

## ***Didymosphenia geminata* (Lyngbye) M. Schmidt (Bacillariophyta), una especie invasora y potencial amenaza para ecosistemas acuáticos bolivianos**

***Didymosphenia geminata* (Lyngbye) M. Schmidt (Bacillariophyta), an invasive species and potential threat to Bolivian aquatic ecosystems**

Eduardo A. Morales, Sinziana F. Rivera, Adriana Veizaga & Roberto Fiorini

Herbario Criptogámico Universidad Católica Boliviana, Carrera de Ingeniería Ambiental, Casilla de Correos 5381, Cochabamba, Bolivia

edu.morales2006@gmail.com

**Resumen:** *Didymosphenia geminata* (Lyngbye) M. Schmidt es un alga unicelular fotosintética que vive en aguas dulces y que causa daños ecológicos considerables mediante crecimientos masivos o floraciones sobre lechos rocosos de ríos y lagos oligotróficos. El alga produce pedúnculos para fijarse a las rocas, los cuales cubren el fondo acuático y persisten aún después de la muerte de las células. Si bien los estudios sobre la autoecología de la especie están aún en desarrollo, los primeros experimentos muestran que las densas matas que se forman durante las floraciones actúan como bombas redox favorecidas por las condiciones de pH y oxígeno disuelto que en ellas se crean, bombas que permiten la adsorción de fósforo y nitrógeno desde la columna de agua a través de un mecanismo peduncular que permite la acumulación sustuosa en forma de corpúsculos polifosfatados a nivel de citoplasma. La adsorción de nutrientes producida en condiciones de alta luminosidad, que favorece altas tasas fotosintéticas, sostiene un mecanismo de reproducción asexual efectivo que permite la exclusión de competidores potenciales y la colonización rápida de grandes extensiones geográficas. La alta capacidad de resistencia a procesos adversos como la desecación, determinan también la rápida dispersión del alga en amplios ámbitos geográficos. El arribo de *D. geminata* a Sudamérica es relativamente reciente y hasta la fecha sólo se ha reportado en Argentina y Chile. Se expone en este trabajo la particular vulnerabilidad de los ecosistemas acuáticos bolivianos y la necesidad de establecer programas de monitoreo y prevención de la diseminación de este organismo perjudicial.

**Palabras clave:** *Didymosphenia geminata*, diatomeas, Bacillariophyta, Sudamérica, Bolivia, invasiones biológicas

**Summary:** *Didymosphenia geminata* (Lyngbye) M. Schmidt is a photosynthetic unicellular alga that lives in freshwater and causes considerable ecological damage through production of massive growths or blooms on rocky beds of rivers and oligotrophic lakes. The alga produces stalks to attach to rocks, which cover the water bed and persist even after the death of the cells. While studies on the autecology of the species are still under development, the first experiments show that the dense mats that form during blooms act as redox pumps favored by the pH and dissolved oxygen conditions created in them; pumps that allow the adsorption of nitrogen and phosphorus from the water column through a stalk mechanism that permits the luxury consumption and accumulation of polyphosphate bodies in the cytoplasm. The adsorption of nutrients produced in high light conditions, which favors high photosynthetic rates, supports an effective asexual reproduction mechanism that allows the exclusion of potential competitors and the rapid colonization of large geographic areas. The high resilience to adverse processes such as drying, also determines the rapid spread of this alga in large geographical areas. The arrival of *D. geminata* is relatively new to South America and to date it has only been reported from Argentina and Chile. In this manuscript, the particular vulnerability of Bolivian aquatic ecosystems and the need of programs for monitoring and prevention of the spreading of this harmful organism are presented.

**Keywords:** *Didymosphenia geminata*, diatoms, Bacillariophyta, South America, Bolivia, biological invasions

## 1 Introducción

Las actividades antropogénicas, principalmente aquellas de los siglos XX y XXI, se han convertido en seria amenaza para la integridad y el funcionamiento natural de los ecosistemas a nivel mundial [41]. Con el incremento del transporte terrestre, aéreo y fluvio-marítimo, se ha facilitado la migración de grupos humanos a prácticamente todos los confines del globo. Asimismo, con la intensificación del comercio internacional, el intercambio de productos elaborados y naturales se ha hecho rápido y efectivo [24][34]. Estos procesos facilitan también el transporte accidental o intencional de varias especies que luego de arribar a un ecosistema foráneo al suyo se adaptan y expanden desplazando rápidamente a las especies nativas. Por tanto, esta dispersión asistida constituye una amenaza seria para la biodiversidad en una determinada región, de la cual pueden extinguirse muchas especies que potencialmente podrían proveer múltiples beneficios ambientales a la misma humanidad [10][28].

Las especies que se dispersan a través de mecanismos asistidos son diversas, desde animales y plantas macroscópicas hasta microorganismos de diversa índole [37]. Una de las especies microscópicas que ha concentrado mayor atención en Europa y Norteamérica es la diatomea *Didymosphenia geminata* (Lyngbye) M. Schmidt un organismo eucarionte, unicelular, fotosintético, dulceacuícola y perteneciente al Reino Chromalveolata, División Bacillariophyta (Figs 1A-D). Esta diatomea crece

adnata al fondo rocoso de ríos y lagos, adhiriéndose a través de pedúnculos ramificados, los cuales están químicamente compuestos por polisacáridos altamente resistentes a la descomposición. Debido a su aspecto, las colonias se han venido a conocer como “moco de roca” (*rock snot* en inglés), aunque la consistencia no es mucosa sino más bien esponjosa-fibrosa [16][27] (Fig. 1A). Bajo situaciones ambientales aún poco conocidas, se producen crecimientos profusos de este organismo en grandes extensiones del cuerpo de agua, cubriendo por entero el lecho e impidiendo el flujo de intercambio químico que normalmente existe entre la columna de agua y los sedimentos. Entre las consecuencias de esta disrupción (Tabla 1) están la inactivación de la productividad primaria por encima de las colonias de *D. geminata* y la modificación total de las redes tróficas del ecosistema acuático.

La atención mundial se centró en *D. geminata* a raíz del descubrimiento de sus floraciones masivas en la Isla Sur de Nueva Zelandia [18], aunque años antes ya se habían reportado tales floraciones, por ejemplo, en ríos de la Isla de Vancouver, Canadá [40]. Decenas de reportes adicionales se registraron después del 2004 para otras partes del mundo, a tal punto que esta diatomea es ahora considerada como una especie invasora agresiva y una amenaza a nivel global [7]. Las primeras floraciones en Sudamérica se reportaron el 2010 para la Patagonia [26][35][36][38]. Un año después, se avistaron floraciones a 800 Km de aquellas inicialmente observadas, lo que indica que el potencial invasivo de la especie es una amenaza seria no sólo para Argentina y Chile, sino también para Bolivia. Este último es el principal justificativo para el presente trabajo que no pretende ser monográfico sino más bien informativo y un posible comienzo para el establecimiento de programas de monitoreo y prevención a nivel nacional.

## 2 Metodología

Se hizo una revisión de artículos relevantes a nivel mundial y sudamericano que tratan de floraciones y otros aspectos de *D. geminata*. Las búsquedas de artículos se hicieron en las bibliotecas del Herbario Criptogámico, UCB, internet, así como también mediante colegas en el extranjero con acceso a información no accesible desde Bolivia.

Las figuras fueron elaboradas en Adobe Photoshop CS3 y Paint para Microsoft Windows 7 Home Premium.

### 3 Resultados y Discusión

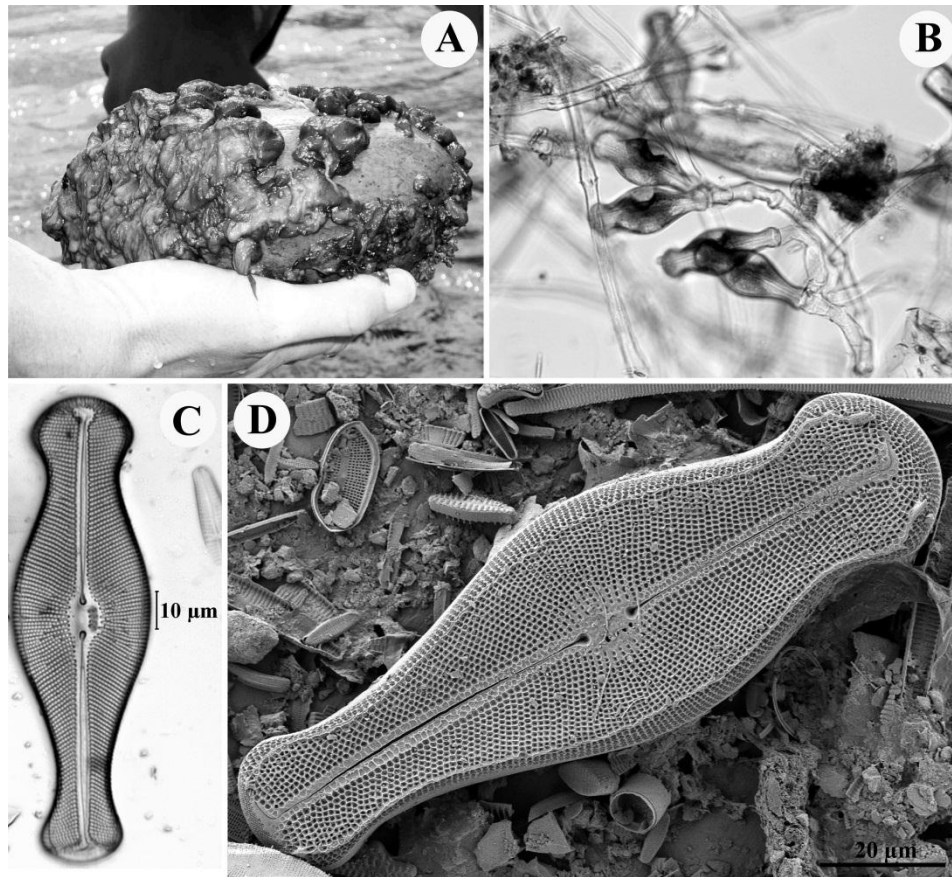
#### 3.1 Aspectos biológicos de *D. geminata*

Las células de *D. geminata* son relativamente grandes cuando se comparan con las dimensiones de otras diatomeas (Figs 1C, 1D). La longitud celular llega a más de 100 micras (una décima de milímetro) y el aspecto amarillo parduzco de las células fotosintéticamente activas es típico de organismos autótrofos (los que obtienen su energía a partir de la luz solar) del Reino Chromalveolata (Fig. 1B). Cada célula está rodeada por una capa externa o pared celular compuesta de dióxido de sílice hidratado que tiene un aspecto similar al vidrio y que presenta una serie de ornamentaciones como poros, fisuras, proyecciones, etc., las cuales facilitan la identificación de la especie [12][18][27](Figs 1C, 1D). El aspecto ondulado del contorno celular es típico de la Familia Gomphonemataceae a la cual pertenece *D. geminata* y muy propio de organismos reófilos (adaptados a corrientes u oleaje).

Antes de formar colonias, las células de *D. geminata* son libres y se mueven por encima de diferentes sustratos (plantas sumergidas, rocas, sedimentos, etc.) gracias a un mecanismo de deslizamiento producido por la extrusión de material mucilaginoso a través de una fisura longitudinal media, denominada rafe (Figs 1C, 1D). Es hacia el final de la primavera y comienzos de verano que, por razones aún desconocidas, las células finalmente comienzan el proceso de fijación [44].

La formación de las densas colonias de *D. geminata* se debe a la capacidad que tiene cada célula de secretar polisacáridos (carbohidratos de cadena larga) a través de un conjunto de poros presentes en la parte basal de la pared celular [18][27][44]. La secreción continua de los polisacáridos presumiblemente se produce desde simples almohadillas al inicio de la colonización hasta pedúnculos largos en estado colonial maduro, pedúnculos que exceden varias veces la longitud de las células que los producen (Fig. 1B). Muchas veces se pueden encontrar dos células al término de un pedúnculo, esto debido a la reproducción asexual típica de las diatomeas y por la cual dos células hijas surgen de la división celular mitótica de una célula madre. La subsecuente producción de un pedúnculo por parte de cada una de estas células hijas produce ramificaciones que en su conjunto asemejan a arbolitos microscópicos cuando las colonias son observadas bajo microscopía fotónica (Fig. 1B). A nivel macroscópico, los agregados de células asemejan agrupaciones columnares pardo verduzcas o blanquecinas en senescencia que se han comparado con el vellón de una oveja [16], en el cual los agregados cuelgan apelmazados (Fig. 1A). Los agregados verduzcos de *D. geminata* contienen bacterias, otras algas (verdes, cianobacterias, otras diatomeas, etc.), macroinvertebrados y una gran cantidad de detritus (partículas orgánicas e inorgánicas) [9][44]. Los organismos fotosintéticos en esta asociación no solamente pueden hallarse atrapados entre las colonias, sino también activamente adheridos a los pedúnculos a través de

almohadillas mucilaginosas o pedúnculos más pequeños producidos por ellos mismos [42].



**Figura 1:** Fotografías de la diatomea *D. geminata*. A. Roca con crecimiento masivo en el río Yuso, Portilla de la Reina, León, España, 2010. Nótese el aspecto de un vellón de oveja. Fotografía tomada por Saúl Blanco, Universidad de León, España. B. Imagen de microscopía fotónica mostrando unas pocas células con sus típicos plastidios, organelos donde se realiza la fotosíntesis (zonas más oscuras dentro de las células), y los pedúnculos filamentosos de polisacáricos (tubos transparentes dispersos en la fotografía). Río Yuso, Portilla de la Reina, León, España, 2010. Fotografía tomada por Saúl Blanco, Universidad de León, España. C. Imagen de microscopía fotónica de la pared celular de *D. geminata*. Nótese la forma y ornamentaciones, las cuales son parte de las características diagnósticas utilizadas para identificar este organismo. La línea media corresponde a la fisura longitudinal llamada rafe. La muestra se ha librado de la materia orgánica a través de un proceso de oxidación con ácido nítrico que es

inocuo a las paredes celulares de las diatomeas. Fotografía tomada por EAM durante el proyecto EPA–National River Survey Assessment, The Academy of Natural Sciences of Philadelphia of Drexel University. Escala 10 micras o una centésima de milímetro. D. Imagen de microscopía electrónica de barrido mostrando la pared celular también libre de materia orgánica. Nótese el rafe bien marcado en la parte longitudinal media. Los minúsculos poros que se hallan en el extremo basal de la pared celular, extremo izquierdo de la fotografía (zona inferior blanquecina en C) se utilizan para la secreción del pedúnculo. Fotografía tomada por EAM durante el proyecto USGS–National Water Quality Assessment Program, The Academy of Natural Sciences of Philadelphia of Drexel University. Escala 20 micras o dos centésimas de milímetro.

Estudios detallados de los pedúnculos muestran que en un corte transversal, la parte central es hueca y alrededor se hallan varias capas concéntricas de polisacáridos, siendo las capas más externas de consistencia fibrosa y por ello el conjunto es muy resistente a la descomposición [15][27][42][44]. Son muchos los componentes químicos de los pedúnculos predominando polisacáridos del tipo xilogalactanos sulfatados, entremezclados con monosacáridos como el ácido urónico, galactosa, manosa y xilosa, así como también proteínas. El xilogalactano sulfatado es hidrofílico y sus moléculas están ligadas por puentes iónicos, endureciendo aún más la estructura de los pedúnculos [15].

### 3.2 Aspectos ecofisiológicos de *D. geminata*

A pesar de la ocurrencia de este taxón en varios países del mundo y de la existencia de varios laboratorios abocados a su estudio, se conoce muy poco acerca de su autoecología y de las causas de sus repentinos florecimientos. Estos últimos se han observado en aguas oligotróficas (nutrientes -moléculas fosfatadas y nitrogenadas- escasos), pero también se han notado crecimientos, aunque no profusos, en aguas eutróficas (nutrientes en exceso). Generalmente, las floraciones algales que se convierten en problemas ecológicos serios se producen por un aumento de nutrientes en el agua, aumento que casi siempre está ligado a actividades antropogénicas. Sin embargo, la particularidad de *D. geminata* de producir floraciones masivas en situaciones oligotróficas hace que estos sobrecrecimientos requieran de enfoques de manejo y mitigación completamente diferentes [11][36].

La literatura sugiere que el hábitat natural de esta diatomea son ríos donde la corriente es relativamente fuerte y estable y lagos donde la acción del oleaje es considerable y constante [18]. También, la literatura muestra que este organismo es de origen circumboreal montañoso, siendo Europa, Asia y Norteamérica, las primeras regiones para las que se tienen registros [6][12][44]. En estos ecosistemas,

las condiciones de bajos nutrientes determinan aguas claras y bien iluminadas y oxigenadas; son características las temperaturas medias, el pH tiende a ser de ligeramente ácido a ligeramente alcalino y la conductividad es bastante variable, aunque, por lo general, estas aguas son de bajo contenido electrolítico y baja alcalinidad [5][14][32]. Sin embargo, es en las nacientes de ríos o cerca de las mismas donde se presentan las corrientes más fuertes y cuya acción mecánica podrían actuar previniendo floraciones masivas. En estos hábitats naturales, *D. geminata* produce crecimientos poco profusos y presenta células individualmente adheridas al sustrato sin formar pedúnculos o formando pequeñas colonias pedunculadas y semiesféricas [44].

Es difícil determinar si en el continente sudamericano existían poblaciones naturales de *D. geminata* ya que los estudios biológicos detallados en esta parte del mundo son muy posteriores a los de los continentes anteriormente citados. Lo cierto es que el número de observaciones de esta diatomea se ha incrementado en los últimos 3 años y principalmente a raíz de la información generada después del segundo avistamiento en la Patagonia argentino-chilena [26][35][36][38][39]. El primer reporte corresponde a Asprey *et al.* [3], quienes presumiblemente hallaron el taxón como parte del plancton del lago Sarmiento y el río Cisnes, pero sin formar floraciones. Estos dos últimos récords deben ser constatados en campo, principalmente debido a que la ocurrencia de *D. geminata* en el plancton no es usual. Una revisión más profunda de la literatura chilena y de la morfología del taxón en este país se halla actualmente en prensa (P. Rivera, Universidad de Concepción, com. pers., 2013).

Fisiológicamente, es la reproducción asexual mitótica sustentada por un suministro fuerte de nitrógeno y fósforo en condiciones de alta luminosidad la que permite a *D. geminata* colonizar rápidamente grandes extensiones del lecho acuático y desplazar en corto tiempo a las especies propias del lugar [13][21][44]. Se ha observado que las floraciones masivas están generalmente (no siempre) asociadas a ríos regulados o cauces de flujo hídrico controlado, donde las corrientes no son lo suficientemente fuertes como para prevenir la colonización profusa del lecho rocoso [23].

En la mitosis no existe intercambio genético a través de la producción de gametos, como ocurre en la reproducción sexual y, por tanto, la energía requerida para la reproducción asexual es mucho menor. Aun así se requieren grandes cantidades de fósforo en el agua para sostener biomásas de hasta un kilogramo por metro cuadrado, como aquellas registradas en ríos de Nueva Zelanda. Whitton *et al.* [44] sugieren que el fósforo orgánico, aquel que procede de la descomposición de la materia orgánica producida en forma autóctona o alóctona, constituye una fuente primordial para el funcionamiento celular y la reproducción de *D. geminata* en situaciones oligotróficas. Ellwood & Whitton [13] observaron una alta actividad

enzimática cerca del punto de contacto de la célula con el pedúnculo. Al ser el pedúnculo altamente hidrofílico, el fósforo orgánico en solución pasaría a la parte central del pedúnculo por difusión y de allí a la célula previa acción enzimática destinada a fragmentar las moléculas orgánicas en fracciones asimilables.

Las floraciones de *D. geminata* tienen, en general, un ciclo característico con un pico de productividad en primavera y verano y una desaparición casi completa de las colonias en otoño o invierno [13][17][18][44]. Este ciclo, como se sugirió anteriormente, parece estar más relacionado con una alta disponibilidad de luz, fósforo orgánico y nitrógeno que con la temperatura [9][11][13][44]. Tampoco se sabe con exactitud el mecanismo por el cual las células terminan por desprenderse al final del pico de productividad ya que son altamente resistentes a los efectos de la corriente u oleaje, pero es posible que un aumento en la corriente del agua sea responsable por la eliminación de las colonias senescentes [23]. Los mecanismos de recolonización para el establecimiento del pico de productividad en el ciclo subsecuente son también desconocidos.

El crecimiento en situaciones de bajos nutrientes en el agua se ha explicado a través de un modelo de consumo suntuario en el que las células son capaces de acumular fósforo en cantidades mayores a las de sus necesidades momentáneas. Esto se ha evidenciado por la presencia de corpúsculos polifosfatados en el citoplasma de las células, los cuales aumentan hasta más de 10 veces la concentración citoplasmática de fósforo con respecto al medio externo [27][35]. La obtención de fósforo excedente sería facilitada por el establecimiento de un potencial redox en el interior de las colonias donde el pH y las concentraciones de oxígeno tienen fluctuaciones notorias y muy diferentes al ambiente exterior a las colonias [43]. Sin embargo, este potencial redox estaría mediado por el hierro, lo cual ha sido descartado por los experimentos de Bothwell *et al.* [9] que claramente han mostrado que incrementos en la biomasa de *D. geminata* no están relacionados con la carga de hierro en la columna de agua o en las matas coloniales. Por tanto, el mecanismo químico por el cual *D. geminata* puede formar densos crecimientos en situaciones oligotróficas es aún desconocido.

Otra característica de *D. geminata* en situaciones oligotróficas es que la longitud de los pedúnculos es mucho mayor, aunque la limitación de nitrógeno y fósforo debe ser combinada para que exista esta elongación peduncular [21]. Se han reportado camas de colonias de *D. geminata* de 20 cm de grosor o más, lo cual constituye un aislamiento químico y físico efectivo del lecho del ecosistema afectado. En estas situaciones, la mayor parte de la biomasa acumulada se debe a los pedúnculos más que a las células mismas [25].

Por el contrario, los crecimientos de *D. geminata* producidos en sistemas eutróficos tienden a ser menos gruesos, típicamente menos de 3 cm de espesor.



Estos crecimientos son ralos y no producen las disrupciones ecosistémicas producidas en situaciones oligotróficas (Tabla 1).

**Tabla 1.** Algunas características de *D. geminata* y sus impactos a diferentes niveles, mostrando también posibles soluciones y algunas referencias bibliográficas que podrían servir de base en la elaboración de un programa de prevención y manejo de floraciones de esta diatomea.

Característica	Impactos	Posibles soluciones y algunas referencias base
Alta invasividad y gran capacidad de dispersión	Colonización rápida y extensa de sitios ocupados por flora y fauna nativas	Control fronterizo: generar planes que permitan prevenir la introducción de esta especie a nuestro país, regulando la entrada de objetos que puedan contaminar ríos o lagos [4] [7] [38]
Rápida generación de grandes cantidades de biomasa, particularmente pedúnculos compuestos por polisacáridos resistentes a la descomposición	Alteración de reacciones químicas sedimento-columna de agua y alteración de ciclos biogeoquímicos incluyendo disminución de oxígeno disuelto  Disminución de la diversidad de micro y macro fauna y flora Repercusión en la ictiofauna debido a la alteración de las características del lecho reduciendo los frezaderos Colmatación de las acequias, canales y otros acueductos y modificación de la hidráulica del río Impactos estéticos y efectos adversos sobre la actividad pesquera y turística generando pérdidas económicas	Evitar la proliferación masiva del alga creando medidas preventivas [7] [11] [18] [25] [33] [42] [44]
Gran adaptabilidad a ambientes tanto oligotróficos como eutróficos.	Invasión y éxito en distintos ambientes acuáticos de manera que su rango de efecto es bastante amplio	[7] [42]
Capacidad de sobrevivir fuera del agua hasta aproximadamente 40 días.	Intensificación del potencial invasivo y de dispersión del alga	Evitar la contaminación cruzada: limpiar, secar y desinfectar todo tipo de objetos que contengan humedad y estén en contacto con el alga [7] [42] [19]

La mayor parte de la información incluida hasta ahora se ha colectado para epilíton (crecimientos sobre rocas) y sistemas lóticos (aguas corrientes) y mucha menos información existe para la dinámica de las floraciones y la ecología misma de *D. geminata* en situaciones epifíticas (sobre plantas acuáticas) y lénticas (lagos). Los reportes de floraciones en la Patagonia evidencian crecimientos profusos sobre macrófitas [38] y además en costas lacustres [4]. Dado que las regiones susceptibles a ser invadidas por *D. geminata* en Sudamérica [36][42] contienen numerosos ecosistemas lénticos y los ríos y lagos están muchas veces densamente colonizados por macrófitas, el estudio de estas situaciones ecológicas merece una mayor atención.

### 3.3 Dispersión de *D. geminata* y distribución en Sudamérica

Los mecanismos de dispersión de esta diatomea son muy variados [6][8][18][22]. La distribución diferencial que se encuentra a lo largo del curso de un río o dentro de una cuenca puede estar grandemente facilitada por las corrientes de agua que transportan células río abajo. La gran motilidad que presentan varias especies de peces, aves, mamíferos e insectos, también pueden favorecer el transporte de inóculos (una o pocas células) a medianas y largas distancias. Bajo condiciones de estrés, como las producidas por una desecación por ejemplo, producen un rápido enquistamiento de las células, las cuales son luego transportadas por el viento a regiones distintas [18]. Es también factible que el acrecentado turismo y movimiento poblacional entre regiones aledañas o distantes sea un vector preponderante en el transporte de esta diatomea. Con seguridad, las actividades de pesca a mosca constituyen un proceso por el cual *D. geminata* puede diseminarse rápidamente en una región [8]. Los utensilios de pesca como las botas de pescador, contenedores de carnada y peces y la misma caña de pescar constituyen medios de transporte viables para este organismo.

Es probable que una combinación de estos múltiples factores haya determinado que en más o menos un año *D. geminata* haya sido transportada hasta 800 km de distancia en la Patagonia chilena después de su avistamiento inicial en Mayo, 2010 [26]. En tan sólo ese lapso, 20 ríos habían sido afectados con el consecuente riesgo de modificación trófica extrema. Esta dispersión efectiva se dio incluso después de una inversión fuerte de parte del gobierno chileno y un control relativamente estricto a nivel población. Un patrón invasivo similar se observa en Argentina, donde ya se ha reportado también la diseminación rápida de *D. geminata* a varios ecosistemas acuáticos desde su reporte inicial en Septiembre, 2010 en la zona de la Patagonia [4][26][35][36][38].

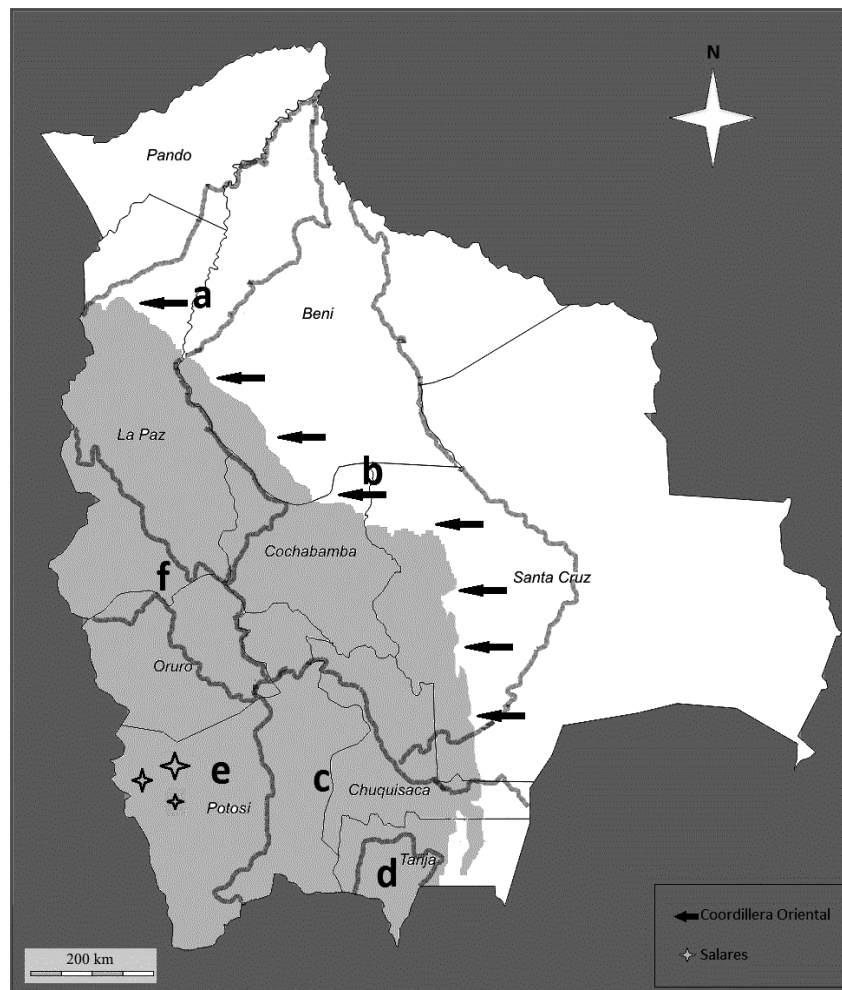
La ineficacia de los medios de control ha llevado a proponer tácticas y estrategias propias para la situación chilena y argentina que pueden ser extensibles a nivel sudamericano [36] con previos ajustes para cada país. La experiencia europea

y norteamericana ha llevado a Spaulding & Elwell [42] a elaborar un mapa de sitios potencialmente susceptibles a ser invadidos por la diatomea incluyendo Sudamérica (véase también Reid *et al.* [36]). En esta última, toda la región andina y subandina podrían constituir sitios propicios para la proliferación de *D. geminata*.

### 3.4 Probabilidad de invasión de ecosistemas bolivianos por parte de *D. geminata*

Biogeográficamente, en Bolivia la Región Andina Tropical con sus Provincias Yungueña Peruano-Boliviana, Puneña Mesofítica, Puneña Xerofítica y Boliviano-Tucumana son particularmente vulnerables [30] (Fig. 2), las cuales comprenden las subcuencas Beni, Mamoré, Pilcomayo, Bermejo, Altiplano y la del Titicaca-Poopó[1]. Particularmente vulnerables son los ríos y lagos ubicados en el flanco este de la Cordillera Oriental en los departamentos de La Paz, Cochabamba, Santa Cruz, Chuquisaca y Tarija (Fig. 2). Estos ecosistemas poseen en general las condiciones de lecho rocoso, poca profundidad, temperaturas no muy altas, alta luminosidad, pH de ácido a ligeramente alcalino y oligotrofia, características propicias para el crecimiento de *D. geminata* [31]. Los ecosistemas de las subcuencas Altiplánica y del Titicaca-Poopó son también sitios potencialmente favorables para *D. geminata* aunque, paradójicamente, el estado de contaminación en el que están la gran mayoría de estos ecosistemas a raíz de prácticas mineras, agrícolas y desarrollo urbano, podría significar una barrera a la expansión del alga en estas zonas. Sin embargo, si bien *D. geminata* no formaría floraciones en sistemas eutróficos, estos últimos podrían convertirse en repositorios o sitios transicionales en la dispersión del alga hacia ecosistemas oligotróficos.

Aunque hay registros de *D. geminata* en sistemas salobres, es posible que estos récords correspondan a un ingreso de células desde tributarios dulceacuícolas [17]. Si la alta salinidad es una barrera para *D. geminata*, entonces los ecosistemas salobres del Altiplano (algunos mostrados en la Figura 2) están exentos de invasiones por parte de este organismo.



**Figura 2:** Mapa de Bolivia con la zona de riesgo de invasión por parte de *D. geminata* superpuesta (área ploma). Líneas negras delgadas marcan fronteras entre Departamentos y líneas gruesas marcan sub-cuencas (a: Beni, b: Mamoré, c: Pilcomayo, d: Bermejo, e: Altiplano y, f: Titicaca-Poopó). Modificado de mapa en <http://d-maps.com/m/america/bolivia/bolivia47.gif>, mapa fisiográfico en Arce-Burgoa & Goldfarb (2009) y mapa de sistemas ecológicos acuáticos en Aguirre *et al.* (2009).

Tres aspectos particulares son preocupantes en las regiones bolivianas anteriormente mencionadas. Primero, por la proximidad de Bolivia a la línea del ecuador, los patrones físicos y químicos de los ecosistemas acuáticos son más o menos constantes durante todo el año, lo que extiende el tiempo de vulnerabilidad de estos ecosistemas. Segundo, existe un flujo masivo de aves entre las distintas regiones del Altiplano y del Titicaca-Poopó que podrían diseminar rápidamente el

alga. Finalmente, está la intensificación del turismo en estas dos zonas, así como también en la zona de Yungas. Morales *et al.* [29] ya habían advertido sobre el posible efecto negativo de un turismo incontrolado en zonas yungueñas. El flujo de turistas es actualmente irrestricto y no existe ningún tipo de control de tráfico de productos vegetales o animales, a menos que se trate de un área de manejo integrado o reserva biológica donde el control existe, pero es mínimo y poco efectivo. Entonces, una falta de regulación estricta en el turismo podría convertir a este en un vector potencial efectivo para la dispersión de *D. geminata*.

#### 4 Conclusiones

La diatomea *D. geminata* es una amenaza potencial para ecosistemas acuáticos bolivianos y ante su ocurrencia en ecosistemas patagónicos, es muy posible que la dispersión hacia aguas nacionales sea inminente y con consecuencias adversas, tales como la pérdida local y regional de la biodiversidad, modificación del funcionamiento de ecosistemas en regiones importantes del país, así como también cuantiosas pérdidas económicas en los ramos de turismo y pesquería.

Ante el ejemplo de Chile y Argentina que ya han comenzado con programas de investigación de la dinámica de las floraciones en sus propios ecosistemas, es preciso que en Bolivia también se inicie la investigación y se comience con la planificación de tácticas y estrategias de prevención y manejo de posibles invasiones por parte de esta alga nociva.

#### Agradecimientos

Estamos en deuda con Luc Ector y Carlos E. Wetzel, Centro de Investigación Pública-Gabriel Lippmann, Luxemburgo por proveernos gran parte de la literatura base para esta publicación. Agradecemos también a Saúl Blanco, Universidad de León, España por facilitarnos las fotografías de las Figuras 1A y 1B. El material fotografiado en las Figuras 1C y 1D fue colectado por personal de EPA y USGS, EUA. EAM dedica el presente trabajo a la memoria de Francis Rice Trainor eximio científico, profesor y amigo; ¡su ejemplo vive!

#### Bibliografía

- [1] Aguirre, L.F.; Aguayo, R.; Balderrama, J.; Cortéz, F.C.; Tarifa, T.; Van Damme, P.A.; Arteaga, L. & Peñaranda, D. 2009. *El Método de Evaluación del Grado de Amenaza para Especies (MEGA)*. En: Ministerio de Medio Ambiente y Agua, Viceministerio de Medio Ambiente, Biodiversidad y Cambio Climático

- (Ed.). Libro Rojo de la Fauna Silvestre de vertebrados de Bolivia. p. 7-17. Plural Editores, La Paz, Bolivia.
- [2] Arce-Burgoa, O.R. & Goldfarb, R.J. 2009. *Metalogenia de Bolivia*. En: Arce-Burgoa, O.R. (Ed.). Guía a los Yacimientos Metalíferos de Bolivia. Online: <http://www.osvaldoarce.com/presentacion.html> (visitado en 21/2/2013).
- [3] Asprey, J.F.; Benson-Evans K. & Furet, J.E. 1964. *A contribution to the study of South American freshwater phytoplankton*. Gayana Botánica 10: 1–18.
- [4] Baffico, G.; Beamud, G. & Díaz, M. 2013. *Detección del alga invasora Didymosphenia geminata en el Lago Nabuel Huapi*. Informe Técnico. Instituto de Investigaciones en Biodiversidad y Medioambiente (INIBIOMA), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Universidad Nacional del Comahue (UNCO). Argentina. 3 pp.
- [5] Bhatt, J.P.; Bhaskar, A. & Pandit, M.K. 2007. *Biology, distribution and ecology of Didymosphenia geminata (Lyngbye) Schmidt an abundant diatom from the Indian Himalayan rivers*. Aquatic Ecology 42(3): 347-353.
- [6] Blanco, S. & Ector, L. 2008. *Didymosphenia geminata (Bacillariophyta, Gomphonemataceae), una amenaza para nuestros ríos*. Cuadernos de Biodiversidad 26: 1-4.
- [7] Blanco, S. & Ector, L. 2009. *Distribution, ecology and nuisance effects of the freshwater invasive diatom Didymosphenia geminata (Lyngbye) M. Schmidt: a literature review*. Nova Hedwigia 88 (3-4): 347-422.
- [8] Bothwell, M.L.; Lynch, D.R.; Wright, H. & Deniseger, J. 2009. *On the boots of fishermen: the history of didymo blooms on Vancouver Island, British Columbia*. Fisheries 34: 382–388.
- [9] Bothwell, M.L.; Kilroy, C.; Taylor, B.W.; Ellison, E.T.; James, D.A.; Gillis, C-A.; Bladon, K.D. & Silinis, U. 2012. *Iron is not responsible for Didymosphenia geminata bloom formation in phosphorous-poor rivers*. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences 69: 1723-1727.
- [10] Cox, C.B. & Moore, P.D. 2009. *Biogeografia. Uma Abordagem Ecológica e Evolucionária*. 7ma edição. GEN-LTC, Rio de Janeiro. 398 pp.
- [11] Cullis, J.D.S.; Gillis, C-A.; Bothwell, M.L.; Kilroy, C.; Packman, A. & Hassan, M. 2012. *A conceptual model for the blooming behavior and persistence of the benthic mat-forming diatom Didymosphenia geminata in oligotrophic streams*. Journal of Geophysics Research 117: G00N03, doi:10.1029/2011JG001891.
- [12] Dawson, P.A. 1973. *The morphology of the siliceous components of Didymosphenia geminata (Lyngb.) M. Schm.* British Phycological Journal 8: 65-78.

- [13] Ellwood, N.T.W & Whitton B.A. 2007. *Importance of organic phosphate hydrolyzed in stalks of the lotic diatom Didymosphenia geminata and the possible impact of atmospheric and climatic changes*. Hydrobiologia 592: 121-133.
- [14] Falasco, E. & Bona, F. 2013. *Recent findings regarding non-native or poorly known diatom taxa in north-western Italian rivers*. Journal of Limnology 72(1): 35-51.
- [15] Gretz, M., 2008. *The stalks of didymo*. En: Bothwell, M. L. & S. A. Spaulding (eds), Proceedings of the 2007 International Workshop on *Didymosphenia geminata*. Canadian Technical Report on Fisheries and Aquatic Sciences 2795: 21.
- [16] Hassall, A.H. 1845. *A History of the British Freshwater Algae*, Vol. I. Taylor, Walton & Maberley, London, UK. 462 pp.
- [17] Kawecka, B. & Sanecki, J. 2003. *Didymosphenia geminata in running waters of southern Poland-symptoms of change in water quality?* Hydrobiologia 495: 193–201.
- [18] Kilroy, C. 2004. *A new alien diatom, Didymosphenia geminata (Lynghye) Schmidt: its biology, distribution, effects and potential risks for New Zealand fresh waters*. Prepared for Environment Southland. NIWA Client report CHC2004-128. 34 pp.
- [19] Kilroy, C. 2005. *Test to determine the effectiveness of methods for decontaminating materials that have been in contact with Didymosphenia geminata*. Prepared for Biosecurity New Zealand. NIWA Client report CHC2005-005. 30 pp.(revised August 2006)
- [20] Kilroy, C. 2006. *Studies on the survivability of the invasive diatom Didymosphenia geminata under a range of environmental and chemical conditions*. Prepared for Biosecurity New Zealand. NIWA Client report CHC2006-116. 110 pp. (revised May 2007)
- [21] Kilroy, C. & Bothwell, M. 2011. *Environmental control of stalk length in the bloom-forming, freshwater benthic diatom Didymosphenia geminata (Bacillariophyceae)*. Journal of Phycology 47: 981-989.
- [22] Kilroy, C. & Unwin, M. 2011. *The arrival and spread of the bloom-forming, freshwater diatom, Didymosphenia geminata, in New Zealand*. Aquatic Invasions 6(3): 249-262.
- [23] Kirkwood, A.E.; Shea, T.; Jackson, L.J. & McCauley, E. 2007. *Didymosphenia geminata in two Alberta headwater rivers: an emerging invasive species that challenges conventional views on algal bloom development*. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences 64: 1703-1709.
- [24] Kolar, C.S. & Lodge, D.M. 2000. *Freshwater non-indigenous species: Interactions with other global changes*. En: Mooney, H.A. & Hobbs, R.J. (Eds.) Invasive Species in a Changing World. pp. 3-30. Island Press, Washington DC, USA.

- [25] Larned, S.; Biggs, B.; Blair, N.; Burns, C.; Jarvie, B.; Jellyman, D.; Kilroy, C.; Leathwick, J.; Lister, K.; Nagels, J.; Schallenberg, M.; Sutherland, S.; Sykes, J.; Thompson, W.; Vopel, K.; & Wilcock, B. 2006. *Ecology of Didymosphenia geminata in New Zealand: habitat and ecosystem effects – Phase 2*. NIWA Client Report CHC2006-086, NIWA Project MAF06507. 127 pp.
- [26] Merino, R.; Bauer, G.; Sastre, V.; Santinelli, N.; Hamame, M.; Montero, P. & Reid, B. 2011. *Initial invasión and colonization patterns of Didymosphenia geminata in Patagonia*. 2<sup>nd</sup> World Conference on Biological invasions and Ecosystem Functioning. November 21-24, Mar del Plata, Argentina. p. 54.
- [27] Moffat, M.C. 1994. *An ultrastructural study of Didymosphenia geminata (Bacillariophyceae)*. Transactions of the American Microscopical Society 113(1): 59-71.
- [28] Molles, M.C. Jr. 2008. *Ecology. Concepts and Applications*. 4<sup>th</sup> edition. McGraw Hill, Boston. 604 pp.
- [29] Morales, E.A.; Fernández, E. & Kociolek, J.P. 2009. *Epilithic diatoms (Bacillariophyta) from cloud forest and alpine streams in Bolivia, South America 3: diatoms from Sebucenas, Carrasco National Park, Department of Cochabamba*. Acta Botanica Croatica 68(2): 263-283.
- [30] Navarro, G. & Ferreira, W. 2009. *Biogeografía de Bolivia*. En: Ministerio de Medio Ambiente y Agua, Viceministerio de Medio Ambiente, Biodiversidad y Cambio Climático (Ed.). Libro Rojo de Parientes Silvestres de Cultivos de Bolivia. pp. 23-39. Plural Editores, La Paz, Bolivia.
- [31] Navarro, G. & Maldonado, M. 2002. *Geografía Ecológica de Bolivia. Vegetación y Ambientes Acuáticos*. Centro de Ecología Simón I. Patiño-Departamento de Difusión, Santa Cruz, Bolivia. 719 pp.
- [32] Noga, T. 2003. *Dispersion of Didymosphenia geminata in the flowing waters of Southern Poland-New sites of species occurrence in the Oransaka watershed and the Oransaka basin*. Oceanological and Hydrobiological Studies 32(4): 159-170.
- [33] Packman, A.I.; Larned, S.; Plew, D. & Vopel, K. 2008. *Modification of river hydraulics by the invasive diatom Didymosphenia geminata*. World Environmental Resources Congress 2008 Ahupaua, Hawaii. American Society of Civil Engineers-ASCE, EUA. pp. 1-6.
- [34] Perrings, C.; Williamson, M. & Dalmazzone, S. 2000. *The Economics of Biological Invasions*. Edward Elgar Publishing, Cheltenham, UK. 251 pp.
- [35] Reid, B.; Torres, R.; Maureira Benavente, C.; Montero, P.; Spaulding, S. & Sundareshwar, P.V. 2011. *Didymosphenia geminata invasion in Chile, and the potential for biogeochemical state change in Patagonian streams*. 2<sup>nd</sup> World Conference



- on Biological invasions and Ecosystem Functioning. November 21-24, Mar del Plata, Argentina. p. 20.
- [36] Reid, B.L.; Hernández, K.L.; Frangópulos, M.; Bauer, G.; Lorca, M. & Kilroy, C. 2012. *The invasion of the freshwater diatom Didymosphenia geminata in Patagonia: prospects, strategies, and implications for biosecurity of invasive microorganisms in continental waters*. Conservation Letters 0(2012): 1-9.
- [37] Ruiz, G.M. & Carlton, J.T. (Eds.) 2003. *Invasive Species, Vectors and Management Strategies*. Island Press, Washington DC, USA. 521 pp.
- [38] Sastre, V.A.; Santinelli, N.H.; Bauer, G.A.; Ayestarán, M.G. & Uyua, N.M. 2013. *First record of the invasive diatom Didymosphenia geminata (Lyngbye) Schmidt in a Patagonian Andean river of Argentina*. BioInvasions Records 2. Published online 11 January 2013.
- [39] Segura, P. 2011. *A slimy invader blooms in the rivers of Patagonia*. Science 331(6013): 18.
- [40] Sherbot, D.M.J. & Bothwell, M.L. 1993. *Didymosphenia geminata (Gomphonemaceae). A review of the ecology of D. geminata and the physicochemical data of endemic catchments on Vancouver Island*. Environmental Sciences Division. National Hydrology Research Institute. Environment Canada. NHRI Contribution No. 93005. Saskatoon, Saskatchewan, Canada. 55 pp.
- [41] Shigesada, N. & Kawasaki, K. 2001. *Biological Invasions: Theory and Practice*. Oxford University Press, Oxford, UK. 206 pp.
- [42] Spaulding, S. & Elwell, L. 2007. *Increase in nuisance blooms and geographic expansion of the freshwater diatom Didymosphenia geminata. Recommendations for response*. United States Environmental Protection Agency, White Paper. 33 pp.
- [43] Sundareshwar, P.V.; Upadhyay, S.; Abessa, M.; Honomichl, S.; Berdanier, B.; Spaulding, S.A.; Sandvik, C. & Trennepohl, A. 2011. *Didymosphenia geminata: Algal blooms in oligotrophic streams and rivers*. Geophysical Research Letters 38(10): L10405. doi: 10.1029/2010GL046599.
- [44] Whitton, B.A.; Ellwood, N.T.W. & Kawecka, B. 2009. *Biology of the freshwater diatom Didymosphenia geminata: a review*. Hydrobiologia 630: 1-37.