



ARSET

Applied Remote Sensing Training

<http://arset.gsfc.nasa.gov>

 @NASAARSET

La Utilización de Satos Satelitales para la Predicción y Detección de Epidemias de Floraciones de Algas Nocivas

Richard Stumpf, NOAA National Centers for Coastal Ocean Science
Fundamentos de la Teledetección Satelital para Aplicaciones de Salud
Semana 4

Esquema

Floraciones de Algas Nocivas (Harmful algal blooms en inglés o HABs)

- ¿Qué son las HABs?
 - Específicamente las HABs de cianobacterias
- El problema
- Los satélites y las HABs de Cianobacterias
- Algoritmos
- Aplicaciones

HABs Marinas

La Ocurrencia de HABs a Nivel Mundial



Imagen de whoi.edu/redtide

HABs Marinas

Especies Beneficiadas por la Teledetección

Especie de HAB	Región	Tipo de Detección	Impacto
<i>Pseudo-nitzschia spp.</i>	Zonas de afloramiento	SST, clorofila	ASP, variable
<i>Karenia brevis</i>	Golfo de México	clorofila, tasa óptica, espectros de absorción	NSP, respiratorio, toxina de pescado
<i>Karenia mikimotoi</i>	Océano costero (Hong Kong, Irlanda, Nueva Zelanda)	Clorofila SST	NSP
<i>Gymnodinium catenatum</i>	Estuarios, océano costero, afloramiento	Clorofila SST	PSP
<i>Alexandrium spp.</i>	Océano costero (Golfo de Maine, Golfo de Alaska)	SST	PSP
<i>Gonyaulax</i>	Zonas de afloramiento	clorofila, posible absorción UV	Toxina de pescado
<i>Cochlodinium</i>	Océano costero (Columbia Británica, Corea)	SST, color	Toxina de moluscos
<i>Nodularia, Microcystis</i>	Salobre encerrado	Color	Hepatotoxina
<i>Dinophysis</i> (no monitoreada por Teledetección)	Irlanda, Portugal, Noruega	Posiblemente SST, pero óptica in situ	Toxina de moluscos

Impacto Económico de las HABs

Ejemplo en Florida

- Estimación de principios de los 70: USD 20 millones
- La marea roja de 1995-96 le costó “por lo menos el doble de ese monto” a Florida
- Estudio Económico: USD 6,5 millones *al mes* en un condado (Larkin et al)
 - Floración típica 3-5 condados / 2-4 meses
- Pérdidas de pescado y moluscos:
 - USD 6 millones para almejas y ostras en 2002-2003 (Dpto. de Agricultura de Florida)
 - ~USD 30 millones por el florecimiento de *Alexandrium* de 2005 en el Golfo de Maine
- Pérdida del uso de las playas



A satellite image of Earth showing a mix of green land, blue oceans, and white clouds. A semi-transparent grey rectangular box is overlaid in the center, containing the text 'HABs de Cianobacterias'.

HABs de Cianobacterias

“HABs” de Cianobacterias



Bahía Put-in, 24 de julio de 2015

Por el Dr. Justin Chaffin, Stone Laboratory, Univ. Estatal de Ohio

Problemas con las “CyanoHABs”

URGENT NOTICE TO RESIDENTS

DO NOT DRINK THE WATER
DO NOT BOIL THE WATER



Fondo Izq.: Ohio Sea Grant, Brenda Culler, ODNR Coastal Management; Derecha: Tom Feran, The Plain Dealer

Riesgos para Mascotas y Animales

- Cada año mueren perros y ganado en EE.UU.
- Floración de Algas Nocivas Marina Novedosa: Cianotoxina (Microcistina) se transfiere a las nutrias marinas



Fuente: James Brooks / Flickr / CC BY-2.0

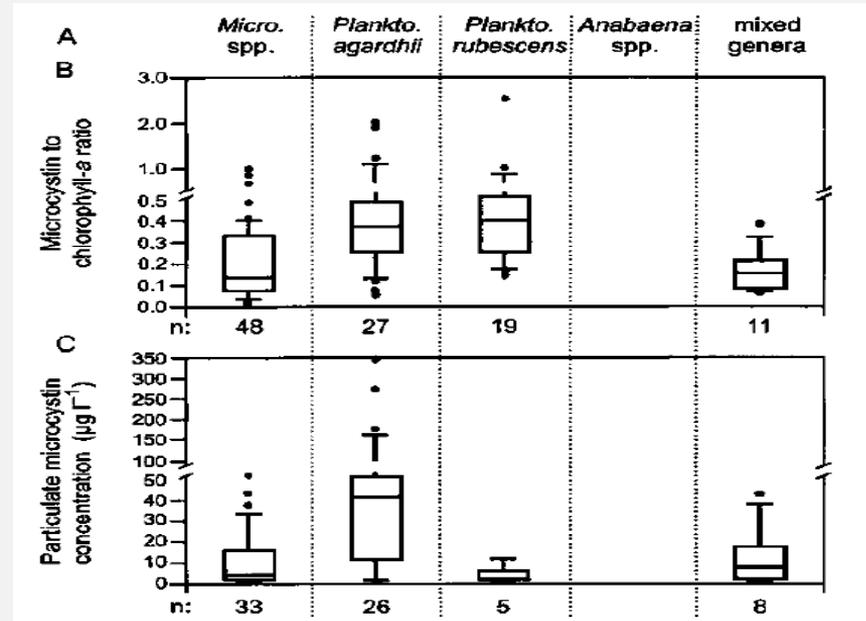


Fuente: Centers for Disease Control and Prevention

Niveles de Alerta de la Organización Mundial de la Salud

- Relativamente bajo 2-4 $\mu\text{g/L}$ microcistina
 - 20,000 células/mL (10 $\mu\text{g/L}$ chl-a)
- Moderado 20 $\mu\text{g/L}$ microcistina
 - 100,000 células/mL (50 $\mu\text{g/L}$ chl-a)
- Es común que se forme una espuma

- Cantidad de microcistina (y microcistina a biomasa de chl-a)* para diferentes especies



*chl- abreviatura de clorofila en inglés

Microcistinas y cilindroespermopsinas

Directrices de la EPA para el Agua Potable

- Orientación técnica (Promedio de 10 días):
- Microcistinas: 0,3 µg/L (ppb) para niños menores de 6 años, 1,6 ppb para mayores y adultos
- Cilindroespermopsinas: 0.7 ppb para niños menores de 6 años, 3 ppb para niños mayores y adultos



Office of Water
820F15003
June 2015

2015 Drinking Water Health Advisories for Two Cyanobacterial Toxins

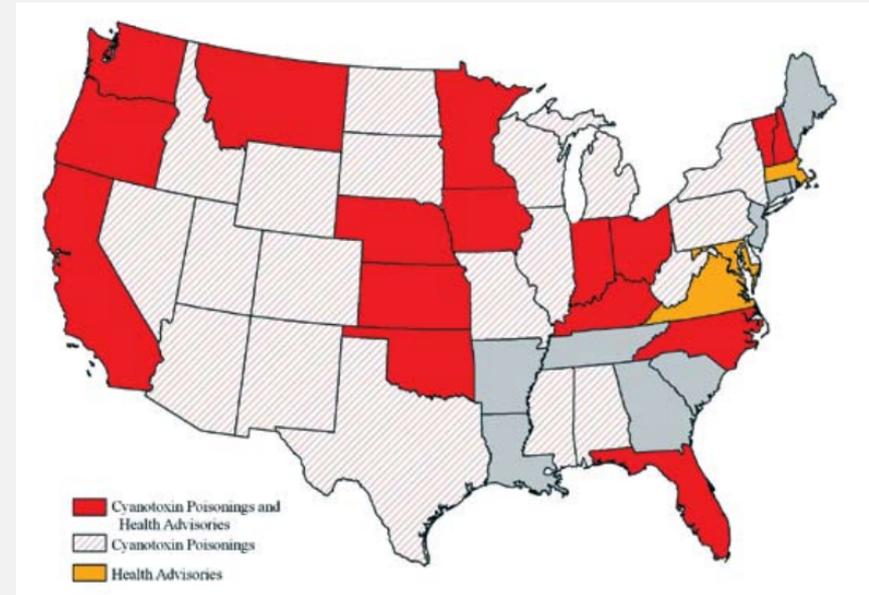
Efectos Recreativos

- Recomendaciones de la WHO
- Microcistina-LR:

microcistinclorofila-a		
Bajo	<10 ppb	<10 $\mu\text{g/L}$
Moderado	10-20	10-50
Alto	20-2,000	50-5,000
Muy Alto	>2,000	>5,000

- Diferentes estados tienen variaciones

Estados Documentados en 2009



Graham et al., 2009, Lakelines

Cianobacterias Preocupantes

Heterocistos: **fijan nitrógeno**; Vacuolas de Gas: **flotación**

- ***Microcystis***
 - **Colonia, sin heterocistos**, vac. gas., T&O, toxinas
- ***Aphanizomenon***
 - Filamentos, heterocistos (fijador), vac. gas, T&O, toxinas
- ***Dolichospermum (Anabaena)***
 - Filamento, heterocistos, vac. gas, T&O, toxinas
- ***Planktothrix (Oscillatoria)***
 - Filamento, **sin heterocistos**, vac. gas, T&O, toxinas
- ***Cylindrospermopsis***
 - Filamento, heterocistos, no vac. gas, **no T&O**, toxinas
- ***Lyngbya***
 - Filamento, **sin heterocistos, no vac. gas., no T&O**, toxinas

Ejemplo de *Microcystis*

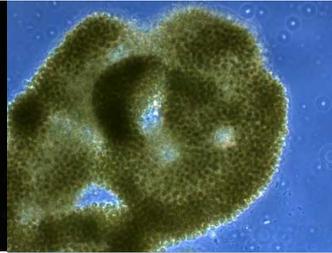
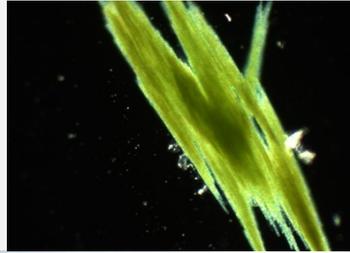
Lago Erie, agosto de 2010



Ejemplo de *Microcystis*

California

Aphanizomenon flos-aquae

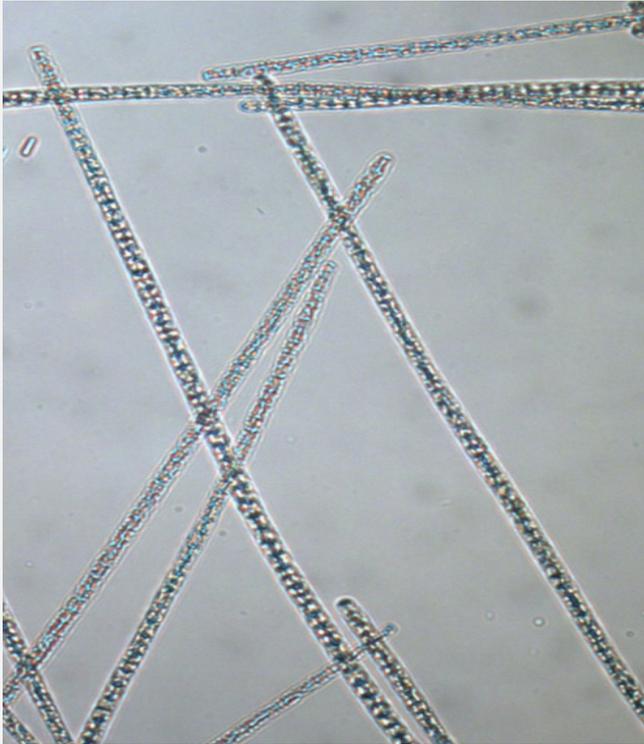


Microcystis spp.



Ejemplo de *Planktothrix*

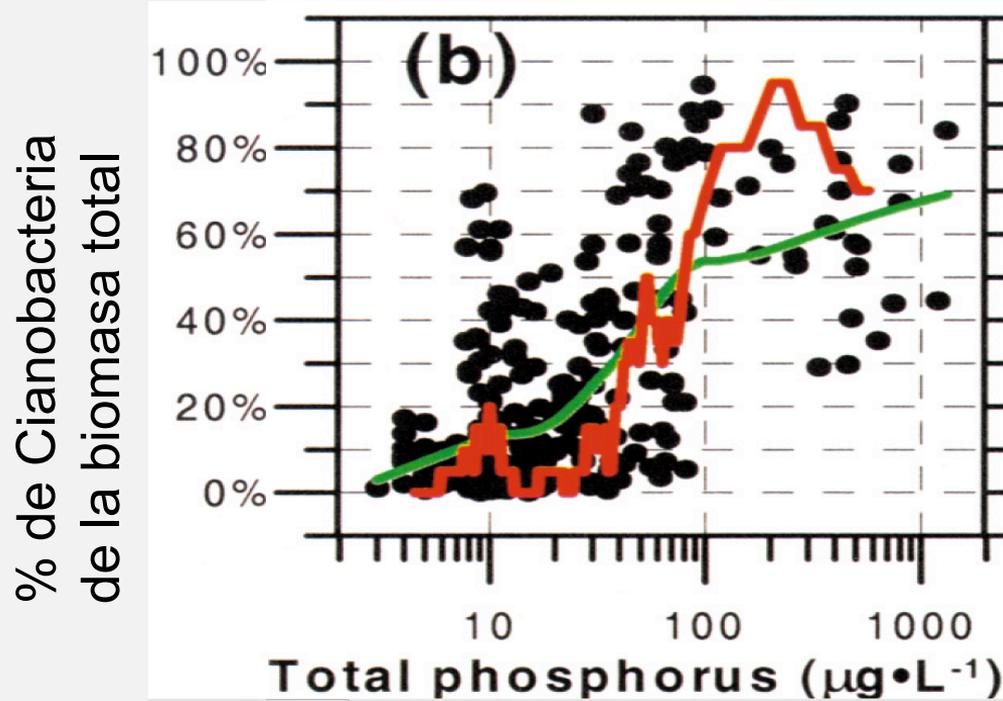
Bahía Sandusky, dispersada



An aerial satellite photograph of a coastal area, showing a mix of green land, brownish terrain, and blue water. A semi-transparent white rectangular box is centered over the image, containing the text 'Diapositiva de Transición'. Below the text is a solid black horizontal line.

Diapositiva de Transición

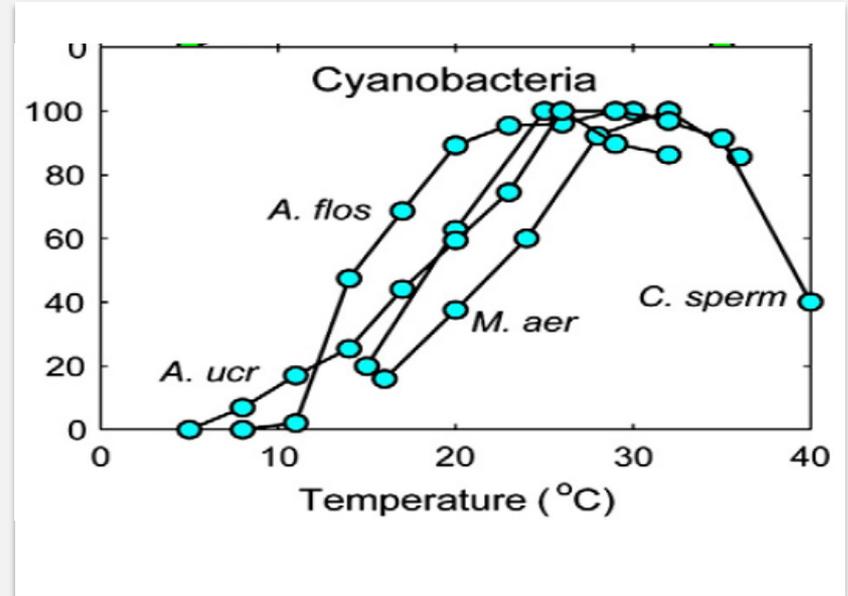
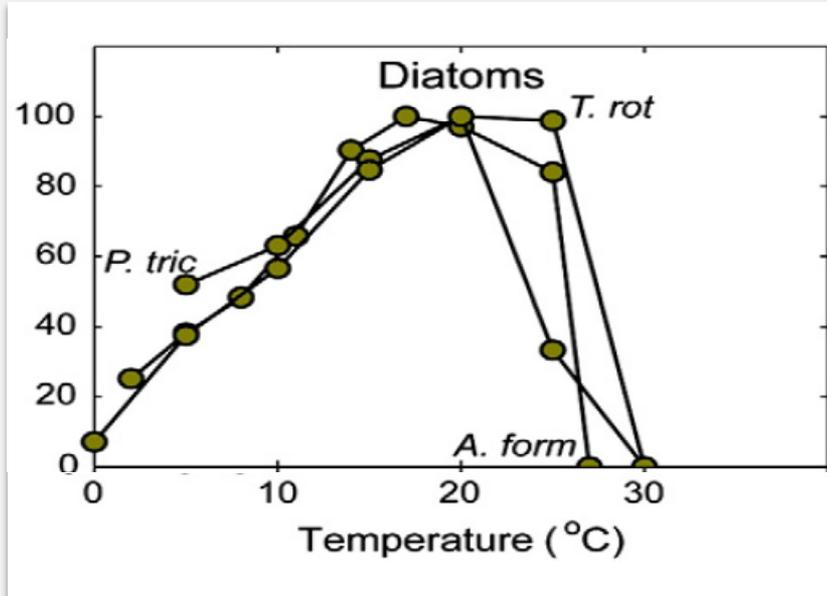
Nutrientes, especialmente fósforo



Downing et al. 2001

A las cianobacterias les gusta el agua tibia

Crecimiento fuerte > 20°C; Crecimiento mínimo < 15°C



Paerl et al., 2011 (Science of the Total Environment)

El Viento es Importante para las Floraciones Flotantes

Verh. Internat. Verein. Limnol.

19

784 – 791

Stuttgart, Oktober 1975

**The use of remote sensing to detect how wind influences
planktonic blue-green algal distribution**

A. J. HORNE and R. C. WRIGLEY

With 4 figures in the text

Una Respuesta Diferente



- Las diatomeas se hunden (verde oliva)



- Las cianobacterias (*Microcystis* en este caso) tienden a flotar

An aerial satellite photograph of a coastal area, showing a mix of green land, brownish terrain, and blue water. A semi-transparent white rectangular box is overlaid on the center of the image. Inside the box, the text "Diapositiva de Transición" is written in a black, sans-serif font. Below the text, a solid black horizontal line spans across the width of the text.

Diapositiva de Transición

Dónde Estamos con los Satélites

- Podemos encontrar floraciones de algas
- Las floraciones de cianobacterias son detectables, pero los métodos en uso actualmente producen muchos falsos positivos
 - Estamos examinando estrategias para reducir éstos
 - Sesgamos contra los falsos negativos
- Todos los sensores pueden encontrar espuma
- La mayoría de los sensores tienen limitaciones
 - Compromisos entre resoluciones: espacial, espectral, temporal

Hay Floraciones de Cianobacterias en Muchos Lugares

- El Báltico
- Lagos Grandes
 - ej. Lake Erie
- Lagos Pequeños



MERIS, 8 Oct 2011



Aqua MODIS, 5 July 2005

Imágenes Satelitales



Lago Erie, 28 de julio de 2015, Landsat OLI



Lago Erie, 5 de octubre de 2011, Landsat 5 TM

Comparación de Aplicaciones para CyanoHABs por Satélite

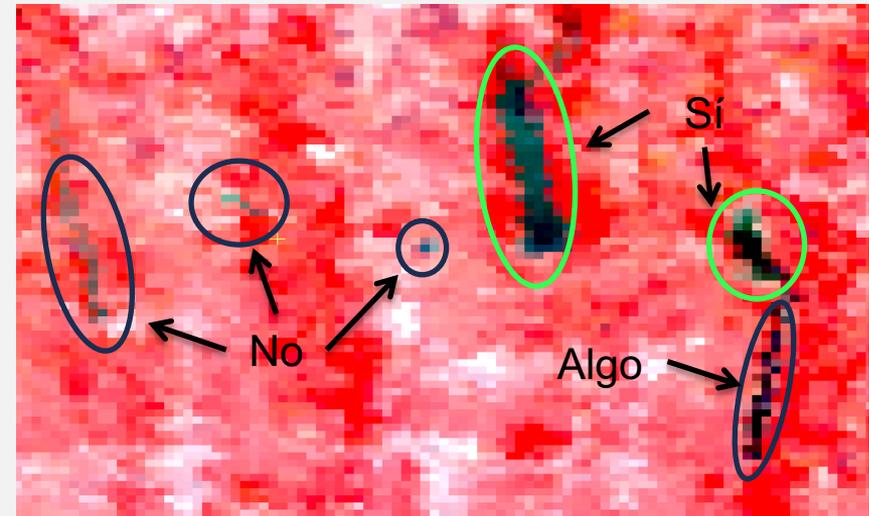
Satélite	Espacial	Temporal	Espectral Clave
MERIS (2002-12) OLCI Sentinel-3, 2016	300m <i>Término medio</i>	2 días <i>Buena</i>	10 (5 en el borde rojo) <i>Buena</i>
MODIS res alta Terra, 1999; Aqua 2002	250/500m <i>Término medio</i>	1-2 días <i>Buena</i>	4 (1 roja, 1 casi IR) <i>Marginal</i>
MODIS res baja Sea WiFS	1km <i>Baja</i>	1-2 días <i>Buena</i>	7-8 (2 en el borde rojo) <i>Término medio</i>
Landsat	30m <i>Buena</i>	8 o 16 días <i>Baja</i>	4 (1 red, 1 NIR) <i>Marginal</i>
Sentinel-2	20m <i>Buena</i>	10 días (5 días con 2 ^{do} satélite en 2017) <i>Posibilidad con 2^{do} satélite</i>	5 (1 red, 2 NIR, 1 en el borde rojo) <i>Potencial</i>

Radiación y Masas de Agua

- El color falso agudiza la distinción entre tierra y agua
- Los pixeles rojizos a la derecha incluyen tierras



- Los pixeles mixtos limitan la habilidad de monitorear masas de agua pequeñas
- Existe una regla de 3 pixeles para escenas individuales



Un Factor de Resolución Diferente: Escala de muestreo

Las muestras de campo tienen cierta incertidumbre frente a los satélites:

Compare el contenido de cualquier vaso elegido al azar con el promedio de todos los vasos en el Estadio de San Francisco;

Los satélites informan el promedio en el estadio entero; la muestra de agua es semejante a un solo vaso.



300 m

Un Factor de Resolución Diferente

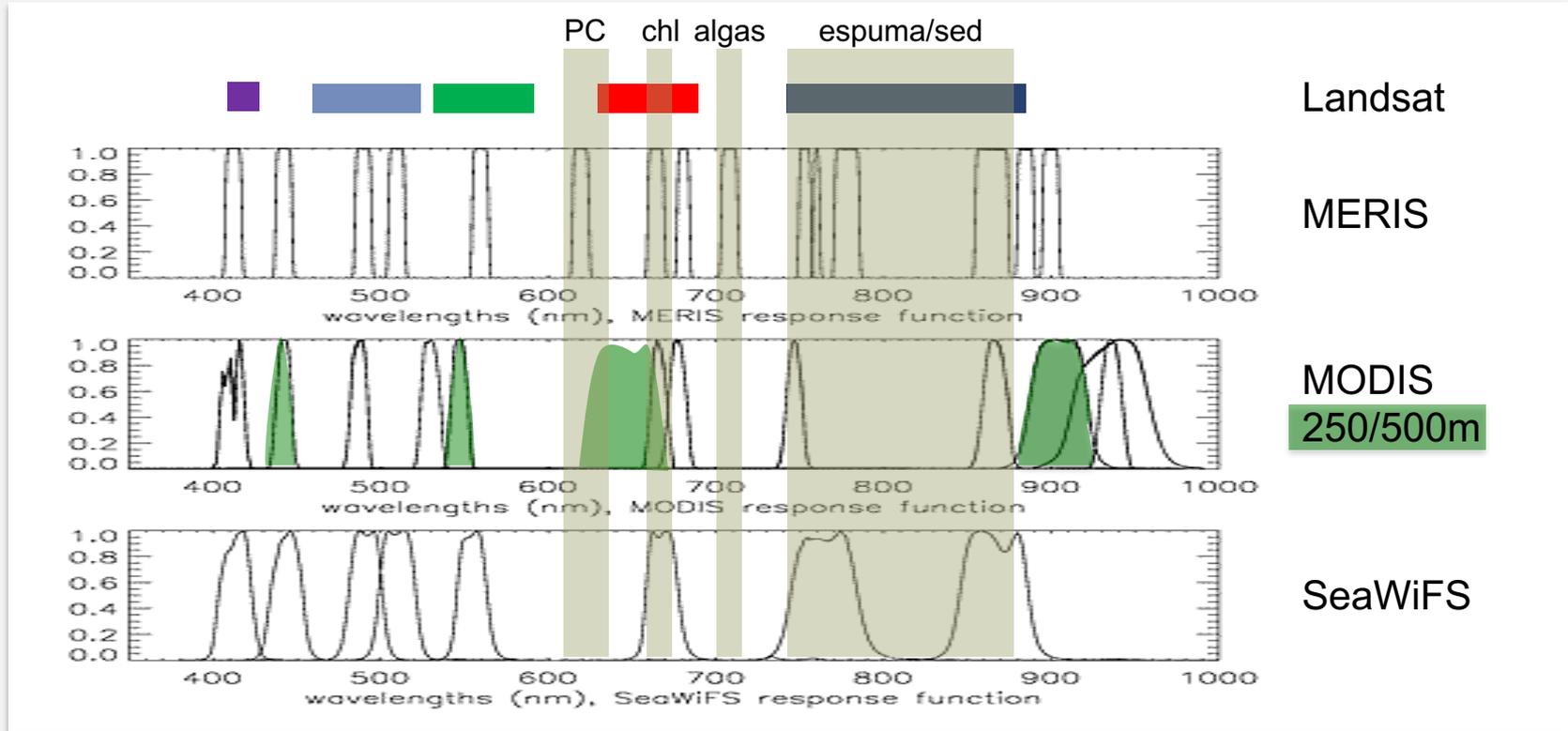
Escala de Muestreo

- Las muestras de campo tienen cierta incertidumbre frente a los satélites
- Compare el contenido de cualquier vaso elegido al azar con el promedio de todos los vasos en el Estadio de San Francisco
- Los satélites informan el promedio en el estadio entero -- la muestra de agua es semejante a un solo vaso

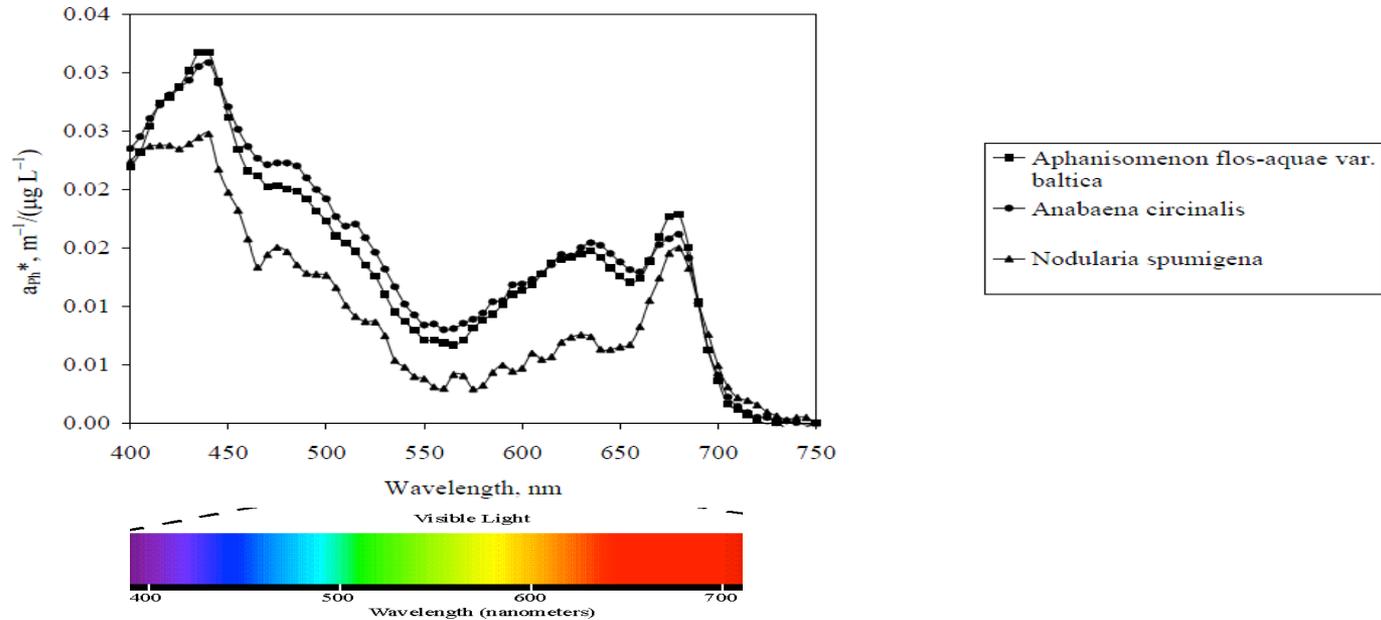


Palonsotcco / Wiki Commons / CC BY-SA 4.0

Bandas espectrales satelitales y floraciones turbias

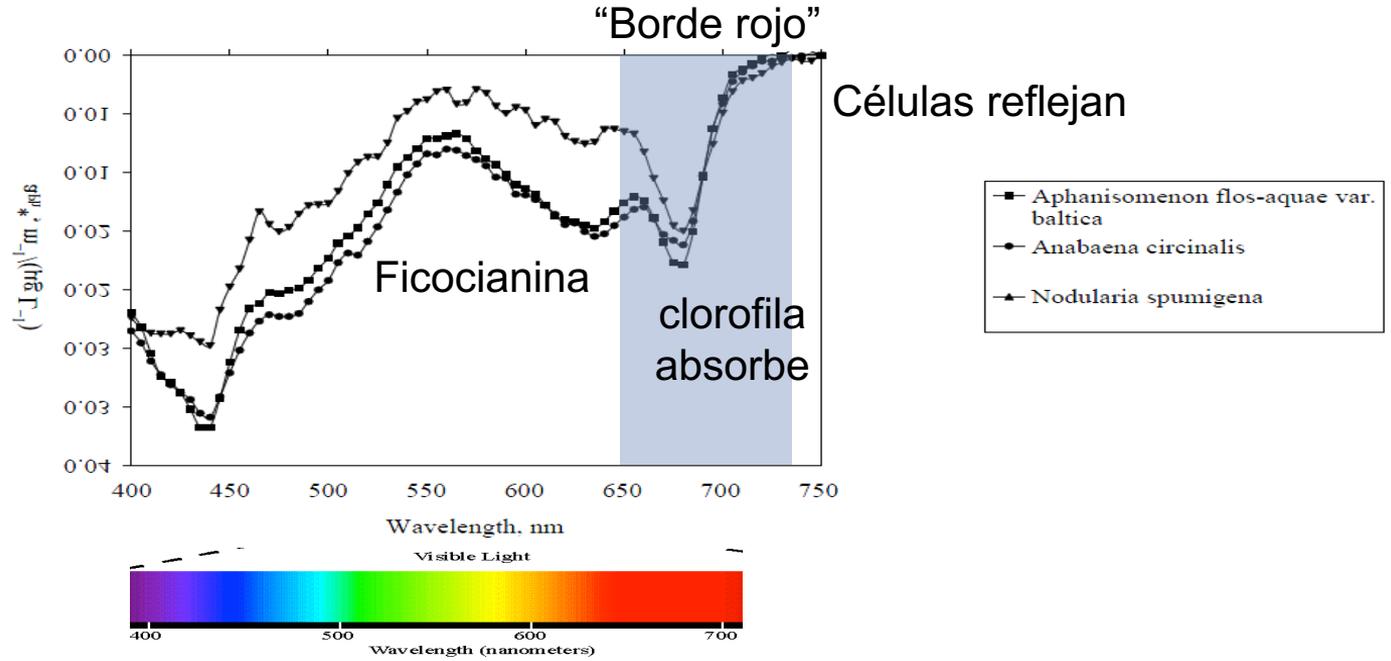


Cuando Las Sumamos para Cianobacterias



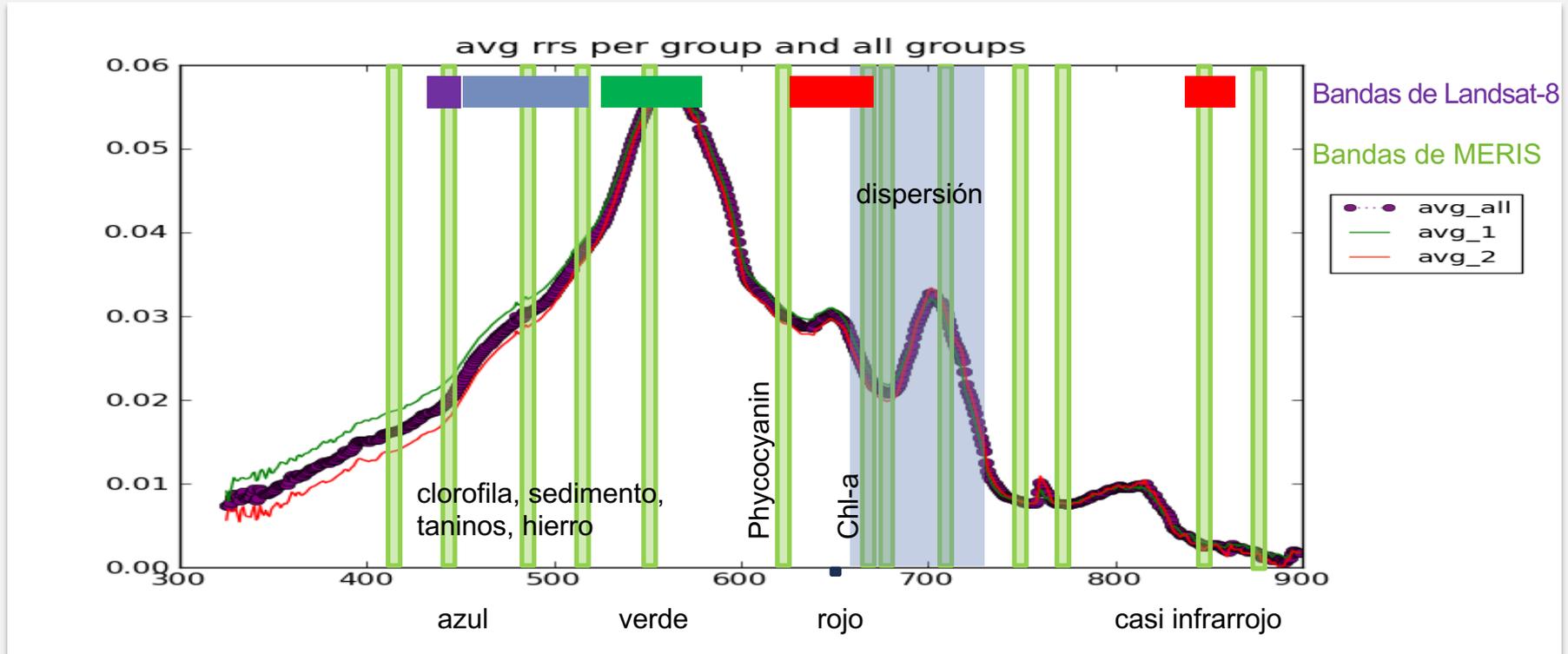
Kutser et al., 2006

La Reflectancia Es el Inverso de la Absorción



Kutser et al., 2006

Bandas de MERIS (y Landsat) en Espectros Acuáticos para *Microcystis*



Tipos de Algoritmos

Analíticos, Semi-Analíticos (Tasa), Biológico-Empíricos

Analíticos (en base a la resolución de ecuaciones físicas sencillas)

- Ficocianina, de Simis, Gones y otros
- QAA para la absorción (Lee y otros)
 - Resuelven por absorción en bandas de MODIS o SeaWiFS

Semi-analíticos (tasas)

- Tasas como 709 nm a 620 nm para PC, 709 a 665 para chl-a

Con buenos datos, son bastante efectivos; se ha demostrado que funcionan con la radiometría

SIN EMBARGO: el satélite depende de una corrección atmosférica excelente

Tipos de Algoritmos

Forma Espectral Biológica-Empírica

Forma espectral (derivada), en base a características biológicas, pero empírica

- CI (Wynne y Stumpf, se describe aquí)
- MCI (Gower et al.)
- MPH (Matthews y Odermatt)

Se puede utilizar sin corrección atmosférica.

Sólo necesita reflectancia (albedo) para asegurar consistencia (reflectancia debe ser la entrada para todo algoritmo)

El CI detecta menos floraciones que no son de cianobacterias y puede ser menos sensible al sedimento y vapor de agua.

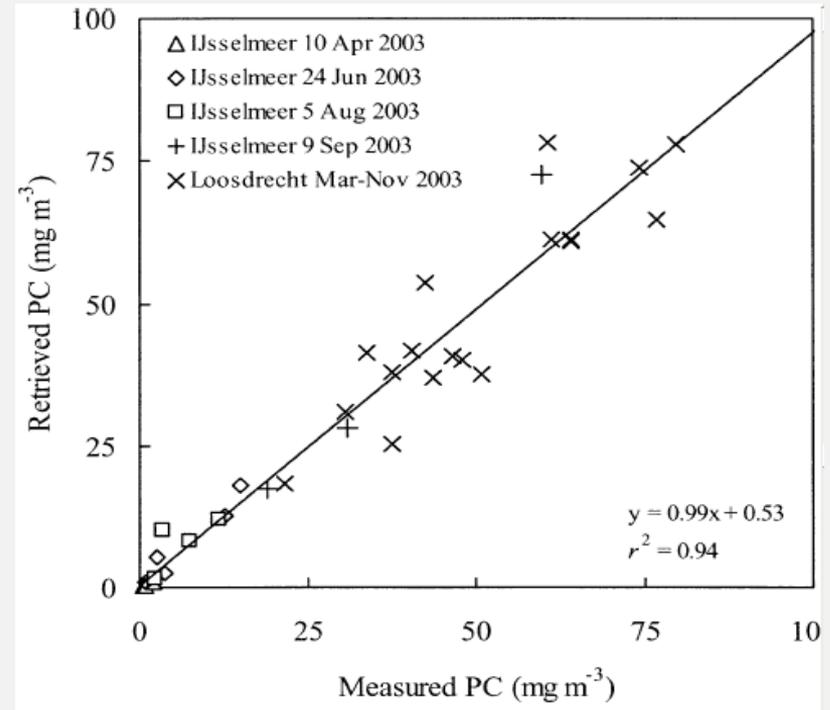
Óptica Analítica

Ejemplo de Cianobacteria

Resuelva $a_{pc}(620)$ de
 $R(709)/R(620)$

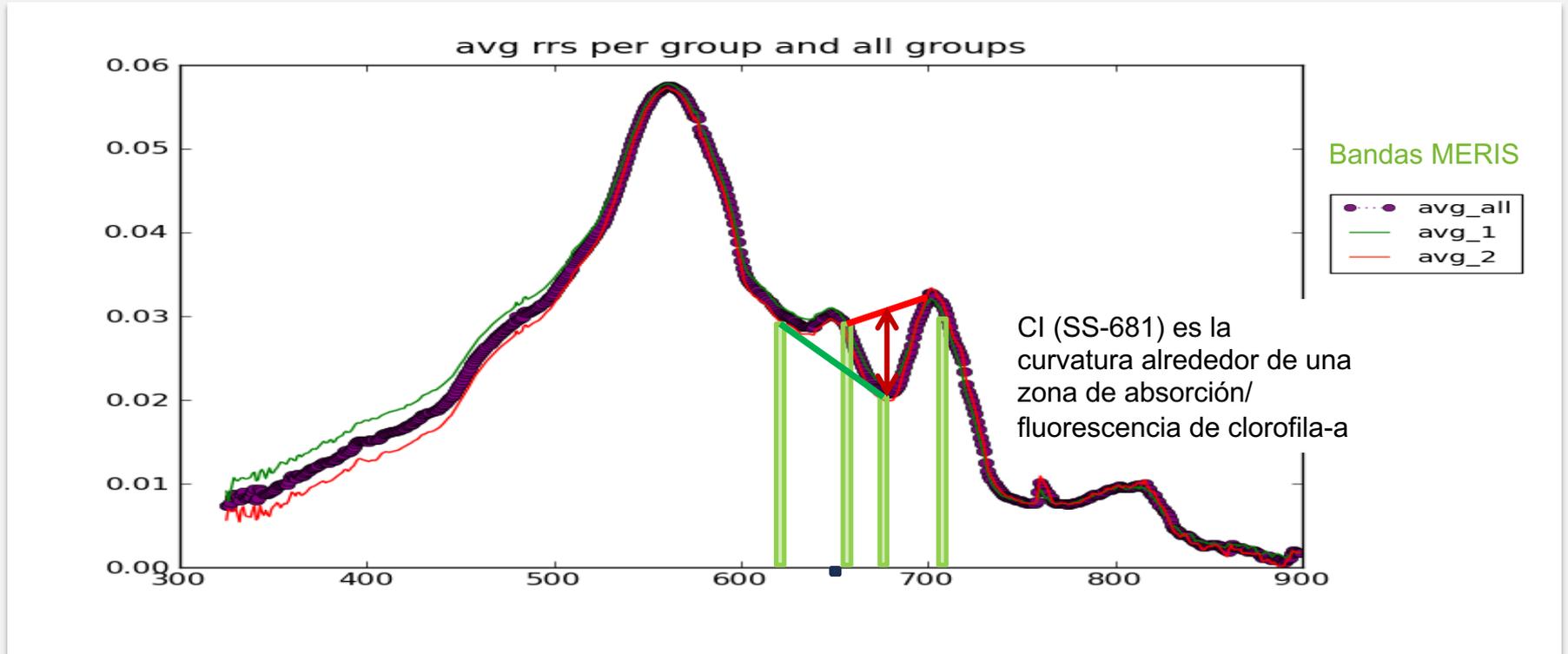
con b_b , a_w , a_{phi}

$$[PC] = a(620)_{pc} / a_{pc}^*(620)$$



Simis et al. (L&O, 2005) Netherlands, MERIS

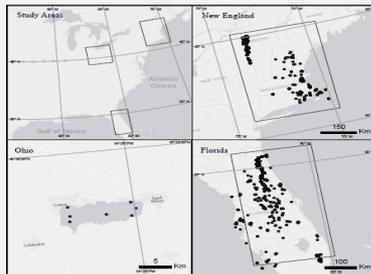
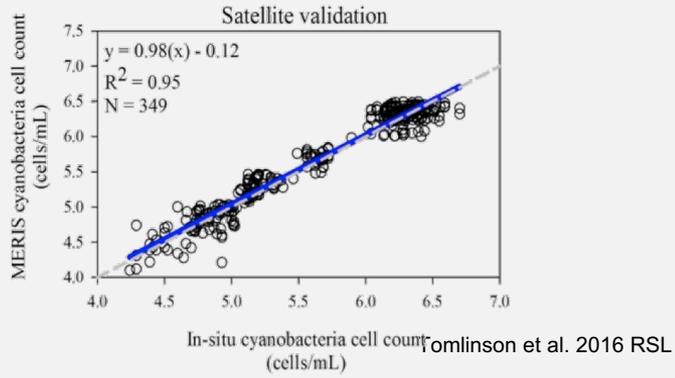
CI/SS681, Floraciones Intensas Mayor Sensibilidad a Cianobacterias



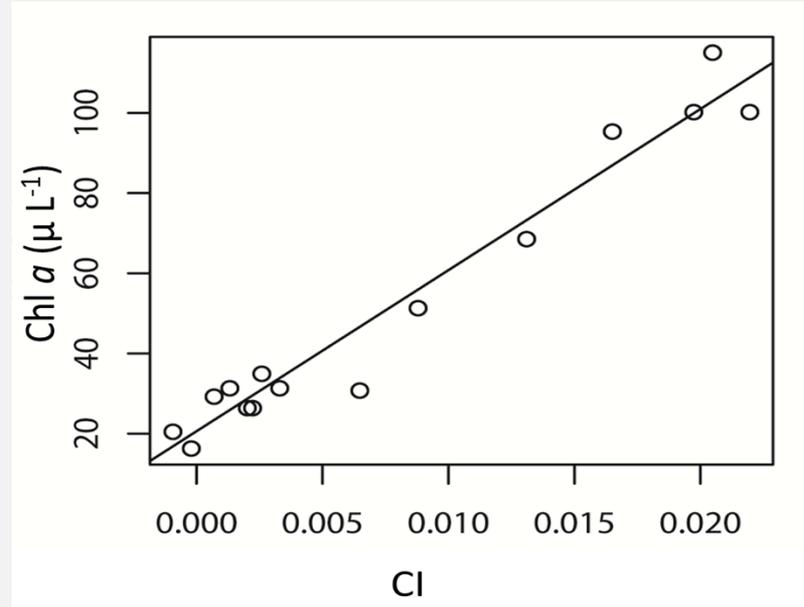
Ejemplo de cuantificación para el CI

Lago Erie Transferido a Varios Otros Lagos

Relación con Chl-a



Lunetta et al., 2014

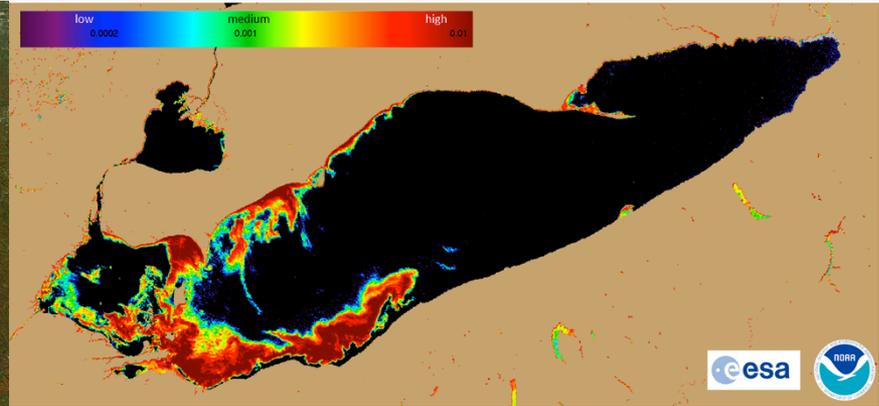


Índice de Cianobacterias (Cyanobacteria Index o “CI” en inglés)

Longitudes de Onda Adicionales Dan el CI – Equivale la Concentración



MODIS Color Real, 9 Oct 2011

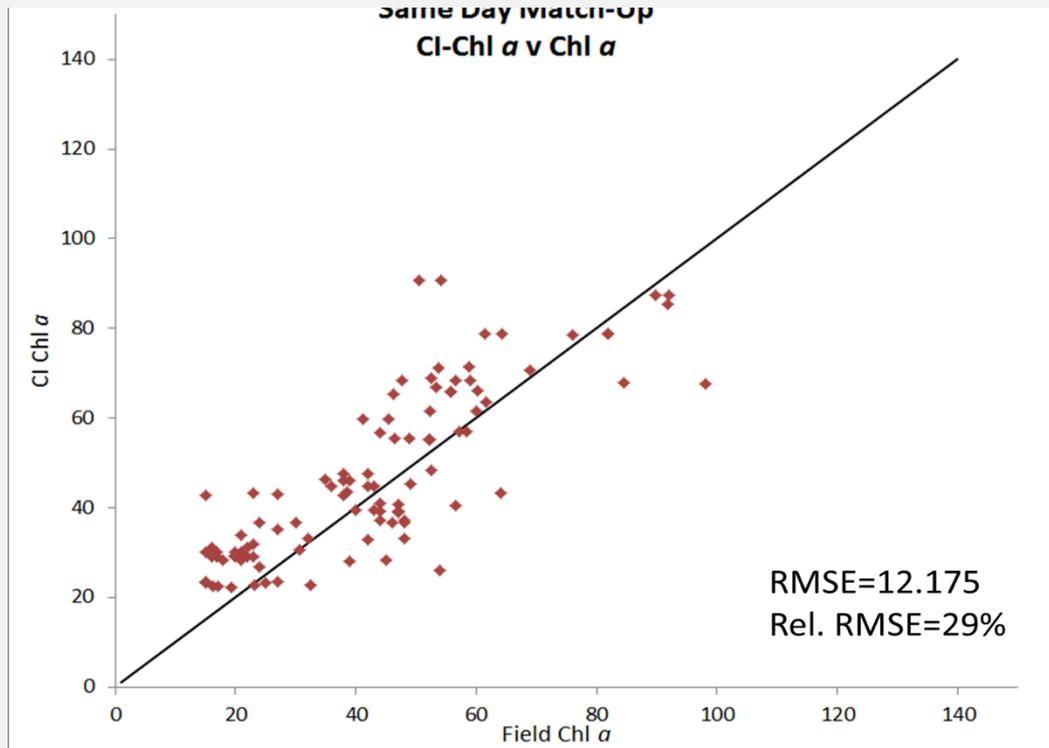


Índice Ciano. (CI) 8 Oct 2011

Concentración superficial (hasta 1 m). No depende de la espuma

Indicador de Biomasa

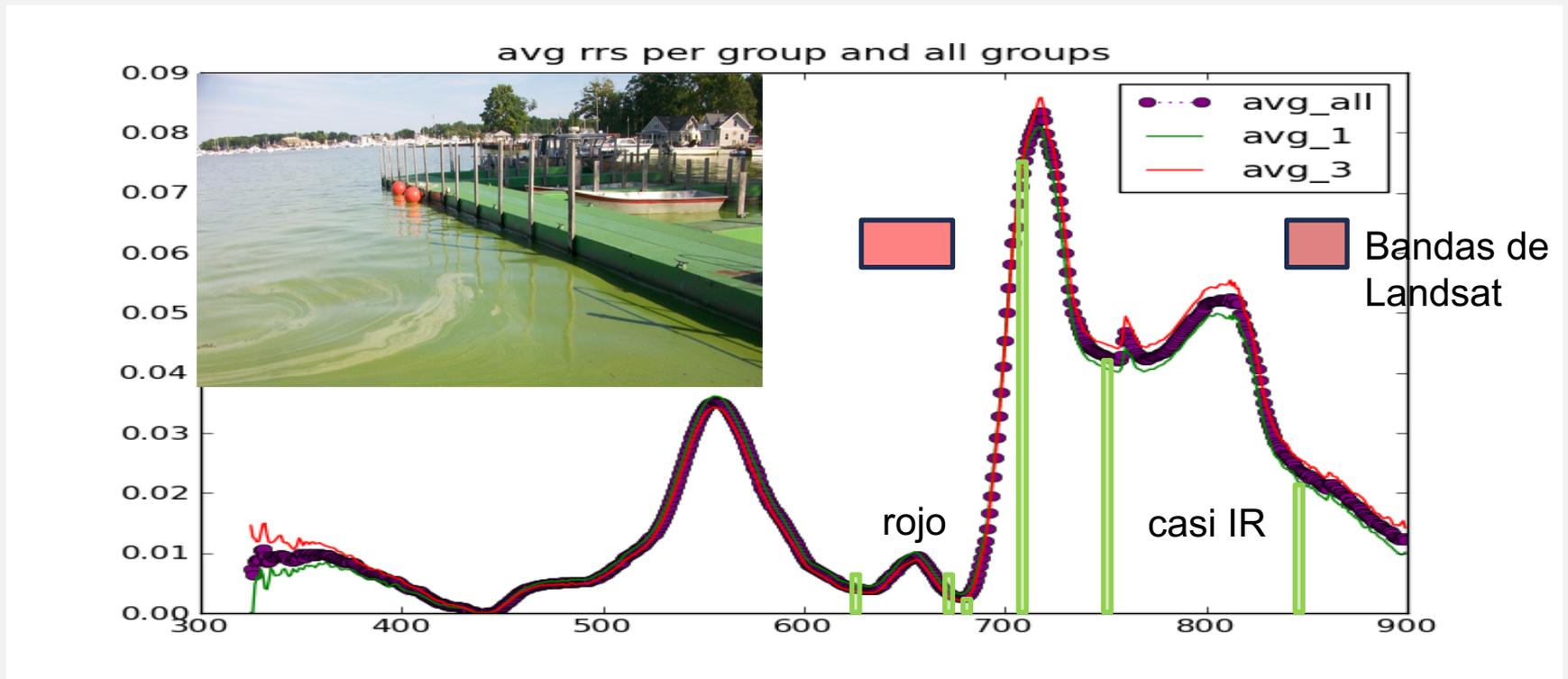
Lagos Floridanos



Datos de LakeWatch y MERIS
Tomlinson et al., 2016

Espectros de la “Espuma” de la *Microcystis*

Elevado en Casi IR, Bajo en Rojo



Color Real

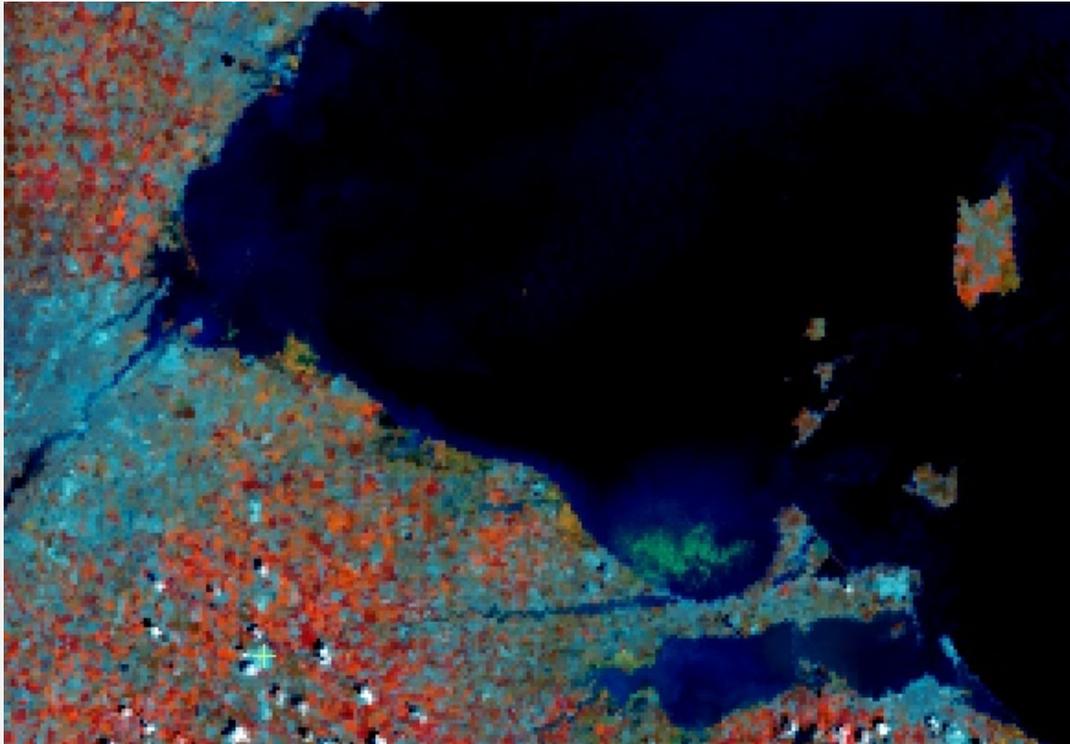
Encuentre la Espuma

- Nota: el color real es valioso pero difícil de interpretar



MODIS True Color, 28 Aug 2010

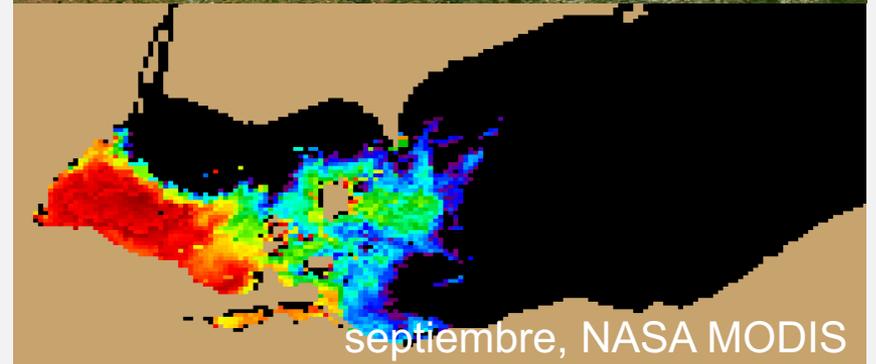
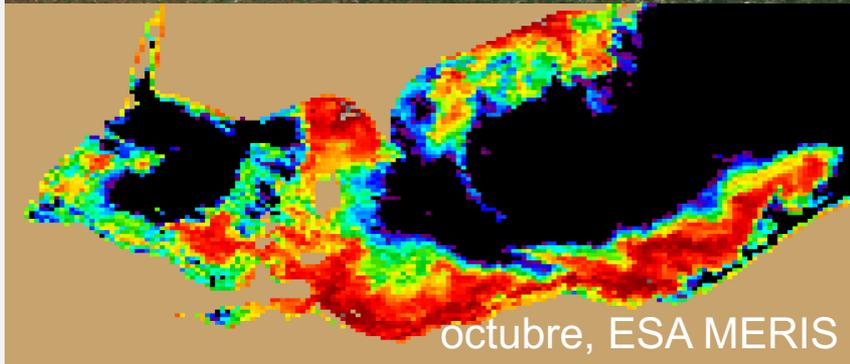
Casi IR y Rojo



A satellite-style background image showing a mix of green land, brown terrain, and white clouds. A semi-transparent light gray rectangular box is centered over the image, containing the text 'Diapositiva de Transición' and a horizontal line below it.

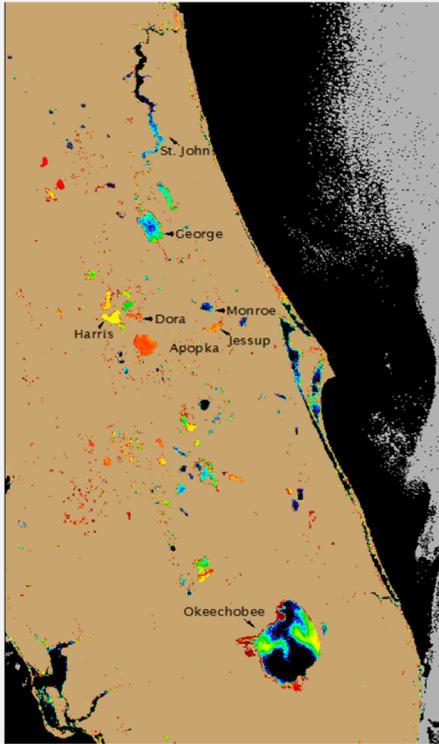
Diapositiva de Transición

Análisis de una Floración

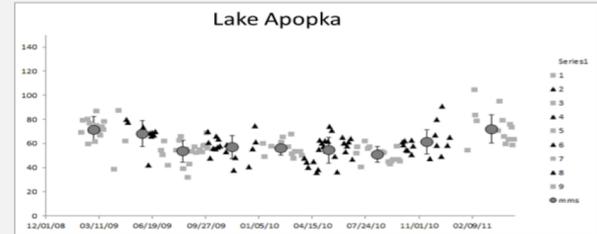


Seguimiento de Biomasa en Florida

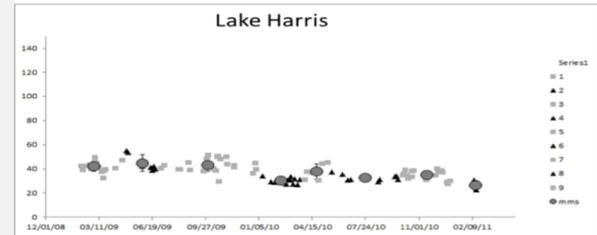
Durante 3 Años



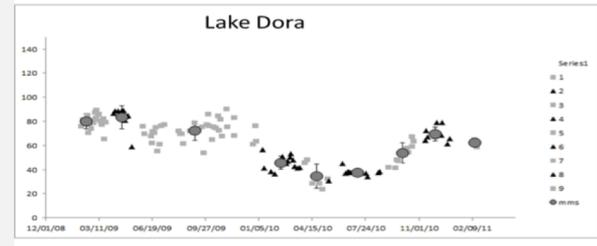
Alta



Medio Baja

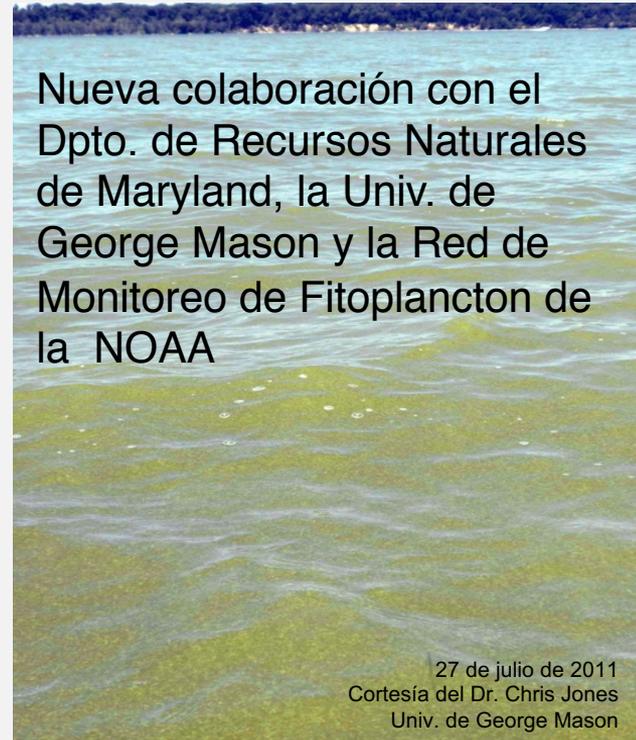
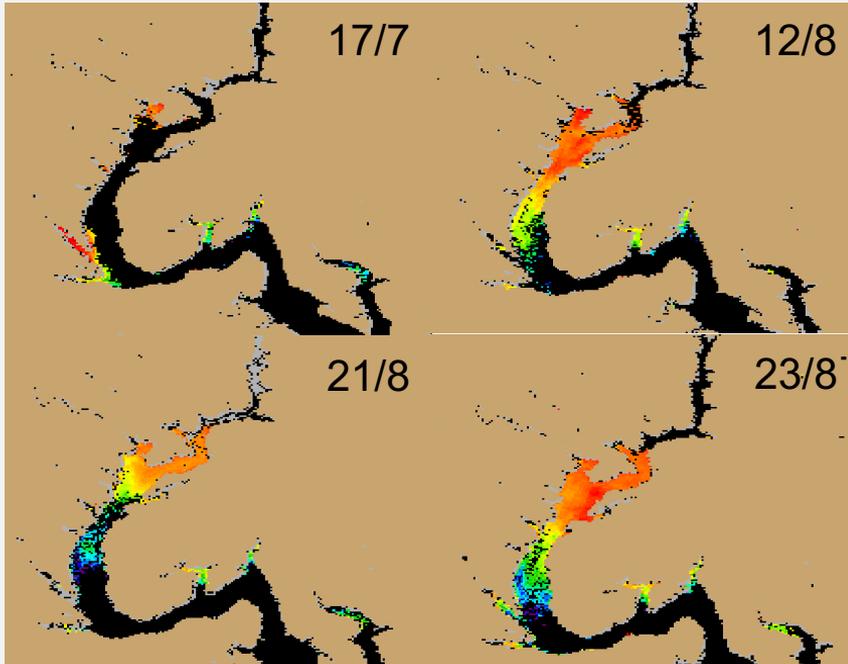


Variable

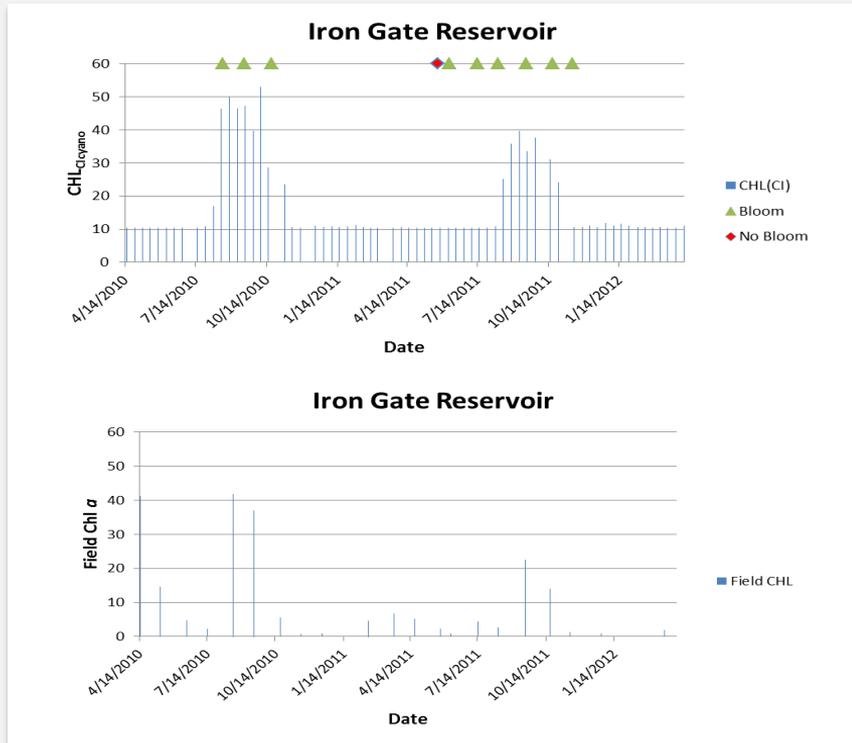


Floración de *Microcystis* en el río Potomac, 2011

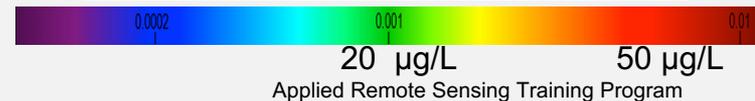
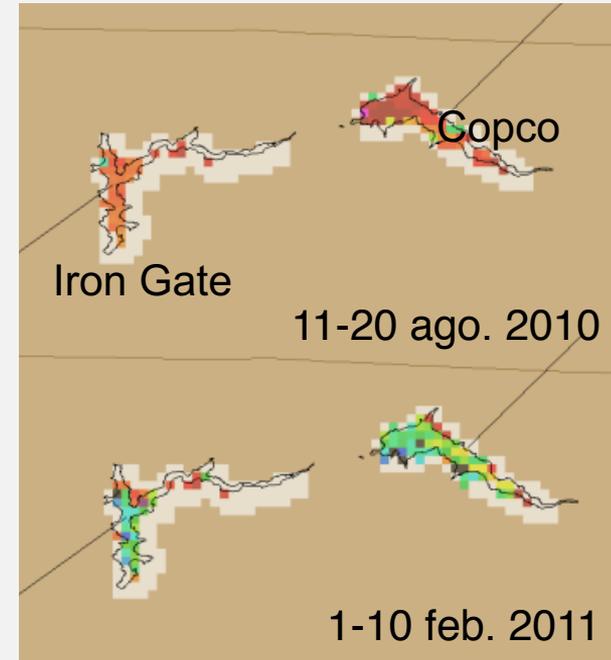
CI Mejorado



Fenología, Reservorios del Río Klamath (California)



Compuestos de MERIS



El Viento es Importante para las Floraciones Flotantes

Verh. Internat. Verein. Limnol.

19

784 - 791

Stuttgart, Oktober 1975

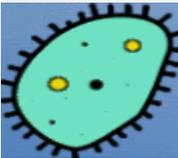
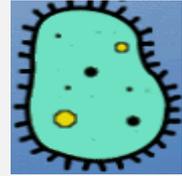
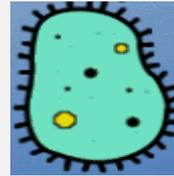
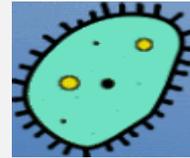
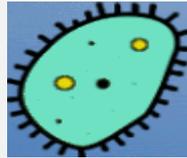
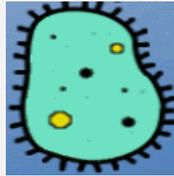
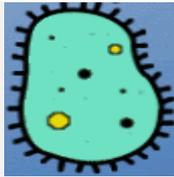
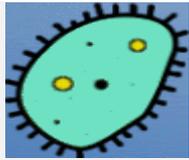
**The use of remote sensing to detect how wind influences
planktonic blue-green algal distribution**

A. J. HORNE and R. C. WRIGLEY

With 4 figures in the text

Diagrama Conceptual

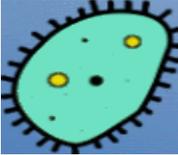
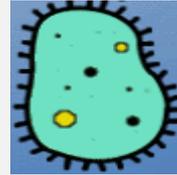
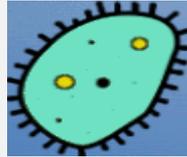
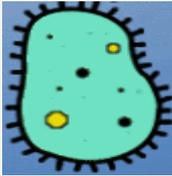
Sin Viento



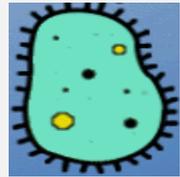
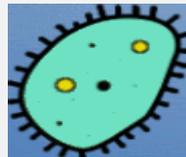
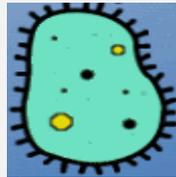
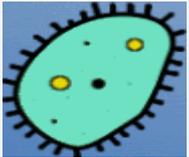
Espesor óptico

Diagrama Conceptual

Con Viento

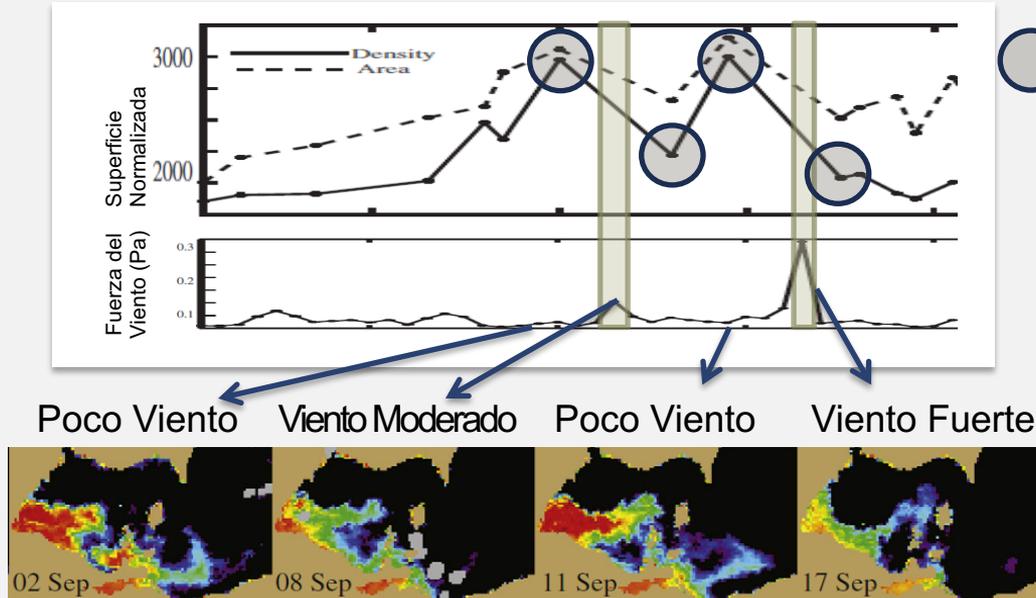


Espesor óptico



Floración del Lago Erie

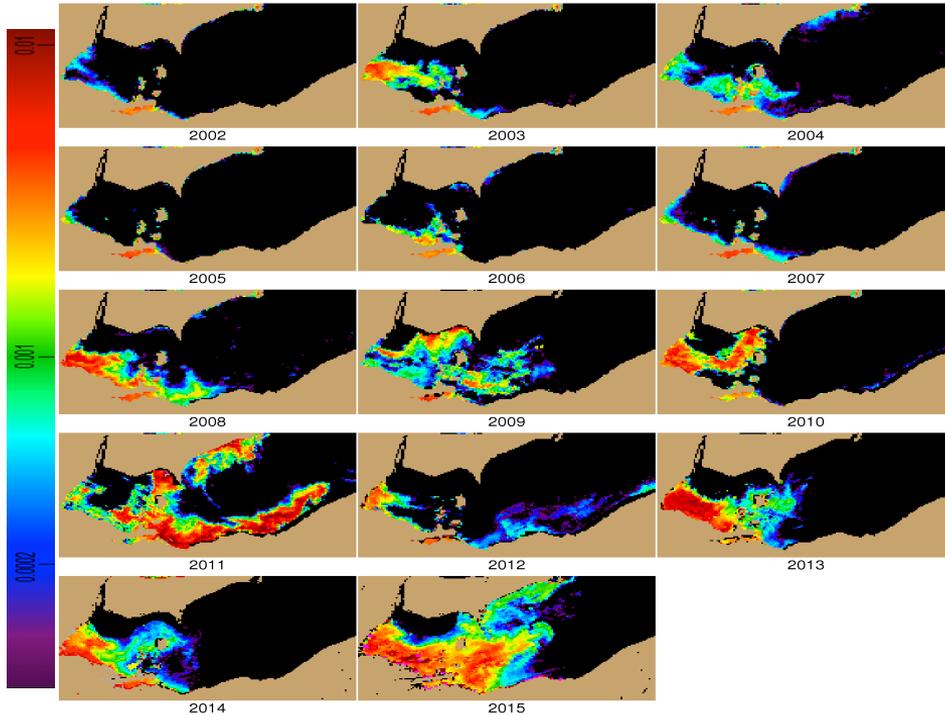
- Los satélites ven o la espuma superficial o la concentración superficial
- Cuidado al “promediar” floraciones flotantes



○ Totales en las imágenes

Figura de Wynne et al., 2013

La del Lago Erie de 2015 Fue Grave



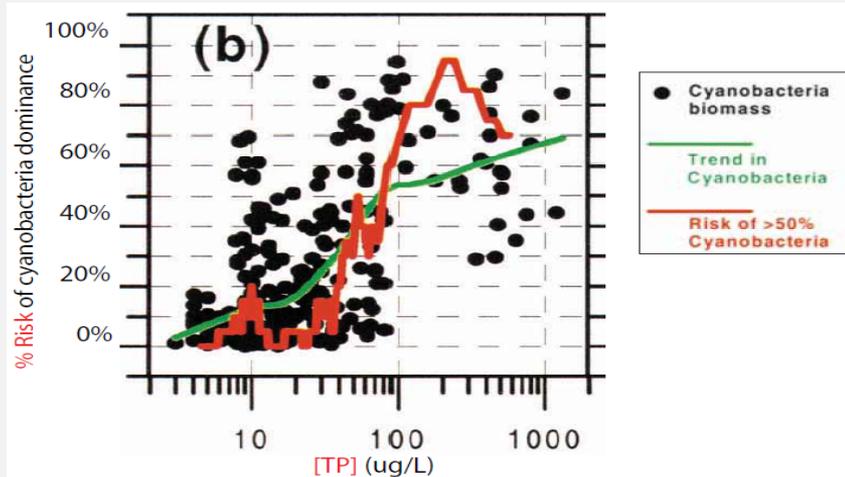
The Columbus Dispatch

Lake Erie's green monster returns

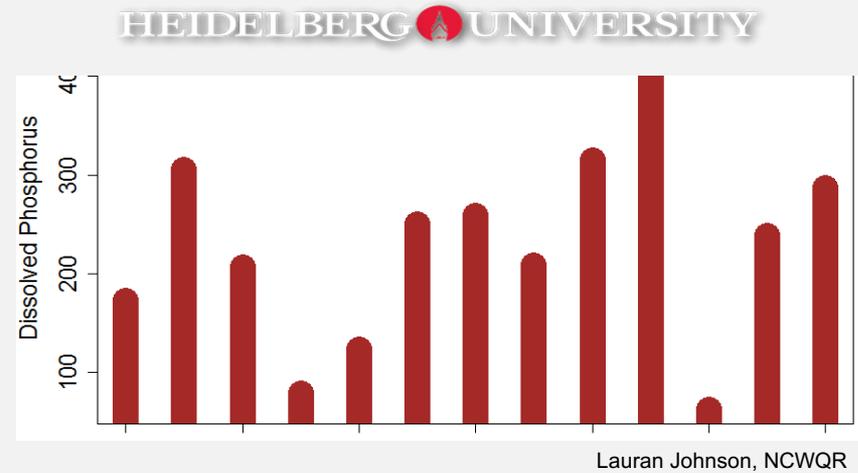
Algae back with a vengeance in Lake Erie a year after Toledo's water crisis; prognosis poor

Fósforo como Impulsador de Floraciones de Cianobacterias en Lagos

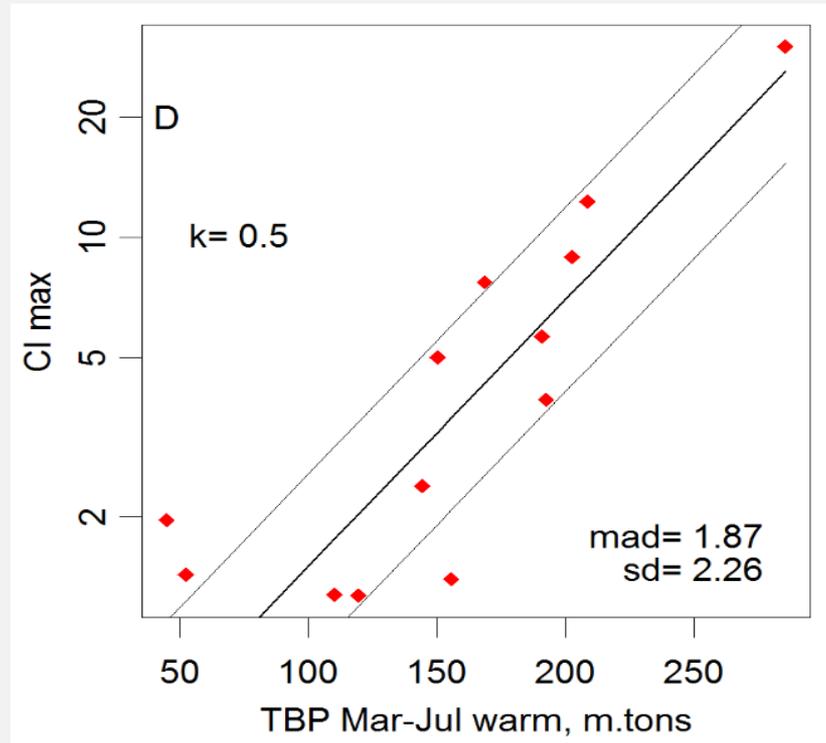
Lago Erie, Carga Primavera del Río Maumee



Downing et al., 2011



Biomasa de Cianobacterias Relacionada con la carga de Fósforo Bio-Disponible Total (TBP por sus siglas en inglés) del Río Maumee, Lake Erie



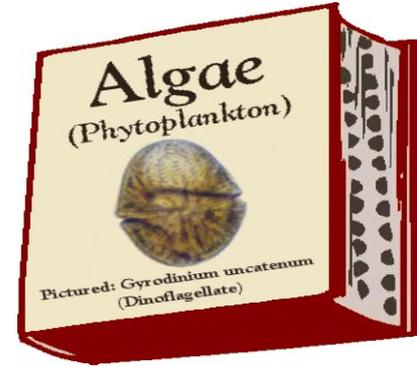
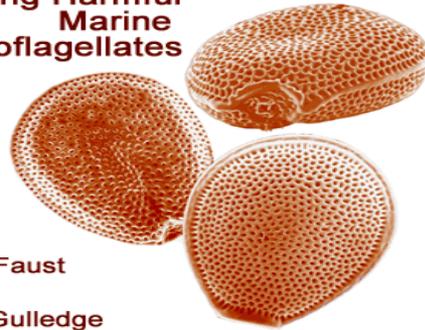
Stumpf et al., In Review

Lugares con Más Información sobre el Fitoplancton



Identifying Harmful Marine Dinoflagellates

by
Maria A. Faust
and
Rose A. Gullede



oceandatacenter.ucsc.edu/PhytoGallery/index.html

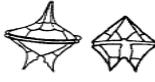
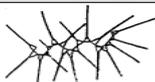
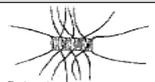
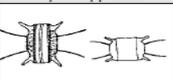
<http://botany.si.edu/references/dinoflag/>

<http://www.dnr.state.md.us/bay/cblife/algae/index.html>

Target Species

COMMON PHYTOPLANKTON KEY

OTHER COMMON PLANKTON (non-phyto)

<i>Alexandrium</i> spp. AL  25-46 µm	<i>Gymnodinium</i> spp. GY  24-50 µm	<i>Gonyaulax spinifera</i> GS  25-50 µm	<i>Protoperidinium</i> spp. PT  50-95 µm	<i>Scropsiella</i> spp. SC  20-37 µm	<i>Coccinodiscus</i> spp. CO  40-500 µm	<i>Odontella</i> spp. OD  45-70 µm	<i>Larval Glam</i> LC  Generally Large
<i>Dinophysis norvegica</i> DN  48-80 µm	<i>Dinophysis acuminata</i> DA  40 - 50 µm	<i>Dinophysis tripos</i> DT  40 - 120 µm	<i>Asterionellopsis</i> spp. AS  30-150 µm	<i>Chaetoceros</i> spp. CH  10 - 53 µm	<i>Chaetoceros socialis</i> CS  3-15 µm	<i>Biddulphia</i> spp. BD  60 - 160 µm	<i>Rotifer</i> spp. RO  Generally Large
<i>Prorocentrum lima</i> PL  31-47 µm	<i>Prorocentrum micans</i> PM  35-70 µm	<i>Ceratium fusus</i> CF  200-540 µm	<i>Ceratium lineatum</i> CL  100-130 µm	<i>Ceratium longipes</i> CP  150-250 µm	<i>Dictyocha</i> spp. DO  10-45 µm	<i>Fragilaria</i> spp. FR  10 - 70 µm	<i>Pollen Grain</i> PG  Generally Large
<i>Pseudonitzschia</i> PS  64-117 µm	<i>Thalassionema</i> spp. TA  16 - 90 µm	<i>Thalassiosira</i> spp. TL  12-39 µm	<i>Nitzschia</i> spp. NZ  60 - 125 µm	<i>Skeletonema</i> spp. SK  2-21 µm	<i>Ditylum</i> spp. DM  80 - 130 µm	<i>Leptocylindrus</i> spp. LP  30 - 75 µm	<i>Crab Zoea</i> CZ  Generally Large
Species Name CODE (Guide to using key) illustration of organism Size Range (in µm)	<i>Rhizosolenia</i> spp. RH  25-57 µm	<i>Gyrodinium</i> spp. GY  110 - 175 µm	<i>Navicula</i> spp. NV  32-49 µm	<i>Melosira</i> spp. ML  10-50 µm	<i>Guinardia</i> spp. GN  60 - 160 µm	<i>Eucampia</i> spp. EU  10-33 µm	<i>Tintinnid</i> spp. TN  Generally Large

REFERENCES USED

Cupp, E.E. 1943. Marine Plankton Diatoms of the West Coast of North America, University of California Berkeley
 McComaughy, B.H. 1970. Introduction to Marine Biology, C.V. Mosby St. Louis
 Smith, D.L., 1997. A Guide to Marine and Coastal Plankton and Marine Invertebrate Larvae, Kendall/Hunt Dubuque.
 Tomas, C.R. 1997. Identifying Marine Phytoplankton. Academic Press/Harcourt Brace San Diego.
 van den Hoek, C., Mann D.G. & Jahns, H.M. 1993. Algae; an introduction to phycology. Cambridge University Press.
<http://www.marbot.gu.sss/SSSHome.htm>

