

*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Florestas
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

Serviços Ambientais em Sistemas Agrícolas e Florestais do Bioma Mata Atlântica

*Lucilia Maria Parron
Junior Ruiz Garcia
Edilson Batista de Oliveira
George Gardner Brown
Rachel Bardy Prado
Editores Técnicos*

Embrapa
Brasília, DF
2015

Aspectos hidrológicos e serviços ambientais hídricos

Lafayette Dantas da Luz

Resumo: Este capítulo discute os serviços ambientais hídricos, aqueles decorrentes e dependentes das condições dos corpos hídricos e que resultam em benefícios ao ambiente e às comunidades humanas e não humanas. A variabilidade natural dos regimes hidrológicos é enfatizada como essencial para o provimento, direto ou indireto, destes serviços. Alguns destes são destacados, assim como a limitação dos serviços providos em decorrência de alterações antrópicas impostas aos corpos de água e a seus regimes hidrológicos.

Palavras-chave: hidrologia, regime hidrológico, variabilidade, conectividade, fragmentação.

Hydrological aspects and hydrologic ecosystem services

Abstract: This chapter discusses the hydrological ecosystem services, i.e. the services derived from and dependent on the condition of water bodies, which result in benefits to the environment and to human and non-human communities. The natural variability of hydrological regimes is emphasized as essential to the direct or indirect provision of these services. Some of these services are highlighted as well as the limitation in the provision of these services due to anthropogenic changes imposed on water bodies and their hydrological regimes.

Keywords: hydrology, hydrological regime, variability, connectivity, fragmentation.

1. Introdução

Serviços ambientais hídricos são aqueles decorrentes da existência e da dinâmica dos corpos hídricos e que propiciam benefícios diretos e indiretos, assim como recursos necessários às atividades e condições de vida e bem-estar humanos (BRAUMAN et al., 2007; FALKENMARK; ROCKSTRÖM, 2004; MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT, 2005).

Tais serviços também beneficiam a flora e a fauna dos ecossistemas, beneficiando indiretamente a espécie humana, embora nem sempre assim reconhecido. Os ciclos biológicos dos organismos e a estruturação de comunidades e populações dependem ou são influenciados pelo comportamento e ocorrência das águas, ao lado de outros fatores como a sua composição química e condições físicas. Ciclos de transformação da matéria orgânica e de compostos químicos dependem ou são influenciados pelas condições físicas, químicas e dinâmicas da água, potencializando ou inibindo-os. Os processos geomorfológicos têm nas condições mecânicas de tensões de cisalhamento, desagregação, transporte e

de deposição de sedimentos proporcionadas pelas águas, um fator essencial para a sua dinâmica e balanço de massa (ARTHINGTON et al., 2010; BUNN; ARTHINGTON, 2002; NAIMAN et al., 2008).

Os rios têm como característica hidráulica principal a predominância do fluxo em seu sentido longitudinal, diferenciando-se assim de outros corpos hídricos como lagos, reservatórios e aquíferos. Os escoamentos nos canais fluviais, assim como demais variáveis que integram o seu ciclo hidrológico, experimentam variabilidades no espaço e no tempo que devem ser consideradas, quando se deseja compreender as características dos ecossistemas e seus componentes ou, por outro lado, quando se busca identificar serviços ecossistêmicos que decorrem das condições hidrológicas.

Este capítulo discute a importância da variabilidade natural dos regimes hidrológicos para o provimento dos serviços ambientais hídricos, relaciona essa variabilidade com

os serviços hídricos de maior importância e, por fim, destaca a limitação do provimento de tais serviços como consequência de intervenções e alterações antrópicas impostas aos corpos hídricos e a seus regimes hidrológicos.

2. Variabilidade dos processos hidrológicos

A hidrologia se ocupa de explicar, medir e caracterizar os reservatórios hídricos, assim como os processos de transferência da água entre eles, ao longo do tempo. Reservatórios hídricos compreendem a atmosfera, as diversas formas de acúmulo nas superfícies do planeta (oceanos, lagos, rios, áreas úmidas e geleiras), bem como em subsuperfície (aquíferos, aluviões e solos). Embora variáveis também sejam os volumes armazenados, os processos de transferência entre reservatórios constituem as variáveis hidrológicas: precipitação, interceptação vegetal, infiltração, percolação, evaporação, transpiração, evapotranspiração e escoamentos superficial, subsuperficial e subterrâneo.

Os volumes acumulados naqueles reservatórios e a umidade que com certa frequência ocorrem em certos domínios espaciais da atmosfera, superfície ou subsuperfície, definem condições que são favoráveis, limitantes ou desfavoráveis para determinados organismos e reações físicas e químicas. Os processos de transferência entre reservatórios, já mencionados, criam também condições ambientais para potencializar ou inibir processos bióticos ou abióticos, similarmente.

Rios permanentes, característicos do bioma Mata Atlântica, têm condições diferentes dos rios temporários para os processos biogeoquímicos. Similarmente, rios alimentados predominantemente por águas pluviais mostram comportamento diferenciado daqueles mantidos por fluxos de base, com consequências sobre aqueles processos. A própria diferenciação entre os regimes de chuvas que mantém os escoamentos nas bacias de dois rios podem resultar em potencialidades e características distintas para os processos ambientais associados aos mesmos. Nesse sentido, a variação de quaisquer fatores ambientais, climáticos ou físicos, criará condições específicas para cada bacia hidrográfica e, logo, para seus cursos de água e para a sua biota. Os fatores ambientais fundamentais que atuam definindo as características hidrológicas de uma bacia hidrográfica podem ser sintetizados em: clima, geologia, solos e vegetação. Permeando esses fatores, há o aspecto da variabilidade ou dinâmica dos processos. Alguns desses apresentam-se com características mais determinísticas e previsíveis, outros se comportam de forma mais errática e imprevisível.

A variabilidade das vazões fluviais é reconhecida como aspecto essencial para a biodiversidade e vitalidade dos ecossistemas. Ela define a estrutura e funções dos ecossistemas aquáticos e influencia a adaptação de espécies aos ambientes aquáticos e ripários (BUNN; ARTHINGTON, 2002; LYTLE; POFF, 2004; NAIMAN et al., 2008; POFF et al., 1997; RICHTER et al., 1996). Os regimes fluviais apresentam padrões que se relacionam fortemente com as dimensões das bacias hidrográficas e com as condições geográficas destas no que se refere ao clima, geologia, relevo, cobertura vegetal e, ainda, às estruturas artificiais construídas pelo homem. Tanto os momentos de cheia ou úmidos e os de vazante ou secos, desempenham papéis fundamentais para os processos abióticos e bióticos. Nessas ocasiões, situadas dentro da janela temporal anual, eventos hidrológicos referentes às vazões fluviais ocorrem produzindo hidrogramas variáveis quanto às magnitudes, durações e frequências de curto prazo. Estes fluviogramas indicam condições (ou eventos) hidrológicas e hidráulicas particulares, associadas a certas funções ambientais e ecológicas. Algumas destas condições são retratadas na Figura 1, considerando por sua vez a situação hidroclimática do ano tais como úmido, médio ou seco.

Os elementos destacados na Figura 1 diferenciam-se ano a ano quanto às suas características específicas, ou fisionomias, mas em quaisquer dos casos proporcionam, em geral e no mínimo, os serviços ecológicos indicados a seguir (ACREMAN; FERGUSON, 2010; COLLISCHONN et al., 2006; NAIMAN et al., 2008):

Vazão mínima em cada mês: manutenção de quantidade mínima de habitat aquático e da conectividade longitudinal (em rios perenes); garante exposição de parcelas do substrato ao ar (propiciando aeração, alimento e reprodução de espécies); controle da composição de espécies da flora aquática;

Máxima vazão durante a vazante: manutenção do habitat de espécies nativas e da qualidade da água (especialmente temperatura e oxigênio dissolvido); mantém mais elevado o nível freático do aquífero adjacente;

Picos de vazão durante a vazante: umedecimento de áreas expostas; remobilização de materiais e organismos sésseis;

Pequenas cheias no início do período úmido: revolvimento e suspensão de material de fundo (e.g. sedimentos e nutrientes), estímulo ou 'gatilho' para ciclos de vida;

Cheias médias ou vazões altas: reconexão e renovação das águas de lagoas marginais e áreas úmidas; atuação na

seleção de materiais que definem o tipo de sedimentos do substrato; controle de plantas terrestres invasoras; estímulo inicial a espécies migradoras;

Cheias extremas: remodelação da calha do rio e ambientes ripários; inundação de lagoas marginais e várzeas; transporte e deposição de sedimentos e nutrientes nas planícies de

inundação; oportunizam habitat para reprodução de peixes e alimentação de peixes e aves; dispersão de sementes, propágulos, óvulos e organismos sésseis; migração de espécies de peixes; controle de espécies invasoras e exóticas da flora; definem o gradiente (estrutura e composição) da flora ripária.

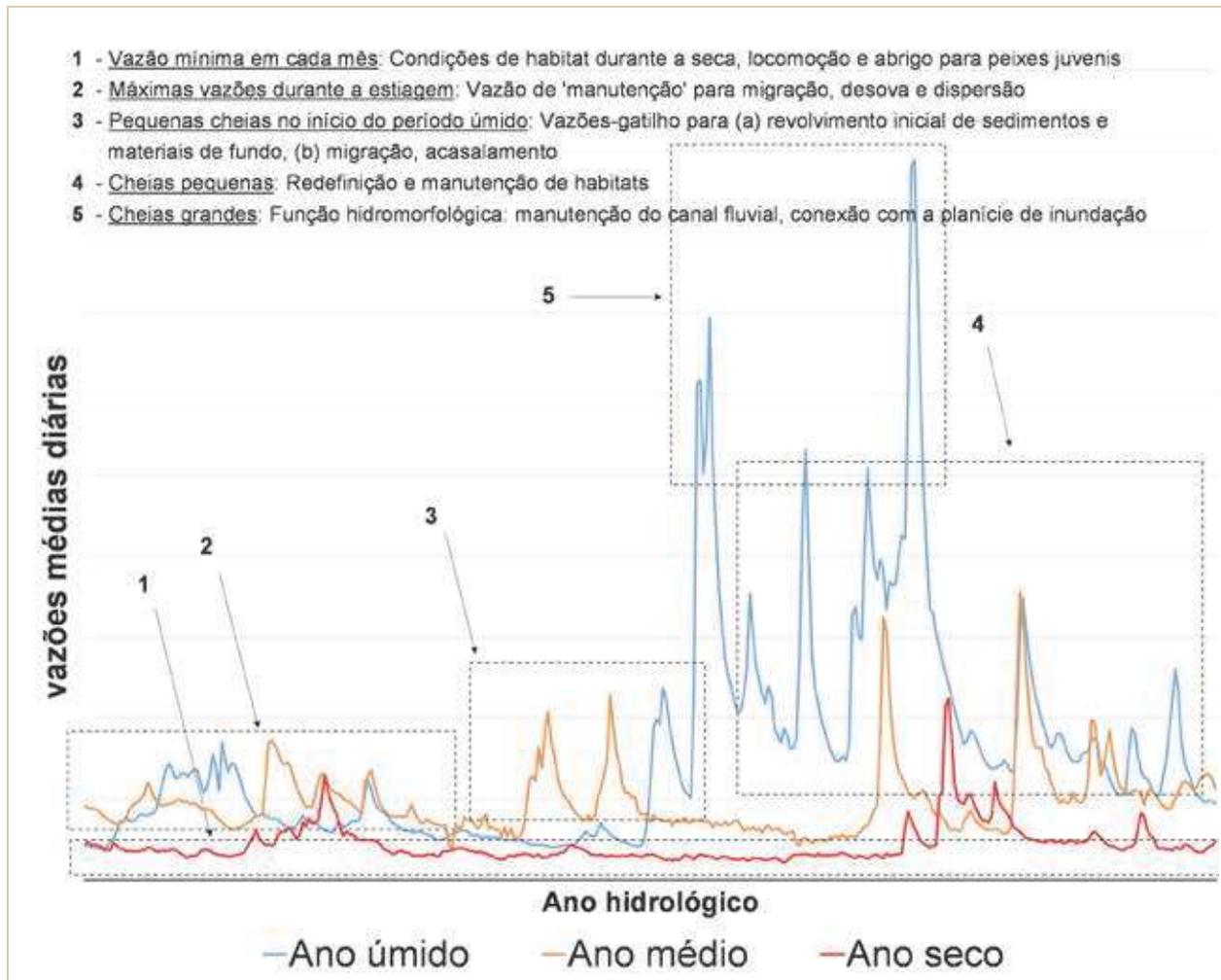


Figura 1. Exemplos de eventos hidrológicos e funções ecológicas e ambientais (Dados fluviométricos da Estação Balsa do Paranapanema, código 65515000, Rio Paranapanema. Fonte: Hidroweb/ANA).

Cinco aspectos fundamentais relacionados aos fluviogramas influenciam os processos dos ecossistemas aquáticos e transicionais: sazonalidade, magnitudes, durações, frequências e taxas de alteração de condições hidrológicas. Tais aspectos atuam em conjunto e assim definem o regime hidrológico do curso de água, contribuindo para os serviços ambientais que promovem:

a) *sazonalidade*, ou o momento em que ocorrem certos eventos hidrológicos, constitui um aspecto regulador dos ciclos ambientais e biológicos, efetuando uma sincronia entre processos que são interdependentes;

b) *magnitudes* desempenham papel fundamental quanto ao alcance volumétrico, espacial e dinâmico do evento hidrológico e de seus consequentes efeitos ambientais, mas que também dependem intimamente do intervalo de tempo com que ocorrem, e diz respeito às durações;

c) *duração* é o intervalo de tempo com que dadas condições de descarga e seus efeitos imediatos permanecem;

e) *frequências* denotam o quão habitual ou repetitivamente um evento ocorre (os eventos hidrológicos em cursos de água com nenhuma ou muito pouca intervenção e controle humanos

têm a frequência de seus eventos bastante dependente das características do clima local);

f) *taxas de ascensão ou recessão* (e suas reversões) indicam o quão rápido as vazões passam de uma magnitude ou tendência a outra. Em geral, bacias que naturalmente apresentam comportamentos abruptos de seus escoamentos têm nesses eventos um grande potencial de arraste e, por outro lado, em função da curta duração dos eventos oferece menores possibilidades para processos que requeiram maior tempo.

Os ecossistemas respondem em escalas diversas aos estímulos e condições ambientais. Também, o tempo de resposta é frequentemente defasado com relação à ocorrência do fator causal. Assim, ciclos hidrológicos interanuais definem períodos mais longos em condição seca ou úmida ou, por exemplo, de águas mais altas e águas mais baixas. Identificar a periodicidade de condições hidrológicas de longo prazo possibilita a avaliação de potenciais condições e características dos ecossistemas. Como exemplo, referindo-se à variação de níveis de um corpo de água (lagoa, lago, reservatório, rio ou estuário) tem-se nas suas margens o local sensível e dinâmico que responde à variação linimétrica. As variações, ou ciclos, de curto prazo, isto é, sazonais, influenciam na estrutura e composição da vegetação marginal e ripária, assim estabelecendo um gradiente (ecótono). Similarmente às variabilidades intra-aneais, os ciclos interanuais também apresentam magnitudes e durações que podem se distinguir em cada ciclo. Ainda com referência ao exemplo anterior, buscando ilustrar a influência das ciclicidades na formação dos ecótonos ripários e considerando essas magnitudes e durações, observa-se que (NAIMAN et al., 2008; NAIMAN; DECAMPS, 1990; WARD et al., 2002):

a) a magnitude das oscilações de curto prazo define a extensão (largura) do ecótono;

b) a duração e frequência de curto prazo definem a composição do ecótono;

c) a magnitude das oscilações de longo prazo define o alcance da migração do ecótono;

d) a duração e frequência das oscilações de longo prazo definem a viabilidade/potencialidade das migrações.

Diversas metodologias de avaliação e classificação das alterações hidrológicas têm sido recorrentemente empregadas e presentes na literatura, a saber: *Indicators of Hydrologic Alteration* - IHA (RICHTER et al., 1996; THE NATURE CONSERVANCY, 2009); *Range of Variability Approach* - RVA (RICHTER et al., 1997); *Aggregate Index*

of Hydrological Alteration - AIHA (BIZZI et al., 2012; DITTMANN et al., 2009); *Index of Daily Hydrological Alteration* - IDHA (BIZZI et al., 2012); *Hydrologic Index Tool* - HIT (NATIONAL HYDROLOGIC ASSESSMENT TOOL, 2014) e *Environmental Flow Component* - EFC (MATHEWS; RICHTER, 2007). Todas estas metodologias de avaliação e classificação das alterações hidrológicas têm em comum a necessidade do uso de dados de vazão (ou outro dado) referentes a um período de pré-impacto (ou de referência) e um de pós-impacto para executar tais análises. Dentre aquelas metodologias, o IHA (RICHTER et al., 1996) tem se destacado para tal finalidade. O IHA possibilita destacar mudanças na distribuição temporal das vazões, além de variações nas características de forma dos hidrogramas, as quais são pontos-chave nas avaliações das alterações hidrológicas. As demais metodologias mencionadas são essencialmente variações desta.

3. Serviços ambientais hídricos

O relatório Millennium Ecosystem Assessment (2005), um esforço internacional visando disseminar a consciência e compreensão sobre a dependência da sociedade sobre os ecossistemas e, atualmente, referência acerca de serviços ambientais, sugere dividi-los em quatro categorias (BRAUMAN et al., 2007), conforme descrito no capítulo 1.

A espécie humana sempre se beneficiou da natureza na forma de bens e serviços diversos. Muitos desses benefícios derivam dos corpos d'água e podem assim ser referidos como serviços ambientais hídricos. Dentre estes, pode-se citar a provisão de água para abastecimento, geração de energia, usos industriais e irrigação agrícola. Também, como serviços ambientais hídricos de outra ordem, pode-se citar a amenização ou regulação climática, a autodepuração das águas, o controle da erosão, dentre outros (TERRADO et al., 2014). Na Tabela 1 são apresentados os serviços ambientais hídricos (benefícios humanos e outros) mais comuns e a sua tipologia. Cada serviço hidrológico requer, ou é definido, por atributos (ou requisitos) de quantidade, qualidade e momento (instante) de fluxo/ocorrência, conjuntamente. As possíveis ou mais usuais variáveis hidrológicas associadas a cada atributo são indicadas como métricas destinadas a indicar o potencial de provimento de dado serviço. Em situações em que um dos atributos não é atendido da forma requerida pelo beneficiário, o serviço hidrológico se torna comprometido ou inviabilizado. Além dos atributos anteriormente referidos, Brauman et al. (2007) acrescentam

ainda o atributo de localização, o qual não foi incluído na Tabela 1, mas que, certamente, é fundamental a todos os casos. Esses autores sugerem que o efeito mais importante dos ecossistemas na localização de água é a partição da precipitação em água superficial e água subterrânea. Tais variáveis ou métricas podem ser obtidas por procedimentos já consagrados de medição de informação hidroclimatológica em estações climatológicas e fluviométricas. Também, no caso de concentrações (de substâncias, compostos ou partículas), técnicas e procedimentos consagrados de amostragem e análises *in situ* ou laboratoriais devem ser empregados a fim de obtenção de valores dos parâmetros a serem empregados como métricas indicadoras dos serviços ambientais. O uso de imagens de satélite e técnicas de geoprocessamento são ferramentas adicionais, por exemplo,

para identificação dos solos e do uso e cobertura da terra, assim como delimitação de áreas inundáveis.

Como referido anteriormente, as condições hidrológicas dependem de um arranjo de condições das bacias hidrográficas, como clima, topografia e uso e cobertura da terra, assim como os serviços ambientais hídricos possuem a mesma dependência. As alterações e os impactos impostos pelas atividades humanas ao meio ambiente refletem sobre os serviços ambientais disponíveis, logo estes se condicionam ao aspecto positivo ou negativo das intervenções humanas, refletindo-se da mesma forma.

O conjunto de serviços ofertados por um ecossistema depende da sua conservação, havendo relação estreita entre a saúde ambiental e a saúde humana, a sua segurança e o seu bem-estar (BRAUMAN et al., 2007).

Tabela 1. Serviços ambientais hídricos, classificação, variáveis hidrológicas ou métricas e seus atributos.

Classificação do serviço	Serviços ambientais hídricos	Variáveis hidrológicas / Métricas (dimensões)		
		Tipo de atributos principais		
		Quantidade	Qualidade	Instante/momento
Serviços de provisão	Suprimento de água doce	Vazões ($L^3 T^{-1}$)	Concentrações ($M L^{-3}$), cor, turbidez	Sempre
	Produção de alimentos	Vazões ($L^3 T^{-1}$), umidade do ar e solos (%)	Concentrações ($M L^{-3}$)	Meses secos do ano
	Madeira e fibras	Precipitação (L ou L^3)	-	Sempre ou dados meses do ano
	Geração de energia	Vazões ($L^3 T^{-1}$) e energia hidráulica (L)	-	Sempre
	Transporte	Níveis limimétricos (L)	-	Sempre
Serviços de regulação	Controle de vetores patogênicos	Vazões ($L^3 T^{-1}$)	Concentrações ($M L^{-3}$)	Dados meses do ano
	Mitigação de danos hídricos	Volumes (L^3), níveis limimétricos (L), áreas inundáveis (L^2)	-	Dados momentos do ano e com certas durações (dias, semanas)
	Autopurificação das águas	Volumes (L^3), vazões (L^3/T)	Concentrações ($M L^{-3}$), temperatura	Sempre
	Estabilização climática	Umidade do ar (%)		Meses secos do ano

Tabela 1. Continuação.

Classificação do serviço	Serviços ambientais hídricos	Variáveis hidrológicas / Métricas (dimensões)		
		Tipo de atributos principais		
		Quantidade	Qualidade	Instante/momento
Serviços culturais	Recreação, estética, intelectual, espiritual	Vazões ($L^3 T^{-1}$), volumes (L^3), níveis linimétricos (L), áreas inundáveis (L^2)	Concentrações ($M L^{-3}$)	Sempre
	Formação de solos	Precipitação (L ou L^3), umidade do solo (%)	-	Meses úmidos do ano
Serviços de apoio ou suporte	Fotossíntese	Evapotranspiração (L ou L^3)	-	Sempre, com ênfases sazonais
	Ciclagem de nutrientes	Vazões ($L^3 T^{-1}$)	Concentrações ($M L^{-3}$), temperatura	Sempre
	Propagação de espécies	Vazões ($L^3 T^{-1}$), velocidade ($L T^{-1}$)	-	Ênfases sazonais (meses) conforme espécies
	Habitat	Vazões ($L^3 T^{-1}$), velocidades ($L T^{-1}$), volumes (L^3), níveis linimétricos (L), áreas inundáveis (L^2)	Concentrações ($M L^{-3}$), temperatura, turbidez	Ênfases sazonais (meses) conforme espécies
	Diversidade biológica aquática	Vazões ($L^3 T^{-1}$), volumes (L^3), níveis linimétricos (L), áreas inundáveis (L^2)	Concentrações ($M L^{-3}$), temperatura, turbidez	Ênfases sazonais (meses) conforme espécies
	Recarga hídrica	Precipitação (L ou L^3), usos do solo (%)	Concentrações ($M L^{-3}$)	Meses úmidos do ano

4. Resistência e resiliência dos ecossistemas.

Os ecossistemas devem persistir em longo prazo a fim de possibilitar o provimento de serviços ecológicos. A persistência dos mesmos depende de dois aspectos fundamentais: da sua **resistência** e da sua **resiliência**. Estes se relacionam aos aspectos da variabilidade hidrológica referida anteriormente, dentre outros fatores, que podem ocorrer como estímulo ou como limitante, a depender de suas características. Esta

se diferencia entre bacias hidrográficas e em uma mesma bacia há variações espaciais e temporais. Dessa variabilidade hidrológica, em conjunto com outros fatores que vão além do escopo deste texto, resulta a complexidade dos sistemas biológicos.

Os ecossistemas adaptam-se às condições mais frequentes, climáticas e hidrológicas. Eventos que fujam à normalidade, isto é, que sejam menos frequentes, poderão, a depender de

suas magnitudes e durações, serem tolerados ou absorvidos, e não representar estresse excessivo ao equilíbrio dinâmico do ecossistema. Nestes casos, o ecossistema se recupera de possíveis efeitos do evento em questão, o que denota ser resistente aos seus efeitos e apresentar resiliência. Em eventos consideráveis como extremos, ainda mais raros, o ecossistema poderá se ressentir de tal forma de seus efeitos que venha a atingir o limiar de equilíbrio, ou seja, ultrapassando a sua capacidade de resistência. Caso não consiga mais retornar às condições anteriores ao evento extremo, ou se a recuperação for apenas parcial, indica que perdeu sua resiliência, ou que a mesma foi ultrapassada (BROCK et al., 2003; FOLKE et al., 2004; GRIMM, 1992; LAKE, 2007).

5. Conectividade e fragmentação dos ecossistemas

Outros aspectos caracterizadores da integridade de um ecossistema, condição para provimento de seus serviços, consistem na sua **conectividade** e **não fragmentação** (ou **continuidade**). A ligação física entre corpos hídricos, proporcionando fluxo de água entre esses, é aqui entendida como conexão. Os fluxos biogeoquímicos, pensados como a ocorrência de processos ambientais e ecológicos entre corpos hídricos ou seus subsistemas, com ou sem participação direta de fluxos de água, constituiriam a conectividade. Conexões hídricas possibilitam os efeitos da frequência, magnitude e duração dos eventos hidrológicos, enquanto a fragmentação limita tais estímulos, eliminando ou reduzindo o efeito de conectividade e, assim, comprometendo os serviços ambientais (JANSSON et al., 2007).

Os fluxos de materiais, sedimentos, nutrientes e matéria orgânica são maximizados nas transferências laterais nas ocasiões das cheias dos rios. As cheias e suas inundações depositam novos sedimentos nas áreas ripárias, criando maiores condições para a produtividade primária da vegetação. Também é o momento de maior movimentação de carbono e nutrientes das áreas terrestres para o canal fluvial, o que ocorre mais intensamente durante a recessão do hidrograma de cheia (JANSSON et al., 2007; RAHEL, 2007).

A saturação dos solos das áreas ripárias em momentos de cheia dos rios e a presença de vegetação são extremamente importantes para transformação de nutrientes e outros compostos químicos em subsuperfície. A vegetação atua sobre a qualidade das águas, não só indiretamente pelos processos decorrentes de sua transpiração, como pela absorção e excreção de solutos pelas raízes, além das simbioses com

bactérias e fungos, que proporcionam reações bioquímicas. Daí decorre uma das fortes razões da importância das matas ripárias (ciliares, de galeria, etc.) para a qualidade das águas, além do seu papel de estabilização dos solos, evitando erosão. Também por esses aspectos é que a revegetação ripária é uma das iniciativas mais comuns em ações de restauração de rios (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2002).

6. Serviços de suporte e regulação pelos ecossistemas ripários

Os serviços ambientais referentes a processos físicos, químicos e biológicos de maior importância, proporcionados em áreas ripárias fluviais incluem: infiltração, deposição, filtração, adsorção, degradação e assimilação (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2002).

A infiltração, além de reduzir o escoamento das águas em superfície, proporciona transporte de substâncias químicas e particuladas para a subsuperfície, reduzindo sua presença no transporte superficial, que normalmente atinge os corpos de água. Poluentes, uma vez retidos na subsuperfície, podem ser degradados e removidos por processos físicos, químicos e biológicos. A presença de vegetação mais densa e detritos orgânicos (p. ex., a serapilheira) sobre o solo, além de auxiliar na infiltração, promove a retenção e **deposição** de sedimentos transportados nas águas que escoam em superfície, em função de seu efeito de resistência e desaceleração desse fluxo. A **filtração** de partículas sólidas pela vegetação e detritos durante o escoamento superficial e a **adsorção** de químicos dissolvidos e micro-organismos no solo e na superfície das plantas não são processos bem compreendidos. A filtração é mais significativa na retenção de partículas maiores do solo, agregados e matéria orgânica particulada, enquanto a adsorção por argilas e matéria orgânica nos solos é mais efetiva para a retenção de compostos dissolvidos com cargas positivas, como é o caso de ortofosfatos, metais pesados e alguns pesticidas (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2002). Os solos ripários vegetados são mais ricos em biomassa radicular e, possivelmente, em matéria orgânica e microrganismos, o que propicia uma série de processos biológicos que podem transformar compostos químicos dissolvidos na subsuperfície. Pesticidas orgânicos, por exemplo, podem sofrer **degradação** por atividade microbiana ativada (USDA, 2000). **Assimilação** é, por sua vez, o processo pelo qual plantas e microrganismos passam a reter grandes quantidades de substâncias químicas dissolvidas em subsuperfície, como é o caso dos nutrientes. A remoção e retenção de nutrientes pelas plantas pode

ocorrer por períodos mais longos ou curtos conforme estas sejam, respectivamente, lenhosas ou arbustivas de ciclo curto. Muitas destas últimas apresentam um ciclo de vida na escala do ciclo hidrológico, fazendo retornar anualmente pelo menos parte de sua biomassa na forma de matéria orgânica que será, então, decomposta. Em ambientes sujeitos a manejo, deve ser avaliada a intenção de reter ou reduzir a presença de nutrientes, neste último caso havendo então a necessidade de remoção de biomassa do local em questão (BALIAN; NAIMAN, 2005).

Um importante processo em áreas ripárias é a **denitrificação**, no qual microrganismos do solo utilizam o nitrato dissolvido da água em subsuperfície convertendo-o em gás nitrogênio. Tem sido afirmada a alta efetividade desse processo para a remoção de nitratos, embora sujeito a condicionantes tais como:

a) fluxo subsuperficial da água rica em nitratos deve percorrer áreas que sejam ricas em matéria orgânica e sejam anaeróbicas;

b) tempo de contato suficiente para as transformações dos compostos;

c) solos não saturados e aeróbicos podem propiciar denitrificação, desde que ricos em carbono orgânico particulado (PARKIN, 1987 citado por NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2002).

Das condicionantes anteriormente listadas, o tempo de contato é dependente das condições hidrológico-hidráulicas (PINAY et al., 2002). Estas, por sua vez, dependem da condutividade hidráulica do solo. Desta forma, solos arenosos, por exemplo, seriam pouco efetivos, ao contrário dos que contém sedimentos finos como as argilas, siltes ou matéria orgânica humificada. Somam-se a esse aspecto, a umidade antecedente, a textura do solo, as características das camadas adjacentes inferiores, a proximidade do canal fluvial e as interferências humanas.

7. Alterações hidrológicas, estruturais e funcionais e perda de serviços ambientais

A humanidade tem, desde seus primórdios, atuado no sentido de utilizar, adaptar ou modificar os ambientes para usufruir de seus serviços ambientais, tais como a obtenção de alimentos, combustíveis, fibras, locomoção e energia. Tais intervenções frequentemente negligenciam o fato de que os serviços providos por ecossistemas se interrelacionam de maneira complexa e dinâmica. Assim, resultados não intencionais podem ocorrer em função da utilização

inadequada e, principalmente, modificação dos ecossistemas, com declínios inesperados ou indesejados de diversos serviços ambientais (BENNETT et al., 2009). Como exemplo, a construção de barragens em rios, se por um lado visa aumentar o serviço de disponibilização de água para abastecimento, por outro frequentemente leva ao declínio de espécies endêmicas da fauna aquática, o que poderia configurar redução do serviço de provimento de alimentos. Na mesma situação, em cadeia, poderia favorecer a proliferação de espécies exóticas, o que poderia ter algum proveito benéfico ou não para o homem.

A Tabela 2 reúne aspectos apresentados por Bunn e Arthington (2002) e Richter et al. (1996), referentes aos impactos decorrentes de condições do regime hidrológico, natural ou alterado, sobre a morfologia fluvial, *habitats*, estratégias e histórias de vida de organismos, conectividades e respostas bióticas, espécies exóticas e invasoras.

As ações mecânicas do fluxo das águas atuam sobre os materiais do substrato, no leito fluvial e nas margens, alterando sua geometria, a qual se ajusta espacial e temporalmente aos estresses causados. Por exemplo, as grandes enxurradas desgastam, arrastam e reposicionam os materiais mais vulneráveis e mesmo aqueles de maior massa e resistência. Nesse processo, diversos *habitats* são afetados, seja pela reconfiguração geométrica dos leitos e margens (zonas ripárias), seja por reconfigurar a distribuição espacial, por exemplo, da vegetação aquática e ripária (BUNN; ARTHINGTON, 2002).

Os ciclos de vida das espécies da fauna e da flora, em geral, seguem (ou se ajustam) o ritmo do ciclo hidrológico, em função da potencialização ou inibição de seus processos de desenvolvimento (concepção, nascimento/brotação, crescimento, reprodução e morte). Os pulsos hidrológicos (eventos temporários de maior fluxo) exercem tais papéis. Sua alteração interfere, assim, na história ou ciclo de vida das espécies, as quais buscam, dentro do possível, estratégias de adaptação para persistirem. Plantas aquáticas com fixação de fundo podem flexibilizar suas hastes de forma a enfrentar alteração na frequência e magnitude das vazões (de suas velocidades e tensões), obtendo sucesso e assim persistindo. Espécies de peixes podem ter as chances de reprodução reduzidas se, por exemplo, os pulsos de inundação de lagoas marginais aos cursos de água forem reduzidos em magnitude e frequência, em função da indisponibilidade de locais para acasalamento. Se tais pulsos forem deslocados no tempo, por exemplo, pela regularização de vazões efetuada por barragens, espécies que se reproduzam estritamente num período do ano seriam prejudicadas, enquanto espécies mais generalistas

que pudessem alterar seu momento de reprodução ao longo do ano poderiam se ajustar à nova condição hidrológica e persistirem. O mencionado exemplo, de restrição à inundação

sazonal de lagoas marginais, retrata um caso de fragmentação do ecossistema, ou perda/redução de conectividade, desestruturando *habitats*.

Tabela 2. Alterações hidrológicas, impactos e respostas.

Variáveis hidrológicas alteradas	Aspecto estruturante afetado	Resposta biológica ou morfológica
Aumento da estabilidade das vazões mínimas; redução da variabilidade das vazões.	Mudanças no habitat	Crescimento excessivo de macrófitas; maiores condições para desenvolvimento larval de insetos; redução da população de peixes; aumento da vegetação permanente; redução na diversidade de macroinvertebrados.
Formação de área lânticas, anteriormente lóaticas.	Mudanças no habitat	Redução da população de crustáceos e moluscos; eliminação de peixes pelágicos e dominância de peixes generalistas; eliminação de peixes adaptados a águas com turbidez; eliminação de peixes que fazem uso de áreas específicas inundadas para desova.
Padrões de alta frequência dos hidrogramas produzidos a jusante de centrais hidrelétricas (intradiaurnos).	Mudanças no habitat	Redução da riqueza e população de espécies de macroinvertebrados bentônicos; arraste, direcionamento e encalhe de macroinvertebrados e peixes de menor mobilidade nas margens.
Taxa de flutuação dos níveis da água.	Resposta na história de vida	Sobrevivência de plântulas e taxas de crescimento de macrófitas aquáticas.
Periodicidade e/ou frequência das inundações.	Resposta na história de vida	Alteração na estabilidade requerida para a desova e recrutamento de peixes; redução da sobrevivência das larvas de crustáceos, peixes e outros organismos.
Sazonalidade.	Resposta na história de vida	Redução da sincronia requerida para a reprodução de crustáceos e outros.
Flutuações rápidas nas vazões.	Resposta na história de vida	Efeitos adversos nas espécies com maior tempo de desenvolvimento larval.
Mudanças na temperatura da água (e.g. a jusante de barragens e por poluição térmica)	Resposta na história de vida	Alteração e/ou atraso nas condições de desova de peixes (especialmente subtropicais); alteração nos padrões de emergência e/ou eclosão de insetos; redução da população de organismos bentônicos; eliminação de peixes sensíveis e/ou adaptados a certas faixas de temperatura (especialmente subtropicais).

Tabela 2. Continuação.

Variáveis hidrológicas alteradas	Aspecto estruturante afetado	Resposta biológica ou morfológica
Abstrações e/ou captações de água.	Perda de conectividade longitudinal e/ou lateral	Alteração das condições de migração, abrigo e reprodução.
Barreiras no canal fluvial.	Perda de conectividade longitudinal	Aumento das condições para predação de juvenis; perda de espécies migradoras.
Redução da frequência, duração e extensão das inundações de área úmidas ripárias.	Perda de conectividade lateral	Redução das áreas de reprodução e do sucesso no recrutamento de peixes; declínio na riqueza e abundância de aves aquáticas; declínio da vegetação típica; aumento do domínio da vegetação terrestre.
Aumento da estabilidade dos níveis de água e redução e/ou eliminação dos ciclos de cheia-vazante.	Introdução e invasão de espécies exóticas	Redução da sobrevivência e crescimento de macrófitas aquáticas nativas; invasão de espécies exóticas.
Redução da variabilidade das vazões e aumento da estabilidade sazonal.	Introdução e invasão de espécies exóticas	Favorecimento das populações de espécies exóticas de peixes.
Formação de área lânticas, anteriormente lóaticas.	Introdução e invasão de espécies exóticas	Proliferação das espécies de peixes exóticas.
Transposição de vazões entre bacias.	Introdução e invasão de espécies exóticas	Transporte e translocação de espécies de organismos aquáticos, inclusive patogênicos (e.g. Schistosoma).

O conhecimento das relações causa-efeito e das interações complexas entre eventos e condições hidrológicas com os elementos estruturantes e consequentes respostas é, por si, um grande desafio. No entanto, trata-se uma necessidade fundamental para o manejo adequado dos ecossistemas ou, mesmo, para sua conservação. No que se refere aos corpos hídricos, tal conhecimento deve embasar o planejamento e projetos de obras hidráulicas, assim como a gestão dos recursos hídricos, a exemplo do enquadramento dos corpos hídricos e da outorga dos direitos de uso da água.

8. Considerações finais

Os serviços ambientais hídricos constituem alguns dos requisitos essenciais para a sobrevivência das comunidades humanas, assim como de outras espécies. A sua obtenção depende diretamente da conservação dos solos e da vegetação das bacias hidrográficas, resultando em corpos de água saudáveis, e podem ser inferidos via a utilização de métricas que traduzam o seu provimento ou não, considerando os

atributos: quantidade, qualidade e instante/momento em que são providos. Os corpos hídricos apresentam uma dinâmica hidrológica que deve ser ao máximo preservada, pois dela depende a saúde desses ecossistemas e, como consequência, os próprios serviços ambientais que provêm. A conectividade e a não fragmentação dos corpos hídricos são condição para integridade do ecossistema e provimento dos serviços. A dinâmica hidrológica apresenta eventos que devem ser ao máximo preservados quanto aos aspectos: sazonalidade, magnitudes, duração, frequências e taxas de alteração e de reversões. “Os ecossistemas aquáticos devem persistir em longo prazo a fim de possibilitar o provimento de serviços ambientais, o que depende da sua **resistência** e da sua **resiliência**, relacionados à variabilidade hidrológica”.

A conservação e, ainda, a melhoria dos serviços ambientais hídricos requer conhecimentos e progressos, científicos e técnicos, nas áreas física, biológica e social. Por sua vez, para se concretizar essas necessidades, investimentos em pesquisa e novos estudos, assim como formação de recursos humanos,

são imprescindíveis. Ao mesmo tempo, há necessidade de que a complexidade dos temas envolvidos seja sistematizada e integrada, e para isso urge desenvolver a capacidade de se atuar interdisciplinarmente. Em seqüência, tais conhecimentos devem ser traduzidos, ou convertidos em ação, ou seja, devem se tornar operacionais. Para tanto, também se observa que esses conhecimentos devem ser entendidos por um público cada vez mais amplo, dentro de suas atribuições e possibilidades.

Referências

- ACREMAN, M. C.; FERGUSON, A. J. D. Environmental flows and the European Water Framework Directive. **Freshwater Biology**, v. 55, p. 32-48, 2010.
- ARTHINGTON, A. H.; NAIMAN, R. J.; MCCLAIN, M. E.; NILSSON, C. Preserving the biodiversity and ecological services of rivers: new challenges and research opportunities. **Freshwater Biology**, v. 55, n. 1, p. 1-16, 2010.
- BALIAN, E. V.; NAIMAN, R. J. Abundance and production of riparian trees in the Lowland Floodplain of the Queets River, Washington. **Ecosystems**, New York, v. 8, p. 841-861, 2005.
- BENNETT, E. M.; PETERSON, G. D.; GORDON, L. J. Understanding relationships among multiple ecosystem services. **Ecology Letters**, Oxford, v. 12, p. 1394-1404, 2009.
- BIZZI, S.; PIANOSI, F.; SONCINI-SESSA, R. Valuing hydrological alteration in multi-objective water resources management. **Journal of Hydrology**, v. 472-473, p. 277-286, 2012.
- BRAUMAN, K. A.; DAILY, G. C.; DUARTE, T. K.; MOONEY, H. A. The Nature and Value of Ecosystem Services: an overview highlighting hydrologic services. **Annual Review of Environment and Resources**, Palo Alto, v. 32, p. 67-98, 2007.
- BROCK, M. A.; NIELSEN, D. L.; SHIEL, R. J.; GREEN, J. D.; LANGLEY, J. D. Drought and aquatic community resilience: the role of eggs and seeds in sediments of temporary wetlands. **Freshwater Biology**, v. 48, p. 1207-1218, 2003.
- BUNN, S. E.; ARTHINGTON, A. H. Basic Principles and Ecological Consequences of Altered Flow Regimes for Aquatic Biodiversity. **Environmental Management**, New York, v. 30, n. 4, p. 492-507, 2002.
- COLLISCHONN, W.; AGRA, S. G.; SOUZA, C. F.; TASSI, R.; FREITAS, G. K.; PRIANTE, G. R. Da vazão ecológica ao hidrograma ecológico. In: CONGRESSO DA ÁGUA, 8., 2006, Figueira da Foz. **Água, sede de sustentabilidade**. Lisboa: Associação Portuguesa de Recursos Hídricos, 2006.
- DITTMANN, R.; FROELICH, F.; POHL, R.; OSTROWSKI, M. Optimum multi-objective reservoir operation with emphasis on flood control and ecology. **Natural Hazards Earth System Sciences**, v. 9, p. 1973-1980, 2009.
- FALKENMARK, M.; ROCKSTROM, J. **Balancing water for humans and nature: the new approach in eco-hydrology**. London: EarthScan, 2004.
- FOLKE, C. F.; CARPENTER, S.; WALKER, B.; SCHEFFER, M.; ELMQVIST, T.; GUNDERSON, L.; HOLLING, C. S. Regime shifts, resilience, and biodiversity in ecosystem management. **Annual Review Of Ecology, Evolution and Systematics**, v. 35, p. 557-581, 2004.
- GRIMM, N. B. Disturbance, succession and ecosystem processes in streams: a case study from the desert. In: GILLER, P. S.; HILDREW, A. G.; RAFFAELLI, D. G. **Aquatic ecology: scale, pattern and process**. Oxford: Blackwell Science, 1992. p. 93-112.
- JANSSON, R.; NILSSON, C.; MALMQVIST, B. Restoring freshwater ecosystems in riverine landscapes: the roles of connectivity and recovery processes. **Freshwater Biology**, v. 52, p. 589-596, 2007.
- LAKE, P. S. Flow-generated disturbances and ecological responses: floods and droughts. In: WOOD, P. J.; HANNAH, P. J.; SADLER, J. P. (Ed.). **Hydroecology and ecohydrology: past, present and future**. London: John Wiley & Sons, 2007. p. 75-92.
- LYTLE, D. A.; POFF, N. L. Adaptation to natural flow regimes. **Trends in Ecology and Evolution**, v. 19, p. 94-100, 2004.
- MATHEWS, R.; RICHTER, B. D. Application of the Indicators of Hydrologic Alteration Software in Environmental Flow Setting. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 43, p. 1400-1413, 2007.

MILLENIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT. **Ecosystems and human well-being**: synthesis. Washington, DC: Island Press, 2005.

NAIMAN, R. H.; DECAMPS, H. (Ed.). **The ecology and management of aquatic-terrestrial ecotones**. Carnforth: Parthenon Publishers: Casterton Hall, 1990.

NAIMAN, R. J.; LATTEREL, J. J.; PETIT, N. E.; OLDEN, J. D. Flow variability and the vitality of river systems. **Comptes Rendus Geoscience**, v. 340, p. 629-643, 2008.

NATIONAL HYDROLOGIC ASSESSMENT TOOL. Disponível em: <<http://www.fort.usgs.gov/products/software/nathat/>>. Acesso em: 8 ago. 2014.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL. Committee on Riparian Zone Functioning and Strategies for Management, Water Science and Technology Board. **Riparian areas**: functions and strategies for management. Washington, DC: National Academy Press, 2002. 444 p.

PINAY, G.; CLEMENT, J. C.; NAIMAN, R. Basic principles and ecological consequences of changing water regimes on nitrogen cycling in fluvial systems. **Environmental Management**, New York, v. 30, n. 4, p. 481-491, 2002.

POFF, N. L.; ALLAN, J. D.; BAIN, M. B.; KARR, J. R.; PRESTEGAARD, K. L.; RICHTER, B. D.; SPARKS, R. E.; STROMBERG, J. C. The natural flow regime: a paradigm for river conservation and restoration. **BioScience**, Washington, DC, v. 47, p. 769-784, 1997.

RAHEL, F. J. Biogeographic barriers, connectivity and homogenization of freshwater faunas: it's a small world after all. **Freshwater Biology**, v. 52, p. 696-710, 2007.

RICHTER, B. D.; BAUMGARTNER, J. V.; POWELL, J.; BRAUN, D. P. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems. **Conservation Biology**, v. 10, n. 4, p. 1163-1174, 1996.

RICHTER, B. D.; BAUMGARTNER, J. V.; WIGINGTON, R.; BRAUN, D. P. How much water does a river need? **Fresh Biology**, v. 37, p. 231-249, 1997.

TERRADO, M.; ACUNA, V.; ENNAANAY, D.; TALLIS, H.; SABATER, S. Impact of climate extremes on hydrological ecosystem services in a heavily humanized Mediterranean basin. **Ecological Indicators**, v. 37, p. 199-209, 2014.

THE NATURE CONSERVANCY. **Indicators of hydrologic alteration**: version 7.1: user's manual. 2009.

USDA. **Conservation buffers to reduce pesticide losses**. Washington, DC, 2000. 21 p.

WARD, J. V.; ROBINSON, C. R.; TOCKNER, K. Applicability of ecological theory to riverine ecosystems. **Verhandlungen des Internationalen Verein Limnologie**, v. 28, p. 443-450, 2002.