

## **LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA E VALORAÇÃO ECONÔMICA**

### *GEOGRAPHIC LOCATION AND ECONOMIC VALUATION*

**FABRÍCIO BARON MUSSI**

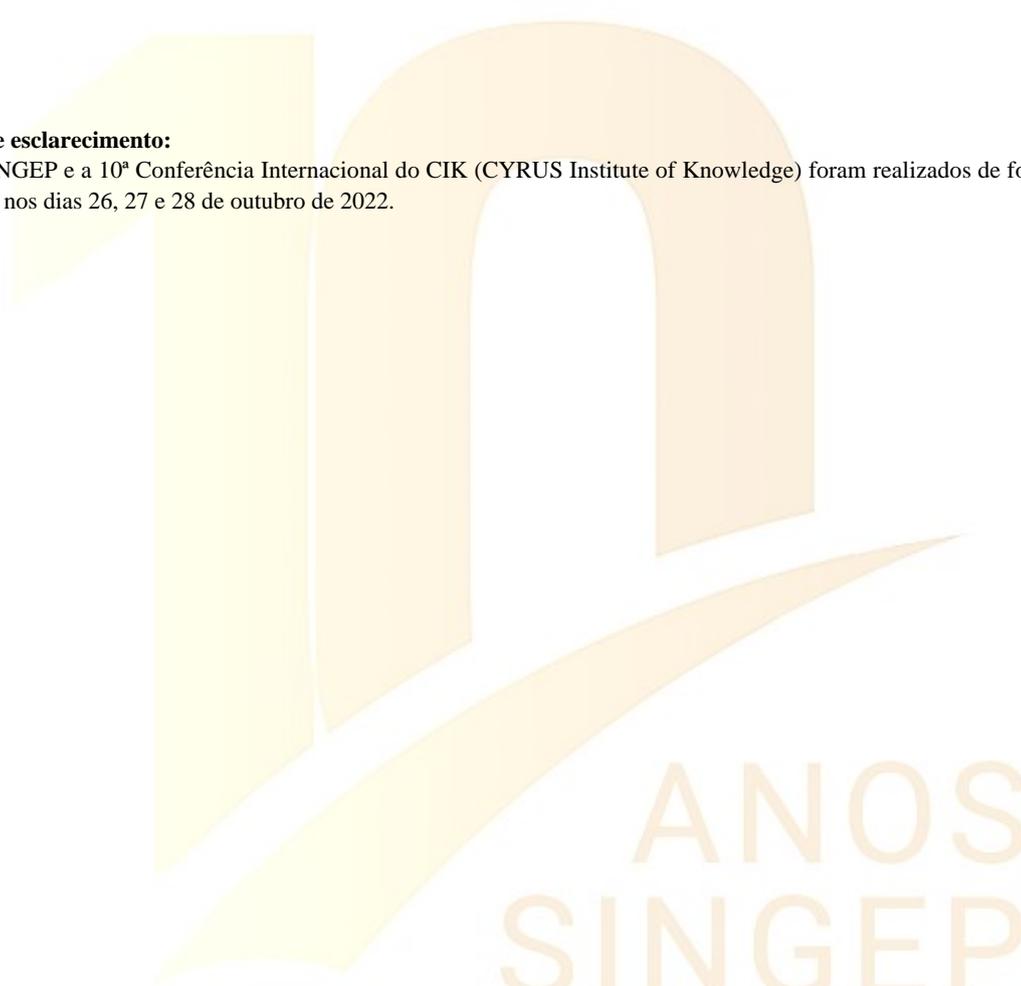
PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ

**ANDERSON BRAGA MENDES**

ITAIPU BINACIONAL

**Nota de esclarecimento:**

O X SINGEP e a 10ª Conferência Internacional do CIK (CYRUS Institute of Knowledge) foram realizados de forma remota, nos dias 26, 27 e 28 de outubro de 2022.



ANOS  
SINGEP

## LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA E VALORAÇÃO ECONÔMICA

### **Objetivo do estudo**

O presente estudo teve como objetivo mensurar economicamente os benefícios decorrentes da presença de uma outra hidrelétrica no curso do rio Paraná, onde a usina hidrelétrica de Itaipu está instalada.

### **Relevância/originalidade**

Procurou-se complementar as discussões contemporâneas a respeito da valoração de serviços ecossistêmicos no contexto das hidrelétricas, ao acrescentar a possibilidade de valoração econômica dos benefícios decorrentes da posição geográfica de uma usina.

### **Metodologia/abordagem**

Empregou-se a abordagem quantitativa, primeiramente para os cálculos de estimativa de vida útil do reservatório de Itaipu e, em seguida, para a valoração econômica dos custos evitados com recuperação do reservatório e com a potencial receita adicional auferida.

### **Principais resultados**

Calculou-se um aumento de 40 anos na vida útil do reservatório de Itaipu em decorrência da sedimentação evitada, além de custos anuais evitados com dragagem de US\$ 695 milhões, e potenciais receitas auferidas de US\$ 164 bi no período estimado.

### **Contribuições teóricas/metodológicas**

A inclusão da questão locacional nos estudos de valoração poderá tornar as estimativas econômicas mais completas, inclusive contribuindo para a redução de várias das lacunas teórico-metodológicas apontadas pela literatura nos estudos dessa temática.

### **Contribuições sociais/para a gestão**

Possibilidade de fazer uso de informações para o gerenciamento da geração de energia em épocas cíclicas, planejar a magnitude e o horizonte de investimentos de médio e longo prazos, e proceder com a análise de cenários de forma mais ampla.

**Palavras-chave:** Usina hidrelétrica, Cálculo de vida útil, Mensuração econômica

## *GEOGRAPHIC LOCATION AND ECONOMIC VALUATION*

### **Study purpose**

The present study aimed to economically measure the benefits arising from the presence of another hydroelectric plant in the course of the Paraná River, where the Itaipu hydroelectric plant is installed.

### **Relevance / originality**

An attempt was made to complement contemporary discussions about the valuation of ecosystem services in the context of hydroelectric plants, by adding the possibility of economic valuation of the benefits arising from the geographical position of a plant.

### **Methodology / approach**

The quantitative approach was used, firstly for the estimation of the useful life of the Itaipu reservoir and, then, for the economic valuation of the avoided costs with the recovery of the reservoir and with the potential additional revenue earned.

### **Main results**

An increase of 40 years in the useful life of the Itaipu reservoir was calculated as a result of the avoided sedimentation, in addition to annual costs avoided with dredging of US\$ 695 million, and potential income earned of US\$ 164 billion.

### **Theoretical / methodological contributions**

The inclusion of the locational issue in valuation studies may make economic estimates more complete, even contributing to the reduction of several of the theoretical-methodological gaps pointed out by the literature in studies on this theme.

### **Social / management contributions**

Possibility of making use of information for the management of energy generation in cyclical periods, planning the magnitude and horizon of medium and long-term investments, and proceeding with the analysis of scenarios more broadly.

**Keywords:** Hydroelectric plant, Useful life calculation, Economic measurement

## 1. Introdução

A preocupação com a segurança hídrica representa um tema prioritário na agenda de gestão do território, na melhora da qualidade ambiental, no bem-estar e costumes dos seus habitantes (Liu *et al.*, 2013). A Organização das Nações Unidas pelo Meio Ambiente no sexto Objetivo de Desenvolvimento Sustentável expõe que relacionamentos precários entre o planejamento territorial, o saneamento ambiental e a gestão sustentável da água, não só aprofundam a fragilização dos processos de ecossistemas e as desigualdades sociais, como também cobram a vida de milhões de pessoas.

Este tema também apresenta relevância e atualidade quando se discute as operações das usinas hidrelétricas, as quais representam a principal fonte para abastecimento da matriz elétrica brasileira, com um percentual de aproximadamente 63% (Brasil, 2021). Reconhece-se a relevância das hidrelétricas como fonte de energia renovável e de custo relativamente baixo, quando comparada a outras potenciais fontes (Liu *et al.*, 2013). Sua capacidade de geração, notadamente em países com amplas áreas alagadas, tem auxiliado no suprimento de eletricidade. Os benefícios do uso das hidrelétricas estão relacionados à eficiência da conversão energética, aos custos baixos de operação e manutenção; à possibilidade de se operar com flexibilidade de geração; à capacidade de promover melhorias nas condições de vida das comunidades que circundam grandes empreendimentos, e; ao alto nível de confiabilidade (Yüksel, 2010; Liu *et al.*, 2013)

Uma das possibilidades de se estimar o potencial de longevidade das hidrelétricas está relacionado à avaliação dos serviços ecossistêmicos dos quais o empreendimento se beneficia, tais como a regulação da erosão do solo que restringe o ingresso de sedimentos no reservatório e a provisão de água, que preserva a segurança hídrica para a geração (Vogl *et al.*, 2016). A mensuração econômica desses serviços consiste no primeiro passo para a avaliação de investimentos ambientais, estabelecimento de métricas de referência e indicadores de sustentabilidade, e definição de programas de pagamento por serviços ambientais (PSA).

Outra possibilidade de se estimar o potencial de longevidade das hidrelétricas consiste na avaliação da localização geográfica do empreendimento face à disposição geográfica das demais usinas daquele corpo hídrico. A depender ponto, ante a cascata de empreendimentos hidrelétricos, a vida útil operacional é favorecida pela retenção dos sedimentos nos demais reservatórios artificiais a montante (Mendes, 2020).

Ambas as perspectivas citadas, via de regra, são abordadas separadamente, como campos de pesquisa distintos, o primeiro voltado à economia ecológica e ambiental e o segundo, por sua vez, à engenharia de sedimentos. Neste trabalho, abordam-se conjuntamente as perspectivas de avaliação da vida útil de uma hidrelétrica, usando como referência a usina de Itaipu. Esta iniciativa configura-se como uma oportunidade de pesquisa uma vez que na revisão preliminar da literatura não se identificou estudos de avaliação de vida útil de empreendimentos hidrelétricos que fizessem uso da valoração econômica. Essa avaliação, por sua vez, pode gerar informações úteis a respeito de custos evitados com a recuperação do reservatório e das receitas estimadas que poderão estar asseguradas no transcorrer do ciclo operativo do negócio. Ainda, da perspectiva prática, este estudo fornece informações que podem subsidiar decisões de investimento de médio e longo prazos tanto na capacidade operativa de uma usina quanto na preservação ambiental de seu entorno.

Diante do exposto, o presente estudo teve como objetivo mensurar economicamente os benefícios decorrentes da presença de uma outra hidrelétrica no curso do rio Paraná, onde a usina hidrelétrica de Itaipu está instalada. Especificamente, considerou-se o impacto na usina de Itaipu decorrente da implantação da usina de Porto Primavera a sua montante. Na seção

seguinte, o referencial teórico é apresentado. Na sequência, são descritos os procedimentos metodológicos e os resultados. Posteriormente, são apresentadas as considerações finais.

## 2. Referencial teórico

### 2.1 As hidrelétricas

A partir de uma revisão sistemática a respeito das hidrelétricas, Jiang, Quiang e Lin (2016) empregaram uma análise bibliométrica da produção científica entre os anos de 1994 a 2013, avaliando 1726 artigos relacionados ao tema (*highly related to hydropower*). As principais constatações foram: (i) maior parte dos temas vinculados ao período pós construção e início de operação; (ii) temas multidisciplinares; (iii) e o rápido e vertiginoso crescimento das publicações sobre as hidrelétricas. Em estudo similar, Han *et al.* (2014) analisaram 434 artigos científicos no período de 1991 a 2012. Adicionalmente aos achados recém-explanados, os autores identificaram os principais *journals* que contemplam a temática (*Renewable and Sustainable Energy Reviews, Renewable Energy, Energy Policy*). Quanto aos principais países que geram publicações na temática da sustentabilidade nas hidrelétricas, encontram-se os Estados Unidos, Turquia, Brasil e China.

No Brasil, a energia hidráulica tem sido a alternativa principal de suprimento, acompanhada pelas usinas térmicas, eólicas, biomassa e as pequenas centrais hidrelétricas (Brasil, 2021). Moreira *et al.* (2015) afirmam que a taxa de crescimento do setor no Brasil é de 4% ao ano, contando com a elevação da participação de outras fontes de energia na matriz. A Figura a seguir apresenta a configuração da matriz no transcorrer da década de 2020.

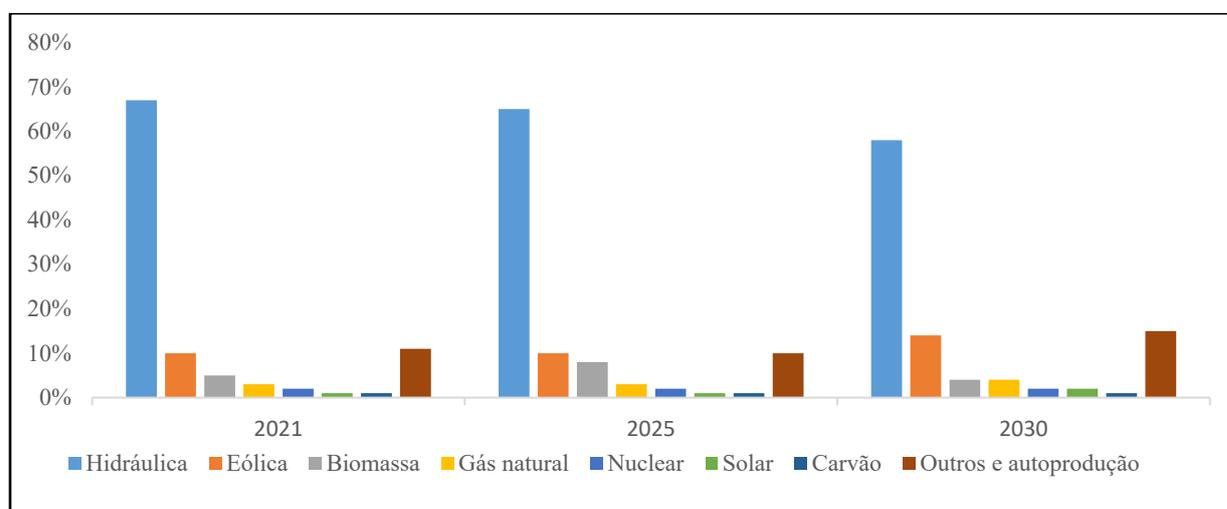


Figura 1: Matriz energética brasileira na década de 2020.

Fonte: Elaborado com base no Plano Decenal de Energia 2030.

Salienta-se que, apesar da redução percentual da participação de energia hidráulica na matriz, está previsto um aumento na capacidade de geração de 32% decorrente da instalação de novas hidrelétricas e da modernização tecnológica pela qual algumas usinas passam atualmente (Brasil, 2021).

### 2.2 Os serviços ecossistêmicos e os desafios de mensuração

Serviços ecossistêmicos, enquanto conceito, referem-se aos benefícios que as populações obtêm direta ou indiretamente das funções do ecossistema (Costanza *et al.*, 1997).

Considera-se a geração hidrelétrica como um dos processos produtivos com elevado grau de dependência dos serviços ecossistêmicos. A provisão de água, a manutenção do regime hídrico e a regulação do clima se destacam como os serviços dos quais as usinas hidrelétricas (UHEs) possuem grau de dependência muito alto, ou seja, além da sua operação ser altamente vulnerável à interrupção desses serviços, não há recurso substituto para continuidade da geração (NCFA & UNEP-WCMC, 2018). Além destes, destaca-se o serviço de regulação da erosão do solo, responsável por evitar a sedimentação dos reservatórios e, por consequência, manter a vida operativa das hidrelétricas (Guo *et al.* 2007; Vogl *et al.*, 2016).

Motta (2011) defende que embora existam limites para o cálculo econômico, reconhecendo que nem tudo está sujeito a valorizações, a mensuração pode desempenhar um papel significativo no processo de avaliação da política ambiental, ou mesmo nas estratégias de sustentabilidade das organizações. Turner e Daily (2008) apontam os principais desafios ao se definir uma estrutura para avaliar serviços de utilidade ecossistêmica, como o foco no detalhamento de informações em escalas de tomada de decisão; *know-how* prático no processo de desenho institucional e implementação; e a apresentação de modelos bem sucedidos, nos quais os incentivos econômicos estejam alinhados com a preservação ambiental. Nas palavras desses autores:

Apesar da crescente conscientização geral sobre os benefícios dos ecossistemas conservados, informações detalhadas em escalas úteis para os tomadores de decisão sobre como as pessoas se beneficiam de serviços específicos permanece deficiente. Essa “falha de informação” é uma das razões pelas quais o financiamento dos investimentos em conservação é ainda muito baixo e às vezes ineficaz. (Turner & Daily, 2008, p.27) (tradução nossa).

Entre outras deficiências identificadas por Turner e Daily (2008), podemos citar “falhas institucionais”, no sentido de que os beneficiários da utilidade do ecossistema serviços são muitas vezes diferentes e distantes daqueles que ganham com a transformação do ecossistema; as “falhas de mercado” que derivam de características públicas de muitos benefícios e sua falta de preços. Mercados normalmente recompensam os valores de curto prazo dos recursos naturais (supervalorizando a preservação custos de oportunidade) em detrimento da saúde ecológica a longo prazo. Apesar de as empresas estarem gradualmente percebendo as relações de dependência de seus negócios com os serviços ecossistêmicos, via de regra as relações não são mapeadas ou mensuradas e ainda pouco discutidas nas produções científicas (Watson & Newton, 2018). Nessa seara, Garcia e Romero (2015, p. 73–74) discutem, por exemplo, os desafios de se definir o valor do serviço ecossistêmico de abastecimento de água:

“precificar” a água não é uma tarefa trivial. Em primeiro lugar, porque pode não haver informação suficiente permitir uma avaliação adequada; em segundo lugar, porque é possível que ocorram situações em que o preço adequado não pode ser cobrado integralmente aos usuários finais [...] O preço adequado deve ser entendido como permitindo a manutenção das condições de “produção”, em termos de quantidade e qualidade do recurso hídrico.

### 2.3 O problema em foco: a sedimentação dos reservatórios e a vida útil das usinas

A sedimentação no reservatório representa um ponto crítico para a operação e para o tempo de vida útil de uma usina hidrelétrica, e a regulação da erosão do solo constitui um serviço ecossistêmico capaz de prevenir a sedimentação excessiva, evitando a erosão dos solos e o assoreamento dos reservatórios (Arias *et al.*, 2011). O impacto do assoreamento na operação e no tempo de vida útil de uma usina é determinado pelas características da bacia hidrográfica

quanto à susceptibilidade à erosão e ao uso do solo e, por isso, deve ser avaliado caso a caso. Há exemplos de perda de 50% da capacidade de armazenamento do reservatório (WCD, 2000), relato de redução do tempo de vida útil do reservatório em 50% (Arias, *et al.*, 2011), além de outras consequências para segurança da barragem, danos à equipamentos e redução da capacidade de atenuação de cheias (Schellenberg, *et al.*, 2017).

Ante o exposto, valorar os serviços de regulação da erosão é relevante para tomada de decisão sobre investimentos em preservação ambiental, e também para estruturação de programas de pagamento por serviços ambientais (PSA). Como experiências internacionais, destacam-se os trabalhos de Cruz *et al.* (1988), Árias *et al.* (2011) e de Vogl *et al.* (2016) os quais aplicam a valoração de serviços ecossistêmicos para estimar o montante destinado aos pagamentos pela conservação de florestas na região onde usinas hidrelétricas das Filipinas, Camboja e Índia estão localizadas. Na interpretação dos autores, esse modelo garante a conservação de uma área de interesse da hidrelétrica, protegendo o reservatório da eventual descarga de sedimentos, de modo que o custo de conservação da vegetação circundante é interpretado como um investimento, pois evita que o reservatório perca sua capacidade de armazenamento de água.

Destaca-se ainda a experiência empreendida pela prefeitura de Nova Iorque, considerada um dos maiores programas de conservação da história dos Estados Unidos. Diante do iminente problema de abastecimento de água potável, a prefeitura passou a investir em ações voltadas à recuperação de bacias e aos cuidados com o uso do solo. Ao final do programa, constatou-se que para cada dólar investido em recuperação ambiental, foram economizados oito dólares em tratamento de água (Appleton, 2002). Este caso ilustra os resultados positivos de se investir na preservação ambiental e as contrapartidas que a sociedade obteve, as quais foram valoradas a fim de se constatar – a médio e longo prazos – a vantajosidade econômica das medidas tomadas.

A partir das Diretrizes Empresariais para Valoração Econômica de Serviços Ecossistêmicos (Gvces, 2019), utilizadas para valoração da dependência das UHEs pelo SE de controle da erosão, recomenda-se a aplicação do (i) método de produtividade marginal para determinar a relação da perda do solo (resultado da Equação Universal de Perda do Solo em ton/ha/ano) e redução na vida útil do reservatório e/ou do fator de geração do empreendimento para, então, determinar as perdas financeiras provenientes do assoreamento, ou ainda o (ii) método do custo de reposição, calculados a partir do resultado de perda do solo, considerando os custos de dragagem do reservatório (Gvces, 2018).

Cabe destacar, adicionalmente, que além das condições do solo das bacias hidrográficas que abastecem os reservatórios prestando os serviços de regulação de erosão, outro fator determinante para a vida útil das hidrelétricas refere-se à sua disposição geográfica *vis-à-vis* a disposição das demais usinas instaladas ao longo do rio (Mendes, 2020). A instalação de cada empreendimento altera a condição ambiental local ao formar seus reservatórios artificiais, contribuindo para a retenção de sedimentos que – de outra maneira – não seria possível alcançar. Esses serviços doravante chamados de “serviços ambientais” por serem fruto da ação humana no meio ambiente (EPE, 2021) não têm sido contemplados na agenda de pesquisa dos campos de sustentabilidade, embora sejam determinantes para a longevidade de muitas usinas. É visando preencher esta lacuna que são apresentados os métodos utilizados e as análises nas seções subsequentes.

### 3. Procedimentos metodológicos

Essa pesquisa, caracterizada como um estudo de caso único, foi conduzida na usina hidrelétrica de Itaipu, considerando os impactos decorrentes da implantação da usina hidrelétrica de Porto Primavera à sua montante. Procurou-se mensurar economicamente os benefícios decorrentes da presença dessa outra hidrelétrica, considerando os custos evitados com a recuperação do reservatório face à potencial sedimentação e as receitas auferidas decorrentes da extensão da vida útil do empreendimento.

A usina de Itaipu está situada no rio Paraná e possui área de drenagem total de 835.398,46 km<sup>2</sup>, o que corresponde a cerca de 10% de todo o território brasileiro. Trata-se de um empreendimento binacional criado e regido pelas Repúblicas Federativas do Brasil e do Paraguai. Possui 20 turbinas que totalizam 14.000 MW de potência instalada. É responsável por abastecer cerca de 12% do território brasileiro e 88% do paraguaio, segundo ITAIPU Binacional (2020), com receita líquida anual média de US\$ 3,631 bilhões (últimos 12 anos). Por estar situada em um ponto privilegiado da cascata de empreendimentos hidrelétricos no rio Paraná, é sabido que a UHE Itaipu, no que concerne sua vida útil operacional, é favorecida pela retenção dos sedimentos nas centenas de outros reservatórios artificiais a sua montante, sejam aqueles instalados no rio Paraná ou em seus afluentes.

O Diagrama Esquemático de Usinas Hidrelétricas do SIN (Sistema Interligado Nacional) elaborado por ONS (2020) para o horizonte 2020-2024 aponta que, dentre usinas já existentes e aquelas que virão a ser instaladas nesse intervalo, um total de 61 empreendimentos hidrelétricos dos mais diversos portes e regimes operacionais a montante da UHE Itaipu. Ao se considerar outros reservatórios artificiais que não para geração hidrelétrica (ex.: açudes, represas para abastecimento de água, etc.) e aqueles não-integrados ao SIN, esse número sobe para 232 (Mendes, 2022).

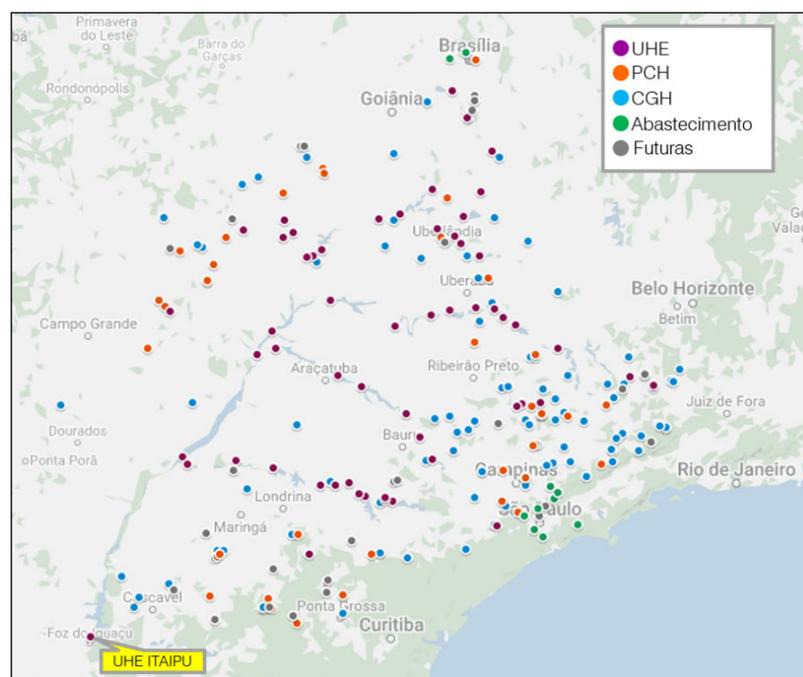


Figura 2: Disposição geográfica dos reservatórios artificiais.

Fonte: Mendes (2022) baseado em ANEEL (2021)

A pesquisa percorreu as seguintes etapas: (i) foram realizados procedimentos matemáticos para a estimativa da vida útil do reservatório de Itaipu e cálculo da sedimentação

evitada em decorrência da implantação da usina de Porto Primavera; (ii) foram estimados – por meio do método de custo de reposição (Arias *et al.*, 2011; GVces, 2019) - os gastos que seriam necessários para a recuperação do reservatório devido à descarga de sedimentos na ausência desta última. Para esta finalidade, foram tomados como referência os custos de dragagem – máximo e mínimo – para a retirada de sedimentos do reservatório. Esta metodologia

baseia-se na premissa de que os custos incorridos (ou estimados) para reposição, restauração ou substituição da quantidade ou qualidade de um serviço ecossistêmico constituem uma estimativa válida dos valores dos benefícios que tal serviço ecossistêmico proporciona. A empresa ou a sociedade. Assim, a perda desse serviço ecossistêmico representaria um ônus para a atividade da empresa ou da sociedade, o que refletiria parcialmente no valor monetário que deveria ser pago pela reposição desse serviço [...]. (GVces, 2019, p. 99)

Por fim, conforme recomendado por Arias *et al.* (2011), procedeu-se à valoração econômica da potencial receita auferida em função da extensão da vida útil do reservatório da usina de Itaipu.

### 3.1 Primeira etapa: cálculo de vida útil da hidrelétrica

Para a realização do presente estudo foram empregados dados disponíveis tanto em relatórios internos da ITAIPU Binacional, oriundos de seu monitoramento sedimentométrico, quanto em artigo científico a respeito da usina de Porto Primavera (Celeri *et al.*, 2005). Itaipu conta com uma rede de 15 postos de monitoramento, sendo 14 deles utilizados nos estudos de vida útil do empreendimento. Por meio dessa rede, a qual teve início em 2001 e desde então tem operado em regime horário de monitoramento por meio de equipamentos automáticos associado a medições de campo clássicas para ajuste matemático das curvas de correlação, foi possível determinar as grandezas necessárias para a calibração do modelo sedimentológico sinérgico. Segundo Mendes e Gossen (2018), a rede cobre 91% de toda a área de drenagem incremental da UHE Itaipu (147.065 km<sup>2</sup>), tendo sido os demais 9% inferidos com base na taxa de produção de sedimentos das bacias monitoradas. Com base nas análises de dados obtidos pelas bases de monitoramento sedimentométrico de Itaipu, considerou-se o valor médio de 17,5 milhões de toneladas por ano.

A Figura a seguir exibe tanto a rede de monitoramento sedimentométrico de ITAIPU Binacional quanto a localização das UHE's contempladas nesta pesquisa.

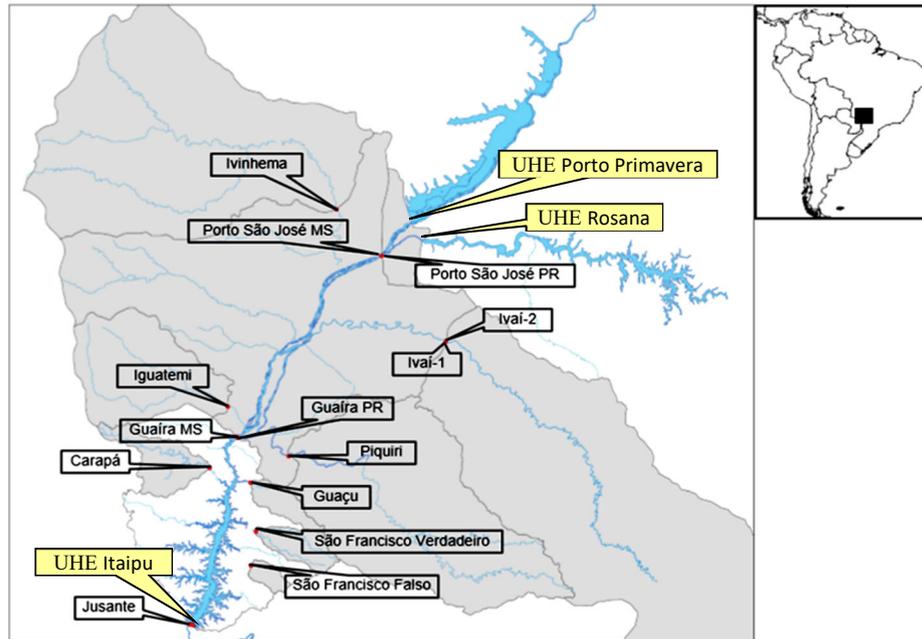


Figura 3: Mapa de localização das UHEs abordadas neste estudo, bem como dos postos de monitoramento sedimentométrico instalados na área de drenagem incremental da UHE Itaipu.

Fonte: Mendes e Gossen (2018).

De forma a otimizar as simulações, foram empregados os softwares *Sediment* e *Dposit*, disponíveis em Mendes (2005) e Carvalho (2008). O uso dos modelos matemáticos foi fundamental por permitir um processo de calibragem mais preciso, haja vista que foi necessário, no ambiente de modelagem, conciliar todas as variáveis de forma que os dados de saída da simulação da UHE Porto Primavera pudessem ser empregados como dados de entrada da UHE Itaipu, e de maneira que resultados simulados coincidisse com os dados medidos em campo.

A Figura 4 apresenta a evolução observada (entre 1982 e 2017) e prevista (a partir de 2018) das descargas sólidas afluentes e efluentes à UHE Itaipu. Destaca-se a queda imediata do aporte sólido na UHE Itaipu em 1999, quando do início operacional da UHE Porto Primavera.

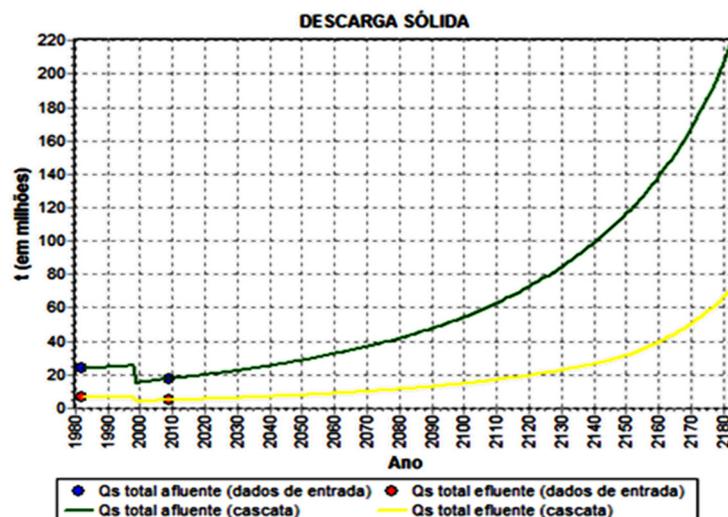


Figura 4: Evolução das descargas sólidas totais médias anuais afluentes e efluentes à UHE Itaipu (dados simulados de 1982 a 2182), com indicação dos valores medidos (dados de entrada) e considerando o cenário “cascata”, ou seja, com a existência da UHE Porto Primavera a montante da UHE Itaipu  
Fonte: Mendes (2020).

À primeira vista, simular um aporte sólido total de quase 220 milhões de toneladas por ano em 2182 pode soar exagerado, porém deve-se atentar para o fato de que há centenas de barramentos a montante da UHE Itaipu, sendo que cada um deles é responsável pela retenção de uma parcela do sedimento que, caso não existisse, chegaria ao lago de Itaipu tanto como descarga em suspensão quanto do leito.

Só o início operacional da UHE Porto Primavera em 1999 respondeu pela redução imediata de cerca de 10,5 milhões de toneladas por ano na descarga sólida afluente à UHE Itaipu. Apenas ilustrativamente e de forma muito simplificada, já que cada reservatório possui porte e regime operacional próprios, dividindo-se os 192 milhões de t.ano<sup>-1</sup> restantes pelos demais barramentos, tem-se uma retenção de sedimentos média por barragem de menos de 1,2 milhões de toneladas por ano (aproximadamente 1 hm<sup>3</sup> submerso ao ano). Cabe salientar, contudo, que esse cálculo só se mostra válido se todos os empreendimentos de montante já tiverem atingido sua vida útil até o ano 2182, tratando-se de cenário provável, uma vez que dezenas destes representam reservatórios de pequeno e médio portes, além de se situarem em bacias onde é forte a pressão do uso do solo para fins agropastoris (Schellenberg *et al.*, 2017).

Para calcular a evolução temporal da altura dos depósitos de sedimentos no pé da barragem, culminando na determinação da vida útil do empreendimento e das novas curvas *cota x área x volume (CxAV)* do reservatório da UHE Itaipu, empregou-se a metodologia desenvolvida por Borland e Miller (1958) e exemplificada em Carvalho (2008), denominada Método Empírico de Redução de Área, a qual é a base matemática dos dois *softwares* utilizados para a elaboração deste trabalho. Foi considerada a mudança contínua do tipo de relevo submerso da UHE Itaipu em decorrência de seu gradual assoreamento, conferindo mais precisão aos resultados finais.

A Figura 5 exibe a altura dos depósitos de sedimento no pé da barragem da usina de Itaipu e sua vida útil segundo dois cenários: (i) considerando a existência da UHE Porto Primavera (“em cascata”) e; (ii) considerando a inexistência da UHE Porto Primavera a montante da UHE Itaipu (“independente”). Nota-se que o refinamento da modelagem matemática permitiu identificar que os sedimentos afluentes só alcançarão o pé da barragem da UHE Itaipu a partir do 40º ano operacional (2022), tornando-se esse fenômeno mais acelerado a partir do 90º (ano 2072).

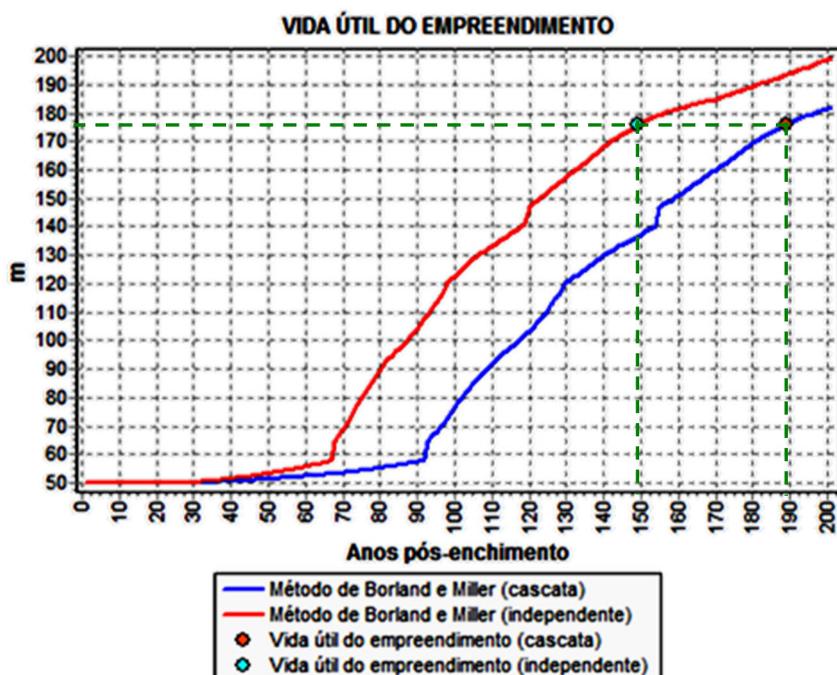


Figura 5: Altura dos depósitos de sedimento no pé da barragem da UHE Itaipu ao longo do tempo, com indicação da vida útil do empreendimento para os cenários “cascata” (189 anos, considerando a existência da UHE Porto Primavera) e “independente” (149 anos, excluindo-se a UHE Porto Primavera).

Fonte: Mendes (2020).

### 3.2 Segunda etapa: valoração econômica da sedimentação evitada

Para a estimativa de valoração, foi considerado o volume de sedimentos que anualmente deixam de adentrar no reservatório de Itaipu em decorrência da presença de outras barragens, bem como os potenciais custos de retirada desses sedimentos a partir da dragagem (Carvalho *et al.*, 2000; Bidone *et al.* 2009; Bueno, 2010; GVces, 2016).

Tabela 1:  
Estimativa de custos evitados com dragagem

<b>Sedimentação total evitada (toneladas/ano)</b>	<b>Custo máximo de dragagem por tonelada</b>	<b>Custo anual evitado (US\$)</b>
192.000.000	US\$ 650	US\$ 124.800.000.000,00
	<b>Custo mínimo de dragagem por tonelada</b>	
	US\$39,75	US\$ 7.632.000.000,00
<b>Sedimentação evitada em decorrência da implantação da UHE Porto Primavera (toneladas/ano)</b>	<b>Custo máximo de dragagem por tonelada</b>	
17.500.000	US\$ 650	US\$ 11.375.000.000,00
	<b>Custo mínimo de dragagem por tonelada</b>	
	US\$39,75	US\$ 695.625.000,00

Fonte: Elaborado com base nos dados secundários

Observou-se que mesmo considerando o menor custo de dragagem, a eventual recuperação do reservatório consiste num processo operacional que requer investimentos significativos. A presença dos demais reservatórios pode ser interpretada como determinante ao prestar um serviço ambiental de retenção de sedimentos que, de outra maneira, impactaria substancialmente na continuidade da usina de Itaipu.

Pode-se constatar, ainda, que o custo anual mínimo evitado, decorrente da instalação da usina de Porto Primavera, de aproximadamente US\$ 695 milhões, representa cerca de 19% da receita líquida anual de Itaipu. Outrossim, diante do aumento da vida útil do empreendimento em 40 anos, pode-se inferir que os ganhos financeiros outrora não previstos, podem ser mensurados a partir da valoração dos benefícios da implantação da usina de Porto Primavera: com a receita média anual líquida de US\$ 3.631 bi, considerando uma taxa anual de 10% (referência de mercado), estima-se uma receita de US\$ 164 bi no transcorrer da sobrevida adquirida.

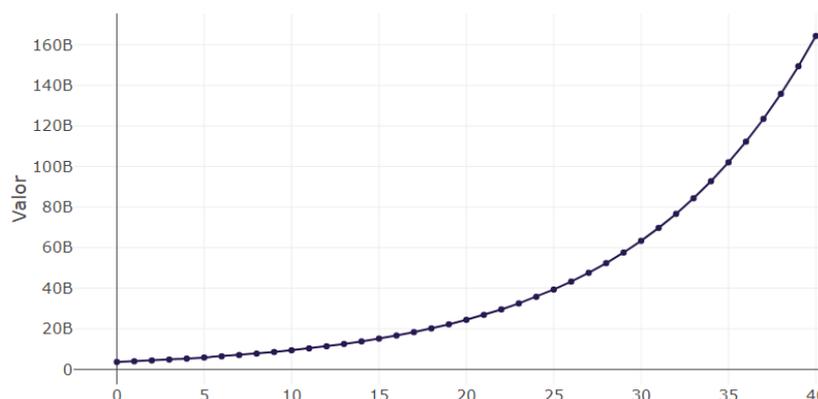


Figura 6: Estimativa de receitas aferidas por Itaipu em decorrência da instalação de Porto Primavera.  
Fonte: Elaborado com base em dados secundários.

#### 4. Implicações para a gestão

A avaliação da vida útil de empreendimentos hidrelétricos, acrescida das estimativas de custos evitados e de potenciais receitas consiste numa alternativa de prever periodicamente o tempo remanescente de operação das usinas, necessário para:

- Conhecer a capacidade de reserva do reservatório: informação necessária para que se possa planejar a geração de energia em tempos de estiagem, bem como gerenciar o vertimento ou armazenamento de águas em épocas de chuvas intensas, visando o aproveitamento máximo desse insumo;
- Planejar o horizonte de investimentos: com a perspectiva temporal estimada, torna-se possível calcular a viabilidade de investimentos de longo prazo, os quais apenas se justificam havendo tempo suficiente de retorno;
- Dimensionar a magnitude de investimentos: o montante de investimentos, sobretudo aqueles de grande vulto, deve levar em conta a possibilidade de retorno. Para isso, além de informações sobre o prazo, torna-se relevante a obtenção de informações a respeito de potenciais receitas auferidas nos anos futuros;
- Realizar análise de cenários: conhecendo a dinâmica de operação bem como as questões ambientais do entorno, torna-se possível prever cenários que podem impactar a operação da hidrelétrica, sobretudo em empreendimentos em cascata, como no caso estudado;
- Captar de recursos financeiros: avaliações dessa natureza são imprescindíveis para aquelas usinas que necessitam da obtenção de fontes de financiamentos externos.

#### 5. Considerações finais

O presente estudo teve como objetivo mensurar economicamente os benefícios decorrentes da presença de outra hidrelétrica no curso do rio Paraná, onde a usina hidrelétrica de Itaipu está instalada. Foram avaliados e valorados os benefícios econômicos, tendo como referência o cálculo da vida útil do reservatório de Itaipu após a implantação da usina de Porto Primavera. Foi constatado que a implantação deste último empreendimento proporcionou um aumento de 40 anos na vida útil do reservatório de Itaipu em decorrência da sedimentação evitada.

Dentre os benefícios valorados, a partir do emprego do método do custo de reposição,

constatou-se que os custos anuais evitados com dragagem são da aproximadamente US\$ 695 milhões. Além disso, pelos anos adicionais verificados no cálculo de estimativa de vida útil a partir da instalação da usina de Porto Primavera, observou-se que a usina de Itaipu poderá auferir uma receita adicional de US\$ 164 bi ao longo dos 40 anos de sobrevida.

Da perspectiva teórica, este estudo procurou complementar as discussões contemporâneas a respeito da valoração de serviços ecossistêmicos no contexto das hidrelétricas (Vogl, *et al.*, 2016; Espécie *et al.*, 2019; GVces, 2019; EPE, 2021), ao acrescentar a possibilidade de valoração econômica dos benefícios decorrentes da posição geográfica de uma usina. Incluir a questão locacional nos estudos de valoração poderá tornar as estimativas econômicas mais completas, inclusive contribuindo para a redução de várias das lacunas teórico-metodológicas apontadas pela literatura nos estudos dessa temática (Turner & Daily, 2008; Watson & Newton, 2018).

Da perspectiva prática, embora a pesquisa tenha sido aplicada em um único contexto, é possível vislumbrar contribuições para a tomada de decisões em usinas hidrelétricas. Destaca-se a possibilidade de fazer uso de informações referentes ao conhecimento da capacidade do reservatório para o gerenciamento da geração de energia em épocas cíclicas (cheias e de escassez hídrica), planejar a magnitude e o horizonte de investimentos de médio e longo prazos, e proceder com a análise de cenários de forma mais ampla ao acrescentar os fatores relacionados à localização geográfica e seus possíveis riscos e benefícios.

Dentre as limitações desse estudo, destaca-se a análise de um único caso e a escassez de informações completas e uniformes a respeito de outras usinas situadas no mesmo rio, o que pode comprometer a precisão dos cálculos. A esse respeito, a estimativa matemática aplicada carece de estudos altamente especializados para que - no futuro- seja possível ratificar ou retificar os valores apresentados na presente análise. Para futuras pesquisas, sugere-se a replicação desse estudo em outras hidrelétricas, bem como a inclusão de outras variáveis em estudos similares, tais como os ciclos pluviométricos e os estágios de vida de cada empreendimento a fim de obter informações ainda mais precisas.

## REFERÊNCIAS

- Appleton, A. F. (2002). How New York City Used an Ecosystem Services Carried out Through an Urban-Rural Partnership to Preserve the Pristine Quality of Its Drinking Water and Save Billions of Dollars. *Forest Trends Meeting*, Tokyo.
- Arias, M., Cochrane, T., Lawrence, K., Killeen, T., & Farrell, T. (2011). Paying the forest for electricity: A modelling framework to market forest conservation as payment for ecosystem services benefiting hydropower generation. *Environmental Conservation*, 38(4), 473-484.
- Bidone, E.D.; Silveira, R.P.; Fiori, C.S.; Rodrigues, A.P.C.; Pires, M.F.A; Castilhos, Z.C. (2009). Custo socioeconômico de dragagens portuárias. In: Boldrini, E. B.; Paula, E. V. (Orgs). *Gestão ambiental portuária*. Antonina: Ademadan, 2009
- Brasil, Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética. (2021). *Plano Decenal de Expansão de Energia 2030*. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE.
- Carvalho, N. O. (2008). *Hidrossedimentologia Prática*. 2ª ed. Interciência, Rio de Janeiro/RJ, 599 p.

Carvalho, N.O; Filizola Júnior, N.P; Santos, P.M.C; & Lima, J.E.F.W. (2000). *Guia de avaliação de assoreamento de reservatórios*. Brasília: ANEEL. 140p.

Celeri, A.; Alves, C. F. C.; Carvalho, N. O. (2005). Reassessment of Porto Primavera Reservoir sedimentation in view of updated sediment measurements. *Anais do VII IAHS*, Foz do Iguaçu/PR, Abr 2005, pp. 308 - 314.

Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387: 253–260.

Empresa de Pesquisa Energética - EPE. (2021). *Serviços ecossistêmicos e o setor elétrico: oportunidades e desafios da Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais*. Nota técnica EPE/DEA/SMA/022/2021.

Espécie, M.A.; Carvalho, P.N.; Pinheiro, M.F.B.; Rosenthal, V.M.; Silva, L.A.F.; Pinheiro, M.R.C.; Espig, S.A.; Mariani, C.F.; Almeida, E.M.; Sodré, F.N.G.A.S. (2019). Ecosystem services and renewable power generation: A preliminary literature review. *Renewable Energy*, **140**: 39-51. Doi:10.1016/j.renene.2019.03.076.

Garcia, J.R.; Romeiro, A.R. (2015). Valoração e cobrança pelo uso da água: uma abordagem econômico-ecológica. In: Tôsto SG, Belarmino LC, Romeiro AR, Rodrigues CAG (eds) (2015). *Valoração de serviços ecossistêmicos: metodologias e estudos de caso/Brasília*. Embrapa Monitoramento por Satélite, DF, pp 71–90

Guo, Z., Li, Y., Xiao, X., Zhang, L., & Gan, Y. (2007). Hydroelectricity production and forest conservation in watersheds. *Ecological Applications*, **17**(6): 1557–1562. doi:10.1890/06-0840.1

GVces. (2016). Valoração Econômica de Serviços Ecossistêmicos Relacionados aos Negócios – Estudos de caso do ciclo 2015. Centro de Estudos em Sustentabilidade da Escola de Administração de Empresas de São Paulo da Fundação Getúlio Vargas. São Paulo. 41 p.

GVces. (2019) *Diretrizes Empresariais de Valoração Econômica de Serviços Ecossistêmicos*. Versão 3. Centro de Estudos em Sustentabilidade da Escola de Administração de Empresas de São Paulo da Fundação Getúlio Vargas. São Paulo, 102p

Han, M.Y; Sui, X.; Huang, Z.L.; Wu, X.; Xia, X.H.; Hayat, T.; Alsaedi, A. (2014). Bibliometric indicators for sustainable hydropower development, *Ecological Indicators*, **47** (December): 231–238. Doi:10.1016/j.ecolind.2014.01.035.

Jiang, H.; Qiang, M. and Lin, P. (2016). A topic modeling based bibliometric exploration of hydropower research. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **57**(3): 226-237. Doi: 10.1016/j.rser.2015.12.194

Liu, J.; Zuo, J.; Sun, Z.; Zillante, G.; Chen, X. (2013) Sustainability in hydropower development – a case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **19**: 230-237. DOI: 10.1016/j.rser.2012.11.036.

Mendes, A. B. (2005). *Análise Sinérgica da Vida Útil de um Complexo Hidrelétrico: o Caso do Rio Araguaia, Brasil*. Dissertação de Mestrado em Ciências. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, RJ.

Mendes, A. B.; Gossen, A. C. (2018). *Relatório para a Reunião do Board de Consultores Cíveis*. ITAIPU Binacional. Foz do Iguaçu/PR.

Mendes, A. B. (2020). Ampliação da vida útil da UHE ITAIPU devido à implantação da UHE Porto Primavera. *XIV Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos*, Campinas.

Motta, R.S. (2011) Valoração e precificação dos recursos ambientais para uma economia verde. *Política Ambiental*, 8(junho):179–190.

Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS (2020). *Diagrama Esquemático das Usinas Hidrelétricas do SIN*. Arquivo em pdf. Disponível em:  
<<http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/mapas>>. Acesso em: 6 de jun. de 2020.

NCFA-Natural Capital Finance Alliance; UNEP-WCMC-United Nations Environment World Conservation Monitoring Centre. (2018). *Exploring Natural Capital Opportunities, Risks and Exposure: A practical guide for financial institutions*, UK.27p.

Schellenberg, G., Donnelly, C. R., Holder, C., & Ahsan, R. (2017). Dealing with sediment: Effects on dams and hydropower generation. *Hydro Review Worldwide*, 25(1):1-24

Turner, R.K.; Daily, G.C. (2008) The ecosystem services framework and natural capital conservation. *Environmental and Resource Economics*, 39(1):25–35.  
<https://doi.org/10.1007/s10640-007-9176-6>

Vogl, A.L.; Frank, P.J.D.; Wolny, S.; Johnson, J.A.; Hamel, P.; Narain, U.; Vaidya, A. Managing forest ecosystem services for hydropower production. *Environmental Science & Policy*, 61 (july), 2016, p. 221-229.

Watson, Stephen C. L., Newton, A.C. (2018). Dependency of businesses on flows of ecosystem services: a case study from the County of Dorset, UK. *Sustainability* 10(1368): p.1-14. doi:10.3390/su10051368.

Yüksel, I. (2010). Hydropower for Sustainable Water and Energy Development. Renewable and Sustainable *Energy Reviews*, 14(1): 462-469. DOI: 10.1016/j.rser.2009.07.025