

Eutrofización


causas, efectos y procesos de retroalimentación



Mariana Meerhoff

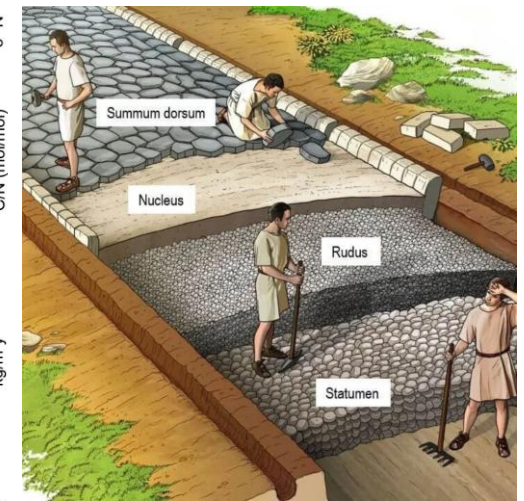
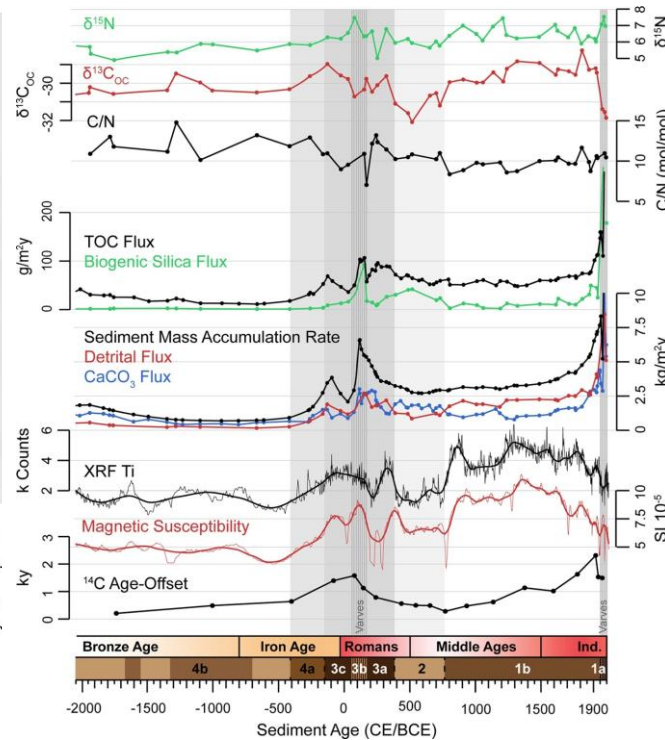
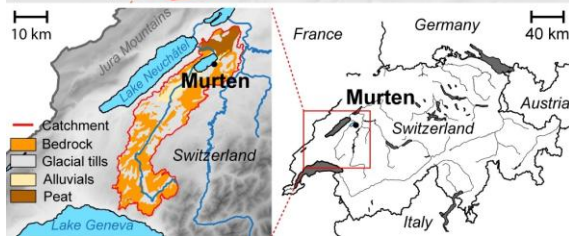
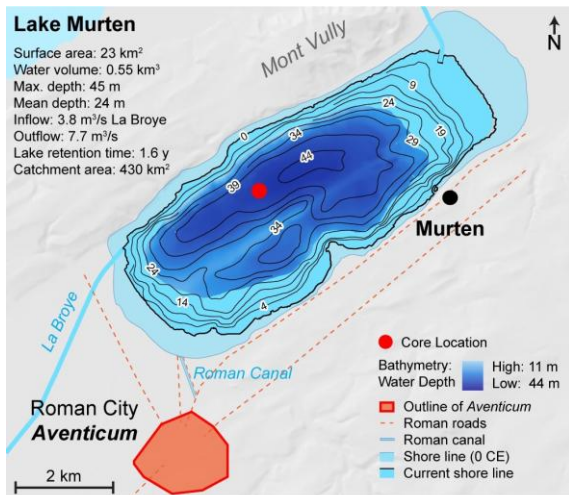
Depto Ecología y Gestión Ambiental CURE, UDELAR

Curso: Eutrofización y biogeoquímica ambiental del P (2026)



Eutrofización :
procesos de enriquecimiento de nutrientes y
aumento de la productividad del ecosistema
acuático

Hoy es global, pero es un viejo problema



**ES UN PROCESO NATURAL O
ANTROPOGÉNICO/CULTURAL?**

Baja disponibilidad natural
de nutrientes (N & P)

Alta diversidad, presencia
depredadores



Ecosistemas naturales: auto regulatorios, resistentes y resilientes

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



Lagos y charcos naturalmente eutróficos por suelos ricos en nutrientes o por ingreso nutrientes desde fauna terrestre o área, o por deposición atmosférica (N)



Sucesión o ciclo temporal de un lago

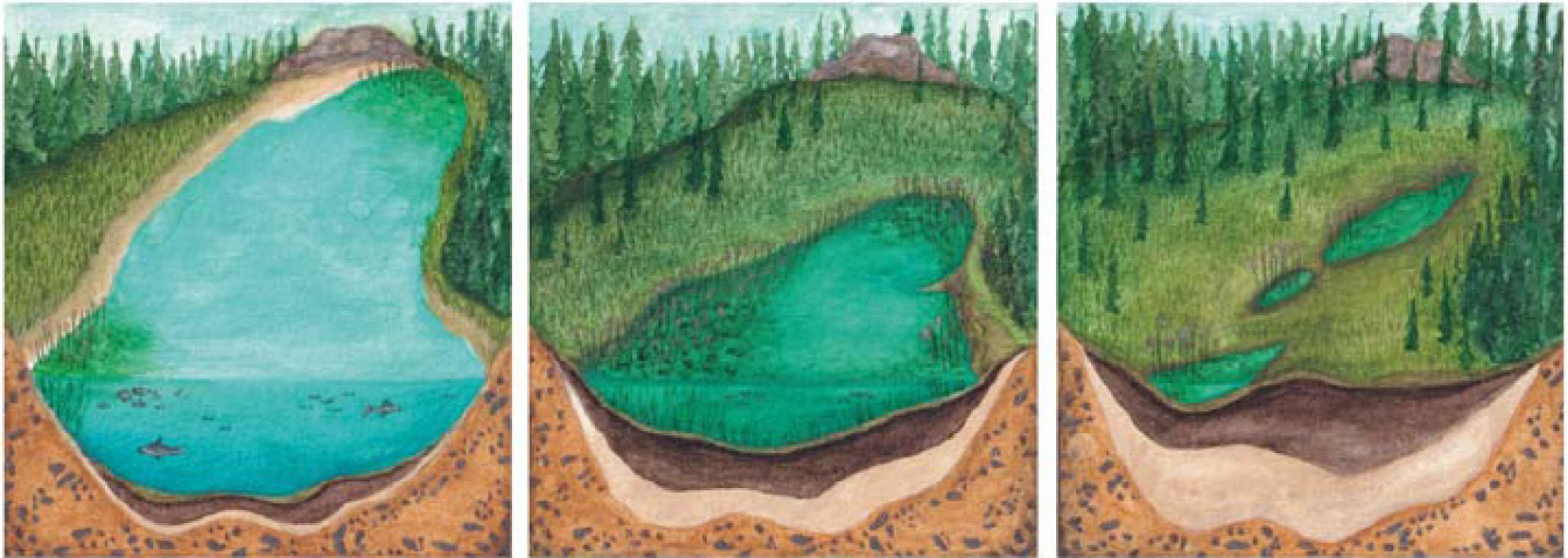
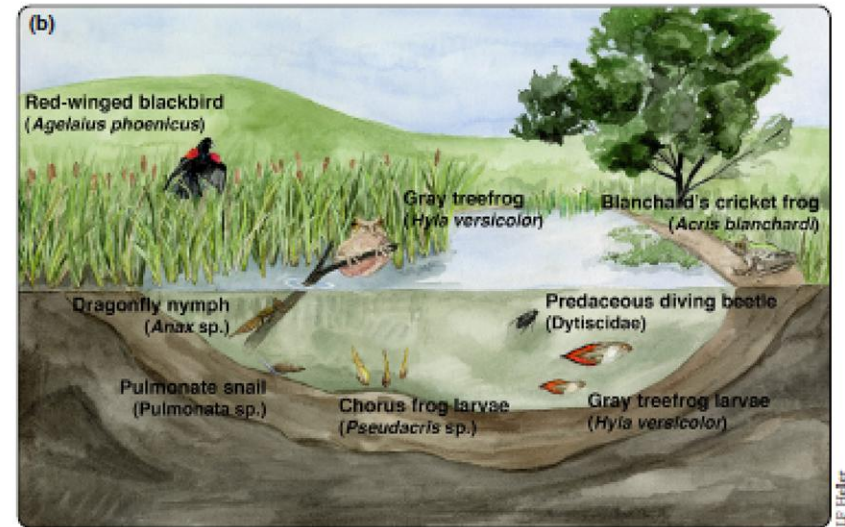
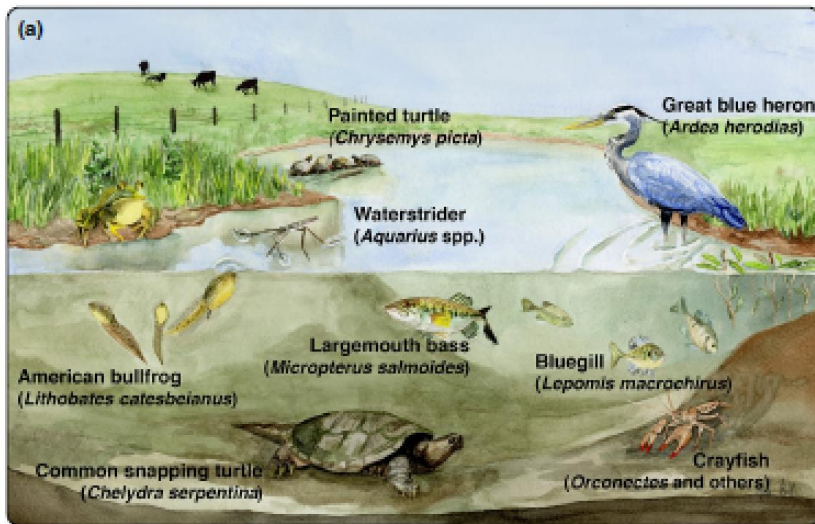


FIGURE 4-18 Lake succession. From left to right: over time, an open lake fills with sediments and organic materials and increased nutrient fluxes accelerate plant growth. The lake ecosystem eventually transitions into a wetland and ultimately land ecosystem. (Artwork by Olaf Giorgino.)

La “terrestrialización” por sedimentación y/o acumulación de materia orgánica puede llevar cientos, miles o millones de años...

Su productividad (=tasa de producción de biomasa por unidad de tiempo y superficie) no tiene porqué cambiar..

La duración del "ciclo de vida" de los lagos varía según cuenca, tamaño y profundidad del cuerpo de agua, manejo y procesos estocásticos...



Las comunidades biológicas cambian con la edad de los ecosistemas. Su productividad puede cambiar, o no.

Front Ecol Environ 2021; doi:10.1002/fee.2381

The American Pond Belt: an untold story of conservation challenges and opportunities

Timothy M Swartz^{1,2*} and James R Miller^{2,3}

“En definitiva, NO hay un patrón único en el desarrollo de los lagos. La dirección del cambio puede revertirse, y con frecuencia..

Lo que ocurre en un lago está determinado por que lo ocurre en su cuenca, lo que depende de la naturaleza de la cuenca original, las circunstancias locales y el clima y cambio climático.

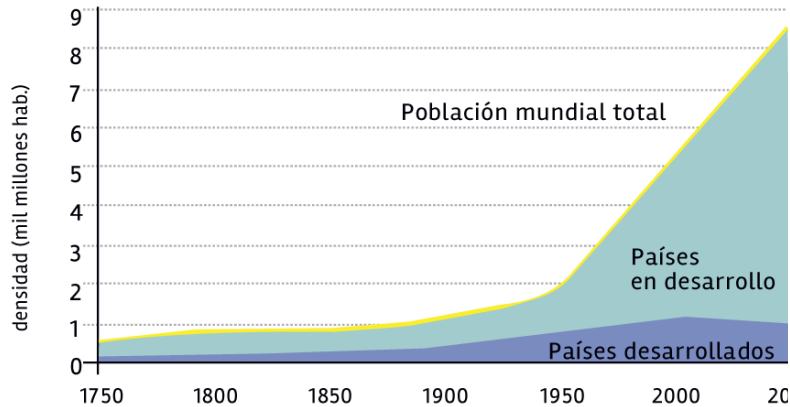
El único aspecto en común a la mayoría de los lagos es el reciente y enorme cambio provocado por las actividades humanas, que pueden generar eutrofización, acidificación, e incluso su desaparición”.



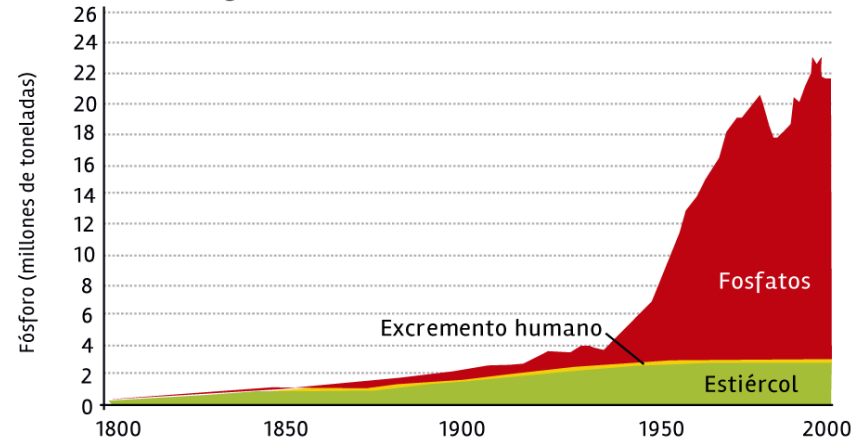
Brian Moss, Ecology of Fresh Waters, 1998

“La gran aceleración” desde 1950s

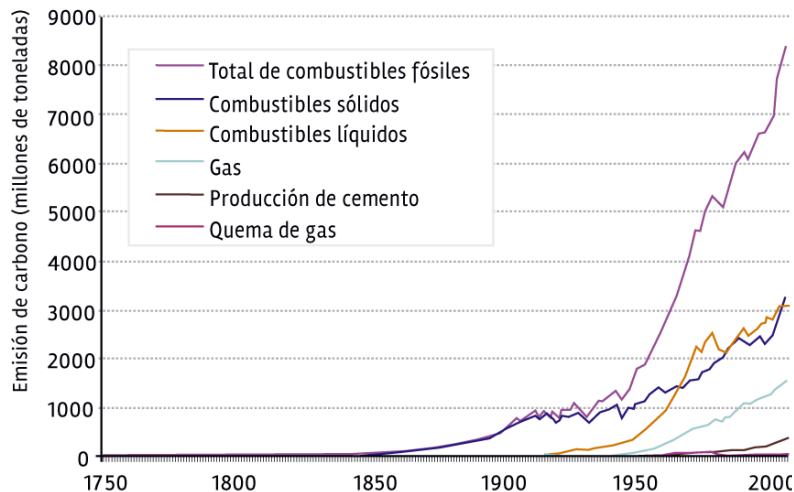
Crecimiento de la población mundial (1750–2050)



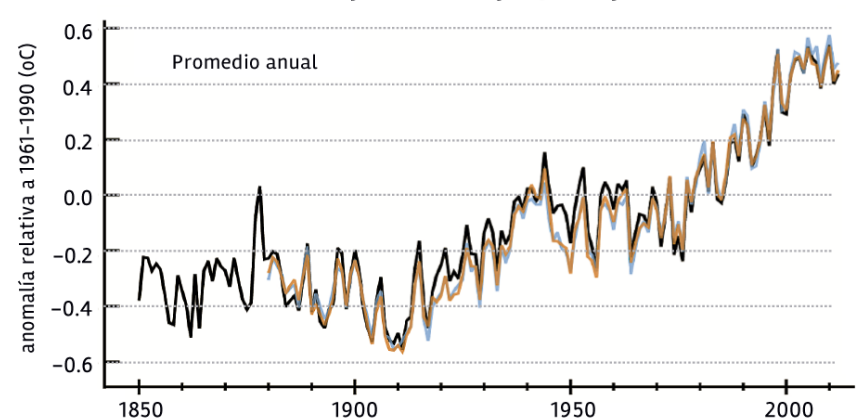
Consumo global de fertilizantes fosforados (1800–2100)



Emisiones globales de carbono por fuente (1750–2010)



Anomalía en la temperatura superficial promedio (1850–2012)



En lo que dura una vida humana, nos hemos convertido en la mayor fuerza de transformación del planeta.



Los enormes cambios en el Sistema Terrestre luego de 1950 están directamente relacionados con cambios vinculados al sistema económico global.

Steffen et al. 2015



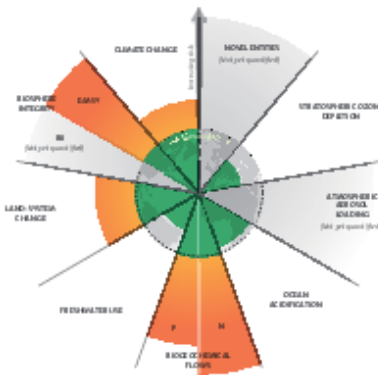
Límites planetarios

2009



7 boundaries assessed,
3 crossed

2015



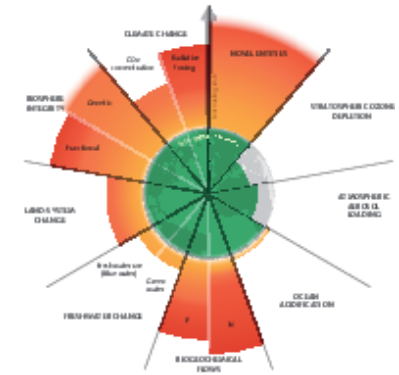
7 boundaries assessed,
4 crossed

2023



9 boundaries assessed,
6 crossed

2025



9 boundaries assessed,
7 crossed

“Gran aceleración” de causantes de eutrofización

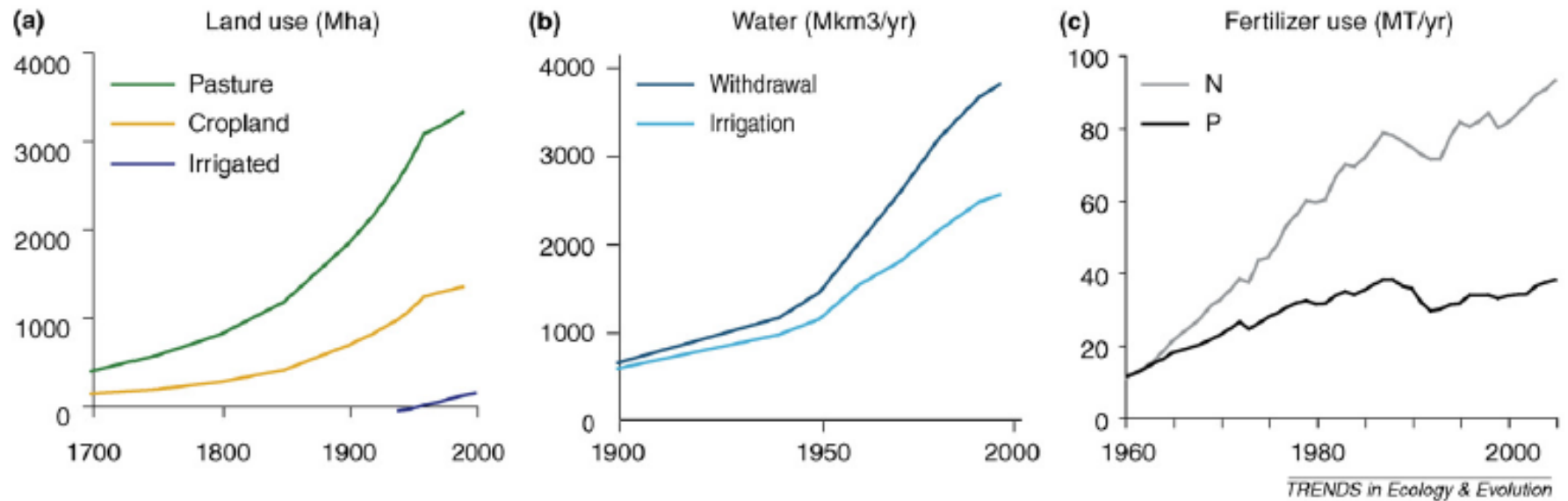
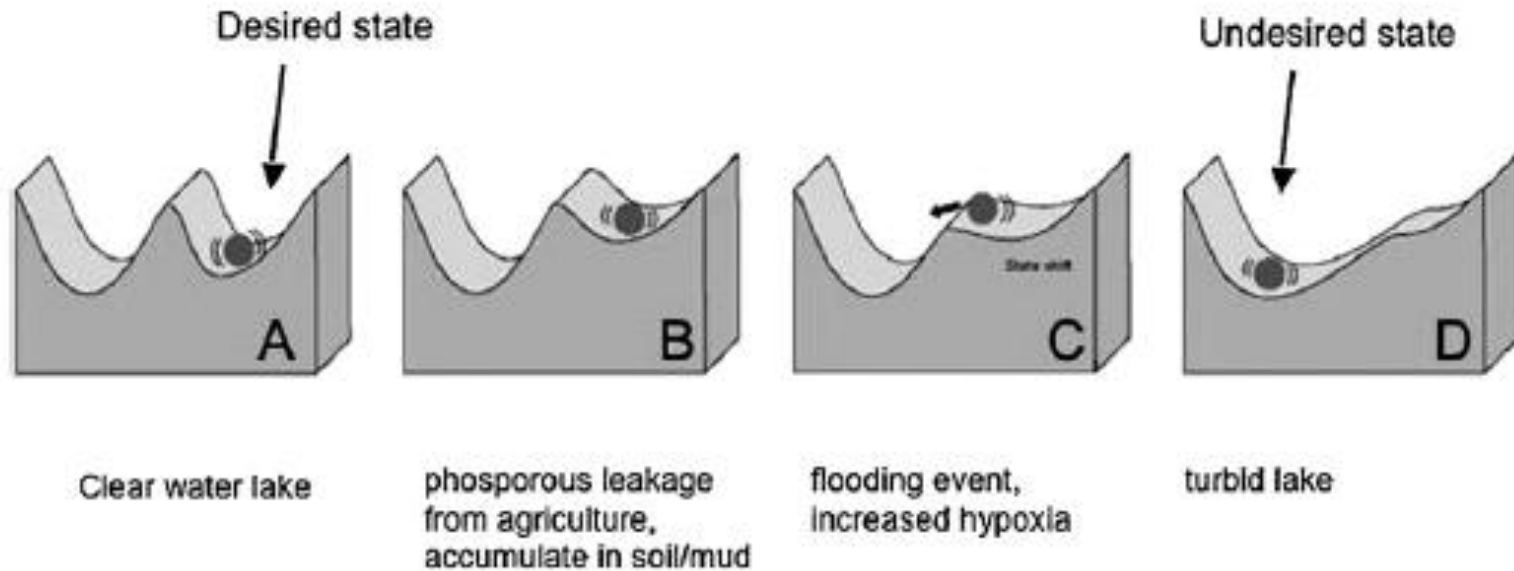


Figure I. Agriculture's extent and modification of the quantity and quality of hydrological flows have increased over the past centuries.

Agricultural modifications of hydrological flows create ecological surprises

Line J. Gordon¹, Garry D. Peterson² and Elena M. Bennett³

La agricultura disminuye la resiliencia de los ecosistemas acuáticos



Eutrofización / pérdida de vegetación riparia / pérdida de peces grandes y carnívoros (consumidores de otros peces)

Agricultural modifications of hydrological flows create ecological surprises

IMPACTOS DIRECTOS:

Erosión y Sedimentación.

Sobreexplotación (agua para riego) y cambios en ciclos hidrológicos.

Contaminación del agua superficial y subterránea por agroquímicos.

Eutrofización y proliferación de algas y cianobacterias.

Disminución de la biodiversidad terrestre y acuática.

Características de la cuenca



Cuánto mayor la cuenca, mayor su influencia sobre la química del agua

Características de la cuenca



Tamaño
Uso y cobertura del suelo
Pendiente

Nutrientes,
Carbono,
pH,
Color (sustancias húmicas)

Interacción entre factores a distintas escalas: Clima y características locales del cuerpos de agua



Tipo de cuenca

(montañosa o llanura).

Posición en el paisaje

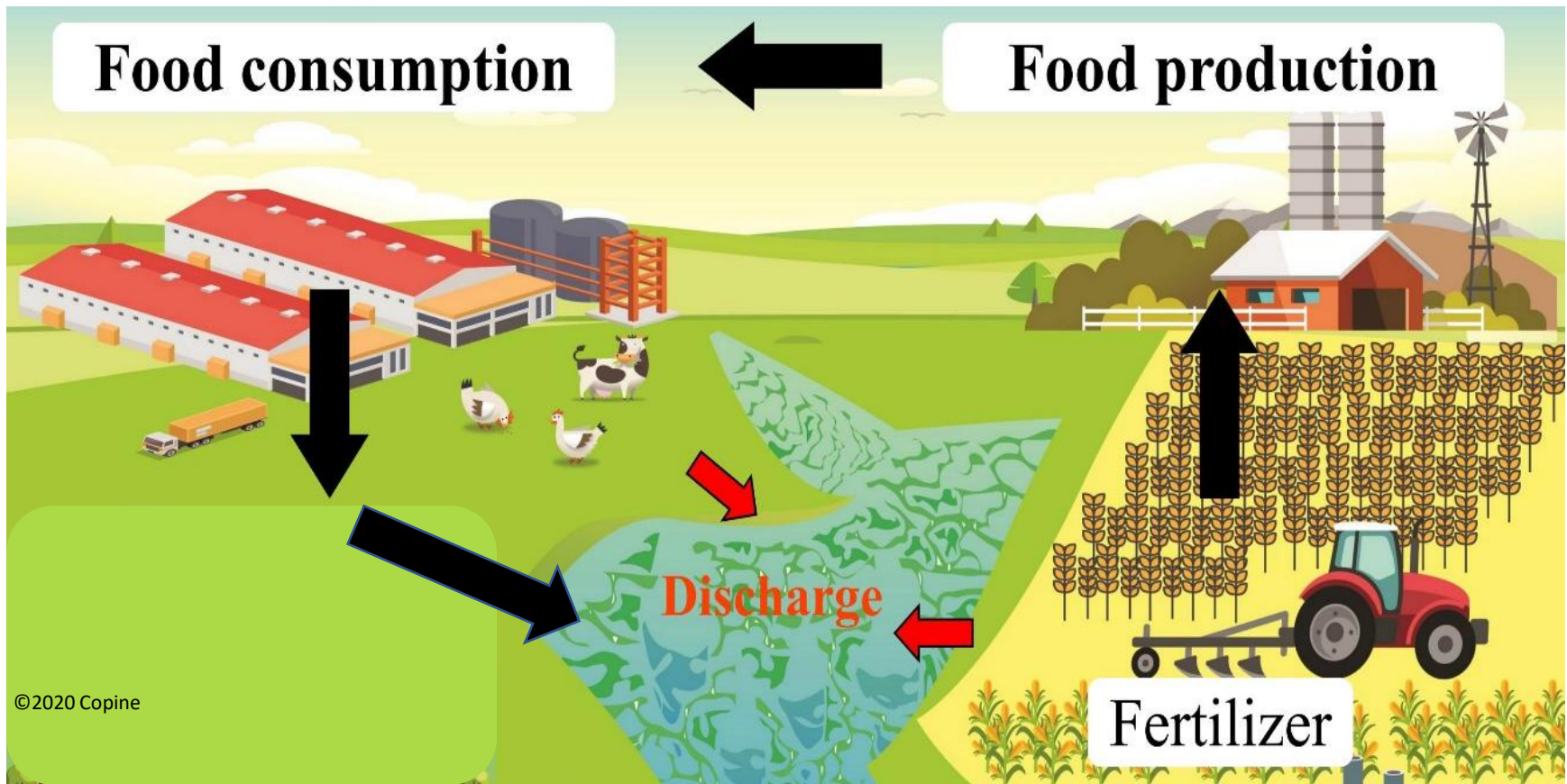
(afectando régimen de flujo hidrológico).

Aspectos físicos del cuerpo de agua, como morfometría y claridad del agua.

Alineación del sistema respecto de los vientos principales

(afectando régimen de mezcla o fenología del hielo en climas fríos).

En particular, los usos del suelo para producir alimento promueven eutrofización



Agua naturales y también (o más) cuerpos de agua artificiales

De las fuentes a los cuerpos de agua

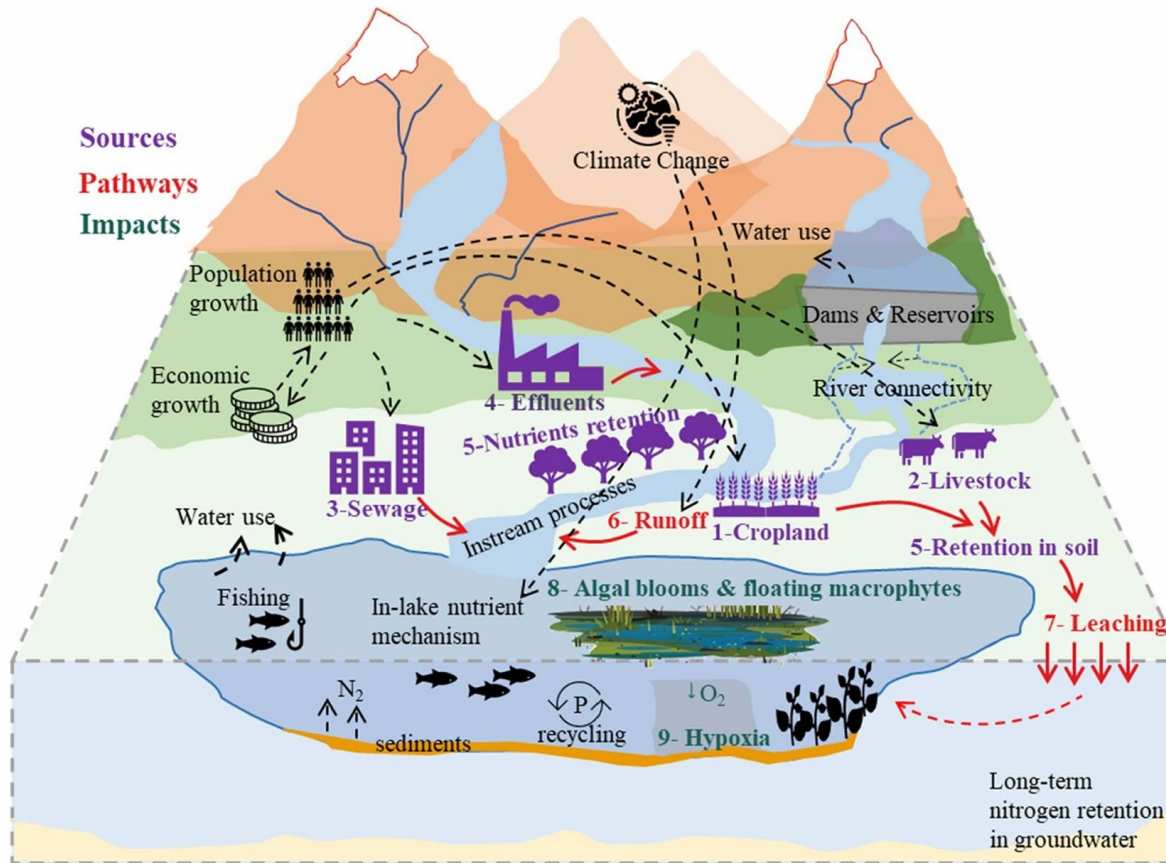
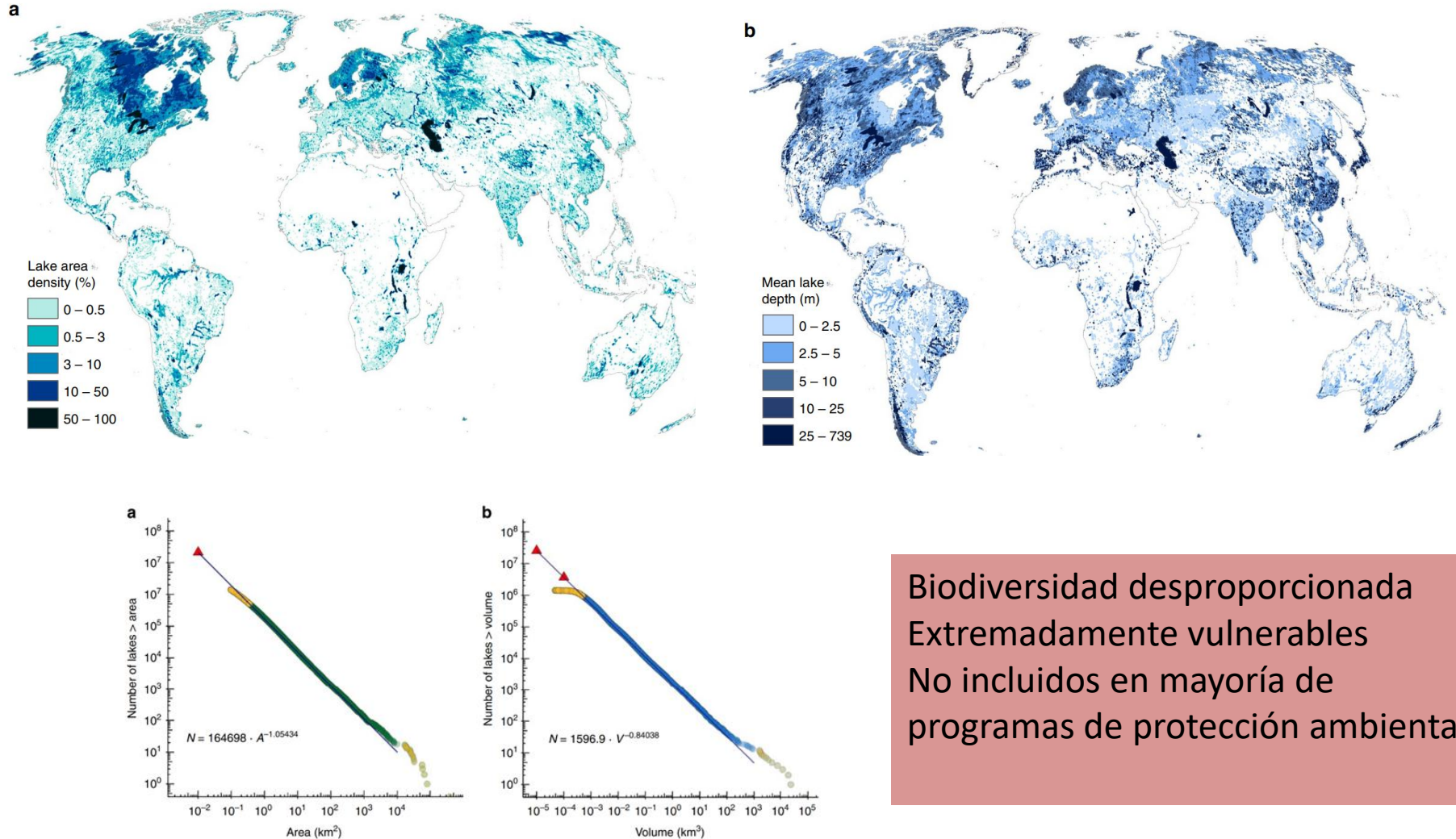


Figure 1. Schematic overview of main nutrient sources (the purple color), pathways (the red color), and impacts (the green color) of eutrophication in freshwater lakes. Population and economic growth drive nutrient emissions. The main sources are 1- croplands, 2- livestock, 3- domestic sewage from rural and urban areas, 4- industrial effluents, 5- legacy nutrients (from surplus in soil on agricultural lands and green areas). These nutrient loads are delivered to lakes via two main hydrological pathways: 6- surface runoff, 7- leaching to groundwater subsequently discharged into streams. The increase of nutrient concentrations cause 8- algal blooms, increased floating macrophytes and 9- hypoxia. The extent of these impacts depend on the nutrient loads from land, rivers, and in-lake nutrient mechanisms i.e. P recycling from sediments, stratification, nitrification, fish abundance, plankton dynamics and climate change factors (e.g. temperature, precipitation). The dashed lines refer to links of population growth, economic growth and climate change with sources, pathways and impact. Refer to the web version of the article for the color representation of this figure.

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

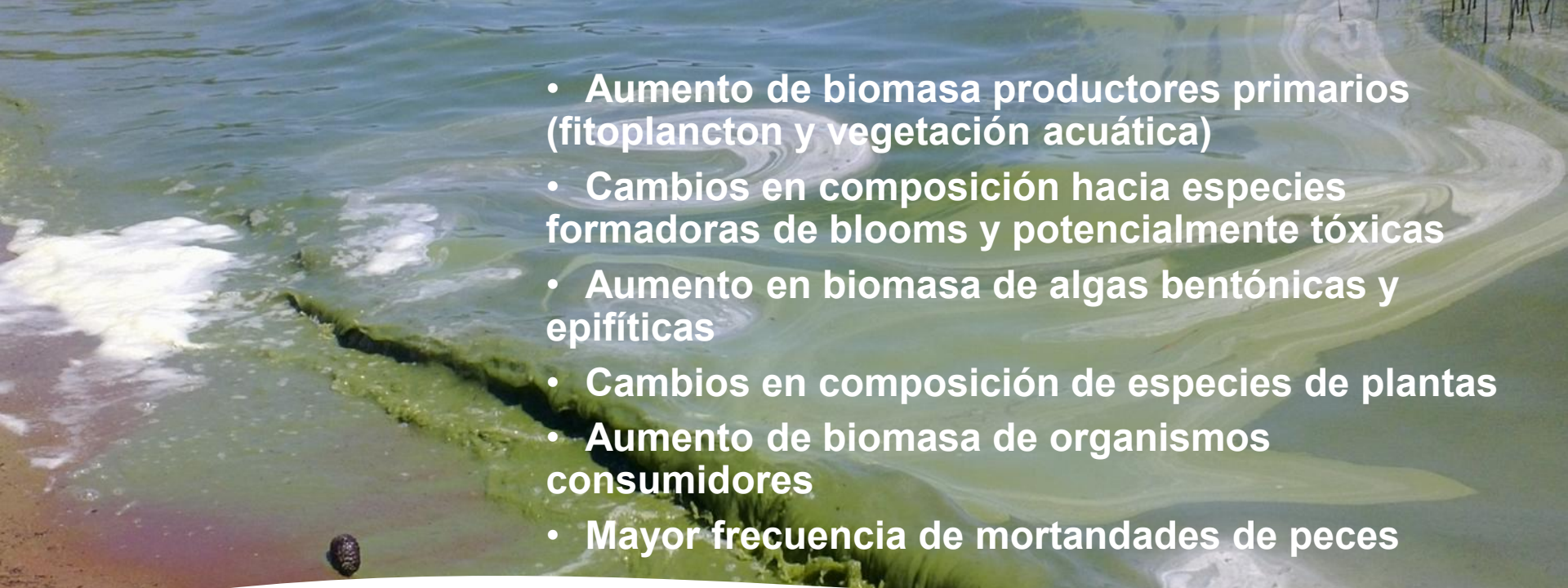


Biodiversidad desproporcionada
Extremadamente vulnerables
No incluidos en mayoría de
programas de protección ambiental

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.

La mayoría de los ecosistemas de agua dulce del mundo son, por lo tanto, altamente vulnerables a lo que ocurre en sus cuencas.

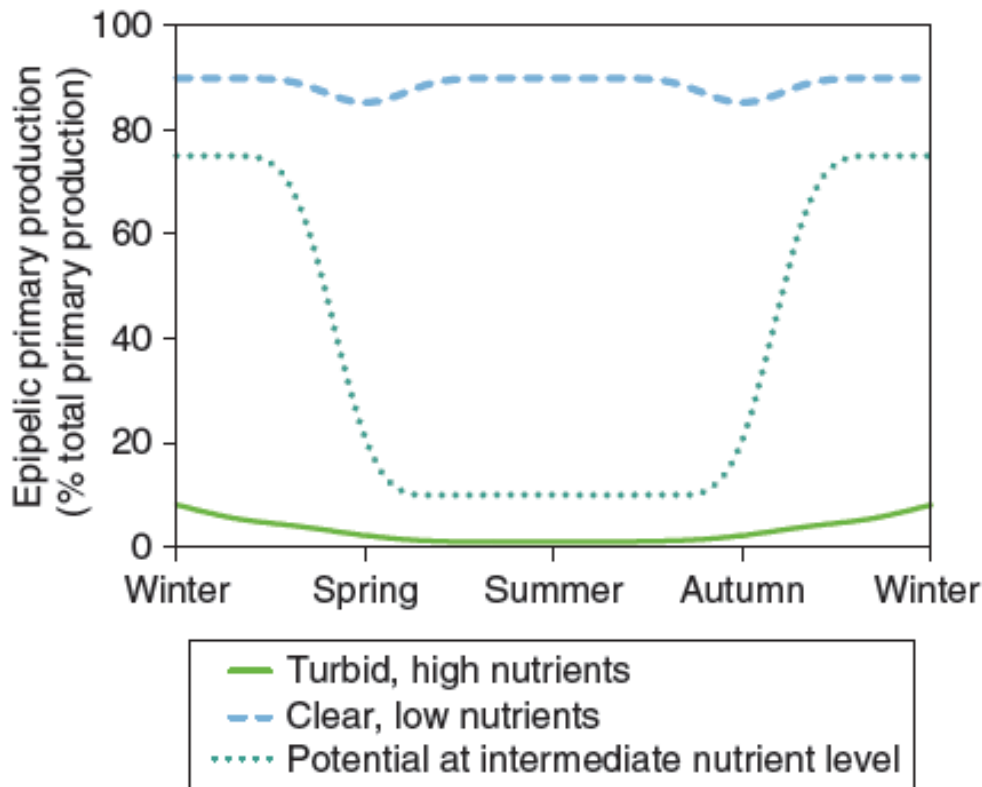
Los lagos someros son más vulnerables que los lagos profundos, y los lagos son más vulnerables que los sistemas de aguas corrientes

- 
- An aerial photograph of a body of water, likely a lake or reservoir, showing a significant green algal bloom. The water is a mix of blue and green, with a large, dense area of bright green algae in the center and left. The shoreline is visible at the bottom left, with some brownish sediment or sand. The overall scene illustrates the effects of eutrophication on aquatic ecosystems.
- Aumento de biomasa productores primarios (fitoplancton y vegetación acuática)
 - Cambios en composición hacia especies formadoras de blooms y potencialmente tóxicas
 - Aumento en biomasa de algas bentónicas y epifíticas
 - Cambios en composición de especies de plantas
 - Aumento de biomasa de organismos consumidores
 - Mayor frecuencia de mortandades de peces

Efectos ecológicos de la eutrofización

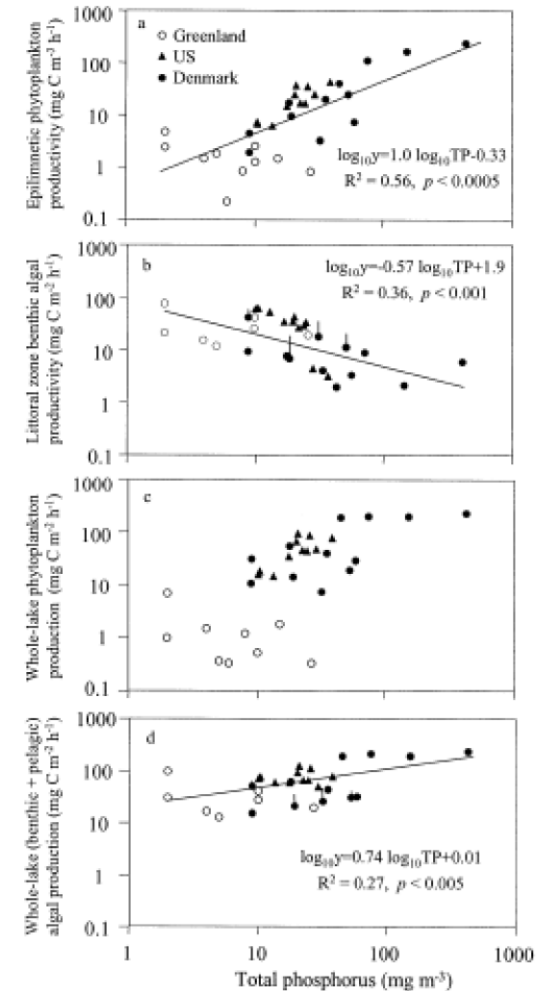
- **Pérdida de transparencia del agua**
- **Problemas de olor, sabor y en el tratamiento de agua potable**
- **Hipoxia y Anoxia**
- **Disminución de la biodiversidad**

Cambios en funcionamiento ecosistémico



Cambio de Producción Primaria principalmente bentónica a principalmente pelágica

Liboriussen & Jeppesen 2009



Vadeboncoeur et al 2003

La mayor productividad puede canalizarse hacia especies que son directamente cosechables para consumo humano.

Sin embargo, **en general el exceso de nutrientes es usado por organismos indeseables** o dañinos para personas y fauna silvestre o doméstica.



Foto tomada de internet: fish ponds en China

Cambios en estructura comunitaria

Lago oligo-mesotrófico



Dominado por macrófitas y
con peces piscivoros

cladóceros grandes, copéodos
calanoides y especies litorales

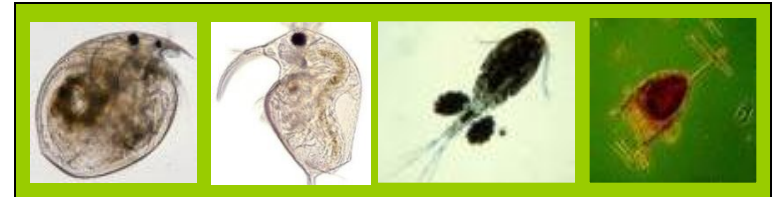


Lago eutrófico



Dominado por fitoplancton y
peces zooplanctívoros

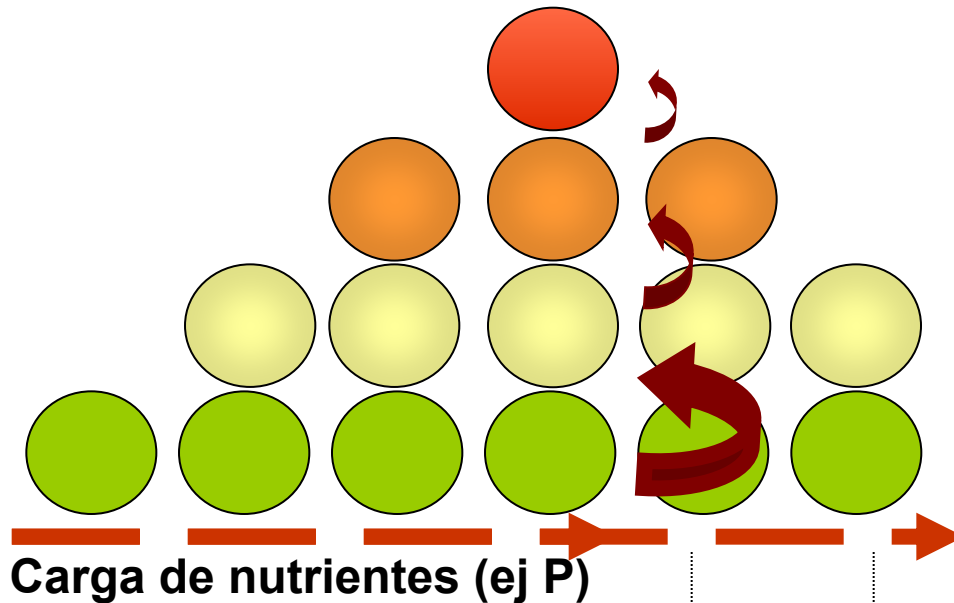
Cladóceros pequeños, copéodos
ciclopoides y rotíferos



eutrofización



Cambios en número de niveles tróficos (niveles de la trama alimenticia)



niveles tróficos:

4. depredadores tope
(carnívoros)

3. consumidores secundarios
(carnívoros)

2. consumidores primarios
(herbívoros)

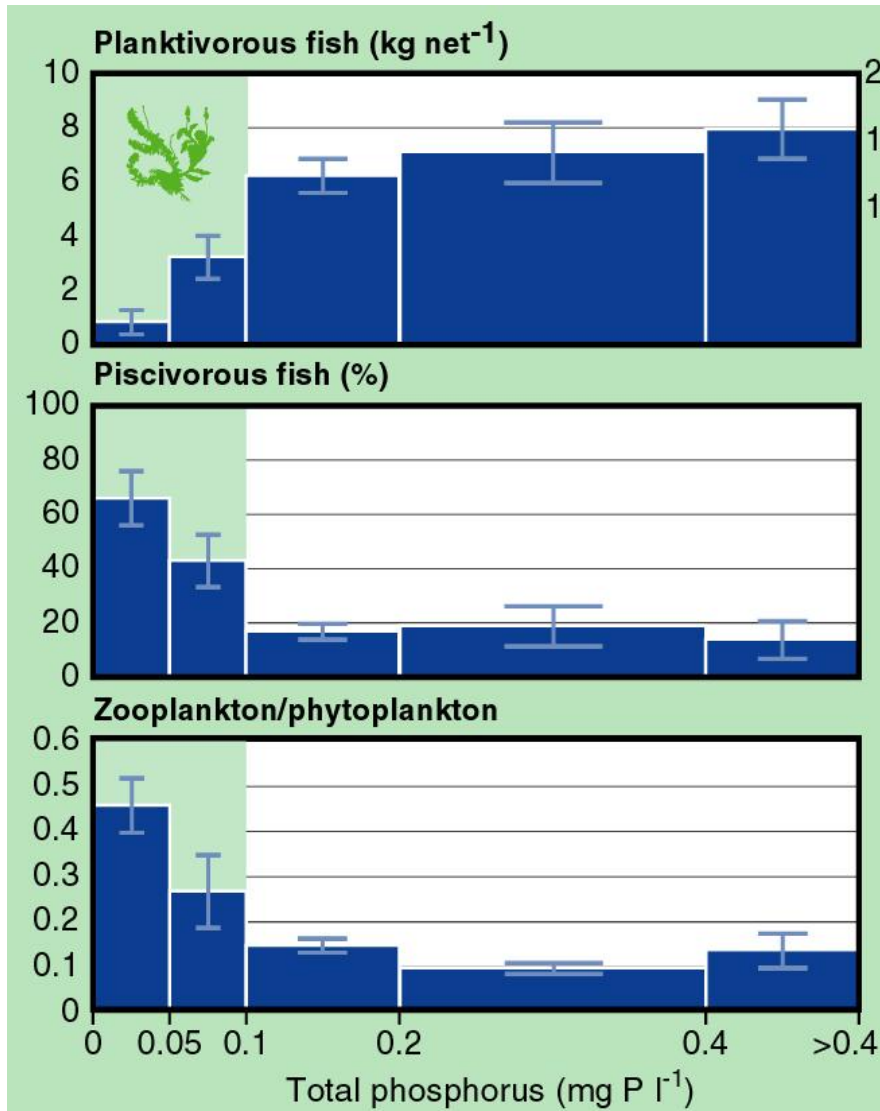
1. productores primarios

Baja eficiencia ecológica: 5-15%
fracción de energía en un nivel trófico que pasa al nivel inmediato superior (Lindemann, 1942)

mayor productividad puede intensificar interacciones bióticas (competencia, depredación), afectando coexistencia

dominancia especies tolerantes a cond. extremas
pérdida de depredadores tope y/o consumidores intermedios

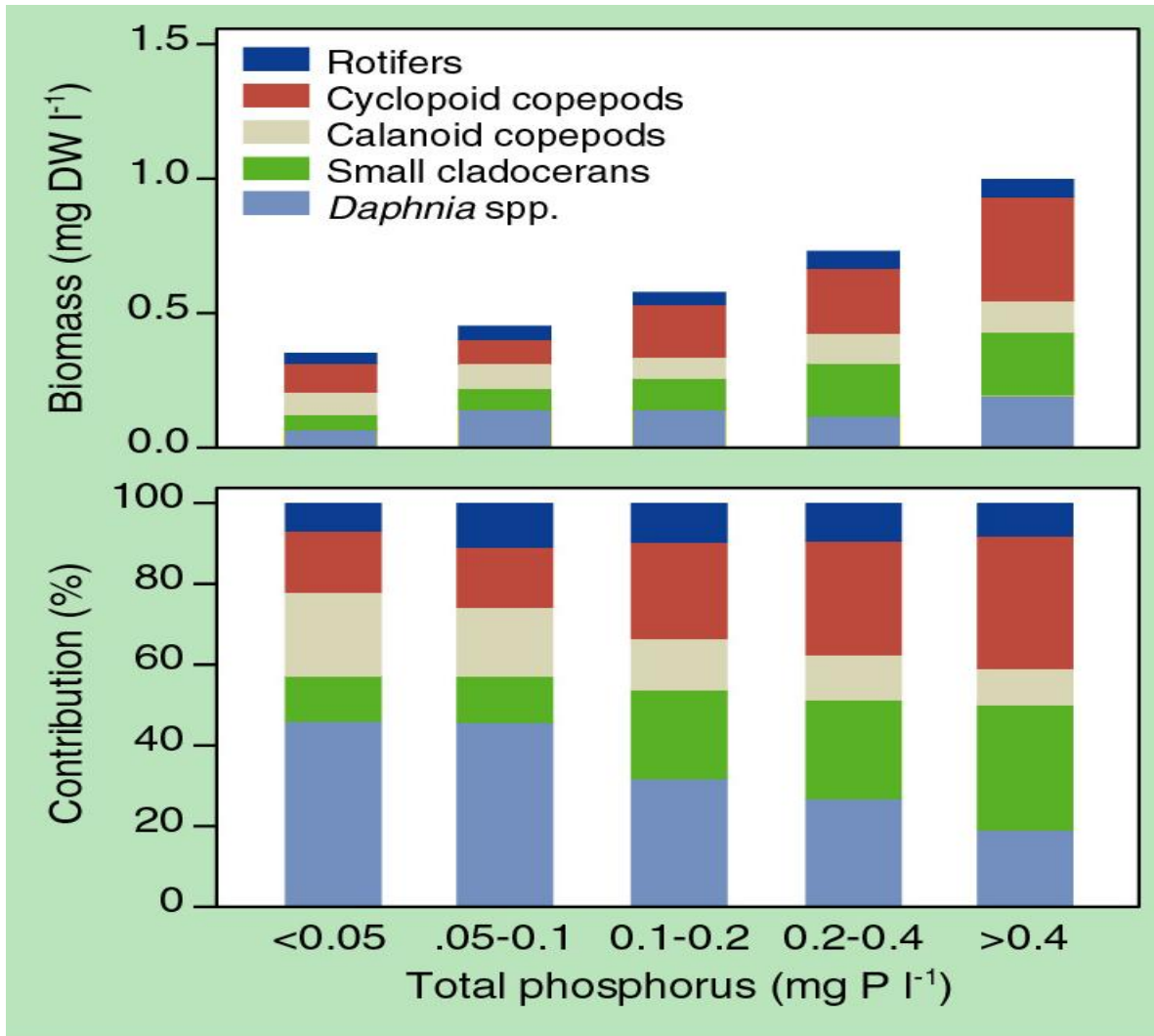
Cambios en comunidad de peces



En lagos templados se ha descrito un **umbral de TP** que promueve cambios significativos en la estructura de la comunidad de peces

(grupos funcionales) y consecuentemente también en el zooplancton y su capacidad de controlar la biomasa de fitoplancton

Cambios en comunidad de zooplancton



Cambios en biomasa y composición del zooplancton son resultado de procesos *bottom up* (nutrientes, alimentos) y *top-down* (consumo)

Eutrofización de lagos someros templados: cambios en plancton

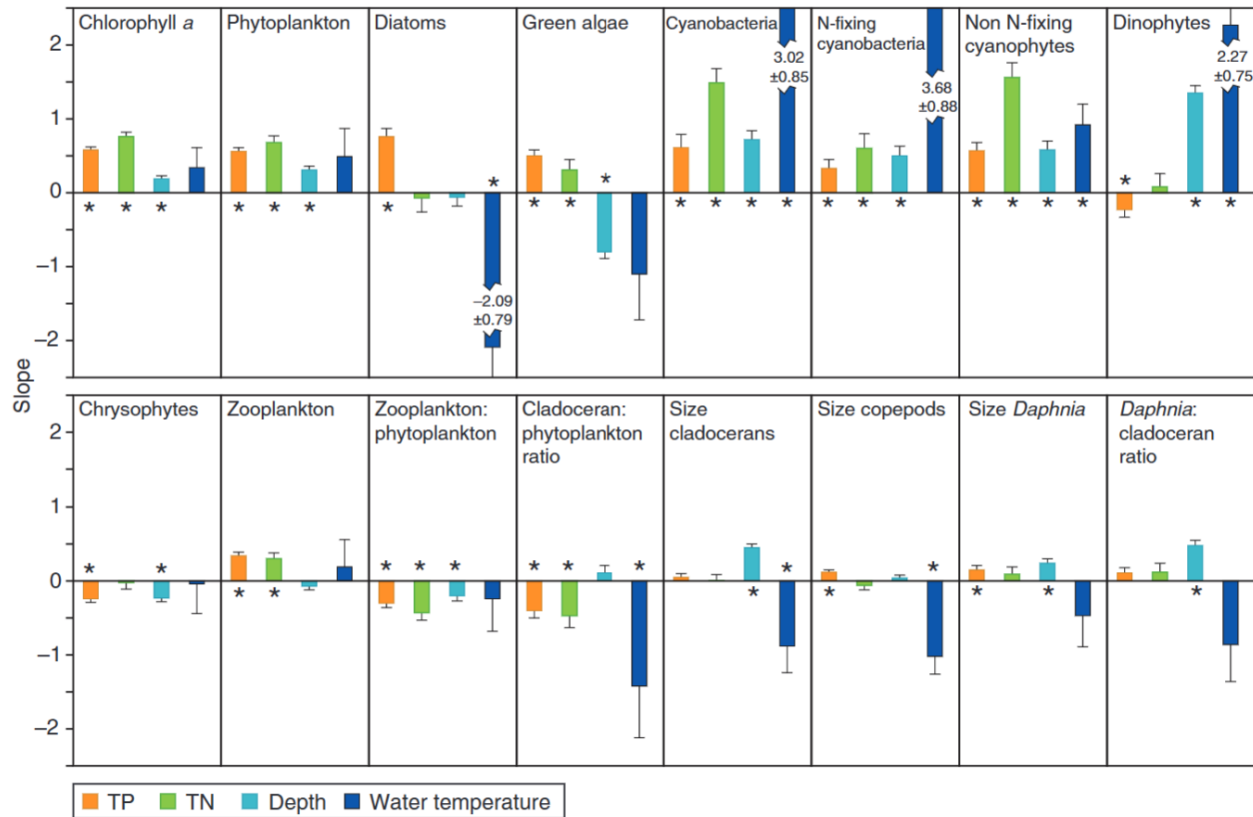
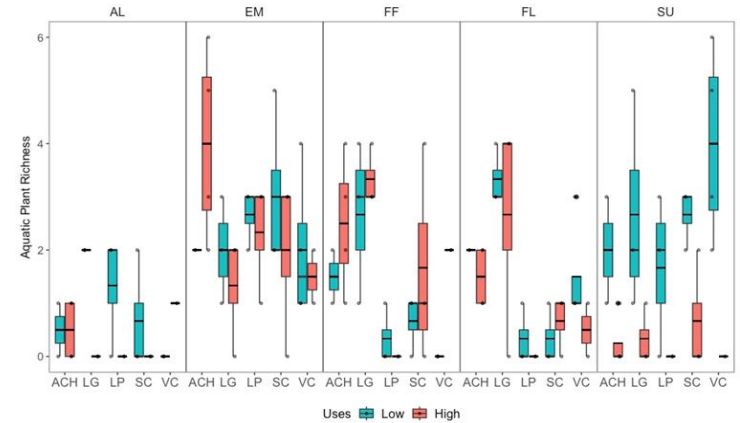
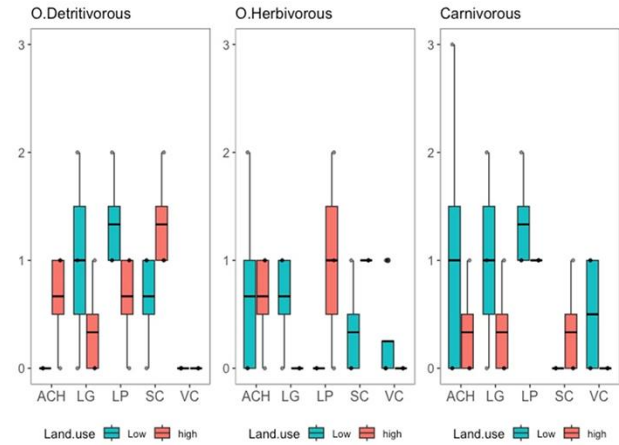
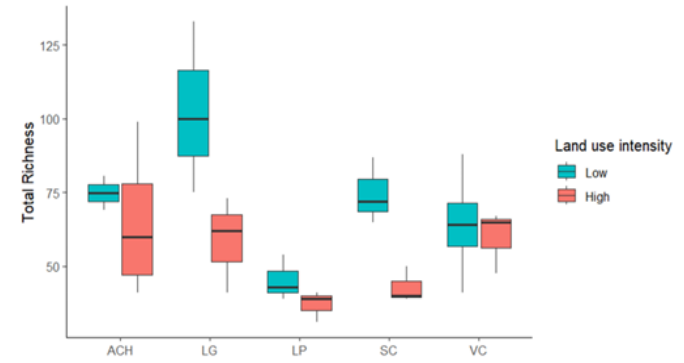
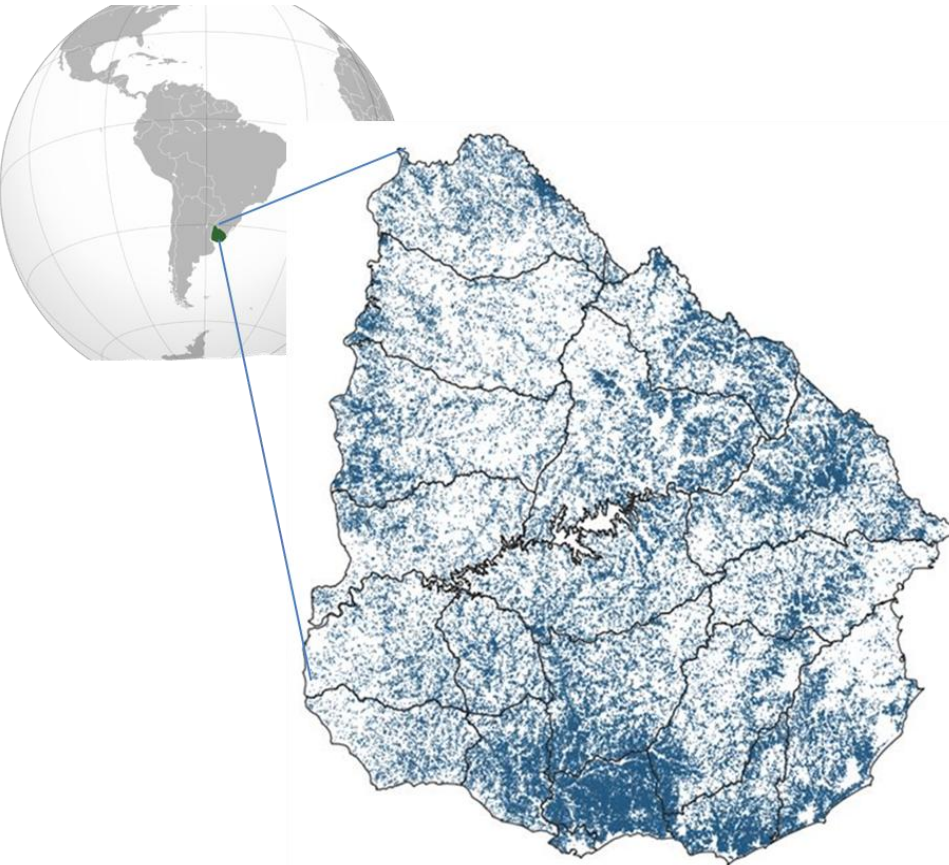
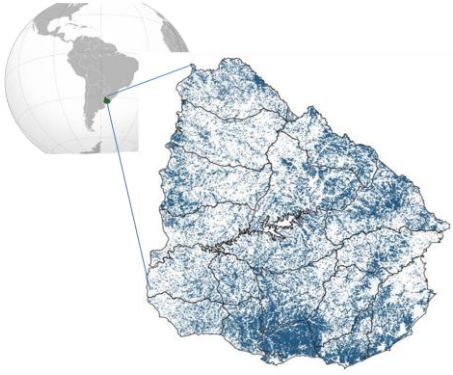


Figure 6.1 Slopes of multiple regressions relating various phytoplankton and zooplankton variables (log transformed) to concentrations of total phosphorus (TP) and total nitrogen (TN) in surface water, mean lake depth and surface water temperature (all log transformed) measured in August in 250 lakes and over 800 lake-years in Denmark. Significant ($p < 0.05$) slopes are indicated by asterisks. (From Jeppesen *et al.* 2009.)

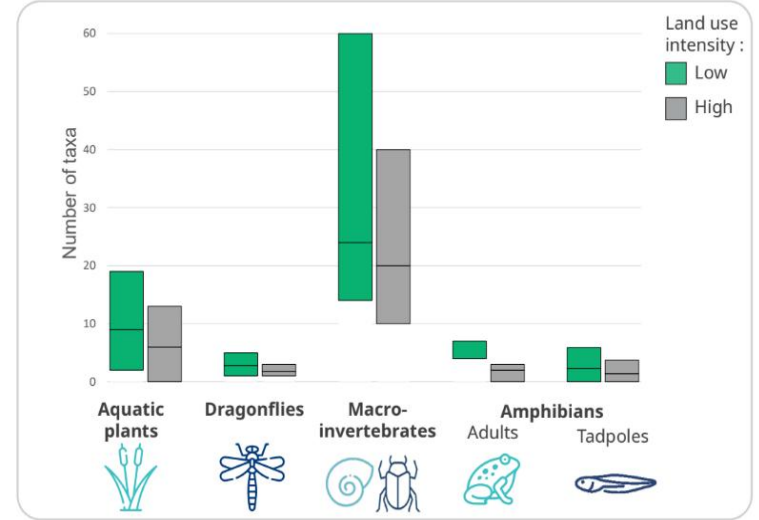
Menor biodiversidad en grupos ecológicos clave: tajamares de Uy





Menor biodiversidad en grupos ecológicos clave: tajamares de Uy

AQUATIC BIODIVERSITY



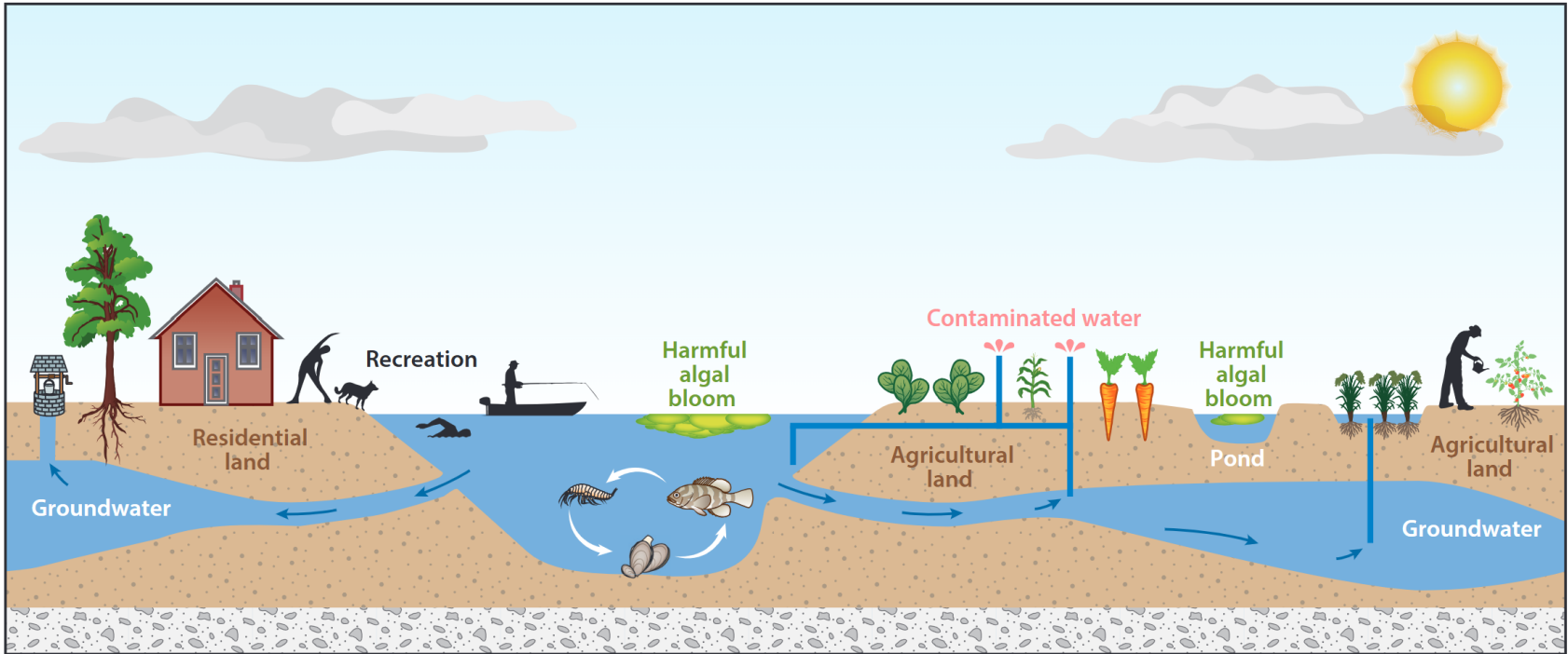
FLAGSHIP SPECIES :



Passadore Romero et al. 2024

Nota: para la biodiversidad, tanto P como N son relevantes
(James et al. 2003, González-Sagrario et al. 2005, Moss 2008)

Cyanotoxinas: cada vez más frecuentes en la trama trófica, aguas y alimentos



Lee et al. 2017 Annu. Rev. Food Sci. Technol.

Otros posibles efectos ecológicos de la eutrofización

Mayor **biodegradación** de productos petroquímicos, hidrocarburos aromáticos y pesticidas en muchos ecosistemas acuáticos por cambios en la comunidad bacteriana.

Mayor **absorción de contaminantes** tóxicos atmosféricos por parte de los lagos.

Cambios en el **metabolismo**, el ciclo y la **biomagnificación** de contaminantes.

Cambios en abundancia, composición, **virulencia y supervivencia de patógenos** (ej mayor velocidad de replicación de los virus acuáticos).

Cambios indirectos en abundancia de patógenos al modificar la abundancia y distribución de sus hospedadores y **vectores**.

Review

Cell

Eutrophication science: where do we go from here?

Val H. Smith¹ and David W. Schindler²

2009 Science

mensaje 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...

Procesos de Retroalimentación en ecosistemas lénticos:

porqué persiste la eutrofización y sus síntomas?



Marco conceptual clave en lagos someros: **Regímenes Estables Alternativos**

Términos clave:

Mecanismos "buffer"

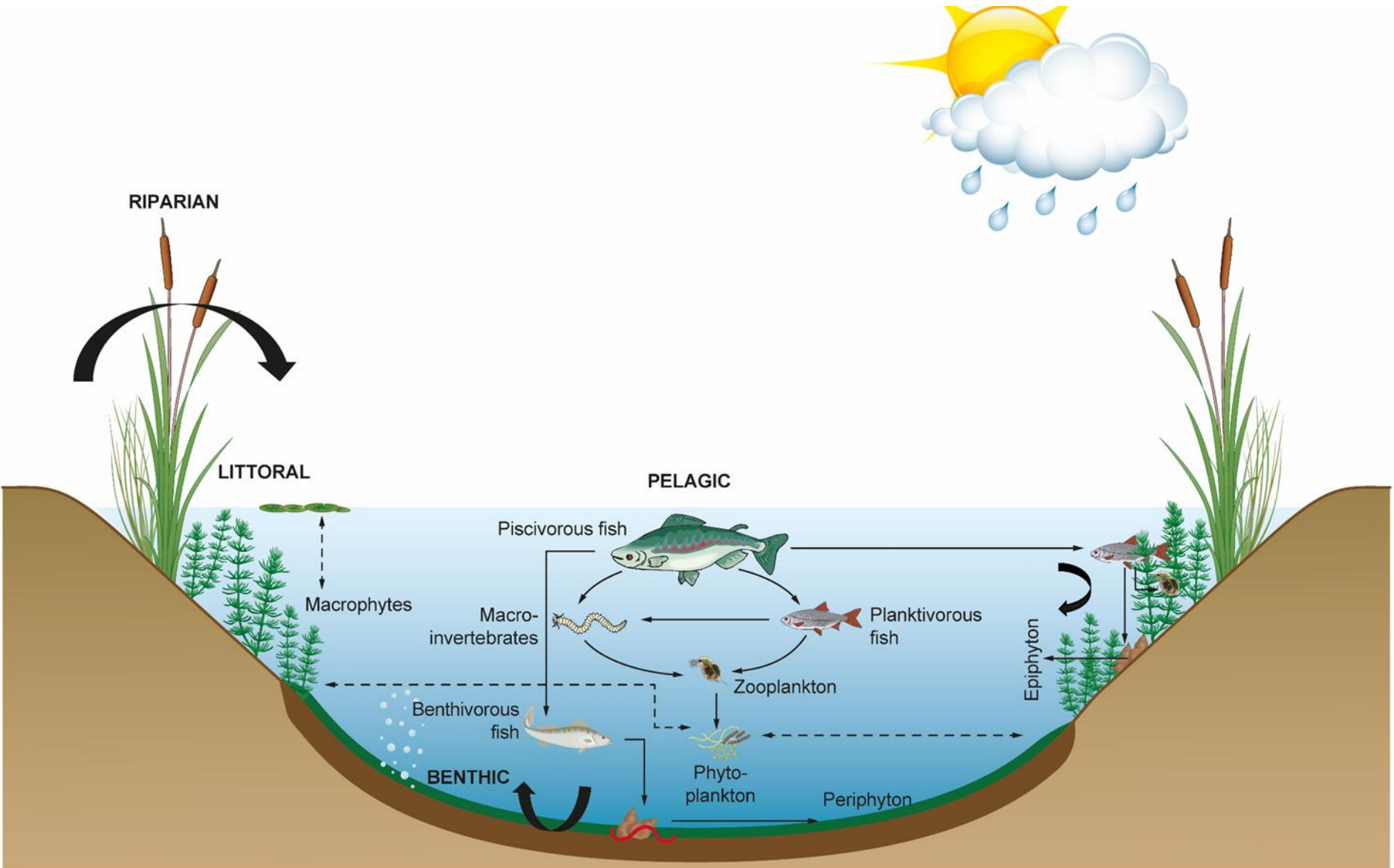
Histéresis

Atractores, Valores umbrales y "Tipping points"

Transiciones críticas/Catastróficas

Estabilidad y Resiliencia (sensu Holling)

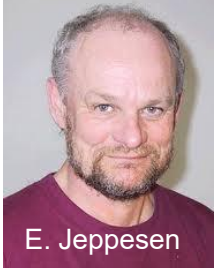
Lagos someros, lagunas y charcos



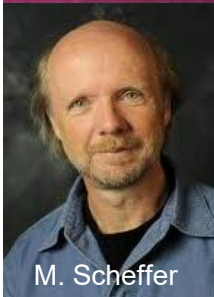
Teoría de los Estados *Estables Alternativos*



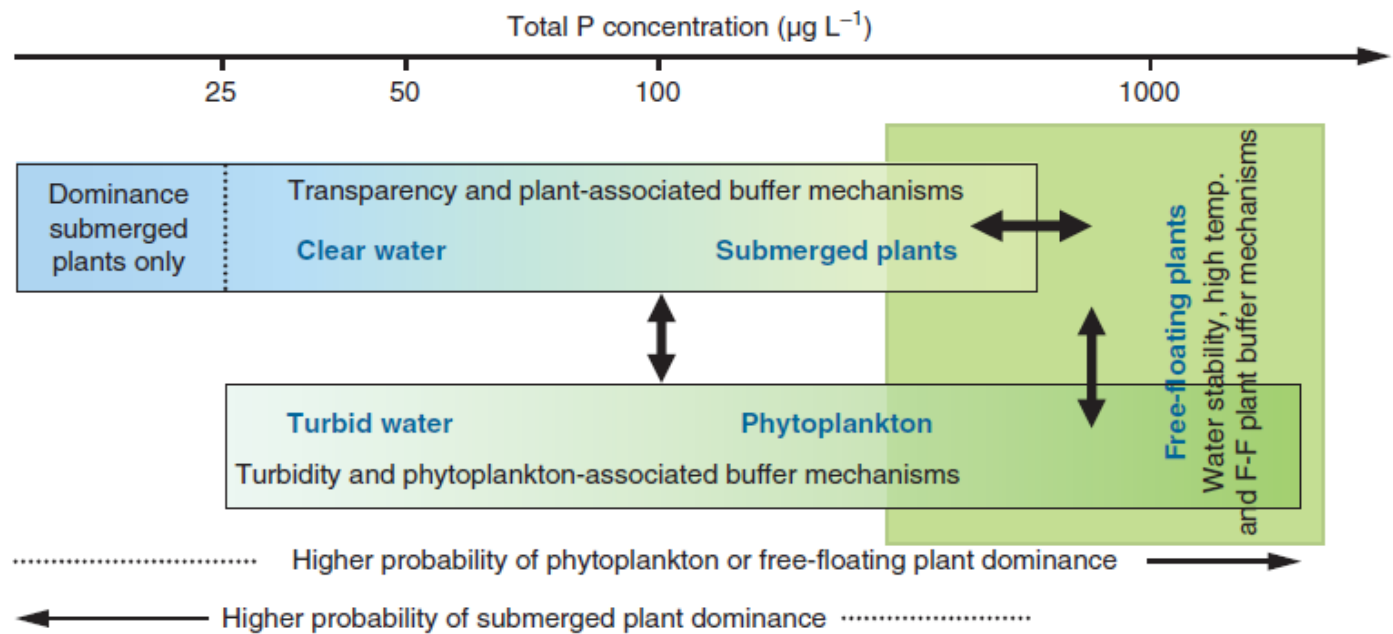
B. Moss



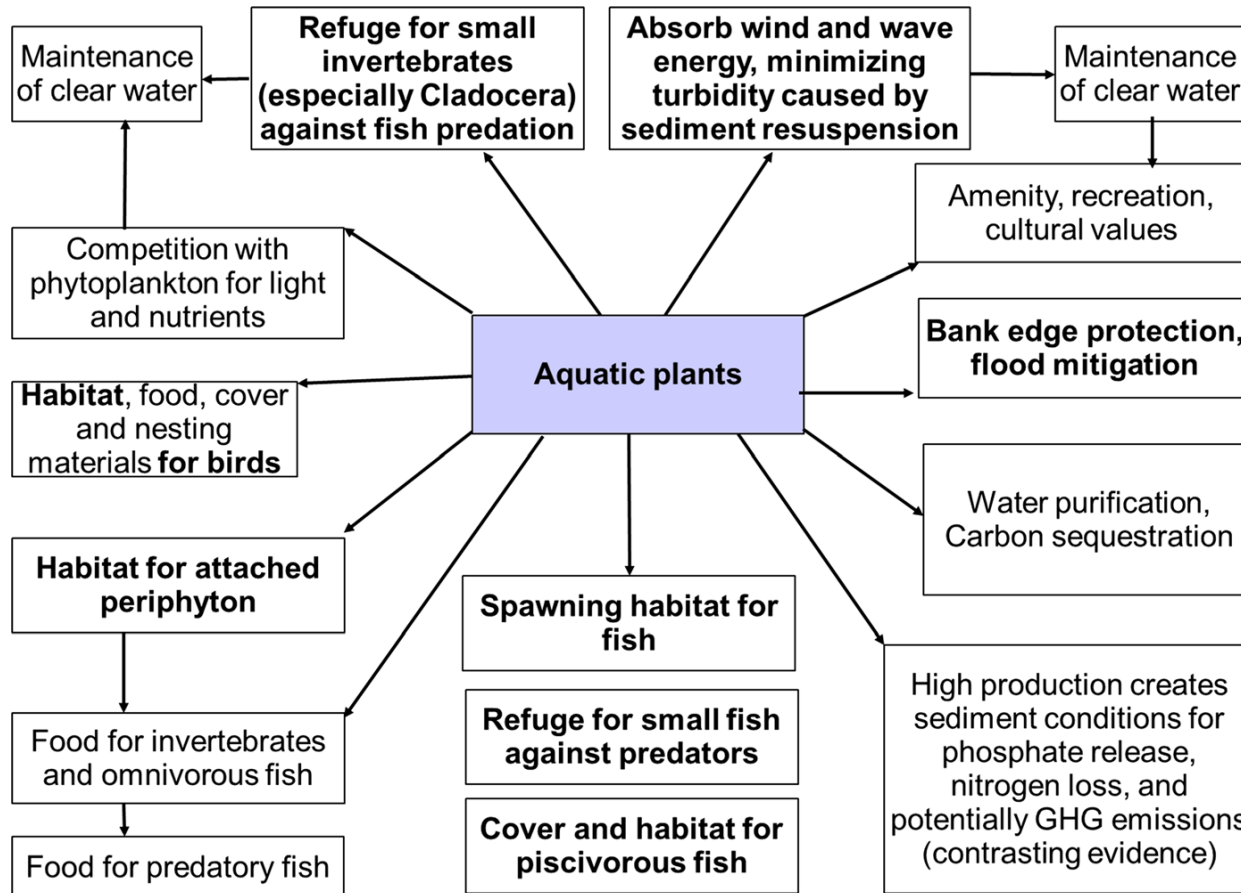
E. Jeppesen



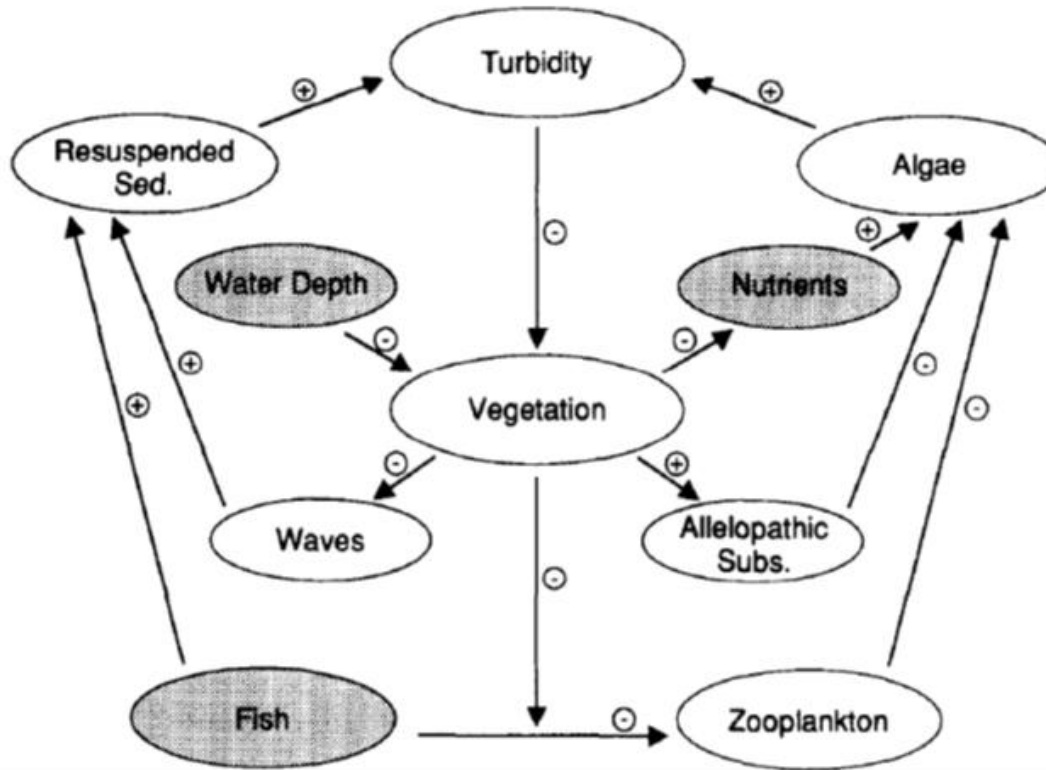
M. Scheffer



Rol clave de plantas acuáticas en la provisión de SSEE de lagos someros, charcos y humedales



Estados alternativos: "Buffers" y "Feedbacks": Rol ecológico "fundamental" de plantas sumergidas



Scheffer et al. 1993, TREE

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, Vejløvej 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, Vejløvej, Silkeborg, Denmark