



**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

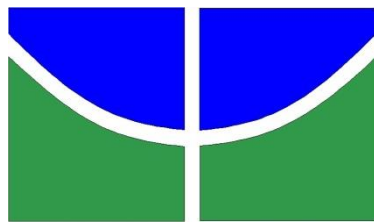
**AVALIAÇÃO DA CONECTIVIDADE DE RIOS NA BACIA DO ALTO  
PARAGUAI (BAP)**

**Maria Eduarda Moraes Sarmiento Coelho**

**Brasília, 02 dezembro de 2020**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL**



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL

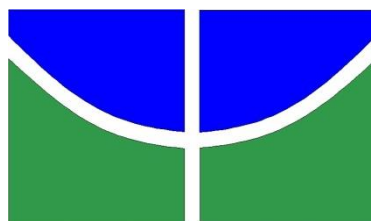
## **AVALIAÇÃO DA CONECTIVIDADE DE RIOS NA BACIA DO ALTO PARAGUAI (BAP)**

**Maria Eduarda Moraes Sarmiento Coelho**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Florestal da Universidade de Brasília como parte das exigências para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Florestal.

Orientador: Prof. Dr. Henrique Marinho Leite Chaves

Brasília-DF, 02 dezembro de 2020



**Universidade de Brasília - UnB**  
**Faculdade de Tecnologia - FT**  
**Departamento de Engenharia Florestal – EFL**

**AVALIAÇÃO DA CONECTIVIDADE DE RIOS NA BACIA DO ALTO  
PARAGUAI (BAP)**

Estudante: Maria Eduarda Moraes Sarmiento Coelho

Matrícula: 14/0153616

Orientador: Prof. Dr. Henrique Marinho Leite Chaves

Menção: \_\_\_\_\_

---

Prof. Dr. Henrique Marinho Leite Chaves  
Universidade de Brasília – UnB  
Departamento de Engenharia Florestal  
Orientador (EFL)

---

Maria Rita Fonseca  
Universidade de Brasília – UnB  
Departamento de Geografia  
Membro da Banca

---

Dr. Paula Hanna Valdujo  
WWF - Brasil  
Membro da Banca

Brasília-DF, 02 dezembro de 2020

## FICHA CATALOGRÁFICA

MORAES SARMENTO COELHO, MARIA EDUARDA

AVALIAÇÃO DA CONECTIVIDADE DE RIOS NA BACIA DO ALTO PARAGUAI (BAP) 2020.

36 p., 210 x 297mm (EFL/FT/UnB, Engenheira, Engenharia Florestal, 2020).

Trabalho de conclusão de curso - Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Florestal

1. Conectividade hídrica

2. Bacia do Alto Paraguai

3. Pulsos de inundação

4. Rios não-regulados

I. EFL/FT/UnB

II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

COELHO, M. E. M. S.- (2020). **AVALIAÇÃO DA CONECTIVIDADE DE RIOS NA BACIA DO ALTO PARAGUAI (BAP)**. Trabalho de conclusão de curso, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 36 p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTORA: Maria Eduarda Moraes Sarmiento Coelho

TÍTULO: *Avaliação da Conectividade de Rios na Bacia do Alto Paraguai (BAP)*.

GRAU: Engenheira Florestal ANO: 2020

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste Projeto Final de Graduação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. A autora reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste Projeto Final de Graduação pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

---

Maria Eduarda Moraes Sarmiento Coelho

dudacoelho1997@gmail.com

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho, assim como todas as minhas conquistas na vida, dedico aos meus pais, Marcia e Heitor, e à minha mãe do coração, Lia. O amor imensurável que vivo por vocês é o que me faz querer ser e fazer cada dia mais, sempre buscando o bem.

Neste momento tão especial na minha vida, não só pela conclusão do curso, mas pelo tratamento de saúde da minha mãe estar dando tão certo, só tenho a agradecer ao universo e à toda a natureza que me move. Agradeço do fundo do meu coração a todos da minha família, de sangue e de consideração, que estiveram presentes conosco nesse último mês. Agradeço à minha tia do coração, Dalva, aos meus irmãos, Gabriela e Marcelo, bem como aos meus sobrinhos, João Miguel e Rafael, que podem não saber, mas foram uma das nossas maiores fontes de força e fé, e fizeram de 2020 um ano melhor.

Sou eternamente grata às minhas amigas e companheiras Andressa, Fernanda, Luiza, Nathalia, Thaís, Victória, Viviane e Yasmin, que de uma forma ou de outra me ajudaram a passar por todas as dificuldades e surpresas da vida, me oferecendo colo, conforto, risadas e muito carinho. Especialmente às minhas amigas de curso, um “Muito obrigada!”. Fui extremamente feliz na minha escolha pela Engenharia Florestal, mas mais feliz ainda por ter tido a oportunidade de compartilharmos o sentimento de sermos calouras juntas e, agora, compartilhamos o sentimento de, 6 anos depois, estarmos formando! Que continuemos regando e adubando o nosso jardim de amizade que só cresce.

Agradeço aos professores do Departamento de Engenharia Florestal, em especial aos professores que mais me inspiram: Reuber Brandão, que além de professor é um amigo; e Henrique Chaves, meu orientador neste trabalho.

Agradeço a oportunidade incrível de ser estagiária, e hoje funcionária, do WWF – Brasil; ONG da qual tanto sonhei em fazer parte. Trabalhar no WWF foi um divisor de águas na minha vida, e lá conheci pessoas fundamentais para o meu crescimento pessoal e profissional. Por isso, agradeço à Mariana Soares, Ricardo Aranha e Paula Valdujo, pessoas íntegras, de trabalho excepcional e que me inspiram dia após dia.

Agradeço ao universo e aos meus pais por esses 20 anos ininterruptos de estudo. Agradeço por terem me guiado e me iluminado a fazer escolhas certas, que ensinaram que eu estudasse a surpreendente engenharia da natureza, o que hoje possibilita meu trabalho junto à conservação ambiental.

Agradeço a todos os meus amigos e companheiros de escalada, que sempre me ensinam tanto. Estar junto de vocês no mato, nas rochas, cachoeiras e trilhas é sentir o pulsar da vida. Sou grata por todas as experiências nesses anos de graduação.

Por fim, agradeço a mim mesma. Agradeço à Duda criança, que sempre teve o maior apreço por plantas e animais, e que junto ao meu inesquecível cavalo Educado, desbravou trilhas por este Cerrado. Agradeço à Duda adolescente, que sonhou com esse momento e nem por um segundo pensou em desistir. Agradeço à Duda de hoje, que sabe que o futuro é grande e, mais do que tudo, sabe que a vida é sincera.

Só agradeço.

## RESUMO

O Brasil aposta fortemente na produção de energia a partir de empreendimentos hidrelétricos, e há uma rápida expansão dos interesses na exploração dos recursos hídricos na região de planalto da Bacia do Alto Paraguai (BAP), onde se concentram as nascentes que abastecem esse sistema. As barragens alteram a vazão e fluxo dos rios, o que causa diversos impactos socioeconômicos e ambientais. Rios de fluxo livre são aqueles que mantêm trocas desobstruídas de energia, matéria e organismos pelo seu fluxo. Devido aos pulsos de inundação típicos da região, essa bacia é especialmente sensível aos efeitos da fragmentação e regulação hídrica. Este estudo apresenta a aplicação da avaliação de conectividade de rios proposta por Grill et al. (2019) na BAP, a fim de analisar o status de conectividade atual e estimar qual será o impacto da implantação dos projetos hidrelétricos que estão em fase de planejamento na conectividade num cenário futuro, e identificar as principais pressões atuantes nesse sistema. O método de avaliação utiliza seis indicadores de pressão para avaliar a conectividade das redes de drenagem: 1) grau de fragmentação, 2) grau de regulação, 3) densidade de rodovias, 4) uso e abstração de água, 5) infraestrutura urbana e 6) retenção de sedimentos. Com a construção das hidrelétricas planejadas, mais de 2.600 km de extensão de rios de fluxo livre seriam afetados. O rio Paraguai, que comanda a rede de drenagens da bacia, já é considerado um com conectividade prejudicada em diferentes níveis. Essa metodologia serve de embasamento para projetos de conservação e preservação de recursos hídricos e articulação com políticas públicas do setor elétrico.

**Palavras-chave:** Bacia do Alto Paraguai, Rio Não-regulado, Conectividade Hídrica, Pulsos de Inundação.

## ABSTRACT

Brazil is strongly investing in the production of energy from hydroelectric power plants, and there is an increasing interest in the exploitation of water resources in the region of the Upper Paraguay Basin (BAP), where the headwaters that supply this system are located. Dams alter the river fragmentation and natural river flow, which causes several socioeconomic and environmental impacts. We define “free-flowing river” as rivers with unobstructed movement and exchange of energy, material, and organisms through its flow. Because of the typical flood pulses of the region, this basin is especially sensitive to the effects of fragmentation and water regulation. This study presents an application of the river connectivity assessment proposed by Grill et al. (2019) in BAP, in order to analyze the current connectivity status and estimate what would be the impact of the planned hydroelectric projects in the connectivity in a future scenario, and identify what are the main pressures acting in this system. This methodology uses six pressure indicators to assess the connectivity of drainage networks: 1) degree of fragmentation, 2) degree of regulation 3) road density, 4) water use and abstraction, 5) urban infrastructure and 6) sediment trapping. Considering the construction of the planned hydroelectric dams, more than 2,600 km of free-flowing rivers would be affected. The main river, Paraguay, which controls the drainage network of the basin, is already considered a regulated river, with its connectivity in jeopardy. This methodology serves as a basis for conservation and preservation of water resources projects and advocacy with public policies in the electricity sector.

**Key words:** Upper Paraguay Basin, Free-Flowing Rivers, Hydrological Connectivity, Flood Pulses.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Metodologia da classificação do status de conectividade dos rios .....	15
Figura 2 – Mapa de apresentação dos resultados da avaliação de conectividade de rios para o cenário atual.....	23
Figura 3 – Mapa de apresentação dos resultados da avaliação de conectividade de rios para o cenário futuro.....	26
Figura 4 – Mapa apresentando as pressões dominantes no cenário atual.....	28
Figura 5 – Mapa apresentando as pressões dominantes no cenário futuro.....	29



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dimensões da conectividade do rio afetadas por cada estressor, e respectivas fontes de informação .....	15
Tabela 2 - Peso ponderado de cada indicador de pressão .....	21
Tabela 3 – Número de rios a) de fluxo livre e b) com conectividade afetada no cenário atual	24
Tabela 4 – Número de rios a) de fluxo livre e b) com conectividade afetada no cenário futuro .....	27
Tabela 5 – Diferença de rios de fluxo livre entre o cenário atual e futuro .....	27
Tabela 6 – Pressões dominantes nos rios com boa conectividade e com baixa conectividade nos cenários a) atual ou b) futuro .....	28

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	10
2. METODOLOGIA .....	12
2.1. Modelo de classificação da conectividade dos rios.....	12
2.1.1. Grau de Fragmentação (DOF).....	17
2.1.2. Grau de Regulação (DOR) .....	17
2.1.3. Uso e Abstração de Água (USE).....	18
2.1.4. Densidade de Rodovias (RDD).....	18
2.1.5. Infraestrutura Urbana (URB) .....	19
2.1.6. Retenção de Sedimentos (SED) .....	19
2.1.7. Ponderação dos indicadores de pressão.....	21
2.2. Aplicação do modelo na BAP .....	21
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	22
3.1. Avaliação da conectividade de rios na BAP no cenário atual .....	22
3.2. Avaliação da conectividade de rios na BAP no cenário futuro .....	25
3.3. Identificação de pressões dominantes .....	27
3.2. Limitações e incertezas do modelo .....	30
4. CONCLUSÃO .....	31
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	32

## 1. INTRODUÇÃO

A Bacia do Alto Paraguai (BAP) fica situada entre Argentina, Brasil, Bolívia e Paraguai, e tem 1.135.984,46 quilômetros quadrados, sendo a segunda maior bacia da América do Sul. Nela está inserido o bioma argentino, boliviano e paraguaio, Chaco, uma porção dos biomas brasileiros Amazônia e Cerrado, e todo o bioma Pantanal, declarado Patrimônio Nacional pela Constituição Brasileira de 1988, e designado como área de relevante importância internacional pela Convenção de Áreas Úmidas RAMSAR, em 1993 (ANA, 2018). Localizada no centro da América do Sul, essa bacia possui uma grande variedade de fauna e flora que é influenciada pelas regiões contíguas da Amazônia, Chaco, Cerrado, Pantanal e Mata Atlântica (CALHEIROS et al., 2018).

A BAP possui duas áreas bem definidas: planalto e planície. O planalto fica a nordeste da bacia, e é caracterizado por altitudes relativamente elevadas, 200 a 1.400 metros, e drenagens bem definidas, sendo que, aos 200 metros, pode-se definir como a fronteira com as planícies (GONÇALVES et al., 2011). O bioma Pantanal é todo inserido nas áreas de planície, onde ocorrem as inundações periódicas, com variação de altitude de 80 a 150 metros, e são compostas por uma rede de drenagens complexa com extensos lagos (PAZ et al., 2010; GONÇALVES et al., 2011).

As áreas de planaltos e chapadões da BAP, onde são as cabeceiras dos rios, são responsáveis pela contribuição hídrica que determinam um fenômeno que ocorre nas planícies chamado de pulsos de inundações (PETRY et al., 2012). O conceito de pulso de inundação foi introduzido por Junk (1989), e descreve a dinâmica da vazão dos rios em áreas alagáveis, como ocorre no Pantanal. Em períodos de vazão controlada, os rios fluem por canais bem definidos, e em períodos de cheias a vazão aumenta e, como consequência do baixo relevo que dificulta o escoamento da água, os rios transbordam e alagam as áreas adjacentes (JUNK, 1989; JUNK, 2005)

As inundações e secas naturais e periódicas são essenciais para a manutenção das áreas alagadas, típicas do Pantanal, onde a conexão de rios permanentes se dá por uma zona de transição aquática-terrestre móvel (JUNK, 2005). A conexão dos rios às planícies de inundação é essencial para a manutenção da biodiversidade dos ambientes ripários, por, por exemplo, fornecer um ambiente favorável para a desova de peixes e promover o retorno de matéria orgânica e organismos para o canal principal (POFF et al, 1997).

O Rio Paraguai, que nasce ao norte do Pantanal mato-grossense e atravessa o Paraguai até a Bolívia, abriga milhares de espécies de plantas e animais, diversas delas endêmicas (CHERMOFF et al., 2001), e comanda a rede de drenagens da bacia (BRAZ et al., 2020).

O Brasil aposta fortemente na produção de energia a partir de empreendimentos hidrelétricos, e há uma rápida expansão dos interesses na exploração dos recursos hídricos na parte norte da BAP, onde se concentram as nascentes que abastecem esse sistema (CALHEIROS et al., 2018; ZANATTA & MACIEL, 2020). Os processos ecológicos e equilíbrio ambiental da região são influenciados pelos eventos que ocorrem nessas partes altas do norte da bacia, o planalto, onde o bioma predominante é o Cerrado (Gonçalves et al, 2011; ANA, 2018).

Barragens são estruturas hidráulicas construídas para a reserva e regulação hídrica, geração de energia, controle de cheias, melhoria da navegação, entre outros usos. Apesar dos benefícios gerados para o Homem, as barragens alteram a vazão e fluxo dos rios e, quando se fala de ambientes como os que compõem a BAP, pode-se esperar impactos como a redução das áreas alagáveis sujeitas às inundações sazonais, devido à diminuição do fluxo de água à jusante do rio (HU et al., 2008; ZEILHOFER & DE MOURA, 2009; ZANATTA & MACIEL, 2020).

Ademais, a presença de barragens altera o equilíbrio e a dinâmica desse ambiente, interrompendo ou limitando o transporte de sedimentos, o movimento lateral e longitudinal de espécies migratórias e, conseqüentemente, impacta todo o ecossistema e atividades econômicas, como turismo, pesca e agricultura (JUNK, 2005; HU et al., 2008; CALHEIROS et al., 2009; ZEILHOFER & DE MOURA, 2009; ZANATTA & MACIEL, 2020).

A construção de barramentos, represas e outras infraestruturas ao longo das zonas ribeirinhas, ou planícies adjacentes, podem afetar os componentes longitudinais (canal do rio), laterais (planícies aluviais), verticais (água subterrânea e atmosfera) e temporais da conectividade fluvial (GRILL et al., 2019). A fragmentação de rios é o maior impacto para um sistema como o da BAP, cuja principal característica é o fluxo dinâmico de suas águas e a periodicidade sazonal, que envolve o processo dos pulsos de inundação (JUNK, 2005; CALHEIROS et al., 2018) que por sua vez regem o funcionamento ecológico do Pantanal (CALHEIROS et al., 2009).

Assim como a fragmentação dos rios, a regulação hídrica também é uma consequência relevante da instalação de barragens (GRILL et al., 2015). A regulação da vazão dos rios reduz a diluição de poluentes e a entrada de água doce nos estuários, e pode interferir na periodicidade

das cheias (PRINGLE et al., 2000), o que é extremamente prejudicial para o ciclo de vida de muitas espécies aquáticas, ribeirinhas, e até de animais terrestres (POFF et al., 1997).

Considera-se “rio de fluxo livre” aquele cujas funções e serviços ecossistêmicos não são afetados significativamente por mudanças antropogênicas na conectividade fluvial, o que permite uma troca desobstruída de materiais, espécies e energia dentro dessa bacia hidrográfica (Grill et al., 2019).

Pesquisadores do laboratório Global HydroLAB da Universidade McGill (Canadá) e do WWF lideraram um estudo que avaliou a localização e extensão dos rios de fluxo livre do planeta. Este estudo foi publicado em 2019 na revista Nature, e concluiu que apenas 21 dos 91 rios com extensão maior que 1.000 km, e que originalmente desembocavam no oceano, continuam fluindo livremente desde a nascente (ver GRILL et al, 2019). Este estudo mostrou que os rios de fluxo livre estão, em sua maioria, distribuídos entre regiões do Ártico, na Bacia do Congo e Amazônica. O WWF – Brasil liderou a aplicação desse modelo na Bacia Amazônica e na Bacia do Alto Paraguai.

No presente trabalho será realizada a aplicação do modelo global proposto por Grill et al (2019), a fim de analisar a conectividade dos rios da Bacia do Alto Paraguai atualmente e estimar qual será o impacto na conectividade num cenário futuro, devido à implantação dos projetos hidrelétricos que estão em fase de planejamento, bem como estimar quais os principais estressores que afetam essa conectividade.

Observa-se que neste estudo o conceito de conectividade parte de um olhar ecológico com foco na hidrologia, em que a conectividade representa o livre transporte de matéria, energia ou organismos dentro e entre elementos do ciclo hidrológico (PRINGLE et al, 2000).

Este trabalho foi desenvolvido durante um estágio realizado no Fundo Mundial da Natureza – WWF-Brasil, entre agosto de 2018 e agosto de 2019, no qual tive a oportunidade de participar ativamente de reuniões da Iniciativa de Água Doce, auxiliar na coleta de dados, auxiliar na calibragem do modelo e coleta de dados, além de operar o processamento, tabular e interpretar os resultados.

## **2. METODOLOGIA**

### **2.1. Modelo de classificação da conectividade dos rios**

Nessa análise foi aplicado o modelo de rastreamento de rio “HydroROUT”, proposto por Lehner & Grill, 2013. O HydroROUT é um conjunto de ferramentas de simulação que fornece o rastreamento e processamento estatístico de uma rede de drenagem para modelagens hidro-

ecológicas (LEHNER & GRILL, 2013). O modelo foi construído com base no banco de dados HydroSHEDS (*Hydrological data and maps based on Shuttle Elevation Derivatives*; Lehner et al, 2008), produzido por meio de uma parceria entre o time de Ciências da Conservação do WWF, em colaboração com o Laboratório Global HydroLAB da Universidade McGill do Canadá.

O banco de dados HydroSHEDS fornece uma malha hidrográfica global com 15 arc-segundos de resolução espacial, ou 450 metros, chamada de HydroRIVERS, derivada de um modelo digital de elevação (MDE) produzido durante a missão SRTM da NASA (LEHNER et al, 2008; LEHNER, 2013). O processo de extração de hidrografia foi baseado no método D8 de *Flow Direction*, que define oito possíveis direções de fluxo em cada pixel do MDE, condicionado aquele para o vizinho onde o declive é o mais acentuado (LEHNER, 2013).

Apesar de o método D8 concentrar o fluxo no canal, comparado aos outros métodos automáticos de acúmulo de fluxo, ele apresenta inconsistências em regiões planas, como as planícies da BAP (RUHOFF et al, 2011).

A base HydroRIVERS fornece uma rede de linhas vetorizadas de todos os rios da Terra, representando uma extensão total de 35,9 milhões de km. Essa base de dados apresenta atributos por trecho de rio que incluem estimativas de comprimento, distância entre cabeceiras e montantes ou desague em oceanos, ordem do rio e vazão média (LEHNER et al, 2008; LEHNER & GRILL, 2013).

Um “trecho de rio” foi aqui definido como a menor unidade linear cartográfica entre duas confluências, e “rio” foi definido como o conjunto de trechos que compõem um caminho contínuo da nascente à foz, ou à uma confluência com um rio maior (GRILL et al., 2019).

Para o delineamento da rede hidrográfica apresentada no HydroRIVERS, um limiar de vazão foi usado para definir os pontos de iniciação das drenagens: considerou-se todos os pixels em que a área de captação exceda 10 km<sup>2</sup>, ou em que a vazão natural exceda 0,1 m<sup>3</sup>/s, ou ambos (LEHNER & GRILL, 2013).

Para que isso fosse possível, as estimativas de vazão média de longo prazo (entre os anos 1971 – 2000) foram derivadas do modelo global de escoamento e vazão WaterGAP – *Global Hydrology Model* (ver DÖL et al, 2003). Esse modelo simula tanto a vazão natural dos rios quanto a antropogênica, em que é considerado o uso e abstração de água para os setores agrícolas, industriais e municipais (DÖL et al, 2003; LEHNER & GRILL, 2013).

A função do modelo de rastreamento de rio HydroROUT é estabelecer a conectividade hidrológica a partir da criação de *links* dentro e entre trechos de rio e sub-bacias, seguindo os

princípios básicos do modelo de rastreamento de rios proposto por Whiteaker et al., 2006. Uma das particularidades do HydroROUT é o estabelecimento da conectividade com base numa “rede geométrica” – um modelo que distingue conjuntos de linhas (trechos de rios) e pontos (confluência entre dois trechos de rios), e identifica cada trecho de rio com um código “ID”, e cria outro código “ID” para o conjunto de trechos que formam um mesmo rio (ver LEHNER & GRILL, 2013).

Finalmente, o modelo rastreia, por meio de dados de entrada, a interação entre a rede hidrográfica e os seis indicadores de pressão definidos nesse estudo – e explicados mais à frente.

Para o processamento do modelo de rastreamento HydroROUT e cálculo dos parâmetros de conectividade, foi utilizado o software de programação PyCharm, que rodou o processamento a partir de um script em linguagem *Python*, cedido pelos autores do artigo do estudo global (GRILL et al, 2019).

Todos os dados de entrada do modelo estão em formato de *shapefile*, armazenados em *geodatabase* e nomeados de acordo com o indicador de pressão. Dados de entrada, resultados e mapas foram manipulados e processados pelo software de geoprocessamento ArcGIS 10.8.

Para avaliar o grau de conectividade hidrológica, calculou-se o Índice do Status de Conectividade (CSI, do inglês “*Connectivity Status Index*”), que varia de 0% a 100%, sendo este último valor para fluxos totalmente livres, para cada trecho de rio (Figura 1). Esse índice utiliza diversos estressores que afetam a conectividade dos rios, como grau de fragmentação (DOF, do inglês “*degree of fragmentation*”), grau de regulação hídrica (DOR, do inglês “*degree of regulation*”), densidade de rodovias (RDD), uso e abstração de água (USE), infraestrutura urbana (URB) e retenção de sedimentos (SED).

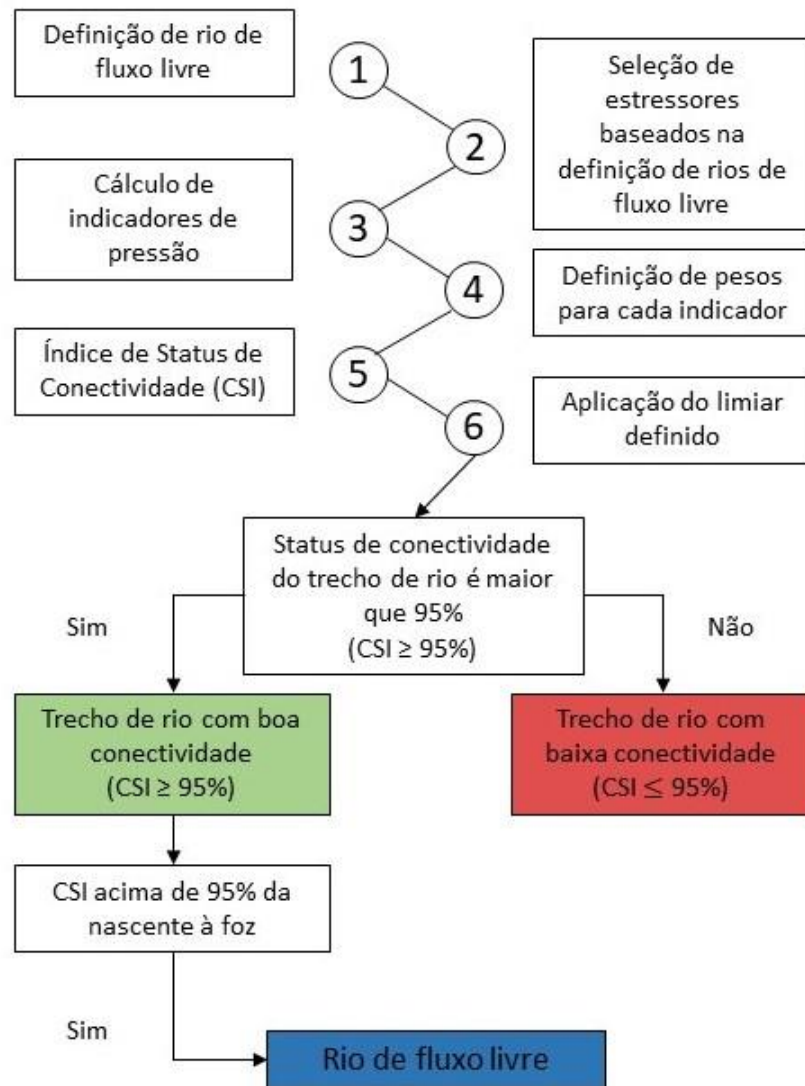


Figura 1 - Metodologia da classificação do status de conectividade dos rios

Os estressores acima foram estimados a partir de uma base de dados previamente selecionada e validada por especialistas, e cada um serve como *proxy* para avaliar os impactos na conectividade dos rios em suas quatro dimensões (Tabela 1).

Tabela 1 - Dimensões da conectividade do rio afetadas por cada estressor, e respectivas fontes de informação

<b>Estressor</b>	<b>Dimensão(ões) afetada(s)</b>	<b>Fonte dos dados</b>
<b>Fragmentação fluvial</b>	Longitudinal	HydroRIVERS (LEHNER & GRILL, 2013); GeoBolivia, 2017; Aneel, 2018.



<b>Regulação hídrica</b>	Lateral e temporal	HydroRIVERS (LEHNER & GRILL, 2013); HydroLAKES (MESSAGER et al, 2016); GeoBolivia, 2017; Aneel, 2018
<b>Uso e abstração de água</b>	Longitudinal, lateral, vertical e temporal	HydroRIVERS (LEHNER & GRILL, 2013); WaterGAP (DÖLL et al., 2003)
<b>Densidade de rodovias</b>	Longitudinal e lateral	UNASUR/ COSIPLAN
<b>Área urbana</b>	Lateral	DMSP-OLS v4 (DOLL et al., 2003)
<b>Retenção de sedimentos</b>	Longitudinal, lateral e vertical	HydroRIVERS (LEHNER & GRILL, 2013); HydroLAKES (MESSAGER et al, 2016); Mapa de Erosão (BORRELLI et al, 2017); GeoBolivia, 2017; Aneel, 2019;

O Índice do Status de Conectividade (CSI) é elaborado a partir de uma média ponderada dos valores dos seis indicadores de pressão para cada trecho de rio. Esse valor é, então, subtraído do máximo de 100% do Índice, que representaria um rio completamente livre.

Para validar o processamento, selecionamos dois rios marcadores, Rio Cabaçal e Rio Miranda, cujo status de rio de fluxo livre foi definido e confirmado entre especialistas. Por isso, à medida em que testamos cenários, com diferentes pesos relativos aos indicadores de pressão, esses dois rios deveriam permanecer com CSI maior que o limiar selecionado.

Com base na metodologia e ajustes propostos por Grill et al. (2019), um limiar de 95% de conectividade foi estabelecido para categorizar os rios em três status (Figura 1):

- 1) Fluxo livre: rios cujo CSI é maior ou igual a 95% da nascente à foz
- 2) Boa conectividade: trechos de rios com CSI maior ou igual a 95% em parte, porém não em toda a sua extensão
- 3) Baixa conectividade: rios com CSI menor que 95%

A categorização acima permite analisar a conectividade fluvial identificada a partir da modelagem hídrica proposta. Foram feitas análises para dois cenários: o cenário atual, com as barragens existentes, e o futuro, com a implantação das planejadas. Para estimar os impactos

das implantações no cenário futuro, foi adicionada a base de empreendimentos hidrelétricos planejados aos dados de entrada do processamento, alterando, assim, o grau de fragmentação e regulação hídrica.

### 2.1.1. Grau de Fragmentação (DOF)

O índice de grau de fragmentação (DOF) caracteriza o grau e a extensão da redução da conectividade longitudinal no sistema de um rio pela fragmentação, e considera que o trecho de rio esteja fragmentado tanto acima quanto abaixo da barragem ou impedimento (GRILL et al, 2019).

O DOF atribui níveis de fragmentação para cada trecho de rio com base na distância do local do impacto, que é medida a partir da diferença do fluxo dos rios, e assume que quanto maior a distância, maior a diferença da vazão e menor o grau de fragmentação (GRILL et al, 2019).

Uma função de decaimento logarítmico foi usada para calcular os valores do índice DOF, o que leva a um declínio mais rápido do que uma função linear. Os valores são calculados tanto para rio acima quanto abaixo, e variam de 0 a 100%.

$$DOF_j = 100 - \frac{|\log_{10}d_{bloc} - \log_{10}d_j| \times 100}{\log_{10}dr}$$

Sendo que “ $DOF_j$ ” é o valor de DOF do trecho de rio “ $j$ ” em porcentagem; “ $d_j$ ” é a vazão média anual do trecho de rio “ $j$ ” em metros cúbicos por segundos; “ $d_{bloc}$ ” é a vazão média anual no local da barragem ou impedimento em metros cúbicos por segundos; e “ $dr$ ” é a maior taxa de vazão entre “ $d_j$ ” e “ $d_{bloc}$ ” em metros cúbicos por segundos.

### 2.1.2. Grau de Regulação (DOR)

O grau de regulação hídrica (DOR) é um índice que estima quanto uma ou mais barragens, ou impedimentos, afetam o fluxo natural das águas rio abaixo. Esse indicador relaciona o volume do reservatório da barragem com o volume total do fluxo anual na localização da barragem, tendo como premissa que maiores reservatórios têm maior efeito regulatório em rios com menor vazão média anual, do que menores reservatórios têm efeito em rios com maior vazão média anual (GRILL et al., 2019).

O índice DOR é expresso pela porcentagem do volume do fluxo de água retido no reservatório, e é representado por:

$$DOR_j = 100 \times \frac{\sum_{i=1}^n svol_i}{d_{vol}}$$

onde " $DOR_j$ " é o valor de DOR do trecho de rio " $j$ " em porcentagem; " $svol_i$ " é o volume do reservatório " $i$ " acima do trecho de rio " $j$ " em metros cúbicos; " $n$ " é o número de reservatórios acima do trecho de rio " $j$ "; e " $d_{vol}$ " é a vazão média acumulada em um ano no trecho de rio " $j$ " em metros cúbicos por segundos.

Um valor alto de DOR indica alta probabilidade de que o volume da vazão possa estar armazenado a montante do trecho de rio (GRILL et al, 2015). DOR menor que 0,1% foi desconsiderado no cálculo final do índice de status de conectividade, para evitar a inclusão de impactos mínimos em trechos de rios (GRILL et al, 2019).

### 2.1.3. Uso e Abstração de Água (USE)

Utilizando os resultados do modelo WaterGAP (DÖLL et al., 2003), as informações de uso e abstração de água fluvial foram extraídas. O indicador USE fornece um valor em porcentagem da redução da vazão média de longo prazo por trecho de rio devido ao uso e abstração de água por atividades antropogênicas relacionadas aos setores agrícolas, industriais e municipais, sendo representado por:

$$USE_j = 100 \times \frac{d_{nat} - d_{ant}}{d_{nat}}$$

onde " $USE_j$ " é o valor de USE do trecho de rio " $j$ "; " $d_{nat}$ " é a vazão média anual natural (sem interferência humana) no trecho de rio " $j$ " em metros cúbicos por segundos; " $d_{ant}$ " é a vazão média anual considerando interferências humanas de uso e abstração de água em metros cúbicos por segundos.

### 2.1.4. Densidade de Rodovias (RDD)

As estradas, principalmente as não pavimentadas e/ ou abertas sem cuidados técnicos necessários, têm grande potencial de impacto sobre os recursos hídricos, por favorecerem eventos de erosão e contaminação da água (PETRY et al., 2012).

Esse indicador é usado para estimar o impacto das rodovias na conectividade lateral de várzeas e na conectividade longitudinal, onde eventualmente as rodovias cortam canais d'água (GRILL et al, 2019).

O RDD indica qual a porcentagem de área ocupada por rodovias em até 1 km de distância do trecho de rio. Considerou-se que a largura das rodovias é igual a 50 metros. O dado de entrada para cálculo desse indicador é um *shapefile* de geometria linear e escala 1:250.000 de rodovias – pavimentadas ou não, que foi cedido por parceiros do WWF - Brasil.

### 2.1.5. Infraestrutura Urbana (URB)

Para a estimativa dos efeitos urbanos na conectividade lateral dos rios, foi utilizado o dado global de intensidade de luz noturna, de imagens do sensor DMSP-OLS, com resolução espacial de 1 km (DOLL, 2008). Este, que fornece a informação especializada de luzes provenientes de assentamentos humanos e instalações industriais, obtidas através de processamentos feitos em imagens de satélite obtidas entre 1992 e 2003 (DOLL, 2008).

O valor de URB é calculado a partir da média da intensidade de luz noturna dentro da área de contribuição de cada trecho de rio (GRILL et al, 2019).

### 2.1.6. Retenção de Sedimentos (SED)

O índice SED quantifica a proporção da carga potencial de sedimentos suspensos que são retidos por barragens ou outros impedimentos para cada trecho de rio (GRILL et al, 2019). Portanto, o índice estima parte dos impactos da retenção dos sedimentos de um rio, pois não leva em consideração o transporte de sedimentos no fundo (geralmente associado a grandes rios), que é cerca de 1 a 20% da carga total de sedimentos (GRAF, 1984; GRILL et al, 2019).

Como a carga potencial de sedimentos é função do suprimento de sedimentos, Grill et al (2019) utilizaram um mapa global de erosão de solo hídrica, de 250 metros de resolução espacial, para o cálculo desse suprimento. O mapa combina fatores como erosividade, condições topográficas, propriedades do solo, uso da terra, sistemas de cultivo e práticas de conservação do solo, para estimar as taxas de erosão do solo anual, utilizando a Equação Universal de Perda de Solo Revisada (RUSLE) em escala global (RENARD et al., 1997; BORRELLI et al., 2017).

A carga potencial de sedimentos (CPS) foi então calculada da seguinte forma:

$$CPS_j = \left( \sum_{i=1}^n CPS_i + SS_j \right) \times (1 - ER_{lak,j})$$

em que “ $CPS_j$ ” é a carga potencial suspensa do trecho de rio “ $j$ ”; “ $CPS_i$ ” é a carga potencial suspensa do rio “ $i$ ” após a retenção de um lago ou reservatório; “ $n$ ” é o número de trechos de rios contribuintes; “ $ss_j$ ” é o suprimento de sedimentos no local da erosão na sub-bacia de contribuição do trecho de rio “ $j$ ”; e “ $ER_{lak,j}$ ” é a eficiência de retenção de todos os lagos localizados no trecho de rio “ $j$ ” em porcentagem.

Em seguida, é calculada a carga modificada de sedimentos (CMS), que representa a carga de sedimentos, após a retenção em lagos ou reservatórios:

$$CMS_j = \left[ \left( \sum_{i=1}^n CMS_i \right) + ss_j \right] \times (1 - ER_{lak+res,j})$$

em que “ $CMS_j$ ” é a carga modificada de sedimentos do trecho de rio “ $j$ ”; “ $CMS_i$ ” é a carga modificada de sedimentos do rio “ $i$ ” após a retenção de um lago ou reservatório; e “ $ER_{lak+res,j}$ ” é a eficiência de retenção de todos os lagos e reservatórios localizados no trecho de rio “ $j$ ” em porcentagem.

A eficiência de retenção de sedimentos em lagos ou reservatórios foi calculada segundo o método de Brune (1953), e a partir das informações dos dados de entrada do modelo HydroLAKES e dos dados utilizados para cálculo do DOR.

$$ER_j = 1 - \frac{0.05}{\sqrt{(\Delta\tau_j)}}$$

sendo que,

$$\Delta\tau_j = \frac{svol_j}{d_j}$$

onde “ $ER_j$ ” é a eficiência de retenção de lagos ou reservatórios localizados no trecho de rio “ $j$ ”; “ $\Delta\tau_j$ ” é a mudança do tempo de residência local do rio “ $j$ ” em anos; “ $svol_j$ ” é o volume total do lago ou reservatório localizado no trecho de rio “ $j$ ” em metros cúbicos; e “ $d_j$ ” é a vazão ao fim do trecho de rio “ $j$ ” em metros cúbicos por segundos.

Finalmente, o índice de retenção de sedimentos SED é expresso em porcentagem para cada trecho de rio, e é expresso por:

$$SED_j = 100 \times \frac{CPS_j - CMS_j}{CPS_j}$$

### 2.1.7. Ponderação dos indicadores de pressão

Com base no conhecimento e julgamento dos especialistas que participaram do processo de avaliação e criação da metodologia descrita por Grill et al. (2019), um modelo de ponderação foi criado para definição dos pesos de cada indicador na média ponderada que calcula o CSI. Para isso, foram elaborados 100 cenários diferentes, propondo distintas ponderações para cada indicador, mantendo apenas o limiar de 95% para o CSI. A escolha do melhor cenário foi feita com base na melhor correspondência das informações geradas para os rios escolhidos como teste, a partir de revisão de literatura e discussão entre especialistas.

Segundo Grill et al. (2019), em geral essa análise se mostrou coerente, sendo que os cenários concordavam de 78,1% a 97,5% com as informações dos rios marcadores. Para a escolha final de um desses cenários propostos, os autores recorreram à revisão de literatura, em que comportamentos de alguns rios em relação às pressões estudadas já teriam sido descritos. Para isso foi implementada uma metodologia de identificação de “limite de pressão único” (GRILL et al., 2019), em que foi definida uma faixa plausível de limites para cada indicador de pressão, sugerindo qual seu impacto máximo na conectividade de um rio.

Por fim, optou-se por replicar a ponderação feita para a escala global na avaliação da BAP (Tabela 2).

Tabela 2 - Peso ponderado de cada indicador de pressão

<b>Indicador de pressão</b>	<b>Peso na média ponderada</b>
Grau de fragmentação (DOF)	30%
Grau de regulação hídrica (DOR)	30%
Densidade de rodovias (RDD)	5%
Uso e abstração de água (USE)	15%
Infraestrutura urbana (URB)	5%
Retenção de sedimentos (SED)	15%

## 2.2. Aplicação do modelo na BAP

Do início de 2018 a agosto de 2019, realizamos algumas reuniões virtuais e workshops com diversos especialistas e pesquisadores parceiros do WWF que participaram do processo de criação e/ ou implementação da metodologia do estudo global de Grill et al (2019). Nesses

eventos discutimos os ajustes dos parâmetros utilizados para a análise dos rios de fluxo livre em escala global, para que pudéssemos realizar a aplicação do modelo no contexto da Bacia do Alto Paraguai.

A principal mudança entre os dados de entrada do modelo global (GRILL et al, 2019) e o regional aqui apresentado, é o nível de detalhamento quanto às informações de barragens hidrelétricas. No modelo global utilizou-se a base de dados “GRanD” (LEHNER et al., 2011), que identificou apenas quatro barreiras fluviais na BAP – sendo apenas uma na Bolívia e três no Brasil.

A base de dados das PCH e UHE brasileiras, obtidas da plataforma Sigel da Aneel, vêm com a informação de distinção de estágio, que determina em qual fase de desenvolvimento o projeto está. Nesse estudo, consideramos barreiras existentes aquelas que estão em construção ou operantes.

Como planejadas, consideramos as fases que apresentam algum nível de esforço ou investimento por parte da empresa interessada: projeto básico aceito ou aprovado, estudo de viabilidade técnica aceito ou aprovado, despacho de registro de adequabilidade do sumário executivo (DRS), requerimento de intenção à outorga de autorização (DRI) ou construção não iniciada.

Já o dado de empreendimentos hidrelétricos bolivianos, adquiridos pelo portal GeoBolívia, foram definidos como existentes ou planejados por parceiros do WWF-Bolívia.

Para a utilização do HydroRIVERS como dado de entrada no processamento, utilizou-se a ferramenta “clip” do software de geoprocessamento ArcGIS 10.8, de forma que a hidrografia fosse restrita à área de estudo – Bacia do Alto Paraguai (BAP).

Esse recorte resultou em 50.940 trechos de rios identificados, que compõem 25.663 rios e somam 266.107,43 km em extensão. Desses, 25.390 rios têm até 100 km de extensão, sendo considerados curtos; 253 têm entre 100 e 500 km, considerados médios; 16 são longos, com 500 a 1.000 km; e apenas 4 são muito longos, com mais de 1.000 km.

### **3. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

#### **3.1. Avaliação da conectividade de rios na BAP no cenário atual**

No cenário atual, em que consideramos 53 empreendimentos hidrelétricos, sendo apenas 1 fora da região das cabeceiras de rios da BAP, identificamos 69 rios com a conectividade de alguma forma afetada, seja o rio considerado com boa conectividade ( $CSI \geq 95\%$ , mas não em toda sua extensão) ou com baixa conectividade ( $CSI < 95\%$ ; Figura 2). Desses, 51 rios são

considerados curtos, 14 médios, 3 longos e apenas 1 se estende por mais de 1.000 km – o rio Paraguai, com mais de 2.500 km (Tabela 3).





Tabela 3 – Número de rios a) de fluxo livre e b) com conectividade afetada no cenário atual

<b>a) Rios de Fluxo Livre</b>					
	10 - 100 km	100 - 500 km	500 – 1.000 km	>1.000 km	<b>Total</b>
Quantidade de rios	25.339	239	13	3	25.594
% de rios em relação ao total	98,74	0,93	0,05	0,01	99,73
Extensão (km)	202.787,98	42.426,32	8.105,74	4.100,60	257.420,64
<b>b) Rios com conectividade afetada</b>					
	10 - 100 km	100 - 500 km	500 – 1.000 km	>1.000 km	<b>Total</b>
Quantidade de rios	51	14	3	1	69
% de rios em relação ao total	0,2	0,05	0,01	0,004	0,27
Extensão (km)	1.617,66	2.836,69	1.666,54	2.565,90	8.686,79

Numa análise de risco ecológico da BAP, Petry et al. (2011) destaca a importância dos tributários da margem direita do rio Paraguai, que compõem as áreas de alta contribuição hídrica, assim como a região da cordilheira dos Andes, na porção mais sudoeste da bacia, onde afloram as nascentes do rio Pilcomayo.

As áreas de maior contribuição hídrica apresentadas neste estudo correspondem às áreas de localização dos empreendimentos hidrelétricos existentes e planejados, ao mesmo tempo que são áreas que deveriam ser prioritárias para os esforços de conservação (GONÇALVES et al, 2010; PETRY et al, 2011).

O rio Paraguai, principal responsável pela drenagem das planícies da BAP (ANA, 2018), foi apresentado, tanto no cenário existente quanto no futuro, como um rio com boa conectividade ou rio com baixa conectividade. Podemos fazer uma leitura do rio no cenário atual separando-o em cinco partes. A primeira parte vai do extremo norte da bacia, onde é a nascente, até 13,5 km rio abaixo. O rio Paraguai é representado pela cor verde ( $CSI \geq 95\%$ ), indicando que esse trecho tem fluxo livre, e que há poucas pressões sobre ele.

Na parte montante do rio Paraguai, o CSI passa a ter cor vermelha, indicando um maior impacto em sua conectividade. Nesse trecho estão localizados os empreendimentos hidrelétricos instalados no rio (triângulos amarelos).

Esse fato pode justificar a pressão dominante que age no rio, tanto 23 km acima quanto 67 km abaixo da localização dos empreendimentos, que representa o grau de fragmentação. A perda de conectividade pela fragmentação restringe a capacidade de fluxo livre do rio,

impedindo um equilíbrio dinâmico entre o movimento da água e dos sedimentos (POFF et al, 1997). A perda de conectividade hídrica, por sua vez, altera funções fundamentais dos rios em relação aos serviços ecossistêmicos e manutenção da biodiversidade (OPPERMAN et al, 2014; ZARFL et al., 2015; GRILL et al, 2019).

O terceiro trecho, na Figura 2, começa próxima à divisa dos municípios mato-grossenses Denise e Barra do Bugres, na área de planalto da BAP. Neste trecho, o rio Paraguai é definido como rio com boa conectividade. A diferença é que nesse caso há pressões agindo sobre ele, tais como a retenção de sedimentos.

Neste trecho, as barragens existentes retêm grande parte dos sedimentos transportados pelo fluxo dos rios, o que gera consequências em ambos os sentidos do rio: tanto acima quanto abaixo, a depender do tamanho do reservatório da barragem. Por exemplo, a água liberada pelas represas pode erodir os sedimentos do canal a jusante, enquanto que, rio acima, pode haver o assoreamento do leito pelo acúmulo de sedimentos, o que reduz a disponibilidade e/ ou qualidade de habitat para muitas espécies aquáticas (POFF et al, 1997).

O processo de retenção de sedimentos pelas barragens também pode, por outro lado, ter efeitos benéficos, principalmente para a população e economia local (OPPERMAN et al, 2015), visto que sua retenção pelos reservatórios diminui a turbidez da água, reduzindo os custos de tratamento da água.

O quarto trecho começa no encontro do rio Paraguai com o Cuiabá, cujo status é de baixa conectividade ( $CSI < 95\%$ ) desde o norte da bacia, sendo a regulação hídrica a pressão dominante no trecho. Do ponto de encontro desses dois rios, o rio Paraguai segue sentido sul até a fronteira entre Brasil, Bolívia e Paraguai com status de baixa conectividade e, assim como o rio Cuiabá, também pressionado pela regulação hídrica. Os impactos da regulação da vazão dos rios pelos empreendimentos hidrelétricos diminuem do norte para o sul na bacia.

### **3.2. Avaliação da conectividade de rios na BAP no cenário futuro**

No cenário futuro (Figura 3), o status de conectividade do rio Paraguai será alterado na porção do rio que acompanha o limite do Paraguai, fazendo fronteira com os municípios mato-grossenses Corumbá e Porto Murtinho. No cenário atual, essa porção do rio tem boa conectividade. Entretanto, considerando os empreendimentos planejados, o impacto da regulação hídrica se estende por mais 334 km rio abaixo.

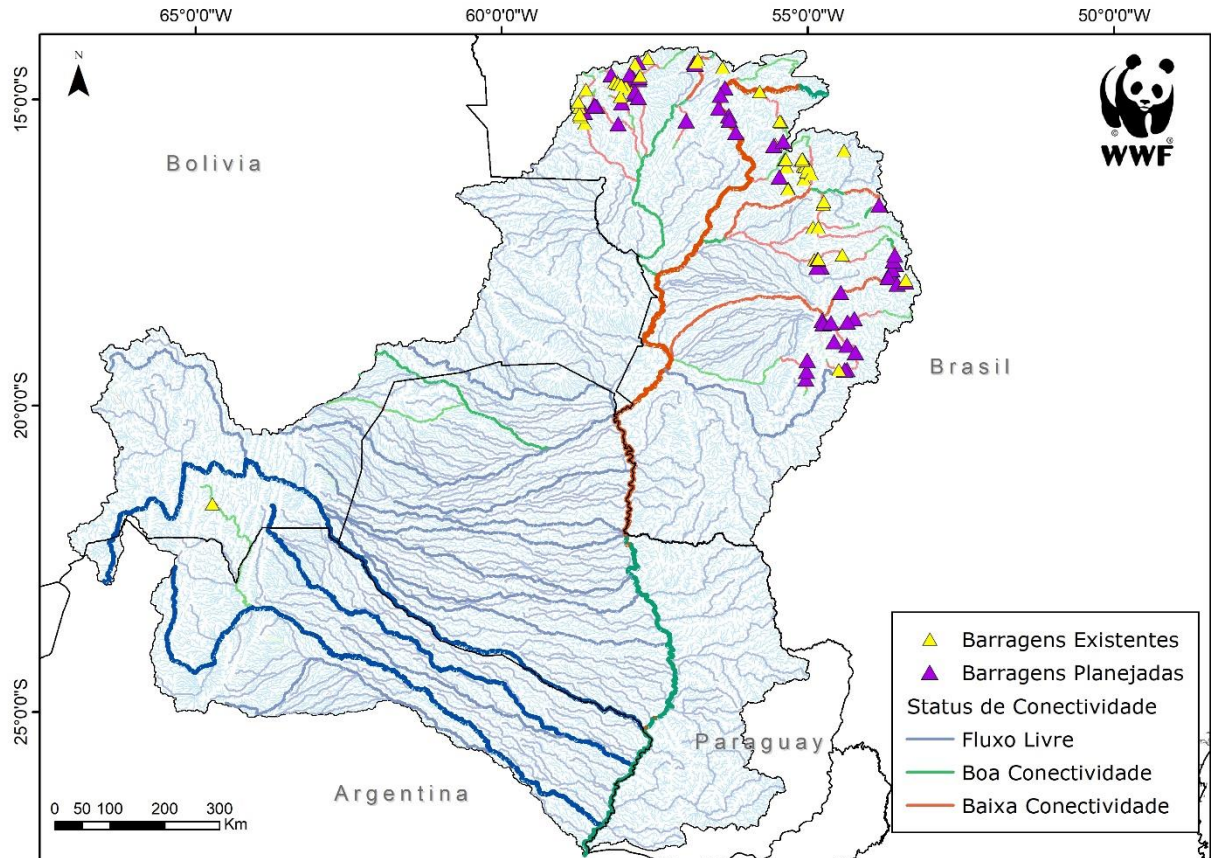


Figura 3 – Mapa de apresentação dos resultados da avaliação de conectividade de rios para o cenário futuro

No cenário futuro, supondo que todos os 55 empreendimentos hidrelétricos em estágio de planejamento sejam efetivamente construídos, teremos um total de 108 barramentos.

Comparando os cenários atual e futuro, há maior diminuição absoluta do número de rios de fluxo livre com até 500 km de extensão, porém a diminuição relativa é maior em rios com extensão entre 500 e 1.000 km (Tabela 4 e Tabela 5). Isso indica que, apesar do número de rios curtos de fluxo livre diminuir, a perda relativa ao número total de rios é mais significativa para rios maiores. Observamos que rios menores apresentaram maior índice de status de conectividade (CSI), o que pode ser justificado pela alocação dos empreendimentos hidrelétricos em rios maiores devido à capacidade de geração de energia de acordo com a vazão do rio.

Tabela 4 – Número de rios a) de fluxo livre e b) com conectividade afetada no cenário futuro

<b>a) Rios de fluxo livre</b>					
	10 - 100 km	100 - 500 km	500 – 1.000 km	>1.000 km	<b>Total</b>
Quantidade de rios	25.322	232	12	3	25.569
% de rios em relação ao total	98,67	0,9	0,05	0,01	99,63
Extensão (km)	202.140,85	41.106,08	7.407,83	4.100,60	254.755,36
<b>b) Rios com conectividade reduzida</b>					
	10 - 100 km	100 - 500 km	500 - 1.000 km	>1.000 km	<b>Total</b>
Quantidade de rios	68	21	4	1	94
% de rios em relação ao total	0,26	0,08	0,02	0,004	0,37
Extensão (km)	2.264,79	4.156,93	2.364,46	2.565,9	11.352,07

Tabela 5 – Diferença de rios de fluxo livre entre o cenário atual e futuro

<b>Diferença de rios de fluxo livre entre o cenário atual e o futuro</b>					
	10 - 100 km	100 - 500 km	500 – 1.000 km	>1.000 km	<b>Total</b>
Quantidade de rios	17	7	1	0	25
Extensão (km)	647,13	1.320,24	697,91	0	2.665,28

### 3.3. Identificação de pressões dominantes

Barragens, reservatórios de água e seus efeitos de fragmentação e regulação hídrica, tanto rio acima quanto rio abaixo, são os principais contribuintes para a perda de conectividade no cenário futuro (GRILL et al., 2019). De todas as seis pressões possíveis, pode-se perceber que para rios com CSI < 95% de até 1.000 km de extensão, a fragmentação é o processo dominante, enquanto no rio mais longo (rio Paraguai) a pressão dominante é a regulação hídrica. Isso pode ser justificado pelo maior volume acumulado dos reservatórios das barragens existentes, que só aumenta com a implementação das barragens em planejamento.

Tabela 6 – Pressões dominantes nos rios com boa conectividade e com baixa conectividade nos cenários a) atual ou b) futuro

<b>a) Cenário atual: pressões dominantes</b>				
Status de conectividade	10 - 100 km	100 - 500 km	500 - 1.000 km	>1.000 km
Rio com boa conectividade (CSI $\geq$ 95%)	RDD	SED	SED	DOR
Rio com baixa conectividade (CSI < 95%)	DOF	DOF	DOF	DOR
<b>b) Cenário futuro: pressões dominantes</b>				
Status de conectividade	10 - 100 km	100 - 500 km	500 - 1000 km	>1.000 km
Rio com boa conectividade (CSI $\geq$ 95%)	RDD	SED	SED	DOR
Rio com baixa conectividade (CSI < 95%)	DOF	DOF	DOF	DOR

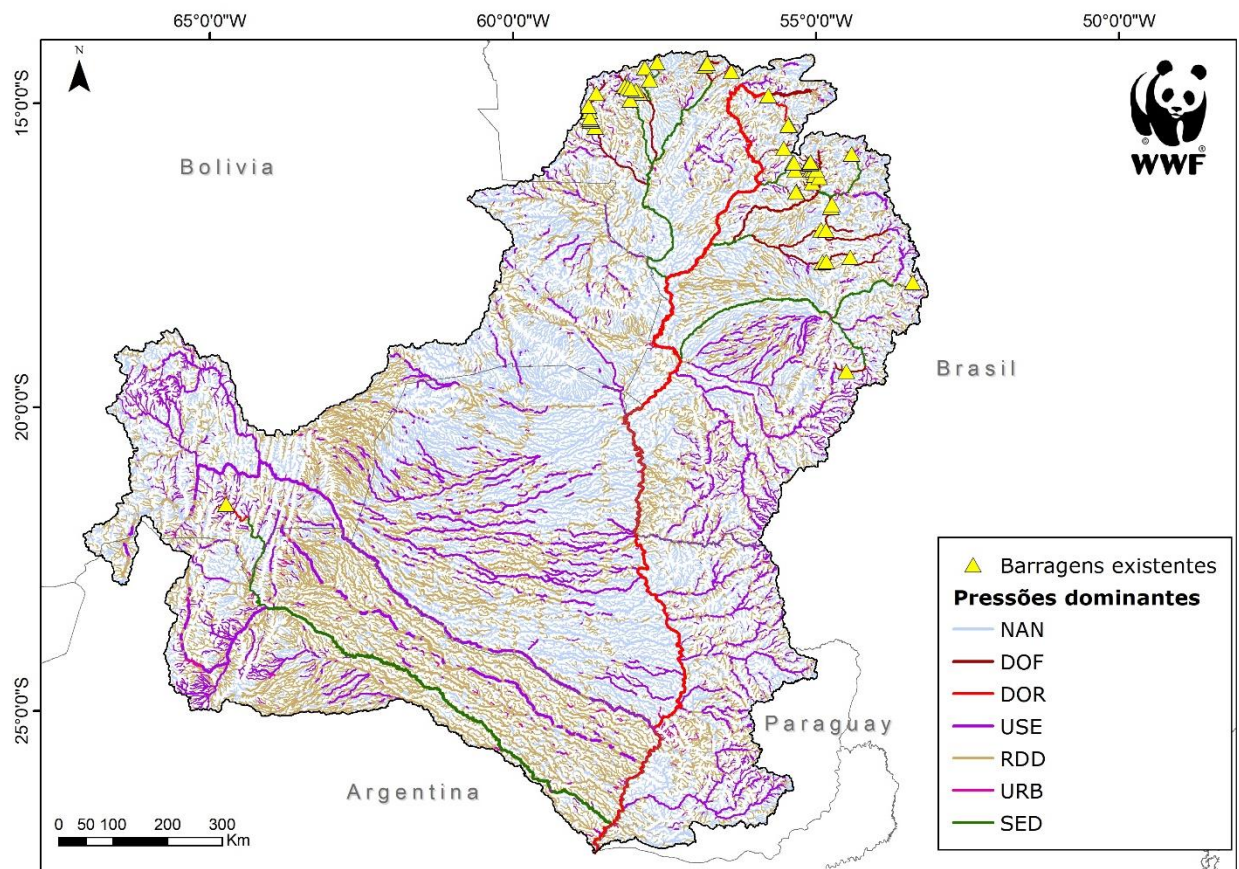


Figura 4 – Mapa apresentando as pressões dominantes no cenário atual

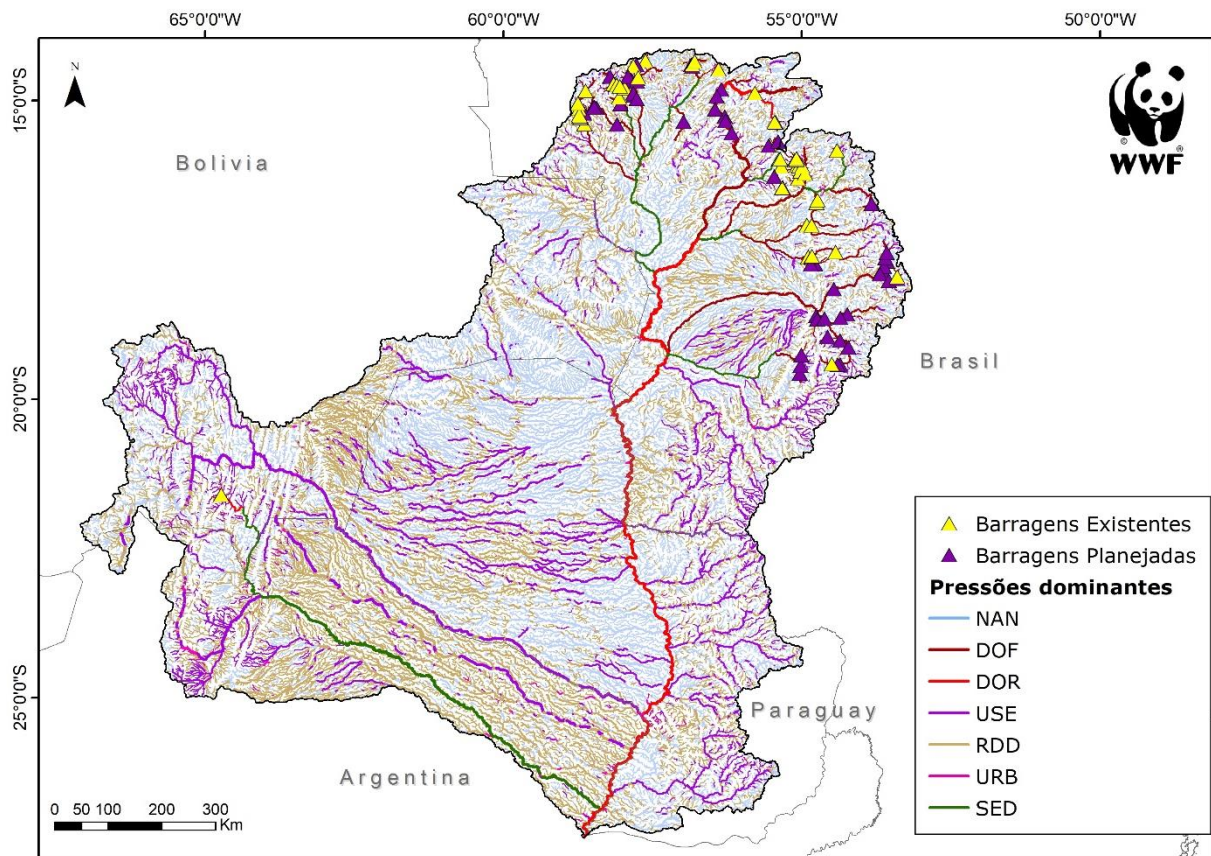


Figura 5 – Mapa apresentando as pressões dominantes no cenário futuro

Os mapas acima indicam as pressões dominantes identificadas por trecho de rio para ambos os cenários. A legenda “NAN” é, na verdade, a ausência de pressão, portanto pode-se deduzir que esses trechos têm fluxo livre. É importante reforçar que os rios com boa conectividade que apresentam pressão dominante não têm, necessariamente, impacto significativo relativo a esse estressor. Caso contrário, apresentariam status de rio com baixa conectividade, com  $CSI < 95\%$ .

A pressão dominante que se apresenta em rios de boa conectividade são bons indicadores para embasar trabalhos de preservação dos recursos hídricos, uma vez que apontam uma tendência de o elemento estressor possivelmente afetar a conectividade do trecho de rio.

Estima-se que ambos os rios Cuiabá e Taquari, dois dos principais fornecedores de água para o rio Paraguai, tenham a conectividade impactada pela fragmentação com a instalação dos empreendimentos planejados. O rio Taquari, que no cenário atual é considerado como rio de fluxo livre, aparece como rio com baixa conectividade devido ao grande número de empreendimentos planejados na área de planalto próxima à sua nascente.

A maior parte dos rios com até 500 km de extensão localizados na parte sul da bacia são pressionados pela alta densidade de rodovias, principalmente na porção de território argentino. Assim como essa região, a parte andina da BAP, em território boliviano, sofre com a crescente

atividade agrícola, que impulsiona o crescimento da malha rodoviária (PETRY et al., 2012), e justifica a pressão dominante relacionada ao uso e abstração de água para irrigação de plantios.

### 3.2. Limitações e incertezas do modelo

Sabe-se que para a geração dos dados HydroSHEDS foram aplicados diversos filtros automáticos e correções manuais na tentativa de representar, da forma mais fiel possível, a hidrografia de regiões propensas a erros, como regiões de relevo baixo, planícies inundadas, grandes lagos e rios com menos de 90 metros de largura (LEHNER, 2013).

A precisão do banco de dados HydroSHEDS depende das características do modelo digital de elevação que, por ser produto de radar, os valores de elevação SRTM são influenciados pela vegetação e outros efeitos de superfície, como umidade, rugosidade e interferências no sinal recebido pelo radar devido a extensas superfícies de água (FREEMAN, 1996).

O uso da malha hidrográfica HydroRIVERS se justifica por este trabalho ser uma réplica do modelo global, sendo essa a base de dados a mais atual e consistente (LEHNER & GRILL, 2013). Dessa forma, para melhorar a precisão do modelo de rastreamento de rios, sugere-se que posteriormente seja feita uma pesquisa comparativa entre essa e outros dados de hidrografia, como o DCW (VMAP-0; *Digital Chart of the World*), que, segundo Lehner (2013), pode se mostrar superior ao HydroSHEDS em áreas alagadas vegetadas, e apresenta dados vetorizados de rodovias, áreas urbanas e altimetria; ou que seja feito o aprimoramento da base global com inputs de dados da hidrografia local.

Entretanto, a geração da rede de drenagem usando o método D8 de direção de fluxo, como feito pelo modelo Hydroshed, pode gerar erros importantes em planícies como a porção baixa da BAP (RUHOFF et al., 2011). Apesar de os empreendimentos hidrelétricos estarem localizados nas áreas altas da bacia, em que o método D8 não apresenta inconsistências, a utilização de métodos como o  $D_{\infty}$  ou MFD poderia reduzir esses erros nas zonas de planícies.

O dado de entrada utilizado para cálculo do indicador URB, DMSP-OLS v4, é amplamente usado para mapeamento de áreas urbanas, porém tende a superestimar sua extensão devido ao efeito de brilho excessivo que ocorre em regiões com alta concentração de luzes noturnas – sejam provenientes de centros urbanos próximos ou iluminação de rodovias (DOLL, 2008). Na BAP, os municípios que apresentam maior concentração de luz noturna estão relativamente distantes e heterogeneamente distribuídos: Asunción (capital do Paraguai), Cuiabá (Mato Grosso, Brasil) e Formosa (Argentina).

Nesse sentido, sugere-se o uso de dados regionais mais recentes para estimar o impacto do indicador de pressão URB. O dado utilizado neste estudo, o mesmo utilizado por Grill et al. (2019), foi gerado a partir do processamento de imagens de satélite de 1992 a 2003 – 18 anos atrás. Nas últimas duas décadas percebemos um aumento significativo no desenvolvimento de infraestruturas e, associado a isso, o desenvolvimento de novos projetos de mapeamentos de uso e cobertura de solo, como, para exemplo no território brasileiro, o MapBiomias.

As aplicações do modelo global de avaliação de conectividade de rios em escalas maiores podem contar com informações mais precisas para estimativa dos indicadores de pressão, como, por exemplo, dados mensurados *in loco*, ao invés de dados modelados (como é o caso do cálculo de SED). Além disso, os autores dessa metodologia indicam que outros estressores poderiam ser incluídos no processamento, como, por exemplo, alteração de temperatura da água e mudanças nos fluxos de água sob e ao longo de rios em ambientes hiporreicos (GRILL et al, 2019). Essas informações não estão disponíveis em escala global, porém podem estar acessíveis dependendo da bacia em que a metodologia for aplicada.

#### **4. CONCLUSÃO**

A aplicação da metodologia proposta por Grill et al. (2019) nesse estudo se difere apenas pelo o detalhamento da base de dados de empreendimentos hidrelétricos. O benefício dessa mudança é permitir que a avaliação da conectividade seja mais detalhada, por termos como dado de entrada dados regionais de barragens, com suas respectivas informações associadas, o que possibilita melhor compreensão e estimativas dos efeitos dos empreendimentos nos cursos d'água.

Para resultados mais precisos, é sugerida a atualização e/ ou alteração nos dados de entrada de hidrografia, área urbana e vazão hídrica, bem como o ajuste dos parâmetros do processamento para o contexto da BAP;

No total, perder-se-ia mais de 2.600 km de extensão de rios de fluxo livre com a construção de novas barragens hidrelétricas, atualmente planejadas – o equivalente a aproximadamente a extensão total do rio Paraguai.

O rio Paraguai atualmente não é considerado de fluxo livre por ter quase metade da sua extensão total impactada pela regulação hídrica pelas barragens existentes. Com a construção dos empreendimentos hidrelétricos planejados para a BAP, o efeito da regulação hídrica se estenderia, devido ao acúmulo do impacto da regulação na vazão de seus afluentes.

Este estudo reforça a necessidade de preservação e conservação dos recursos hídricos da Bacia do Alto Paraguai, direcionando a atenção para o crescente interesse de produção de energia na região. Ademais, serve como fundamento para tomadas de decisão em relação à projetos de restauração e articulação de políticas públicas.



## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Plano de recursos hídricos da Região Hidrográfica do Paraguai**. Brasília: ANA. 2018.

BORRELLI, P. ROBINSON, D. A. FLEISCHER, L. R. et al. **An assessment of the global impact of 21<sup>st</sup> century land use on soil erosion**. Nature Communications, v. 8. 2017.

BRAZ, A. M., MELO, D. S., BONI, P. F., DECCO, H. F. **A estrutura fundiária do Pantanal brasileiro**. Finisterra, LV (113), p. 157–174. 2020. (doi: 10.18055/Finis18323)

BRUNE, G. M. **Trap efficiency of reservoirs**. Transactions, American Geophysical Union (AGU), v. 34, n. 3. 1953.

CALHEIROS, D. F., ARNDT, E., RODRIGUEZ, E. O., SILVA, M. C. de A. **Influências de Usinas Hidrelétricas no funcionamento hidro ecológico do Pantanal Mato-Grossense: recomendações**. Documentos eletrônicos: Embrapa Pantanal, ISSN. p.1981 – 7223. 2009.

CALHEIROS, D. F.; CASTRILON S. K. I.; BAMPI, A. C. **Hidrelétricas nos Rios Formadores do Pantanal: Ameaças à Conservação e às Relações Socioambientais e Econômicas Pantaneiras Tradicionais**. Revista Ibero-americana de Ciências Ambientais, v.9, n.1, p.119–139, 2018. (doi: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2018.001.0009>)

CHERMOFF, B., WILLINK, P.W. & MONTAMBAULT, J.R. **A biological assessment of the Rio Paraguay basin, Alto Paraguay, Paraguay**. Rapid Assessment Program Bulletin of Biological Assessment, Washington. v.19, p.1 – 156. 2001.

DOLL, C. N. H. **CIESIN thematic guide to night-time light remote sensing and its applications**. Center for International Earth Science Information Network (CIESIN) of Columbia University – USA. 2008. Disponível em <http://sedac.ciesin.columbia.edu/tg/>.

DÖLL, P. KASPAR, F. LEHNER, B. **A global hydrological model for deriving water availability indicators: model tuning and validation**. Journal of Hydrology, 270, p. 105 – 134. 2003.

FREEMAN, T. **What is imaging radar?** Jet Propulsion Laboratory. 1996.

GOLÇALVES, H. C. MERCANTE, M. A. SANTOS, E. T. **Hydrological cycle**. Brazilian Journal of Biology, v.71, n1. 2011.

GRILL, G. LEHNER, B. LUMSDON, A. E. MacDONALD, G. K. ZARFL, C. LIERMANN, C. R. **An index-based framework for assessing patterns and trends in river fragmentation and flow regulation by global dams at multiple scales**. Environmental Research Letters, v.10. 2015. (doi:10.1088/1748-9326/10/1/015001)

GRILL, G., LEHNER, B., THIEME, M. et al. **Mapping the world's free-flowing rivers**. Nature 569, 215–221. 2019. (doi: <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1111-9>)

HU, W.-W., WANG, G.-X., DENG, W., LI, S.-N. **The influence of dams on ecohydrological conditions in the Huaihe river basin, China**. Ecological Engineering, 33, p.233 – 241. 2008. (doi: 10.1016/j.ecoleng.2008.04.003)

Infraestructura de Datos Espaciales del Estado Plurinacional de Bolivia – **GeoBolivia**. Disponível em [geo.gob.bo/geonetwork](http://geo.gob.bo/geonetwork).

JUNK, W. J. **The Flood Pulse Concept in river-floodplain systems**. Proceedings of the International Large River Symposium, p.110 – 127. 1989.

JUNK, W. J. **Flood pulsing and the linkages between terrestrial, aquatic, and wetland systems**. SIL Proceedings, p.1922-2010, 29(1), p.11–38. 2005. (doi:10.1080/03680770.2005.11901972)

LEHNER, B. VERDIN, K. JARVIS, A. **New Global Hydrography Derived from Spaceborne Elevation Data**. 2008. Disponível em [www.hydrosheds.org](http://www.hydrosheds.org).

LEHNER, B. et al. **High-Resolution Mapping of The World's Reservoirs and Dams for Sustainable River-Flow Management**. Front. Ecol. Environment. v.9., p.494 – 502. 2011.

LEHNER, B. **HydroSHEDS technical documentation, version 1.2**. World Wildlife Fund – US. 2013.

LEHNER, B., GRILL, G. **Global river hydrography and network routing: Baseline data and new approaches to study the world's large river systems**. Hydrol. Proces. 27, p.2171 – 2186. 2013.

MESSAGER, M.L., LEHNER, B., GRILL, G., NEDEVA, I., SCHMITT, O. **Estimating the volume and age of water stored in global lakes using a geo-statistical approach.** Nature Communications: 13603. 2016. (doi: 10.1038/ncomms13603)

OPPERMAN, J. GRILL, G. HARTMANN, J. **The power of rivers – Finding balance between energy and conservation in hydropower development.** The Nature Conservancy. 2015. Disponível em: <https://www.nature.org/media/freshwater/power-of-rivers-report.pdf>

PAZ, A. R. COLLISCHONN, W. TUCCI, C. E. M. **Simulação hidrológica de rios com grandes planícies de inundação.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v.15, n4. 2010.

PETRY, P. et al. **Análise de risco ecológico da Bacia do Rio Paraguai: Argentina, Bolívia, Brasil e Paraguai.** The Nature Conservancy & WWF – Brasil. 2011.

PRINGLE, C. M. FREEMAN, M. C. FREEMAN, B. J. **Regional effects of hydrologic alterations on riverine macrobiota in the New World: tropical-temperate comparisons.** BioScience, v.50, p.807 – 23. 2000.

POFF, N. L., ALLAN, 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, v.47, n.11, p.769 – 784. 1997.

RENARD, K. FOSTER, G. WEESIES, G.McCOOL, D. & YODER, D. **Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE).** USDA-ARS, Washington, 1997.

RUHOFF, A. L. CASTRO, N. M. R. RISSO, A. **Numerical modelling of the topographic wetness index: an analysis at different scales.** International Journal of Geosciences, v.2, p. 476 – 483. 2011.

WHITEAKER, T. L., GOODALL, J. L., MAIDMENT, D. R., TAKAMATSU, M. **Integrating Arc Hydro features with a schematic network.** Transactions in GIS. 10, p.219 – 237. 2006. (doi: 10.1111/j.1467-9671.2006.00254.x)

ZANATTA, S. S. MACIEL, J. C. **Pantanal Ameaçado: as contradições em torno das narrativas para produção de energia elétrica.** Revista Brasileira de Meio Ambiente, v.8, n.1, p.2 – 11. 2020.

ZARFL, C., LUMSDON, A. E., BERLEKAMP, J., TYDECKS, L., TOCKNER, K. **A global boom in hydropower dam construction.** *Aqua Sci.* v.77, p.161 – 170. 2015.

ZEILHOFER, P., & DE MOURA, R. M. **Hydrological changes in the northern Pantanal caused by the Manso dam: Impact analysis and suggestions for mitigation.** *Ecological Engineering*, 35(1), p.105 – 117. 2009. (doi: 10.1016/j.ecoleng.2008.09.011)