

MANUAL DE RESTAURACIÓN DE EN HUMEDALES CUENCAS AGRÍCOLAS

Francisco A. Comín



Comarca de Los Monegros

MANUAL DE RESTAURACIÓN DE HUMEDALES EN CUENCAS AGRÍCOLAS

Francisco A. Comín

Comarca de Los Monegros

Reservados los derechos de propiedad intelectual. **Se autoriza el uso y reproducción del contenido para uso particular y docente haciendo referencia a esta publicación.** Ni la totalidad ni parte de este libro, puede reproducirse, almacenarse o transmitirse en manera alguna por ningún medio ya sea electrónico, químico, mecánico, óptico, informático, de grabación o de fotocopia, con intereses de venta o comerciales sin permiso previo por escrito de los editores y del autor.

La información y las opiniones contenidas en esta obra son de la exclusiva responsabilidad del autor. La editorial solo se hace responsable del interés científico de la publicación

Autor: Prof. Dr. Francisco A. Comín
Instituto Pirenaico de Ecología-CSIC. Campus de Aula Dei
Av. Montañana, 1005. 50059 Zaragoza. España

Editor: Comarca de Los Monegros
Av. Fraga s/n. 22200 Sariñena. Huesca. España

Diseño Gráfico: INO Reproducciones

Impreso en España (Printed in Spain): INO Reproducciones

Índice

PRESENTACIÓN	IX
PREFACIO	XI
1 INTRODUCCIÓN: PORQUÉ RESTAURAR Y CREAR HUMEDALES A ESCALA DE CUENCA	1
1.1. Porqué restaurar y crear humedales	2
Restaurar y/o crear humedales a escala de cuenca hidrográfica	6
<i>Concepto 1.1. Restaurar y crear humedales</i>	8
2 BASES CIENTÍFICO-TÉCNICAS	11
2.1. Introducción	12
2.2. Restauración y creación de humedales	13
<i>Concepto 2.1. Restauración versus creación de humedales</i>	13
Rasgos hidrogeomorfológicos de los humedales	13
2.3. Procesos biogeoquímicos	16
2.4. Distribución de la vegetación	19
2.5. Red trófica	19
<i>Concepto 2.2. Restauración ecológica</i>	21
2.6. Restauración de un conjunto de humedales en una cuenca hidrográfica	21
<i>Concepto 2.3. Cobertura y uso del suelo, y diversidad del paisaje</i>	22
2.7. Restauración y creación de humedales a escala continental y global ..	23
2.8. La integración de aspectos científico-técnicos, sociales y económicos ..	23

3 SELECCIÓN DE SITIOS PARA LA RESTAURACIÓN Y CREACIÓN DE HUMEDALES A ESCALA DE CUENCA ...	27
3.1. Introducción	28
3.2. Pasos a seguir en la selección de sitios para la restauración de humedales a escala de cuenca	28
<i>Concepto 3.1. Un humedal grande solo o varios pequeños</i>	29
3.3. Selección de humedales a restaurar en una cuenca hidrográfica para la mejora de la calidad del agua	33
3.4. Selección de humedales a restaurar en una cuenca hidrográfica para mejorar la biodiversidad	36
3.5. Aspectos críticos de la selección de sitios para restaurar humedales a escala de cuenca hidrográfica	37
3.5.1. Selección de humedales a restaurar por múltiples objetivos	37
3.5.2. Conectividad entre humedales	39
4 DIMENSIONAMIENTO Y DISEÑO DE HUMEDALES	41
4.1. Requerimientos de información sobre el tamaño y forma de los humedales para su restauración	42
<i>Concepto 4.1. Morfometría del humedal</i>	42
4.2. Dimensionamiento de humedales construidos a escala de cuenca hidrográfica para la mejora de la calidad del agua	45
4.2.1. Consideraciones generales	45
4.2.2. Dimensionamiento de humedales con flujo superficial horizontal (HFSH)	47
4.3. Diseño de humedales con flujo superficial horizontal en medio natural	52
5 EJECUCIÓN DE LAS OBRAS DE RESTAURACIÓN DE HUMEDALES	57
5.1. Consideraciones previas	58
5.2. Planificación de las obras	59
5.3. Conformación del terreno	61
5.4. Control del nivel y de los flujos de agua	67
5.5. Enmiendas del suelo	70

6 LA RECUPERACIÓN DE LA VEGETACIÓN EN LA RESTAURACIÓN DE HUMEDALES	71
6.1. Distribución y dinámica de la vegetación en los humedales	72
<i>Concepto 6.1. Dinámica de la vegetación en los humedales</i>	74
6.2. Replantar o no replantar	75
6.3. La revegetación	77
6.4. Control de la proliferación de la vegetación	80
REFERENCIAS CITADAS	83

Presentación

La Comarca de Los Monegros trabaja desde hace muchos años en favor del medio ambiente del territorio a través de proyectos de investigación y de sensibilización medioambiental y con actuaciones y programas para el mantenimiento del rico patrimonio natural monegrino. En esta línea, el LIFE CREAMAgua es una de las iniciativas más importantes emprendidas por la Comarca de Los Monegros. Para Los Monegros este proyecto ha supuesto un reconocimiento internacional a las políticas medioambientales que se impulsan desde el gobierno comarcal y la inclusión de esta comarca como “territorio LIFE” es una marca de calidad también para futuras iniciativas.

El proyecto LIFE CREAMAgua ha incluido la restauración de 70 hectáreas de riberas en el río Flumen y la creación de 16 humedales. En total se ha actuado en una superficie de más de 400 hectáreas de terreno público en los términos municipales de Albalatillo, Almuniente, Barbués, Capdesaso, Grañén, Lalueza, Torres de Barbués, Poleñino, Sangarrén y Sariñena. Se han plantado más de 4.000 plantas y se han censado hasta 200 especies de aves y 180 de plantas.

Respecto a la metodología de trabajo, la Comarca de Los Monegros es ejemplo de administración local capaz de coordinar a un equipo multidisciplinar formado por políticos del ámbito local, regional y estatal, así como a científicos, técnicos expertos en programas europeos, en ingeniería y construcción, educadores y especialistas en tecnologías de la información y la comunicación. El trabajo no ha sido fácil, pero fruto de la responsabilidad, la profesionalidad y sobre todo, la ilusión de todos, este proyecto se ha traducido en un éxito desde todos los puntos de vista.

Nuestro proyecto corresponde al LIFE + Política y Gobernanza Medioambiental. Este programa trata de demostrar que las autoridades locales pueden participar eficazmente en la mejora y gestión del medio ambiente. Un objetivo que la Comarca de Los Monegros, desde la época de la Mancomunidad, ha tenido presente teniendo en cuenta los tres pilares de la sostenibilidad: área ambiental, económica y social.

En torno a este proyecto se han unido voluntades de instituciones de distinto color político, entidades, tejido social y económico, agricultores y ciudadanía. Este proyecto ha puesto de manifiesto que la unión de voluntades se traduce en logros

para el desarrollo de nuestros pueblos y en CREMAgua se dan la mano muchas instituciones, asociaciones, agricultores y monegrinos particulares que han hecho posible que este proyecto tenga un balance muy satisfactorio en cuanto a participación y resultados.

Deseamos que el Manual de Restauración de Humedales en cuencas agrícolas que tiene Ud. en sus manos sea también una herramienta práctica y útil.

ILDEFONSO SALILLAS

Presidente de la Comarca de Los Monegros

Prefacio

Este *Manual de restauración de humedales en cuencas agrícolas* es una obra con las orientaciones y técnicas básicas y esenciales para la restauración de humedales en general y con especial atención a la restauración de humedales a escala de cuenca hidrográfica y en cuencas con intensos usos agrícolas. Resulta de las tareas del Proyecto EU Life09 ENV/ES/000431 “Creación y restauración de ecosistemas acuáticos para la mejora de la calidad del agua y de la biodiversidad en cuencas agrícolas” que fue coordinado por la Comarca de Los Monegros y realizado conjuntamente por KV Consultores, Tragsa, Confederación Hidrográfica del Ebro, la Fundación para la Promoción de la Juventud y el Deporte, y el Instituto de Estudios de Investigación de Los Monegros, con la colaboración del Instituto Pirenaico de Ecología-CSIC, sindicatos agrarios y municipios de la cuenca del río Flumen (Huesca, España) donde se realizó este proyecto durante 2011-2014. A todos ellos y al Programa EU Life se les reconoce aquí el soporte y la inestimable ayuda y colaboración dadas.

Es una obra resultante de la experiencia del autor en la planificación, preparación y ejecución de proyectos de restauración de humedales y de la investigación experimental y teórica del propio autor y de numerosos trabajos de la literatura científica y no científica. En cierto modo reúne y resume las ideas y la experiencia de muchos años de investigación y de práctica en trabajos de restauración de humedales. Trata de restauración ecológica. Es decir, de la restauración de humedales como ecosistemas. Por ello tiene el enfoque de restaurar el funcionamiento ecológico de los humedales para que una vez recuperada mínimamente las funciones ecológicas esenciales, y también una mínima estructura, los mismos ecosistemas se auto-organicen adaptándose a los factores reguladores externos y evolucionando con ellos.

Por ser una obra general no incluye aspectos propios de la restauración de tipos determinados de humedales. Esta sería una tarea ingente, que requeriría multitud de detalles y particularidades de cada tipo de humedal. Existen en la literatura numerosas obras que tratan por separado de la restauración de diferentes tipos de humedales y trabajos que incluyen Pero si contiene, los fundamentos y las orientaciones prácticas para la restauración de cualquier tipo de humedal y para la restauración, y creación, de humedales a escala de cuenca hidrográfica.

La restauración ecológica combina aspectos científico-técnicos, económicos y sociales, lo cual es necesario para afrontar y resolver los problemas y aportar soluciones ambientales. Y requiere investigación para su innovación continuada, especialmente basada en la práctica de la restauración con ese enfoque de ecosistema. Esperamos que esta obra contribuya también a esa innovación y a su integración en el desarrollo social y económico para convertirlo en un desarrollo socio-ecológico.

FRANCISCO A. COMÍN

1

**Introducción:
Porqué restaurar y crear
humedales a escala de cuenca**

1.1. PORQUÉ RESTAURAR Y CREAR HUMEDALES

Los humedales proporcionan numerosos servicios a la Humanidad y, en particular, a las poblaciones humanas que los gestionan y usan de forma sostenible (Tabla 1.1). Son el tipo de ecosistema que más valor agregado de servicios proporciona por hectárea (Costanza *et al.* 1997) debido su biodiversidad y a los intensos procesos biogeoquímicos que en ellos tienen lugar.

TABLA 1.1.

Ejemplos de los variados servicios ecosistémicos proporcionados por los humedales

Proceso ecológico	Función	Servicio	Beneficio
Absorción gases efecto invernadero/acumulación de carbono	Reducir emisión de gases de efecto invernadero	Regulación climática	Reducción impactos cambio climático
Reducción insolación y absorción/emisión de vapor de agua	Reducción de las variaciones de temperatura y de humedad	Regulación meteorológica	Condiciones de vida y salud mejores
Crecimiento vegetal (aéreo y subterráneo) y estructuración física	Amortiguación de: velocidad del viento, inundación, origen y propagación incendios	Reducción de perturbaciones por fenómenos naturales	Protección frente a tormentas e inundaciones
Adsorción, acumulación y dispersión de agua en componentes físicos del ecosistema	Reducción de flujos de agua, evaporación y evapotranspiración	Regulación flujos de agua	Amortiguación de la velocidad de flujo del agua y de su impacto físico
Acumulación de agua	Almacenaje de agua	Suministro de agua	Tener agua disponible para múltiples usos.
Sedimentación de sólidos en suspensión y acreción	Frenado y depósito de sólidos en suspensión	Acumulación y retención de suelo	Almacenar y disponer de suelo
Interacción biogeoquímica entre agua, suelo, vegetación y microorganismos	Meteorización de material mineral	Formación de suelo	Disponer de suelo útil
Absorción vegetal	Crecimiento vegetal y acumulación de biomasa	Regulación de nutrientes	Disminución contenido en nutrientes del agua

Proceso ecológico	Función	Servicio	Beneficio
Absorción y transformación metabólica de contaminantes	Crecimiento bacteriano	Regulación de contaminantes	Eliminación de contaminantes
Transporte de polen y fecundación de óvulos de las flores	Reproducción vegetal	Polinización	Asegurar la reproducción y el mantenimiento de las poblaciones vegetales
Competencia interespecífica y depredación	Eliminación de competidores por recursos	Control de plagas	Elimina especies no propias o masivas en el ecosistema
Facilitar condiciones ambientales para vida y cría de especies	Protección vegetal y animal	Refugio y criadero de especies	Asegurar la persistencia de las poblaciones biológicas
Desarrollo de partes de la vegetación y animales consumibles por los humanos.	Crecimiento de especies, individual y de poblaciones	Producción de alimentos	Proporcionar alimentos a las poblaciones humanas
Incremento de biomasa y de partes de las especies usables por los humanos.	Crecimiento de especies, individual y de poblaciones	Producción de materias primas	Proporcionar bienes materiales útiles para los humanos
Formaciones físicas y presencia de especies de interés recreativo	Apariencia y proporcionar sustrato para recreación	Recreativos	Proporciona la facilidad para actividades recreativas
Sustrato y motivo de actividades culturales	Da soporte a interpretación cultural de la estructura y procesos del humedal	Culturales	Proporciona material para actividades culturales

Sin embargo, la desaparición de humedales no ha cesado en el mundo. Ya a finales del siglo XX se había documentado la pérdida global durante el último siglo de más del 50% del área de los humedales (Mitsch & Gosselink 2007) y sigue esta pérdida durante el siglo XXI (Costanza *et al.* 2014) a pesar de la necesidad demostrada de que se sigan prestando los servicios de los ecosistemas para mantener una Tierra habitable. De hecho, la restauración y la creación de humedales si se realizaran a escala global contribuirían notablemente a la provisión de servicios ambientales (Watson *et al.* 2000). Entre otros a la mejora de las condiciones de so-

porte del funcionamiento de los humedales y de otros ecosistemas (ej., formación de suelo, producción primaria y reciclado de nutrientes), a mejorar los servicios de regulación (ej., acumular compuestos generadores de gases de efecto invernadero, amortiguar variaciones meteorológicas, disminuir los impactos de perturbaciones ambientales), a la provisión de alimentos y materias primas que son muy utilizados por la población humana (frutos, leña, miel), y a beneficios culturales muy variados (ej., educativos, de investigación, recreativos) (Millenium Ecosystem Assessment 2005). Muchos humedales se han señalado como los más valiosos después de los corales entre todos los ecosistemas (Russi *et al.* 2013).

Los beneficios que los humedales proporcionan son muy valiosos también a escala local. Pero debe resaltarse que estos servicios, y los beneficios que proporcionan, se sustentan en las funciones de todo tipo (ej., amortiguación de flujos intensos de agua, intercambios de compuestos entre agua, sedimento y atmósfera, crecimiento y desarrollo de poblaciones vegetales y animales) que a su vez resultan de los procesos (ej., infiltración y adsorción de agua a las partículas del sedimento, reacciones biogeoquímicas que transforman compuestos entre estadios oxidados y reducidos con intervención de microorganismos, producción primaria —asimilación de nutrientes y agua y conversión a materia por los vegetales y algas—) que tienen lugar y se realizan en las estructuras físicas y biológicas de los humedales (ej., en el sedimento, en la vegetación tan variada de los humedales, en el conjunto atmósfera-agua-sedimento por el cual circula el agua que les da dinamismo) (Fig. 1.1).

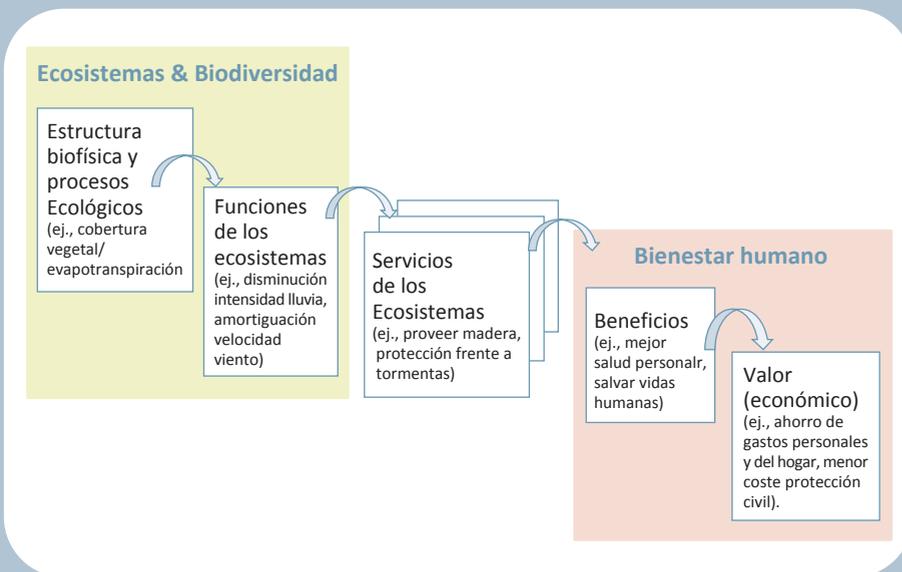


Fig. 1.1. Esquema de la relación entre el valor económico (puede haber otros tipos de valores) y los beneficios de los servicios que proveen los humedales (los ecosistemas en general), y las funciones que realizan los humedales que a su vez están realizadas y sustentadas por los procesos ecológicos y la estructura física y biológica (biodiversidad) de los humedales.

Por otra parte, el modelo de desarrollo sectorial basado en la explotación de uno o varios recursos del territorio sin considerar usos alternativos de estos recursos ni las potencialidades del conjunto del territorio no es sostenible ni beneficioso para la población humana a medio y largo plazo. Puede que aporte beneficios económicos a algunos sectores de la población a corto plazo. Pero acaban siendo ineficientes y poco rentables por la merma de los recursos explotados, por la degradación del entorno, y por la dependencia de factores externos (biofísicos o socio-económicos) que afectan negativamente a los rendimientos económicos. En numerosas ocasiones lleva al mantenimiento artificial (con subvenciones económicas y de servicios sociales) del sistema socio-económico, al abandono de explotaciones en condiciones degradadas y a impactos ambientales y sociales difíciles y costosos de revertir.

En contraste, la planificación y ejecución de un desarrollo basado en el aprovechamiento equilibrado de las múltiples potencialidades del territorio y de su población, es garantía de mantenimiento de los recursos y de obtención de valor añadido del conjunto de la población. En este contexto, en territorios rurales con grandes extensiones y escasa población, el aprovechamiento múltiple y acorde a sus características es más razonable que la sobreexplotación de un solo, o varios recursos. Además, las orientaciones de la nueva Política Agraria Común para incorporar terreno y actividades por los agricultores y ganaderos hacia objetivos de mejora ambiental suponen una posibilidad de usos acorde con esta visión de aprovechamiento de las múltiples potencialidades que ofrezca cada territorio.

En este sentido, la restauración y la creación de humedales ofrecen excelentes oportunidades para el desarrollo de las poblaciones humanas de forma integrada con los recursos y potencialidades del territorio. Restaurar humedales degradados o recuperar zonas de humedales transformadas a otros usos es una prioridad desde esta perspectiva porque siempre conservan pequeños espacios o restos del humedal original que pueden servir de orientación e inóculo para recuperar el humedal. Y la creación de humedales en sitios donde no existieron anteriormente, con criterios de funcionalidad ecológica, es una actividad positiva que vendría a revertir la gran pérdida ocurrida durante el último siglo, como se ha comentado anteriormente.

Obviamente, en general, el orden preferente de actuación debe ser la restauración de humedales degradados o desaparecidos y, en segundo lugar, la creación de humedales en sitios en los que nunca existieron o en sitios en los que hubo humedales hace mucho tiempo y han sido extremadamente modificados a otros usos. La razón para este orden en los criterios cuando se trata de establecer prioridades es que en los humedales que ya existen, aunque estén degradados, o las zonas en las que hubo humedales, aunque no sea visible ninguna zona como tal, se pueden reconocer signos de lo que fue el humedal y existen restos de orga-

nismos que pueden servir de referencia para la restauración o de inóculos para la recuperación. Y con ello se puede conseguir que los humedales una vez restaurados cumplan una serie de funciones ecológicas tales que provean múltiples y valiosos servicios. Los humedales de nueva creación pueden cumplir esto mismo, pero suele ser necesario decidir durante su diseño y construcción por favorecer algunas características hidrogeomorfológicas o biofísicas que condicionan las funciones ecológicas y, por tanto, los valores y servicios que proveen. En cualquier caso, la combinación de restaurar y crear humedales en territorios en los que, como se ha citado, se perdió un gran número y extensión de los mismos es muy aceptable y deseable si se hace con criterios razonables. Entre ellos Europa ocupa un lugar destacado con un 65% del área de humedales perdida (Revenga *et al.* 2000).

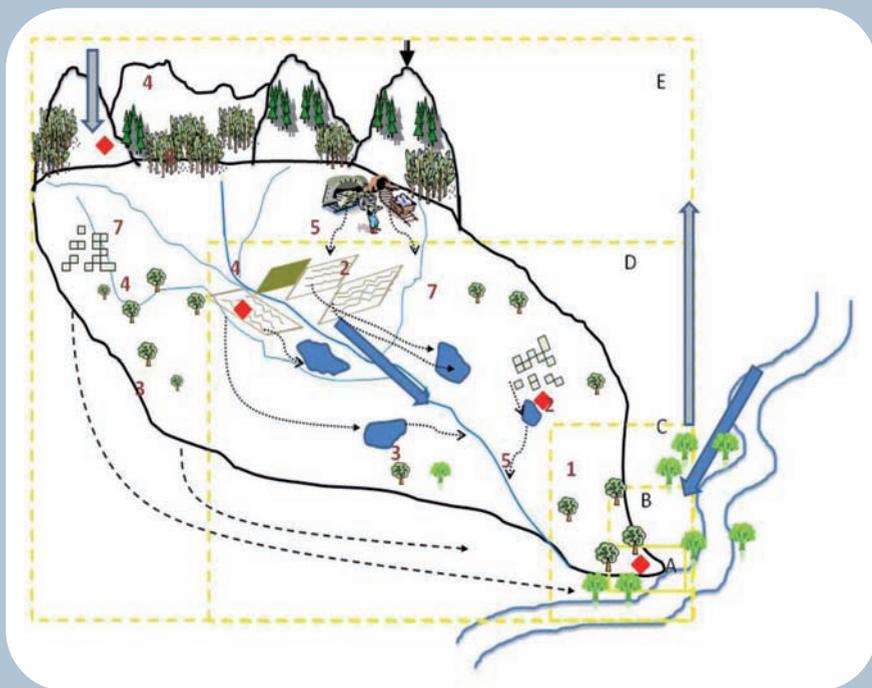
Restaurar y/o crear humedales a escala de cuenca hidrográfica

El reto de planificar y ejecutar la restauración y/o creación de humedales en un territorio es que se haga cumpliendo al máximo posible la provisión del conjunto de servicios ambientales, o los servicios para los cuales su restauración y/o creación ha sido planificada y ejecutada. Dado que las interacciones ecológicas más intensas en el territorio ocurren dentro de las cuencas hidrográficas, la planificación y ejecución de la restauración y/o creación de humedales a escala de cuenca hidrográfica es primordial porque mejorará las características del medio ambiente del conjunto de la cuenca a través del intenso papel que tienen los humedales conectando flujos hídricos en las relaciones entre partes de la cuenca. Y también por su papel en integrar las actuaciones de restauración y creación de humedales como parte del desarrollo del territorio, ya que en la cuenca hidrográfica tienen lugar los usos principales de los recursos naturales (tierra, agua).

Típicamente la distribución de humedales en una cuenca hidrográfica se enmarca en el patrón de circulación del agua, dentro del ciclo del agua, en general con zonas de recarga de agua subterránea en la parte superior y zonas de descarga a superficie de agua subterránea en la parte inferior (Fig. 1.2). Pero debido a la organización estructural de las cuencas en subcuencas, este patrón se puede repetir en modo fractal. De modo que no hay limitaciones conceptuales a la restauración o creación de humedales distribuidos en una cuenca hidrográfica.

Las limitaciones para restaurar y crear humedales vienen determinadas por la esencia misma de los ecosistemas: han de ser sistemas que se auto-organicen con el tiempo y que se correspondan con la región biogeográfica en la que se encuentren. Esto quiere decir que se han de restaurar o crear humedales representativos de la región biogeográfica (su hidrología, el paisaje, los tipos de suelo, las especies propias del lugar) en la que se encuentra la zona de actuación. Además de los aspectos relativos a las especies que formen parte de la estructura biológica se ha

Fig. 1.2. Esquema de una cuenca hidrográfica con una distribución ideal de humedales naturales y artificiales: 1) lagos de montaña, 2) prados de montaña, 3) pastizales de descarga, 4) de ribera, 5) kársticos, 6) lagunas, 7) de tratamiento de aguas residuales urbanas, 8) colas de embalse, 9) balsas construidas para almacenamiento de agua.



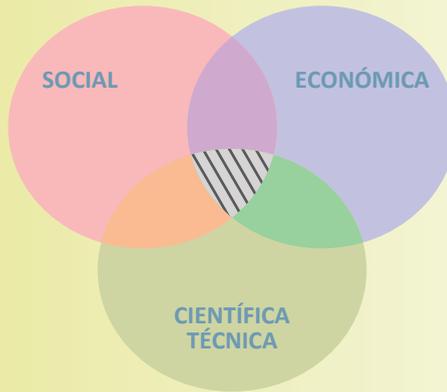
de respetar este criterio respecto a los tipos de suelo y a los materiales que se usen durante la fase constructiva para que no se acumulen o interfieran con el humedal materiales que no son propios del entorno en el que está situado. Y, una vez restaurados o creados, tienen que evolucionar sin presiones externas más allá de las variaciones climáticas y meteorológicas para que la interacción entre los factores reguladores externos y los componentes físicos y biológicos transcurra de modo que se optimicen los objetivos de la restauración y creación de los humedales.

No obstante, los criterios detallados vendrán delimitados por los objetivos concretos del proyecto de restauración o creación de los humedales. Así, se pueden establecer criterios restrictivos respecto a algunos aspectos funcionales de los humedales (por ej., tasa de renovación del agua, proporción de cobertura por diferentes especies de plantas) para optimizar la eficiencia del funcionamiento de los humedales con arreglo a los objetivos del proyecto. Y esto es válido para fases posteriores a la ejecución del proyecto de restauración o creación de humedales en las que sea necesario de acuerdo a esos objetivos introducir modificaciones estructurales o funcionales.

CONCEPTO 1.1.

Restaurar y crear humedales

Para la recuperación de las funciones y valores de los humedales en un territorio es *prioritario restaurar humedales degradados*. La restauración de humedales, de ecosistemas en general, requiere la participación coordinada de un equipo integrado que abarque todos los aspectos técnicos además de los sociales y económicos requeridos en un proyecto de restauración ecológica.



La restauración puede combinarse con la creación de humedales. Los humedales creados o construidos son muy útiles cuando se plantean objetivos muy específicos y relacionados con actividades intensivas humanas que generan contaminantes o perturban los sistemas naturales porque se pueden diseñar para optimizar su funcionamiento con respecto al objetivo definido. Por ejemplo, es mejor construir humedales con diseño específico para el tratamiento de las aguas residuales de una población o actividad agraria humana que restaurar humedales para este fin. Otro ejemplo, es muy posible que sea mejor construir un humedal con el objetivo de proporcionar hábitat a una especie de animal o planta que restaurar un humedal con el objetivo y aplicaciones de dedicarlo a la conservación de una especie concreta. En el primer caso se puede diseñar el humedal para tener el hábitat y la red trófica adecuada a la especie objetivo; en el segundo caso se pueden alterar muchos de los procesos del humedal y de sus funciones y valores, favoreciendo algunos de ellos y afectando negativamente a otros y en definitiva al conjunto del funcionamiento del humedal.

Como se deduce de estas consideraciones, es muy posible que la restauración y creación de humedales requiera de una primera fase constructiva y de una fase posterior, indefinida en el tiempo, de seguimiento y mantenimiento de su funcionamiento. Esta es una herramienta excelente para integrar estas actividades, dirigida por un experto técnico en la materia, como parte del desarrollo socio-eco-

nómico, especialmente en el medio rural. Además del conocimiento del terreno la población local suele tener experiencia en trabajos que requieren actuaciones similares a las de restauración de humedales, y son parte del contexto social lo cual es muy positivo para que el desarrollo tenga perspectivas a largo plazo.

En este Manual no tratamos de la parte económica de la ejecución de proyectos de restauración o construcción de humedales, ni siquiera de la parte económica de la redacción de proyectos, más allá de dar algunos consejos basados en la experiencia propia. Este Manual se limita a los aspectos científico-técnicos de la restauración y creación de humedales, pero se recuerda que la integración de éstos con los aspectos económicos y sociales es fundamental para el éxito de la restauración de ecosistemas.

2

Bases científico-técnicas

2.1. INTRODUCCIÓN

La planificación y realización de un proyecto de restauración ecológica requiere conocimiento técnico y fundamentos científicos. Todavía, la práctica de la restauración ecológica va por delante de la teoría, en el sentido de que se realizan más acciones (en muchos casos llamados proyectos) de restauración de ecosistemas degradados sin fundamentos ni técnicas testadas, ni siquiera bien planificados ni con un proyecto ejecutivo previo que proyectos basados en teorías y directrices provenientes de la experimentación y de técnicas bien testadas. Es más, la mayoría de las acciones o proyectos de restauración se llevan a cabo sin la monitorización de los resultados para comprobar los resultados de las acciones realizadas. De modo que no se puede evaluar el grado de consecución de los objetivos, si estaban definidos, ni corregir los defectos o resultados no satisfactorios.

Respecto a restauración de humedales es frecuente utilizar una aproximación simplista dirigida a recuperar un aspecto funcional o estructural sin considerar el conjunto de interacciones del ecosistema ni de los factores que las regulan. Por esto, conviene relatar algunos de los fundamentos científicos básicos del funcionamiento ecológico de los humedales para tenerlos presentes en su realización y reseñar los pasos fundamentales a seguir en la planificación y ejecución de proyectos de restauración de humedales, cualesquiera que sean los objetivos de los mismos. Porque, aunque cada humedal y cada proyecto de restauración de humedales tenga aspectos específicos que requieren un conocimiento y tratamiento propio, existen generalizaciones ya establecidas como directrices o teoría de la ecología de la restauración que deben atenderse si se quiere realizar el proyecto con un mínimo de garantías de éxito y, por lo menos, de conocimiento de porqué la trayectoria y los resultados de la restauración son los que se observan.

Entre los documentos (textos, manuales, guías) que tratan sobre la restauración de humedales pueden destacarse Mitsch & Jorgensen (2004) y Eades *et al.* (2005). Se han publicados numerosos documentos, textos y manuales sobre restauración de muchos tipos de humedales fácilmente asequibles a través de la world wide web (www). Esto da idea de la especificidad y la especialización que requiere la restauración según el tipo de humedal que se trate. De igual manera es recomendable conocer las directrices y fundamentos de la restauración de ecosistemas en general que pueden encontrarse en diversos documentos (Perrow & Davy 2002; SER Primer 2004, Howell *et al.* 2012).

2.2. RESTAURACIÓN Y CREACIÓN DE HUMEDALES

Recuperar mediante proyectos de restauración las funciones que cumplen y los valores que aportan a un territorio los humedales puede ser en sí mismo un objetivo. Debido a que muchos humedales se han perdido y no se pueden recuperar, la creación de humedales (construir humedales en sitios en los que no habían existido antes) es una alternativa que contribuye a ese objetivo.

CONCEPTO 2.1.

Restauración versus creación de humedales

La **restauración** de un humedal trata de mejorar las características ecológicas de un ecosistema que está degradado. La **creación** de humedales consiste en construir humedales en sitios en los que nunca antes existieron.

Así **restaurar humedales** debe hacerse con arreglo a una referencia real o virtual de las características del humedal que se va a restaurar y aprovechando o corrigiendo las características existentes. Por ejemplo, en el lugar de un humedal que fue completamente desecado y el sitio usado para otros usos pueden quedar restos de las características del suelo o sedimento (por ej., contenido en materia orgánica y minerales del sedimento; restos de organismos, plantas y animales, que habitaron el humedal) y esto puede servir de guía para definir las características del sitio que se va a restaurar.

La **creación de humedales** puede hacerse con referencia a otros existentes de forma natural, pero no necesariamente han de tener sus características, aunque es conveniente que sus componentes y funciones estén acordes con el entorno físico y biogeográfico en el que se crea el humedal. **Humedales contruidos** es un término que se suele usar para humedales con funciones y componentes regulados y artificialmente dispuestos. Es decir, suelen construirse con una finalidad muy concreta (por ej., tratar aguas residuales para mejorar su calidad) y con elementos artificiales (por ej., tuberías para regular flujos de agua, suelo como base de la vegetación, islas para albergar animales) o dispuestos de forma no natural (por ej., plantas dispuestas regularmente sobre el suelo, diques para limitar y regular flujo del agua).

Rasgos hidrogeomorfológicos de los humedales

Los humedales, en comparación con otros ecosistemas acuáticos, tienen una alta relación superficie/volumen. Es decir, la altura media de la columna de agua suele ser pequeña, en muchos casos y/o en gran parte de su extensión inferior a 1 m. El principal rasgo distintivo de los humedales es que todas sus características fluctúan a lo largo del tiempo. Y de manera especial lo hace la superficie cubierta por agua; y con ella, la profundidad del agua. En zonas con climas áridos y semiá-

ridos, los humedales suelen fluctuar y pasar por periodos (dentro de un año y entre años) sin agua libre o, de otra manera, con el nivel del agua por debajo de la superficie del suelo o sedimento. De hecho, en la mayoría de los humedales, el nivel del agua refleja el nivel de su acuífero de influencia.

Morfología del humedal

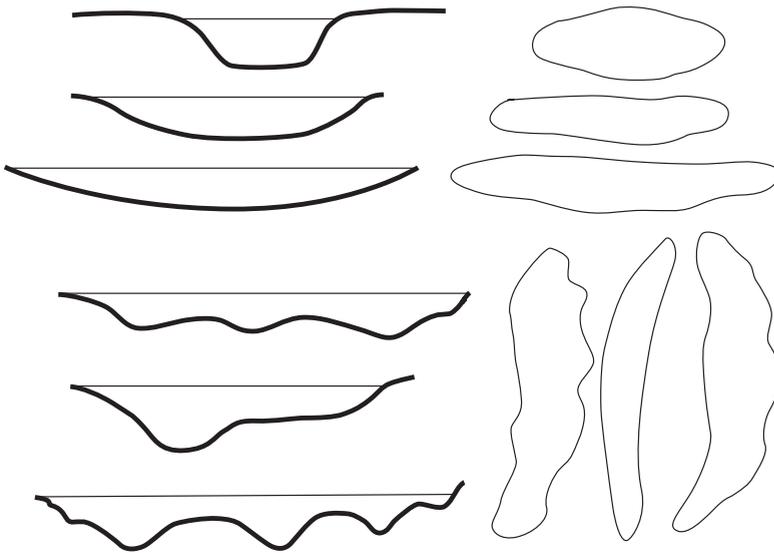
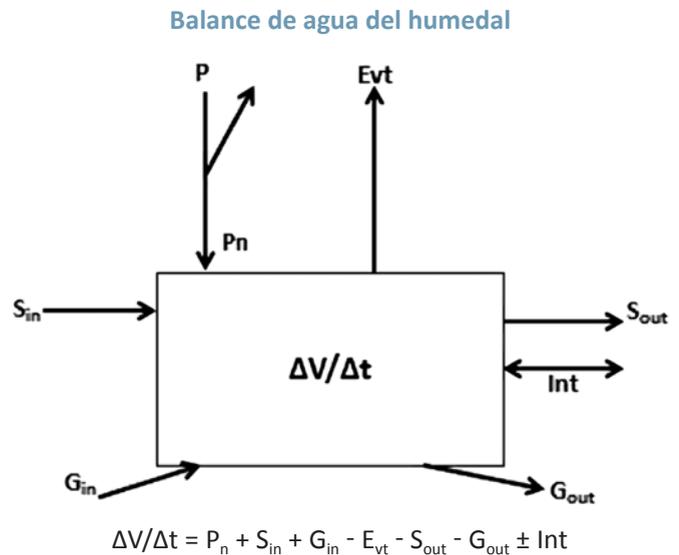


Fig. 2.1. Vista en perfil transversal (izquierda) y en planta (derecha) de varias morfologías de humedales que pueden albergar en un momento dado el mismo volumen de agua.

Los humedales tienen la mayor parte de su extensión con características similares, son muy homogéneos observados a gran escala. Pero tiene zonas que contrastan en todas sus características. Por ejemplo, cerca de las orillas la altura de la columna de agua disminuye y puede haber grandes playas. Además, en diferentes zonas del humedal puede haber partes con mayor profundidad, aunque no excesivamente, que en otras.

El factor principal para el funcionamiento ecológico de un humedal, que sustenta cualquier aproximación a usarlo o gestionarlo, es su hidrología. Los flujos de agua a través de un humedal, que son resultado del balance de entradas y salidas de agua, determinan todas las características del humedal y, especialmente, su evolución temporal a largo plazo. Los cambios en las entradas y salidas de agua durante diferentes periodos de tiempo definen sus variaciones temporales. Mientras se mantienen más o menos similares los factores reguladores externos

Fig. 2.2. La variación del volumen de agua en el humedal en un periodo de tiempo determinado es el balance entre las entradas (Precipitación neta sobre el humedal, entrada de agua superficial y subterránea) y las salidas de agua (Evapotranspiración, Salida de agua superficial y subterránea). El término Int se refiere a los intercambios de agua entre el humedal y otro sistema acuático con el que esté conectado hídricamente.



Tipos de hidroperíodo de los humedales

Nivel del agua

Área

Volumen

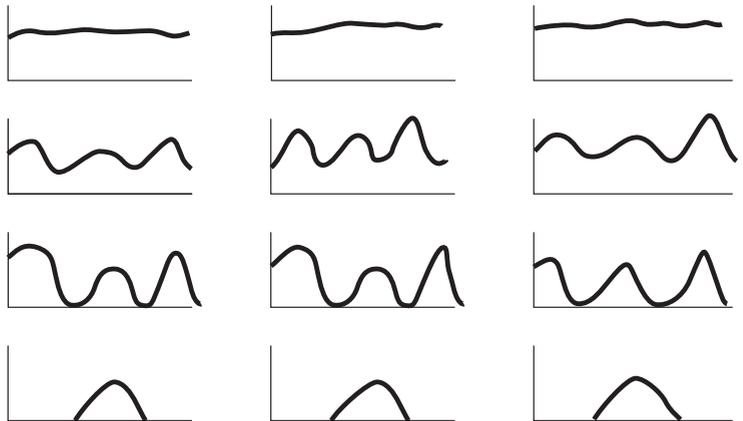


Fig. 2.3. Tipos de hidroperíodo ideales en distintos humedales definidos por la fluctuación del nivel del agua, área inundada y volumen de agua superficial en el humedal durante tres ciclos hidrológicos anuales.

(climatología, entradas y salidas de agua) el hidroperiodo (variación temporal del nivel o volumen de agua del humedal) del humedal no experimentará desviaciones de su patrón.

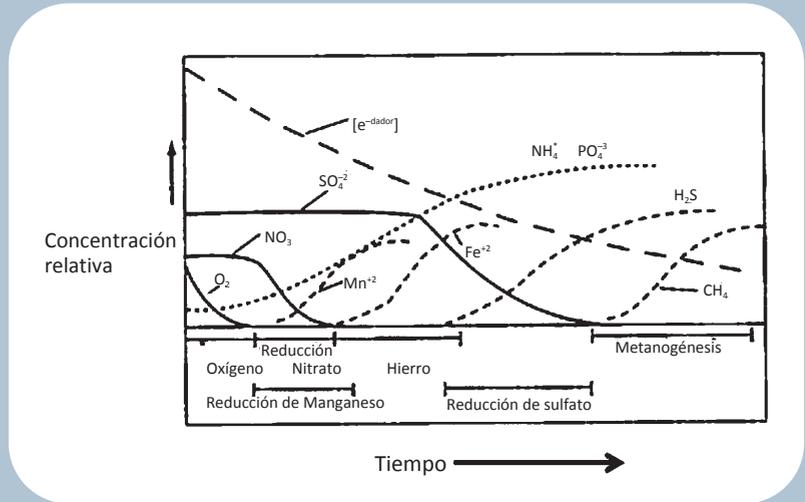
Según el tipo de humedal y su ubicación así será su hidroperiodo característico. **Pero es esencial definir el hidroperiodo, y por tanto las áreas inundables, cuando se hace el plan de restauración o se crea un humedal** para marcar el tipo de fluctuación temporal del nivel y volumen de agua que se establece, en función del cual variarán todas las demás características del humedal.

2.3. PROCESOS BIOGEOQUÍMICOS

La heterogeneidad en los humedales es notable tanto en sentido vertical como en sentido horizontal pero de diferentes características. Uno de los aspectos biogeoquímicos esenciales de los humedales es el gradiente de óxido-reducción que se establece en sentido vertical desde la superficie del agua, con abundante oxígeno disuelto debido al intercambio con la atmósfera y un balance positivo entre producción primaria y respiración, hasta varios centímetros por debajo de la superficie del sedimento en los humedales con abundante materia orgánica en el sedimento, que consume la capacidad oxidante y puede llegar a dar formas reducidas de compuestos de azufre y carbono. El potencial de óxido-reducción es la variable que mejor sintetiza este gradiente y se puede medir con un sencillo equipo. El ambiente reductor pueden extenderse a la columna de agua si el sedimento del humedal contiene gran cantidad de materia orgánica (tiene condiciones muy reductoras) y la columna de agua permanece estancada, aunque en un humedal mínimamente en buen estado (con buen flujo de agua y sin gran acumulación de material vegetal en descomposición) la columna de agua estará bien oxigenada por ser muy fácil e intenso el paso de oxígeno de la atmósfera al agua y de los gases producidos durante la descomposición de la materia orgánica al aire. No obstante, aún en humedales que, en conjunto tengan flujos de agua intensos, puede haber zonas con agua relativamente estancada en las que se acumulen restos de material vegetal en descomposición en gran cantidad en las que, si el sedimento es rico en materia orgánica, la columna de agua puede mostrar baja concentración de oxígeno disuelto.

Como los humedales son sistemas muy dinámicos debe tenerse en cuenta las variaciones temporales (en corto plazo, de pocas horas a varios días) que suelen ocurrir en las características del agua intersticial del sedimento de los humedales al inundarse o durante el periodo de temperatura más alta que coincide con menos flujos de agua y más alta producción vegetal y acumulación de ésta en y sobre la superficie del sedimento, lo cual es habitual en muchos humedales (Fig 2.4).

Fig. 2.4. Variación temporal de la concentración relativa de diferentes iones disueltos en el agua al inundarse un humedal (Modificada de Mitsch&Gosselink 2007).



Es muy recomendable conocer bien las peculiaridades de los ciclos biogeoquímicos de los elementos más relevantes, porque las características ecológicas de los humedales están determinadas por las fases y los procesos de estos ciclos (Fig. 2.5).

Estas variaciones alternarán a lo largo del tiempo según ocurran periodos con sedimento inundado y periodos sin inundación. En humedales con suelos minerales, con poca cantidad de materia orgánica, el suelo y la columna de agua permanecerán con oxígeno y no se darán estos fenómenos. No obstante partes diferentes de un humedal pueden tener características y comportamientos diferentes. Por ejemplo, en zonas con gran flujo de agua se renovará ésta muy rápidamente y, si proviene de una fuente oxigenada, no ocurrirán estos gradientes; en cambio, zonas con poco flujo de agua, en las que se acumulen restos de vegetación, es muy probable que lleguen a tener aquellas características, que son propias de muchos humedales.

Durante la evolución de un humedal se progresa en la acumulación de materia orgánica en el sedimento y se ponen de manifiesto con más intensidad las características señaladas, llegando incluso la proliferación de la vegetación a regular los flujos de agua internos en el proceso sucesional ideal de un humedal (Fig. 2.6).

No obstante, hay humedales en los que las perturbaciones repetidas (por ejemplo, por oleaje o por inundaciones frecuentes) mantienen sus características en estadios tempranos de baja mineralización y carga orgánica o alternando sus estadios (de más a menos cobertura vegetal y de una red trófica compleja a una más sencilla).

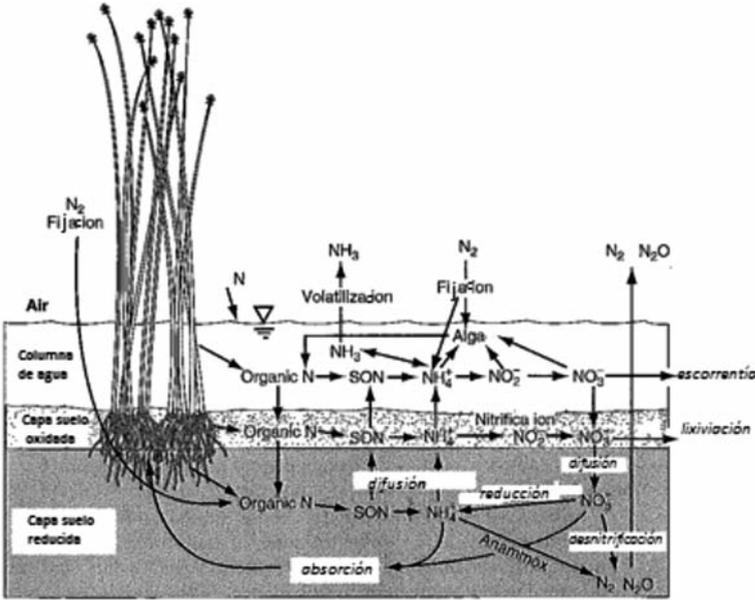


Fig. 2.5. El ciclo del nitrógeno en los humedales (Modificada de Mitsch&Gosselink 2007).

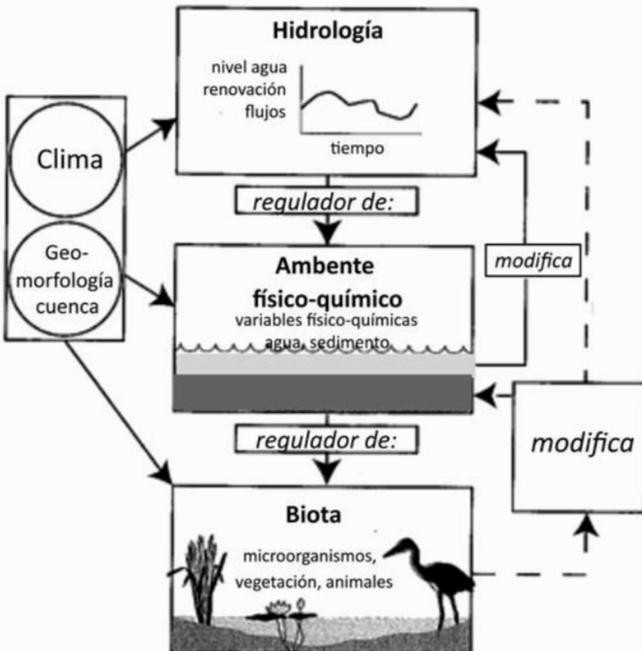


Fig. 2.6. Esquema que muestra las interacciones entre la hidrología y la influencia de los factores bióticos en la ecología de los humedales (Modificada de Mitsch&Gosselink 2007).

2.4. DISTRIBUCIÓN DE LA VEGETACIÓN

La distribución de la vegetación en los humedales responde a sus adaptaciones ecofisiológicas a las condiciones ambientales de los hábitats en los que viven. Así, puede haber un gradiente desde la orilla hacia las partes más profundas del humedal de las diferentes especies de plantas enraizadas emergentes en función de su capacidad para resistir la inundación. Las especies flotantes dominarán en zonas de aguas tranquilas, a resguardo de excesivo flujo de agua y libres de sombra. Y las plantas sumergidas enraizadas se encontrarán en zonas del humedal con suficiente transparencia de agua. La presencia de abundantes masas de algas filamentosas o de fitoplancton (que da una coloración verdosa o marronosa al agua) es característica de aguas eutrofizadas (con exceso de nutrientes en el agua respecto a la capacidad del humedal de asimilarlos y procesarlos).

Aunque es común que grandes proporciones del área de un humedal tengan una cobertura homogénea de vegetación, es también usual que en todo humedal haya zonas con diferente cobertura por la vegetación superior (emergente, flotante —enraizada o no—, y sumergida) correspondiendo a diferentes características del sedimento y de los flujos de agua. Esta heterogeneidad es un seguro para la posible evolución hidrogeomorfológica del humedal; de manera que ante cambios notables de la morfología del humedal ya tendría un reservorio de poblaciones vegetales, y de la comunidad biológica en general, para colonizar y mantener la producción primaria que es base de la red trófica del humedal, directamente o por la vía de la descomposición del material vegetal, y aporta hábitats esenciales por su extensión y diversidad al conjunto del humedal.

2.5. RED TRÓFICA

Las redes tróficas de los humedales son muy diferentes según el tipo de humedal. Desde las más sencillas en humedales salinos, con apenas 3-5 niveles tróficos y una conectividad trófica (número de taxones conectados tróficamente/número de conexiones tróficas posibles) alta, hasta las de humedales con gran heterogeneidad espacial en las que hay desde descomponedores (hongos, bacterias, insectos) en ambientes oxidados y reducidos hasta grandes mamíferos y abundantes y diversas poblaciones de peces y aves, un número grande de niveles tróficos y una conectividad trófica baja.

Durante el periodo de tiempo posterior a las obras de restauración, la red trófica puede seguir una trayectoria más o menos definida hacia la de un humedal de referencia establecido o puede mostrar variaciones entre estadios alternantes asociados, lo cual está asociado a la variabilidad de los factores reguladores externos, baja en el primer caso y alta en el segundo.

Una de las cuestiones esenciales en restauración es si se debe dejar que la comunidad biológica colonice y progrese espontáneamente (restauración pasiva) o se debe dirigir la recuperación de la red trófica mediante el establecimiento inicial durante las obras de una estructura trófica más o menos densa (restauración activa). No hay una respuesta única. En el caso de la restauración de humedales muy extensos y/o con gran conectividad hídrica con otros ecosistemas y factores reguladores (por ej., llanuras de inundación en un río, marismas costeras) puede dejarse a la colonización y desarrollo espontáneo el progreso de la estructura biológica, siempre que la conectividad mantenga un alto grado de naturalidad; es decir, que las entradas y salidas de agua al humedal mantengan un régimen asociado a la variabilidad natural de los fenómenos reguladores externos. Si los factores reguladores externos (por ej., las crecidas o flujos de agua de los ríos o las variaciones del nivel del agua de los acuíferos que regulan la inundación de un humedal) están desviados de su variabilidad natural, el proyecto de restauración debe plantearse las condiciones y el grado en que puede recuperarse su hidroperiodo característico. Si éste se recupera, será probable recuperar el conjunto de características del humedal. Si no se recupera el hidroperiodo del humedal, es muy probable que se favorezcan algunas de sus características funcionales y componentes de su estructura biológica desfavoreciendo otras y también afecten a procesos biogeoquímicos forzando el funcionamiento ecológico general, provocando situaciones de tensión y desviando el humedal de sus características típicas, que pueden requerir intervenciones continuadas para corregir estas situaciones. Incluso pueden llevar al humedal a una situación fuera del rango de variabilidad de sus características y situarlo por fuera del umbral de variabilidad; es decir, en otro tipo de humedal diferente del objetivo de la restauración.

La facilidad para que se recupere la comunidad biológica mediante una colonización espontánea o interviniendo activamente, combinado con la urgencia en tener resultados, y los costes de restauración son determinantes en la estrategia de restauración a plantear. Se ha de recordar que alcanzar estructuras de las comunidades biológicas similares a las de humedales de referencia en buen estado puede tardar más de 30 años, sobre todo en humedales extensos (de más de 50 has) y en climas fríos. En humedales poco extensos y/o en climas cálidos la recuperación de las comunidades biológicas es más rápida (Moreno-Mateos *et al.* 2012).

En el caso de restaurar o crear humedales con un objetivo solo bien definido o con un objetivo prioritario, y si son de pequeño tamaño (de menos de 10 has), es conveniente establecer una colonia inicial de la comunidad biológica (generalmente con la vegetación suficiente a no ser que el objetivo sea recuperar la red trófica completa o alguna especie animal concreta) dirigida a la optimización del objetivo definido en el menor tiempo posible. En este caso la homogeneidad del humedal favorecerá la consecución del objetivo establecido. En contraste, en el caso de tener varios o múltiples objetivos con la restauración, y ninguno clara-

mente destacado, la heterogeneidad del humedal favorecerá la provisión de varios microhábitats y la estabilidad dinámica de la red trófica frente a variaciones de factores externos reguladores y frente a la alternancia de estadios tróficos propia de la dinámica interna del humedal.

CONCEPTO 2.2.

Restauración ecológica

La restauración ecológica tiene como objetivo y seña de identidad tratar la recuperación de ecosistemas. No trata solamente de recuperar las características del suelo o del agua, o algún aspecto físico de un sitio degradado, ni alguna población o parte de la comunidad biológica de interés. Su rasgo más distintivo es que su objetivo es recuperar el conjunto del ecosistema, el complejo de interacciones entre la comunidad biológica en su conjunto y los componentes abióticos. Por esto se enfoca más a recuperar hábitats y procesos hidrogeomorfológicos y biogeoquímicos y, como consecuencia, la red trófica que vive y contribuye a ellos. Es muy recomendable leer SER Primer (2004) para planificar y ejecutar un proyecto de restauración ecológica.

2.6. RESTAURACIÓN DE UN CONJUNTO DE HUMEDALES EN UNA CUENCA HIDROGRÁFICA

La diferencia entre planificar y ejecutar la restauración de humedales en un territorio sin delimitación orográfica y en una cuenca hidrográfica reside en que los límites del territorio no están definidos por los flujos de agua en el primer caso, por lo que la restauración de humedales con fines de recuperar o mejorar aspectos ligados a los flujos de agua (por ej., mejorar la calidad del agua) no se puede alcanzar en conjunto y se han de abordar por zonas. Así, restaurar y/o crear un conjunto de humedales en una cuenca hidrográfica es la mejor opción de restauración que puede llevarse a cabo a esta escala espacial con diversos objetivos porque es a la escala de cuenca hidrográfica donde ocurren con más intensidad las interacciones entre partes de un territorio, entre ecosistemas acuáticos sobre todo.

Uno de los objetivos de planificar y realizar la restauración de humedales a escala de cuenca hidrográfica puede ser **la mejora de la calidad del agua; otro recuperar y mejorar la biodiversidad; también aumentar la diversidad del paisaje.** Establecer múltiples objetivos al planificar la restauración y/o creación de humedales en una buena estrategia porque no todos ellos se cumplirán al máximo establecido y, de esta manera, se pueden compensar los resultados de unos objetivos con los de otros. No obstante, establecer prioridades en cuanto a los objetivos

ayudará a la planificación, el diseño y la ejecución de la restauración y construcción de los humedales. Por esto se recomienda establecer un objetivo como prioritario. La restauración y creación de humedales a escala de cuenca permite combinar varios objetivos, porque unos humedales se pueden dirigir preferentemente a optimizar un objetivo y otros a objetivos diferentes.

CONCEPTO 2.3.

Cobertura y uso del suelo, y diversidad del paisaje

Equivalentes a la acepción en inglés de *land cover* y *land use*, la cobertura y el uso del suelo son dos conceptos muy utilizados en la práctica en trabajos de análisis y planificación territorial y de Ecología en general. **Cobertura del suelo** se refiere al tipo de estructura o formación física ocupando un área de superficie terrestre, incluye la acuática, (por ej., cultivo agrícola, humedal costero de aguas permanentes) y **uso del suelo** se refiere al tratamiento o uso específico que se hace de un espacio de la superficie terrestre (por ej., un cultivo agrícola de regadío y con fertilización nitrogenada inorgánica o un cultivo agrícola sin riego y con fertilización orgánica proveniente de purines; humedal costero con agua de 12-45 mS/cm de conductividad y manejado para evitar entradas de agua dulce superficial continental durante mayo-octubre y con rango de fluctuación anual de 60 a 150 cm directamente relacionado con altura del nivel del mar a escala anual y la amplitud de mareas a escala mensual y diaria, y con extracción activa de pesca (peces y crustáceos). Los tipos de cobertura y de usos del suelo se definen particularmente para cada caso de estudio en función de los objetivos y la capacidad de resolución. Dos son las aproximaciones complementarias más usuales a reconocer la cobertura del suelo: inspecciones sobre el terreno y la observación con imágenes de percepción remota. Respecto a los usos del suelo, la realización de encuestas y el análisis de bases de datos se hacen necesarios como complemento a las dos anteriores para una buena clasificación de usos del suelo de un territorio o área de trabajo. Sobre los datos de cobertura del suelo se puede estimar la **diversidad del paisaje** de un territorio o zona de interés aplicando varios índices a los datos de áreas de los diferentes tipos de coberturas de suelo definidos. Uno de los más sencillos, que se suele llamar diversidad de hábitats, es el mismo índice de diversidad específica de Shannon utilizado en Ecología, sustituyendo la abundancia de las diferentes especies por las áreas de los diferentes tipos de cobertura del suelo ($-\sum_{i=1}^c p_i \ln p_i$; siendo $p_i = a_i/A_t$, a_i es el área ocupada por el tipo de cobertura del suelo i , y A_t es el área total de la zona de interés o suma de las áreas de todos los tipos de cobertura; y c es el número de tipos de cobertura del suelo). La diversidad de paisaje es un concepto con múltiples aplicaciones que requiere la utilización de diferentes métricas (por ej., densidad de parches, márgenes) para su estimación, interpretación y aplicación a diferentes escalas espaciales (tanto del área de interés como del área de observación, "pixel") y, sobre todo, con el sentido dinámico que tiene el territorio y el paisaje. Para una profundización en el tema se puede consultar la revista *Landscape Ecology* y diversos libros con similares palabras clave en sus títulos y contenidos.

2.7. RESTAURACIÓN Y CREACIÓN DE HUMEDALES A ESCALA CONTINENTAL Y GLOBAL

Además de recuperar humedales frente a la pérdida global de extensión que ha ocurrido durante el último siglo, existen otras razones y objetivos para restaurar y/o crear humedales a escala espacial mayor que la de cuenca hidrográfica o la de un territorio con características geográficas más o menos comunes, incluso mayor que a la escala administrativa de un país, estado o nación. El ejemplo de Ducks Unlimited patrocinando la conservación y restauración de humedales en Canadá, Estados Unidos de América y los Estados Unidos Mexicanos, favorece la disponibilidad de hábitats de humedales para las poblaciones de aves que migran entre estos 3 países, aunque pueda haber aspectos éticamente controvertidos como que estas acciones también se realizan para favorecer la persistencia de aves para mantener la actividad de caza de aves acuáticas.

Otros ejemplos de iniciativas, desarrolladas con más o menos éxito, para conservar y recuperar humedales a escala continental y global (por ej., manglares, estanques) también son ejemplos de propuestas y acciones de restauración a escala mayor que la de cuenca hidrográfica. El papel de los humedales como acumuladores de carbono y, consecuentemente, su contribución a reducir la emisión de gases de efecto invernadero y, con ello, a reducir impactos derivados del cambio climático, es un buen argumento para realizar la restauración de humedales globalmente (sobre todo de los grandes depositarios de carbono y a largo plazo, como turberas y manglares). Pero también la restauración a escala global de humedales tendría base sobre el argumento de mantener y mejorar la biodiversidad, porque son excelentes reservorios de biodiversidad por todo el mundo. En cualquier caso, debe evitarse realizar restauraciones enfocadas a un objetivo que puedan afectar negativamente a las características intrínsecas de un humedal o conjunto de ellos, y a los servicios que proporcionan. Por ejemplo, con frecuencia y con perspectiva limitada se ejecutan acciones de conservación o restauración de humedales para mantener una lámina de agua más o menos estable y favorecer con ello algunas poblaciones animales, sin tener en cuenta las fluctuaciones necesarias de todo humedal a lo largo del tiempo para manifestar toda su complejidad y la provisión de los servicios que conlleva.

2.8. LA INTEGRACIÓN DE ASPECTOS CIENTÍFICO-TÉCNICOS, SOCIALES Y ECONÓMICOS

Desde hace tiempo, existe una opinión generalizada que aconseja que las acciones técnicas de restauración, en general, se integren con aspectos sociales y económicos de modo que se asegure la participación, o al menos la buena dispo-

sición, de la población, especialmente la local y próxima a los sitios de actuación; y también la eficiencia económica que no solamente es el balance resultados/coste de la restauración y creación de humedales, sino también la del rendimiento de las acciones realizadas y sus resultados en términos de repercusión no contable al bienestar y desarrollo, especialmente local (Comín *et al.* 2005).

En este sentido, cuanto antes en el desarrollo de un proyecto se establezca esta integración de aspectos mejor para asegurar la eficacia en la consecución de objetivos. No obstante, cada proyecto de restauración tiene aspectos peculiares que pueden requerir o no los mismos pasos. A modo de orientación, si existen unos cuantos pasos que deben considerarse antes, durante y después de la realización de un proyecto de restauración cualesquiera que sean los objetivos y la escala espacial a la que se refiera (Fig. 2.7). La primera consideración que debe hacerse al plantearse un proyecto de restauración en general es la opción cero. Es decir, debe plantearse si estamos en condiciones de realizar el proyecto. Las condiciones mínimas para realizar un proyecto de restauración de un ecosistema son: que se disponga de la suficiente capacidad científica y técnica para realizarlo, desde la redacción del proyecto a la ejecución material y el seguimiento del mismo; que haya la necesaria aceptación social para que su realización transcurra sin dificultades; y que se disponga del presupuesto suficiente para su ejecución. En muchos casos no se cumplen estas condiciones y, entonces, es conveniente reunir primero las condiciones mínimas antes de iniciar la fase de ejecución. También se puede desglosar el proyecto en fases sucesivas o planificar por fases de modo que, aun contando con una planificación completa se pueda ejecutar por fases.

Un proyecto de restauración puede requerir, por las circunstancias del sitio o tipo de ecosistema o de las acciones que se puedan plantear para su realización, la realización de fases previas a su ejecución completa. Así, por ejemplo, la modificación de las orillas de un río puede requerir pruebas de carga de la maquinaria a utilizar o la revegetación de un lugar de un ecosistema puede requerir pruebas de adaptación de la vegetación. O se dispone de esta información previamente o se tendrá que improvisar sobre la realización del proyecto, lo cual en este caso significa en la redacción del mismo. De igual modo, si el grado de consecución de objetivos es insuficiente, será necesario conocer las causas y modificar las acciones realizadas o volverlas a ejecutar, en una fase avanzada de realización del proyecto, lo cual puede requerir modificar el proyecto original o introducir variaciones en el mismo. De aquí la importancia de observar detenidamente las prescripciones administrativas y técnicas que afectan al proyecto para poder realizarlo de acuerdo a las mismas. Entre estas deberán figurar, o estarán implícitas, la observación de las leyes y reglamentaciones de carácter general y las de carácter específico de la entidad administrativa en la que se realiza el proyecto. Es necesario respetarlas y atenerse a ellas en la planificación del proyecto para que su ejecución transcurra sin afecciones por estos motivos.

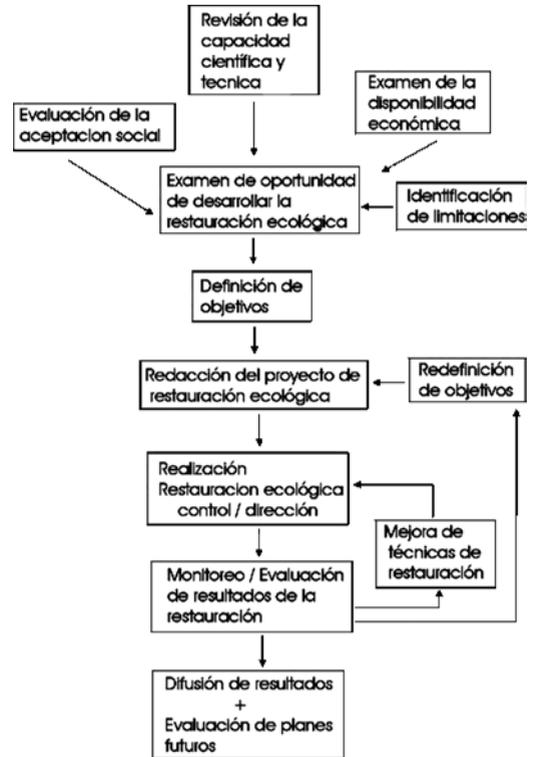


Fig. 2.7. Esquema con los pasos básicos necesarios para planificar y ejecutar un proyecto de restauración ecológica (De Comín *et al.* 2005).

Respecto a la escala temporal en la que se manifiestan los resultados de las acciones de restauración de humedales, conviene recordar que las posibles variables indicadoras de la restauración (físicas, químicas, biológicas) tienen tiempos de respuesta diferentes a las acciones de restauración (Moreno-Mateos *et al.* 2012).

Así, variables relacionadas con la hidrología (por ej.: caudal y régimen de caudal; porcentaje de agua fluyendo por vía superficial y subterránea, tiempo de residencia del agua) pueden mostrar una respuesta rápida (1 a 5 años) y valores similares a los anteriores a la degradación del ecosistema o al ecosistema de referencia. En cambio en lo relativo a estructura de comunidades, el tiempo de evidencias positivas de recuperación puede ser de hasta 30 o más años. Por lo que una buena elección de indicadores y la correcta interpretación de los resultados será clave para explicar y evaluar los resultados de la restauración.

Así, es obvio que los proyectos de restauración deben incluir una parte de **seguimiento de los resultados de las acciones realizadas**. Es decir, de evaluación del grado de éxito de la restauración. Y esto supone medir una serie de variables indicadoras de la recuperación del ecosistema en comparación con otro de referencia en buen estado y otro en estado degradado o del mismo antes de la restauración, si lo anterior no es posible. En cualquier caso el proyecto redactado debería incluir los objetivos cuantitativos o semicuantitativos (comparativos respecto a ecosistemas de referencia). Y un programa de seguimiento especificando además de las variables indicadoras, que deben considerar un mínimo de los aspectos funcionales y estructurales del ecosistema, los métodos de monitoreo de las diferentes variables y de elaboración de los resultados. Aunque la rigidez de los procedimientos de contratación y administrativos no permite en muchas ocasiones incluir en los proyectos de restauración acciones de seguimiento, porque éstas sobrepasan en el tiempo la fecha de finalización de las acciones de restauración, si es posible añadir cláusulas o programas de acompañamiento paralelos que lo faciliten. En cualquier caso, debe quedar claro que es fundamental conocer los resultados de la restauración para corregir durante su realización o después del plazo de finalización con labores de mantenimiento. No quiere decir que será necesario en todos los casos, pero es necesario mantener el monitoreo de lo realizado para confirmar que no son necesarias acciones de corrección o mantenimiento o para demostrar que si son necesarias, cuáles han de ser y en qué deben consistir.



Fig. 2.8. Sección del humedal *in stream* Lalueza en Monegros (Huesca) del Proyecto CREAMAgua. Se aprecia (izda.) uno de los diques recién construidos para ampliar su anchura y aumentar el tiempo de residencia del agua y (dcha.) al cabo de 2 años.

3

**Selección de sitios para
la restauración y creación de
humedales a escala de cuenca**

3.1. INTRODUCCIÓN

No hay un procedimiento único de selección de humedales para restaurar en una cuenca hidrográfica. El procedimiento depende de los objetivos de la restauración. En cualquier caso conviene establecer unos criterios para la selección de sitios, humedales, a restaurar y asignar prioridades teniendo en cuenta el potencial de restauración, que ha de considerar los tres aspectos indicados anteriormente científico-técnicos, sociales y económicos.

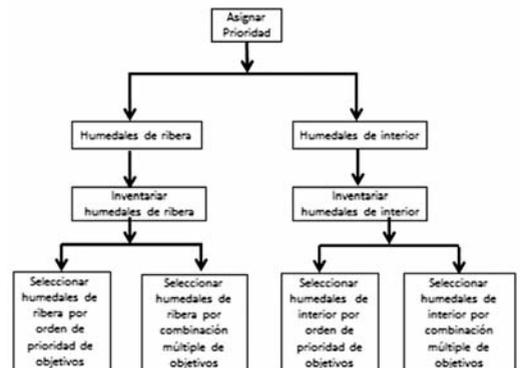
3.2. PASOS A SEGUIR EN LA SELECCIÓN DE SITIOS PARA LA RESTAURACIÓN DE HUMEDALES A ESCALA DE CUENCA

Los proyectos de restauración deben tener los objetivos bien definidos porque tanto el diseño de los humedales como la ejecución de las obras están condicionados por los objetivos. Entre los objetivos de restaurar humedales en una cuenca hidrográfica o en un territorio puede estar de forma genérica, y sería deseable, restaurar los humedales degradados y desaparecidos, lo cual lleva implícito y constituye su justificación, la recuperación de la biodiversidad y las múltiples fun-

FICHA 3.1. Pasos generales a seguir en la selección de sitios en los que restaurar humedales en una cuenca hidrográfica. A la derecha detalle de uno de los pasos para asignar prioridades

1. Inventariar y caracterizar los humedales existentes en la actualidad y en el pasado.
2. Identificar y tipificar los humedales que pueden servir como referencias en buen estado.
3. Aplicar un protocolo para establecer prioridades entre los humedales a restaurar y seleccionarlos por el orden de prioridad.*
4. Redactar el proyecto de restauración incluyendo todos los humedales seleccionados y el presupuesto adecuado para todos ellos tomando como modelos los humedales de referencia en buen estado.

*Ejemplo de árbol para asignar prioridades para la selección de tipos de humedales a restaurar en una cuenca hidrográfica



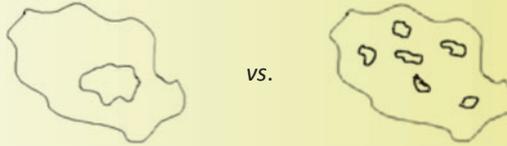
ciones y valores de los humedales. El primer paso a seguir es **identificar los sitios en los que hubo humedales** y que han desaparecido total o parcialmente y **descubrir algunas de sus características anteriores**; y respecto a los degradados **identificar las causas de la degradación**. En ambos casos, ésta información debería

CONCEPTO 3.1.

Un humedal grande solo o varios pequeños (SLOSS-“A single large or several small”)

SLOSS es la abreviatura para referirse a un dilema interesante tratado en la historia de la Ecología. Se refiere a la planificación de la gestión de espacios naturales, y en este caso aplicado a la restauración de humedales en un territorio o cuenca hidrográfica. Su planteamiento se puede simplificar en una pregunta: ¿Qué es más conveniente para recuperar o aportar las funciones de los humedales a un territorio: restaurar o crear un humedal grande solo, extenso, o restaurar y/o crear varios humedales pequeños?

Una forma sencilla de representar gráficamente este dilema es la siguiente:



La respuesta a esta cuestión planteada así en general y como alternativa entre dos situaciones, sin referencia a un territorio o cuenca concretos, no es única, como para tantas otras cuestiones. Y dado que los humedales tienen múltiples funciones y valores, para que se expresen todos ellos con su máxima capacidad la mejor respuesta es la representada esquemáticamente en la siguiente figura y que no es ninguna de las alternativas de la pregunta: restaurar un humedal relativamente grande y varios pequeños, que pueden o no estar conectados hidrológicamente por vía superficial o subterránea.



Este diseño de la distribución espacial de la restauración de humedales en una cuenca hidrográfica permite distribuir los humedales por el territorio de acuerdo a las funciones que se quieran optimizar en diferentes zonas y mantener una red de comunicación —conectividad— entre organismos (por ejemplo, aves) que requieran o tengan distintas querencias y entre humedales que pueden tener hábitats similares o no.

permitir trazar las características generales o esenciales del funcionamiento y estructura del humedal en cuestión o de cada uno de los humedales a restaurar y evaluar en qué grado se pueden recuperar los factores que regulan su funcionamiento y el potencial para recuperar su estructura física y biológica y sus características químicas.

Debe tenerse en cuenta ante todo que, en la mayoría de los casos, las causas de degradación de los humedales están situadas fuera de los humedales. Se trata, entre otras causas, de alteraciones de los flujos de agua superficial o subterránea que llegan a los humedales, descargas de contaminantes a los flujos que llegan a los humedales, cambios en la cobertura o los usos del suelo en la cuenca del humedal que influyen en las descargas de agua y compuestos en suspensión o disueltos, extracción de agua del acuífero del propio humedal o acuífero inmediato conectado al del humedal, por ejemplo. Y que la restauración del humedal ha de consistir como medida principal en reparar, corregir o eliminar la causa de la degradación. De otro modo, si solo se actuara corrigiendo los efectos en el mismo humedal, se estaría interviniendo solamente sobre los impactos o síntomas de la degradación pero no en la causa, el problema no se solucionaría y la restauración no tendría éxito porque la causa de la degradación seguiría persistiendo.

En una cuenca hidrográfica deben distinguirse los humedales de ribera, situados en los márgenes de los ríos y conectados hídricamente con el cauce del río. Son mayoritariamente zonas inundables por las crecidas de los ríos y pueden incluir diversos tipos de hábitats más o menos interconectados por flujos de agua entre sí y con el río, superficial y/o subterráneamente. Además puede haber en estas zonas inundables, algunas fuentes o cuerpos de agua con descarga de agua superficial o subterránea de los márgenes de la cuenca que pueden tener más o menos conexión temporal con el acuífero aluvial.



Fig. 3.1. Ejemplo de márgenes de un río sin conectividad hídrica ni de hábitats (izda.) y de márgenes de un río con conectividad longitudinal y transversal pero escasa conectividad vertical (centro). Formación de un galacho ("ox-bow lake") por apertura de un nuevo cauce (dcha.)

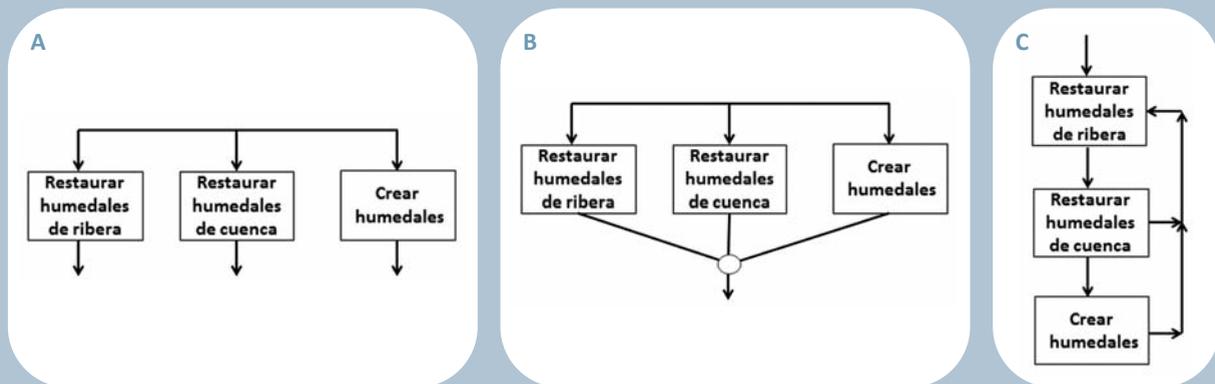


Fig. 3.2. Tres esquemas de procesos alternativos de toma de decisiones para seleccionar tipos generales de humedales a restaurar en una cuenca hidrográfica. A) Restauración de un tipo de humedales solamente: Se asigna un valor de prioridad para cada uno de los tipos de humedales evaluando criterios de interés para la restauración, y se selecciona uno de los tipos de humedales como prioritario, a continuación se asignan prioridades a los humedales de este mismo tipo para establecer un orden de restauración entre éstos; B) Restauración de un conjunto variado de tipos de humedales: si los valores asignados a los tres tipos de humedales son similares, se establece una combinación de los tres tipos de humedales como prioridad para la restauración; C) Se decide restaurar un número similar de humedales de cada tipo: se establece como prioridad empezar por un humedal de un tipo, seguir por otro y por un humedal del tercer tipo y comenzar de nuevo por este orden; o intercalar humedales de diferente tipo según las prioridades asignadas por la evaluación de criterios.

En este tipo de humedales, la principal característica que debe mantenerse para obtener una restauración ecológica es la conectividad de los hábitats con el río. Y esta conectividad o continuidad de los hábitats se ha de contemplar y restaurar en 4 dimensiones: las 3 del espacio —longitudinal, lateral y vertical— y los cambios a lo largo del tiempo como cuarta dimensión. Esta última es muy relevante ya que significa mantener la dinámica espacio-temporal de sedimentación en unas partes de las zonas inundables y de erosión en otras zonas con la consiguiente formación de nuevas zonas inundables, incluso con agua permanente (“ox-bow lakes” o galachos) si es el caso.

En áreas de la cuenca no contiguas al río ni conectadas hídricamente con el acuífero aluvial, se ha de distinguir entre los humedales ya existentes pero en condiciones degradadas y los sitios en los que hubo humedales pero ya no se perciben o escasamente signos externos de su existencia. En este último caso el espacio puede estar ocupado por otros usos, por lo que una primera decisión ha de tomarse entre dedicar los esfuerzos a restaurar humedales en un sitio en el que apenas quedan restos de su existencia o a recuperar los humedales degradados.

Una tercera alternativa es crear humedales en un sitio en el que no hubo anteriormente. La decisión final puede ser una de estas alternativas o una combinación de varias de estas alternativas. Tomando como criterio la importancia de los distintos humedales, la decisión puede ser un algoritmo o árbol sucesivo en el que la primera decisión condiciona las siguientes o un algoritmo en paralelo en el que las decisiones se toman por combinación de varios criterios a la vez. Así en el ejemplo anterior, si el primer criterio de selección es restaurar humedales de ribera, se tomará la decisión de restaurar éstos hasta que se acaben las restauraciones en todos los hu-

FICHA 3.2. Ejemplo sencillo de evaluación de humedales para la asignación de prioridades de restauración

Se asignan un peso de 100, 50 y 25 respectivamente a los criterios 1, 2 y 3. Y se asignan puntuaciones a cada una de las posiciones en orden de importancia que pueden ocupar los distintos humedales respecto a cada uno de los criterios 1, 2, 3. Por ejemplo:

Tabla que lista el orden de posición de cada humedal de los existentes en una cuenca hidrográfica en relación con los criterios utilizados en este ejemplo para su evaluación

Criterio	1 (100)	2 (50)	3(25)
Puntuación			
0,4	A	A	W
0,3	D	Z	S
0,1	B	X	X
0,08	X	C	A
0,05	C	D	B
0,03	E	R	F
0,02	Q	F	Q
0,009	F	Y	S
0,006	Y	W	L
0,005	M	N	O

La evaluación resultante en este ejemplo para cada uno de los humedales es:

$$A = (0,4 \times 100) + (0,4 \times 50) + (0,08 \times 25) = 62$$

$$B = (0,1 \times 100) + (0,05 \times 25) = 11,25$$

$$C = (0,05 \times 100) + (0,08 \times 50) = 9$$

$$D = (0,3 \times 100) + (0,05 \times 50) = 32,5$$

$$X = (0,08 \times 100) + (0,1 \times 50) + (0,1 \times 25) = 15,5$$

Así, el orden de prioridad para la restauración de humedales en este ejemplo sería: A-D-X-B-C.

En este ejemplo, como en otros, hay varios puntos críticos: la selección de criterios a evaluar, el peso dado a cada criterio, y la puntuación a asignar a cada humedal por su importancia relativa respecto a cada criterio. Son estos primeros pasos que deben establecerse para priorizar los humedales a restaurar en un territorio o cuenca hidrográfica.

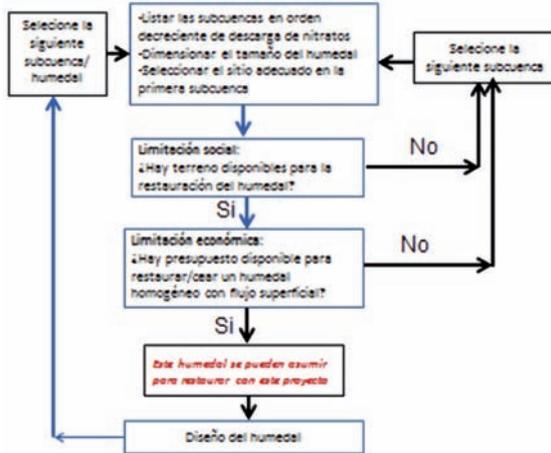
medales de ribera degradados y después de esto se pasará a tomar la decisión de continuar con restaurar humedales de cuenca o de interior como hemos llamado anteriormente. Y así sucesivamente si hubiera otras alternativas.

Entre los criterios que cabe considerar para hacer una evaluación de humedales en función de criterios establecidos para su restauración se pueden listar su papel en la regulación de flujos de agua, la mejora de la calidad del agua, la recuperación de alguna especie de interés, la recuperación de hábitats escasamente representados en el territorio, el potencial del humedal para eliminar algún contaminante, su valor recreativo una vez restaurado. Otras muchas funciones de los humedales, y sus correspondientes valores, pueden ser criterios a evaluar comparativamente entre humedales para establecer un orden de prioridades para su restauración. Y esto puede ser para tipos genéricos de humedales o para humedales de un mismo tipo.

3.3. SELECCIÓN DE HUMEDALES A RESTAURAR EN UNA CUENCA HIDROGRÁFICA PARA LA MEJORA DE LA CALIDAD DEL AGUA

El protocolo desarrollado durante el Proyecto Life CREAMAgua es un modelo real útil para aplicar en cuencas semiáridas con el objetivo de mejorar la calidad del agua a escala de cuenca. Se aplicó a la cuenca del río Flumen (1430 km², Huesca, NE España) que tiene un uso mayoritario agrícola de regadío intensivo en gran parte de la cuenca y en la cual se produce una escorrentía importante de contaminantes con las aguas excedentes del riego que son drenadas por barrancos o arroyos (azarbes en la región) al cauce del río Flumen. El objetivo que se planteó con el proyecto fue la **restauración de humedales a escala de la cuenca hidrográfica del río Flumen para mejorar la calidad del agua de la cuenca en general**. El protocolo establecido incluye aspectos científico-técnicos, sociales y económicos para la selección de sitios a restaurar. La consideración de aspectos económicos es importante porque cualquier proyecto de restauración tiene o debe tener un presupuesto y con el mismo presupuesto se pueden restaurar varios humedales o uno solo de mayor tamaño y complejidad. En el caso del proyecto CREAMAgua había un presupuesto de partida y a este presupuesto se tuvieron que ajustar las actuaciones. Respecto al aspecto social, el principal factor a considerar es disponer de terrenos para la restauración de los humedales. Entre los aspectos científico-técnicos se consideró la eliminación de nitratos como el criterio esencial a considerar porque se identificó como el compuesto o contaminante que representa la mayor variabilidad de las características de calidad del agua en esta cuenca (Martin-Queiler *et al.* 2010, Comín *et al.* 2014) y la variable más restrictiva para establecer un área de humedal que cumpliera con los criterios de mejora de la calidad del agua (es decir la variable en función de la cual se requiere un área mayor de humedal para alcanzar los parámetros de calidad del agua).

FICHA 3.3. Protocolo CREAMAgua para seleccionar humedales a restaurar en una cuenca hidrográfica con el objetivo de mejorar la calidad del agua



En primer lugar se modelizó utilizando SWAT (Soil and Water Assessment Tool) la descarga de nitratos por 163 subcuencas de la cuenca del río Flumen (para ver detalles consultar Comín *et al.* 2014). Así se disponía de la información necesaria para establecer una jerarquía de sitios por subcuencas en cuanto a la descarga de nitratos, de modo que se puede decidir restaurar los humedales en las subcuencas por las que se descargan las mayores cantidades descargadas al río. De esta manera se seleccionó para restaurar en primer lugar la subcuenca por la que descarga la mayor cantidad de nitratos de toda la cuenca. Si hay en esta subcuenca un lugar adecuado como humedal a restaurar (quiere decir que tenga rasgos morfológicos del tipo de depresión del terreno o que mediante obra se consiga establecer una morfología tipo humedal) con el objetivo de reducir nitratos (quiere decir que haya espacio suficiente para que tengan lugar las funciones ecológicas, basadas en la adecuada estructura de la comunidad biológica, para este objetivo). Si es así, se le asigna una parte del presupuesto. Y se prosigue seleccionando la siguiente subcuenca en cuanto a descarga de nitratos al río y se repite la selección del sitio en la subcuenca de modo que sea el lugar adecuado como humedal a restaurar con el objetivo de que elimine la mayor parte posible de la carga de nitratos al río y las sucesivas consideraciones en cuanto a disponibilidad de terrenos y presupuesto. Y así sucesivamente. Si uno de los sitios seleccionados no cumple alguno de estos criterios, no se considera y se pasa al siguiente. Así se van seleccionando sitios hasta que hay presupuesto suficiente.

Debido a las limitaciones de presupuesto de este proyecto, que es demostrativo del potencial de utilizar humedales para mejorar la calidad del agua, solo fueron 15 los humedales restaurados (78 ha) con este proyecto (11 humedales *in-stream* y 4 *off-stream*) con un coste medio de 4.700 Euros por ha. Las acciones de restauración propuestas son muy sencillas: utilizar la misma morfología de los ensanchamientos de los arroyos por los que se descargan las aguas sobrantes de riego para ampliarlos embalsando el agua y aumentando el tiempo de retención del agua hasta 3.5 días y con ello favorecer la expansión de macrófitos emergentes en cuyos tallos y sobre el lecho del humedal coloniza la película de microorganismos que contribuye a reducir los nitratos.



Fig. 3.3. Tres tipos de humedales distintos restaurados con el proyecto CREAMAgua: en el arroyo (“in stream”) antes y después de la restauración (izda.); fuera del arroyo, “off-stream” (centro), mostrando el canal de derivación de agua del arroyo (arriba) y la zona inundable (abajo); de ribera (dcha) mostrando la zona interna a la izquierda (antes, arriba, y después, abajo, de plantación) y la zona próxima al río Flumen (antes, arriba, y después, abajo, de taluzamiento y plantación de la orilla).

El protocolo presentado con este caso es específico para las circunstancias del proyecto CREAMAgua y para las características ecológicas de la cuenca de actuación. En lugar de éste protocolo pueden utilizarse otros tipos de protocolos. Por ejemplo, uno que considere los aspectos científico-técnicos, sociales y económicos en distinto orden o simultáneamente.

3.4. SELECCIÓN DE HUMEDALES A RESTAURAR EN UNA CUENCA HIDROGRÁFICA PARA MEJORAR LA BIODIVERSIDAD

Los criterios para seleccionar humedales/sitios a restaurar en una cuenca hidrográfica o en un territorio cambian según los objetivos de la restauración. Si se trata de mejorar la biodiversidad en general, deben ajustarse los objetivos de restauración de cada uno de los humedales a la variabilidad ambiental del territorio y manteniendo las condiciones generales biogeográficas. Es decir, debe plantearse recuperar los hábitats característicos de cada uno de los humedales dentro del

FICHA 3.4. Criterios generales de SER Primer (2004) para comprobar la restauración de ecosistemas

- El ecosistema restaurado contiene un conjunto característico de especies que habitan en el ecosistema de referencia y que proveen una estructura apropiada de la comunidad.
- El ecosistema restaurado tiene especies autóctonas hasta el grado máximo factible.
- Todos los grupos funcionales necesarios para el desarrollo y/o la estabilidad continua del ecosistema restaurado se encuentran representados o, si no, los grupos faltantes tienen el potencial de colonizar por medios naturales.
- El ambiente físico del ecosistema restaurado tiene la capacidad de sostener poblaciones reproductivas de las especies necesarias para la continua estabilidad o desarrollo a lo largo de la trayectoria deseada.
- El ecosistema restaurado funciona normalmente de acuerdo con su estado ecológico de desarrollo y no hay señales de disfunción.
- El ecosistema restaurado se ha integrado adecuadamente con la matriz ecológica o el paisaje, con los cuales interactúa a través de flujos e intercambios bióticos y abióticos.
- Se han eliminado o reducido, tanto como sea posible, las amenazas potenciales del paisaje que lo rodea a la salud e integridad del ecosistema.
- El ecosistema restaurado tiene suficiente capacidad de recuperación como para aguantar los acontecimientos estresantes periódicos y normales del ambiente local y que sirven para mantener la integridad del ecosistema.
- El ecosistema restaurado es autosostenible al mismo grado que su ecosistema de referencia y tiene el potencial de persistir indefinidamente bajo las condiciones ambientales existentes. No obstante, los aspectos de su biodiversidad, estructura y funcionamiento podrían cambiar como parte del desarrollo normal del ecosistema y podrían fluctuar en respuesta a acontecimientos normales y periódicos aislados de estrés y de alteración de mayor trascendencia. Como con cualquier ecosistema intacto, la composición de las especies y otros atributos de un ecosistema restaurado podrían evolucionar a medida que cambian las condiciones ambientales.

contexto biogeográfico general en que se encuentra el territorio o cuenca hidrográfica en la que se plantea la restauración de un conjunto de humedales. Pero en una cuenca hidrográfica puede haber una gran variabilidad ambiental desde las partes altas a las bajas, por ejemplo. Esto incluye diferencias en las características físicas y químicas del agua y del sedimento, renovación del agua, morfología, todo lo cual condiciona la estructura de la comunidad biológica que puebla cada uno de los humedales.

Así, para la restauración de las comunidades biológicas de los humedales de una cuenca hidrográfica, además de re-establecer las características físicas y las químicas propias de cada tipo de humedal, se requiere la recuperación de la comunidad biológica propia de cada tipo de humedal.

En la mayoría de manuales y guías de restauración de humedales, se abordan de forma específica para cada tipo de humedal los aspectos de recuperación de la comunidad biológica. En las listas de Referencias se citan varios manuales y publicaciones que dan con detalles directrices sobre la restauración de las comunidades biológicas de diferentes tipos de humedales.

Además de respetar las especificidades propias de cada humedal, hay algunas directrices generales que son válidas para todos los humedales. Están señalados en el SER (Society for Ecological Restoration) Primer (2004).

En esencia se trata de restaurar un mínimo de la estructura de la comunidad biológica propia de cada humedal de tal modo que se desarrollen y persistan por sí mismas y de forma que se adapten a las posibles condiciones ecológicas (que incluyen los aspectos ambientales, sociales y económicos) cambiantes a largo plazo (por ejemplo, cambios en los planes de desarrollo urbanístico, cambio climático).

3.5. ASPECTOS CRÍTICOS DE LA SELECCIÓN DE SITIOS PARA RESTAURAR HUMEDALES A ESCALA DE CUENCA HIDROGRÁFICA

3.5.1. Selección de humedales a restaurar por múltiples objetivos

Los humedales de una cuenca hidrográfica pueden restaurarse con diferentes objetivos o con preferencia o prioridad por diferentes objetivos cada uno de ellos. Esta es la ventaja de planificar y ejecutar la restauración de humedales a escala de cuenca hidrográfica. Se puede mantener un objetivo principal para uno o varios humedales y establecer objetivos diferentes como prioritarios para otros humedales. Si alguno de estos humedales tiene un papel fundamental respecto a algún aspecto general de la cuenca (por ejemplo, el ciclo del agua, el movimiento

o migración de especies por todo el territorio, incluso más allá de la cuenca) no conviene alterar su funcionamiento por tratar de favorecer algún objetivo más parcial. Es mejor, hacer la restauración con ese objetivo prioritario en otro humedal de la cuenca que no tenga un papel determinante en algún aspecto general del funcionamiento del conjunto de la cuenca.

Mención especial merece la aproximación o práctica que pueda realizarse para la recuperación de alguna especie biológica o grupo de especies con rasgos funcionales similares (por ejemplo, las aves). Este no es un objetivo propio de un proyecto de restauración ecológica, cuya esencia es la recuperación del ecosistema (sus funciones y estructura, y respecto a la estructura biológica del conjunto no de una o varias especies solamente). De hecho, la recuperación de una especie no es posible en condiciones naturales sin recuperar el hábitat en que vive. Así se entiende no es adecuado poner como objetivo recuperar una especie o grupo de especies o sus hábitats solamente en un proyecto de restauración, ya que se estarían favoreciendo algunas partes de la estructura de la comunidad biológica y con ello estarían limitadas las funciones recuperadas del ecosistema. De igual manera, poner como objetivo o interpretar la restauración de un humedal en función de un grupo funcional de organismos solamente lleva a limitar la necesaria variabilidad espacial y temporal del humedal. Por ejemplo, planificar o interpretar la restauración ecológica de un humedal en función solamente de la presencia cuantitativa o cualitativa de aves acuáticas no es correcto porque este grupo de organismos es solo una parte de la estructura de la comunidad biológica que incluye otros muchos eslabones de una red trófica. En ese sentido, interpretar solamente la presencia de un gran número de aves asociada al mantenimiento del nivel del agua como un signo positivo de la restauración no es correcto porque no hay indicadores de la estructura biológica del humedal pero solo de una parte reducida de la misma y, aunque puedan utilizarse hasta cierto punto de indicadores, no expresan el estado del conjunto ni la funcionalidad del humedal. De hecho, en la mayoría de los humedales las poblaciones de aves experimentan variaciones temporales intensas que están motivadas por la dinámica del mismo humedal (entre otras variables, por el nivel y extensión del agua) por lo que, si se establece como objetivo o se argumenta como positivo que se mantenga de forma permanente un cierto nivel del agua para que persistan poblaciones de aves, se estará forzando la estructura y la funcionalidad del humedal hacia un estadio que no es propio de su dinámica. En la mayoría de los casos en los que se ha seguido, de propio o indirectamente, esta aproximación, se estabilizaron o redujeron las variaciones temporales de los humedales, llegando incluso a mantener con agua humedales temporales que se desecan cada cierto tiempo y por periodos más o menos largos. La consecuencia es que, con el objetivo de recuperar, mantener o favorecer a algunas poblaciones de organismos, aves en este caso, una parte de la estructura biológica, se llega a alterar un ecosistema. Y puede ser contraproducente para los

propias aves (otros organismos si ese fuera el objeto de la actuación) ya que al estabilizar o favorecer una característica del humedal se pierde la variabilidad y capacidad adaptativa del ecosistema frente a variaciones ambientales, y se favorecen algunos procesos o condiciones que pueden perjudicar a las mismas aves (o al objeto de la actuación). Una de las consecuencias más frecuentes de estas actuaciones, por ejemplo, es la eutrofización acelerada del humedal y, con ésta, la pérdida de muchos de los hábitats favorables a muchas especies de aves.

3.5.2. Conectividad entre humedales

Establecer o no conectividad física entre los humedales es un aspecto de interés que debe definirse en el proyecto. La conectividad es necesaria para mantener el flujo genético (el intercambio de poblaciones de la misma especie), la posibilidad de colonización y dispersión de poblaciones entre sitios de la cuenca y para contribuir a los procesos que regulan los procesos ecológicos de la cuenca hidrográfica. Pero, la conectividad entre humedales, puede ser la vía de expansión de especies indeseables (como invasoras) o facilitar la mezcla de poblaciones de distintas especies afectando negativamente a unas u otras, incluso la vía de dispersión de contaminantes. Por todo ello, la definición del tipo y grado de conectividad entre humedales debe definirse en base a las funciones y valores específicos de cada humedal en la cuenca hidrográfica, en el caso de que el objetivo de la restauración sea la de recuperar los humedales degradados por ellos mismos, o combinado con los objetivos de la restauración a escala de cuenca, si es que los objetivos se definen con precisión en conjunto o específicamente para cada humedal de la cuenca.

En el caso de los humedales ribereños, no hay restricciones mayores en recuperar la conectividad hídrica entre los humedales, y entre estos y el río, porque la conectividad hídrica es parte esencial del funcionamiento de los humedales de ribera, individualmente y a lo largo de todos los cauces de la cuenca. No obstante, los humedales de una llanura de inundación de un río no deben tener la misma conectividad (Cabezas *et al.* 2008, Gallardo *et al.* 2009) sea superficial o subterránea) con el río ni entre sí para mostrar toda su biodiversidad y funcionalidad. Pero deben conocerse los aspectos dinámicos del ecosistema (por ejemplo, el estadio geomorfológico en que se encuentran) para determinar su tipo y grado de conectividad. Por ejemplo, respecto a los galachos de una llanura de inundación debe conocerse el estadio geomorfológico en que se encuentran en relación con la dinámica fluvial, el tipo de conexión dominante (subterránea y, si es superficial, si es vía aguas arriba o aguas abajo); y el grado de conexión (duración e intensidad de la inundación, por ejemplo).

En el caso de los humedales de la cuenca no contiguos a los cauces de los ríos, debe tenerse en cuenta que no todos tienen que estar conectados entre sí física-

mente por flujos de agua ni con la misma intensidad si están conectados. También que las diferentes características de los hábitats de los humedales de una cuenca hidrográfica contribuyen a la diversidad biológica y a la evolución de las especies, a largo plazo. Por lo que mantener entre los humedales la conectividad adecuada a las características hidrogeomorfológicas de la cuenca es fundamental si el objetivo es recuperar, genéricamente, las funciones y valores de los humedales.

4

Dimensionamiento y diseño de humedales

En la restauración y creación de humedales es fundamental planificar sus dimensiones y sus formas porque ambos condicionan sus funciones y viceversa. En este capítulo vamos a tratar algunos conceptos y principios generales sobre el **dimensionamiento y el diseño de humedales** y algunas de las aplicaciones prácticas más comunes. Se recomienda al lector acudir a manuales especializados para tratar sobre aspectos de detalle del diseño y del dimensionamiento de humedales que están enfocados a alguna función precisa o a algún tipo de humedal. La lista de referencias incluye bibliografía sobre estos temas.

4.1. REQUERIMIENTOS DE INFORMACIÓN SOBRE EL TAMAÑO Y FORMA DE LOS HUMEDALES PARA SU RESTAURACIÓN

Es fundamental disponer de un **levantamiento topográfico** del humedal como base de información para la planificación de los trabajos de restauración. Esto permite conocer la altura relativa del nivel del agua en cada punto del humedal. Debido a que la superficie del sedimento de los humedales tiene, generalmente,

CONCEPTO 4.1.

Morfometría del humedal

El **desarrollo de la orilla**, $D_s = s/2\sqrt{VA} \pi$, es una medida del grado de irregularidad de la línea de costa del humedal. En esencia indica cuanto se diferencia la longitud de la línea de costa del humedal (s , que es dependiente de la escala y debe ser normalizada) de la longitud de la línea de costa de un humedal de igual área (A) pero con forma circular. También puede interpretarse como un índice de la importancia del litoral en el conjunto del humedal. En general los humedales suelen tener orillas irregulares y D_s bastante superiores a 1 (que correspondería a un humedal de forma circular).

El **desarrollo del volumen**, $D_v = V / (1/3) (A z_m) = A z / 1/3 (A z_m) = 3 (z : z_m)$, expresa la relación entre el volumen del humedal (V) y el volumen de un humedal ideal con forma de cono invertido y área basal (A) igual a la del humedal y altura igual a la profundidad máxima del humedal (z_m). La profundidad media del humedal es $z = V/A$.

El **tiempo de residencia del agua** es $t = V / V_{out}$, el cociente entre el volumen de agua en el humedal y el volumen de agua que sale del humedal por unidad de tiempo. Si éste se expresa por año, t será en años.

La **tasa de renovación del agua**, $r = 1/t$, es la inversa del tiempo de renovación (años^{-1}). Expresa el número de veces que el agua del humedal se renueva por unidad de tiempo.

muy poco relieve (es muy llana), el mapa topográfico del humedal (del lecho o superficie del sedimento) ha de tener suficiente resolución como para que se puedan distinguir pequeñas diferencias de la altura de la columna de agua. O, de otro modo, para que se puedan distinguir zonas con pequeñas diferencias en la profundidad del agua porque estas son esenciales para que se creen distintos microhábitats a pequeñas distancias entre si dentro del mismo humedal. Por ejemplo, diferencias del 10% de profundidad del agua pueden significar pequeñas depresiones en el fondo del humedal que favorezcan la heterogeneidad ambiental. Así se pueden generar sitios con diferencias en luz o turbidez y estado de óxido-reducción del agua, lo cual también puede favorecer diferentes funciones biogeoquímicas y la colonización o dispersión de diversas especies. La topografía deber ser especialmente detallada en las orillas del humedal porque en la mayoría de humedales la altura de la columna de agua varía notablemente en las orillas del humedal en cortas distancias horizontales. Es decir, debido al gradiente de profundidad del agua en las orillas, pequeñas variaciones del nivel del agua pueden suponer dejar sin inundar o variar la altura del agua por grandes extensiones del humedal. No es siempre así, porque algunos humedales tienen orillas con gran pendiente (pocas diferencias de profundidad del agua), pero en la mayoría de ellos si se observan estos gradientes en las orillas del humedal y entre las orillas y las partes internas del humedal. Todo en conjunto constituye la **morfometría** del humedal, que es resultado y condiciona la dinámica del mismo.

Una topografía detallada es la base para estimar el volumen de agua por niveles topográficos y el área inundada a diferentes alturas del agua. Esta es la información necesaria, junto con los flujos de agua que salen del humedal, para conocer **el tiempo de residencia del agua** en el humedal (y su inversa la **tasa de renovación del agua**). Debe tenerse en cuenta que la renovación del agua puede tener lugar a distinta tasa en unas y otras partes del humedal. O sea, que el agua puede quedar estancada más tiempo en algunas partes del humedal el agua que en otras, lo cual es determinante para la distribución de diferentes asociaciones biológicas por partes distintas del humedal. En este sentido es determinante el número de entradas y salidas de agua por vía superficial al humedal, si esta es la vía mayoritaria de flujo del agua. Si la entrada y salida de agua superficial es por un solo lugar, es relativamente sencillo medir estos flujos y la tasa de renovación del agua en el humedal en conjunto. Si son varias las entradas y salidas de agua, deben estimarse los flujos de agua para cada uno de ellos para estimar la tasa de renovación. No obstante, en el balance de agua de un humedal pueden ser relevantes otras vías de agua. En esencia, los flujos de agua a lo largo del tiempo varían en función de la importancia relativa de distintos procesos asociados a factores externos (por ej., meteorología y climatología, erosión y sedimentación en la cuenca) e internos del humedal (por ej., evapotranspiración, acumulación de sedimento y materia orgánica). Todo en conjunto determina la **dinámica** del humedal

que se refleja en las variaciones morfológicas, estructurales físicas y biológicas, y en las funciones del humedal, a distintas escalas de tiempo.

Así, la forma del humedal condiciona sus funciones y, viceversa, la funcionalidad del humedal crea su forma. Este es un concepto básico que ya se mencionó en el capítulo 2 acerca de la dinámica temporal de los humedales. En etapas o estadios tempranos del desarrollo de un humedal, con poca cobertura vegetal y gran flujo de agua, la heterogeneidad espacial es relativamente baja y conforme se coloniza el humedal por vegetación se crean zonas en las que el flujo de agua es menor, se acumula materia orgánica, y las orillas del humedal se hacen más curvilíneas. Todo en un proceso de evolución geomorfológica que puede llevar cientos de años en un humedal natural o unos pocos años en un humedal restaurado, si se facilita o recrea mínimamente su morfología.

Para la restauración de ecosistemas acuáticos en general y humedales en particular, es imprescindible dejar espacio de fluctuación para que al fluctuar el nivel del agua con arreglo a su hidropereodo se inunden y encharquen o queden sin agua superficial algunas zonas del humedal. En la figuras 4.1 se pueden observar algunas de las relaciones entre volumen de agua y área inundada de distintos tipos ideales de humedales; y en la figura 4.2 varias formas de la orilla y desarrollos del volumen de 3 tipos también ideales de humedales. Estas figuras dan idea de las diferencias que pueden obtenerse al diseñar un humedal según el desarrollo de la orilla y del volumen que le otorguemos. Ver Concepto 4.1 para entender los conceptos desarrollo de la orilla y desarrollo del volumen de un humedal. Para una profundización en la morfometría de ecosistemas acuáticos se recomienda la publicación (Timms 1992).

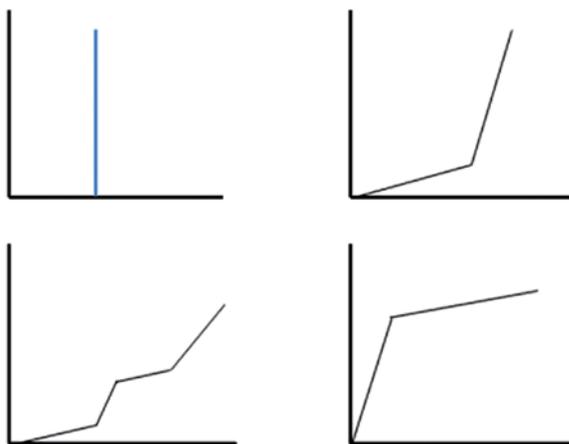


Fig. 4.1. Ejemplos de posibles relaciones morfométricas entre el volumen de agua (eje vertical) y el área cubierta por agua superficial (eje horizontal) en diferentes humedales.

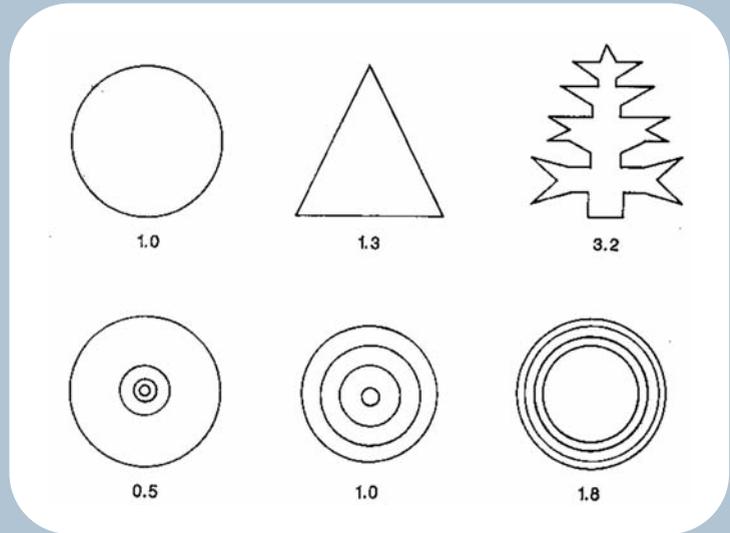


Fig. 4.2. Arriba: Representación gráfica ideal de las orillas de tres humedales con su desarrollo de la orilla (D_s , en número debajo de las figuras). Abajo: Vista aérea de la distribución de los contornos del humedal a diferentes profundidades con el Desarrollo del volumen (D_v , en número debajo de las figuras).

4.2. DIMENSIONAMIENTO DE HUMEDALES CONSTRUIDOS A ESCALA DE CUENCA HIDROGRÁFICA PARA LA MEJORA DE LA CALIDAD DEL AGUA

4.2.1. Consideraciones generales

El uso y la construcción de humedales para la mejora de la calidad del agua en entornos naturales tiene una larga experiencia y, derivado de ésta, una consolidada formalización del procedimiento general a seguir para su dimensionamiento. Como se ha dicho al principio de este manual, el objetivo determina las características de las actuaciones con humedales. Por esto, definir con precisión el objetivo es el primer paso también en el dimensionamiento de humedales a usar para mejorar la calidad del agua o a construir para el tratamiento de aguas residuales.

En este Manual nos estamos refiriendo sobre todo a la planificación y ejecución de proyectos de restauración y creación de humedales a escala de cuenca hidrográfica. Aunque, podrían tener cabida a esta escala los humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales urbanas o de otro origen, no lo vamos a hacer en este apartado porque el objeto del Manual es otro, como acabamos de decir, y porque esa aproximación requeriría un detalle lejos del alcance de este Manual y que ya está hecho en otras publicaciones.

Así, aquí nos vamos a referir solo al dimensionamiento de humedales con flujo superficial horizontal, que son el de tipo de humedales más adecuados para la mejora de la calidad del agua a escala de cuenca hidrográfica porque a esta escala son los flujos de agua naturales o no controlados los que requieren más atención. Las aguas residuales de actividades puntuales como las de centros urbanos, industriales o ganaderos, están, generalmente, sometidos a unas regulaciones específicas y merecen una planificación particular en el contexto de planes de tratamiento de aguas residuales de estos tipos. Vamos a tratar del aprovechamiento de humedales naturales o creados en el medio natural para la mejora de la calidad del agua. En este contexto, se supone que no es necesario ni conveniente diseñar la restauración o creación de humedales con grandes infraestructuras o elementos mecánicos. Esto supondría la artificialización de los humedales y podría alterar la idea de humedales en el medio natural, además de la misma función de mejora de la calidad del agua. Porque, como acabamos de decir en el apartado 4.1, los humedales en el medio natural requieren disponer de espacio para permitir las fluctuaciones de sus características, que es esencial para mantener su funcionamiento como humedales, incluso su papel en la mejora de la calidad del agua. Y si limitamos su espacio de fluctuación mediante artilugios mecánicos, estaremos limitando su capacidad respecto a esta función y, probablemente, arriesgando el cumplimiento de esa función a medio y largo plazo.

Algunos ejemplos pueden ayudar a entender esta idea. La utilización de elementos mecánicos y limitaciones en el espacio de fluctuación en el proyecto CRE-AMAGUA fue desestimada porque la experiencia hizo ver que las dimensiones de los humedales a restaurar y crear en este proyecto eran pequeñas, la utilización de elementos artificiales destacados iba a suponer la artificialización del medio natural en el que estaban los sitios de actuación y los costes de los posibles medios mecánicos sobrepasaban a establecer en los humedales, eran desproporcionados para el tipo de proyecto y medio en el que se realizó. En el mismo sentido, la utilización de compuertas de grandes dimensiones (varios metros de altura y anchura) y movidas por artilugios mecánicos a estas dimensiones para almacenar temporalmente agua en diferentes llanuras de inundación del río Ebro (provincia de Zaragoza, NE España) en su tramo medio parece desproporcionada (además del coste que supone, porque se está limitando la fluctuación del sistema, facilitando la sedimentación de sólidos en suspensión, y la proliferación de especies alóctonas colonizadoras de aguas estancadas) respecto al objetivo de amortiguar las crecidas del río Ebro que puede lograrse dando más amplitud a la fluctuación lateral y vertical de la dinámica fluvial y restaurando humedales en las llanuras de inundación, aunque esto requiera un plan de restauración del río Ebro en su tramo medio que incluya la integración de los usos agrarios e industriales y la participación de los habitantes y usuarios del sistema en los beneficios que proporcionan los servicios de los ecosistemas (por ejemplo, mediante su participación

en un sistema de pago por el servicio de retención de agua, entre otros, o por el desarrollo de la comercialización preferente de los productos hortícolas de las zonas inundables). En el otro sentido, la utilización de grandes compuertas y canalizaciones para limitar el flujo de agua en zonas inundadas de la península de Florida (USA) que reciben grandes descargas de contaminantes de cultivos de caña de azúcar que llegan a parque de los Everglades y a otros espacios protegidos en el sur de Florida, parece adecuada, en general, porque el espacio disponible es extraordinariamente extenso y permite las fluctuaciones características del humedal, el coste de las infraestructuras y operaciones está acorde con la de los costes y beneficios del sistema en el conjunto explotación-conservación de recursos, y se han testado a diferentes escalas de experimentación las actuaciones realizadas previamente a su puesta en marcha.

4.2.2. Dimensionamiento de humedales con flujo superficial horizontal (HFSH)

El flujo de agua superficial horizontal es el más frecuente y para el que más conviene dimensionar los proyectos de restauración cuando se trata de humedales en el medio natural. Sin olvidar los de flujo subsuperficial (por ejemplo de descarga de aguas subterráneas) o los que tiene un flujo de agua mixto entre superficial y subterráneo. Aquí, por ser motivo principal de este manual la restauración de humedales en el medio natural, nos referimos al dimensionamiento de los humedales con flujo superficial horizontal.

La estimación del área de un humedal para que cumpla determinados requerimientos de mejora de la calidad del agua se hace frecuentemente siguiendo el modelo ideal de funcionamiento de los humedales según el cual algunos compuestos del agua disminuyen la concentración inicial (C_{in}) en un humedal hasta una concentración mínima (C^o) resultado del balance de remoción del compuesto por la actividad de los organismos y otros componentes del humedal (por ej., adsorción, absorción, reducción asimilatoria y desasimilatoria) que la eliminan del agua exponencialmente (ésta es un aproximación a la actividad de un cultivo bacteriano que se comporta en su desarrollo y, respecto a un humedal, se está suponiendo que se comporta como un conjunto de organismos o superorganismo en el que el conjunto de procesos que actúan reduce exponencialmente la concentración del contaminante en el agua) y de aporte a la columna de agua por otros procesos (por ej., descomposición de la materia orgánica, reducción y difusión del sedimento al agua) si se le da tiempo suficiente de funcionamiento. En el caso de humedales naturales con alta tasa de renovación del agua las concentraciones de fondo o mínimas debidas a este balance de la mayoría de los compuestos son insignificantes para estimaciones de dimensionamiento con objetivos de mejorar la calidad del agua. De manera que la tasa neta de disminución del contaminante en el agua es

$J = k_v (C_{in} - C^o)$, siendo J la tasa de disminución neta del contaminante, k_v la constante volumétrica de disminución del contaminante en el humedal, y C_{in} es la concentración del contaminante en el agua residual o agua de entrada al humedal.

En humedales naturales o restaurados o creados aprovechando sitios naturales, puede ocurrir que haya diferencias entre la precipitación y la evapotranspiración en el humedal, y que haya infiltración de agua en el terreno con flujos subterráneos fuera del humedal. Pero si estas diferencias no son relevantes respecto al flujo de agua superficial a través del humedal (Q) puede suponerse que este flujo es constante a lo largo del humedal (y) de área A , y la reducción del contaminante sigue el modelo cinético de primer orden $dC/dt = -k_v C$ (siendo C la concentración del contaminante, mg/L , k_v la constante de cinética de primer orden en $días^{-1}$, d^{-1} , y t el tiempo medio de retención hidráulica en días) según el cual un reactivo disuelto en el agua disminuye su concentración por la actividad de los organismos que la eliminan exponencialmente.

A partir de esta ecuación se puede integrar entre la concentración inicial del contaminante (C_{in}) y la concentración al cabo de un tiempo t (C_{out}), que pueden ser equivalentes a las concentraciones en el agua de entrada y de salida del humedal, respectivamente:

$C_{in}/C_{out} = \exp(-k_v \times t)$, donde t es el tiempo medio de residencia del agua en el humedal o tiempo de retención hidráulico, $t = V/Q = (\epsilon \times A \times h) / Q$, siendo V el volumen del humedal (m^3), Q el caudal medio (m^3/d), ϵ la porosidad de la columna de agua en tanto por uno, A el área del humedal (m^2), y h la altura de la columna de agua en el humedal (m).

Y sustituyendo la constante volumétrica de reacción k_v ($días^{-1}$) por una nueva constante cinética de primer orden referida al área del humedal ($k_A = k_v \epsilon \times h$): $C_{in}/C_{out} = \exp [(-k_A \times A)/Q]$

Así se puede estimar la superficie de humedal requerida para reducir la concentración de contaminante de la entrada del humedal, C_{in} , a la salida, C_{out} : $A = Q/k_A \ln(C_{in}/C_{out})$ [eq. 4-1], donde A es el área de humedal (m^2), Q es el caudal medio (m^3/d), y k_A tiene unidades de velocidad y que según como se considere el caudal puede requerir expresarse en unidades $m \cdot d^{-1}$ (metros por día) o $m \cdot año^{-1}$. Caso de considerar necesario incorporar la concentración del contaminante generada por el mismo humedal o concentración mínima por debajo de la cual no se puede reducir la concentración del contaminante, C^* , la expresión sería: $A = (Q/k_A) \ln [(C_{in}-C^*)/(C_{out}-C^*)]$.

TABLA 4.1.

Concentraciones básicas o de fondo de algunas variables y contaminantes comunes en el agua de humedales usados o construidos para el tratamiento de aguas residuales urbanas o de otros usos con, relativamente, alta carga respecto a los naturales

Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	1-10 mg/L
Sólidos en suspensión totales (TSS)	1-6 mg/L
Nitrógeno orgánico + total (N _{org} + N _T)	1-3 mg/L
Amonio (N-NH ₄ ⁺)	Menos de 0,5 mg/L
Nitratos (N-NO ₃ ⁻)	Menos de 0,1 mg/L
Fósforo total (P _T)	Menos de 0,1 mg/L

El valor de K_A varía según el tipo de contaminante, su carga y la temperatura del agua en el humedal, entre otros factores generales. La tabla 4.2 indica algunos valores orientativos para los parámetros de calidad del agua más simples. Para cada caso se debe hacer un ejercicio muy riguroso de los valores de estas constantes instantáneas de reacción, incluso en muchos casos es conveniente hacer una estimación o experimentación porque las circunstancias de cada humedal pueden ser diferentes de las que se ofrecen en la literatura, que suelen ser para cargas de aguas residuales urbanas. Para cargas de entrada de contaminante al humedal intensas es necesario reducir el valor de K_A en un porcentaje no inferior al 20% de los valores anteriores.

Los parámetros hidráulicos o dimensiones del humedal se estiman a partir de la ley de Darcy de flujo en medio poroso: $Q = k_s \times A_s \times s$, donde Q es el caudal (m³/d), k_s es la conductividad hidráulica perpendicular a la sección del flujo (m³/m² × d = m d⁻¹), A_s es la sección (m²) del humedal perpendicular al flujo, y s es el gradiente hidráulico o pendiente (m/m). k_s puede ser muy variado (de 100 a 250.000 m d⁻¹, respectivamente para arenas finas hasta rocas pequeñas), y la pendiente del lecho del humedal (s) ha de ser muy baja (0,01 a 0,02 m/m).

Como las cargas, tanto hidráulica como de contaminantes, así como el desarrollo de la estructura del humedal, fundamentalmente la vegetación, pueden variar durante el año, es conveniente hacer estimaciones de dimensionamiento específico detallado durante distintas fases de desarrollo del humedal o momentos del año si la variabilidad temporal es un factor determinante en la gestión del humedal acorde a los objetivos de restauración o construcción. En este sentido, algunos compuestos y reacciones son sensibles a la temperatura del medio o, dicho de otra forma, los procesos biogeoquímicos que influyen en su transformación son

variables en función de la temperatura (por ejemplo, la actividad bacteriana aumenta con la temperatura dentro del rango habitual en aguas superficiales de humedales e influye en la tasa de desnitrificación y, por tanto, en la eliminación de nitrógeno). Esto requiere introducir, si se puede porque hay información disponible al efecto, modificaciones en las constantes cinéticas de reacción de acuerdo con la ley de Arrhenius: $K_t = K_{20} \theta^{(t-20)}$, donde K_t es la constante de reacción a la temperatura del agua en el humedal, K_{20} a 20°C, y θ es el factor de corrección debido a la temperatura, que se estima empíricamente. La tabla 4.2 ofrece algunos valores de referencia de la literatura para estos parámetros.

TABLA 4.2.

Algunos valores de la literatura de las constantes en la ecuación de Arrhenius

Parámetros	BOD ₅	Sólidos en Suspensión totales (SST)	Amonio (N-NH ₄)	Nitratos (N-NO ₃)	Fósforo Total	Coliformes fecales
K ₂₀	180	1000	34	50	12	95
θ	1	1	1.04	1.09	1	1

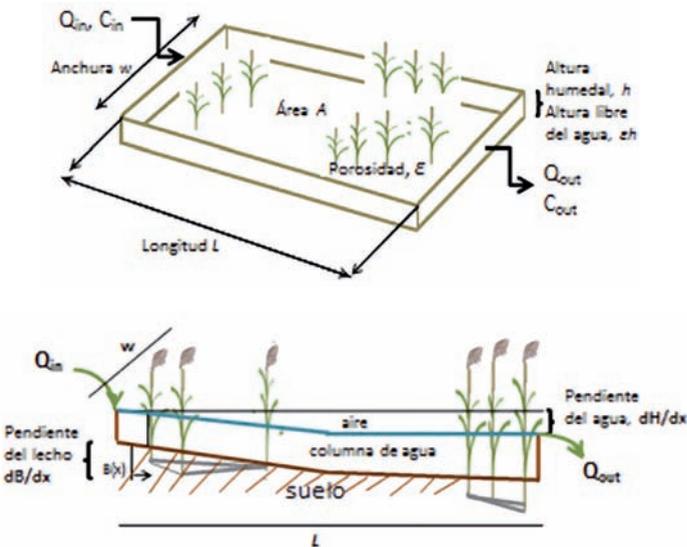


Fig. 4.3. Vista oblicua y de perfil de un humedal indicando los principales parámetros de dimensionamiento y diseño.

En cualquier caso, conviene tener presente que un humedal es un sistema ecológico que puede sobrepasar algunos umbrales y si esto ocurre cambiar su funcionamiento ecológico. Por ejemplo, si se sobrepasa en gran medida la carga hidráulica, puede convertirse en un sistema de flujo rápido del agua y ocurrir una dilución de su capacidad como sistema autodepurativo posterior. Si se sobrepasa la carga contaminante puede convertirse en un acumulador y aumentar su grado trófico disminuyendo su capacidad de eliminar los contaminantes en poco tiempo. Por lo que no conviene superar ciertos umbrales. Por ejemplo, el tiempo de residencia del agua se sugiere, para que actúen los procesos biogeoquímicos de ciclos como el nitrógeno y fósforo que son de los más restrictivos en cuanto a los compuestos más comunes a tratar, ha de ser de varios días y hasta una semana para ser mínimamente eficientes los humedales.

En base a la ley de Darcy, que describe el flujo del agua en un medio poroso $Q = k_s \cdot A_s \cdot s$, donde Q es el caudal (m^3/d), k_s ($m^3/m^2 \cdot d$) la conductividad hidráulica del medio en una unidad de sección perpendicular a la dirección del flujo, A_s (m^2) la sección del humedal perpendicular a la dirección del flujo, y s (m/m) el gradiente hidráulico (dH/dL) (ver Fig. 4.3), se pueden estimar los parámetros de forma del humedal. El área de la sección transversal del humedal $A_s = Q_{med\ d} / k_s \cdot s$, donde Q_s es el caudal medio diario (m^3/d). Se recomienda utilizar este caudal para asegurar que se incluyen los caudales máximos diarios. Utilizar los caudales máximos horarios puede llevar a estimaciones de forma de los humedales muy anchos y poco largos que no se corresponden con la necesidad de tratar volúmenes más frecuentes de entrada de agua al humedal. Una vez fijada la altura de la columna de agua (h , que suele ser de 0.6 m para humedales con vegetación sumergida y emergente) la anchura del humedal resulta de $w = A_s/h$, donde w es la anchura (m). Y la longitud del humedal (m) resulta $L = A/w$, donde A (m^2) es el área del humedal estimada con el dimensionamiento biológico (A en eq. 4-1). Como regla general la relación longitud/anchura conviene que sea mayor de 1. Si no es así, lo cual ocurre en lo común de los cálculos según estas estimaciones, debe dividirse el área total del humedal en varias celdas, separadas con un tabique de modo que no se mezcle el agua entre ellas, y dispuestas en paralelo de modo que si se cumpla que el largo es mayor que el ancho. Tampoco conviene que la longitud sea muy superior a la anchura (no más de 3:1) porque la parte final del flujo es poco operativa comparada con la entrada de agua en cuanto a actividad biogeoquímica al haber disminuido bastante la concentración de los compuestos contaminantes en la parte más cercana a la entrada de agua.

Con todas estas consideraciones, y conociendo la descarga del contaminante que es objetivo reducir para cada una de las subcuencas de una cuenca hidrográfica (Ver apartado 3.3), es posible estimar el área requerida de humedal en cada subcuenca, lo cual puede seguir una distribución fractal en subcuencas menores hasta ubicar en los sitios de interés los humedales adecuados en cuanto a dimensiones para reducir la descarga hasta unas tasas establecidas.

Así, a igualdad de otras características, la eficiencia de los humedales restaurados y construidos con el objetivo de mejorar la calidad del agua aumenta cuanto mayor sea la uniformidad del flujo de agua a su través, es decir cuanto más homogénea sea su área para que el flujo de agua sea próximo al de un reactor de tipo a pistón. De aquí que el resultado final del dimensionamiento y del diseño de los sistemas de tratamiento basados en humedales construidos para reducir la contaminación y mejorar la calidad del agua sean lechos paralelepípedos regulares. En ellos se pueden introducir algunas modificaciones de forma para adecuarlos a objetivos concretos de su construcción.

4.3. DISEÑO DE HUMEDALES CON FLUJO SUPERFICIAL HORIZONTAL EN MEDIO NATURAL

En la gran mayoría de proyectos de restauración en el medio natural la forma del humedal viene determinada por la cubeta existente y los condicionantes del proyecto de respetar la situación. Y conviene respetarla, además, porque la forma existentes es el resultado de tiempo de evolución del humedal lo cual supone adaptación común de la comunidad biológica al hábitats o hábitats establecidos. En algunas ocasiones el humedal es muy extenso y complejo, el proyecto abarca solo parte del humedal (lo cual no es conveniente porque unas partes afectan a otras), o es necesario modificar o no se sabe cuál es la forma original o de referencia del humedal. Entonces es posible incidir en modificar o recrear la forma del humedal. También en el caso de humedales creados no hay condicionantes, más allá de la disponibilidad de terreno, para construcción y recreación de la forma del humedal. Conviene tener algunas pautas generales a modo de orientación respecto a estas posibilidades.

Un humedal de forma regular ofrece muchos menos subhábitats que uno de forma irregular. Si se restaura para conservación, las formas irregulares ayudarán a dar complejidad al humedal. Aunque hay humedales muy homogéneos, todos tienen irregularidades que, precisamente, le dan variedad y capacidad para su evolución futura. Por ejemplo, Los grandes carrizales son homogéneos en un 80-90% de su extensión en cuanto a relieve del fondo, de la superficie del suelo o sedimento, y de las orillas. Aunque, si se baja la escala de observación, las irregularidades en la forma de los humedales son enormes en las tres dimensiones del espacio y, sobre todo, son o deberían serlo a lo largo del tiempo.

Las irregularidades de forma son clave para albergar una rica y variada biodiversidad. De hecho la sucesión de los humedales tiende a dar formas más irregulares con el tiempo. Entre los balances de sedimentación y erosión por partes diferentes del humedal, y la acción de fuerzas físicas (viento, oleaje, corrientes de agua, acción

directa o indirecta de comunidades biológicas) con los que están relacionados, se pueden conformar en poco tiempo irregularidades suficientes para ayudar en la trayectoria de restauración de un humedal a formas satisfactorias. Pero se puede ayudar a acelerar, y a la vez a establecer formas originales, de un humedal desde el principio de los trabajos de restauración. La facilitación de algunas formas iniciales ayuda a conseguir objetivos y, en contrapartida, aumenta los costes de restauración.

El **relieve del fondo** del humedal es importante porque pequeñas diferencias de profundidad del agua, particularmente pequeñas depresiones en un fondo que es homogéneamente plano por la mayor parte de la superficie del lecho y en la mayoría de los humedales, establecerán diferencias entre estas depresiones y las zonas planas en cuanto a las características físicas y químicas de la columna de agua, al menos en su parte más profunda, y en la parte superior del sedimento. Así, pequeñas depresiones pueden contribuir a que, con menor circulación de agua en ellas, se acumule más materia orgánica y haya condiciones biogeoquímicas con menor potencial de óxido-reducción, lo cual ayudará a la capacidad del humedal de eliminar contaminantes si en el conjunto del humedal hay una buena renovación del agua. Estas depresiones, que orientativamente pueden llegar a ser del 10-25% de la altura de la cubeta en sus zonas llanas, serán sitios de refugio de especies en caso de disminución del nivel del agua, y contribuyen a disminuir la expansión acelerada de los rizomas de macrófitos emergentes.

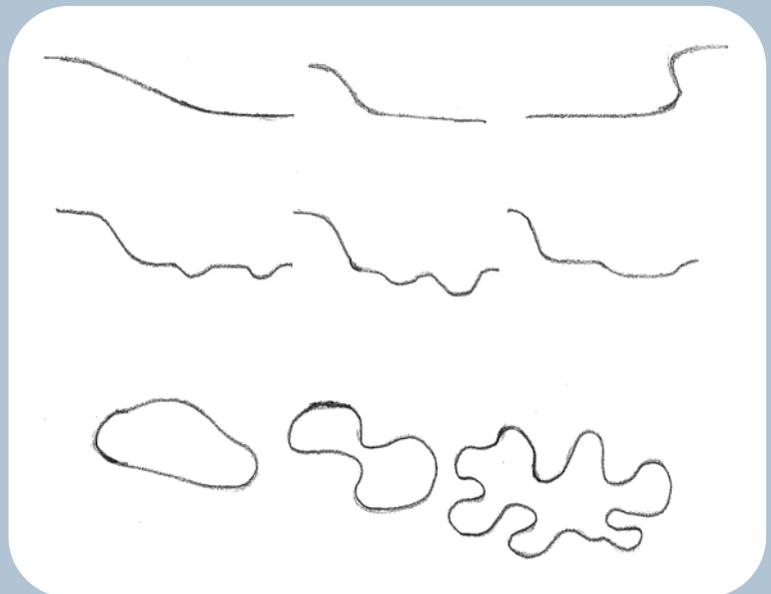


Fig. 4.4. Formas diversas ideales de tres humedales: perfil de la orilla (arriba), relieve del lecho (medio), orilla (abajo).

El **contorno de la orilla** es clave para la forma del humedal. Cuanto más irregular es el contorno más subhábitats y microhábitats se generan en un humedal y más rica y variada es la estructura de la comunidad biológica. También ocurrirá que más partes del humedal quedarán con menos conectividad, tanto hídrica como biológica. Y como se ha acaba de decir más arriba, conformar unas orillas irregulares aumenta el coste de la restauración por la necesaria dedicación de tiempo y esfuerzo a dar unas formas más laboriosas de establecer que unas formas irregulares.

La **pendiente de las orilla** es la tercera dimensión que merece atención especial, ya que la distribución espacial transversal a la orilla de las comunidades vegetales de humedales sigue un patrón regido en gran parte por la pendiente del lecho del humedal que determina la variación de la profundidad del agua desde las orillas hacia el centro del humedal. En esta dirección también se puede aumentar la heterogeneidad del humedal estableciendo distintas pendientes por diferentes zonas de las orillas de un humedal. Lógicamente, la pendiente será mayor en las zonas de mayor energía del rozamiento del agua con el sedimento-suelo, hasta poder llegar a tener la orilla una forma excavada. Las zonas de muy baja pendiente (por ej., 1:1000) dan lugar a playas muy extensas y características de humedales con grandes fluctuaciones del nivel del agua (hidroperiodo, ver apartado 2.2).

Ya se ha comentado anteriormente que, en las estimaciones de dimensionamiento y diseño de humedales, es muy conveniente dejar un margen de fluctuación de las dimensiones en las tres dimensiones espaciales. Esta variación, en general, de las dimensiones y forma del humedal es la variación que ocurre por la evolución del propio humedal combinada con la influencia de los factores reguladores externos. Es la cuarta dimensión, el tiempo, a lo largo del cual los humedales experimentan la variación asociada a su evolución hidrogeomorfológica, y por la cual conviene dejar espacio de fluctuación suficiente para permitir esa variación. Si esto se hubiera hecho en muchos humedales de la costa o en las riberas de los ríos, se hubieran evitado muchos daños a construcciones y usos humanos que ocuparon ese margen de fluctuación de los humedales.



Fig. 4.5. Ejemplos de formas diversas en humedales. Arriba: humedal creado proyecto CREAMAGUA, Monegros, Huesca, España (izda.); llanura inundable en Ñeembucú, Paraguay; laguna salada en Monegros, Huesca, España. Centro: humedal de descarga de agua subterránea en Monreal del Campo, Teruel, España (izda.); llanura inundable, Pantanal, Brasil; galacho (ox-bow lake) a la derecha en la imagen del cauce principal del río Ebro en Zaragoza, España. Abajo: humedales construidos para tratamiento de aguas residuales urbanas en Fabara, Zaragoza, España (izda.) y Lérida, España (centro); y aguas residuales agrícolas, Dinamarca.

5

**Ejecución de las obras
de restauración de humedales**

5.1. CONSIDERACIONES PREVIAS

Son muchos y variados los aspectos que deben tenerse en cuenta para la ejecución de las obras de restauración de humedales. En primer lugar debe disponerse de un proyecto redactado lo más precisamente posible, con detalles de las características que ha de tener el humedal y de las obras a ejecutar, para que no se planteen dudas durante la ejecución (ver Fig. 2.7). Aun así, las circunstancias de las obras suelen plantear disyuntivas que tendrán que resolverse por los responsables ejecutores de las obras. Lo ideal sería que los ejecutores del proyecto sean los mismos que lo proyectaron. Pero si esto no es posible por cuestiones de contratación o administrativas conviene mantener la comunicación con los redactores del proyecto para consultar cualquier duda o disyuntiva que pudiera surgir. Insistimos en lo conveniente que es disponer de un proyecto redactado. Aunque, por la simplicidad de las obras o por la dimensión y alcance de las mismas, pueda no ser obligado ni necesario disponer de proyecto redactado, redactar un proyecto de restauración ayuda muchísimo a pensar y preparar las acciones a ejecutar y como llevarlas a cabo; es muy útil para definir los aspectos técnicos de las obras y planificar su ejecución, y para plantear el presupuesto previendo desviaciones o imprevistos.

Así, se entiende que la redacción del proyecto de restauración incluya una revisión de la legislación vigente en la que se enmarquen las obras de restauración y que le pueda afectar. Se entiende también que sea necesario y muy relevante establecer la dirección facultativa de las obras que será responsable de dirigir y supervisar las obras para que se ejecuten correctamente según el proyecto constructivo, incluyendo la supervisión de plazos y materiales empleados, y de inspección y vigilancia de las condiciones de seguridad y salud. En los casos más complejos la dirección facultativa puede estar constituida por una dirección de obra, una dirección de ejecución de la obra y la coordinación de seguridad y salud. Debe revisarse la legislación para ajustarse a ella en cuanto a estos órganos de dirección de las obras y a los responsables de la ejecución (particulares, empresas directas o por medio de contratación), que deben estar acordes con la magnitud de la obra y de acuerdo a la legislación vigente y que tener asumidas estas responsabilidades claramente.

De igual manera el proceso de contratación de las obras, sean estas de promoción pública o privada, debe ser claro y ajustado a la legislación vigente. Un contrato claro, con definición de los términos de ejecución materiales, de plazos y costes y pagos es necesario para iniciar bien la ejecución del proyecto. Y debe incluir la forma y responsable de resolver las diferencias de criterio que puedan surgir o las dificultades de ejecución de las obras.

5.2. PLANIFICACIÓN DE LAS OBRAS

Una buena planificación de las obras es importante para realizar un proyecto de restauración de humedales, y es esencial si el proyecto es de restauración de humedales a escala de cuenca hidrográfica. Porque, especialmente en este último caso, organizar adecuadamente la secuencia de ejecución de las distintas fases de obras en sitios distintos de la cuenca optimiza la utilización de los recursos y el aprovechamiento del tiempo, evitando costes. Por ejemplo, una buena secuencia de distribución de las fases de obras entre los distintos sitios de ejecución permite un menor movimiento de máquinas, material y personal. Esto es válido también para humedales de cierta extensión cuya restauración requiera el desplazamiento entre zonas distintas.

La planificación de la duración de las fases de obras y los periodos en que deben ejecutarse, una vez establecido el inicio de las obras, deben hacerse de acuerdo a las necesidades del proyecto. Por ejemplo, la plantación de especies arbóreas debe hacerse dentro del periodo de dormancia o latencia, después de la caída de las hojas y antes de que aparezcan brotes nuevos con el aumento de la temperatura en primavera, lo cual permite que crezcan las raíces si la humedad del suelo es adecuada.

Algunos de los aspectos que deben considerarse porque pueden afectar a la planificación de las obras están relacionados con la posibilidad de que los sitios de actuación o proximidades tengan alguna servidumbre y/o que como consecuencia de las obras puedan verse afectados: sitios de interés arqueológico, sitios y especies declarados de interés y con alguna figura legal de protección, la incidencia en vías públicas de acceso o de paso, la existencia de infraestructuras de servicios públicos o particulares, la extracción o derivación de caudales de agua, alteración del paisaje, existan especies cuya actividad se deba respetar durante ciertos periodos del año, impedir la llegada y colonización de especies no autóctonas o perjudiciales. Para iniciar las obras es necesario disponer de los permisos legales que garanticen la ejecución y continuidad de las obras. En muchas ocasiones, estos permisos y los informes o certificados que avalen su solicitud deben obtenerse de entidades diferentes. Y toda obra necesita cumplir estrictamente el plan de seguridad y salud que debe estar en el documento redactado como proyecto.

Lógicamente, como estos trámites e informaciones son previos a la ejecución pero condicionan la temporalidad de las obras, deben constar en el proyecto al igual que el cronograma o planificación de las obras. Algunas consideraciones generales pueden servir como principios orientadores para la planificación de las obras (Tabla 5.1)

TABLA 5.1.

Orientaciones para la planificación y ejecución de obras de restauración de humedales

Fases y situación de las obras	<ul style="list-style-type: none"> • Planee de forma equilibrada el tiempo y el espacio de las actuaciones. Si se actúa en una parte del humedal, o en algunos humedales de la cuenca solo, se facilita que los organismos ocupen zonas no alteradas por las obras mientras se restauran otras. Esto supone un compromiso con el coste de las obras porque entorpece el proceso de restauración pero puede ser necesario para tener éxito porque asegura mantener la comunidad biológica propia del sitio. • Considere la evolución hidrogeomorfológica del humedal, o humedales en una cuenca hidrográfica, y trate de anticipar creando partes del humedal, o nuevos humedales en una cuenca, en lugar de actuar en el existente, o en algunos humedales de la cuenca que estén, por ejemplo, colmatados. • Adapte el conjunto de fases de las obras (movimiento de tierra, apertura/cierre de flujos de agua, revegetación, interacción entre especies) a los periodos adecuados del año. Evite actuaciones que afecten negativamente a partes de la comunidad biológica en sus periodos más activos demográficamente (por ej.: reproducción, nidificación y cría, dispersión de semillas) o, precisamente, actúe previamente a esos periodos si se trata de controlar a ciertas poblaciones biológicas.
Flujos de agua	<ul style="list-style-type: none"> • Asegúrese de que dispone y usa los flujos de agua necesarios según el proyecto. • Minimice o evite la contaminación por la ejecución de las obras. • Tenga en cuenta la interacción agua subterránea/agua superficial. • No altere el hidropериodo del humedal. • Para el conjunto de humedales de una cuenca considere la variación del hidropериodo en distintas partes del territorio.
Conformación del terreno	<ul style="list-style-type: none"> • Evite formas geométricas muy regulares que no son propias de humedales. • Tenga en cuenta la orientación principal de los flujos de agua y aire en la conformación del terreno (orillas, islas, relieve del fondo). • No cree grandes pendientes, excepto si el proyecto lo indica y se basa en sitios de referencia. Pero puede ser conveniente establecer surcos o zonas más profundas en el fondo de un humedal con diversos objetivos (por ej.: diversificar hábitats, intensificar actividad biogeoquímica).
Vegetación	<ul style="list-style-type: none"> • Prevea con antelación las necesidades de plantas si hay que revegetar. • Considere la posibilidad de facilitar la plantación (mediante especies u objetos facilitadores) en lugar de plantar directamente solo las plantas objetivo. • Use lo más posible planta autóctona y de origen local. • Prevea la necesidad de reponer mareas de vegetación. • Prevea la necesidad de controlar la posible invasión o afección por especies no deseadas.

5.3. CONFORMACIÓN DEL TERRENO

La parte de las obras de restauración relativa a dar forma al humedal es la básica del proyecto. Sobre su resultado se realizan el resto de los trabajos del proyecto. Es, por esto, esencial ya que los demás trabajos estarán condicionados por la forma y estado en que quede el humedal con los trabajos de conformación del terreno. Es, a la vez, una de las partes de mayor coste económico porque el movimiento de tierras, sea a gran escala o con detalles a pequeña escala, es de las más costosas de los proyectos. Por pequeño que sea el humedal, hoy día se suelen hacer los movimientos de tierras con máquinas, que son muy variadas según la tarea a realizar (Tabla 5.2), aunque se pueden hacer los trabajos de afinamiento de formas o de pequeñas dimensiones, incluso de conformación de humedales pequeños, con el trabajo directo de personas sin maquinaria. Y la utilización de maquinaria es muy cara, tanto si es de propiedad del ejecutor de la obra como si es necesario alquilarla a propósito para los trabajos. A menudo es necesario alquilar las máquinas y los conductores, o contratarlos específicamente para manejar las máquinas, y suele hacerse por horas precios caros. No obstante, la realización de proyectos de restauración mediante el trabajo realizado directamente por personas, contratadas o de forma voluntaria, es muy encomiable y recomendable en muchos proyectos o fases que no requieran gran esfuerzo físico, porque tiene la ventaja de poderse afinar más las acciones a realizar, además de que supone una mayor implicación social en el proyecto. Esto no debería excluir lo dicho anteriormente sobre la utilidad y necesidad de disponer de un proyecto y de una buena planificación.

TABLA 5.2.

Muestra de las diferentes máquinas que pueden utilizarse en obras de restauración de humedales con algunas de sus características más destacadas

Nombre coloquial	Nombre técnico	Peso tonel. (cargado)	Presión terreno kg/cm ²	Aspectos positivos	Aspectos negativos	Notas	Esquema
Quad	VTT (Vehículo todo terreno)	0,3	0,2	Desplazamientos de personas o cargas con poca presión sobre el terreno	Solo lleva cargas pequeñas (hasta aprox. 100 kg)	Puede ser difícil de manejar	
Tractor pequeño	Mini tractor	0,75	1	Tareas pequeñas; equipamiento ligero en espacios limitados	Pequeña capacidad	Puede enfangarse fácilmente	
Tractor	Tractor	2-8	2,5	Bueno para todo tipo de terrenos. Disponibles	Puede dañar vegetación. Estabilidad baja	Mejor usar tractor 4WD	

Nombre coloquial	Nombre técnico	Peso tonel. (cargado)	Presión terreno kg/cm ²	Aspectos positivos	Aspectos negativos	Notas	Esquema
Retro-cargadora	Excavadora /cargadora de ruedas	7,5	3,25	Barato y rápido llevar y en el sitio. Alta disponibilidad.	Alta presión en el terreno. Alcance limitado. Más lenta que otras	Buena para trabajos pequeños en suelo estable. Daña superficie	
Hymac	Excavadora hidráulica	3-30	0,25-1	Muy versátil para excavar, cargar; adaptable a suelos de humedales.	Difícil de transportar. Movimiento lento en el sitio	Transporte al sitio se cobra	
Dumper	Auto-volquete	2-5 (6-10)	2,5 (5)	Alta disponibilidad. Fácil de mover. Adaptable a terreno irregular	Alta presión sobre el terreno. Puede formar surcos	Puede ir a velocidad pero causa daño en el suelo	
Hydrema	Camión volquete articulado (ruedas flotantes)	5 (15)	1,4 (4)	Buena para cargas grandes en suelos blandos que requieran poca presión, relativam.	Para sitios sensibles, la presión sobre el terreno puede ser alta	Articulado, estable.	
Moxy	Camión volquete articulado	25 (43)	2 (5)	Coste bueno relativo al trabajo que puede realizar	Muy alta presión sobre el terreno	Más usado en obras de ingeniería	
	Excavadora sobre ruedas	20	4-6	Buena para sitios con suelo duro, compacto	Alta presión sobre el terreno	Más usado en obras de ingeniería	
Bulldozer	Excavadora oruga	10-20	1	Buena para hacer relieves y reperfilar	Menos precisa que excavadora hidráulica	Conviene con pala ancha para humedales	
Pala	Pala cargadora (sobre ruedas)	10	4	Buena para cargar. Difícil de alquilar por periodos cortos	Usos reducidos. Movimientos lentos	Buscar palas intercambiables	
Oruga	Volquete oruga de caucho	5 (10)	0,12 (0,24)	Para transporte en sitio blando, rápido.	Difícil encontrar conductores expertos	Poca disponibilidad	
Caterpillar	Excavadora compacta	1-3	0,15-0,3	Barata, pequeña	Inestable, escasa tracción	Para partes sencillas de las obras	

Todas las cifras son orientativas. Deben buscarse las prescripciones más idóneas a cada obra según sus características que son muy variadas según tipos, marcas y equipamientos. Algunas máquinas pueden cambiar el soporte (de ruedas a oruga de caucho o metálica) y la posibilidad de intercambiar palas y funciones.

Antes de hacer obras que requieran movimiento o extracción de tierra o sedimento del humedal se debe tener en cuenta que puede contener semillas o partes durables de organismos que podrían ser el germen para el desarrollo de la comunidad del humedal y que, por tanto, conviene conservar. Esto es muy recomendable tanto para las orillas de los humedales que quedan sin cubrir por agua durante un tiempo y para el sedimento de los humedales permanentemente inundados. Y es esencial para humedales temporales, en la que muchas especies de vegetales y animales de su comunidad pasan fases de su vida en forma de anabiosis o dejan formas durables que se revitalizan al inundarse de nuevo después de que el humedal ha pasado un periodo sin agua.

La extracción de sedimento de humedales en avanzado estado de colmatación es una técnica habitual y eficaz para aumentar la columna de agua del humedal y para extraer materia orgánica que tensiona el metabolismo del humedal por la respiración de la materia orgánica y el aporte de nutrientes a la columna de agua. La extracción de la capa superior del suelo (“top soil removal”) se ha practicado eficientemente en muchos casos, desde pequeños hasta grandes humedales (Jordan *et al.* 2003, Moss *et al.* 1996). Es una forma práctica y eficiente de extraer el sedimento que ha causado la colmatación del humedal y que está contribuyendo a fertilizar la columna de agua y la eutrofización del ecosistema. Requiere medidas precautorias para evitar la dispersión del material que se extrae en el propio humedal al hacer la extracción. Pero existen equipos de succión muy variados, que desde las orillas o montados en equipo flotante o barca y con barcaza a modo de remolque con contenedor al que se vierte el sedimento extraído han funcionado eficazmente. También hay vehículos anfibios (o simples barcas) con múltiples capacidades (por ej.: provistos de una herramienta extractiva o cortadora, o ambas cosas); frecuentemente se usan para extraer vegetación que se ha expandido indeseablemente en los humedales (Fig. 5.1).

Como el material que se extrae o mueve de los humedales puede ser de textura y porosidad variadas, puede utilizarse con diversos fines. El más orgánico puede servir para enriquecer (si no está contaminado) partes de la restauración que queden sobre un suelo o sedimento pobre en nutrientes. Y el más arcilloso se puede utilizar para sellar alguna parte profunda o lateral del humedal.

Ya se ha comentado anteriormente que los humedales no tienen formas rectilíneas ni repetidas (no se encuentran dos humedales con idéntica forma, ni dos partes de un humedal son idénticas, y hay que recordar que un humedal tiene tres dimensiones espaciales y los cambios a lo largo del tiempo como cuarta dimensión). Aunque si se observan en algunos humedales costeros, del tipo marismas, por ejemplo, en los que la energía del factor regulador mayoritario de su forma se disipa en el humedal por una vía principal (Fig. 5.2), ciertos patrones en la forma del humedal que recuerdan secuencias de tipo fractal (una forma básica

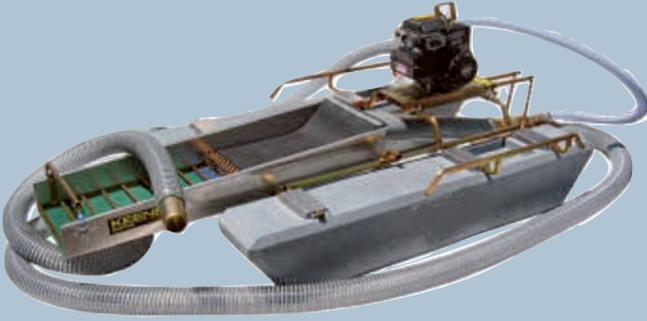


Fig. 5.1. Equipo sencillo de succión de sedimento (izda.) y vehículo anfíbio de variados usos (dcha.)

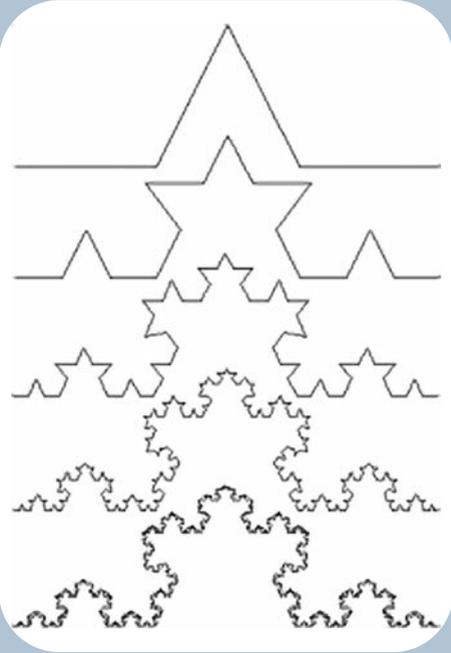


Fig. 5.2. Figura de Koch a modo de ejemplo de geometría fractal (izda.); parte de una marisma costera mareal en la que pueden imaginarse formas similares al variar la escala de observación (dcha.).

se mantiene al aumentar la escala espacial en un sitio en conjunto o al observar la forma de partes más pequeñas del humedal) (Jensen M.E. & P. S. Bourgeron, 2001).

No obstante, aunque pueda ser atractivo tomar como inspiración la geometría fractal, esta perspectiva es muy simple por considerar solo aspectos de forma y no considerar los aspectos esenciales del funcionamiento de los humedales que son las dinámicas hidrológica y de la estructura de la comunidad biológica asociadas a las condiciones biogeoquímicas del humedal, y todo ello en relación a sus factores reguladores externos al humedal. La conformación de un humedal de estas características debe considerar los fundamentos de la conformación de los cauces en tres dimensiones, del flujo de agua y su disipación a través de ellos, y sus relaciones con la composición y estructura de las comunidades biológicas, que serán expresión de las interacciones hidromorfológicas con las biogeoquímicas del ecosistema. De otro modo, inspirarse en formas regulares para construir o restaurar humedales, aunque sean construcciones artificiales con fines comerciales o de esparcimiento, lleva a aberraciones funcionales que causan problemas al resto del territorio, por ejemplo, por la alteración de los flujos de agua y el gasto enorme en recursos que es necesario hacer para mantenerlos (Fig. 5.3). Aunque puedan entenderse como una inversión económica para obtener mayores ingresos de su uso o producción, no consideran la privatización de los ecosistemas que supone, ni los costes ambientales, ni el desarraigo social, ni otras alternativas de desarrollo del conjunto del territorio, que son partes importantes también de la restauración de humedales y de la restauración de ecosistemas en general.

Fig. 5.3. Ejemplos de humedales conformados de forma natural mediante la disipación gradual de la energía de la marea a través de canales en marismas costeras (izda.) y de conformaciones artificiales que no han considerado los factores reguladores de los flujos de agua y aire (dcha.).



Por esto, darle forma al humedal ha de ser en las tres dimensiones espaciales y previendo los cambios que habrá a lo largo del tiempo motivados por los factores reguladores externos. Así, es importante dar una forma básica en planta o dimensión horizontal, pero es esencial dar la forma adecuada a estos factores en sentido vertical, porque pequeñas diferencias de relieve de apenas centímetros pueden suponer grandes diferencias en la inundación y en el gradiente de especies que se sitúan a distintas alturas de inundación.

Además de los flujos de agua, la dirección de los vientos es fundamental en la conformación de los humedales. A barlovento, la energía directa del viento o del oleaje causará relieves excavados, cóncavos, erosionados o muy cambiantes. Las orillas a sotavento, por estar protegidas o no recibir tanta energía ni del viento ni del oleaje, tendrán formas más suaves y en ellas se acumulará sedimento. Este aspecto es fundamental a tener en cuenta en una de las formas más frecuentes a considerar en los proyectos de restauración de humedales, las islas. Con frecuencia se proyectan islas, sobre todo como hábitats para albergar especies de aves. En general, las aves relacionadas con el medio acuático necesitarán un espacio con playas protegidas del viento y oleaje y el hábitat adecuado con o sin vegetación, para anidar en caso de ser nidificantes. Para proyectar y construir una isla se han de tener también en cuenta otros dos factores: la orientación por la insolación y horas de luz y la protección frente a perturbaciones, además del viento. Es conveniente que la parte de la isla protegida del viento y oleaje, también sea la que recibe más horas de luz; tenga amplia visibilidad para evitar la interacción con especies agresivas o de colonización rápida; y no esté bajo la influencia de vertidos o corrientes que puedan transportar y depositar en ella materiales contaminantes o no deseados (Fig. 5.4).

Similares consideraciones valen para flechas o formas destacadas de las orillas. Conviene darles una forma en relación y a favor de los factores reguladores mencionados (viento, corrientes y flujos de agua) y se debe esperar que con el tiempo se realizará un ajuste o afinamiento de la forma modulada por estos factores reguladores, incluida la influencia de la comunidad biológica. De esta manera se pueden establecer zonas más expuestas y variables de forma y zonas más protegidas y menos variables de forma que tiene funcionalidades complementarias en el conjunto del humedal.

Respecto al relieve del fondo del humedal, generalmente es muy plano. Pero en la construcción de este relieve de fondo pueden formarse grandes desniveles (relativamente, porque en un humedal una diferencia de nivel o de altura de la columna de agua de más de un metro puede considerarse un gran desnivel) aunque las pendientes de estas zonas más profundas no deben ser grandes para evitar erosión, y pequeños desniveles) a modo de surcos o zonas algo más profundas (de 5 a 30 cm en humedales de hasta 1 a 2 m de profundidad más general) para dar

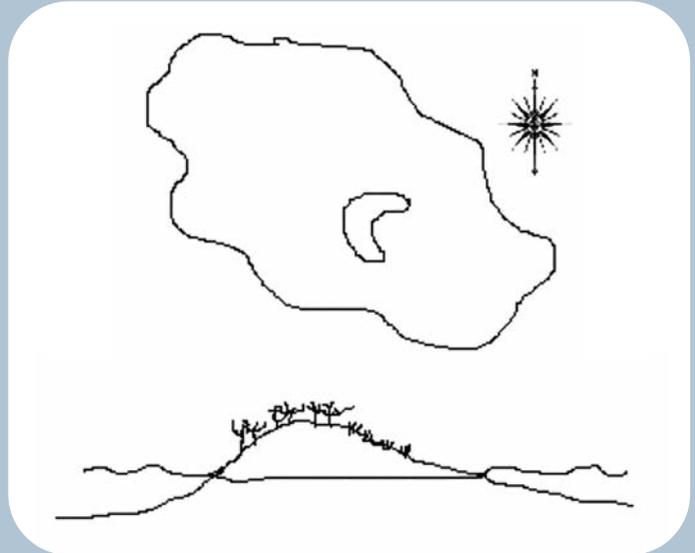


Fig. 5.4. Situación y forma ideal de una isla en un humedal. Con viento dominante del NW.
 Arriba: vista en planta con situación de la parte cóncava y de baja pendiente a sotavento. Abajo: perfil transversal (NW-SE) de la isla con la parte de mayor pendiente y vegetada a barlovento, y la zona con forma de playa y de menor pendiente a sotavento.

mayor diversidad de micro-hábitats al conjunto del humedal. Son formas constructivas sencillas de hacer con maquinaria o a mano, pero deben estar planteadas y ejecutadas en la fase más temprana de la construcción porque son parte de la forma inicial y una vez avanzadas las obras es más costoso y laborioso realizarlas.

5.4. CONTROL DEL NIVEL Y DE LOS FLUJOS DE AGUA

La conformación del terreno es la fase básica e inicial de las obras de restauración de humedales. Y sirve para establecer los fundamentos de la variedad de hábitats del humedal. Pero el aspecto esencial de las obras que determinará el funcionamiento, en los términos más generales, del humedal como ecosistema es el relativo al control del nivel y de los flujos de agua. Los mecanismos para determinar las variaciones de nivel del agua a lo largo del tiempo y los flujos de agua deben establecerse lo antes posible durante las obras porque en relación a ellos se alcanzará el nivel del agua, el área inundada, y sus fluctuaciones, el hidroperiodo, aspecto esencial y primordial en el funcionamiento del humedal (ver apartado 2.2). Así se entiende que disponer de una topografía detallada del humedal y realizar las obras de conformación de acuerdo a ella según lo determinado en el proyecto es esencial para alcanzar los objetivos de restauración. Para

controlar el nivel del agua en un humedal basta con establecer un mecanismo apropiada a la salida del agua del humedal; de tal manera que manteniendo un control del flujo de salida de agua se puede controlar el nivel del agua en el humedal y, consecuentemente, el área inundada. De aquí que deba esmerarse el trabajo de conformación del humedal referido en el apartado anterior.

Para humedales pequeños y sin grandes flujos de agua, un sencillo dispositivo tubular que comunique la columna de agua en el humedal con la parte exterior de salida puede servir para controlar la altura del agua y el área de humedal inundada (Fig. 5.5). La construcción de un terraplén o dique es algo más frecuente en la construcción de humedales creados de nuevo y puede servir para confinar el agua en el humedal. Pero, si se construye, debe recrearse como uno de los hábitats del humedal.

Una compuerta con partes extraíbles (las tradicionales son tablonés apilados en sendas guías laterales también sirve. Pero estas dos formas de controlar el nivel del agua tienen la servidumbre de requerir visitas y control frecuente para mover el tubo de salida o retirar/poner tablonés según los requerimientos del proyecto.

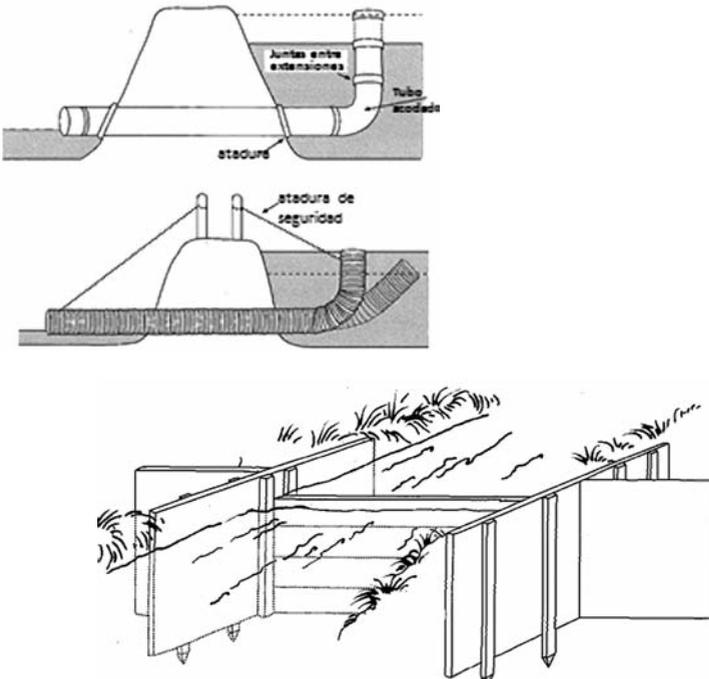


Fig. 5.5. Esclusas sencillas para controlar el nivel del agua a la salida de humedales: izda.) de tubo, fijo o flexible, a través de terraplén; dcha.) de tablonés extraíbles.

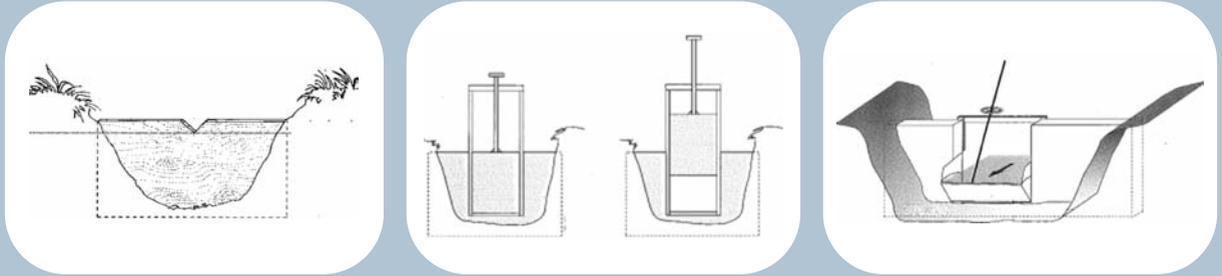


Fig. 5.6. Compuertas mecánicas fijas (ida.) y manuales para control del agua por salida profunda (centro) y superficial (dcha.).

Ambos mecanismos son propensos a filtraciones laterales o desbordamientos en caso de grandes variaciones del nivel del agua o avenidas al humedal, por lo que deben asentarse bien en la base y en los laterales del canal o dique de salida en donde estén construidos. Con todo, son propensos a deterioro con el tiempo y debe preverse la necesidad de reemplazamiento de todo o parte de estos sencillos mecanismos.

Las compuertas mecánicas son útiles para cualquier sitio siempre que se adecúen su tamaño y funcionalidad a los requerimientos del proyecto respecto al control del nivel del agua. Unas compuertas pequeñas serán útiles para humedales relativamente pequeños. Pero si los flujos no son grandes ni los desniveles, unas compuertas pequeñas pueden ser muy eficaces para controlar en nivel del agua y los flujos de salida del humedal. También se pueden instalar compuertas fijas con muesca que se calibran de acuerdo a los flujos de agua para regular entradas y salidas existen.

Existen también compuertas automáticas que basculan con la presión del agua o reguladas por ultrasonidos (respuesta de aparato emisor de ultrasonido al nivel del agua) o simplemente mediante un sistema electrónico que se activa al alcanzar el nivel del agua cierto nivel (con cierre de circuitos que activan sistema mecánico).

Si al/del humedal entran/salen varios flujos de agua, el control del nivel y de los flujos de agua se complica. Pero la salida de agua del humedal estará controlada por el regulador del nivel situado más abajo topográficamente, en situaciones de aguas bajas, y por el controlador de nivel que alcance más altura, en situaciones de aumento del nivel del agua en el humedal. En cualquier caso, para ser eficientes en el control del agua, las compuertas deben estar situadas en el nivel más bajo del dique, terraplén o canal de salida del humedal; la parte superior de la

compuerta debe estar por encima de la altura máxima prevista del agua en el humedal; la sección de la salida debe ser capaz de desaguar los picos de flujos de agua al humedal; deben protegerse o mantenerse estas instalaciones frente a erosión, colonización, alteraciones en la construcción y materiales.

5.5. ENMIENDAS DEL SUELO

Si el proyecto de restauración incluye la corrección de alguna característica del suelo o sedimento alterada por algún vertido externo o por procesos internos conviene evaluar la posibilidad de corregir estas características alteradas por la adición de alguna enmienda antes de realizar un trabajo físico que, en general, será más costoso.

Así, suelos resultantes de actividades mineras de extracción de carbón o metales es muy frecuente que dejen suelos ácidos que pueden corregirse mediante la adición de caliza, que debe hacerse en fase líquida, disuelta, y comprobando la capacidad de dilución en el agua del humedal que empapará el suelo o sedimento. La adición de un acidificante (por ej., sulfato de hierro) puede servir para bajar el pH de suelos básicos y adiciona hierro útil para la vegetación si lo necesita; y también puede servir para precipitar fosfato de la columna de agua. El aporte de una enmienda orgánica no es recomendable en la restauración de un humedal, excepto en casos de terrenos extremadamente secos y pobres en nutrientes. Se ha sugerido la adición de restos orgánicos de granjas y fertilizantes a suelos de la cuenca de humedales o a los mismos humedales con suelos o sedimentos pobres. Un humedal debe desarrollarse según su propia dinámica y este desarrollo de la vegetación llevará a una evolución del humedal relacionada con su entorno territorial, con su cuenca. Forzar su dinámica con la adición de nutrientes, puede suponer un desarrollo exagerado de la vegetación y la eutrofización del humedal de difícil control.

6

**La recuperación de la
vegetación en la restauración
de humedales**

Junto con la hidrología, los aspectos relacionados con la recuperación de la vegetación son los fundamentales en los proyectos de restauración. Incluso en los proyectos que tengan otros objetivos primordiales o preferentes, la recuperación de la vegetación adecuada es esencial para conseguir estos otros objetivos. La razón está en el papel fundamental que tiene la vegetación en el funcionamiento (Fig. 2.5) y estructuración (Fig. 2.6) de los humedales. Dicho de otra manera, un proyecto de restauración de humedales no estará bien fundamentado si no define correctamente los aspectos relativos a la vegetación. Aunque la propuesta de acciones solo incluya aspectos físicos (por ej.: la apertura o cierre de un flujo de agua, la extracción de la capa superior del suelo), el proyecto debe incluir las expectativas respecto a la vegetación y las acciones a desarrollar en cualquier caso.

La lentitud en el desarrollo de la vegetación respecto a los objetivos del proyecto puede ser un aspecto preocupante. El exceso de vegetación, o el desarrollo demasiado rápido de la vegetación, también; sobre todo si no va acompañado de la heterogeneidad planeada. En algunos humedales, una gran homogeneidad espacial de la estructura de la vegetación es, en cambio, la norma; al menos a gran escala espacial. En humedales temporales, y en aquellos con grandes fluctuaciones del nivel del agua y con gran variación del área inundada, la estructura de la vegetación (y sus componentes) puede variar muchísimo. Todo esto quiere decir que es necesario conocer el tipo de humedal que se va a restaurar y su situación biogeográfica para definir las características estructurales y la dinámica temporal de su vegetación.

En lo que sigue hablaremos de la vegetación de los humedales refiriéndonos a la vegetación macrofítica, a la cual nos referiremos como macrófitos. Aunque es una palabra no incluida en el diccionario de la Real Academia de la Lengua Española, lo cual es sorprendente, dicho sea de paso, porque micrófito si lo está, es de uso muy frecuente entre las personas y ámbitos dedicados o con interés en humedales, al igual que macrófitas (y ambas también sin acento). No nos referiremos a la vegetación microscópica o micrófitos, particularmente, aunque mencionaremos algunos aspectos de interés para la restauración de humedales.

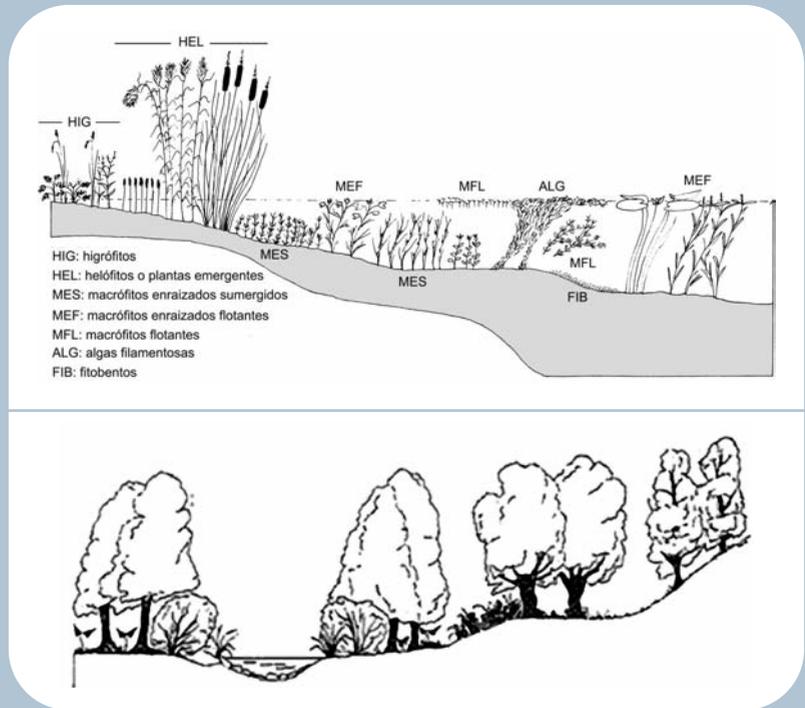
6.1. DISTRIBUCIÓN Y DINÁMICA DE LA VEGETACIÓN EN HUMEDALES

Dentro de las características propias de cada humedal, la distribución de la vegetación está regulada, principalmente, por unos pocos factores: los flujos de agua; la textura del sedimento, la transparencia del agua; la interacción con otras partes de la comunidad.

Ciertamente, a partir de determinada velocidad del agua la colonización y permanencia de la vegetación es muy difícil, no tanto porque no pueda enraizar y per-

sistir, incluso ante grandes avenidas, sino porque el flujo turbulento del agua remueve el sedimento y arrastra las partes colonizadoras e incluso las desarrolladas de la vegetación. Por esto las partes de los humedales con corrientes de agua preferenciales, altas y turbulentas no suelen estar ocupadas por macrófitos o por gran densidad de macrófitos. Y por esto, además de por la evolución de la colonización de la vegetación, las orillas de los humedales muestran, en general, una mayor cobertura por macrófitos y una heterogeneidad espacial (Fig. 6.1) en su distribución por tipos asociada a la combinación de la colonización y sucesión de la comunidad, y de los factores que la regulan como la intensidad (altura y permanencia) de la inundación, disponibilidad de luz, factores físicos como la resistencia al viento y oleaje, y químicos como la adaptación a sedimentos más o menos reducidos.

Fig. 6.1. Representación esquemática de gradientes de tipos de la comunidad vegetal en las orillas de humedal palustre (izda., de Cirujano, S. *et al.* 1995) y llanura de inundación (dcha., de García de Jalón y González del Tánago 1995). En ambos esquemas se trata de reflejar de una forma muy simple la idea de la estrecha relación entre la distribución espacial en gradiente de las diferentes especies del humedal con su principal factor regulador, la disponibilidad de agua o altura del nivel del agua.



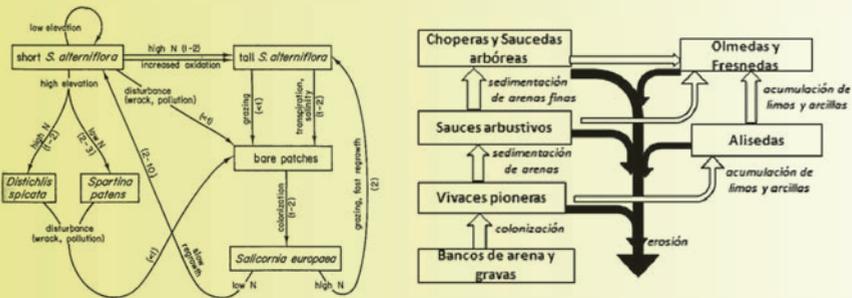
No obstante, una perspectiva dinámica de la vegetación, como de todo el humedal, es más realista y ayuda mejor a diseñar las actuaciones de restauración, en particular de las relativas a la comunidad vegetal. De otra manera, un proyecto de restauración de humedales no tiene que tratar de reproducir esquemas tan simples que solo reflejan una idea en dos dimensiones. Deben tenerse en perspectiva las

cuatro dimensiones de variación de los humedales. Y en vista en planta se puede imaginar mejor una visión más realista: la distribución espacial de las especies que componen la comunidad vegetal se corresponde con las características de los variados factores reguladores entre los cuales, además de la influencia de la presencia del agua (o mejor, la distancia al nivel freático en bosques ribereños y la altura de la columna de agua en humedales palustres) se encuentra el tipo y estado del suelo o sedimento, y la historia de la colonización y desarrollo de la comunidad. Esto último se refiere a la variación temporal de la distribución espacial de la comunidad vegetal que, a su vez, está regulado por los flujos de agua, acumulación de sedimento, influencia de la fauna, etc. Entonces, se comprende que la comunidad vegetal muestra, en general, una heterogeneidad espacial notable en los humedales y variable a lo largo del tiempo (Concepto 6.1). Lo cual es de gran interés considerar para reflejarlo y preverlo en los proyectos de restauración.

CONCEPTO 6.1.

Dinámica de la vegetación en los humedales

La vegetación, como todo el ecosistema, experimentan cambios espaciales y temporales regulados por factores externos al humedal e internos, y por la competencia intra e interespecífica y las interacciones con otros grupos tróficos de la comunidad biológica. Todo esto, la dinámica, en este caso de la comunidad vegetal, varía según el tipo y la situación del humedal en relación con los factores externos (flujos de agua, exposición al viento). Así, zonas distintas del mismo humedal pueden mostrar ocupación y distribución de la vegetación muy diferentes. Y también a lo largo del tiempo, en algunos casos estacionalmente en otros a lo largo de los años.



Ejemplos de dinámica de la comunidad vegetal: izda.) en una marisma costera atlántica (NE USA, de Valiela 1995) indicando el número de años entre transiciones de tipos de vegetación dominante; dcha.) de bosque ripario mediterráneo (de González del Tánago y García de Jalón, 1995); en ambos casos señalando también los factores reguladores principales de las transiciones entre estadios de la comunidad vegetal etiquetados por la vegetación dominante.

Conviene recordar uno de los aspectos más notables de la vegetación que se refiere a la dinámica observada en las zonas del humedal que pasan durante el año por una fase sin inundación, lo cual es común en las orillas de la mayoría de los humedales y pueden abarcar toda o gran parte de su extensión en los humedales temporales, en zonas costeras con amplitud variables de la marea, en las riberas de los ríos y en áreas geográficas con clima semiárido. Se trata del hecho de que muchas de las especies de la comunidad vegetal tendrán en estos ambientes un desarrollo a partir de semillas u otras partes de órganos que persisten en estado durmiente o de anabiosis durante los periodos sin inundación meses desfavorables, sin agua, y que rebrotan en fases favorables, cuando vuelven a inundarse o a tener humedad el suelo sin llegar a inundarse, en el caso de helófitos. El caso más extremo de éstos es el de lagunas salinas de interior (atalasohalinas) que se secan cada año o en las que la sequedad perdura varios años. En ellas, la vegetación puede rebrotar a partir de los órganos durables al inundarse de nuevo y empezar la estación favorable, menos fría y con luz abundante, y repetirse un patrón de variación de la cobertura vegetal paralelo al del aumento del nivel del agua y de la extensión de la inundación.

6.2. REPLANTAR O NO REPLANTAR

La primera cuestión respecto a recuperar la vegetación de un humedal es si se debe replantar o no vegetación para establecer una comunidad vegetal. Para responder a esta cuestión es necesario conocer el banco de semillas y su viabilidad en el sitio en restauración para poder decidir si el potencial de recuperación de la vegetación residente en el banco de semillas es suficiente para recuperar la vegetación. Obviamente, si se ha extraído la capa superficial de suelo o removido al hacer la conformación de la cubeta y orillas del humedal, ya no estarán disponibles. Guardar la tierra vegetal, capa superior del humedal para distribuirla al acabar los trabajos de remodelación física es una garantía de recuperación de la comunidad vegetal y alternativa a replantar con gran intensidad, aunque siempre se pierde potencial vegetal.

Si el banco de semillas no es suficiente para recuperar la comunidad vegetal, el siguiente paso interesante es saber si hay potencial de colonización espontánea por vegetación característica de la comunidad vegetal del humedal suficiente para recuperar la vegetación en un tiempo aceptable por el proyecto. En humedales con gran conectividad hídrica con otros sistemas acuáticos (riberas en ríos con gran hidrodinámica, marismas bien conectadas entre sí y con influencia del mar) la capacidad de colonización espontánea y desarrollo de la vegetación debería ser grande y no ser necesario replantar vegetación para recuperar en un tiempo prudencial la comunidad vegetal. En zonas ribereñas de ríos muy regulados y sin

notable dinámica hídrica y en zonas costeras también sin hidrodinámica, el potencial de colonización espontánea de la vegetación es muy escaso y convendría replantar para recuperar la comunidad vegetal.

Si se decide replantar, debe tenerse un plan de revegetación que exprese la intensidad extensión y forma de replantar. De nuevo, en humedales con cierta hidrodinámica es muy conveniente contemplar la posibilidad de adaptar la distribución de la vegetación acorde a sus topográfica y la disponibilidad de agua en el freático es muy variable, por las variaciones en altura del freático conectado a la variabilidad del caudal del río y a la heterogeneidad del sustrato, seguir un patrón regular en la distribución de la vegetación que se planta llevará a una alta mortalidad de la vegetación replantada por su gran dependencia del agua del freático.

Con apenas distancias de uno o pocos metros en sentido horizontal puede haber diferencias en altura en la superficie del terreno respecto al nivel del freático, suficiente para limitar el crecimiento de plantas replantadas en las zonas topográficas más elevadas. En estos casos será más eficiente replantar por núcleos en zonas topográficas menos elevadas, con menor distancia entre las raíces de los ejemplares replantados y el agua del freático, y que éstas plantas actúen como centros de dispersión para colonizar otras zonas menos favorables aunque se tarde más tiempo en extenderse la vegetación replantada.

Otro aspecto muy interesante y favorecedor de la replantación es la posibilidad de utilizar plantas o complementos facilitadores de la replantación. Plantar las especies objetivo al lado de plantas protectoras o nodrizas de crecimiento rápido, resistentes al viento y poco apetecibles para ramoneadores, facilitará su protección frente a animales que pudieran consumirlas o dañarlas y a la vez amortiguaran la influencia del viento, pueden servir de puntos de condensación o acumulación de humedad, y aportar materia orgánica al suelo, todo útil para aumentar la supervivencia de las plántulas de las especies objetivo de crecimiento más lento replantadas. El uso de estas plantas facilitadoras puede ser útil en zonas de ribera de ríos con cortos periodos de inundación en las que se quiera recuperar bosque de ribera, y también servirán para esponjar y a la vez sujetar el suelo de la ribera.

En cualquier caso, se deben utilizar plantas nativas, autóctonas del sitio a restaurar o su entorno próximo, tratando de huir de la provisión de plantas por viveros que no puedan certificar esta circunstancia. También considerar la posibilidad de usar en el proyecto un vivero propio, que no es difícil de constituir y mantener en el tiempo del proyecto, solo llevaría un año previo al momento de la revegetación y puede ser menos costoso y dar más experiencia y provisión de plantas a largo plazo que comprar las plantas de viveros comerciales.

Las especies leñosas tienen que replantarse durante el periodo de dormancia durante el cual la actividad de crecimiento y de circulación vascular está interrumpida.

vida, pero las especies herbáceas, aunque sean anuales, pueden replantarse en cualquier momento. Es preferible y será mucho más eficiente hacerlo al final del periodo desfavorable para el crecimiento, en condiciones de quietud o escasa agitación del agua y viento en el humedal, para evitar desenraizamiento o pérdida del material inoculado. Pero en el caso de que el proyecto esté forzado en el tiempo por cualquier causa (por ej., mala planificación, urgencia de plazos y objetivos, disponibilidad de plantas, inclemencias meteorológicas o climáticas) se puede plantar en los primeros meses del periodo de crecimiento. Habrá que tener en cuenta que las plantas, en estas condiciones, no tendrán un periodo tan largo para el crecimiento y no se desarrollarán tanto, ni en crecimiento individual ni como comunidad por su expansión radicular y de vástagos.

6.3. LA REVEGETACIÓN

Además de los aspectos relativos a la conformación del terreno, ya tratados en el capítulo anterior, los suelos muy compactados requieren de esponjamiento y aireación, quizás de avenamiento mediante algunos drenajes en el terreno para evitar encharcamientos. En cambio los sedimentos con material muy fino y con mucha materia orgánica pueden requerir extracción para evitar un exceso de condiciones reductoras cuya influencia se traslade a la parte baja de la columna de agua. Y todo ello con mayor o menor intensidad según la zona y orientación del humedal en relación con las corrientes de agua y la insolación. Así, las orillas orientadas al sur recibirán más horas de luz en el hemisferio norte, por ejemplo, y las orientadas al norte tendrán más sombra por lo que la plantación de especies de cierto porte todavía dará más sombra y dificultar el crecimiento de otras especies más bajas. De igual manera, la pendiente de la orilla tiene una influencia similar. Y ambas condiciones deben considerarse en la conformación del humedal.

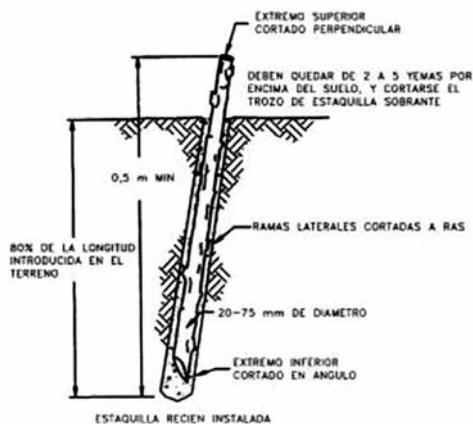
Al igual que con los nutrientes, con la salinidad un exceso o una limitación pueden ser desfavorables o favorecer a unas especies frente a otras. Por lo que será necesario reconocer las características químicas del suelo y enmendarlas si fuera necesario. En el capítulo siguiente se dan unas orientaciones generales sobre las características de tipos generales de suelo/sedimento de humedales.

Una vez reconocidas las características del sustrato y del agua en que se replantarán las especies vegetales elegidas, debe establecerse el número de individuos de cada especie a plantar. Se puede hacer por módulos si no hay una separación espacial determinante entre las especies lo cual dará diversidad al conjunto de la comunidad vegetal, con una densidad orientativa de metro y medio entre plántulas de especies leñosas. Y acompañarla de otras especies para dar esa diversidad deseada pero en menor densidad. Pero en humedales en los que las especies se dis-

tribuyan marcadamente en el espacio, lo cual es común en herbáceas, plantar una especie de forma homogénea en su sitio adecuado y separada de otra zona en la que se plante planta por ser más adecuada a esta zona, es adecuado y hasta cuatro pies por metro cuadrado pueden dar un crecimiento y propagación rápidos. Y, como tercera alternativa y muy valiosa en humedales con gran dinámica y heterogeneidad topográfica, se puede replantar por núcleos; con mayor esfuerzo replantando grupos de especies por sitios del humedal que se sepa claramente que son propicios para estas especies (puede ser para una especie) y que estos núcleos actúen como sitios a partir de donde se dispersen los órganos reproductores de las especies para colonizar otras partes del humedal aprovechando la dinámica hídrica y otros agentes dispersores.

La técnica de plantación puede ser diferente según el material a utilizar, que también estará en relación con las condiciones del sitio y la disponibilidad de material. La siembra directa de semillas es útil para herbáceas, ya que su germinación es rápida y pueden extender su cobertura fácilmente sin o hay afecciones negativas por inclemencias meteorológicas, hídricas o ramoneo. Una vez hecha la siembra, manual o mecánica, se suele cubrir con una capa protectora (usualmente biodegradable y a modo de malla que permite salir a los tallos) para evitar incidencias. Para especies leñosas, sin descartar semillas si están disponibles y se trata de gran extensión, es más frecuente partir de cepellones con un sistema radical desarrollado, lo cual garantiza un cierto porte y enraizamiento inicial, pero requiere asegurarse que se dan buenas condiciones para su crecimiento por lo que la plantación debe hacerse en tiempo y lugar adecuados. Para esto deben prepararse el sitio concreto de plantación mediante un ahoyado adecuado a la altura y tamaño de la parte radical del cepellón, teniendo en cuenta que si el suelo es desfavorable para que se desarrolle la vegetación plantada se deben espaciar más los ejemplares (ocupando entre 1 y 4 m² por cepellón) y excavando algo más para facilitar su acceso al agua freática (de 40 cm a 1 metro orientativamente según los condicionantes citados). La plantación de estaquillas o esquejes obtenidos de las mismas plantas del sitio que se restaura es el método más barato y puede ser el más exitoso para especies leñosas o arbustivas, ya que se parte de material autóctono. Para ser más eficiente debe tomarse el material —ramas jóvenes de un año cortadas dejando en los extremos nudos, y relativamente cortas 40-80 cm, con algunas yemas por encima del suelo— en otoño o invierno, se pueden plantar directamente o en grupo usando bandejas, por ejemplo, para mantenerlas un tiempo protegidas y mantengan la cohesión entre sí y con el terreno, y manteniendo la orientación que tenían en el árbol original, por esto y para facilitar la penetración en el terreno y el crecimiento radical es conveniente hacer el corte segado. También se puede impregnar esta parte inferior con material que evite la pérdida de humedad, como cera, mientras se manipula o con hormonas líquidas que favorezcan el enraizamiento.

Fig. 6.2. Representación de la implantación de un esqueje con las partes interesantes (izda.) y al tiempo de brotar las primeras ramas después de haber crecido las raíces (dcha.).



Las especies de helófitos emergentes de zonas palustres, más propias de suelos que pueden estar saturados de agua e inundados, pueden plantarse fácilmente a partir de rizomas. Estos deben estar en buen estado: ser de color claro, sin signos de oxidación o deterioro; sin aberturas ni chafados para conservar su interior aerrenquimatoso, en buen funcionamiento para el transporte de gases, con raíces también claras que aseguren el aporte de oxígeno a su entorno y la absorción de compuestos minerales, y de longitud que abarque dos entrenudos para que sean activos y no entre aire o agua a su interior. Es conveniente que en el momento y en el periodo siguiente a la plantación

Para las especies leñosas será habitual poner protectores a los retoños plantados para evitar daños por el viento, animales salvajes o ganadería, que debe regularse antes de que esté bien constituida la comunidad vegetal y para evitar compactar el suelo. Para especies herbáceas ya se ha mencionado que se pueden usar mallados que permitan su emergencia y crecimiento y retengan suelo y raíces. Y para otras especies de menor porte, incluso hasta macrófitos sumergidos, debe tenerse prevista la reposición de marras si la supervivencia y expansión de la vegetación no es la adecuada a las prescripciones del proyecto.



Fig. 6.3. Arriba: Rizomas del helófito *Phragmites australis* con brotes de nuevos tallos (izda.) y raíces (centro); y propagación vegetativa por los rizomas (dcha.). Centro: limitación del crecimiento de *Phragmites* por la salinidad del freático (izda); camas de tierra preparadas para implantación de plántulas de manglar (centro); debe tenerse cuidado para disponer las plántulas con las raíces accesibles al agua y en evitar el aumento de salinidad del suelo (dcha.). Abajo: Esquejes en la orilla del río Flumen (Huesca, España) y árboles plantados y protegidos con entubado (izda.); lirios plantados en las orillas del río Flumen y árbol plantado y protegido con entubado (dcha.).

6.4. CONTROL DE LA PROLIFERACIÓN DE LA VEGETACIÓN

En numerosas ocasiones, el problema de los humedales con respecto a la vegetación es que prolifera en exceso y altera su estado ecológico, el de todo el ecosistema, degradándolo. Hay numerosos casos: la proliferación de plantas flotantes que, ocupando la superficie del humedal, desfavorecen el intercambio gaseoso con la atmósfera y, al degradarse, se acumula su materia orgánica en el lecho del

humedal descomponiéndose y consumiendo oxígeno; la expansión de helófitos cubriendo toda la columna de agua en toda la extensión de un humedal; la proliferación de algas filamentosas que se acumulan en superficie, alrededor de los tallos de la vegetación, sobre el lecho del humedal, la proliferación del fitoplancton en la columna de agua del humedal interrumpiendo la penetración de la luz, evitando la transparencia del agua e impidiendo el crecimiento de los macrófitos sumergidos.

Antes de sugerir algunas soluciones para controlar la proliferación de la vegetación, debemos recordar que el objetivo de los proyectos de restauración debe ser recuperar el funcionamiento de los humedales como ecosistemas, lo cual llevará incluido recuperar su estructura física y biológica, y que en numerosas ocasiones el origen de la degradación de los humedales está fuera del humedal, por lo que su restauración debe comenzar por subsanar el origen de la degradación y no los efectos. Y la proliferación de la vegetación suele ser el efecto no el origen, no la causa, de la degradación del humedal.

Una vez subsanado el origen de la degradación del humedal, el proyecto puede que incluya eliminar o regular la proliferación de la vegetación no deseada. Para esto, existen variadas actuaciones según el tipo de vegetación que se quiera controlar. El fitoplancton es casi imposible de controlar en humedales extensos. El origen del problema puede ser la entrada excesiva de nutrientes de la cuenca o ya del sedimento a la columna de agua si se ha acumulado excesiva materia orgánica en el sedimento. Así, reducir la entrada de nutrientes del exterior y/o extraer la capa superficial del sedimento, además de aumentar, si se puede, la renovación del agua, pueden ser útiles. En pequeñas balsas o estanques, cubrir su superficie con una película que evite el paso de la luz evitará su crecimiento, pero debe ir acompañado de la renovación del agua para evitar que el fitoplancton sedimente sobre el lecho. pero tendrá que ir acompañado de la extracción manual o mecánica porque quedan enganchados a tallos de la vegetación y sobre el fondo del humedal. Lo mismo puede ser útil para eliminar algas filamentosas, macrófitos sumergidos y flotantes, enraizados o no. Pero para los enraizados puede ser necesaria la extracción activa, manual o mecánica.

El control de los helófitos es eficaz si se hace antes de que empiecen a brotar los tallos nuevos del año. Puede hacerse manteniendo el nivel del agua por encima de los rizomas de los que brotan, y acompañado de aplastamiento de los tallos y rizomas para que al romperse los tejidos queden inundados y no sean viables. Aun así, el control no será completo porque pueden emerger de otros trozos de rizomas no dañados. Lo que es desaconsejable es quemar los helófitos. Quemar la vegetación es una práctica que contribuye, aunque sea en pequeña extensión, a aumentar los gases de efecto invernadero en la atmósfera; y los helófitos rebrotan con mayor intensidad y en mayor número porque no tienen limitación de la luz, al

eliminarse los tallos del año anterior que pueden quedar en pie. La eliminación de helófitos emergentes puede hacerse a mano en pequeña extensión (era una práctica frecuente para utilizar los tallos de estas plantas para diversos fines) o con maquinaria especialmente adaptada con sierra cortadora (práctica también habitual en varias zonas de Europa del centro en las que se extraen y comercializan los tallos para, principalmente, tejados de casas y entramados protectores). El pastoreo de la vegetación en humedales con animales foráneos, además de significar la introducción de una especie exótica, no autóctona, altera la trama trófica del ecosistema, y puede alterar con su pisoteo y el trájín de materia orgánica las condiciones ambientales del humedal, por lo que su uso para controlar la vegetación no está justificada en el contexto de proyectos de restauración ecológica.

Referencias citadas

- CABEZAS A., E. GONZALEZ, B. GALLARDO, M. GARCIA, M. GONZALEZ, F.A. COMIN (2008). Effects of hydrological connectivity on the substrate and understory structure of riparian wetlands in the Middle Ebro. River (NE Spain): Implications for restoration and management. *Aquatic Sciences* 70: 361-376.
- CIRUJANO, S., A. MECO, K. CEZÓN (2011). Flora Acuática: Macrófitos. Taxagua (Tesauro Taxonómico para la clasificación del estado ecológico de las masas de agua continentales). MAGRAMA.
- COMÍN, F.A. 2002. Restauración ecológica: teoría versus práctica. *Ecosistemas* XI (1): 1-3.
- COMÍN, F.A. *et al.* 2005. Integrating Wetland Restoration: Scientific-Technical, Economic, and Social Perspectives. *Ecological Restoration* 23(3): 181-185.
- COMÍN F.A., R. SORANDO, N. DARWICHE-CRIADO, M. GARCÍA, A. MASIP (2014). A protocol to prioritize wetland restoration and creation for water quality improvement in agricultural watersheds. *Ecological Engineering* 66: 10-18.
- Costanza, R. R. d'Arge,, R. de Groot, S. Farberk, M. Grasso, B. Hannon, K. Limburg I, S. Naeem, R. V. O'Neill, J. Paruelo, R. G. Raskin, P. Sutton, M. van den Belt (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387: 253-260.
- COSTANZA, R., R. DE GROOT, P. C. SUTTON, S. VAN DER PLOEG, S. ANDERSON, I. KUBISZEWSKI, S. FARBER and R. K. TURNER (2014). Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change* 26: 152-158.
- EADES P., L. BARDSLEY, N. GILES, A. CROFTS (Eds. 2005). *Wetland Restoration Manual*. Wildlife Trusts, Newark, U.K.
- GALLARDO B., S. GASCÓN, M. GONZÁLEZ-SANCHÍS, A. CABEZAS, F. A. COMÍN (2009). Modelling the response of floodplain aquatic assemblages across the lateral hydrological connectivity gradient. *Marine and Freshwater Research* 60: 924-935.
- GONZÁLEZ DEL TÁNAGO, M., D. GARCÍA DE JALÓN (1995). *Restauración de ríos y riberas*. Fundación Conde del Valle de Salazar.
- HOWELL, E.A., J.A. HARRINGTON, S.B. GLASS (2012). *Introduction to restoration ecology*. Island Press.
- MARTÍN-QUELLER E., D. MORENO-MATEOS, C. PEDROCCHI, J. CERVANTES, G. MARTÍNEZ (2010). Impacts of intensive agricultural irrigation and livestock farming on a semi-arid Mediterranean catchment. *Environ Monit Assess.* 167 (1-4): 423-35.
- MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT (2005). *Ecosystems and Human well being: synthesis*. Island Press.

- MITSCH, W.J., S.V. JORGENSEN (2004). *Ecological engineering and ecosystem restoration*. J. Wiley & Sons.
- MITSCH, W.J., J. G. GOSSELINK (2007). *Wetlands*. J. Wiley & Sons.
- MORENO-MATEOS D., M. E. POWER, F. A. COMÍN, R. YOCKTENG (2012). Structural and Functional Loss in Restored Wetland Ecosystems. *PLoS Biology* 10:1 | e1001247.
- PERROW, M.R., A.J. DAVY (2002). *Handbook of Ecological Restoration*. Cambridge University Press.
- REVENGA, C., J. BRUNNER, N. HENNINGER, K. KASSEM and R. PAYNE (2000). *Pilot Analysis of Global Ecosystems: Wetland Ecosystems*. World Resources Institute, Washington, D.C.
- RUSSI D., TEN BRINK P., FARMER A., BADURA T., COATES D., FÖRSTER J., KUMAR R. and DAVIDSON N. (2013) *The Economics of Ecosystems and Biodiversity for Water and Wetlands*. IEEP, London and Brussels; Ramsar Secretariat, Gland.
- TIMMS, B. 1992. *Lake geomorphology*. Gleneagles Publishing, Adelaide, Australia.
- SER Primer. Grupo de trabajo sobre ciencia y política (2004). *Principios de SER International sobre la restauración Ecológica*. Society for Ecological Restoration.
- VALIELA, I. (1995). *Marine Ecological Processes*. Springer.
- WATSON, R.T., I.R. NOBLE, B. BOLIN, N.H. RAVINDRANATH, D.J. VERARDO, D.J. DOKKEN (2000). *Land use, land-use change and forestry*. (Special Report of the IPCC) Cambridge University Press.



FRANCISCO A. COMÍN (Teruel, España) es ecólogo, doctorado en la Universidad de Barcelona, España, en 1981. Discípulo del Prof. Dr. Ramón Margalef. Profesor de Ecología en la Univ. de Barcelona (1983-2002); profesor invitado del CINESTAV-IPN (Mérida, Yucatán, México) y del Master en Biodiversidad, Funcionamiento y Gestión de Ecosistemas de la UPV-EHU en Bilbao; Profesor de Investigación del Consejo Superior de Investigaciones Científicas en el Instituto Pirenaico de Ecología-CSIC (Zaragoza-Jaca, <http://www.ipe.csic.es>) desde 2002. Especializado en el estudio y restauración de humedales y en la evaluación de servicios de los ecosistemas y su aplicación a la restauración ecológica a escala de cuenca hidrográfica y su integración en el desarrollo rural. Ha sido miembro del Comité de Dirección de la Society for Ecological Restoration (2005-2009) y director científico del proyecto Life CREAMAgua (2011-2014). Autor de 100 artículos científicos en revistas indexadas, editor de 5 libros, y organizador de las 1ª y 4ª World Conference on Ecological Restoration (Zaragoza, España, 2005; Mérida, México, 2011) y del 9º European Wetland Congress (Huesca, España, 2014).

Este libro es un manual básico para la planificación y la realización de la restauración de humedales con perspectiva y escala de cuenca hidrográfica, particularmente adecuado para zonas con usos agrícolas intensivos de regadío y en regiones mediterráneas. Contiene las líneas maestras para la preparación, redacción y realización de proyectos de restauración, y los elementos esenciales para el dimensionamiento, diseño y restauración de humedales. Ha surgido y es parte del Proyecto Life CREAMAgua (EU Life09 ENV/ES/00431) coordinado y realizado por la Comarca de Los Monegros en Huesca, España, que tuvo como objetivos demostrar la eficiencia de la creación y restauración de humedales para la mejora de la calidad del agua, de la biodiversidad y el empoderamiento socio-ecológico en territorios rurales.



Proyecto EU Life09 ENV/ES/000431 (2011-2014)

Creación y restauración de ecosistemas acuáticos para la mejora de la calidad del agua y de la biodiversidad en cuencas agrícolas