, I., Mishra, D. R., Mishra, S., Curtarelli, M. P., Stech, J. L. (2013) A Performance Review of Reflectance Based Algorithms for Predicting Phycocyanin Concentrations in Inland Waters. *Remote Sensing*, 5, 4774-4798; doi:10.3390/rs5104774.

Page, B.P., Kumar, A., Mishra, D. R. (2018) A novel cross-satellite based assessment of the spatio-temporal development of a cyanobacterial harmful algal bloom. *Int J Appl Earth Obs Geoinformation*, 66 (2018) 69–81.

Rigamonti, N. (2016) Expresión de genes de toxinas de *Cylindrospermopsis raciborskii* en distintas condiciones de disponibilidad de nutrientes. UROU, Uruguay.