

## MESA 1. UNA VISIÓN INTEGRAL DEL AGUA: FORMAS DE AFRONTAR LA COMPLEJIDAD.

### M.1.1. RECOMENDACIONES PARA LA GESTIÓN, RESTAURACIÓN Y CONSERVACIÓN DE LAS LAGUNAS DE LA ALBUFERA DE ADRA.

#### **Autores:**

Luis Cruz-Pizarro, Inmaculada de Vicente Alvarez-Manzaneda, Victoria Amores Antequera y Enrique Moreno Ostos.

Instituto del Agua. Universidad de Granada  
C/ Ramón y Cajal, 4. 18071 Granada  
[lcruz@ugr.es](mailto:lcruz@ugr.es)

#### **INTRODUCCIÓN**

Como apunta Miracle (1987), el medio ambiente litoral constituye la frontera de transición entre los ecosistemas terrestre y marino. Como tal, tiene escasa extensión al estar casi siempre limitado a una estrecha franja costera. Las Albuferas (conjunto de sistemas en los que se incluyen las lagunas paralelas a la costa, detrás de las dunas, así como las lagunas perpendiculares formadas por antiguas bahías o simplemente ramblas cerradas por barras de arena) representan, con mucho, los ambientes acuáticos más importantes del litoral, si bien, su extensión a lo largo de la franja mediterránea ha sufrido a lo largo del tiempo un drástico proceso de recesión al que, en un principio, contribuyó una elevada presión de desecación para ganar terrenos fértiles para la agricultura –a la vez que se combatía el paludismo, enfermedad ligada a esta agua costeras.

Actualmente, la influencia antrópica sobre estos ambientes reductos (áreas muy restringidas de lagunas y marjales en ciertos puntos de la costa) se ha incrementado de forma exponencial y los problemas a los que se ven sometidos son otros y, seguramente, más graves: extraordinaria velocidad del proceso de ocupación del espacio litoral por el turismo; concentración de industrias que requieren grandes cantidades de agua dulce; construcción de embalses que restringen el flujo de agua en las zonas deltaicas o, como en el caso de la Albufera de Adra, factores de tensión derivados de las actividades agrícolas (cultivos intensivos bajo plástico) que se desarrollan en su entorno. Esto les hace, por un lado, ser ecosistemas fluctuantes con cierto (elevado) grado de impredecibilidad y, por otro, justifica la necesidad de su conservación y de elaboración de un Plan de Gestión.

Esta es la idea nuclear que recoge el Plan Andaluz de Humedales (PAH) cuyo Propósito es el de “Conservar la integridad ecológica de los humedales andaluces, fomentando su uso racional para mantener, ahora y en el futuro, sus funciones ecológicas, socioeconómicas e histórico-culturales” y que establece como su principal Objetivo básico el de “Impulsar un modelo de gestión dirigido hacia la conservación o la restauración de la integridad ecológica (funciones) de los humedales andaluces”.

En este sentido, defendemos (y también lo hace el PAH) la necesidad de abordar la planificación y la gestión de los humedales, como la de cualquier otro sistema natural, con un enfoque integrador, global, holístico, que reconozca la complejidad de relaciones y funciones que caracteriza a estos sistemas. Esto significa, entre otros:

a) que la **gestión** (y los principios de actuación) debe necesariamente ser **ecosistémica** e ir más allá de la mera propuesta de soluciones técnicas para estar más próxima a la concepción de Grumbine (1994) cuando la define como “aquella gestión que integra los conocimientos científicos (y tradicionales) con las relaciones de tipo ecológico,

dentro de un complejo marco sociopolítico y de valores, con el objetivo principal de proteger los ecosistemas originales, a largo plazo”.

Además, este enfoque sistémico, centrado en el análisis (y, en su caso, en la restauración) de funciones y de procesos biofísicos y articulado alrededor de la caracterización de dos de los principales atributos de los ecosistemas: la *integridad ecológica*, determinada por su estructura y funcionamiento (que les confiere una determinada capacidad para responder a las perturbaciones de origen natural y/o antrópico) y la *salud ecológica* que se refiere (en gran medida) a su valor social, constituye posiblemente la mejor manera de dar cumplimiento a los que se reconocen como objetivos de la conservación:

- Mantener procesos ecológicos esenciales y los sistemas que soportan la vida
- Asegurar que la utilización de especies y de ecosistemas es sostenible
- Preservar la diversidad de especies y de sistemas.

a) la necesidad de considerar **escalas espaciales** más amplias: unidades fisiográficas más equilibradas funcionalmente y la obligatoriedad de considerar en cualquier política de planificación y/o de gestión, la **escala temporal**: el carácter dinámico de los sistemas naturales sometidos a cambios que, cuando llevan el marchamo de la irreversibilidad, denominamos su sucesión ecológica.

La Albufera de Adra representa la zona húmeda natural más importante del sureste peninsular. En las últimas décadas, en la línea de lo ocurrido con otros ecosistemas litorales, este espacio se ha visto sometido a fortísimas presiones antrópicas como consecuencia de la desecación de áreas encharcadas para la recuperación de terrenos agrícolas, una práctica que se incremento de forma exponencial en los años 70 y 80 con el auge de la agricultura intensiva (cultivos en invernaderos), cuyas primeras manifestaciones han sido una notabilísima reducción de la zona inundada (tamaño de las lagunas) y del cinturón perilagunar de vegetación hidrófila de estos sistemas y un deterioro de la calidad de sus aguas (Martínez-Vidal & Castro, 1990; Cruz-Pizarro et al., 2002a).

## ÁREA DE ESTUDIO

### 1. Génesis y localización geográfica

La Albufera de Adra se encuentra situada en el vértice oriental del actual delta del río Adra, a escasa distancia de la línea de costa (el punto más alejado dista 900 m del mar)

En la actualidad el complejo palustre de la Albufera está constituido por dos lagunas costeras: la laguna Honda (aprox. 13 ha de área superficial y 3.2 m de profundidad máxima) y la laguna Nueva (aprox. 29 ha de área superficial y 3.8 m de profundidad máxima), así como por una serie de terrenos encharcados de dimensiones mucho más reducidas, como las lagunas Cuadrada y El Monte.

La génesis de la Albufera de Adra se encuentra asociada tanto a la dinámica de la deriva litoral (formación de barreras litorales) como con las acciones antrópicas acaecidas en la llanura aluvial y en su entorno (deforestación de la cuenca, desvío del cauce del río Adra y construcción de la escollera del puerto de Adra). Desde su formación se han producido numerosos cambios tanto en la composición como en la fisonomía de las lagunas, llegando a desaparecer algunas de ellas (como la Albufera Grande y la Albufera Litoral) y a aparecer otras, como la Albufera Nueva (Gómez-Mercado & Paracuellos, 1996).

Desde tiempos remotos, posiblemente anteriores al período romano, el desarrollo de la agricultura y otros usos del suelo en la zona han dado lugar a la deforestación de la cuenca y, por ende, a un incremento de los procesos erosivos que determinaron el progresivo relleno del estuario y la conformación del actual sistema deltaico, que presenta una morfología fuertemente asimétrica como consecuencia de la deriva litoral dominante de poniente. Las pautas de relleno sedimentario debieron ser incompletas, determinando la existencia de depresiones en donde el espesor del estrato de material sedimentado era menor y la posterior construcción de barreras arenosas litorales condujo al definitivo aislamiento de estas áreas palustres.

Los primeros documentos históricos que “avalan” la existencia de una Albufera en Adra datan del siglo XVI, cuando el complejo palustre estaba constituido por la Albufera Grande o Ancha (más somera y próxima al río Adra) y por la Albufera Honda (más profunda y alejada del cauce) (Tapia, 1990).

Más tarde, en la primera mitad del siglo XIX, la intensa deforestación de la zona, con el objetivo último de alimentar los hornos de fundición de una actividad minera en la Sierra de Gádor, provocó numerosas avenidas, con consecuencias dramáticas en la ciudad de Adra. Por ello, en 1863 se iniciaron las obras de desvío del río, que concluyeron en 1871. Además, la construcción de la escollera del puerto, cuyas obras se iniciaron en 1911, al desviar la deriva litoral y reducir los aportes, dio lugar a la rápida destrucción del antiguo delta y a la formación de un nuevo delta más al Este con estructura idéntica al anterior (asimétrico), con el mayor desarrollo hacia el levante. Estos nuevos aportes determinaron la configuración de barras arenosas, que dieron lugar a la formación del denominado Lago Marino, actualmente desaparecido, y más tarde a la individualización de la laguna Nueva, en 1931. Este mismo mecanismo fue el precursor del origen, a principios de los años setenta, de la laguna Litoral, hoy desaparecida.

## 2. Hidrología e hidrogeología

La Albufera de Adra se sitúa en la Cuenca Mediterránea Andaluza. El aporte superficial de agua a las lagunas procede del río Adra, a través de la Acequia Real de Adra que desemboca en ambas lagunas tras bifurcarse poco antes de llegar a las mismas. La laguna Honda recibe la descarga de una única acequia de riego mientras que en la laguna Nueva vierten dos acequias.

La laguna Honda recibe además la descarga directa de tres ramblas: "La Estanquera", "Las Adelfas" y "Del Alto", que drenan una cuenca vertiente de 13.7 km<sup>2</sup>, de los cuales 1.4 km<sup>2</sup> se dedican al cultivo de almendros y el resto, se trata de terrenos rurales no cultivados. Los tres cauces drenan la vertiente Sur de la Sierra Alhamilla y las estribaciones más suroccidentales de la Sierra de Gádor, dirigiéndose en dirección norte-sur al área de la Albufera. Estos cauces permanecen secos prácticamente todo el año, exceptuando los momentos de lluvias torrenciales, en los cuales puede producirse la entrada de gran cantidad de materia en suspensión a las lagunas. De hecho, en los últimos años (especialmente desde las lluvias acontecidas a finales de Diciembre de 2000) se ha observado el desarrollo de un cono de deyección en la parte central ("el estrechamiento") de la laguna Honda, lo que podría dar lugar a una división de la laguna en dos cubetas independientes.

En relación con su hidrogeología, las lagunas de la Albufera de Adra se localizan en el extremo oriental del sistema acuífero del delta del río Adra, con el que están relacionadas estrechamente. Se trata de un acuífero libre, cuya principal recarga es la infiltración procedente de las aguas superficiales del río Adra. Además de ésta, el acuífero recibe la recarga procedente de las entradas subterráneas del río, de los aportes pluviométricos, del retorno de regadíos y de la alimentación lateral oculta. La salida de mayor importancia la representan los bombeos, y en menor medida las salidas ocultas al mar y la evaporación directa (Pulido *et al.*, 1988).

El río Adra recibe gran parte de su caudal del aporte de los manantiales de las Fuentes de Marbella, emergencias naturales que se producen por descarga del acuífero calizo-dolomítico de Turón-Peñarrodada. Éste acuífero es a su vez recargado por las filtraciones del embalse de Benínar.

### 3. Régimen de protección y valor ambiental de las lagunas

Las lagunas de la Albufera de Adra se encuentran rodeadas por un cinturón de vegetación palustre de tarayales (*Tamarix canariensis*), juncales (*Juncus maritimus* y *Juncus acutus*) y masegares (*Cladium mariscus*) que alberga una fauna acuática de gran variedad y riqueza. La importancia de su composición faunística y florística ha sido reconocida nacional e internacionalmente (Cirujano *et al.*, 1992, Castro *et al.*, 1994).

En 1989, una parte de la superficie (217 ha) que rodea ambas lagunas, fue declarada Reserva Natural e incluida en el Inventario de Espacios Naturales Protegidos de la Comunidad Autónoma Andaluza por ser uno de los enclaves de Andalucía Oriental de mayor relevancia en la conservación de la avifauna ligada a humedales (B.O.J.A. de 27 de julio de 1989). Un área algo menor (135 ha), que incluye a ambas lagunas, se encuentra protegida bajo la figura de Lugar de Importancia Comunitaria (LIC), en el marco normativo de la Directiva Habitats de la UE. En 1994, una superficie de 75 ha, que igualmente incluye a ambas lagunas, fue declarada como "Humedal Ramsar" bajo la denominación de Albufera de Adra (B.O.E. de 15 de noviembre de 1994). Además, está prevista su declaración como zona ZEPA (Zona de Especial Protección para las Aves/ CEE)

Al valor ecológico de este humedal contribuye en buena medida la presencia de especies de aves acuáticas como la Gaviota de Audouin (*Larus audouinii*), el Somormujo lavanco (*Podiceps cristatus*), la Cerceta pardilla (*Marmaronetta angustirostris*), el Porrón europeo (*Aythya ferina*), la Focha común (*Fulica atra*), el Porrón moñudo (*Aythya fuligula*), el Calamón común (*Porphyrio porphyrio*), el Avetorillo común (*Ixobrychus minutus*), el Cormorán grande (*Phalacrocorax carbo*), la Garza real (*Ardea cinerea*), la Garza imperial (*Ardea purpurea*), el Aguilucho lagunero occidental (*Circus aeruginosus*) y el Martín pescador (*Alcedo atthis*), entre otras. No obstante, la especie de mayor interés conservacionista es la Malvasía cabeciblanca (*Oxyura leucocephala*), que posee en la Albufera un importante núcleo de cría e invernada.

Aunque la diversidad específica de la comunidad piscícola se ha reducido considerablemente, destaca la presencia de especies como la Anguila (*Anguilla anguilla*), el Fartet común (*Lebias iberica*) o el Pejerrey (*Atherina mochon*). De entre ellas, el Fartet se podría considerar como símbolo de la Albufera, al ser una especie endémica y encontrarse en peligro de extinción (Martínez Vidal & Castro, 1990; Paracuellos & Nevado, 1994; Nevado & Paracuellos, 1999).

A pesar de su extraordinario interés ecológico, como se ha comentado con anterioridad, las lagunas de la Albufera de Adra están sufriendo gran número de amenazas derivadas fundamentalmente del asentamiento y ocupación, en todo su perímetro, de cultivos intensivos bajo plástico (del 8% de área ocupada por los invernaderos en el entorno del humedal en 1952, se ha pasado al 57% en la actualidad). Esta extensión extraordinaria del cultivo bajo plástico en las inmediaciones de las lagunas ha reducido drásticamente la vegetación emergente de carácter palustre que antaño ocupaba gran parte del delta del río Adra. Además, la contaminación de las aguas subterráneas, por el retorno de regadío, ha llevado a un continuo proceso de eutrofización de las aguas, que ha sido reconocido en diversos estudios (Carrillo *et al.*, 1987; Carrillo *et al.*, 1996; de Vicente, 1999; Cruz-Pizarro *et al.*, 2002a, b). Más aún, el incremento del estado trófico de las lagunas ha repercutido muy negativamente en el desarrollo de macrófitos acuáticos, especialmente en la laguna Honda, de donde han estado ausentes durante más de 10 años. No obstante, aún se observa el desarrollo de una comunidad macrofítica en la orla litoral de la laguna Nueva, con poblaciones de *Potamogeton pectinatus*, *Najas marina*, y con menor frecuencia, de *Ruppia marítima* (Paracuellos, 2002).

## **ESTUDIOS DE DIAGNÓSTICO Y DE VIABILIDAD PARA EL CONTROL DE LA EUTROFIZACIÓN DE LAS LAGUNAS DE LA ALBUFERA DE ADRA.**

Durante los años 1984 y 1985, promovido y subvencionado por el Instituto de Estudios Almerienses se llevó a cabo un "Estudio Integral de las Albuferas de Adra" que permitió caracterizar estructural y dinámicamente los sistemas lagunares antes aludidos y, sobre todo, identificar (y hacer una primera cuantificación) las actividades contaminantes y su impacto sobre las lagunas. En este trabajo se describe, por primera vez, la existencia de un proceso de deterioro de la calidad de las aguas que se manifestaba tanto en la evolución de los parámetros indicadores de eutrofia como en los estimadores globales de estado trófico (Carrillo *et al.*, 1996).

Un estudio rutinario realizado durante los años 1992 y 1993 (Cruz-Pizarro *et al.*, 1996), puso de manifiesto un agravamiento de las manifestaciones del proceso de eutrofización en ambas lagunas. Mas recientemente, durante los años 1999 a 2002, en el marco de un ambicioso proyecto de conservación y restauración de la zona húmeda (Proyecto UE LIFE " Conservación de las Albuferas de Adra"), cofinanciado por la Junta de Andalucía y la Unión Europea, ambas lagunas han sido objeto de una completa investigación que ha pretendido, por un lado, profundizar en el conocimiento del funcionamiento de estos sistemas litorales, caracterizados como fluctuantes y con un elevado grado de impredecibilidad y, por otro lado, asegurar que cualquier medida de restauración que eventualmente pudiera proponerse, tuviera el respaldo de un diagnóstico detallado de la situación de partida.

En la literatura limnológica se recogen resultados exitosos y rotundos fracasos en los proyectos de restauración a gran escala de lagos eutrofizados, que hacen que la predicción del resultado, en una situación particular, resulte todavía difícil, si no imposible (Sas, 1989; van Liere & Gulati, 1992) y, en todo caso, estamos absolutamente de acuerdo con Cooke *et al.* (1993) cuando afirman que el éxito de los esfuerzos por restaurar y/o mejorar la calidad del agua de lagos y embalses depende de la meticulosidad en el diagnóstico y evaluación de la situación anterior al inicio de cualquier medida de restauración.

Los objetivos concretos que, en el marco del Proyecto europeo, se plantearon, fueron:

1. Caracterizar, cuantificar y estudiar la evolución estacional (ciclo anual) de las variables externas (y de control); variables de estado y parámetros que tradicionalmente se han considerado en los modelos empíricos de masa de agua, para el control de la eutrofización.
2. Identificar y cuantificar las poblaciones de las especies de fitoplancton y de zooplancton de las lagunas estudiadas.
3. Predecir y modelar, en la medida de lo posible, las causas y los efectos de la eutrofización. Validar modelos y diseñar ensayos de simulación.
4. Proporcionar información relevante sobre la que elaborar una propuesta de gestión.

Para ello, a lo largo de dos ciclos anuales, y mediante la toma de datos y de muestras (de elevada frecuencia), se analizó la evolución espacio-temporal de variables incluidas en los siguientes compartimentos: aguas superficiales (cuantificación de variables físicas, químicas y biológicas); sedimento y agua intersticial (caracterización química y estudio de procesos de liberación y retención de nutrientes) y aguas subterráneas (realización de balance hídrico y propuesta de un modelo de funcionamiento hídrico de las lagunas estudiadas). Además, se cuantificó la evolución estacional de la carga externa hidráulica y de nutrientes a ambas lagunas y se estimó, a partir de la realización de sendos balances de masa, los flujos de entrada y salida hacia y desde los sedimentos a la columna de agua.

Esta información permitió ensayar la aplicación de cuatro modelos empíricos de masa de agua para la predicción de la concentración promedio anual de Fósforo total en las lagunas y realizar un primer estudio experimental sobre la posibilidad de utilización de técnicas de biomanipulación para su restauración.

De los resultados obtenidos se derivó la propuesta de un plan de actuación que comprende la implementación de medidas concretas; de medidas para el seguimiento de los resultados obtenidos y de investigación futura.

### Sinopsis sobre el diagnóstico efectuado

El desarrollo de este proyecto nos ha permitido cuantificar variables, parámetros y procesos sobre los que basar un diagnóstico y evaluación de los sistemas objetos de estudio que, a su vez, oriente las actuaciones y recomendaciones propuestas para su conservación y gestión.

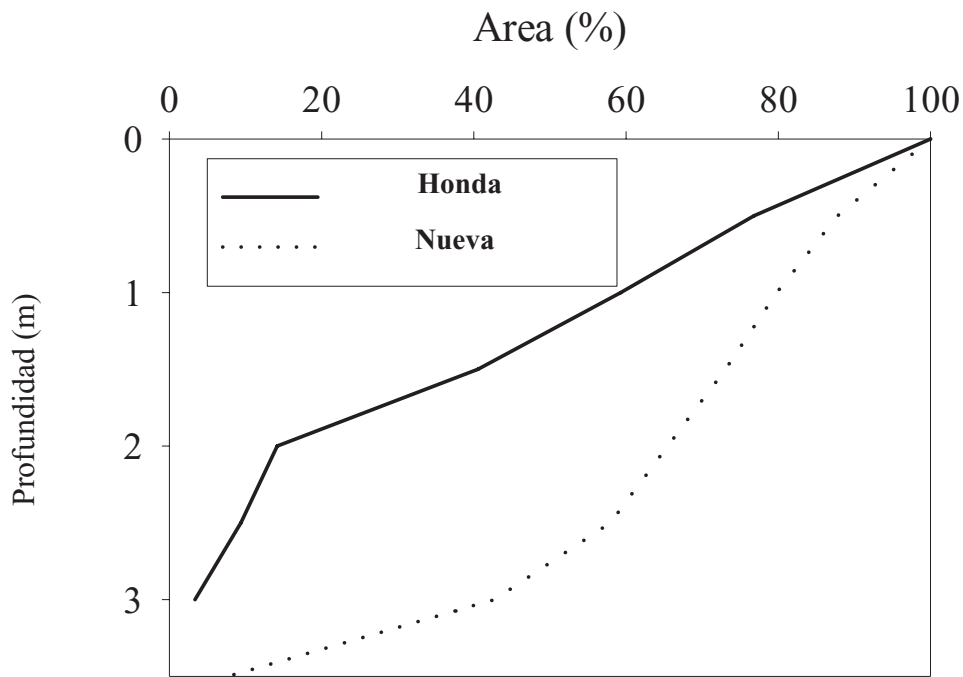
Con esta perspectiva y, de forma sinóptica, conviene resaltar, en primer lugar, los siguientes aspectos:

1. En la base del funcionamiento de ambas lagunas y de las diferencias observadas en el comportamiento específico de cada una de ellas, se encuentran aspectos ligados a su morfometría y morfología. En este sentido, características como el tamaño, forma, volumen y desarrollo de volumen de las lagunas; su escasa profundidad media y relativa o los valores de razones e índices como los establecidos entre la profundidad media y profundidad de la zona eufórica o entre el tamaño del área de captación y el área superficial (Tabla 1), permiten explicar su diferente nivel trófico, comportamiento térmico y elevada susceptibilidad para ser influenciadas por factores asociados a la acción del viento que, de hecho en la laguna Nueva llega a generar patrones de circulación anticiclónica en el plano horizontal y mantiene un flujo recirculatorio del agua en el perfil vertical.

	<b>Laguna Honda</b>	<b>Laguna Nueva</b>
<b>Área (A) (m<sup>2</sup>, 10<sup>3</sup>)</b>	80.1	260.4
<b>Longitud máxima (m)</b>	586	759
<b>Longitud de la línea de costa (m, 10<sup>2</sup>)</b>	14.66	20.66
<b>Profundidad máxima (Z<sub>max</sub>) (m)</b>	3.19	3.80
<b>Volumen (m<sup>3</sup>, 10<sup>3</sup>)</b>	91.52	594.70
<b>Área de captación (A<sub>c</sub>) (m<sup>2</sup>, 10<sup>5</sup>)</b>	137.2	5.0
<b>Profundidad media (<math>\bar{z}</math>) (m)</b>	1.14	2.28
<b>Profundidad relativa (m)</b>	1.00	0.66
<b>Desarrollo de la línea de costa</b>	1.46	1.14
<b>Z<sub>m</sub>: Z<sub>max</sub></b>	0.36	0.60
<b>A<sub>c</sub>: A</b>	171.30	1.92
<b>Tiempo de residencia (años)<sup>1</sup></b>	0.17	2.95
<b>Carga externa de Fósforo (g P m<sup>-2</sup> años<sup>-1</sup>)<sup>1</sup></b>	1.73	0.03

**Tabla 1.** Principales características morfométricas e hidrológicas de las lagunas estudiadas (Julio 1999-Agosto 2001). Modificado de: de Vicente & Cruz-Pizarro (en prensa).

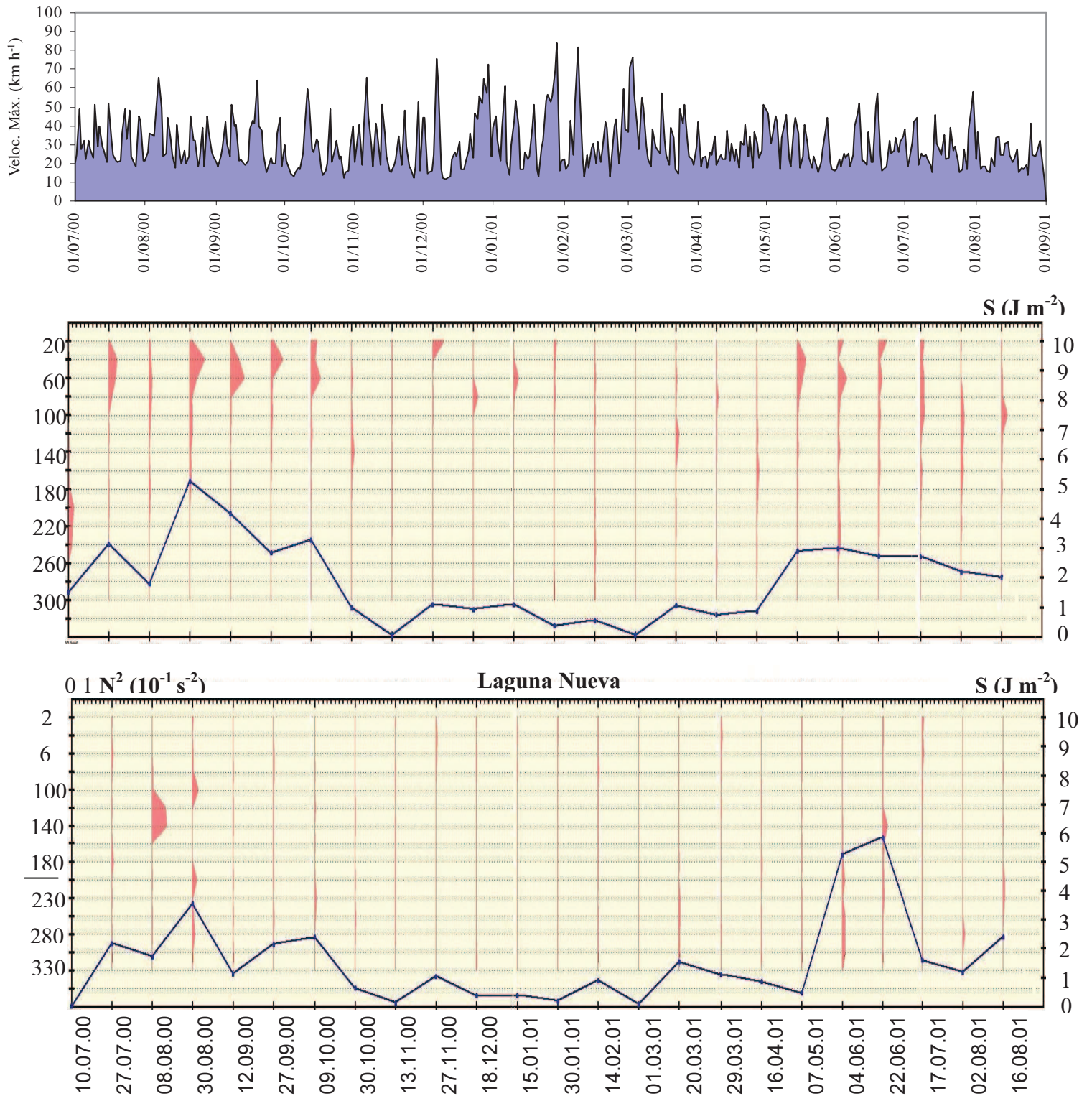




**Figura 1.** Curvas hipsográficas de superficie de las lagunas estudiadas. Tomado de: de Vicente & Cruz-Pizarro (en prensa).

2. Ambas lagunas se caracterizan por presentar períodos prolongados de isoterma en profundidad y muy escasa resistencia térmica a la mezcla (Figura 2). Desde este punto de vista, pueden ser consideradas como sistemas de comportamiento entre monomítico cálido y polimítico. Tan sólo desarrollan una débil y poco persistente termoclina durante los meses de máxima radiación solar. De ello es responsable, primariamente, su carácter somero así como los valores extremadamente bajos de la razón entre la profundidad media y el área superficial y la frecuencia e intensidad de los vientos dominantes de la zona.

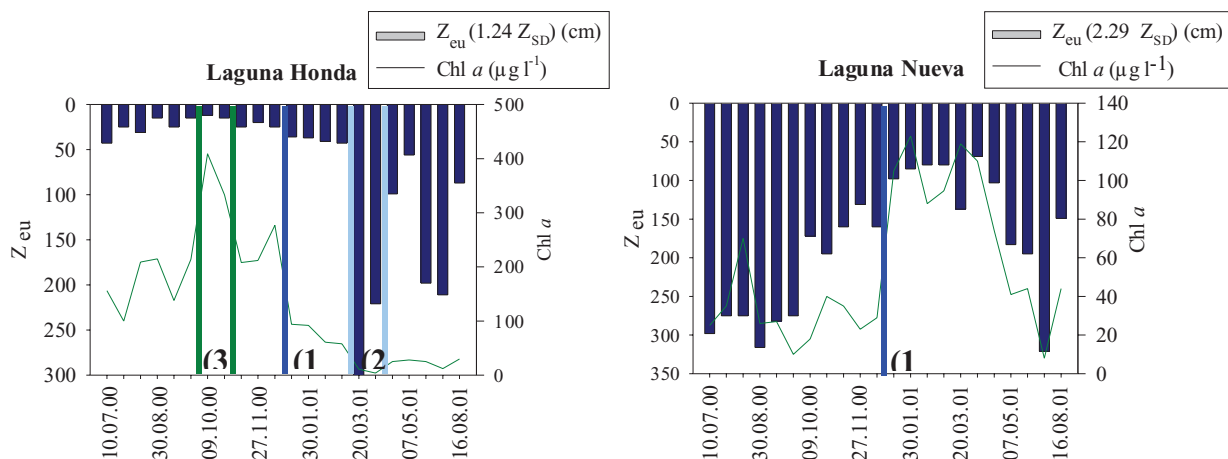




**Figura 2.** Estabilidad térmica de la columna de agua (S), frecuencia de Brünt-Väisälä (N<sup>2</sup>, 10<sup>-1</sup>s<sup>-2</sup>) y velocidad máxima diaria del viento (km h<sup>-1</sup>). Tomado de: de Vicente (2004).

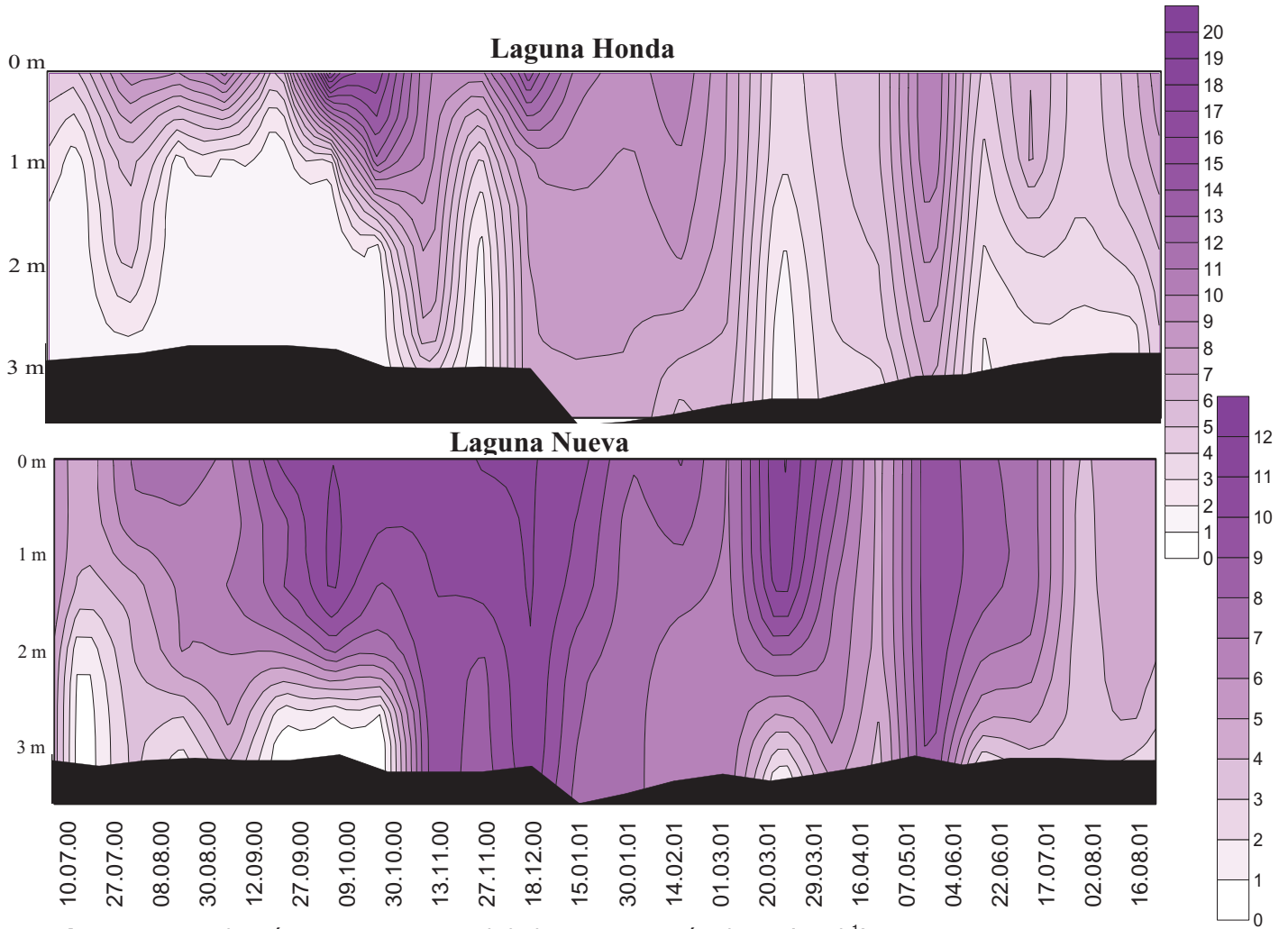
3. Una de las manifestaciones más evidentes de dichas características es el valor tan elevado de la tasa de extinción de la luz en profundidad que determina valores de transparencia de las aguas muy bajos, aunque se observan interesantes diferencias entre ambas lagunas (Figura 3). Junto a una elevada biomasa algal, al establecimiento del "clima de luz" de las lagunas, contribuyen la resuspensión del sedimento superficial, que promueve un incremento de la turbidez biogénica y abiogénica en la laguna Honda y la elevada concentración de materia orgánica disuelta no biodegradable de la laguna Nueva.

La profundidad de la zona eufórica es siempre inferior a la profundidad de la capa de mezcla (y, por supuesto, a la profundidad máxima) en la laguna Honda, mientras que en la laguna Nueva la radiación fotosintéticamente activa llega hasta el sedimento durante la mayor parte del año y permite el desarrollo de "manchas" de macrófitos que, en determinados períodos, tapizan el fondo. En esta laguna es posible aventurar la existencia de un doble "estado estacionario de equilibrio" en su estructura trófica según que las condiciones de luz favorezcan en mayor o menor medida (o impidan) el desarrollo de macrófitos y de fitobentos. Esto crea una incertidumbre "extra" asociada a dicha "doble estabilidad" que se debe tener en cuenta en las tareas de gestión. Además resulta creíble que, en determinados momentos, la luz pueda llegar a ser el factor limitante de la productividad algal.



**Figura 3.** Variación temporal de la profundidad de la zona eufótica (estimada en función de la profundidad de visión del disco de Secchi) y de la concentración promedio de Chl *a*. (1) Período de fuertes lluvias, (2) Fase de aclaramiento del agua, (3) Fase de "bloom" algal.

4. La mezcla turbulenta dominante en las lagunas y una intensa actividad fotosintética, determina la existencia de aguas saturadas (y hasta sobresaturadas) de Oxígeno en superficie (Figura 4). Tan sólo se llega a producir agotamiento de Oxígeno en profundidad y a desarrollarse anoxia funcional (como consecuencia de una elevada tasa de descomposición bacteriana) en “momentos” muy concretos durante los meses de verano, en la laguna Honda.



**Figura 4.** Distribución espacio-temporal de la concentración de O<sub>2</sub> (mg l<sup>-1</sup>).

5. Ambas lagunas presentan aguas básicas, duras, tamponadas y fuertemente mineralizadas (Tabla 2). Las elevadas concentraciones de Calcio y de Bicarbonatos juegan, como veremos, un papel muy importante en el carácter de la interacción agua-sedimento en el ciclo del Fósforo, al propiciar la retirada de este nutriente de la masa de agua.

	Na <sup>+</sup>	Mg <sup>+2</sup>	Ca <sup>+2</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>
<b>Honda</b>	17.57	11.39	4.70	1.47	18.86	12.22	4.24	0.21
<b>Nueva</b>	32.90	15.63	10.27	1.06	33.70	25.05	2.98	0.18

**Tabla 2.** Concentración promedio anual (meq l<sup>-1</sup>) de los principales cationes y aniones. Tomado de: de Vicente (2004).

6. Ambas lagunas presentan aguas muy ricas en nutrientes, especialmente en Nitrógeno y Fósforo (Tabla 3), tanto en forma inorgánica como (sobre todo) en forma orgánica particulada. A partir de los valores de la concentración promedio anual de Fósforo total y de Clorofila a, así como de los valores de transparencia del agua, es posible considerar a la laguna Honda como hipereutrófica y a catalogar a la Nueva como eutrófica (Figura 5).

Es interesante destacar que la comparación de los valores obtenidos del Índice de Estado Trófico durante este estudio con los registrados en períodos anteriores, muestra que la tendencia al deterioro de la calidad del agua que se apreció en la segunda mitad de la década de los 80 y comienzos de los 90, no se ha mantenido.

De la aplicación de criterios basados en la concentración de nutrientes y/o de sus proporciones relativas, se desprende que el Fósforo es el nutriente limitante de la producción primaria y, por lo tanto, el factor que ejerce el control potencial del proceso de eutrofización en ambas lagunas.

Por eso mismo, y aunque también es cierto que en condiciones que suponen una reducción en la carga externa de Nitrógeno dicho elemento puede compartir con el Fósforo el papel de nutriente limitante, parece aconsejable considerar la carga de Fósforo como el "objetivo clave" al que dirigir las posibles intervenciones de recuperación.

		Z <sub>SD</sub> (cm)	Chl-a (µg l <sup>-1</sup> )	SRP (µg l <sup>-1</sup> )	TP (µg l <sup>-1</sup> )	TN (mg l <sup>-1</sup> )
<b>Honda</b>	<b>Media</b>	34	160	40	255	2.94
<b>Años 1999-2000</b>	<b>Min</b>	20	57	2	112	1.57
	<b>Max</b>	50	396	210	425	5.59
	<b>SD</b>	7	86	57	83	1.07
	<b>CV (%)</b>	21	54	143	33	36
<b>Años 2000-2001</b>	<b>Media</b>	64	129	77	295	3.86
	<b>Min</b>	10	4	0	146	0.99
	<b>Max</b>	250	292	275	471	7.14
	<b>SD</b>	71	96	92	100	1.99
	<b>CV (%)</b>	111	74	119	39	52

**Tabla 3.** Variabilidad inter-anual en la transparencia del agua (Z<sub>SD</sub>), y en las concentraciones de Chl-a, SRP, TP y TN. Tomado de: de Vicente et al.(en prensa).

		$Z_{SD}$ (cm)	Chl-a ( $\mu\text{g l}^{-1}$ )	SRP ( $\mu\text{g l}^{-1}$ )	TP ( $\mu\text{g l}^{-1}$ )	TN ( $\text{mg l}^{-1}$ )
<b>Nueva</b>	<b>Media</b>	119	57	7	79	1.10
	<b>Años 1999-2000</b>					
	<b>Min</b>	70	7	0	25	0.80
	<b>Max</b>	210	126	32	147	1.67
	<b>SD</b>	36	32	10	32	0.20
<b>Años 2000-2001</b>	<b>Media</b>	75	54	4	99	1.68
	<b>Min</b>	30	8	0	24	1.16
	<b>Max</b>	140	125	24	155	2.00
	<b>SD</b>	36	38	7	35	0.23
	<b>CV (%)</b>	48	70	175	35	14

Tabla 3. Continuación.

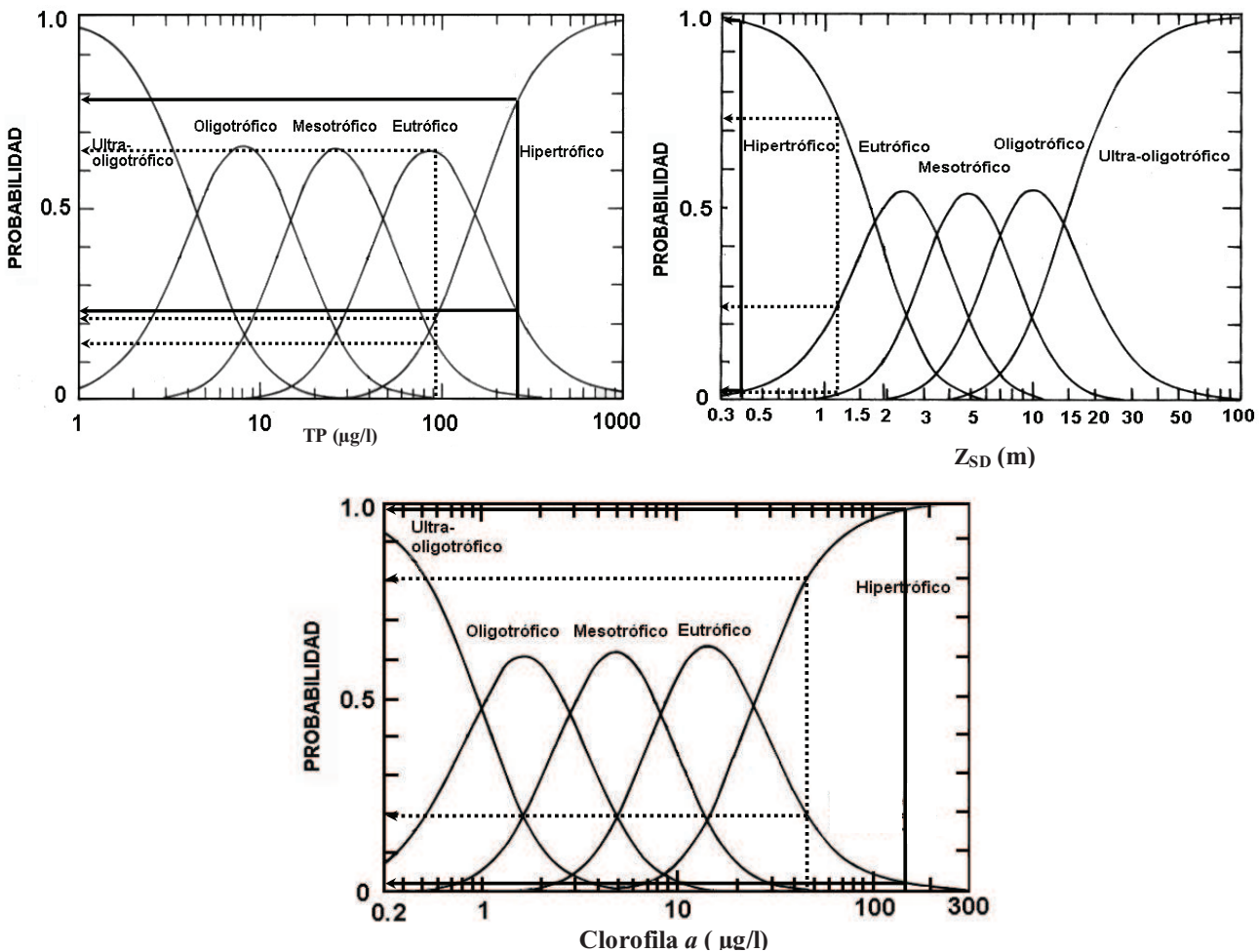


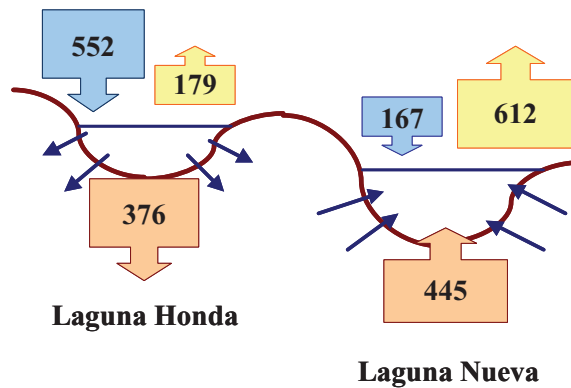
Figura 5.- Distribución probabilística de categorías tróficas de ambas lagunas (línea continua: laguna Honda; línea discontinua: laguna Nueva), en función de la concentración promedio anual de TP, de Clorofila a y de la transparencia del agua.



7. Las acequias derivadas para riego del río Adra representan la principal fuente externa "puntual" y "continuada" de agua a las lagunas. De hecho esta es la única entrada externa a la laguna Nueva. En la laguna Honda, sin embargo, juegan un papel decisivo las ramblas que drenan su cuenca de captación, presentando un régimen torrencial cuando una intensa precipitación propicia una escorrentía superficial hortoniana.

Si desde un punto de vista hidrológico (como carga hidráulica) y sobre una base anual, tales pulsos de avenida pueden no ser significativos, concentran, cuando se producen, en un tiempo muy limitado, una carga de nutrientes que sobrepasa la que recibe la laguna durante un ciclo anual a través de otras vías superficiales.

Los resultados de la aplicación de balances hídricos, que contemplan entradas de agua a través de las acequias, ramblas y de precipitación directa sobre las lagunas y salidas por evaporación, ponen de manifiesto una intensa interacción agua superficial-agua subterránea con flujos de magnitud y sentido variable en función de los caudales superficiales de entrada. Sobre una base anual, la laguna Honda presenta un flujo neto negativo (de descarga hacia el acuífero) considerable, mientras que en la laguna Nueva, el flujo es mucho menor y positivo (Figura 6). El modelo hidrológico que hemos construido y que da sentido a estos resultados, considera que la descarga subterránea de la laguna Honda recarga en última instancia a la laguna Nueva.



**Figura 6.** Diagrama de flujos entre el agua superficial y el agua subterránea ( $10^3 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$ ).

8. Las cargas de nutrientes medidas en el agua de las acequias y estimadas en el agua de las ramblas, son extremadamente altas en el caso de la laguna Honda (entre 162 y 174  $\text{kg TP año}^{-1}$ ) y mucho menores en la laguna Nueva (entre 9 y 31  $\text{kg TP año}^{-1}$ ), lo que significa que aquella está recibiendo una carga externa de casi  $2 \text{ g TP m}^{-2} \text{ año}^{-1}$ , más de un orden de magnitud superior a la que recibe la laguna Nueva (entre 31 y  $113 \text{ mg TP m}^{-2} \text{ año}^{-1}$ ) (Tabla 4). Las entradas a través de las ramblas a la laguna Honda son en gran medida responsables de estas diferencias. Estos valores de carga externa son superiores a los teóricos tolerables (según los modelos más habituales) para sistemas de características morfométricas e hidrológicas similares que se mantuvieran en un nivel entre meso y eutrófico y son la causa primera de su elevado estado trófico.

	Laguna Honda	Laguna Nueva	Laguna Honda	Laguna Nueva
	1999-2000	2000-2001	1999-2000	2000-2001
<i>Deposición atmosférica (kg P)</i>	5.4	5.1	17.3	17.1
<i>Fuente externa puntual (kg P)</i>	4.6	12.1	6.3	5.9
<i>Fuente externa difusa (kg P)</i>	152.6	152.6	0	0
<i>"Carga" externa (kg P)</i>	162.6	169.8	23.6	23.0
<i>Carga externa (<math>\text{mg P m}^{-2} \text{ año}^{-1}</math>)</i>	1968.9	2188.1	90.2	88.7

**Tabla 4.** Resultados de la estima de la carga externa anual de fósforo a las lagunas a partir de distintas fuentes. Tomado de: de Vicente (2004).

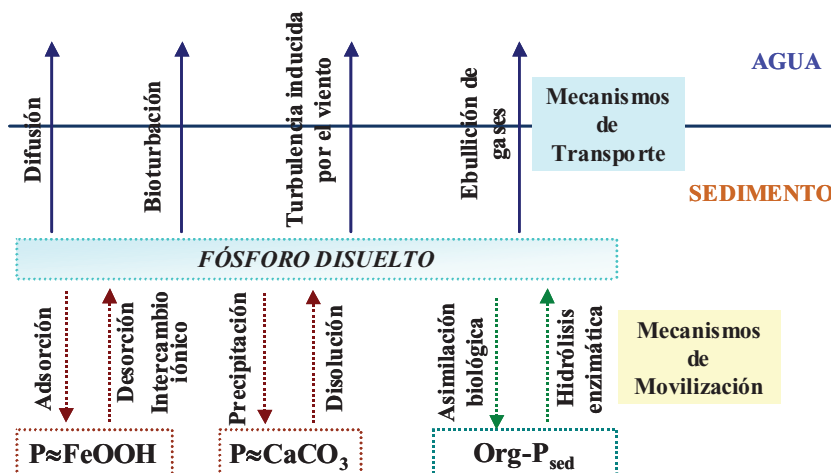
9. Un aspecto que sin duda ha contribuido a mitigar las consecuencias (esperables) de la tensión que dicha carga externa supone, es el valor extremadamente bajo del tiempo de renovación del Fósforo en las lagunas que se obtiene tanto cuando se estima de forma teórica como cuando se calcula a partir de la relación entre la masa de Fósforo en los sistemas y las tasas de sedimentación de este nutriente. De los datos calculados se deduce que el Fósforo se renueva, en promedio, en la laguna Honda en menos de 10 días y lo hace en un tiempo comprendido entre 10 y 15 días en laguna Nueva. Se trata de valores que, aunque variables en función del ciclo hidrológico considerado, representan porcentajes inferiores al 10% del tiempo de renovación del agua en la laguna Nueva y de entre el 10% y el 15% de aquel, en la laguna Honda.

Dos circunstancias estrechamente relacionadas contribuyen a esto: las elevadas tasas de sedimentación de material particulado, cargado de Fósforo, que hemos medido en ambas lagunas y el carácter de sumidero neto para el Fósforo que, sobre una base anual, representan los sedimentos, caracterizados por su riqueza en Carbonatos y elevadas concentraciones en óxidos de Hierro y Aluminio con los que el ión fosfato puede formar precipitados (Tabla 5). Tomado de: de Vicente (2004):

Variables	Honda	Nueva
SiO <sub>2</sub>	25.20	19.51
MnO	0.05	0.05
MgO	2.36	1.49
Na <sub>2</sub> O	0.73	0.44
K <sub>2</sub> O	1.79	0.62
TiO <sub>2</sub>	0.37	0.20
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.67	5.15
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.91	2.34
CaO	20.78	29.41

**Tabla 5.** Concentración (%) de óxidos del sedimento superficial (0-5 cm) de las lagunas de Adra.

Conviene añadir, sin embargo, que estacionalmente -sobre todo si se desarrolla una anoxia prolongada- los períodos de redisolución de Fósforo pueden predominar sobre los de precipitación (ver Figura 7). En tales situaciones se manifiesta la elevada carga interna de nutrientes hacia la columna de agua. Tampoco se deben dejar de tener en cuenta los elevados valores de la concentración de nutrientes disueltos medidos en el agua intersticial de los sedimentos superficiales (especialmente de la zona de máxima profundidad de la laguna Honda) durante los meses de verano, cuando la actividad bacteriana se encuentra favorecida y existe una elevada disponibilidad de aceptores de electrones que participan en la oxidación química de la materia orgánica.



**Figura 7.** Procesos que intervienen en la liberación y retención de las fracciones de fósforo presentes en el sedimento (modificado de Boström *et al.*, 1982).



Hemos podido constatar el decisivo papel que juegan los sedimentos de las lagunas en su funcionamiento y el que probablemente jugarán en la "forma" de sus respuestas ante una eventual intervención. Esto justifica que prestáramos a la caracterización de los sedimentos y a la cuantificación (primera) de los flujos e interacciones entre el agua y el sedimento, una atención particular.

La concentración de Fósforo Total en el sedimento es muy elevada en ambas lagunas, aunque muy superior en la laguna Honda, en la que predominan fracciones inorgánicas de Fósforo unidas al Calcio y, sobre todo y de forma estable, al Hierro (Tabla 6). En la laguna Nueva son las fracciones orgánicas de Fósforo las que tienen mayor relevancia. A pesar de las elevadas concentraciones medidas, experimentos de laboratorio han mostrado que la capacidad de saturación de los sedimentos aún no se ha superado, lo que significa que su papel de acumulador de Fósforo seguirá prevaleciendo durante algún tiempo.

	Prof (cm)	Fe(OOH) $\approx$ P	CaCO <sub>3</sub> $\approx$ P	Org-P- $\rightarrow$ ácido	Org-P- $\rightarrow$ álcali	Org-P- $\rightarrow$ residual	$\Sigma$ P <sub>sed</sub>
<b>Honda</b>	<b>0-5</b>	135	313	61	174	11	694
	<b>5-10</b>	156	245	44	188	12	645
	<b>10-15</b>	126	207	57	152	15	557
<b>Nueva</b>	<b>0-5</b>	18	142	53	166	14	393
	<b>5-10</b>	22	83	131	141	14	391
	<b>10-15</b>	8	75	173	77	8	341

**Tabla 6.** Valor promedio anual de la concentración ( $\mu\text{g P g}^{-1}$  d.w.) de las diferentes formas de P<sub>sed</sub> según el método EDTA. Tomado de: de Vicente (2004).

10. La posibilidad de utilizar modelos empíricos de masa de agua en la predicción de la concentración promedio anual de Fósforo Total en las aguas de las lagunas (o de variables con él relacionadas, como la Clorofila a o la transparencia del agua) esperable en distintos escenarios de variación de la carga externa de Fósforo, se ve limitada por el carácter singular de estas lagunas que las hace "vulnerar" algunas de las asunciones sobre las que aquellos están contruidos. Cuando se considera el carácter dinámico de las lagunas, su gran variabilidad estacional e interanual y el enorme número de factores interdependientes que actúan en el ciclo del Fósforo en estos sistemas, se comprende la incertidumbre asociada a cualquier (simple) explicación mecanicista como la que se deriva de estos modelos.

Además, en el curso de la realización del proyecto que venimos comentando, se puso de manifiesto la necesidad de precisar la estima de la carga externa difusa de Fósforo a las lagunas y de cuantificar las ganancias y pérdidas de este nutriente que acompañan al proceso de interacción con las aguas subterráneas.

## Consideraciones de partida

Sobre la base del diagnóstico efectuado, el siguiente decálogo supone un marco de consideraciones previas en el seno del cual se define un Plan de actuaciones sustentado en tres pilares; medidas correctoras, medidas de seguimiento y necesidades de investigación.

1. El convencimiento de que en el compromiso entre iniciar una gestión activa y la política de no intervenir, conviene decantarse por aquélla. La aplicación de la máxima "*Let the nature do the work*" no es una opción satisfactoria en nuestro caso porque el mantenimiento de los niveles actuales de presión antrópica sobre las lagunas impedirá, desde luego, la reversibilidad de la situación y por el contrario, es previsible que desencadene una cascada (más o menos predecible) de acontecimientos hacia un deterioro progresivo, a largo plazo.

2. Si bien es cierto que existen aún "lagunas de conocimiento" importantes para explicar el funcionamiento en detalle de estos sistemas extraordinariamente dinámicos, no creemos conveniente diferir la aplicación de medidas de actuación hasta completar una información deseable que llegara a garantizar su éxito. La práctica demuestra que siempre persiste un fondo incontrolable de "impredicibilidad residual" (que en este tipo de lagunas se acentúa) que impide una garantía absoluta de éxito.

En cualquier caso, será incuestionable que el estado ecológico de los sistemas se mejorará a largo plazo con la puesta en marcha del programa de control de la carga de entrada de nutrientes.

3. Reconocemos que no existe una estrategia única. No hay una panacea ni una solución universal.

4. Se ha dado prioridad a aquellas medidas que atienden al control (minimización, reducción) de las causas responsables del proceso de eutrofización, frente a las que contribuyen a mitigar (temporalmente) sus síntomas. En este sentido creemos que el control de los aportes externos de Fósforo es la estrategia más efectiva a largo plazo.

Dicho esto, no hemos renunciado a proponer otras medidas alternativas y/o complementarias que al tratar dichas manifestaciones, creemos que podrían mejorar la eficacia del tratamiento de las causas.

5. En la medida de lo posible hemos apostado por la implementación de métodos "no estructurales" frente a medidas "estructurales" más agresivas. Aceptamos, sin embargo, que, en ocasiones, si se desean resultados duraderos en la mejora de la calidad del agua, puede resultar insuficiente la limitación (exclusivamente) de las entradas externas.

6. Estamos convencidos de la conveniencia de llevar a cabo un programa escalable y progresivo en el tiempo de acciones de control. Antes que un programa "tan elaborado" que limite su aplicabilidad, se ha diseñado una propuesta "menor", que combina acciones inmediatas y medidas de prevención, realistas en sus objetivos y que puede ser ampliada/modificada a medida que se vayan teniendo conocimientos (y recursos) que pudieran potenciar el éxito alcanzado, en su caso.

7. Lo que se acaba de decir justifica y exige la necesidad de llevar a cabo un programa de seguimiento que evalúe la efectividad de las medidas adoptadas así como de mantener un programa de investigación paralelo que encuentre respuestas a las cuestiones aún no aclaradas completamente.

8. El plan pivota sobre el realismo. Por ejemplo, reconoce la demora esperable en la obtención de los resultados; la magnitud del cambio "exigible" de forma razonable y acepta como posible el fracaso en la consecución de los objetivos de mejora de la calidad del agua y de reducción de los niveles tróficos, incluso después de llevarse a cabo las medidas de control previstas.

9. En relación con el tiempo de respuesta y con la magnitud de la respuesta esperable conviene precisar:

En términos generales el "tiempo de respuesta" que transcurre entre la puesta en marcha de las medidas de control y la observación de los resultados esperables, puede ser estimado teóricamente a partir del tiempo de residencia del Fósforo en el sistema. En tal caso, en las lagunas de Adra ese tiempo (teórico) de latencia debería medirse en meses pero conviene tener presente algunas de las "lecciones" derivadas de experiencias prácticas anteriores:

- La tasa de recuperación de los lagos es una función compleja de varios factores y los sistemas con una (larga) historia de eutrofización (con sedimentos enriquecidos en Fósforo) requieren un mayor tiempo de respuesta.
- El retraso en el tiempo de respuesta puede extenderse a varios años en sistemas de cuencas cerradas, en regiones áridas y velocidades muy lentas se desagüe.
- En determinados sistemas la respuesta se ha relacionado con el contenido en Fósforo movilizable desde los sedimentos antes que con la carga externa y además, una reducción de la carga externa de nutrientes ha conducido a un incremento de los valores de carga interna durante el período de post-tratamiento (p.e. Istvánovics & Somlyódy, 2001).
- Aunque en nuestras lagunas los mecanismos de precipitación de Fósforo y la naturaleza química de los sedimentos han presentado más bien un "seguro" y no prevemos que tras las medidas de reducción de la carga externa de nutrientes se produzcan incrementos de movilidad del Fósforo del sedimento, estimamos esencial extremar las medidas de seguimiento (post-tratamiento) del contenido y de la forma del Fósforo en los 15 primeros centímetros del sedimento.

La eutrofización es un proceso y, por lo tanto, un programa de gestión que pretenda su reversión ha de plantear sus objetivos en función de una situación de referencia. Si bien es cierto que no disponemos de información sobre el estado trófico de las lagunas en condiciones no antropizadas, resulta realista suponer a partir de la consideración de aspectos como el tamaño, composición geológica y topografía de la cuenca de drenaje; la disposición y naturaleza de las cubetas (su carácter somero; la elevada sección de contacto entre el agua y el sedimento o el desarrollo prolongado de condiciones de isoterma) que las aguas de estos sistemas, en su "estado natural", deberían ser ricas en nutrientes.

Por eso, aunque la magnitud de la mejora se percibe externamente como una reducción de los valores de biomasa algal y un incremento en las transparencias de las aguas, la cuantificación de dicha mejora ha de considerarse teniendo en cuenta tanto la situación de partida (actual) como las "previsibles" condiciones iniciales ("de fondo"). En todo caso insistimos en que es importante tener en cuenta que la carga de nutrientes a las lagunas se debe reducir significativamente antes de que se manifiesten mejoras importantes y evidentes, y aún así, la carga interna puede mantener la elevada producción primaria de estos sistemas.

Con las cautelas que exige la utilización de modelos para hacer predicciones por la incertidumbre que llevan asociada (y que en nuestro caso, como se ha escrito con detalle en el capítulo anterior, el pronóstico se puede ver especialmente debilitado) a título orientativo los modelos empíricos que hemos obtenido para relacionar la carga externa de Fósforo con los valores de Fósforo total del sistema y de éste con la concentración de Clorofila a, predicen que, por ejemplo:

- una reducción del 50% de la carga externa anual de Fósforo que llega a las lagunas, se traducirá en una disminución inferior al 10% de la concentración promedio anual de Fósforo total en ambas lagunas.

- Si dicha reducción se concentra en los meses primaverales, la misma reducción de entrada se traduciría en una reducción aproximadamente el 11% de la concentración promedio anual de Fósforo total en primavera en la laguna Honda y del 13% en la laguna Nueva lo que, a su vez, representaría una disminución de los valores promedio de Clorofila a durante el verano de aproximadamente un 10% en ambas lagunas.

10. Creemos muy importante conseguir que la solución (lógica) sea también aceptada social y medioambientalmente. Esto significa la necesidad de integrar el plan de medidas concretas en un programa más amplio de educación pública, participación ciudadanas y, por supuesto, inscribirlo dentro de un marco medioambiental que pudiera incluso desaconsejar acciones posibles desde otra perspectiva.

### **Medidas concretas de actuación**

Sin lugar a dudas, el proceso de eutrofización al que se han visto sometidas las lagunas en las últimas décadas, es una consecuencia directa de la radical modificación que ha experimentado la zona húmeda original de la que forman parte, debido a una profunda intervención en el área de captación que ha modificado sus características fisiográficas y ha producido cambios en los usos del suelo cuya manifestación más evidente ha sido la construcción de invernaderos en el entorno inmediato de las lagunas, reduciendo considerablemente su tamaño original y produciendo una fragmentación extrema de la unidad natural que representaba la llanura deltaica, hasta hacerla irreconocible.

Esto ha generado un incremento en la carga externa de nutrientes a las lagunas (especialmente a la laguna Honda) a través de los cauces que drenan el área de captación, junto con las consecuencias derivadas de las prácticas agrícolas desarrolladas en los propios invernaderos (lixiviación de nutrientes por el uso de fertilizantes; de productos tóxicos; de acumulación de restos orgánicos en descomposición en la zona litoral de las lagunas, etc).

Por todo ello, un Plan de gestión científicamente orientado ha de contemplar una medida genérica que, sin lugar a dudas, representa la solución (por antonomasia) del problema: la de restaurar la zona húmeda natural para la recuperación de las lagunas.

Esta actuación supone el desmantelamiento (progresivo) de los invernaderos de las proximidades de las lagunas para devolver a esta zona las condiciones hidrológicas, ecológicas y paisajísticas iniciales. Es, además, la única solución que garantiza efectos persistentes en el tiempo.

Ciertamente se trata de una medida económicamente costosa pero representa la mejor de las soluciones en términos de coste-beneficio, especialmente cuando entre estos últimos se considera no sólo en control del proceso de eutrofización de las lagunas sino aquellos, seguramente más importantes y generales, derivados de la reversión de esta zona hacia sus auténticos valores ecológicos, medioambientales, paisajísticos y hasta sociales y culturales. Además, estos beneficios no son en absoluto comparables a los derivados de cualquier otra intervención que, por lo tanto, nunca podrá ser considerada como medida alternativa sino complementaria de ésta, aunque pueda tener un valor inmediato (especialmente durante la implementación de la solución definitiva).

La restauración de la zona húmeda natural tras el desmantelamiento de los invernaderos, que seguramente requerirá de mínimas intervenciones sobre el curso de la sucesión ecológica restablecida, dará lugar al desarrollo de una orla de vegetación encharcable (consustancial con el carácter de estas lagunas) que:

- Incrementará sustancialmente la capacidad de almacenamiento de agua del área.
- Recuperará su función de protección de avenidas.

- Manifestará su elevada efectividad en la filtración y decantación de sólidos en suspensión acarreados en períodos de crecidas así como su papel como transformador de nutrientes (proceso de consumo biológico, desnitrificación...).
- Si bien es cierto que la efectividad de estos cinturones de vegetación encharcada en la retención de nutrientes es menor, el elevado contenido en Aluminio y Hierro del suelo/sedimento, contribuirá en este caso a la retención efectiva de Fósforo.
- Es posible que contribuya al "pool" de materia orgánica disuelta de las lagunas con lo que, a largo plazo, es presumible que ambos sistemas adquieran características similares a las que actualmente presenta la laguna Nueva.
- Contribuirá, además, a resaltar el valor natural del hábitat original, altamente productivo y de elevada diversidad estructural y biológica (florística, faunística).

Las medidas complementarias a las que acabamos de referirnos, incluirían, esencialmente:

- Acciones tendentes a minimizar la erosión, con la consiguiente reducción de las pérdidas de suelo y de nutrientes, cuyo destino último son las lagunas a través de la escorrentía. Entre estas:
  - a) Limitación de intervenciones en zonas de elevada pendiente en las que el riesgo de potenciación de la erosión es mayor.
  - b) Mantenimiento de una cubierta vegetal estable, incluyendo, en su caso, medidas de revegetación con especies autóctonas.
- Limpieza y saneamiento de la cuenca de captación, en particular del lecho de los cauces y de las acequias. Reforzamiento de las medidas de gestión de residuos que se han venido poniendo en marcha a lo largo de este proyecto.
- Difusión entre los agricultores de un código de buenas prácticas. Continuación y ampliación de las medidas de asesoría técnica en las que junto con información sobre la aplicación (adecuada) de fertilizantes, plaguicidas, etc. Participen proporcionando información de su competencia, representantes de la Consejería de Medio Ambiente. El éxito entre los agricultores de las reuniones que esta Consejería ha mantenido durante el desarrollo del proyecto, es un síntoma de la efectividad de estas medidas.
- Medidas de explicación pública del programa de actuación; de información periódica sobre el progreso de las acciones y de educación ambiental que pongan énfasis en la pérdida de parte del acervo natural (cultural) que supone la degradación de las lagunas. Se trata en resumen de lograr una complicidad de los ciudadanos con las tareas de gestión a emprender.
- En relación con esta medida se podría analizar la posibilidad de una reordenación del territorio que contribuyera al disfrute (sostenible) público de un patrimonio singular, único en la región.

Bajo la perspectiva que estamos considerando (intento de reversión de la situación actual) otras medidas, aun técnicamente posibles, no nos parecen recomendables, bien porque no sean compatibles con las condiciones hidrológicas particulares de esta área (p.ej. el desvío de las aguas "cargadas" de nutrientes; la aplicación de compuestos químicos para la precipitación de Fósforo en las ramblas y acequias); porque económicamente sean desproporcionadas (construcción de plantas para la eliminación de Fósforo del agua de las acequias; construcción de diques de sedimentación de materiales y de retención de Fósforo en el cauce de las ramblas) o porque supondrían un impacto ambiental inaceptable en una zona protegida (la misma construcción de diques de sedimentación de materiales y/o retención de Fósforo en el cauce de las ramblas). En todo caso estas medidas resultarían poco más que cosméticas y de dudosa efectividad.

Creemos que sólo merecería la pena analizar la posibilidad de aplicar tratamientos terciarios, utilizando tecnologías "blandas" (tratamientos biológicos) para la retirada de nutrientes de las aguas que se vierten al cauce del río Adra y terminan alcanzando las lagunas a través de las acequias.

De las posibles medidas a adoptar para la reducción de la biomasa algal, entre las denominadas "acciones dentro del lago" (aquellas que hemos dicho que atienden a los síntomas del proceso antes que a sus causas), después de desaconsejar sin paliativos el uso de alguicidas, merece la pena comentar:

- a) *Las medidas de incremento de las tasas de desagüe* que propician un "lavado" de las lagunas, están desaconsejadas, por motivos obvios, en este tipo de lagunas "terminales".
- b) *Inactivación de nutrientes*. Se trata de eliminar el Fósforo disponible para las algas de la columna de agua "ligándolo" de forma permanente a los sedimentos mediante la aplicación de sales de Aluminio, Hierro o Calcio con las que forma precipitados.

Las sales de Aluminio (Sulfato Aluminico, Aluminato Sódico) dan lugar a la formación de Fosfato Aluminico y de flóculos coloidales de Hidróxido de Aluminio al que adsorben ciertas fracciones de Fósforo. Estos flóculos de Hidróxido de Aluminio sedimentan y continúan adsorbiendo (y reteniendo) Fósforo en la matriz de su molécula, incluso bajo condiciones reductoras. Esto les hace mucho más eficaces (y preferidos) que las sales de Calcio y de Hierro cuyos precipitados son muy sensibles a los cambios en el potencial redox, por lo que en condiciones de anoxia se produce la resolubilización del Fósforo precipitado.

En todo caso la inactivación del Fósforo con sales de Aluminio sólo es efectiva, con efectos de larga duración y (teóricamente) sin efectos agudos o crónicos significativos sobre la biota del sistema, si se mantiene paralelamente una reducción significativa de la carga externa de Fósforo al sistema.

Si bien las condiciones de las lagunas de Adra son precisamente las "más convenientes" para la aplicación de esta técnica; aguas de mezcla continuada; con elevados valores de pH y Alcalinidad y elevadas concentraciones de Calcio, Sulfatos, Carbono orgánico y Silicatos, el hecho de que se hayan descrito en la bibliografía algunos efectos tóxicos, especialmente en condiciones de exposición prolongada (adherencia a la mucosa del epitelio branquial de peces; reducción de la diversidad específica de microcrustáceos planctónicos y macroinvertebrados bénticos), nos hace desaconsejar esta medida que, por lo demás y económicamente puede ser aceptada ya que las lagunas de Adra requerirían dosis de entre 20-30 g Al m<sup>-3</sup> y tratamientos de entre 10-15 días, que supondrían un coste de aproximadamente 150 hombres-día (aprox. 90 000 euros).

*1. Biomanipulación de la cadena trófica*. Esta "ecotecnología" (no requiere tratamientos químicos ni tecnologías mecánicas agresivas) resulta, en principio, aconsejable medioambientalmente. Sin embargo, en el momento actual se encuentra en fase experimental ya que muchas de las interacciones en las que se basa, todavía son desconocidas o pobremente conocidas.

De hecho, aunque existen evidencias de que los efectos "top-down" derivados de la manipulación en la cima de la pirámide trófica del sistema, se transmiten en cascada y afectan a la biomasa algal en lagos pobres en nutrientes, su aplicación a lagos someros, de pequeño tamaño y eutróficos está peor documentada.

Dos circunstancias adicionales nos obligan a ser cautos en la recomendación de su aplicación:

- i. La necesidad (presumible) de reducir la biomasa de peces planctívoros, algo que no será admisible en estas lagunas.
- ii. Los resultados de las experiencias previas que hemos llevado a cabo en las que una reducción de la biomasa de planctívoros (reproducida por un incremento experimental de la biomasa de herbívoros planctónicos) no produjo los efectos esperables, sobre todo en la laguna Honda.

2. Finalmente reconocemos el carácter de medida "definitiva" que puede suponer la retirada de sedimentos mediante dragado del fondo de las lagunas. Sin embargo, creemos que antes de aconsejar esta técnica se deberían resolver algunos aspectos como:

- La profundidad del sedimento a retirar.
- La técnica apropiada de remoción (dragado mecánico, hidráulico, neumático...).
- El destino de los sedimentos retirados.

Asimismo, para su aceptación definitiva deberían conocerse y sopesarse algunas de las "desventajas" que su puesta en práctica conlleva: resuspensión de sedimentos durante la fase de dragado; liberación (eventualmente) de sustancias tóxicas acumuladas en el sedimento; destrucción de hábitats para los organismos bentónicos y de un (potencial) banco de semillas, etc. No obstante, la aplicación de esta medida, más que en el caso de cualquier otra, requeriría una investigación más detallada de los sedimentos.



**BIBLIOGRAFÍA**

- BOSTRÖM, B., M. JANSSON & C. FORSBERG. 1982. Phosphorus release from lake sediments. Arch. Hydrobiol. Beih. Ergeb. Limnol., 18:5-59.
- CARRILLO, P., L. CRUZ-PIZARRO, R. MORALES & P. SÁNCHEZ-CASTILLO. 1987. Cambios estacionales en las comunidades de fitoplancton y de zooplancton de la Albufera de Adra. Limnética, 3: 243-254.
- CARRILLO, P., P. SÁNCHEZ-CASTILLO, L. CRUZ-PIZARRO & R. MORALES. 1996. Cambios cíclicos y tendencias a largo plazo en la salinización de ecosistemas fluctuantes (Albuferas de Adra). Evidencias de eutrofización y contaminación. Limnética, 12: 59-65.
- CASTRO, H., J.C. NEVADO, M. PARACUELLOS & J. M. LÓPEZ MARTOS. 1994. La Malvasía (*Oxyura leucocephala*) en la provincia de Almería. Evolución poblacional, nidificación y selección de hábitat. *Oxyura*, 7: 119-134.
- CIRUJANO, S., M. VELAYOS, F. CASTILLA & M. GIL. 1992. Criterios botánicos para la valoración de las lagunas y humedales españoles (Península Ibérica y las Islas Baleares). Colección Técnica. ICONA. Madrid.
- COOKE, G. D., E. B. WELCH, S. A. PETERSON & P. R. NEWROTH. 1993. Restoration and Management of Lakes and Reservoirs. 2<sup>nd</sup> ed. Florida: Lewis Publishers.
- CRUZ-PIZARRO, L., V. AMORES & J. DE LA ROSA. 1996. Informe Final. Contrato UGR-Delegación Consejería de Medio Ambiente de Almería.
- CRUZ-PIZARRO, L., J. BENAVENTE, J. CASAS, V. AMORES, L. MAY, D. FABIÁN, M. RODRÍGUEZ, K. EL MABROUKI, I. RODRÍGUEZ, I. DE VICENTE, E. MORENO-OSTOS, S. L. RODRIGUES DA SILVA, M. BAYO, A. MOÑINO & M. PARACUELLOS. 2002a. Control de la eutrofización en las lagunas de las Albuferas de Adra. Diagnóstico, Evaluación y Propuesta de Recuperación. *Informe Final Proyecto UE LIFE B4-3200/98/458*. 349 pp.
- CRUZ-PIZARRO, L., V. AMORES, D. FABIÁN, I. DE VICENTE, I. RODRÍGUEZ-PARÍS, K. EL MABROUKI, M. RODRÍGUEZ & S. L. RODRIGUES DA SILVA. 2002b. La Eutrofización de las Albuferas de Adra (Almería). *En: Agricultura y Medio Ambiente en el entorno de las Albuferas de Adra*. J. C. Nevado & M. Paracuellos (eds.): 77-96. Consejería de Medio Ambiente (Almería). España.
- DE VICENTE, I. 1999. Control de la eutrofización en las Albuferas de Adra. Papel del sedimento en el ciclo del fósforo. Proyecto Fin de Carrera. Universidad de Granada. 74 pp.
- DE VICENTE, I. 2004. Intercambio de nutrientes en la interfase agua-sedimento de dos lagunas costeras de elevado nivel trófico: la Albufera de Adra (Almería). Tesis Doctoral, Universidad de Granada, Granada, España.
- DE VICENTE, I., L. SERRANO, V. AMORES, V. CLAVERO & L. CRUZ-PIZARRO. 2003. Sediment phosphate fractionation and interstitial water phosphate concentration in two coastal lakes (Albuferas de Adra, SE Spain). *Hydrobiologia*, 492: 95-105.
- DE VICENTE, I. & L. CRUZ-PIZARRO. 2003. Estudio de la carga externa e interna de fósforo y aplicación de modelos empíricos de eutrofización en las lagunas de la Albufera de Adra. *Limnética*, 22 (1-2): 165-181.
- DE VICENTE, I., V. AMORES & L. CRUZ-PIZARRO. Instability of shallow lakes: a matter of the complexity of factors involved in sediment and water interactions?. *Limnética*, en prensa.

- DE VICENTE, I., E. MORENO-OSTOS, V. AMORES, F. RUEDA & L. CRUZ-PIZARRO. Low predictability in the dynamics of shallow lakes: implications for their management and restoration. *Wetlands*, en revisión.
- DE VICENTE, I. & L. CRUZ-PIZARRO. Sediment resuspension in two shallow coastal lakes: controlling factors and consequences on phosphorus dynamics. *Wat. Resource Res.*, enviado.
- GÓMEZ-MERCADO, F. & M. PARACUELLOS. 1996. Hábitats de las albuferas de Adra (Almería) recogidos en el Anexo I de la Directiva 92/43/CEE. *Boletín Instituto de Estudios Almerienses (Ciencias)*, 14: 59-76.
- GRUMBINE, R. E. 1994. Wildness, wise use and sustainable development. *Environmental Ethics*, 16 (3): 27-249.
- MARTÍNEZ VIDAL, J. L. & H. CASTRO (coords.). 1990. Las Albuferas de Adra. Estudio Integral. Colección Investigación, 9. Instituto de Estudios Almerienses (Diputación Provincial de Almería). Almería.
- MIRACLE, M. R. 1987. Ecosistemas valencianos: Las zonas húmedas litorales. *En: El medio ambiente en la comunidad valenciana: 76-81*. Generalitat Valenciana.
- NEVADO, J. C. 2002. Proyecto LIFE-NATURALEZA 1998 Conservación de las Albuferas de Adra (Almería, España). *En: Agricultura y Medio Ambiente en el entorno de las Albuferas de Adra*. J. C. Nevado & M. Paracuellos (eds): 29-40. Consejería de Medio Ambiente (Almería).
- NEVADO, J. C. & M. PARACUELLOS. 1999. El Fartet en Almería. Una estrategia de conservación. *En: Peces ciprinodóntidos ibéricos. Fartet y Samaruc*. Monografía. M. Planelles-Gomis (coord.): 163-168. Colección Biodiversidad, 5. Consellería de Medio Ambiente (Generalitat Valenciana). Valencia.
- PARACUELLOS, M. 2002. Valor ambiental de las Albuferas de Adra. *En: Agricultura y Medio Ambiente en el entorno de las Albuferas de Adra*. J.C. Nevado & M. Paracuellos (eds): 51-63. Consejería de Medio Ambiente (Almería).
- PARACUELLOS, M. & J. C. NEVADO. 1994. Localización del Fartet, *Aphanius iberus*, en la cuenca del Río Adra (Almería, sudeste ibérico). Doñana, *Acta Vertebrata*, 21: 199-204.
- PULIDO, A., J. BENAVENTE & G. MORALES. 1988. Hidrogeología del delta del Río Adra. *Estudios geológicos*, 44: 429-443.
- SAS, H. 1989. Lake restoration by reduction of nutrient loading: expectations, experiences, extrapolations. Sankt Augustin: Akademie Verlag Richarz.
- TAPIA GARRIDO, J. A. 1990. Historia general de Almería y su provincia. Tomo 9.
- VAN LIERE, L. & R. D. GULATI. 1992. Restoration and recovery of shallow eutrophic lake ecosystems in the Netherlands: epilogue. *Hydrobiologia*, 233:283-287.