



# Eutrofización, estados alternativos y otros tópicos interesantes

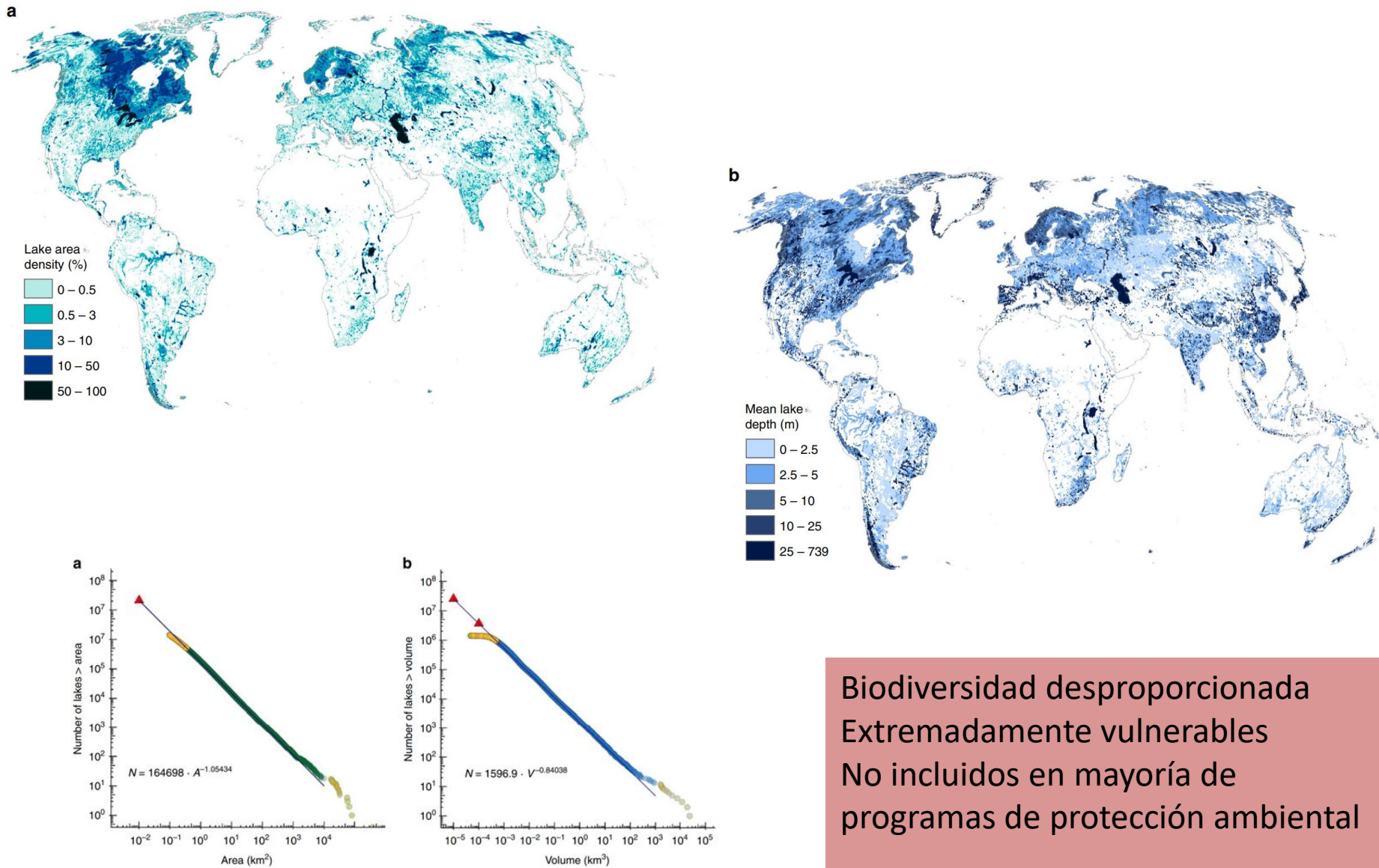
**Mariana Meerhoff**

**Depto Ecología y Gestión Ambiental CURE, UDELAR**

*Curso: Eutrofización y biogeoquímica ambiental del P (2024)*

La mayor parte de los lagos del mundo  
son pequeños y someros





**Figure 3 | Global size and volume distributions of natural lakes using a Pareto model.** Distributions are plotted as the total number of global lakes larger than a given surface area (a) or volume (b) derived from data contained in HydroLAKES. Yellow points represent data that were not included for fitting the log-log regression. Red triangles represent extrapolated values based on the log-log regression. See Methods for further explanations.

Biodiversidad desproporcionada  
Extremadamente vulnerables  
No incluidos en mayoría de  
programas de protección ambiental

# **Marco conceptual clave en lagos someros:** **Estados Estables Alternativos**

**Términos clave:**

**Mecanismos "buffer"**

**Histéresis**

**Atractores, Valores umbrales y "Tipping points"**

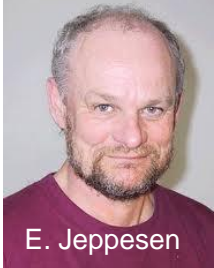
**Transiciones críticas/Catastróficas**

**Estabilidad, Resistencia y Resiliencia**

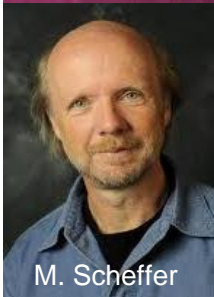
# Teoría de los Estados *Estables Alternativos*



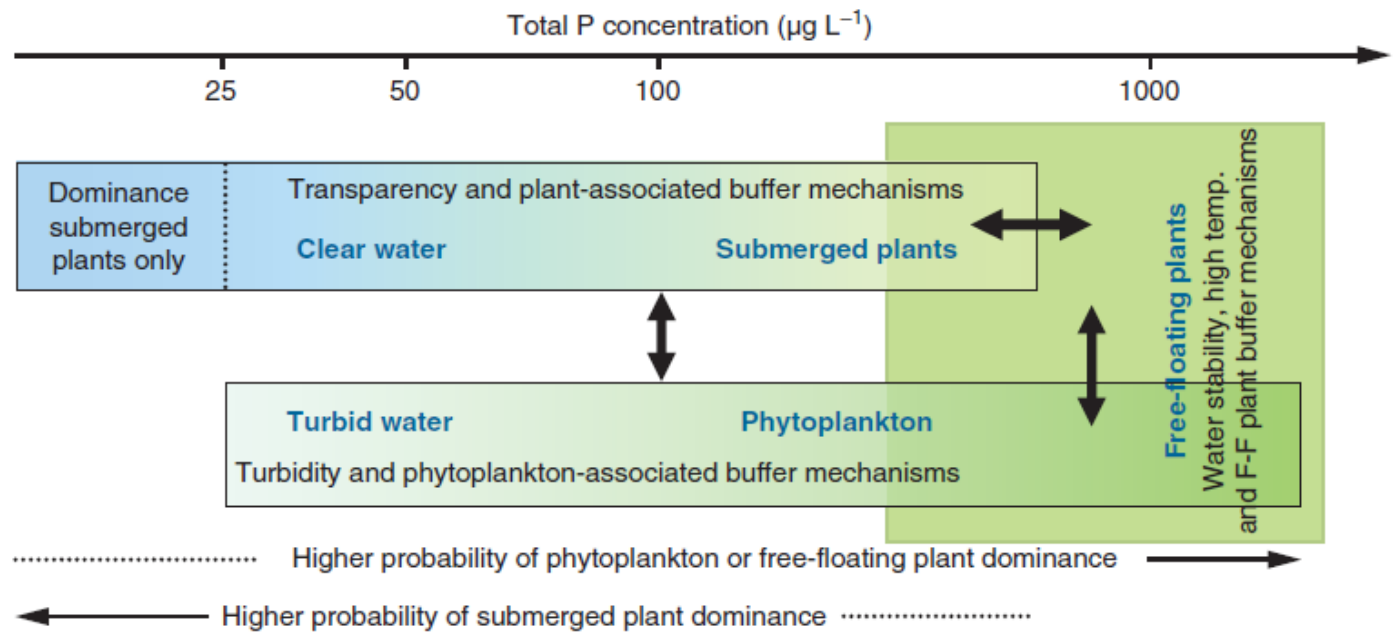
B. Moss



E. Jeppesen



M. Scheffer



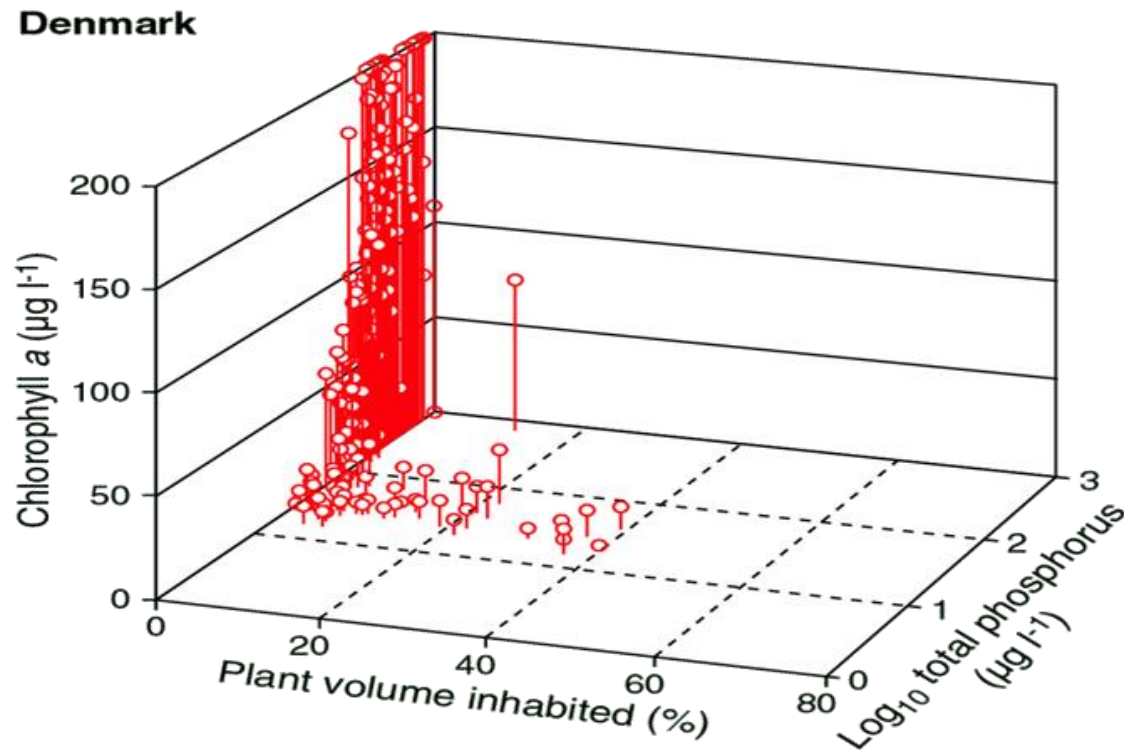


## Paréntesis, a no olvidar:

Cantidades de P que pueden ser bajas o incluso insignificantes desde un punto de vista agronómico,  
son **altísimas desde un punto de vista ecológico acuático.**

Hablamos de órdenes de magnitud...

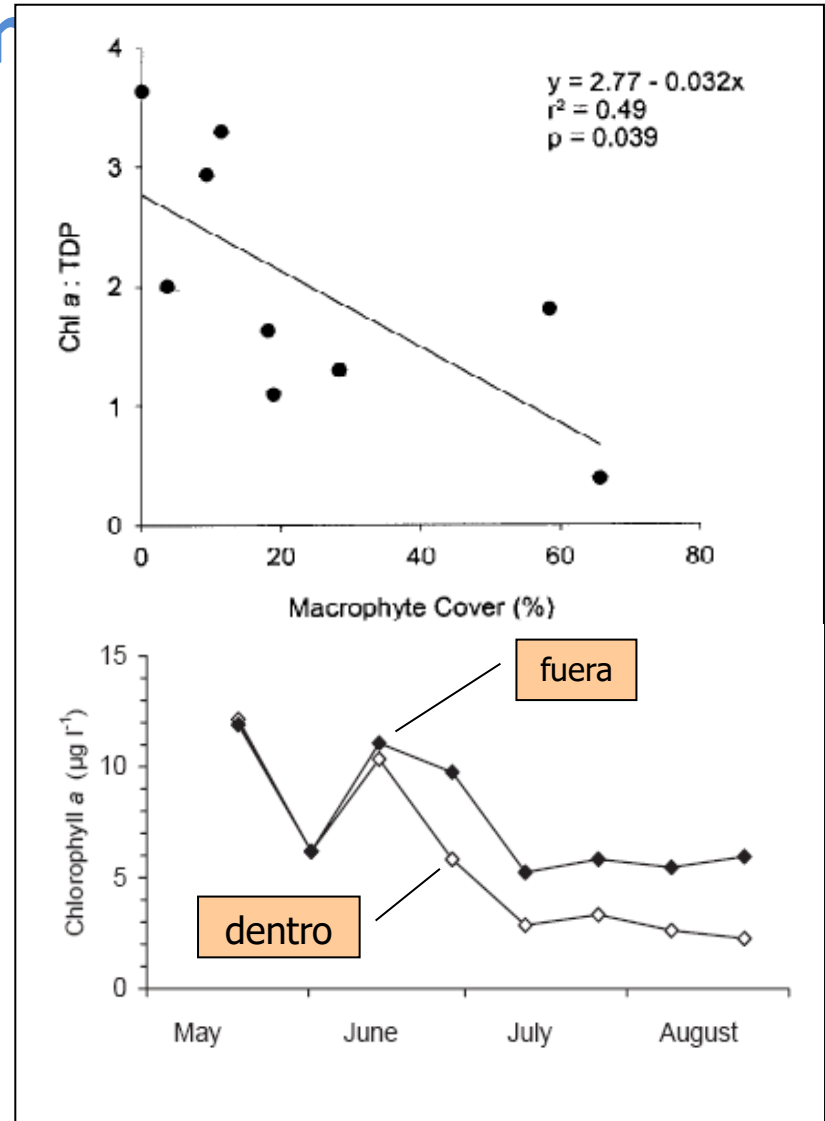
# Sobre un amplio rango intermedio de nutrientes, los lagos (*templados*) estarán dominados por plantas o por fitoplancton



# Efectos de plantas sumergidas sobre fitoplan

**Menor biomasa fitoplanctónica (Chl-a) con aumento de cobertura de plantas, ante igual concentración de fósforo (set de lagos)**

**Menor biomasa fitoplanctónica (Chl-a) dentro de parches de plantas en mismo lago**







# Probabilidad y estabilidad

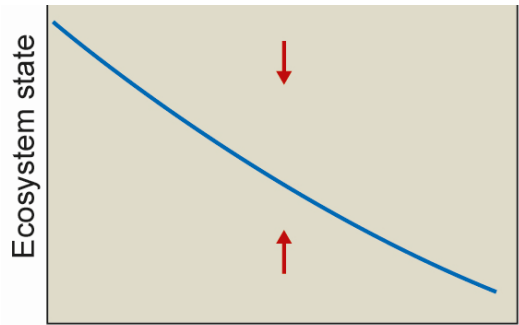


Agua  
clara

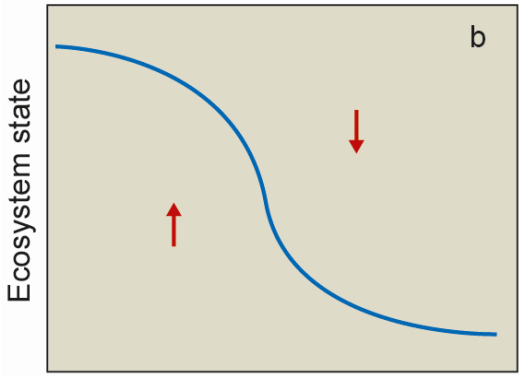
Agua  
turbia



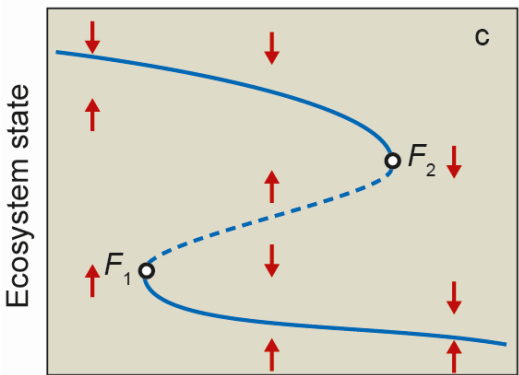
# Estados Alternativos: histéresis y estabilidad



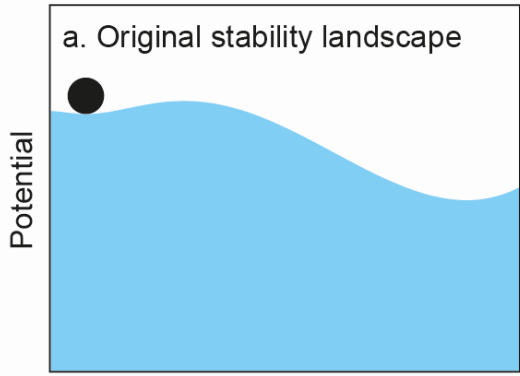
Conditions



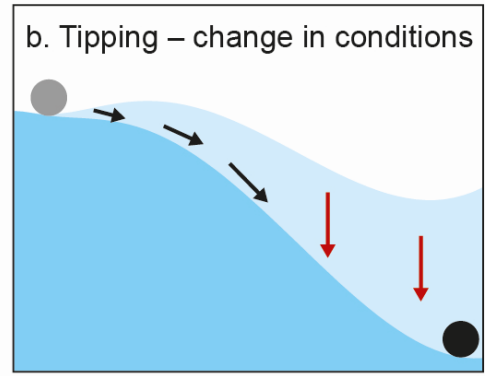
Conditions



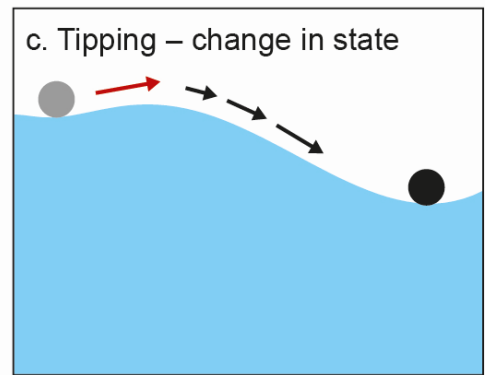
Conditions



Ecosystem state

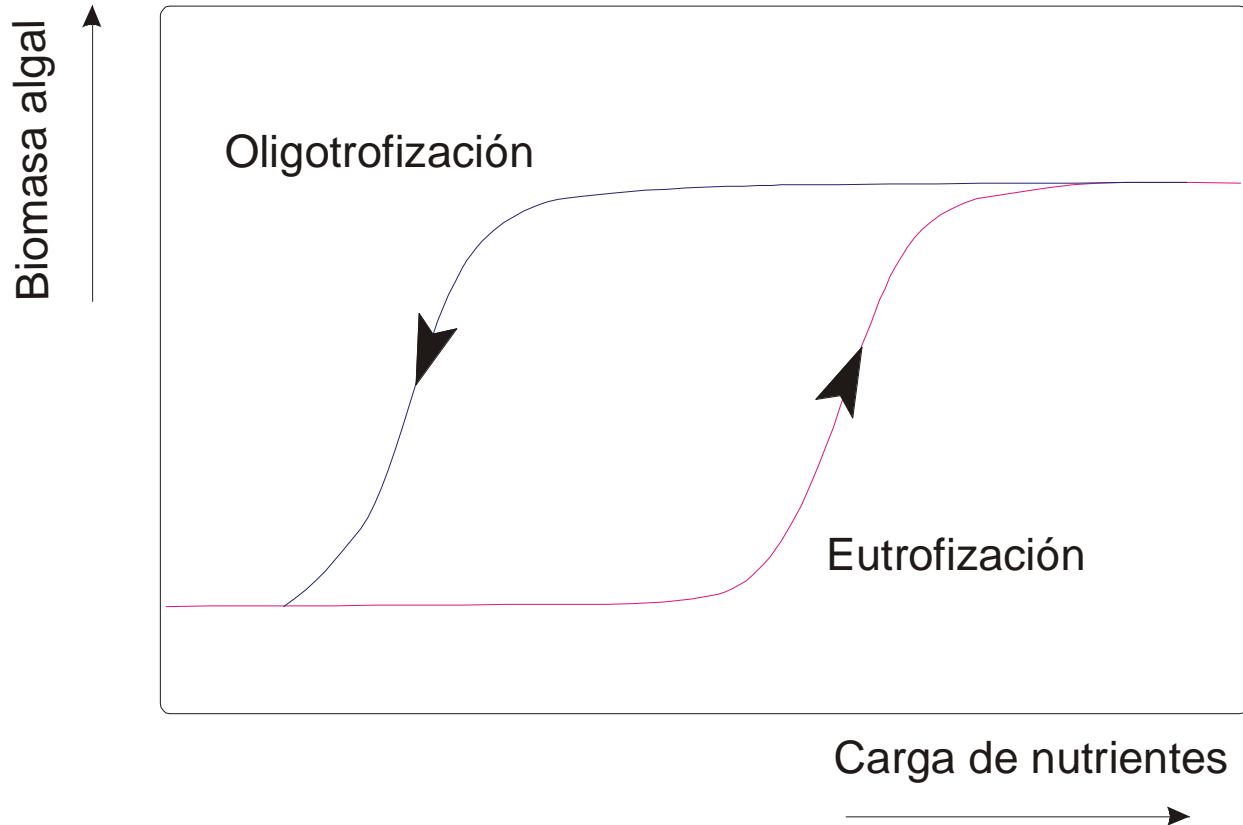
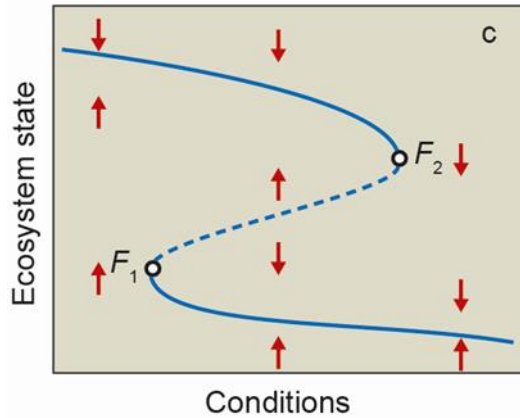


Ecosystem state



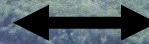
Ecosystem state

# Estados Alternativos: Histéresis, Resistencia, Resiliencia



Baja disponibilidad  
natural  
de nutrientes (N & P)

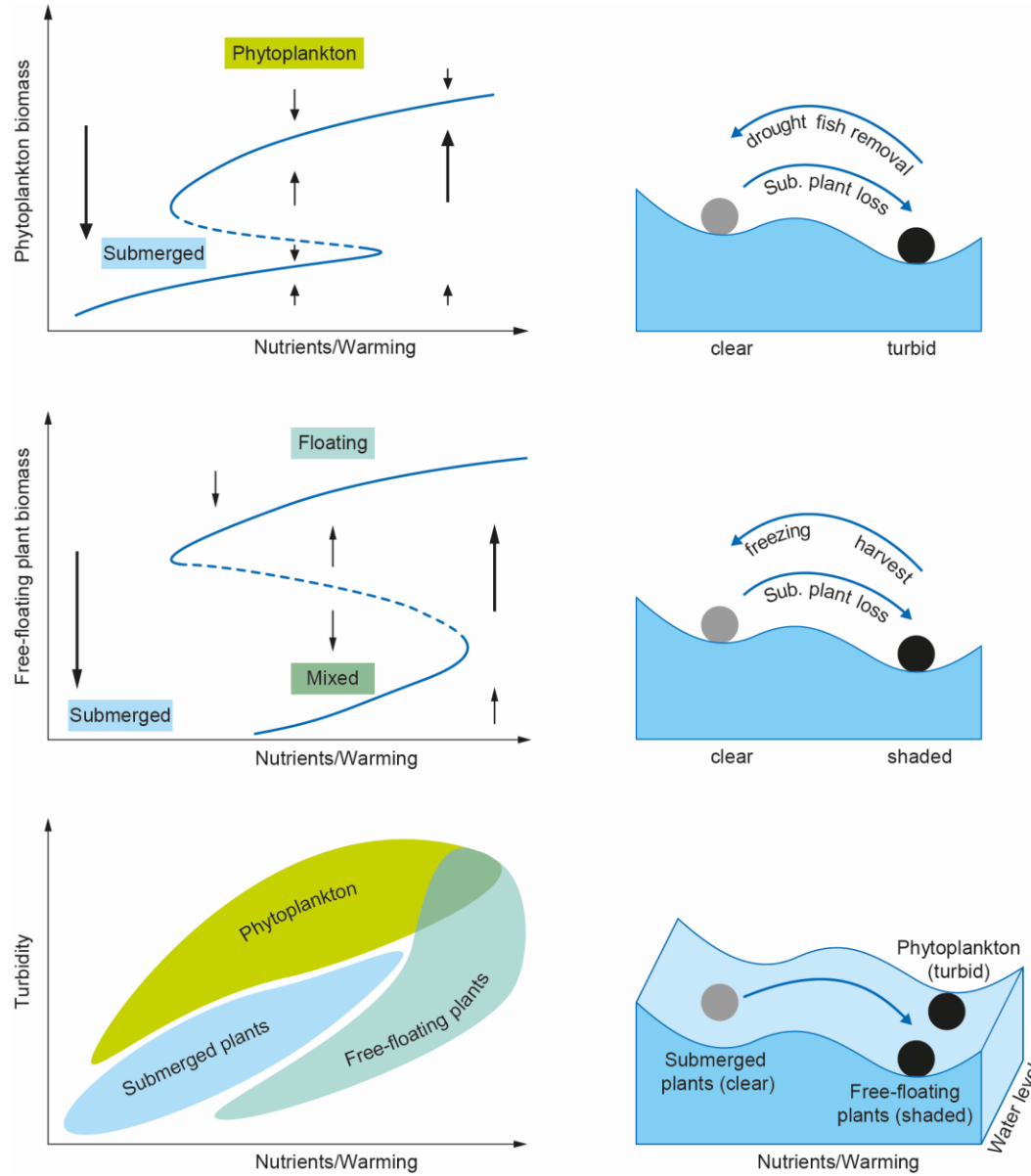
Alta biodiversidad,  
presencia  
depredadores



Ecosistemas naturales: auto regulatorios, resistentes y resilientes

Gran tamaño y conectividad,  
permitiendo migración de organismos y movimiento de materia;  
gran pool genético que permite  
ajustes mediante la selección natural

# Estados alternativos: Cambios y Estabilidad



**Competencia:**

por luz en la columna de agua

**Competencia:**

por nutrientes en la columna de agua  
(y acceso a nutrientes en sedimento)

**Alelopatía:**

Liberación de sustancias inhibidoras del crecimiento

**PLANTAS ACUÁTICAS sumergidas**

**Disminución de resuspensión:**

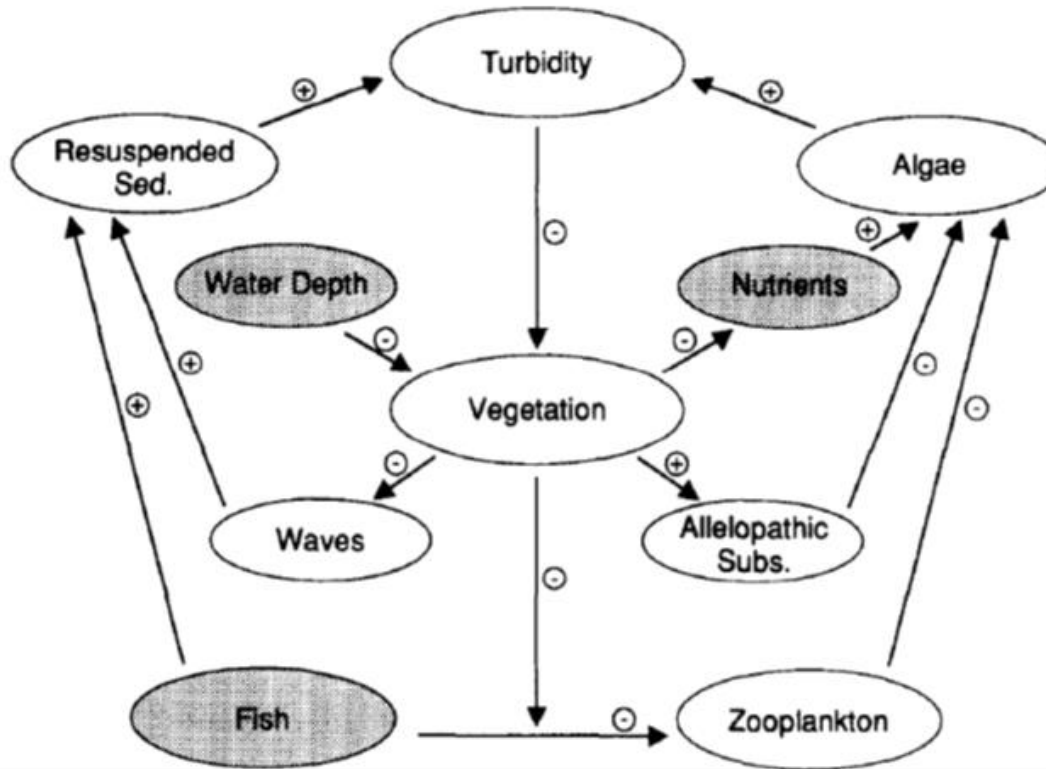
mayor estabilidad de la columna de agua y compactación de los sedimentos

**Promoción indirecta de herbivoría:**

efecto refugio para el zooplancton de gran tamaño e inverteb. litorales



# Estados alternativos: "Buffers" y "Feedbacks"



*Freshwater Biology* (1995) 33, 255–270

Impact of submerged macrophytes on fish–zooplankton–phytoplankton interactions: large-scale enclosure experiments in a shallow eutrophic lake

PER SCHRIVER, JENS BØGESTRAND, ERIK JEPPESEN\* AND MARTIN SØNDERGAARD\*  
*National Environmental Research Institute, Vejlsøvej 25, PO Box 314, DK-8600 Silkeborg, Denmark*

*Freshwater Biology* (2002) 47, 343–365

FRESHWATER BIOLOGY SPECIAL REVIEW

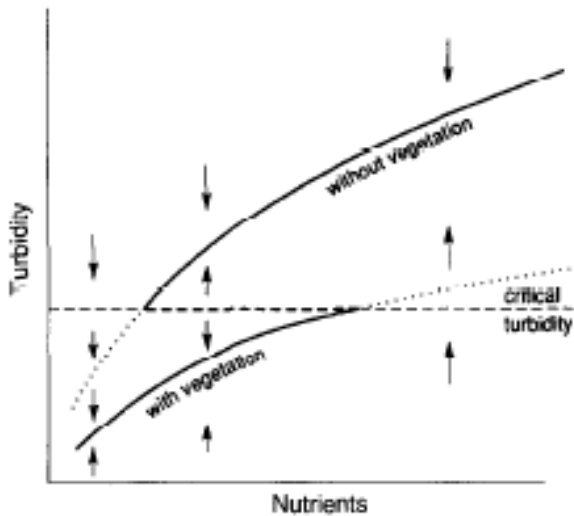
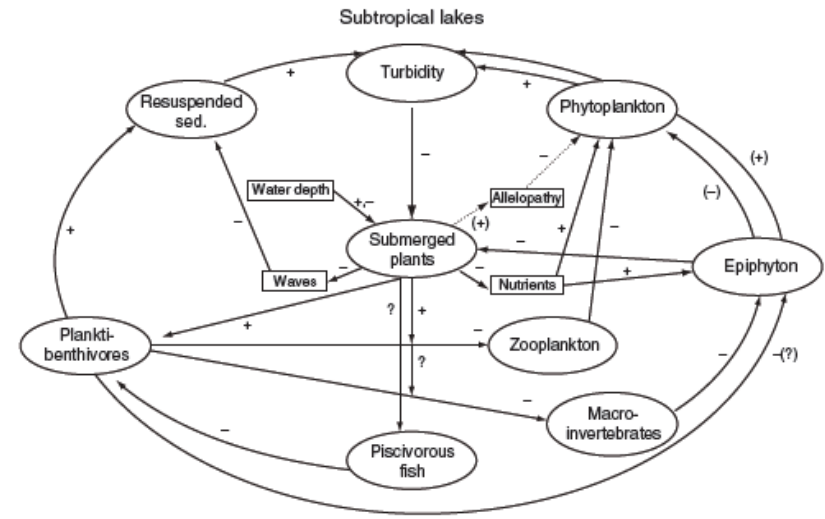
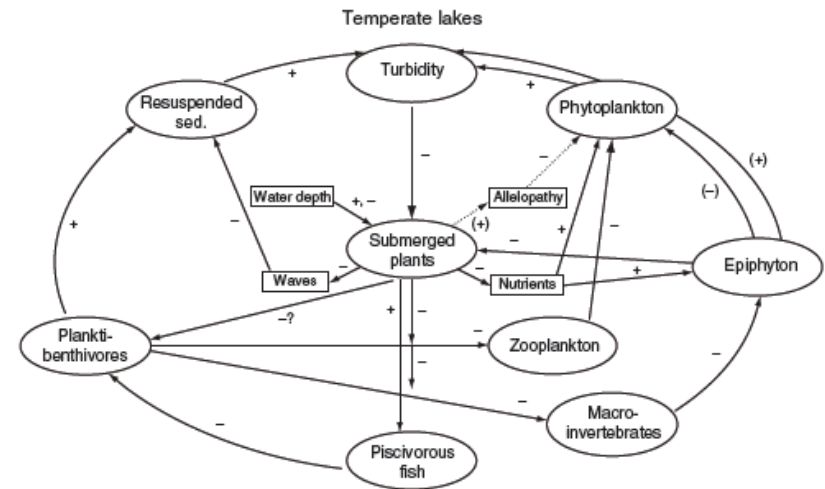
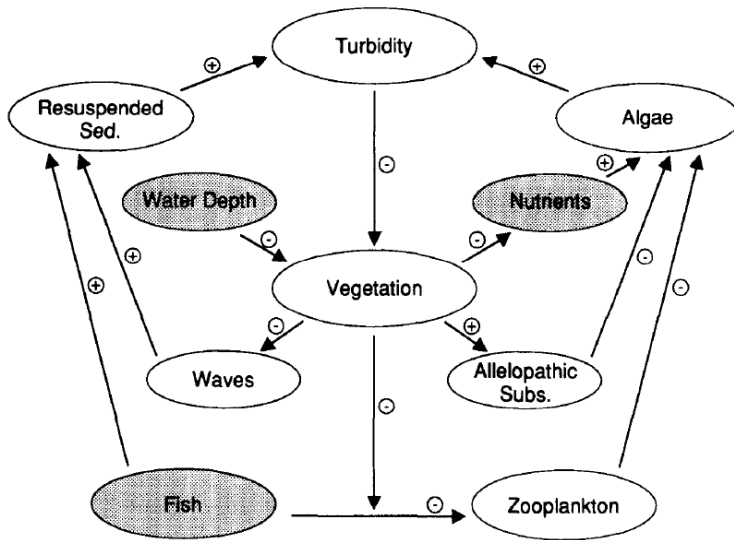
**Diel horizontal migration of zooplankton:  
 costs and benefits of inhabiting the littoral**

R. L. BURKS,\* D. M. LODGE,\* E. JEPPESEN† and T. L. LAURIDSEN†

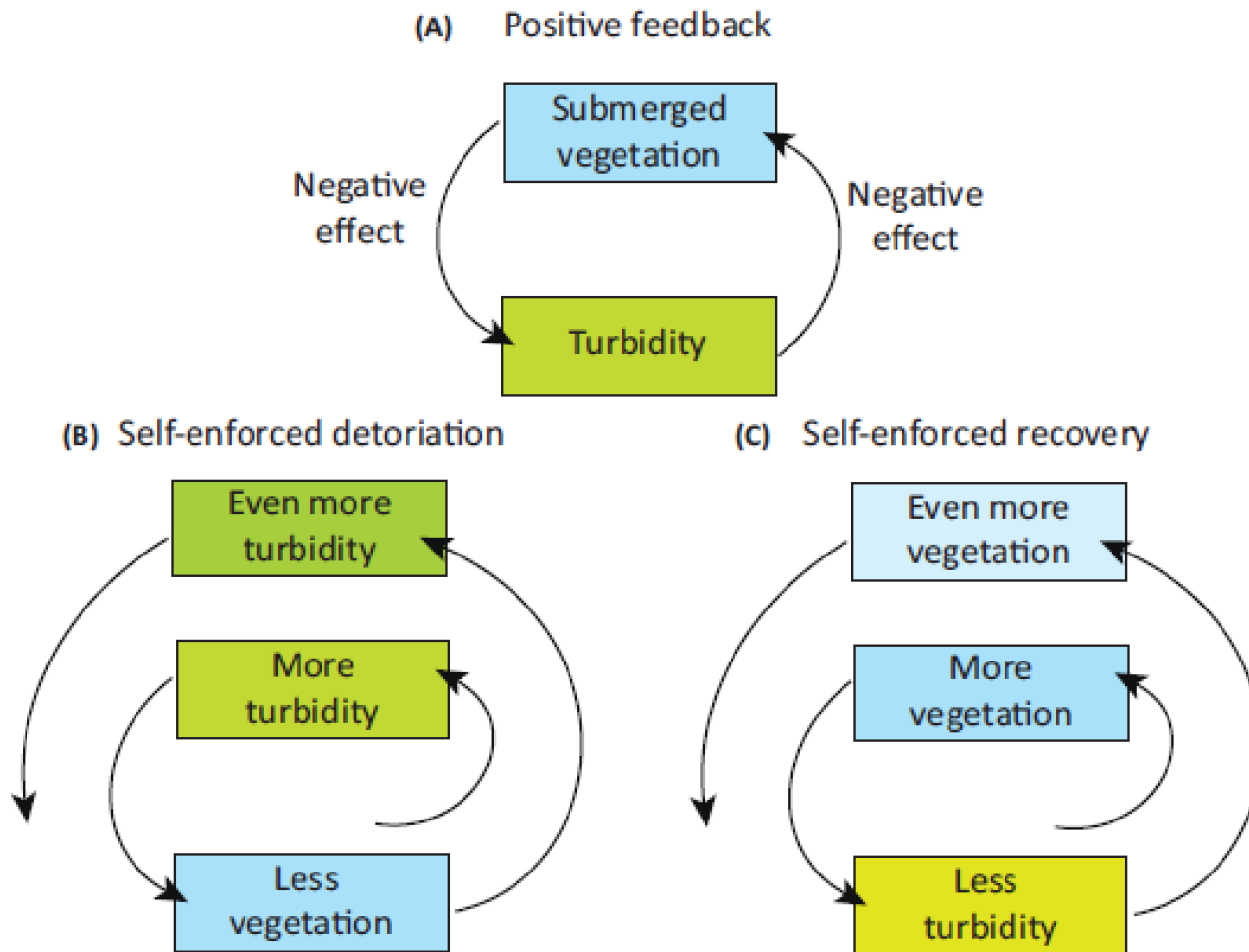
\**Department of Biological Sciences, University of Notre Dame, Notre Dame, IN, U.S.A.*

†*Department of Lake and Estuarine Ecology, National Environmental Research Institute, Vejlsøvej, Silkeborg, Denmark*

# Estados alternativos: "Buffers" y "Feedbacks"

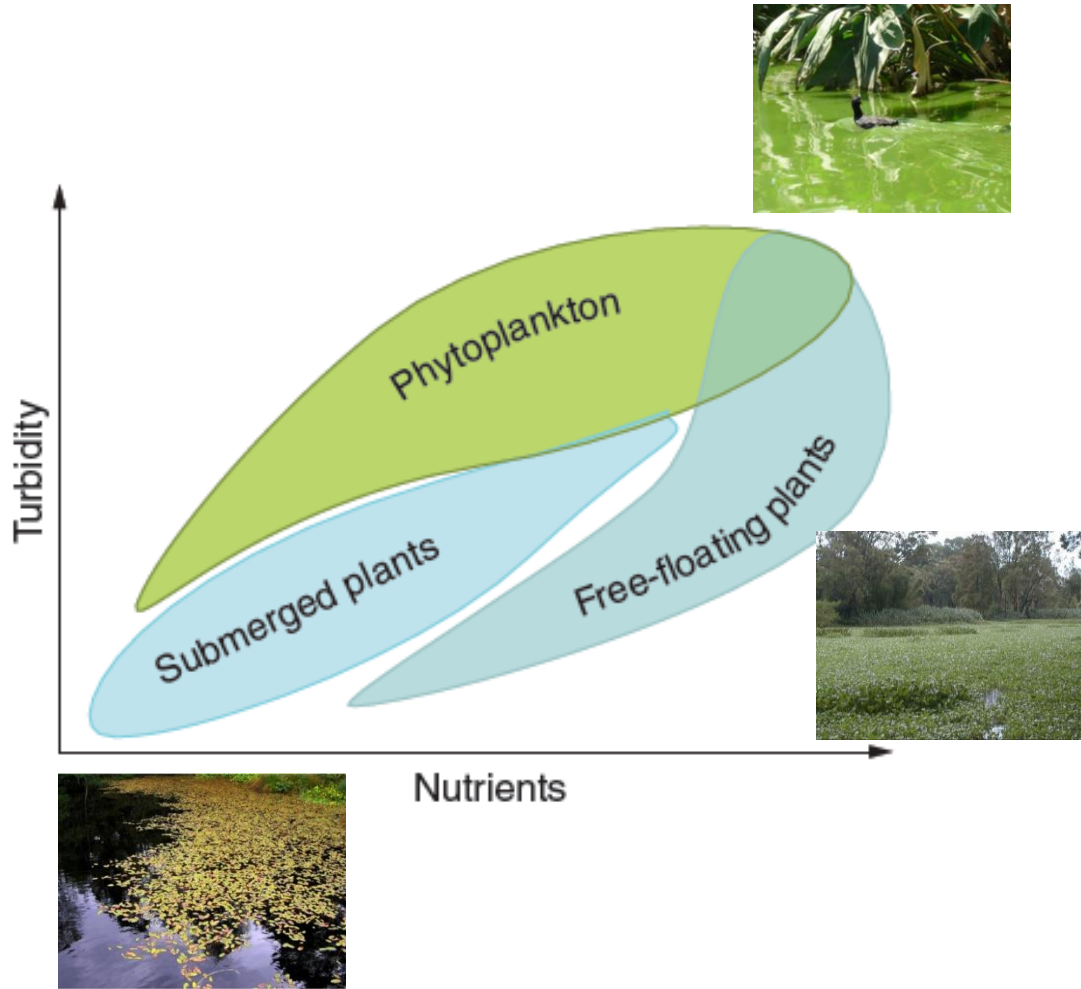


# “Feedbacks” y “Tipping-points”



“Una vez superado cierto umbral, la dinámica del sistema se acelera dramáticamente **por procesos internos** y promueve cambios galopantes hacia un estado alternativo diferente”.

# Producción primaria en lagos: Competencia por la luz y los nutrientes



**Probabilidad de dominancia** de distintos tipos de productores primarios cambia con la turbidez y concentración de nutrientes **en agua**

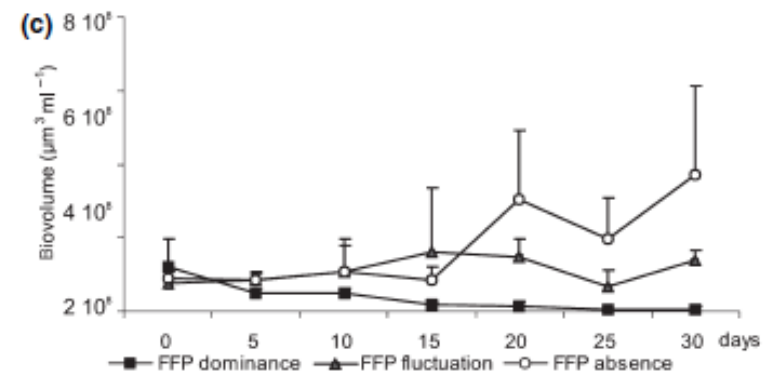
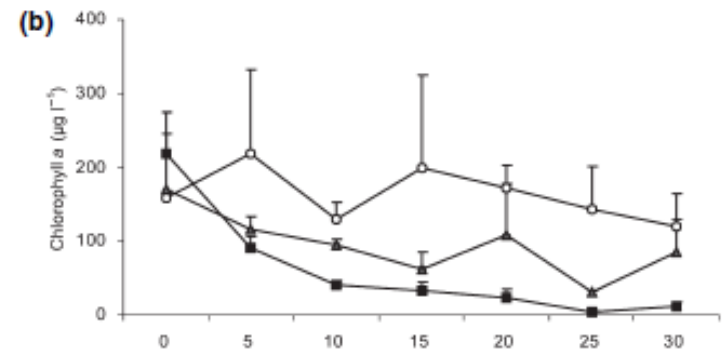
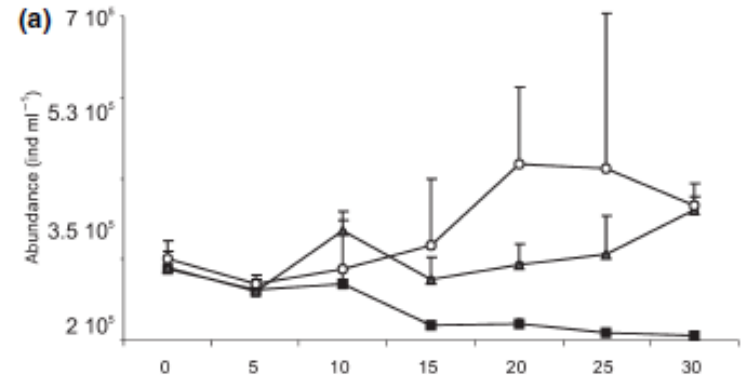
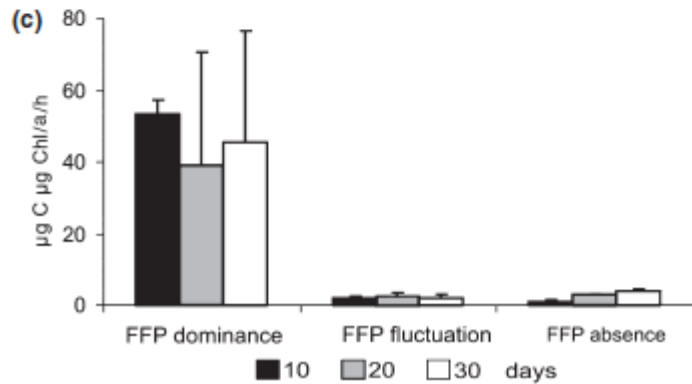
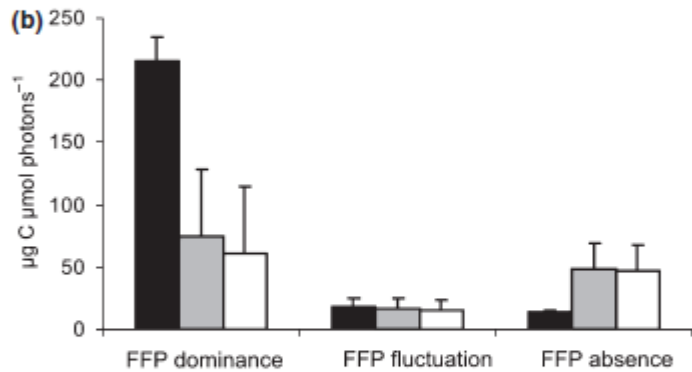
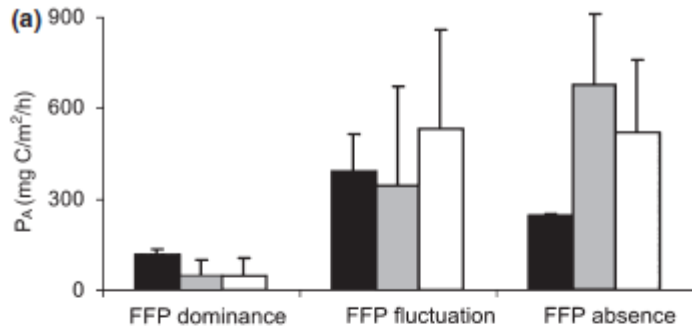
# Alelopatía: inhibición crecimiento fito por plantas en sistemas templados



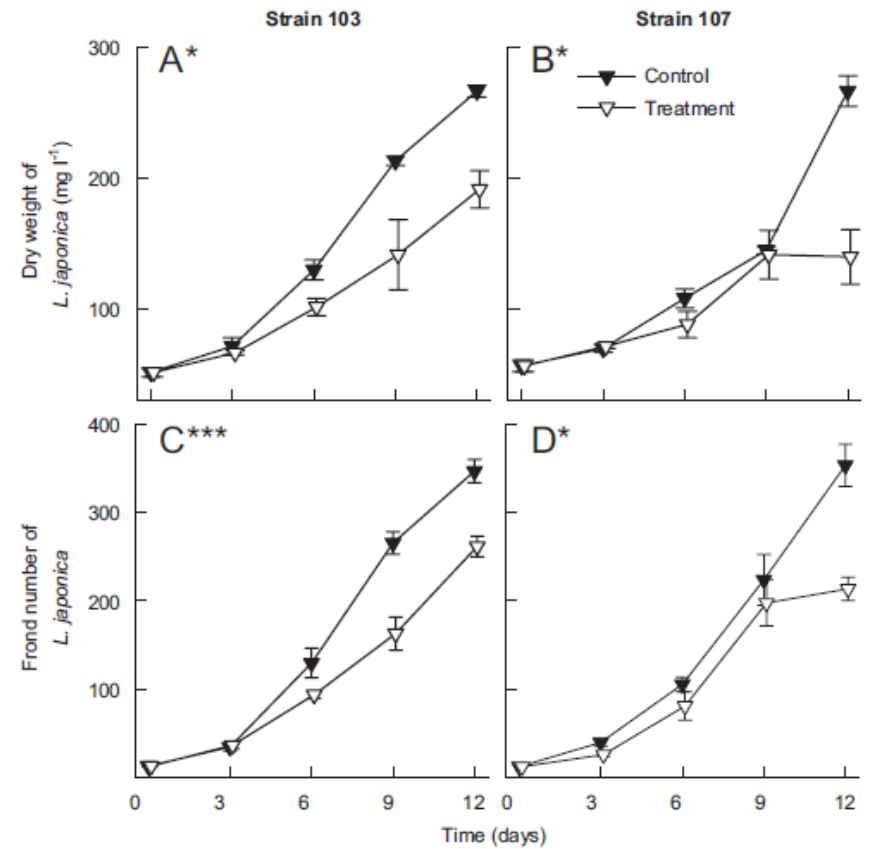
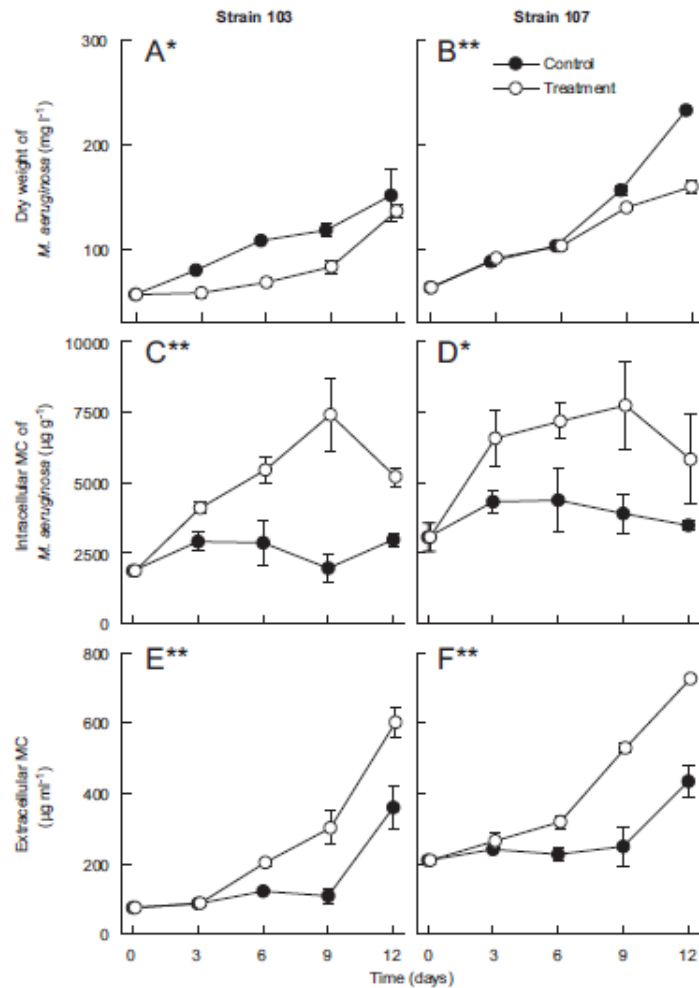
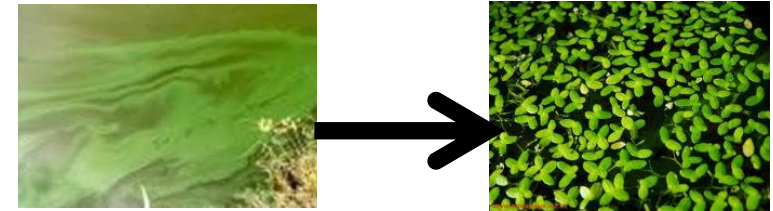
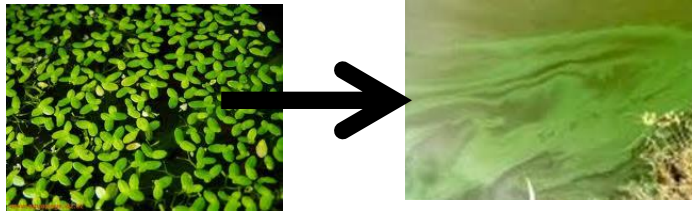
Allelopathic potential	Species	Common name
High ↓	<i>Myriophyllum spicatum</i>	Eurasian water milfoil
	<i>Chara globularis, Ch. aspera, Ch. contraria</i>	Stonewort or charophyte
↓	<i>Ceratophyllum demersum</i>	Coontail
↓	<i>Stratiotes aloides</i>	Water soldier
Medium/high*	<i>Elodea</i> spp	Waterweed, water pest
↓	<i>Eleocharis acicularis</i>	Spike rush
↓	<i>Myriophyllum brasiliense</i>	Parrotfeather, Brazilian milfoil
↓	<i>Myriophyllum verticillatum</i>	Whorl-leaf watermilfoil
Medium	<i>Berula erecta (Sium erectum)</i>	Water parsnip
↓	<i>Eichhornia crassipes</i>	Water hyacinth
↓	<i>Egeria densa</i>	Common waterweed
↓	<i>Najas marina</i> ssp. <i>intermedia</i>	Spiny naiad
↓	<i>Nuphar lutea</i>	Yellow water lily
Low	<i>Potamogeton</i> spp	Pondweeds

Burks et al. 2006

# Efectos plantas flotantes libres sobre fito: sombra



# La inhibición del crecimiento puede ser mutua!



**Competencia:**

por luz en la columna de agua

**Competencia:**

por nutrientes en la columna de agua  
(y acceso a nutrientes en sedimento)

**Alelopatía:**

Liberación de sustancias inhibidoras del crecimiento

**PLANTAS ACUÁTICAS sumergidas**

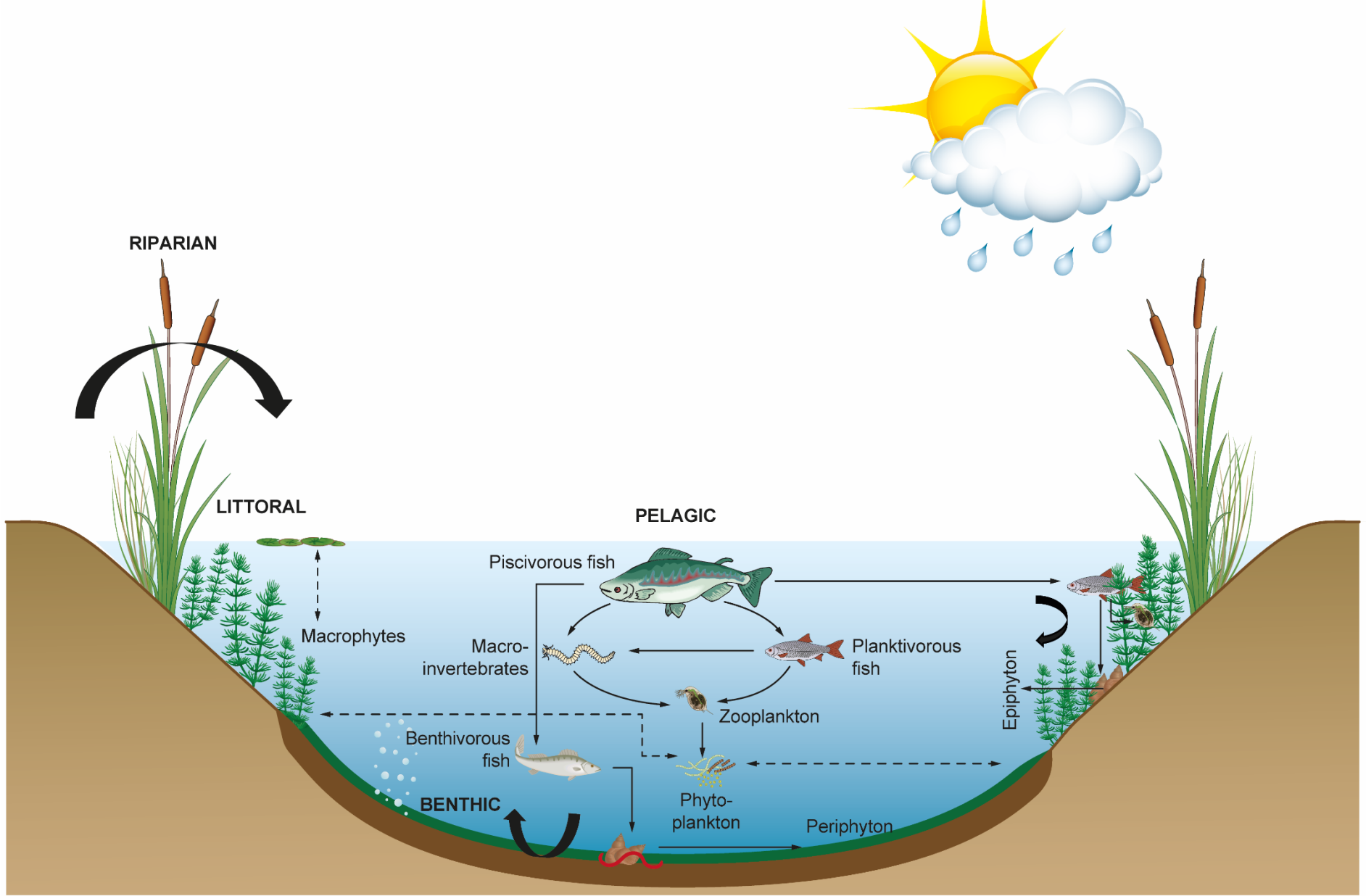
**Disminución de resuspensión:**

mayor estabilidad de la columna de agua y compactación de los sedimentos

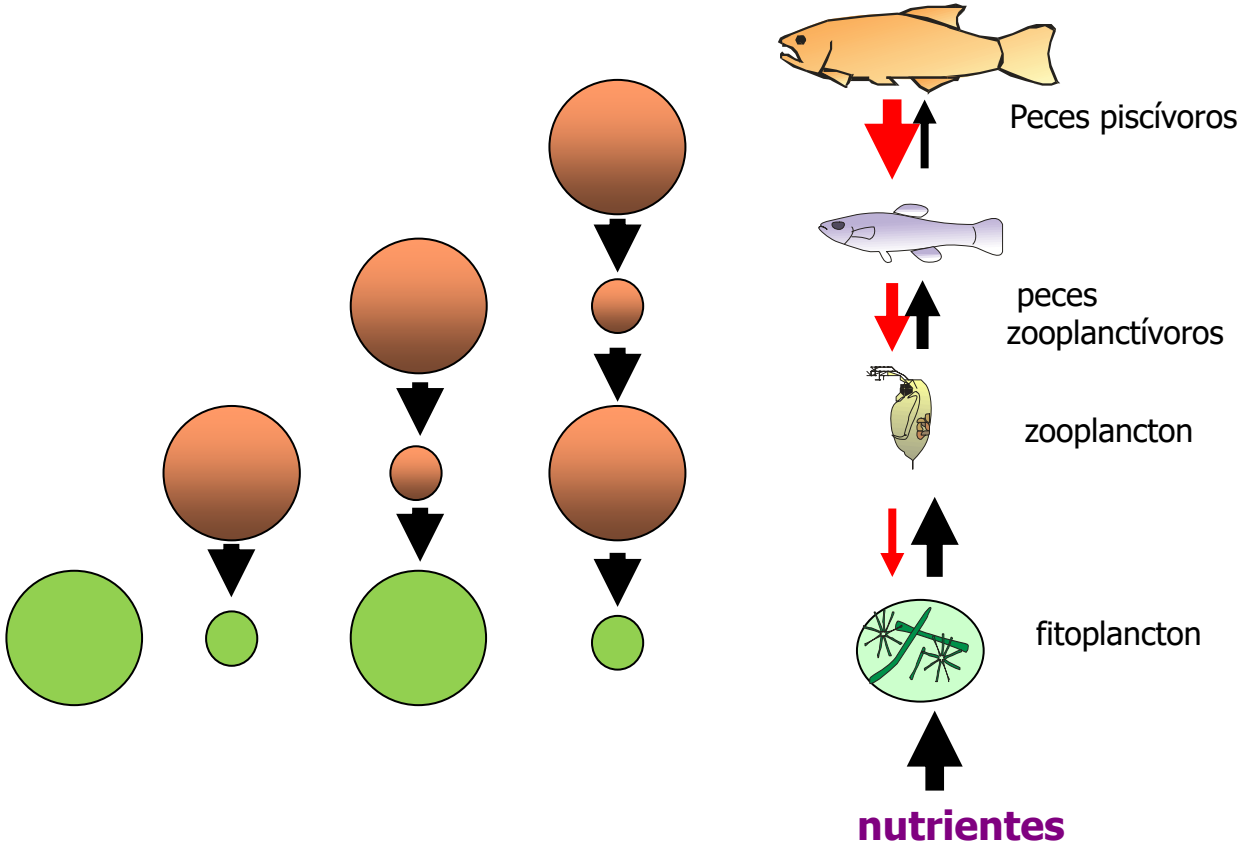
**Promoción indirecta de herbivoría:**

efecto refugio para el zooplancton de gran tamaño e invertebrados litorales



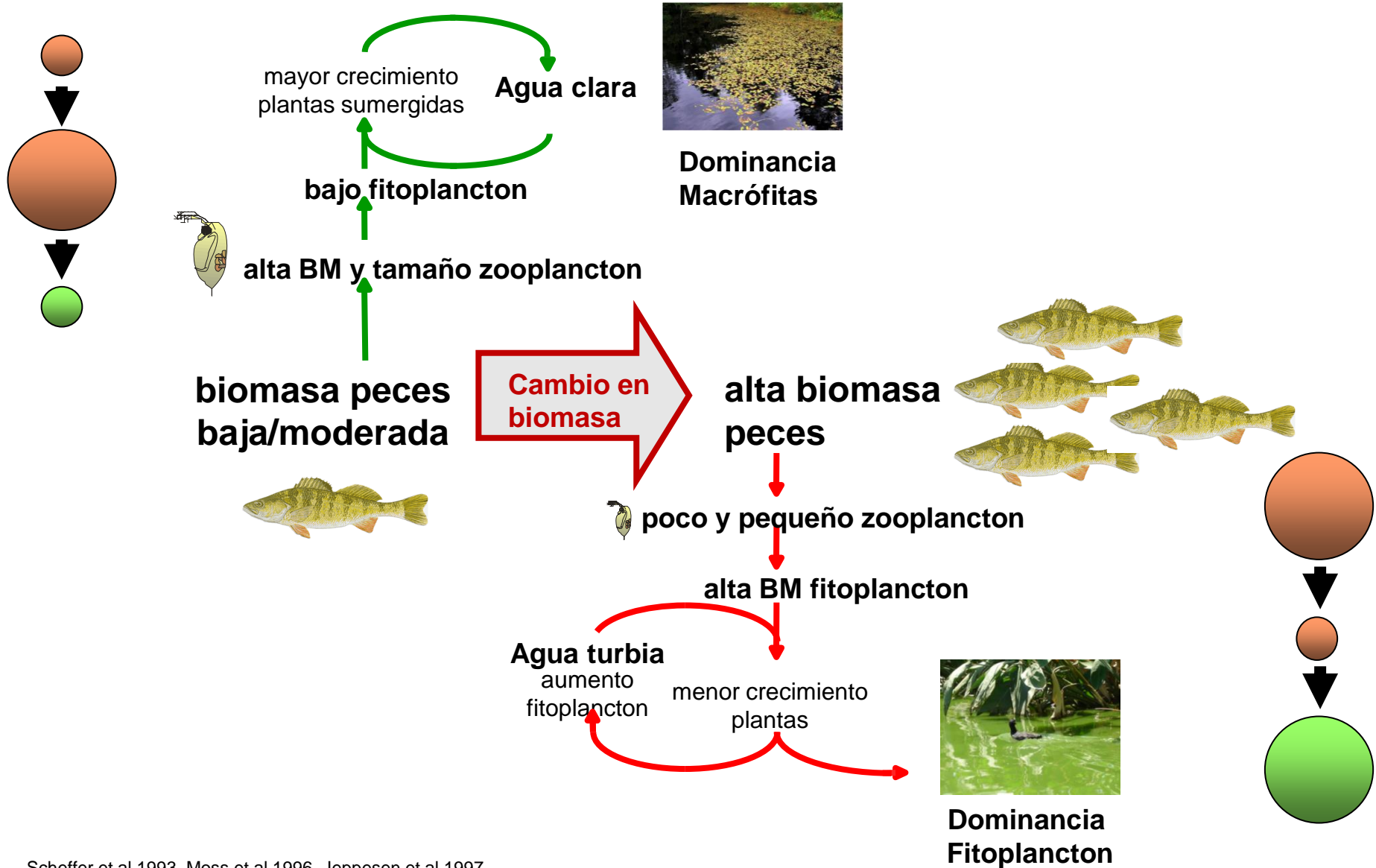


# Tramas tróficas y efectos en cascada

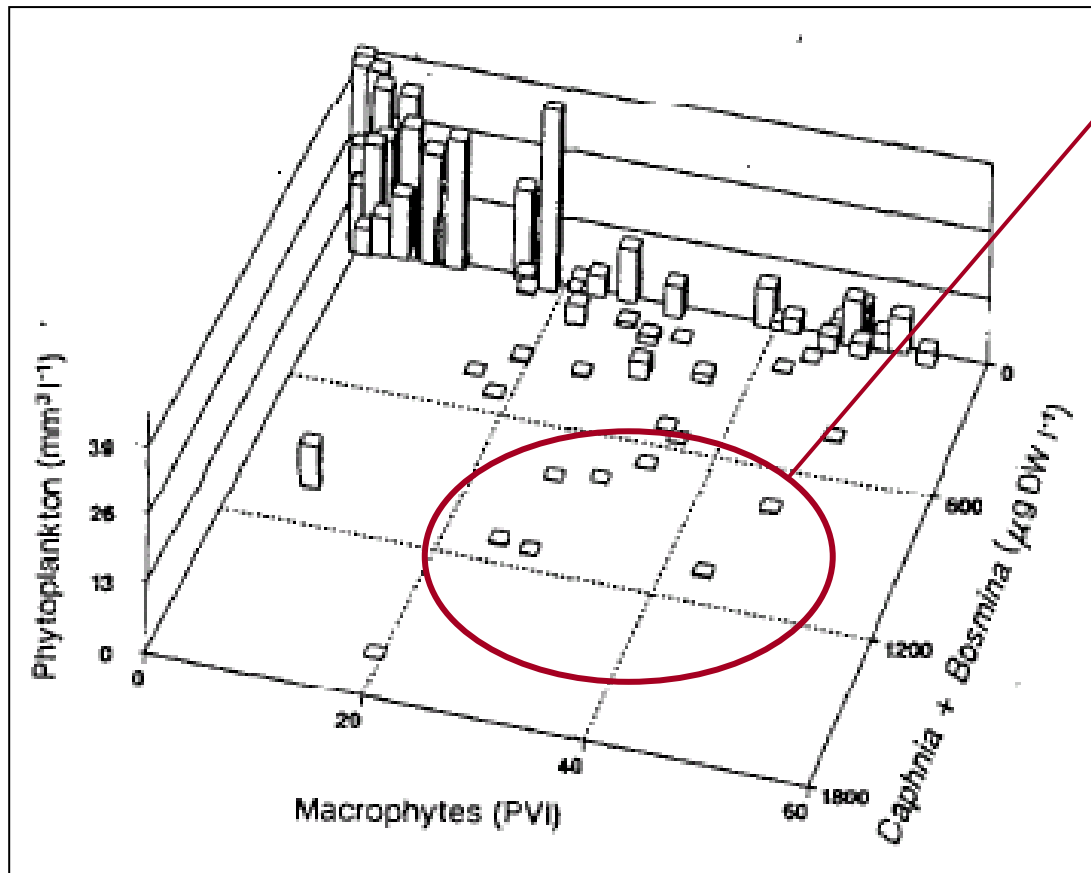


Shapiro et al 1975, Carpenter et al. 1985, McQueen et al. 1989, Jeppesen et al 1997

# Resistencia biológica: Cascadas tróficas pelágicas



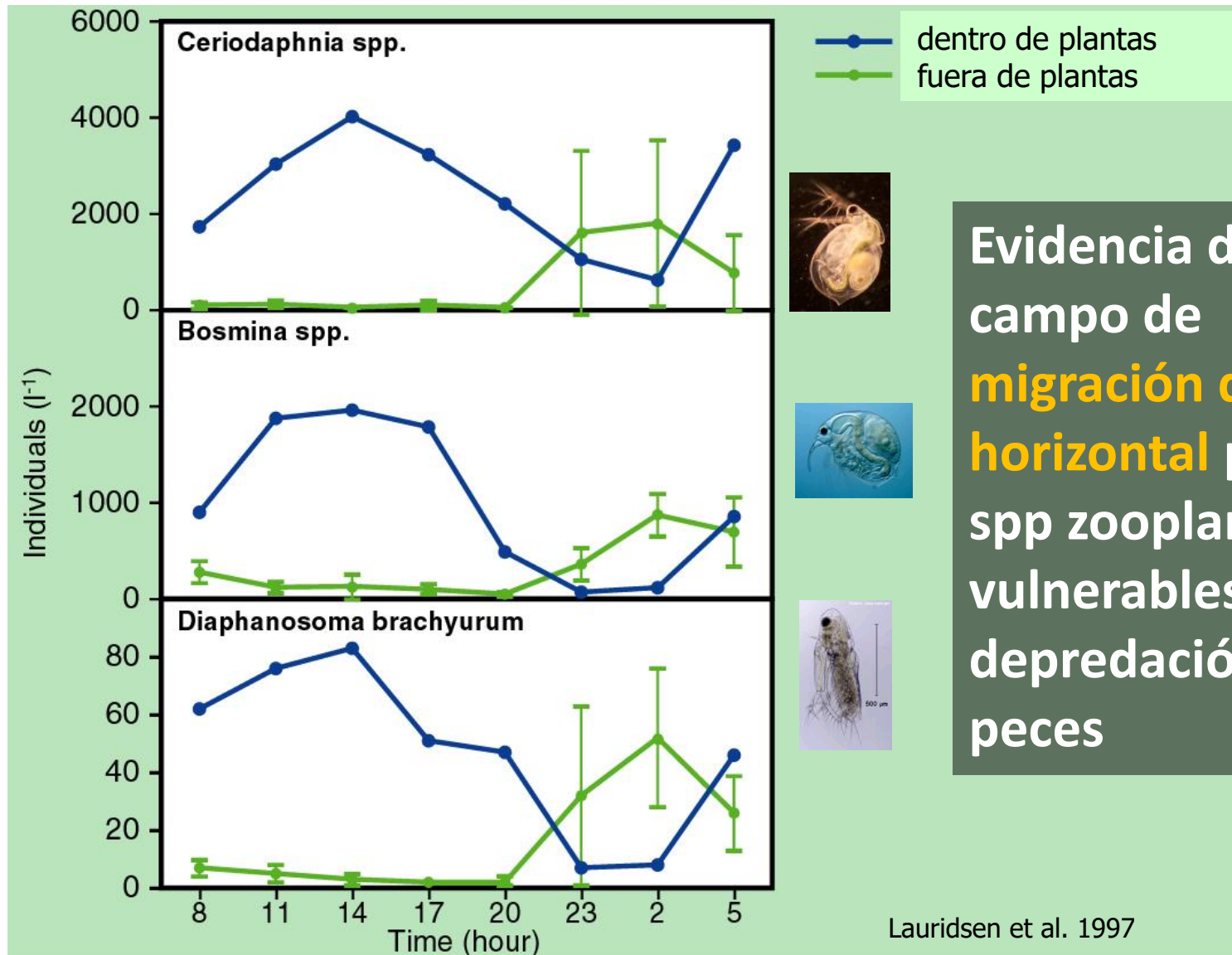
# Plantas sumergidas potencian herbivoría sobre fitoplancton



Menor biomasa algal (biovolumen) con mayor %PVI y PVI x zooplancton

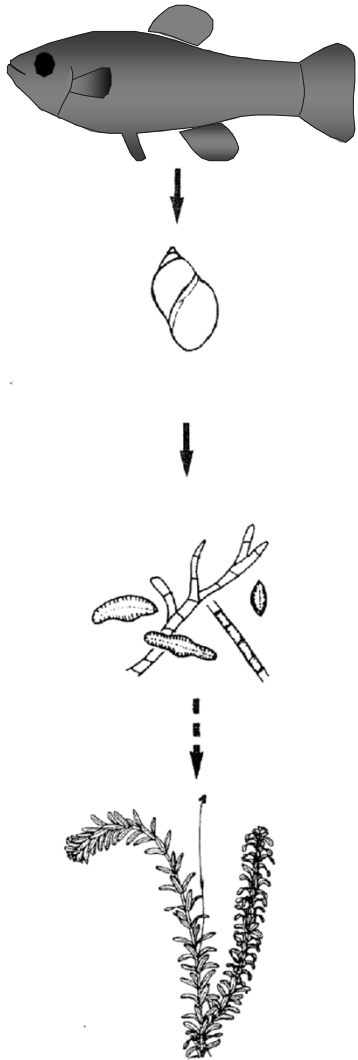
Con alto %PVI  
Comunidad fito dominada por flagelados de crecimiento rápido y diatomeas

# Migración Horizontal Diaria- hipótesis de refugio de macrófitas hacia zooplancton

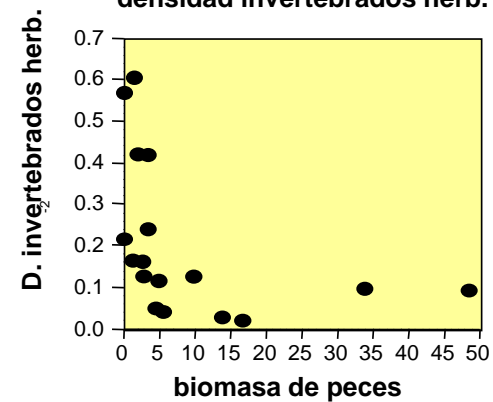
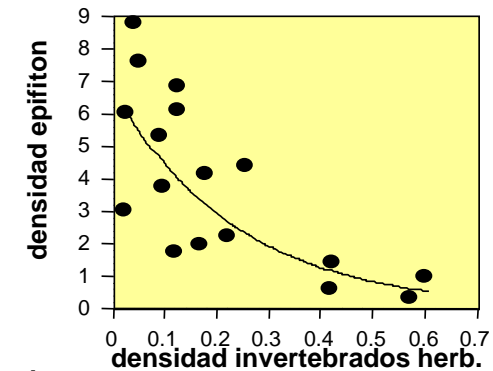
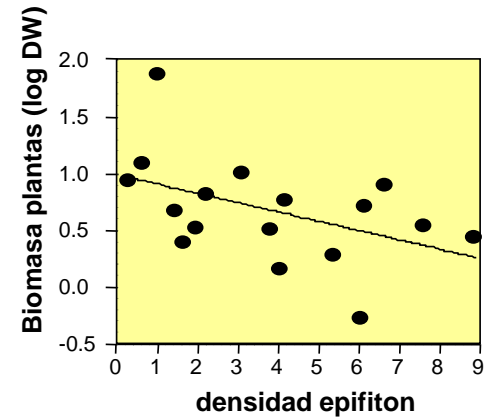
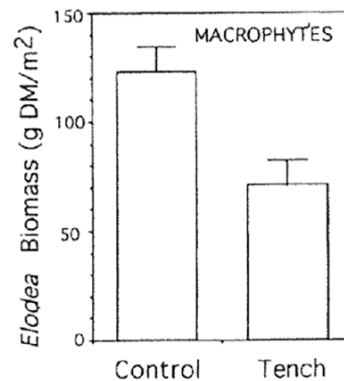
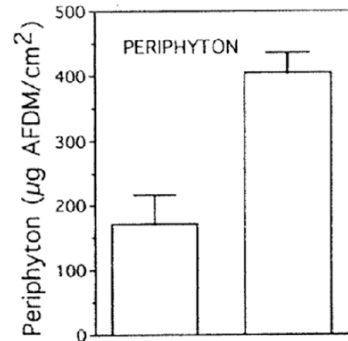
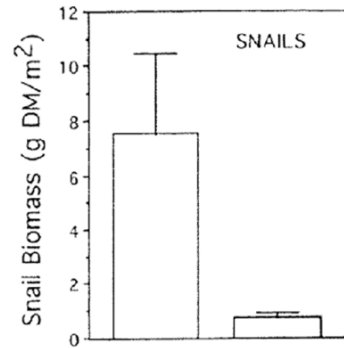


Evidencia de campo de **migración diaria horizontal** por spp zooplancton vulnerables a la depredación por peces

# Cascada trófica litoral en lagos someros templados

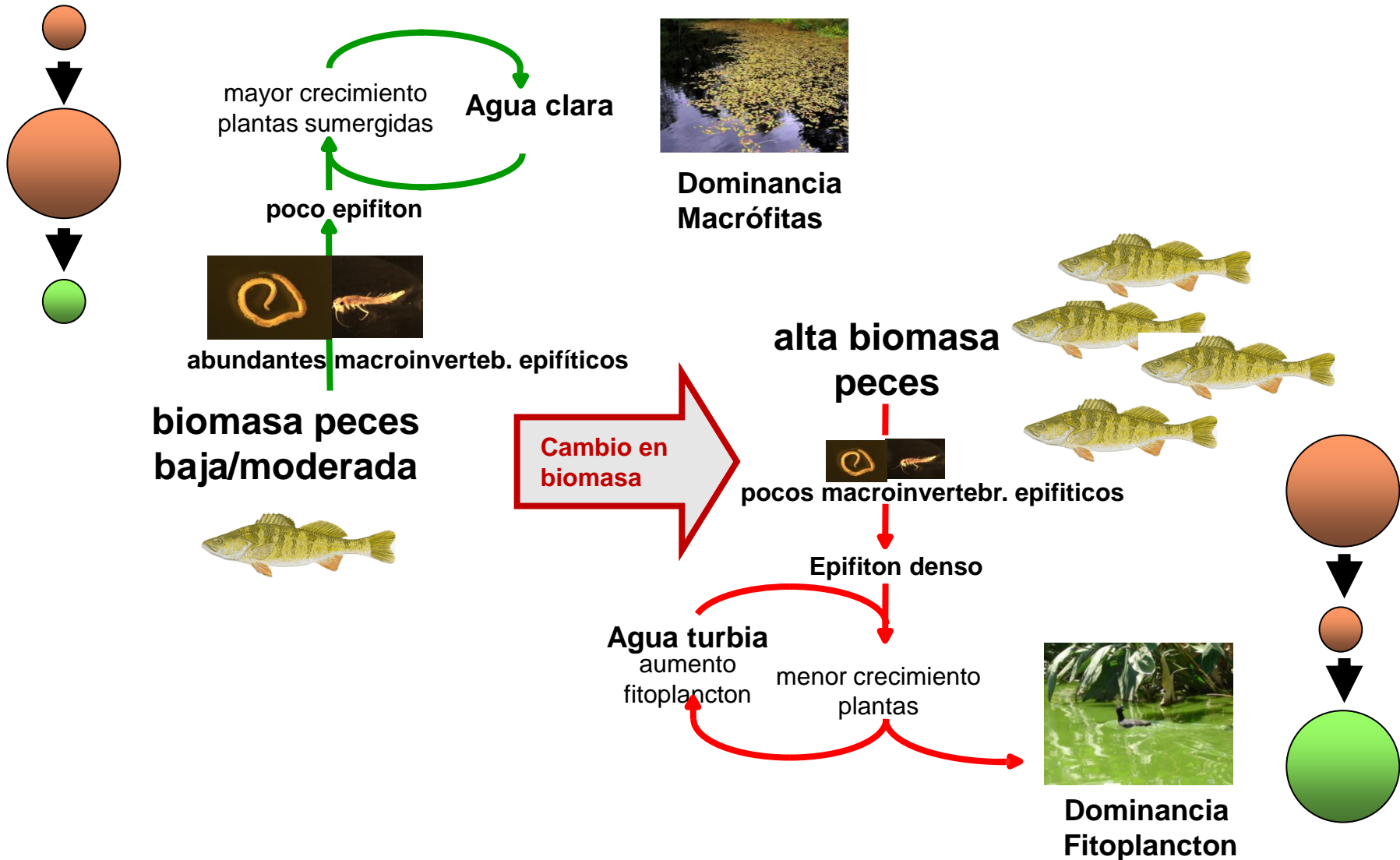


Brönmark & Vermaat 1998

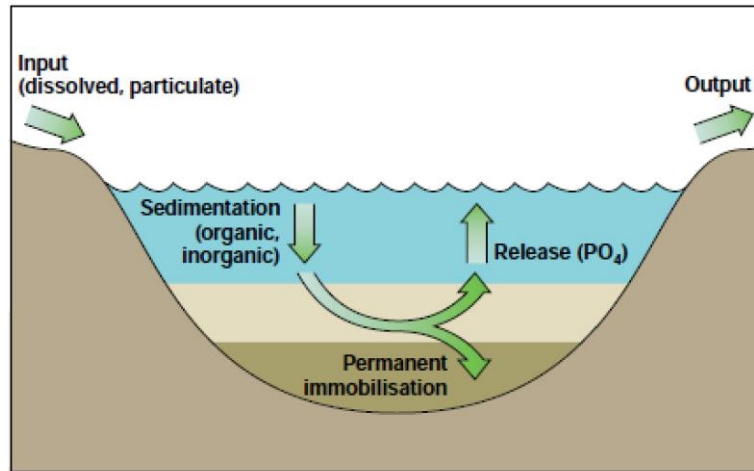


Jones & Sayer 2003

# Resistencia biológica: Cascadas tróficas litorales



# Resistencia Química: carga interna de P



## P-forms in the sediment:

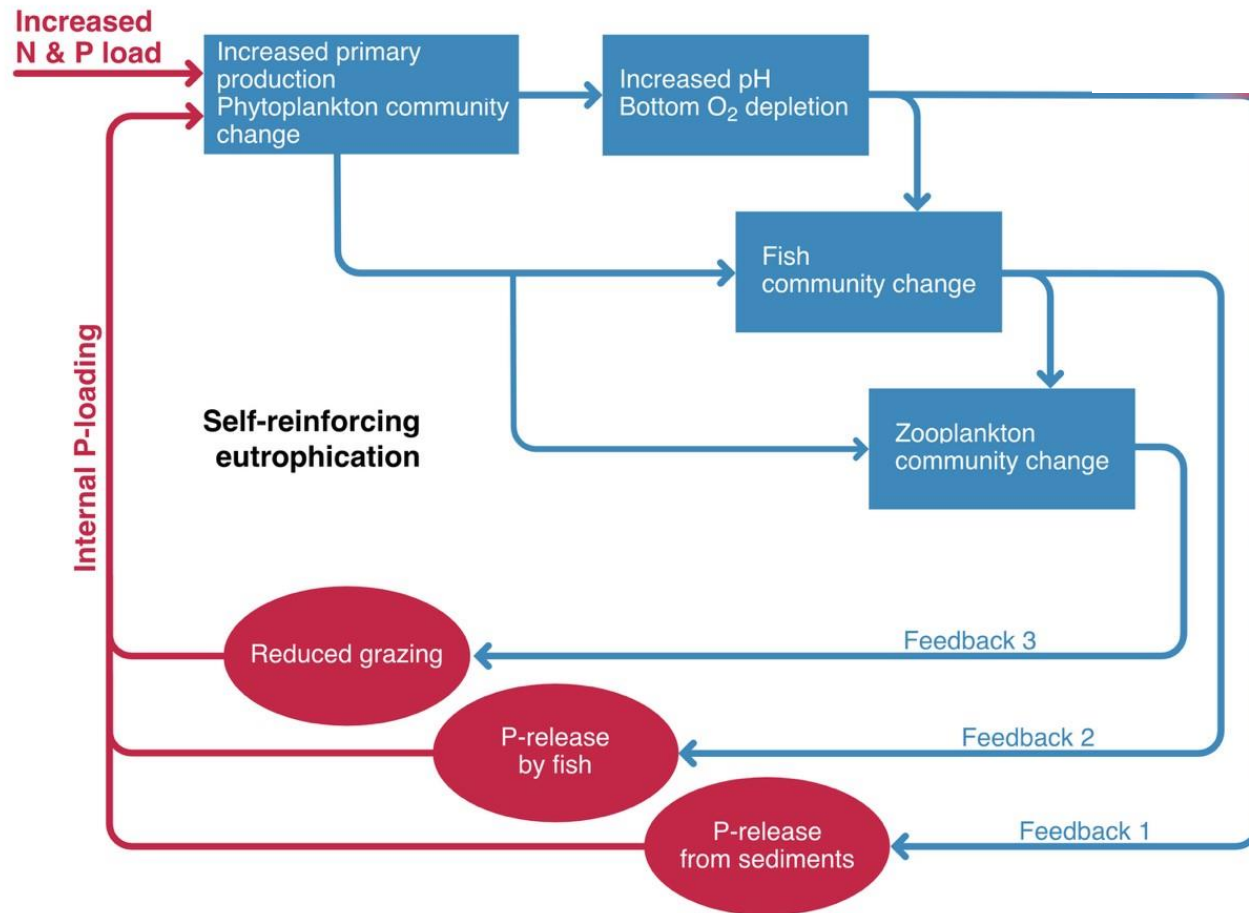
- Dissolved ( $\text{PO}_4$ , organic P)
- Particulate
  - Iron: Fe (III) hydroxides, Fe (OOH), (ads.)  
Strengite,  $\text{Fe PO}_4$   
Vivianite,  $\text{Fe}_3 (\text{PO}_4)_2 \cdot 8 \text{H}_2\text{O}$
  - Alum: Al (OH)<sub>3</sub> (ads.)  
Variscite, Al  $\text{PO}_4$
  - Calcium: Hydroxyapatite,  $\text{Ca}_{10} (\text{PO}_4)_6 \text{OH}_2$   
Monetite, Ca H  $\text{PO}_4$   
Calcite (ads.)
  - Clay: (ads.)
  - Organic: "Labile"  
"Refractory"

## Intercambio agua-sedimento dada por:

1. Mecanismos asociados con el equilibrio mineral-agua;
2. Procesos de sorción, especialmente el intercambio iónico, interacciones redox dependientes de oxígeno y otros aceptores de electrones;
3. Actividades fisiológicas y comportamentales de muchos organismos bentónicos (peces, macroinvertebrados).



# "Feedbacks" y "Tipping-points"



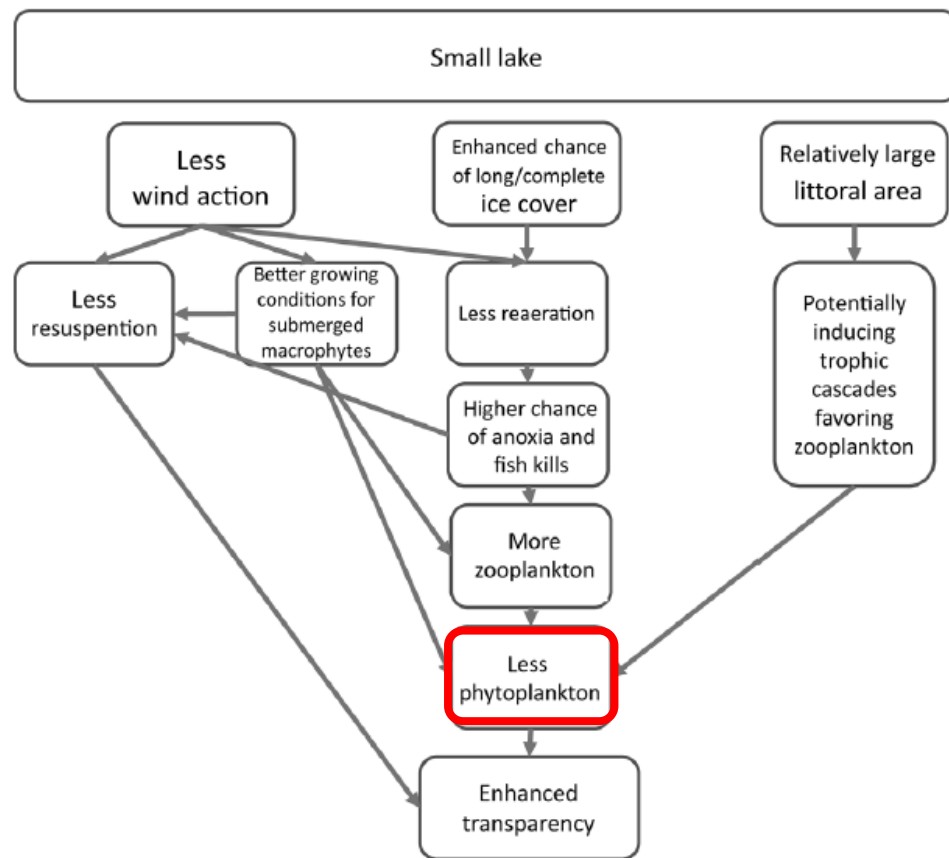
Hessen et al. under review

**Variaciones sobre el tema:**  
**Estados Alternativos**

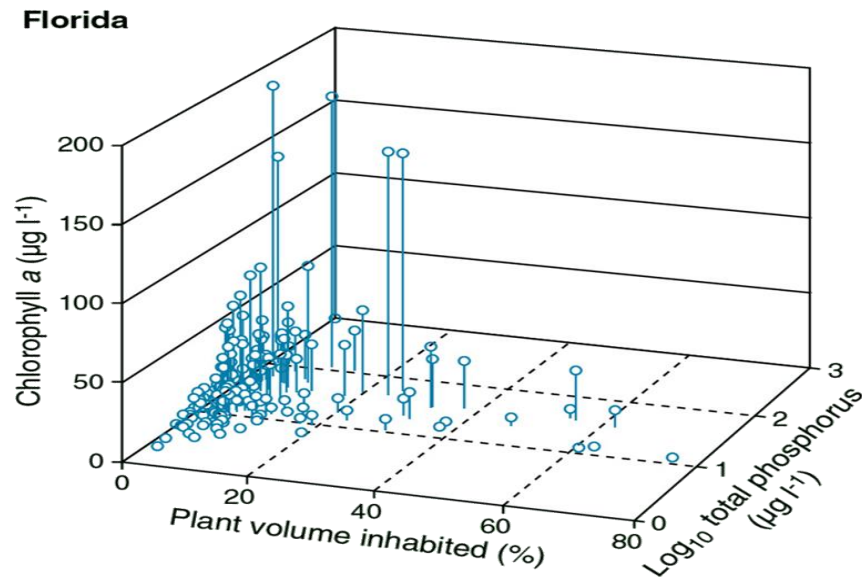
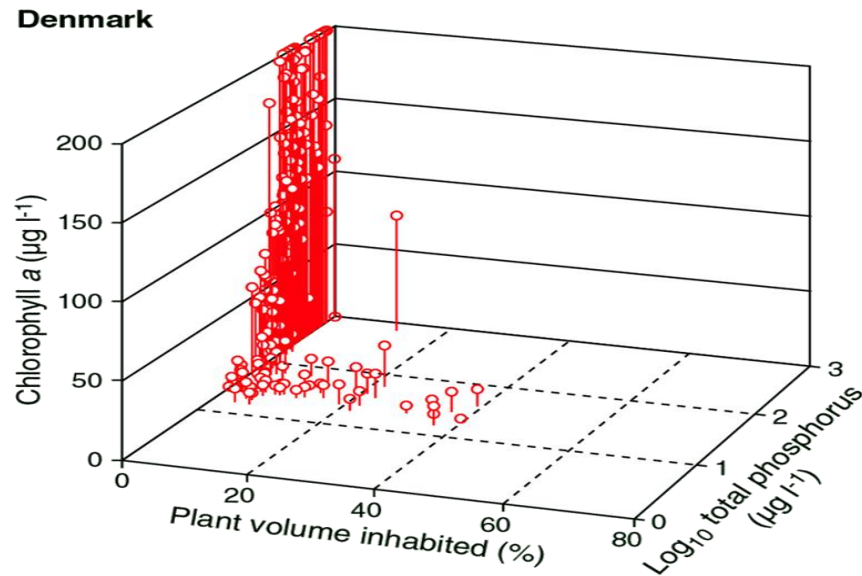
**Características cuerpo de agua**  
**Características climáticas**

# Según características del cuerpo de agua

Los **efectos** de las **plantas acuáticas sobre el fito** varían con la superficie del cuerpo de agua, siendo **mayores los efectos en cuerpos de agua chicos.**



# Relación de plantas- fito, y EEA, varía con clima

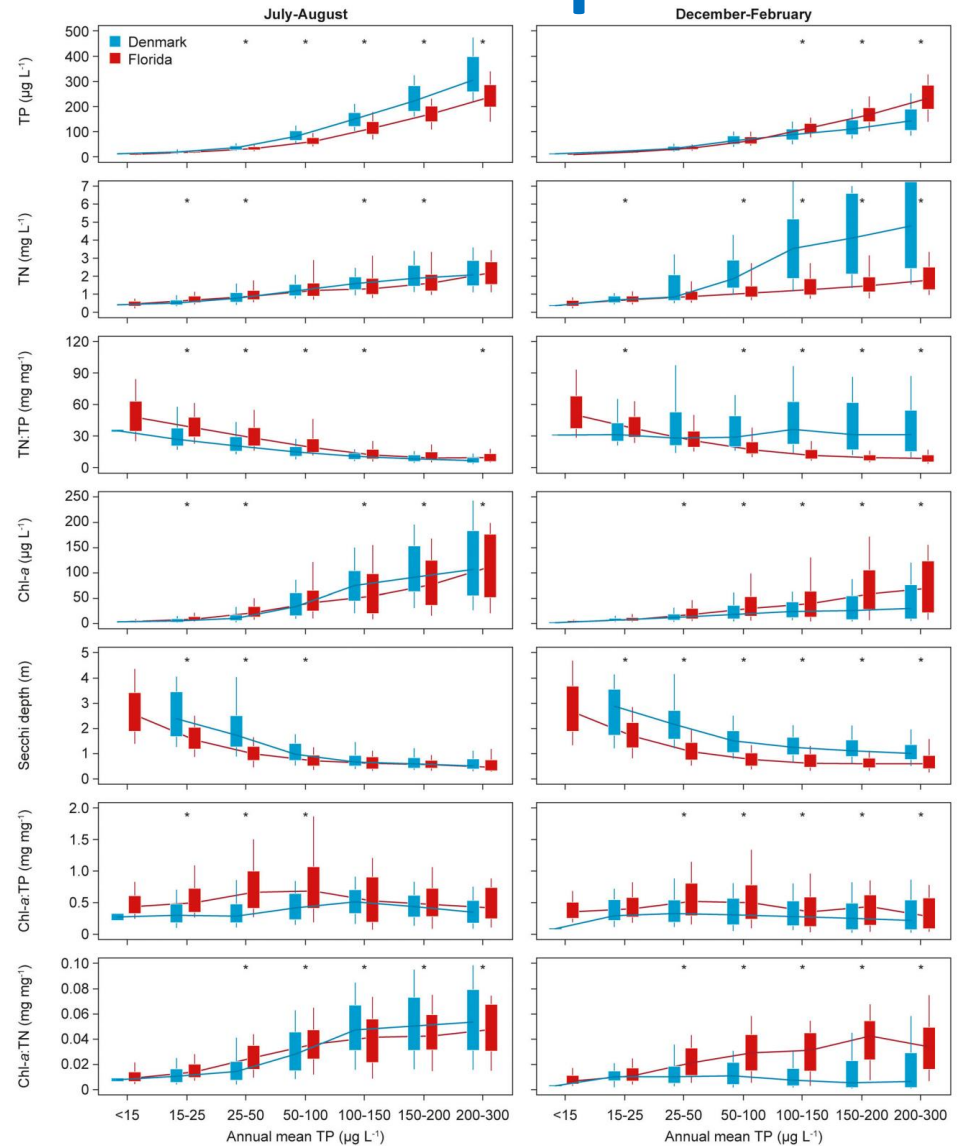


Mayor biomasa fitoplanctónica (Clo-a) y mayor variabilidad en sistemas subtropicales, ante igual concentración de fósforo e igual densidad de plantas.

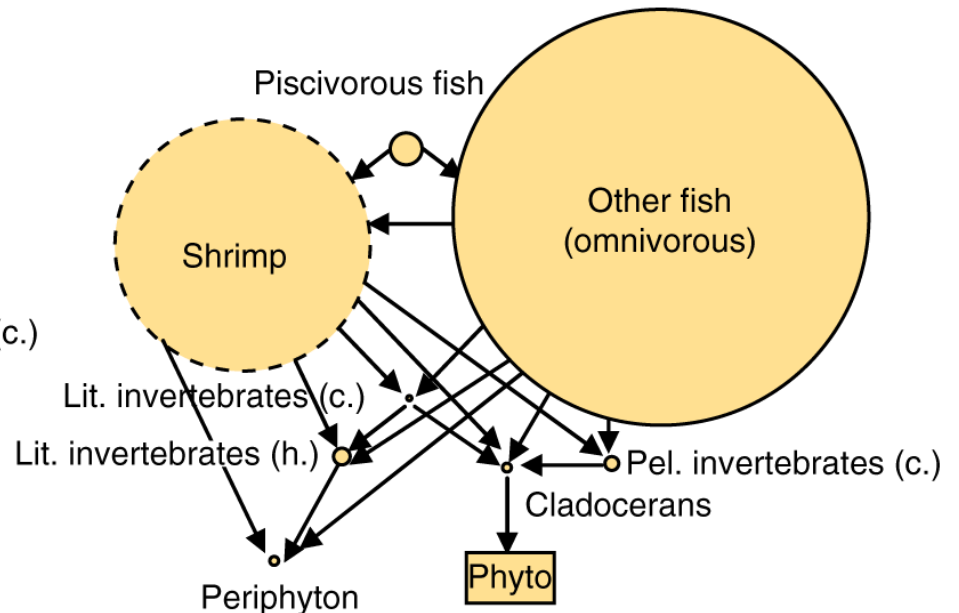
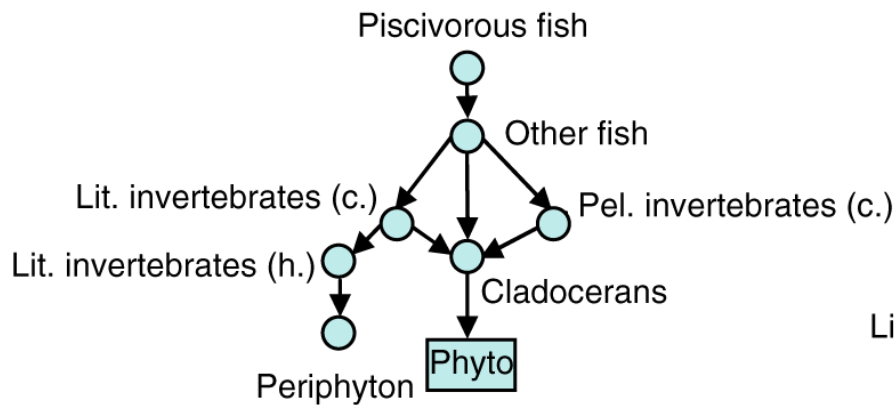
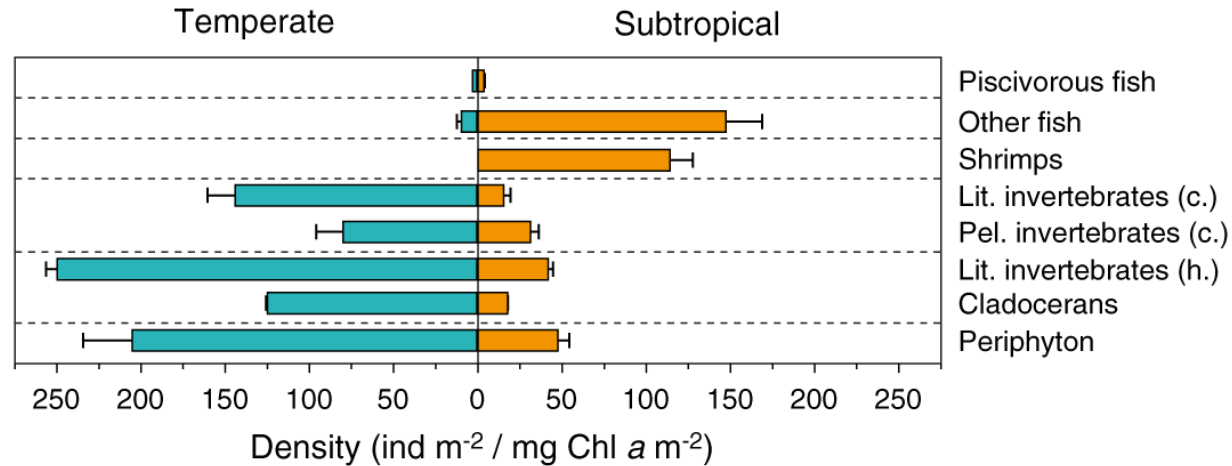
# Relación entre P y calidad del agua

# Lagos templados vs subtropicales

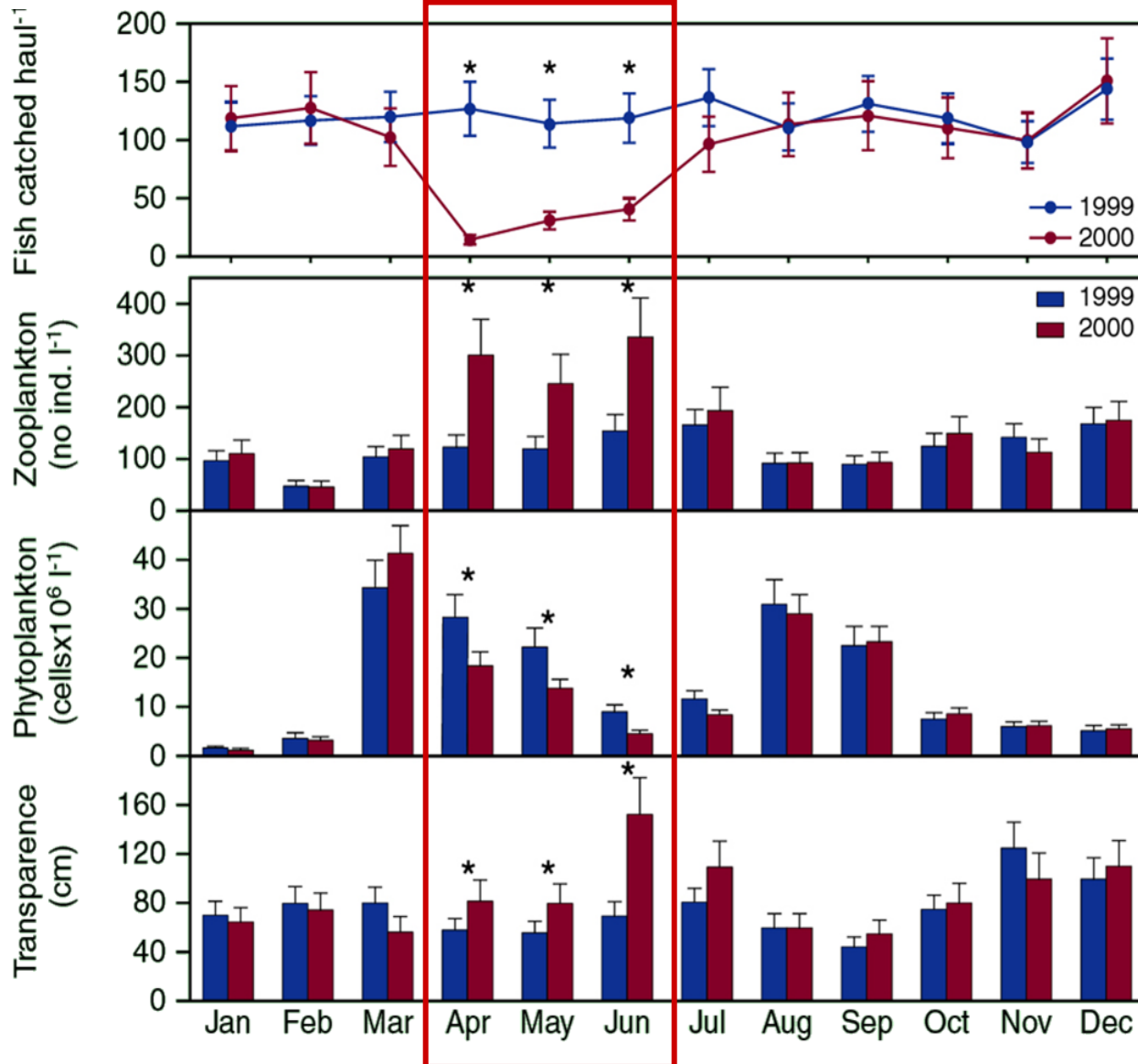
**Para iguales concentraciones de PT en el agua,** en climas más cálidos (ej. Florida, USA, rojo) la calidad de agua es peor que en lagos similares de climas fríos (ej. Dinamarca-azul)



# Resistencia biológica lagos cálidos



# Comunidad de peces en lagos subtropicales

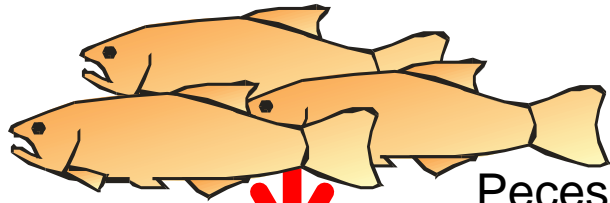


En sistemas cálidos, los efectos en cascada tienen muy corta duración;

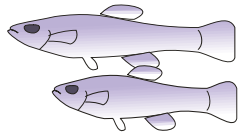
los peces se recuperan rápidamente

# Estructura biológica y clima: distinta resistencia

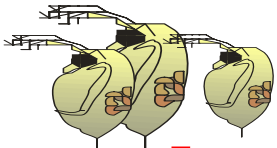
Lagos templados mesotróficos



Peces carnívoros



Peces zooplanctívoros, omnívoros, etc.



zooplancton

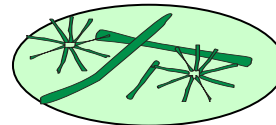
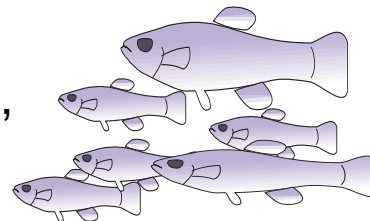
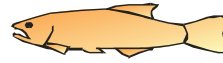


fitoplancton

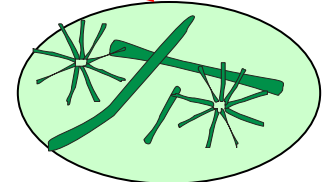
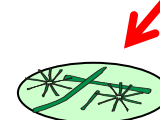
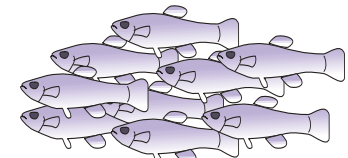
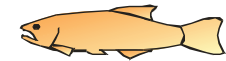


Nutrientes

eutróficos



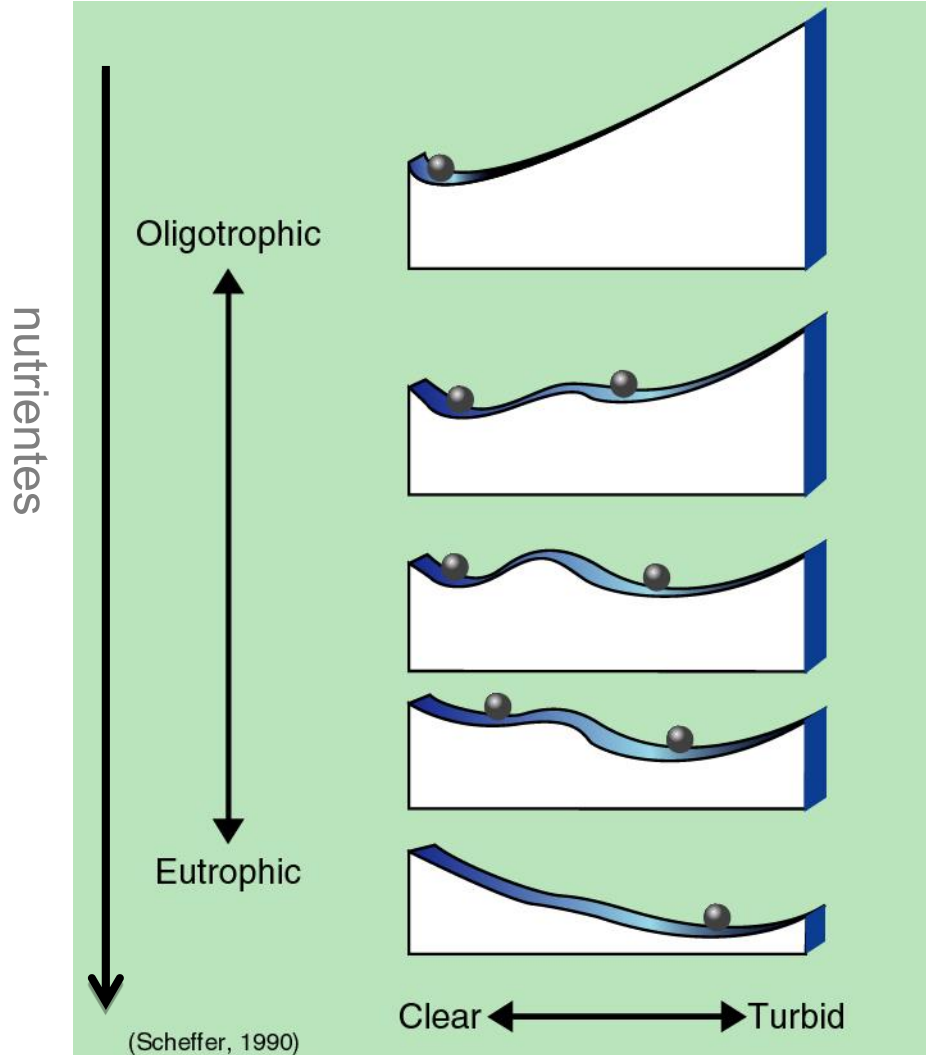
Lagos cálidos



Nutrientes







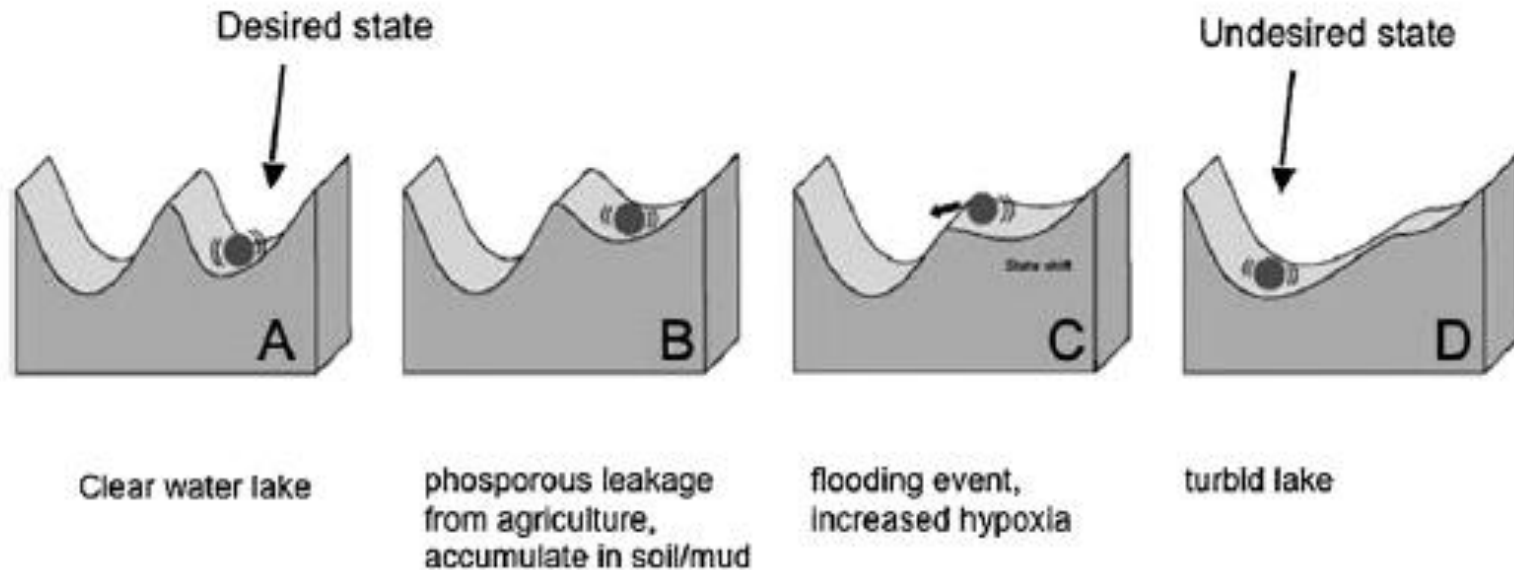
## 1er gran mensaje

La eutrofización reduce la resistencia y resiliencia de los ecosistemas

mediante cambios en procesos biológicos, químicos y físicos.

La Resistencia y resiliencia son moduladas por la estructura trófica y clima.

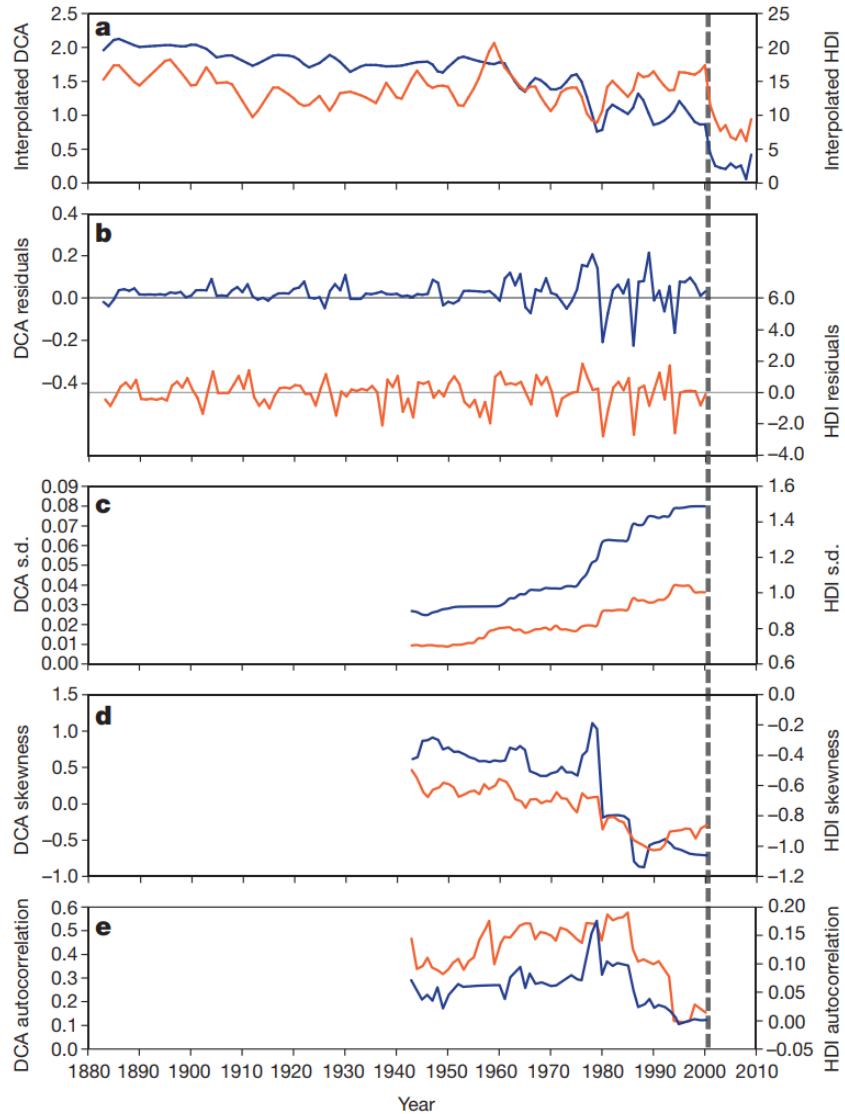
# Y la agricultura en particular disminuye la resiliencia de los ecosistemas acuáticos



Eutrofización / pérdida de vegetación riparia / pérdida de peces grandes y carnívoros

## Agricultural modifications of hydrological flows create ecological surprises

# Gran dificultad de encontrar señales de alerta temprana para detectar cambios de estado...



## Eutrophication science: where do we go from here?

Val H. Smith<sup>1</sup> and David W. Schindler<sup>2</sup>

**“Sean estables o no, los estados alternativos generan grandes complejidades para el manejo de los sistemas acuáticos, y pueden ser uno de los temas más importantes que enfrenten los ecólogos acuáticos actualmente...”**

Smith & Schindler, 2009 Science



Gracias por la atención

Mariana Meerhoff

Depto Ecología y Gestión Ambiental CURE, UDELAR

[merluz@fcien.edu.uy](mailto:merluz@fcien.edu.uy)

