

Análise de conectividade longitudinal  
de rios e fragmentação de habitats  
fluviais:  
Resultados finais para integração

Walter Collischonn

IPH UFRGS

## Sumário

1	Introdução.....	3
2	Revisão bibliográfica.....	3
3	Metodologia .....	8
4	Análise por sub-bacias da BAP .....	8
4.1	Análise de conectividade na bacia do rio Paraguai a montante de Descalvados .....	8
4.1.1	A rede de drenagem, barragens já existentes e os obstáculos naturais.....	8
4.1.2	Cenários de construção de barragens.....	12
4.1.3	Fator ponderador da rede de drenagem .....	13
4.1.4	Resultados da análise de fragmentação da rede fluvial.....	16
4.2	Análise de conectividade na bacia do rio Cuiabá .....	20
4.2.1	A rede de drenagem, barragens já existentes e os obstáculos naturais.....	20
4.2.2	Cenários de construção de barragens.....	23
4.2.3	Fator ponderador da rede de drenagem .....	25
4.2.4	Resultados da análise de fragmentação da rede fluvial.....	27
4.3	Análise de conectividade na bacia do rio São Lourenço .....	31
4.3.1	A rede de drenagem, barragens já existentes e os obstáculos naturais.....	31
4.3.2	Cenários de construção de barragens.....	34
4.3.3	Fator ponderador da rede de drenagem .....	34
4.3.4	Resultados da análise de fragmentação da rede fluvial.....	37
4.4	Análise de Conectividade na bacia do rio Piquiri .....	41
4.4.1	A rede de drenagem, barragens já existentes e os obstáculos naturais.....	41
4.4.2	Cenários de construção de barragens.....	44
4.4.3	Fator ponderador da rede de drenagem .....	44
4.4.4	Resultados da análise de fragmentação da rede fluvial.....	47
4.5	Análise de conectividade na bacia do rio Taquari.....	51
4.5.1	A rede de drenagem, barragens já existentes e os obstáculos naturais.....	51
4.5.2	Cenários de construção de barragens.....	54
4.5.3	Fator ponderador da rede de drenagem .....	55
4.5.4	Resultados da análise de fragmentação da rede fluvial.....	58
4.6	Análise de conectividade na bacia do rio Negro .....	62
4.5.1	A rede de drenagem, barragens já existentes e os obstáculos naturais.....	62
4.5.2	Dados de coleta de ovos e larvas .....	64
4.5.3	Análise simplificada de cenários .....	65
4.7	Análise simplificada de conectividade na bacia do rio APA.....	66
5	Conclusões.....	68

## 1 Introdução

Em 2016 foi firmado um contrato entre a Agência Nacional de Águas (ANA) e a Fundação Eliseu Alves (FEA) para a ELABORAÇÃO DE ESTUDOS DE AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA IMPLANTAÇÃO DE EMPREENDIMENTOS HIDRELÉTRICOS NA REGIÃO HIDROGRÁFICA DO RIO PARAGUAI E PARA SUPORTE À ELABORAÇÃO DO PLANO DE RECURSOS HÍDRICOS DA RH-PARAGUAI.

Entre os objetivos dos estudos especificados no contrato, estão dois ligados diretamente aos estudos hidrológicos, descritos no presente texto:

1. Apoiar a implementação da gestão dos recursos hídricos a partir de pesquisas relativas aos aspectos da dinâmica hidrológica, da qualidade das águas associada à sustentabilidade das ictiodiversidade e aspectos socioeconômicos relacionados; e
2. Subsidiar a Agência Nacional de Água – ANA e os órgãos gestores de recursos hídricos e do meio ambiente dos estados de Mato Grosso e Mato Grosso do Sul para que possam tomar decisões em relação às possibilidades de implantação de empreendimentos hidrelétricos na bacia do rio Paraguai.

Um dos aspectos relevantes na tomada de decisão com relação à implantação de empreendimentos hidrelétricos em uma bacia é a potencial interrupção da continuidade existente em um rio. Esta interrupção ocorre porque as barragens atuam como barreiras que dificultam a migração de peixes, por exemplo.

No presente texto é apresentada a análise da perda de conectividade causada nos rios da Bacia Hidrográfica do Alto Paraguai pela construção de barragens. O texto inicia com uma revisão sobre o tema Conectividade Longitudinal de rios, e sobre a fragmentação de habitats fluviais. Na sequência é apresentada a metodologia que foi aplicada nos estudos de fragmentação de habitats fluviais na Bacia do Alto Paraguai (BAP), e ao final são apresentados os resultados.

## 2 Revisão bibliográfica

A conectividade é uma propriedade dos habitats que permite o movimento de indivíduos, energia e massa (sedimentos, nutrientes, detritos) entre as diferentes porções deste habitat. Em ambientes fluviais, normalmente existe a conectividade entre as diferentes partes de um rio, e entre o rio e seus tributários. Esta é a chamada conectividade longitudinal, pois ocorre ao longo do eixo dos rios (Schmutz and Sendzimir, 2018).

A conectividade em ambiente aquático fluvial também pode ser caracterizada como a ligação entre o canal principal e a planície de inundação e lagos marginais. Esta é a chamada conectividade lateral (Schmutz and Sendzimir, 2018).

A fragmentação de habitats representa a transição de uma área nativa, uma vez inteira, em duas ou mais partes distintas. No caso de habitats fluviais, a fragmentação de habitat impede dificulta

o movimento de migração de jusante para montante, e dificulta ou impede o fluxo de ovos, larvas e indivíduos adultos de montante para jusante (Seliger e Zeiringer, 2018).

Organismos aquáticos, especialmente os peixes, dependem muito da conectividade, pois todas as espécies realizam mudanças de habitat em diferentes fases do seu desenvolvimento, ou para reprodução, ou para proteção contra predadores (Seliger e Zeiringer, 2018). No caso de peixes migradores, a desova geralmente ocorre a montante das áreas de alimentação de adultos. A corrente predominante no rio transporta os ovos e as larvas para jusante, onde os peixes juvenis se alimentam e crescem até se juntarem aos adultos (Barletta et al., 2010).

Obras de infra-estrutura, como barragens, podem representar obstáculos para o movimento de organismos vivos, ovos, larvas, sedimentos e nutrientes, e, dessa forma, reduzem a conectividade dos habitats. Barragens, em especial, podem impedir o acesso de peixes a áreas essenciais de reprodução e criação, resultando em redução da produtividade de peixes e outras mudanças na composição da comunidade aquática (Ioannidou e O’Hanley, 2018).

Diversos autores concordam que, para harmonizar o desenvolvimento econômico com a sustentabilidade do meio ambiente é necessário que, antes da construção de novas barragens, seja avaliada a extensão dos impactos de perda de conectividade. Além disso, esta avaliação não pode ser centralizada em cada empreendimento de forma individualizada, mas deve ser uma avaliação regional, em grande escala, envolvendo um conjunto de empreendimentos (Seliger et al. 2016; Jager et al., 2015; Santos, 2011).

No caso de barragens para produção de energia hidrelétrica, a decisão sobre instalar ou não as barragens, envolve uma troca (“trade-off”) entre produção de energia de um lado e a qualidade do ambiente fluvial de outro.

Uma forma que tem sido utilizada para mitigar a fragmentação de habitat causada pelas barragens, depois de sua construção, é a criação de mecanismos de passagem de peixes nos locais das barragens (Celestino et al., 2018). Entretanto, estas soluções são relativamente pouco eficientes. As frações dos peixes migradores que conseguem transpor as barragens através de mecanismos de transposição são relativamente baixas. Além disso, os ovos e larvas dos peixes migradores que conseguem atingir a cabeceira dos rios acabam retidos nos trechos de rio de baixa velocidade da água existentes a montante das barragens, e acabam não atingindo as regiões mais adequadas para seu desenvolvimento. Por tudo isso, mecanismos de transposição, como as escadas de peixes, podem resultar em “armadilhas ecológicas” (Schmutz and Moog, 2018; Pelicice e Agostinho, 2018; Pelicice et al., 2015).

Por outro lado, quando é possível planejar de forma sistêmica e regional, antes da construção de uma ou mais barragens em uma bacia hidrográfica, é possível buscar configurações ou arranjos de barragens que permitem maximizar os benefícios energéticos, minimizando os impactos ecológicos e para a sociedade (Jager et al., 2015; Ioannidou e O’Hanley, 2018).

Algumas questões que podem ser colocadas neste tipo de avaliação são (Jager et al., 2015):

- É melhor construir poucas barragens ao longo dos rios principais, ou muitas pequenas barragens nos tributários?
- É melhor concentrar as barragens em algumas sub-bacias, ou distribuir de forma homogênea em todas as sub-bacias?

Entretanto, para formular o problema na forma de um “trade-off” é necessário quantificar os impactos ecológicos de alguma forma. No aspecto da conectividade de habitats, e sua possível

fragmentação, foram criados recentemente diversos índices que permitem realizar esta quantificação.

Cote et al. (2009) propuseram um índice para quantificar conectividade longitudinal de redes fluviais, com base na probabilidade esperada de um organismo ser capaz de se mover livremente entre dois pontos aleatórios da rede. O índice proposto tem duas versões, uma para peixes Diádromos (que migram da água doce para a salgada ou vice-versa), e outra para peixes Potamódromos (que migram apenas entre ambientes fluviais).

O índice proposto por Cote et al. (2009) recebeu o nome de Dentritic Connectivity Index (DCI). Ele está baseado na representação da rede de drenagem através de segmentos de rio. A rede de drenagem completa é representada por N segmentos de rio. O comprimento de cada segmento é dado por  $l_i$ . O comprimento total da rede de drenagem é representado por L, e é igual ao somatório do comprimento de cada um dos N trechos individuais.

A versão do DCI para peixes Potamódromos, denominada  $DCI_P$ , é apresentada na equação 1.

$$DCI_P = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N c_{ij} \cdot \frac{l_i}{L} \cdot \frac{l_j}{L} \cdot 100 \quad (1)$$

O termo  $c_{ij}$  na equação 1 representa a conectividade entre o trecho de rio i e o trecho de rio j de uma rede de drenagem. Ele é calculado pela equação 2.

$$c_{ij} = \prod_{m=1}^M p_m^u \cdot p_m^d \quad (2)$$

Nesta equação o símbolo  $\prod$  representa o “produtório”, que é semelhante ao símbolo  $\sum$  para o somatório, porém representa produto. A letra m representa cada um dos M obstáculos existentes entre os segmentos i e j, e  $p^u$  e  $p^d$  são as “passabilidades” para montante ( $p^u$ ) e para jusante ( $p^d$ ) destes obstáculos.

A passabilidade, ou transposabilidade (Santos, 2011) de uma barreira pode ter valores entre zero e 1. Uma barreira absoluta, que impede a passagem de peixes, tem passabilidade igual a zero. Além disso, a passabilidade de um obstáculo para montante ( $p^u$ ) pode ser diferente da passabilidade para jusante ( $p^d$ ) deste mesmo obstáculo.

A versão do DCI para peixes Diádromos, denominada  $DCI_D$ , é apresentada na equação 3.

$$DCI_D = \sum_{i=1}^N c_{ik} \cdot \frac{l_i}{L} \cdot 100 \quad (3)$$

Na equação 3 o termo  $c_{ik}$  representa a conectividade entre o trecho i e a foz do rio, representada pela letra k. O valor de  $c_{ik}$  pode ser calculado pela equação 2, considerando que o trecho j é a foz do rio.

Com base nos índices  $DCI_P$  e  $DCI_D$ , Cote et al. (2009) mostraram que a localização da barreira ou obstáculo sobre a rede de drenagem tem um papel relevante sobre a conectividade. Obstáculos ao movimento localizados imediatamente a montante da foz de um rio tem impacto maior sobre a conectividade para peixes Diádromos (que precisam migrar para o oceano). Já para peixes Potamódromos, os obstáculos localizados no centro da rede hidrográfica trazem maior impacto de fragmentação.

Desde sua proposta inicial, os índices  $DCI_P$  e  $DCI_D$  foram utilizados em diversos trabalhos para avaliar a conectividade de habitat para peixes (Buddendorf et al., 2019; Buddendorf et al., 2017; Eros et al., 2017, Fuller et al., 2015; Grill et al., 2014; Grill et al., 2015; Mahlum et al., 2014; McKay et al., 2013; Perkin et al., 2013; van Puijenbroek et al., 2019; Shaad et al., 2018).

O índice DCI pode ser utilizado, por exemplo, para uma análise de trade-off entre Energia e Conservação Ambiental, na avaliação do impacto de conjuntos de barragens em bacias hidrográficas, como sugerido por Jager et al. (2015). Esta análise de trade-off permite comparar diferentes configurações espaciais de construção de barragens, e seus impactos na capacidade de produção de energia e na condição ambiental, conforme mostra um caso hipotético na Figura 1.

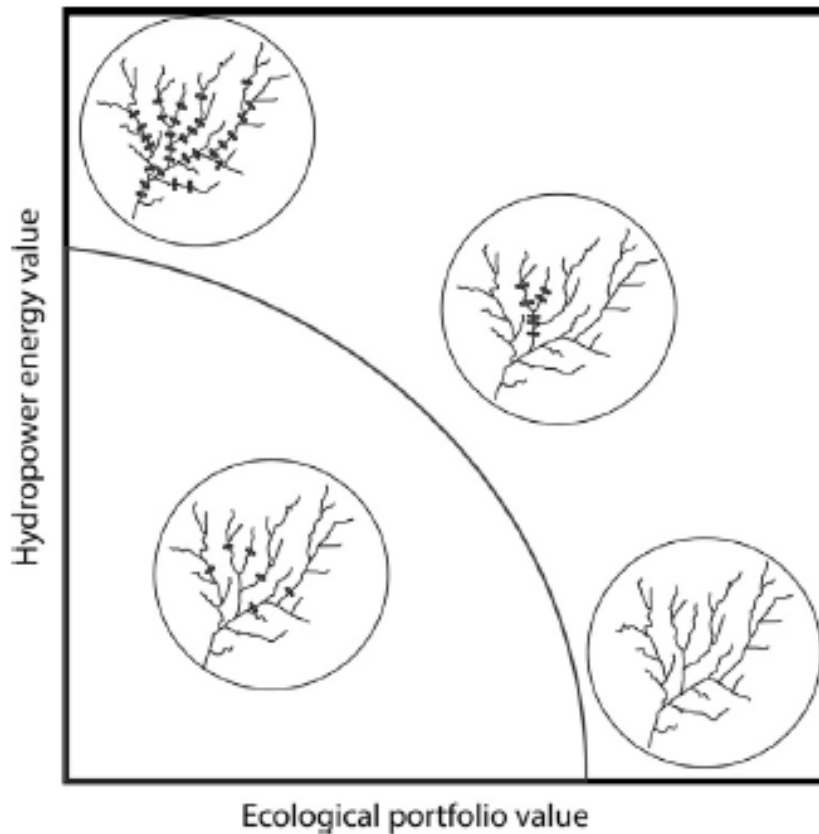


Figura 1: Trade-off entre diferentes configurações de conjuntos de barragens em uma bacia hidrográfica (adaptada de Jager et al., 2015).

No exemplo hipotético da Figura 1, podemos identificar dois extremos. Um extremo, localizado à esquerda na figura, representa o desenvolvimento de todas as barragens identificadas em um inventário preliminar, e resulta na máxima capacidade de geração de energia, porém na pior condição ambiental resultante. O outro extremo, localizado à direita na figura, representa a condição em que não é construída nenhuma das barragens identificadas no inventário, resultando em capacidade de produção de energia nula, e mantendo a melhor condição ecológica. Entre estes dois extremos há diversas combinações possíveis, e é possível identificar, aproximadamente, uma curva de Pareto, identificada pela linha contínua.

Uma análise semelhante, porém, com dados reais, foi apresentada por Ioannidou e O'Hanley (2018), mais recentemente, e está ilustrada na Figura 2.

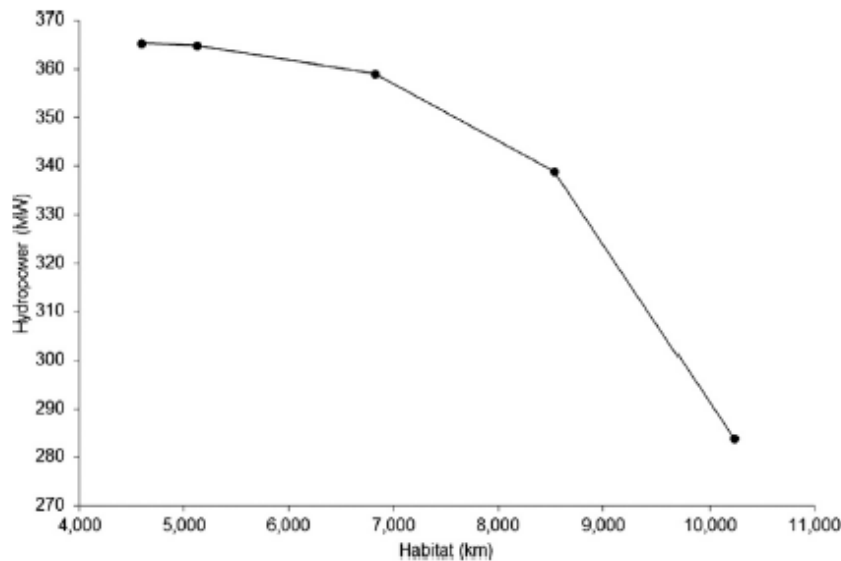


Figura 2: Exemplo de “trade-off” entre produção de energia (no eixo vertical) e manutenção de conectividade de habitat (medida em km de rios conectados, no eixo horizontal) em um estudo no Reino Unido, apresentado por Ioannidou e O’Hanley (2018).

As conclusões do trabalho de Jager et al. (2015) são particularmente interessantes. Os autores concluem que, para minimizar o impacto ambiental em termos de fragmentação de habitats, o ideal é concentrar as barragens em um ou alguns tributários do rio principal. Além disso, a construção de barragens sobre o rio principal, especialmente em trechos localizados mais a jusante, deve ser evitada.

O índice de conectividade dendrítica, na forma apresentada nas equações 1 e 3, considera que os trechos de rio têm a mesma importância, independentemente da sua localização. Isso nem sempre é uma hipótese razoável, pois é comum que certos trechos de rio tenham uma importância ecológica maior do que outros. Neste caso, uma alternativa é utilizar o que se pode chamar de Índice de Conectividade Dendrítica Ponderado, em que um peso é atribuído a cada segmento da rede de drenagem, de acordo com algum critério ecológico, conforme já previsto por Cote et al. (2009). A expressão para o Índice de Conectividade Dendrítica Ponderado, no caso de peixes Diádromos, é apresentada na equação 4.

$$DCIP_D = \frac{\sum_{i=1}^N c_{ik} \cdot l_i \cdot P_i}{\sum_{i=1}^N l_i \cdot P_i} \cdot 100 \quad (4)$$

Na equação 4 o valor de  $P_i$  corresponde ao peso atribuído ao segmento  $i$  da rede de drenagem, e os demais termos são equivalentes aos da equação 3.

Um exemplo de fator de ponderação é apresentado por Grill et al. (2014), que ponderam a importância dos trechos pelo seu volume de água, que está relacionado à largura e à profundidade, além do comprimento. De forma semelhante, Buddendorf et al. (2017) utilizam ponderadores relacionados ao tipo de substrato do leito do rio, e sua qualidade como habitat para peixes.

A importância de manter trechos de rios relativamente longos livres de qualquer tipo de obstáculo à migração, como barragens, por exemplo, foi recentemente comprovada no Brasil em estudos no rio São Francisco (Lopes et al., 2019) e no rio Paraná (Marques et al., 2018).

### 3 Metodologia

Para analisar o impacto da construção das barragens na BAP sobre a conectividade dos rios foi utilizada uma metodologia baseada no índice de conectividade dendrítica para peixes do tipo diádromos, adequado para peixes que migram entre os rios e o oceano. Esta escolha foi feita porque os peixes migradores do Pantanal têm um comportamento de migração entre os rios do Planalto e o Pantanal. Para os peixes migradores da BAP, o Pantanal tem o mesmo papel que o oceano para os peixes diádromos, ou seja, é necessário que os rios em que ocorre a desova estejam conectados ao Pantanal, permitindo livre movimento de migração (Resende, 2008).

O índice de conectividade dendrítico utilizado foi calculado com base na equação proposta por Cote et al. (2009), porém contou com uma modificação para permitir a ponderação de trechos de drenagem em diferentes regiões da bacia, conforme comentado no item anterior. A equação utilizada foi o  $DCIP_D$ , com pesos dados pela importância das sub-regiões para a reprodução dos peixes (equação 4).

A importância dos trechos da rede de drenagem para a reprodução de peixes foi estimada com base nos fluxos estimados de ovos e larvas de peixes nos pontos de coleta.

O índice de conectividade foi calculado considerando como base a rede de drenagem oficial disponibilizada pela Agência Nacional de Águas (ANA), denominada BHO5K, considerando apenas os trechos de rio com área de drenagem total a montante superior a 100 km<sup>2</sup>.

O valor do  $DCIP_D$  foi calculado para cada cenário de implementação de barragens na bacia, iniciando pelo cenário base, que corresponde à situação atual, incluindo as barragens já existentes e obstáculos naturais à migração de peixes, como quedas d'água. Posteriormente, o valor do  $DCIP_D$  foi calculado novamente em várias configurações de subconjuntos de todas as barragens propostas.

O cálculo do  $DCIP_D$  foi realizado utilizando um programa em linguagem FORTRAN desenvolvido especialmente para este objetivo durante o projeto.

Os resultados são analisados em mapas e tabelas, indicando trechos de rio conectados e desconectados e o valor final do  $DCIP_D$  em cada cenário.

## 4 Análise por sub-bacias da BAP

### 4.1 Análise de conectividade na bacia do rio Paraguai a montante de Descalvados

Para realizar a análise de conectividade fluvial na bacia do rio Paraguai foram considerados dados da rede de drenagem oficial da ANA, cenários de construção de barragens e informações sobre fluxo de ovos e larvas de peixes obtidos durante o projeto pela equipe de ictiologia.

#### 4.1.1 A rede de drenagem, barragens já existentes e os obstáculos naturais

Para a análise de conectividade e fragmentação de habitat, a bacia hidrográfica do rio Paraguai foi delimitada até o posto fluviométrico Descalvados, localizado já no Pantanal. Nesta região, os

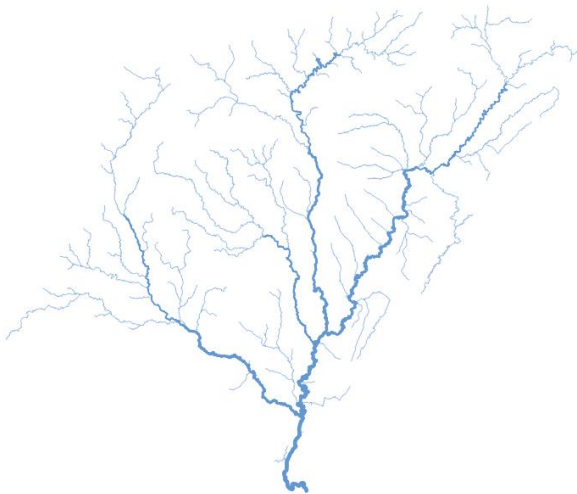


principais rios, além do próprio Paraguai, são os rios Jauru, Sepotuba, Cabaçal e Juba, conforme ilustrado na Figura 3.



*Figura 3: Rede de drenagem da bacia do Alto Paraguai a montante do posto fluviométrico Descalvados, e os principais rios da região.*

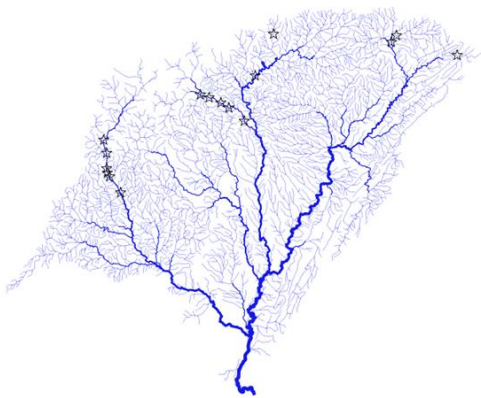
A rede de drenagem utilizada na análise é a rede vetorial disponibilizada pela ANA e denominada BHO5K, e conta com 3620 trechos de rio, com comprimento médio de 5 km por trecho (Figura 3). Entretanto, os cursos d'água muito pequenos foram desconsiderados da análise, através da eliminação da base BHO5K de todos os trechos de rio cuja área de drenagem total (atributo NUAREAMONT) é inferior a 100 km<sup>2</sup>. A rede de drenagem resultante, com 1144 trechos de rio com comprimento médio de 4,55 km está apresentada na Figura 4.



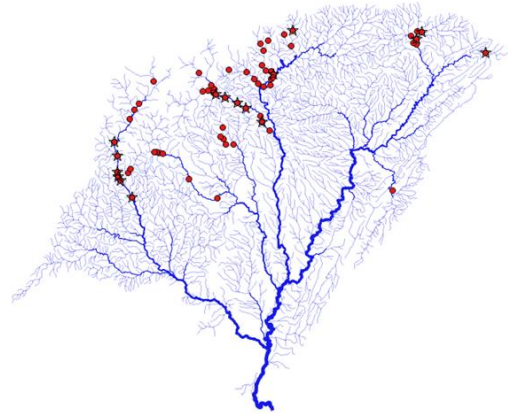
*Figura 4: Rede de drenagem da bacia do Alto Paraguai a montante de Descalvados mostrando apenas os rios com área de drenagem superior a 100 km<sup>2</sup>.*

Nesta bacia já existem 16 usinas hidrelétricas em operação e há outras 46 em projeto, conforme mostra a Figura 5. Muitas das usinas em operação se concentram sobre os rios Jauru e Juba.

**Usinas em operação**



**Em operação + propostas**



*Figura 5: Localização das usinas hidrelétricas em operação e das usinas hidrelétricas projetadas na bacia do Alto Paraguai até Descalvados.*

Além das barragens já existentes, existem alguns obstáculos naturais também dificultam a migração de peixes para montante no período de piracema. Os obstáculos naturais foram identificados com base em dados de declividade dos rios estimados a partir do modelo digital de elevação do SRTM e de imagens de satélite de alta resolução. Estas informações foram complementadas ainda com fotografias do local e com informações obtidas no campo, quando possível.

Cabe destacar dois obstáculos naturais importantes que podem ser considerados barreiras intransponíveis à migração nesta bacia: o Salto das Nuvens (Figura 6), no rio Sepotuba e o Salto do Céu (Figura 7), no rio Branco, na bacia do rio Cabaçal.



*Figura 6: Salto das Nuvens no rio Sepotuba, no município de Tangará da Serra.*

Na totalidade foram identificados 28 obstáculos naturais totais ou parciais ao deslocamento de peixes migratórios na bacia. A cada um dos obstáculos foi atribuída uma probabilidade de passagem de peixes migratórios. Esta probabilidade foi estimada com base em fotografias do obstáculo, imagens de satélite, estimativas de declividade e comparação com obstáculos

semelhantes. A localização dos obstáculos está apresentada na Figura 8, em que a cor do ponto representa a probabilidade de passagem de peixes migradores.



Figura 7: Salto do Céu, no rio Branco, no município de Salto do Céu.

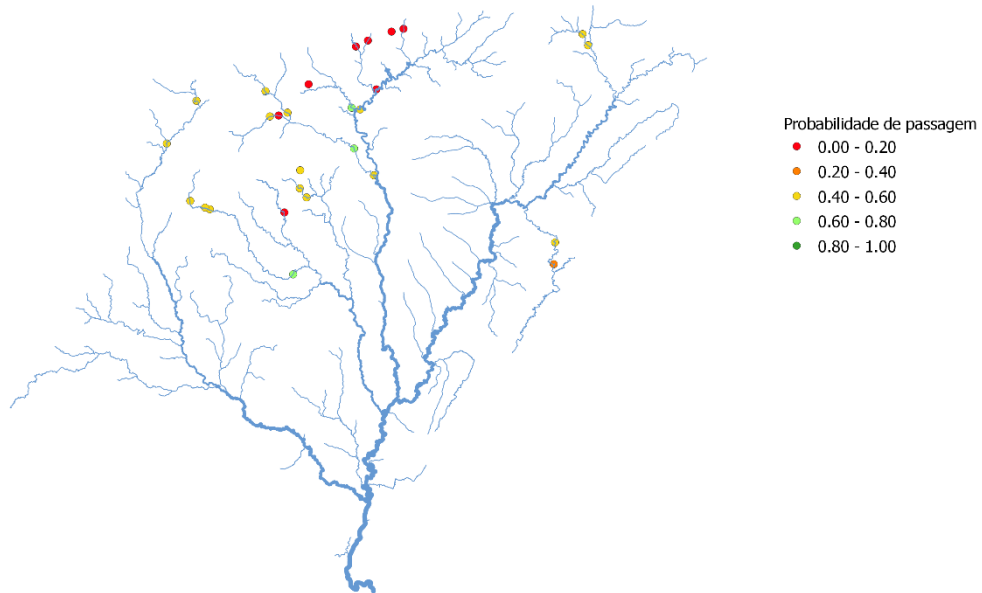


Figura 8: Localização e probabilidade de passagem de obstáculos naturais para migração de peixes na bacia do rio Paraguai a montante de Descalvados.

#### 4.1.2 Cenários de construção de barragens

Conforme mencionado antes, existem 46 barragens em projeto na bacia do rio Paraguai definida até o posto fluviométrico Descalvados. O impacto de cada uma delas sobre a conectividade fluvial na bacia depende da construção ou não de outras barragens. Assim, idealmente seria necessário calcular o índice de conectividade para todas as combinações possíveis da inclusão ou não de 46 barragens. O número de cenários a ser analisado, portanto, é igual a 2 elevado a 46, o que corresponde a cerca de 70 trilhões de cenários. Por questões de limitação de capacidade computacional, este número é elevado demais, pois, ainda que o DCI de cada cenário fosse calculado em 1 milésimo de segundo, seriam necessários 133 mil anos para obter o resultado de todos os cenários.

Por este motivo, foi adotada uma metodologia de combinar as barragens na forma de conjuntos, ou blocos de barragens. Os critérios para definir os conjuntos foram baseados em análises preliminares e foram baseados nas seguintes considerações:

1. Todas as barragens atualmente em operação constituem um único grupo.
2. Barragens localizadas a montante de barragens já existentes, ou de grandes obstáculos naturais, podem ser agrupadas porque o impacto sobre o DCIPD é nulo.
3. Barragens próximas, localizadas sobre o mesmo segmento da rede de drenagem, na forma como esta é representada na BHO5K, podem ser agrupadas, pois a inclusão no cenário de análise de apenas uma delas, de apenas outra ou das duas não apresenta diferença no valor do DCIPD calculado.

Com base nestes critérios, foram definidos 23 blocos, ou conjuntos, de barragens, conforme a Figura 9 e Tabela 1.

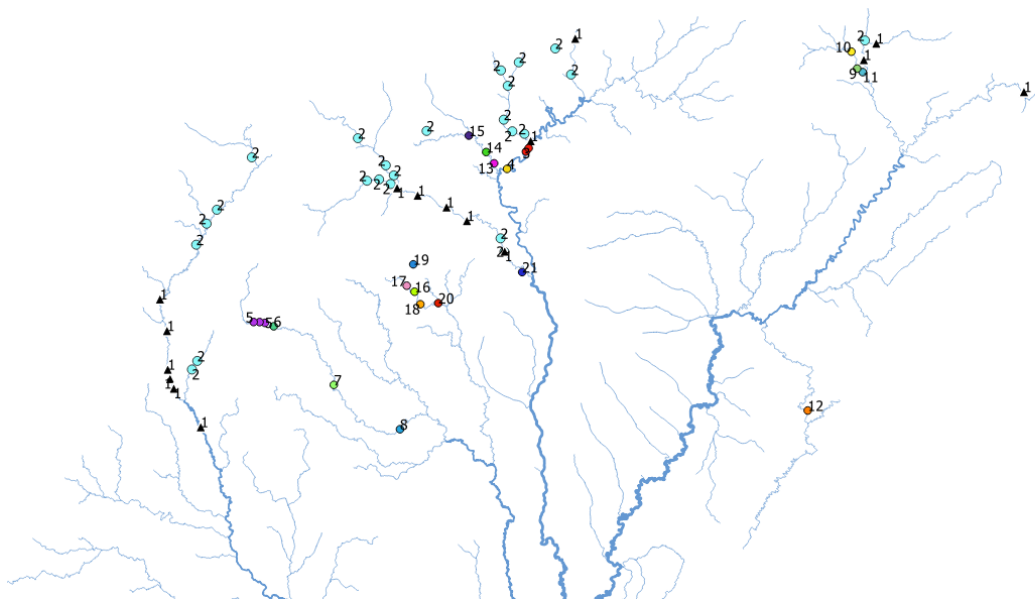


Figura 9: Agrupamento das barragens da bacia do Alto Paraguai em 22 blocos.

Tabela 1: Blocos de usinas para análise de cenários na bacia do Alto Paraguai até Descalvados.

Bloco	Descrição
1	Barragens já em operação
2	Barragens localizadas a montante de barragens já existentes, ou a montante de grandes obstáculos naturais
3	Barragens Sepotuba e Salto das Nuvens, no rio Sepotuba
4	Barragem Salto Maciel, no rio Sepotuba
5	Barragens Cabaçal 6, 5 e 4, no alto rio Cabaçal
6	Cabaçal 3
7	Cabaçal 2
8	Cabaçal 1
9	Jaçanã Alta
10	Sáira
11	Biguá
12	Araras
13	Formoso III
14	Formoso II
15	Formoso I
16	Salto Cacau
17	Salto do Céu
18	Salto Vermelho I
19	Caramujo
20	Salto Caramujo
21	Tapirapuã

Considerando que as barragens do bloco 1 já estão em operação, e devem estar presentes em todos os cenários, o número final de cenários para analisar foi de 2 elevado a 20, que é igual a 1.048.576, ou seja, pouco mais do que 1 milhão.

#### 4.1.3 Fator ponderador da rede de drenagem

Como fator ponderador da rede de drenagem foi atribuído um peso a cada trecho de rio, procurando refletir a importância do trecho para o processo de reprodução dos peixes na bacia.

Para isto foram utilizados os dados de fluxo de ovos e larvas nos pontos de amostragem apresentados no mapa da Figura 10 e na Tabela 2.

Tabela 2: Pontos de amostragem de ovos e larvas de peixes na sub-bacia do rio Paraguai a montante de Descalvados, com os respectivos valores de fluxo médio diário de ovos e larvas.

Local	Rio	Fluxo de ovos+larvas (milhões de indivíduos por dia)
CAB1	Cabaçal	15,6
CAB2	Cabaçal	3342,4
FOR	Formoso	1372,4
JAUMT	Jauru	7539,8
JUB	Juba	31,0
PAR	Paraguai	10.331,0
SEP1	Sepotuba 1	8497,7
SEP2	Sepotuba 2	3789,1
SEP3	Sepotuba 3	26.945,8
VERN	Vermelho	268,6

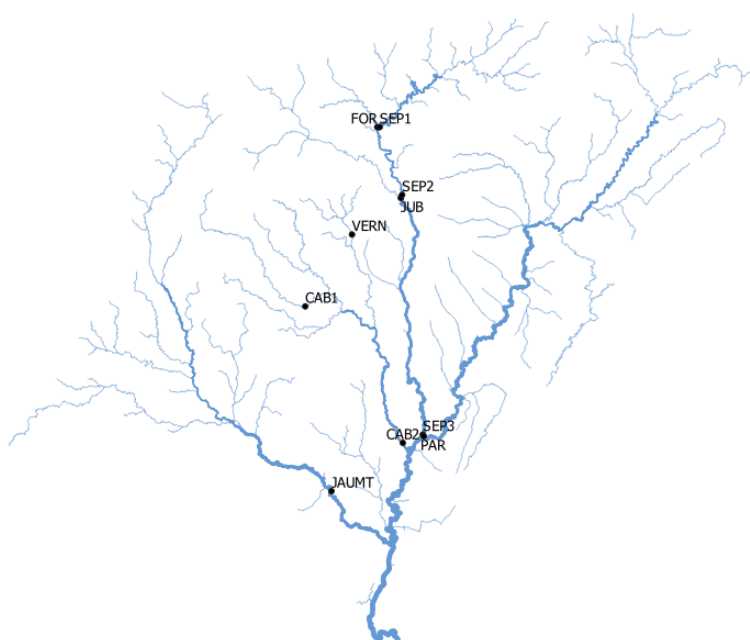


Figura 10: Mapa da localização dos pontos de coleta de ovos e larvas na bacia do rio Paraguai a montante de Descalvados.

Os valores de número de indivíduos por dia, apresentados na Tabela 2, foram divididos pelo comprimento da rede de drenagem na área de captação de ovos e larvas de cada ponto de amostragem, para obter a densidade de ovos e larvas por km de rio. A área de captação de ovos e larvas de cada ponto de amostragem foi definida considerando toda a rede de drenagem localizada a montante do ponto de amostragem, e a uma distância inferior do ponto de amostragem do que a distância estimada pelo chamado retrocálculo da posição de desova, dado o estágio de desenvolvimento do ovo ou larva. A Tabela 3 apresenta os valores finais de fluxo diário de ovos e larvas por km de rio.

*Tabela 3: Pontos de amostragem de ovos e larvas de peixes na sub-bacia do rio Paraguai a montante de Descalvados, com os respectivos valores de fluxo médio diário de ovos e larvas, e densidade de fluxo por km de rio.*

Local	Fluxo de ovos+larvas (milhões de indivíduos por dia)	Comprimento dos rios (km)	Fluxo (milhões de indivíduos por dia por km)
CAB1	15,6	126	0,12
CAB2	3342,4	529	6,32
FOR	1372,4	81	16,94
JAUMT	7539,8	824	9,15
JUB	31,0	21	1,48
PAR	10.331,0	1785	5,79
SEP1	8497,7	36	236,05
SEP2	3789,1	152	24,93
SEP3	26.945,8	370	72,83
VERN	268,6	87	3,10

O valor final do fluxo diário de ovos e larvas por km de rio, obtido para cada ponto de amostragem, foi definido como atributo da rede de drenagem, refletindo a sua qualidade como habitat para reprodução de peixes. O resultado é apresentado na Figura 11.

Para obter o mapa da Figura 11 foi necessário preencher regiões em que a metodologia descrita acima não permitiu estimar o fluxo de ovos e larvas, como a região da bacia incremental entre os pontos de amostragem PAR, SEP3, CAB2 e JAUMT e o posto fluviométrico Descalvados, e as regiões a montante das barragens dos aproveitamentos hidrelétricos atualmente em operação na bacia.

Para a região da bacia incremental entre os pontos de amostragem PAR, SEP3, CAB2 e JAUMT e o posto fluviométrico Descalvados, considerou-se como valor do fluxo de ovos e larvas por km de rio o valor médio obtido dos pontos PAR, SEP3, CAB2 e JAUMT, localizados logo a montante.

Para as regiões a montante das barragens atualmente existentes, e a montante dos grandes obstáculos naturais, e a montante do extremo máximo identificado de possíveis pontos de desova, foi utilizado o valor mais baixo identificado nos pontos de amostragem, que corresponde ao ponto CAB1, ou seja, o ponto de amostragem mais a montante no rio Cabaçal.

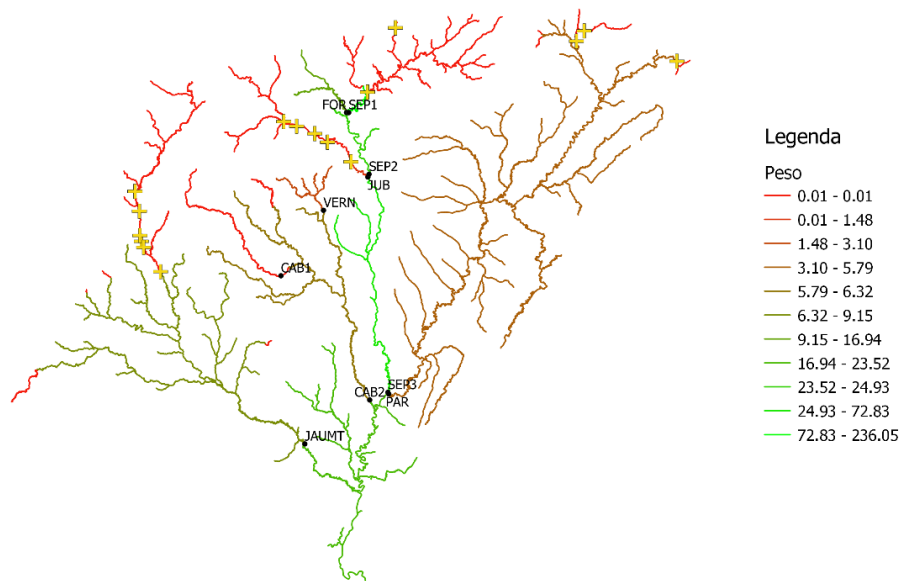


Figura 11: Mapa da rede de drenagem da bacia do rio Paraguai a montante de Descalvados (somente rios com área de drenagem superior a 100 km<sup>2</sup>) com cores indicando o peso para o cálculo do DCIPD (Índice de Conectividade Dendrítico Ponderado para peixes Diádomos) cruces simbolizando os locais com aproveitamentos hidrelétricos em operação e pontos pretos indicando os locais de amostragem de ovos e larvas.

Observa-se no mapa da Figura 11, que a bacia do rio Paraguai a montante de Descalvados tem áreas mais favoráveis a desova de peixes (identificadas em verde) e áreas menos favoráveis à desova (identificadas em vermelho). Entre as áreas mais favoráveis à desova está o rio Sepotuba, desde a sua foz, no rio Paraguai, indo para montante até o Salto das Nuvens, que é um obstáculo natural que praticamente impede a migração de peixes para montante. A montante do Salto das Nuvens o rio Sepotuba e seus afluentes foram consideradas áreas desfavoráveis à desova, com peso igual a 0,12.

Outros rios favoráveis à desova são os rios Paraguai e seus afluentes, e o rio Jauru, e seus afluentes, pelo menos até o local em que estão localizadas as barragens atualmente em operação. Já os rios Cabaçal e Vermelho apresentam fluxos relativamente baixos de ovos e larvas, embora não existam barragens em operação nestes rios.

#### 4.1.4 Resultados da análise de fragmentação da rede fluvial

Para cada um dos cerca de 1 milhão de cenários foi calculado o valor do DCIP<sub>D</sub> e da potência instalada total na bacia.

Os resultados podem ser analisados em um gráfico com os eixos DCIP<sub>D</sub> e Potência Instalada, como mostra a Figura 12. Neste gráfico cada ponto representa o resultado de um cenário. Entretanto, o número de pontos neste gráfico é grande demais para uma análise objetiva. Por este motivo, é conveniente selecionar os pontos que combinam os melhores resultados em termos de Potência Instalada e Conectividade Fluvial, na forma de uma linha de Pareto. A linha de Pareto, ou região de Pareto, está ilustrada pelos pontos azuis na Figura 12, e é constituída de cenários que não são superados por nenhum outro cenário pelos dois critérios (DCIP e Potência)



ao mesmo tempo. Para complementar a análise, foram escolhidos também os pontos de uma linha de Pareto inferior (em cor vermelha). Estes pontos correspondem aos cenários com as mais baixas combinações de valores de DCI<sub>p</sub> e Potência Instalada.

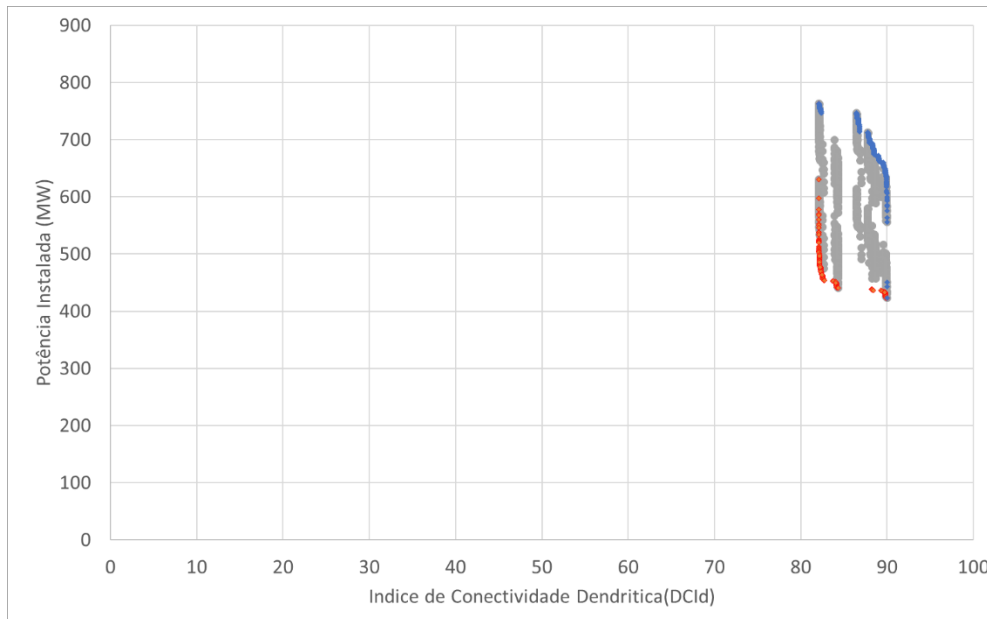


Figura 12: Figura ilustrativa com resultados de DCI<sub>p</sub> e Potência instalada na bacia em muitos cenários (pontos cinzas), nos cenários da região de Pareto superior (pontos vermelhos) e nos cenários da região de Pareto inferior (pontos azuis).

Os resultados dos cenários da linha de Pareto inferior e da linha de Pareto superior são apresentados em mais detalhe na Figura 13.

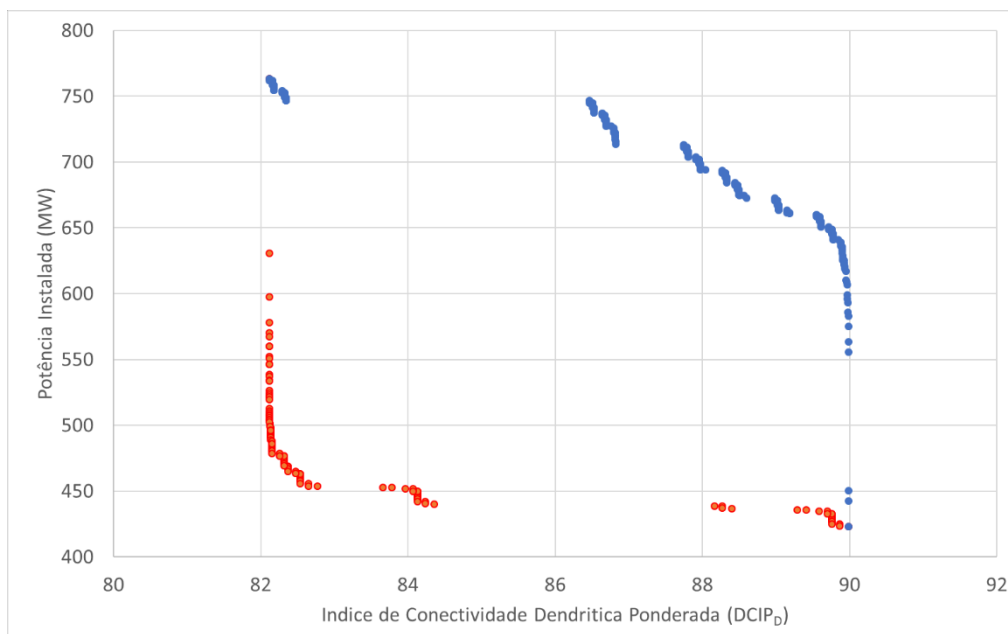


Figura 13: Resultados da linha de Pareto superior (pontos azuis) e da linha de Pareto inferior (pontos vermelhos) da análise de mais de 1 milhão de cenários de construção de barragens na bacia do rio Paraguai até Descalvados.

Os resultados mostram que existe um trade-off entre as variáveis Potência instalada total na bacia (eixo vertical) e Conectividade da rede de drenagem (DCIP<sub>D</sub>). De forma geral, a inclusão de novas barragens na bacia tende a fazer com que o índice de conectividade tenha seu valor reduzido. Da mesma forma, o valor original do índice de conectividade só pode ser mantido se não forem construídas novas barragens, ou se forem construídas apenas barragens a montante de barragens já existentes ou de grandes obstáculos naturais, que já representam impedimento para a migração de peixes.

Observa-se, na Figura 13, que no cenário atual, a potência instalada na bacia equivale a 423,20 MW, e o valor de DCIPD é de 89.99%. Num cenário futuro em que fossem implementadas todas as usinas previstas, a potência instalada atingiria 763,58 MW e o valor de DCIPD cairia para 82,12%.

Entretanto, é interessante observar que a inclusão de algumas barragens pode resultar em aumentos expressivos de potência instalada, sem reduções muito substanciais do valor de DCIP (Figura 14). Por exemplo, é possível identificar um cenário com 555,83 MW de potência instalada e com DCIP de 89,98% (Cenário B na Figura 14). Este cenário agrega boa parte do potencial hidrelétrico da bacia a sua potência instalada sem comprometer a conectividade fluvial. Neste cenário considera-se que seriam implementadas todas as usinas do bloco 2, isto é, com barragens localizadas a montante de barramentos já existentes, ou de obstáculos naturais relevantes.

A Figura 14 e a Tabela 4 apresentam mais alguns cenários interessantes que emergem da análise dos resultados. O cenário C, por exemplo, apresenta 639,23 MW de potência instalada e DCIP de 89,88%. O incremento de potência instalada na bacia, em relação ao cenário atual, seria de 216,03 MW neste cenário, com impacto praticamente nulo na conectividade da rede fluvial. No cenário C considera-se que seriam implementadas, além das usinas do bloco 2, as usinas Salto Cacau, Salto do Céu, Salto Vermelho e Caramujo na bacia do rio Vermelho, e todas as usinas do rio Cabaçal.

No cenário D a potência instalada chegaria a 713,08 MW. Neste cenário considera-se que seriam implementadas todas as usinas identificadas no inventário, exceto as usinas do rio Sepotuba (Salto Maciel, Salto das Nuvens e Sepotuba). O impacto na conectividade fluvial já seria perceptível, no entanto, com redução do DCIPD de 89.99% para 87.75%.

No cenário E a potência instalada chegaria a 746.58 MW e o DCIPD seria reduzido a 86.47%. Este cenário corresponde à situação em que seriam implementadas todas as usinas do inventário, exceto a usina Salto Maciel, localizada no rio Sepotuba.

Tabela 4: Cenários relevantes identificados com base nos resultados do índice de conectividade e de potência instalada na bacia (o X indica se a barragem ou bloco de barragens está presente no cenário analisado).

Bloco	Descrição	Cenários						
		A	B	C	D	E	T	R
1	Barragens já em operação	X	X	X	X	X	X	X
2	Barragens localizadas a montante de barragens já existentes, ou a montante de grandes obstáculos naturais		X	X	X	X	X	
3	Barragens Sepotuba e Salto das Nuvens, no rio Sepotuba					X	X	
4	Barragem Salto Maciel, no rio Sepotuba						X	X
5	Barragens Cabaçal 6, 5 e 4, no alto rio Cabaçal			X	X	X	X	
6	Cabaçal 3			X	X	X	X	
7	Cabaçal 2			X	X	X	X	
8	Cabaçal 1			X	X	X	X	
9	Jaçanã Alta				X	X	X	
10	Saíra				X	X	X	
11	Biguá				X	X	X	X
12	Araras				X	X	X	X
13	Formoso III				X	X	X	X
14	Formoso II				X	X	X	
15	Formoso I				X	X	X	
16	Salto Cacau			X	X	X	X	
17	Salto do Céu			X	X	X	X	
18	Salto Vermelho I			X	X	X	X	
19	Caramujo			X	X	X	X	
20	Salto Caramujo				X	X	X	
21	Tapirapuã			X	X	X	X	
	Potência Instalada (MW)	423.20	555.83	639.23	713.08	746.58	763.58	476.85
	DCIP <sub>b</sub> (%)	89.99	89.98	89.88	87.75	86.47	82.12	82.26
	Incremento de Potência em relação ao cenário atual (MW)	0.00	132.63	216.03	289.88	323.38	340.38	53.65
	Incremento de DCIPD em relação ao cenário atual (%)	0.00	0.00	-0.10	-2.24	-3.52	-7.86	-7.73

Finalmente, cabe destacar o cenário R, por apresentar baixo incremento de potência instalada, e perda de conectividade fluvial relativamente alta. Neste cenário, considera-se que seriam implementadas as usinas Biguá (Rio Buritis), Araras (Rio Jauquara), Formoso III (Rio Formoso), além da usina Salto Maciel, no rio Sepotuba. No cenário R a potência instalada na bacia passaria a 476.85 MW e o valor do DCIPD cairia para 82.26%, um valor quase tão baixo como o resultante do cenário de implementação de todas as usinas. Pode-se inferir, portanto, que as usinas Biguá

(Rio Buritis), Araras (Rio Jauquara), Formoso III (Rio Formoso), e Salto Maciel (Rio Sepotuba) são as que mais trazem prejuízo à conectividade fluvial na bacia.

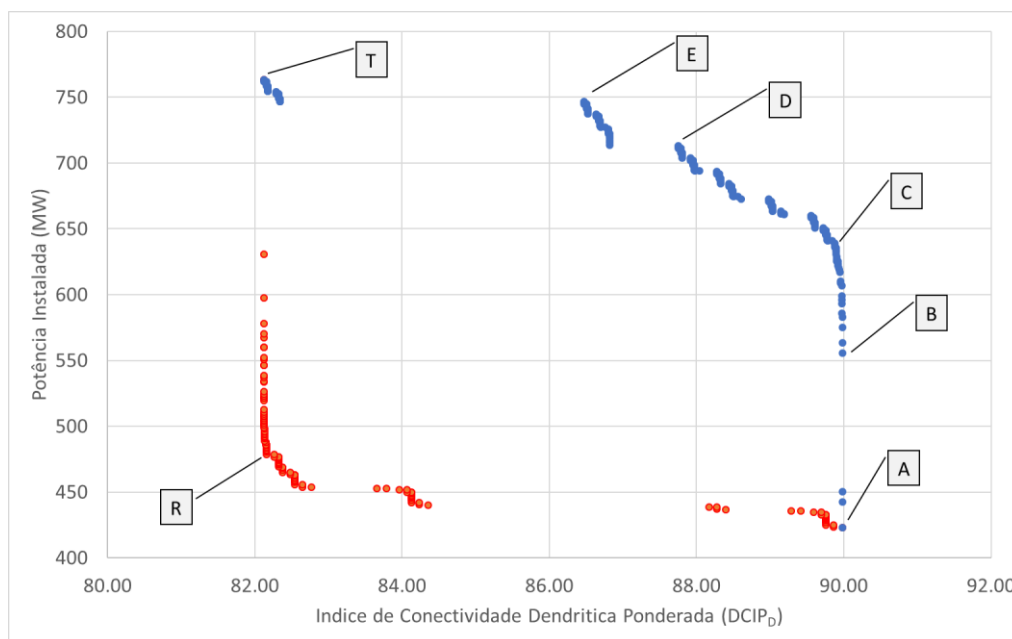


Figura 14: Resultados da linha de Pareto superior (pontos azuis) e da linha de Pareto inferior (pontos vermelhos) da análise de mais de 1 milhão de cenários de construção de barragens na bacia do rio Paraguai até Descalvados, com a indicação do cenário atual (A); do cenário com inclusão de todas as 46 barragens propostas (T); e de outros cenários relevantes da linha de Pareto superior e inferior, conforme o texto.

Considerando os resultados resumidos na Figura 14, é interessante identificar quais os empreendimentos que participam dos cenários com melhor e pior desempenho. A Tabela 4 identifica com o símbolo X quais as usinas ou blocos de usinas que se considera implementadas em cada um dos cenários, além de apresentar os resultados em termos de potência instalada na bacia e índice de conectividade dendrítica ponderado (DCIPD).

## 4.2 Análise de conectividade na bacia do rio Cuiabá

Para realizar a análise de conectividade fluvial na bacia do rio Paraguai foram considerados dados da rede de drenagem oficial da ANA, cenários de construção de barragens e informações sobre fluxo de ovos e larvas de peixes obtidos entre os anos de 2002 e 2004 no contexto do projeto monitoramento dos impactos ambientais da implantação da barragem da UHE Manso, localizada no rio Manso, um dos formadores do rio Cuiabá.

### 4.2.1 A rede de drenagem, barragens já existentes e os obstáculos naturais

Para a análise de conectividade e fragmentação de habitat, a bacia hidrográfica do rio Cuiabá foi delimitada até um ponto imediatamente a jusante da barra do rio Mutum, localizado já no Pantanal. Nesta região, os principais rios, além do próprio Cuiabá, são os rios Manso e Cuiabazinho (que formam o rio Cuiabá), o rio Casca, que é um tributário do Manso, e o rio Mutum, cuja confluência com o rio Cuiabá ocorre já dentro da região do Pantanal, conforme ilustrado na Figura 15.

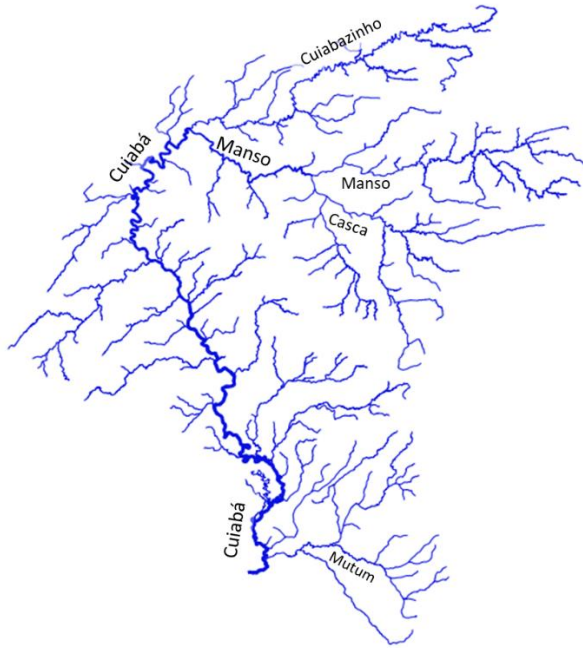


Figura 15: Rede de drenagem da bacia do rio Cuiabá até a confluência com o rio Mutum, e os principais rios da região.

A rede de drenagem utilizada na análise é a rede vetorial disponibilizada pela ANA e denominada BHO5K, e conta com 2627 trechos de rio, com comprimento médio de 5,4 km por trecho (Figura 15). Entretanto, os cursos d'água muito pequenos foram desconsiderados da análise, através da eliminação da base BHO5K de todos os trechos de rio cuja área de drenagem total (atributo NUAREAMONT) é inferior a 50 km<sup>2</sup>. A rede de drenagem resultante, com 1016 trechos de rio com comprimento médio de 4,9 km está apresentada na Figura 16.

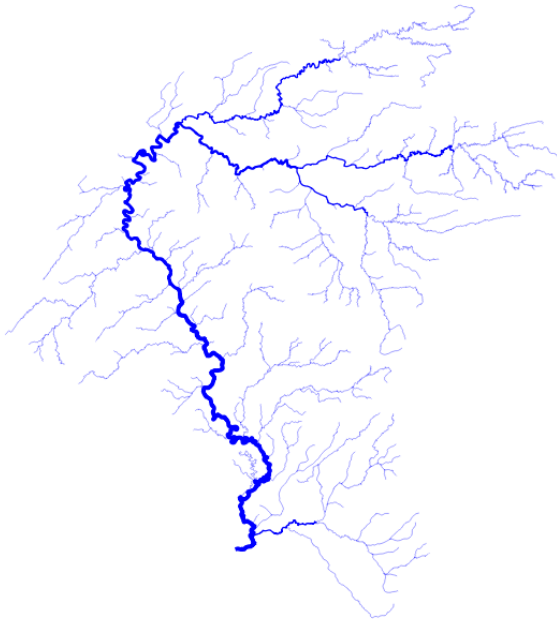


Figura 16: Rede de drenagem da bacia do rio Cuiabá até a confluência com o rio Mutum mostrando apenas os rios com área de drenagem superior a 50 km<sup>2</sup>.

Nesta bacia já existem 9 usinas hidrelétricas em operação e há outras 16 identificadas no inventário, conforme mostra a Figura 17.

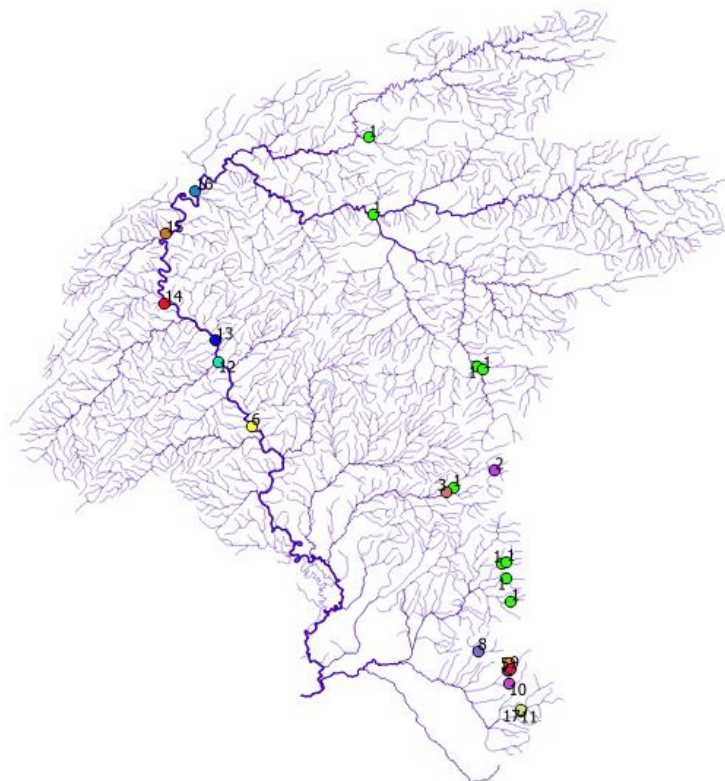


Figura 17: Localização das usinas hidrelétricas em operação (cor verde e código 1) e das usinas hidrelétricas projetadas na bacia do rio Cuiabá.

Além das barragens já existentes, existem alguns obstáculos naturais que também dificultam a migração de peixes para montante no período de piracema. Os obstáculos naturais foram identificados com base em dados de declividade dos rios estimados a partir do modelo digital de elevação do SRTM e de imagens de satélite de alta resolução. Estas informações foram complementadas ainda com fotografias do local e com informações obtidas no campo, quando possível.

Não há obstáculos naturais relevantes ao longo dos principais rios da bacia, entretanto, há obstáculos naturais que possivelmente impedem a migração de peixes ao longo da encosta que marca a cabeceira do rio Mutum.

Na totalidade foram identificados 10 obstáculos naturais totais ou parciais ao deslocamento de peixes migratórios na bacia. A cada um dos obstáculos foi atribuída uma probabilidade de passagem de peixes migratórios. Esta probabilidade foi estimada com base em fotografias do obstáculo, imagens de satélite, estimativas de declividade e comparação com obstáculos semelhantes. A localização dos obstáculos está apresentada na Figura 18, em que a cor do ponto representa a probabilidade de passagem de peixes migradores através do obstáculo.

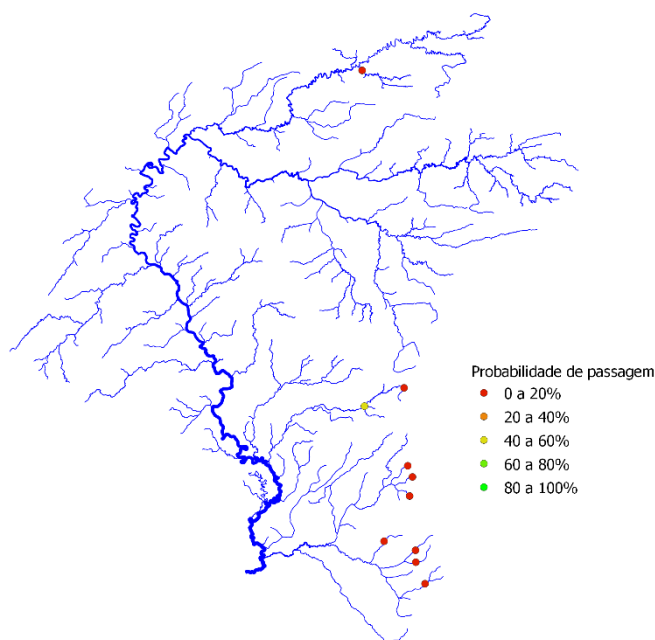


Figura 18: Localização e probabilidade de passagem de obstáculos naturais para migração de peixes na bacia do rio Cuiabá.

#### 4.2.2 Cenários de construção de barragens

Conforme mencionado antes, existem 9 barragens de usinas hidrelétricas em operação e há outras 16 barragens em projeto ou identificadas no inventário na bacia do rio Cuiabá. O impacto de cada uma delas sobre a conectividade fluvial na bacia depende da construção ou não de outras barragens. Assim, idealmente seria necessário calcular o índice de conectividade para todas as combinações possíveis da inclusão ou não de 16 novas barragens, além das já existentes. O número de cenários a ser analisado, portanto, é igual a 2 elevado a 16, o que corresponde a mais de 65 mil cenários. Analisar todos estes cenários não representa um desafio computacional inviável, assim as barragens atualmente existentes foram unificadas em único bloco, e as demais foram analisadas individualmente conforme a Figura 19 e a Tabela 5, resultando em 17 blocos de barragens, sendo o bloco 1 o conjunto de barragens já existentes.

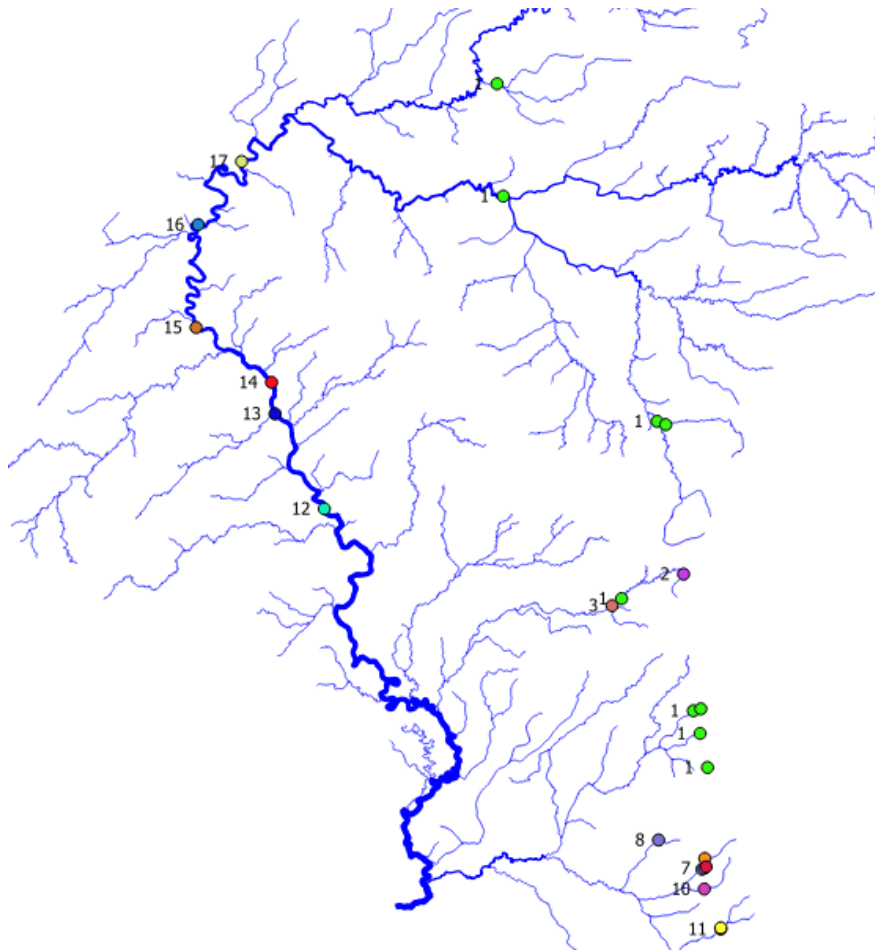


Figura 19: Agrupamento das barragens da bacia do Cuiabá em 17 blocos (pontos verdes representam barragens já existentes).

Tabela 5: Blocos de usinas para análise de cenários na bacia do rio Cuiabá.

Bloco	Descrição
1	Barragens já em operação
2	Aricá-Mirim I
3	São Tadeu II
4	Rancho Queimado I
5	Rancho Queimado 4
6	Mutum I
7	Rancho Queimado 2
8	Santo Antônio
9	Rancho Queimado 3
10	Rancho Queimado 5
11	Mantovilis
12	Guapira II
13	Iratambé I
14	Iratambé II
15	Angatu I
16	Angatu II Montante
17	Perudá Montante



Considerando que as barragens do bloco 1 já estão em operação, e devem estar presentes em todos os cenários, o número final de cenários para analisar foi de 2 elevado a 16, que é igual a 65536, ou seja, pouco mais do que 1 milhão.

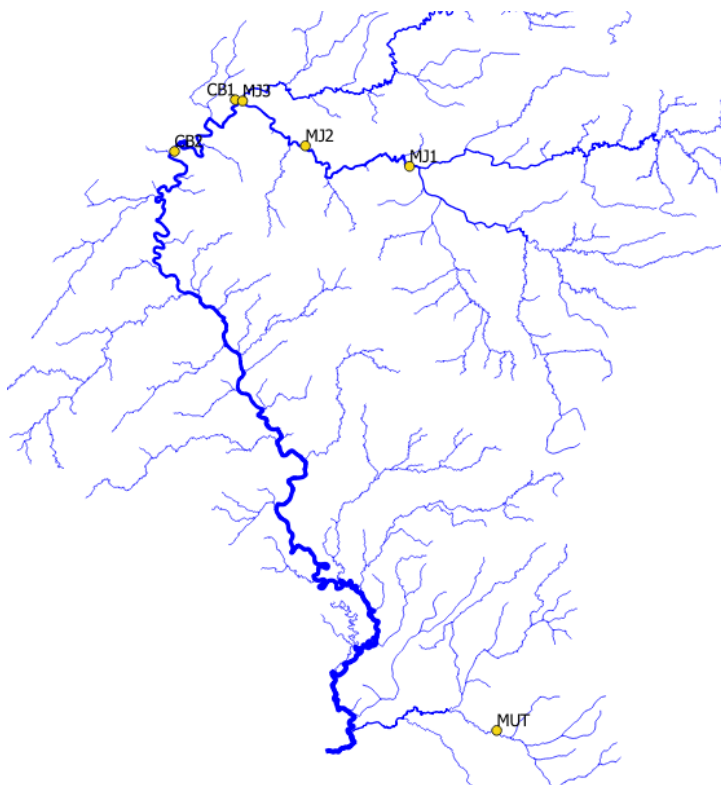
#### 4.2.3 Fator ponderador da rede de drenagem

Como fator ponderador da rede de drenagem foi atribuído um peso a cada trecho de rio, procurando refletir a importância do trecho para o processo de reprodução dos peixes na bacia.

Para isto foram utilizados os dados de fluxo de ovos e larvas nos pontos de amostragem apresentados no mapa da Figura 20 e na Tabela 6.

*Tabela 6: Pontos de amostragem de ovos e larvas de peixes na bacia do rio Cuiabá, com os respectivos valores de fluxo médio diário de ovos e larvas.*

Local	Rio	Fluxo de ovos+larvas (milhões de indivíduos por dia)
CB-1	Cuiabazinho	9732.3
CB-2	Cuiabá	8153.0
MJ-1	Manso	5.7
MJ-2	Manso	2458.8
MJ-3	Manso	34676.0
MUT	Mutum	27.8



*Figura 20: Mapa da localização dos pontos de coleta de ovos e larvas na bacia do rio Cuiabá.*

Os valores de número de indivíduos por dia, apresentados na Tabela 6, foram divididos pelo comprimento da rede de drenagem na área de captação de ovos e larvas de cada ponto de amostragem, para obter a densidade de ovos e larvas por km de rio. A área de captação de ovos e larvas de cada ponto de amostragem foi definida considerando toda a rede de drenagem localizada a montante do ponto de amostragem, limitada pela posição de obstáculos naturais e artificiais à migração de peixes. A Tabela 7 apresenta os valores finais de fluxo diário de ovos e larvas por km de rio.

*Tabela 7: Pontos de amostragem de ovos e larvas de peixes na bacia do rio Cuiabá, com os respectivos valores de fluxo médio diário de ovos e larvas, e densidade de fluxo por km de rio.*

Local	Rio	Fluxo de ovos+larvas (milhões de indivíduos por dia)	Comprimento dos rios (km)	Fluxo (milhões de indivíduos por dia por km)
CB-1	Cuiabazinho	9732,3	601	16,18
CB-2	Cuiabá	8153,0	949	8,59
MJ-1	Manso	5,7	2	2,84
MJ-2	Manso	2458,8	102	24,20
MJ-3	Manso	34676,0	184	188,87
MUT	Mutum	27,8	137	0,20

O valor final do fluxo diário de ovos e larvas por km de rio, obtido para cada ponto de amostragem, foi definido como atributo da rede de drenagem, refletindo a sua qualidade como habitat para reprodução de peixes. O resultado é apresentado na Figura 21.

Para obter o mapa da Figura 21 foi necessário preencher regiões em que a metodologia descrita acima não permitiu estimar o fluxo de ovos e larvas, como a região a jusante do ponto CB2, e as regiões a montante das barragens dos aproveitamentos hidrelétricos atualmente em operação na bacia.

Para a região a jusante do ponto CB2 foi adotado o mesmo valor estimado no próprio ponto CB2 (8,59 ovos e larvas por dia por km de rio). Para a região a montante da barragem de Manso foi adotado o valor do ponto MJ1, e em toda a bacia do rio Mutum foi adotado o valor encontrado no ponto de monitoramento MUT.

Para as demais regiões, localizadas a montante de obstáculos naturais e artificiais foi utilizado o valor mais baixo identificado nos pontos de amostragem, que corresponde ao ponto MUT.

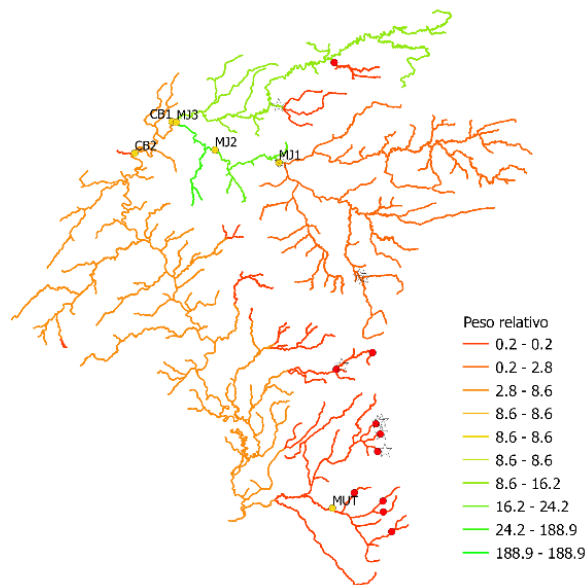


Figura 21: Mapa da rede de drenagem da bacia do rio Cuiabá (somente rios com área de drenagem superior a 50 km<sup>2</sup>) com cores indicando o peso para o cálculo do DCIPD (Índice de Conectividade Dendrítico Ponderado para peixes Diádromos) estrelas simbolizando os locais com aproveitamentos hidrelétricos em operação, pontos vermelhos indicando a localização de obstáculos naturais e pontos amarelos indicando os locais de amostragem de ovos e larvas.

Observa-se no mapa da Figura 21, que a bacia do rio Cuiabá tem áreas mais favoráveis a desova de peixes (identificadas em verde) e áreas menos favoráveis à desova (identificadas em vermelho). Entre as áreas mais favoráveis à desova está o rio Manso, no trecho entre a confluência com o rio Cuiabazinho e a barragem, e o rio Cuiabazinho. As áreas menos favoráveis à desova são as áreas de maior declividade, ou as áreas a montante de grandes obstáculos naturais e artificiais.

#### 4.2.4 Resultados da análise de fragmentação da rede fluvial

Para cada um 65536 milhão de cenários foi calculado o valor do DCIP<sub>D</sub> e da potência instalada total na bacia.

Os resultados podem ser analisados em um gráfico com os eixos DCIP<sub>D</sub> e Potência Instalada, como mostra a Figura 22. Neste gráfico cada ponto representa o resultado de um cenário. Entretanto, o número de pontos neste gráfico é grande demais para uma análise objetiva. Por este motivo, é conveniente selecionar os pontos que combinam os melhores resultados em termos de Potência Instalada e Conectividade Fluvial, na forma de uma linha de Pareto. A linha de Pareto, ou região de Pareto, está ilustrada pelos pontos azuis na Figura 22, e é constituída de cenários que não são superados por nenhum outro cenário pelos dois critérios (DCIP e Potência) ao mesmo tempo. Para complementar a análise, foram escolhidos também os pontos de uma linha de Pareto inferior (em cor vermelha). Estes pontos correspondem aos cenários com as mais baixas combinações de valores de DCIP e Potência Instalada.

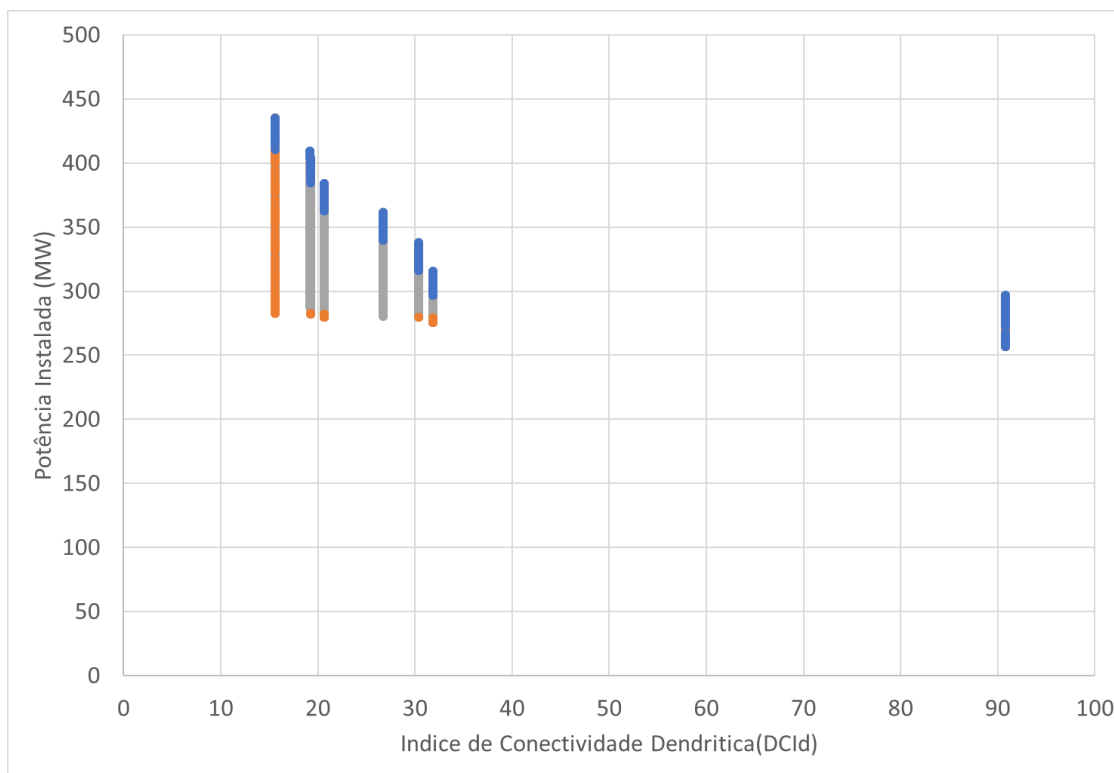


Figura 22: Figura ilustrativa com resultados de DCIP e Potência instalada na bacia em muitos cenários (pontos cinzas), nos cenários da região de Pareto superior (pontos vermelhos) e nos cenários da região de Pareto inferior (pontos azuis).

Os resultados dos cenários da linha de Pareto inferior e da linha de Pareto superior são apresentados em mais detalhe na Figura 23.

Os resultados mostram que existe um trade-off entre as variáveis Potência instalada total na bacia (eixo vertical) e Conectividade da rede de drenagem (DCIP<sub>D</sub>). De forma geral, a inclusão de novas barragens na bacia permite aumentar a potência instalada mas tende a fazer com que o índice de conectividade tenha seu valor reduzido. Da mesma forma, o valor original do índice de conectividade só pode ser mantido se não forem construídas novas barragens, ou se forem construídas apenas barragens a montante de barragens já existentes ou de grandes obstáculos naturais, que já representam impedimento para a migração de peixes.

Observa-se, na Figura 23, que no cenário atual, a potência instalada na bacia equivale a 256,86 MW, e o valor de DCIPD é de 90,80%. Num cenário futuro em que fossem implementadas todas as usinas previstas, a potência instalada atingiria 435,24 MW e o valor de DCIPD cairia para 15,60%. Isto significa que a rede de drenagem adequada para a reprodução (desova) dos peixes migradores na bacia do rio Cuiabá seria amplamente desconectada do Pantanal, tornando se inacessível para estes peixes, caso fossem construídas todas as barragens identificadas no inventário hidrelétrico. As barragens que mais contribuiriam para esta perda de conectividade fluvial seriam as das usinas localizadas sobre o rio Cuiabá (Guapira II; Iratambé I; Iratambé II; Angatu I; Angatu II Montante; Perudá Montante).

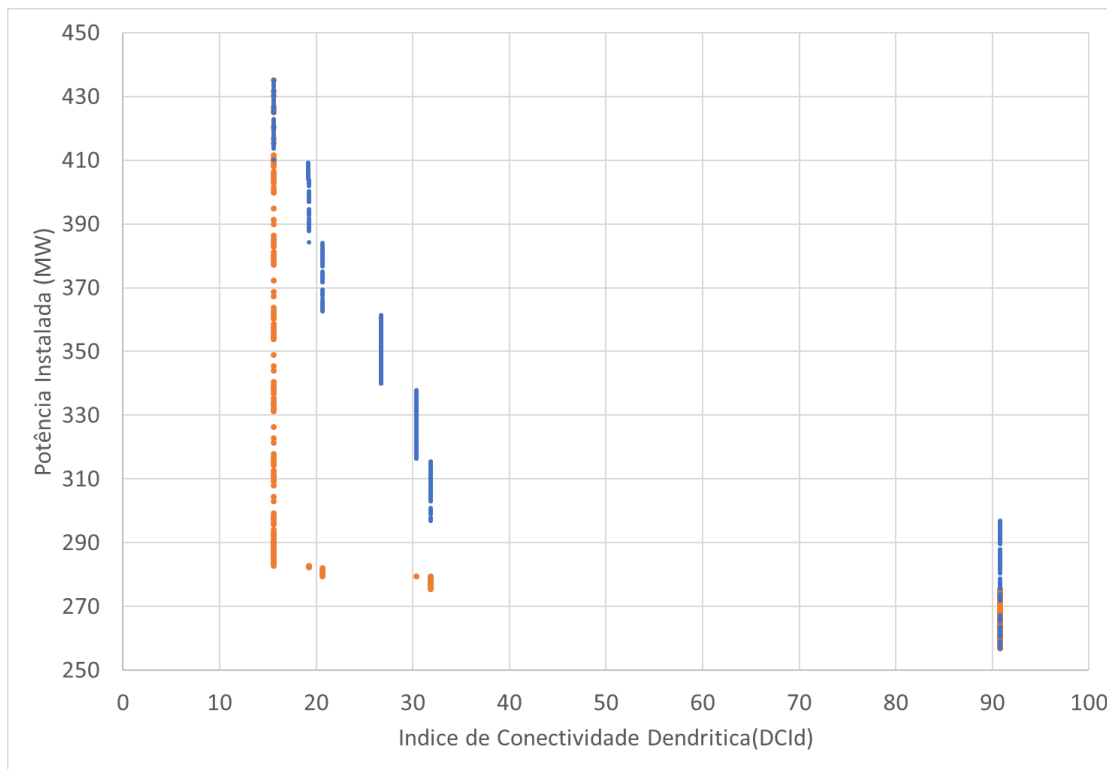


Figura 23: Resultados da linha de Pareto superior (pontos azuis) e da linha de Pareto inferior (pontos vermelhos) da análise de mais de 1 milhão de cenários de construção de barragens na bacia do Cuiabá.

A barragem que mais contribuiria para a perda de conectividade seria a da usina Guapira II, que é a que está posicionada mais a jusante no rio Cuiabá. Caso esta única barragem fosse construída, além das que já estão em operação, o valor de DCI<sub>p</sub> cairia de 90,80% para 15,60%, e a potência instalada aumentaria apenas 25,96 MW em relação ao valor atual, atingindo 282,82 MW. O cenário de inclusão desta única usina corresponde ao ponto R, identificado na Figura 24.

Por outro lado, existem usinas identificadas no inventário que não afetariam profundamente a conectividade fluvial para peixes migradores, portanto sem reduções muito substanciais do valor de DCI<sub>p</sub>, e permitiriam aumentar a potência instalada, conforme ilustrado pelo ponto B na Figura 24. O ponto B corresponde ao cenário em que são construídas todas as usinas hidrelétricas do inventário, exceto as localizadas sobre o rio Cuiabá. Este cenário permite aumentar a potência instalada para 296,92 MW, praticamente sem alterar o DCI<sub>p</sub>, que se mantém em 90,79%.

A Figura 24 e a Tabela 8 apresentam os detalhes dos cenários que foram destacados entre os resultados obtidos. Considerando os resultados resumidos na Figura 24, é interessante identificar quais os empreendimentos que participam dos cenários com melhor e pior desempenho, em termos de ganho de potência e perda de conectividade fluvial. A Tabela 8 identifica com o símbolo X quais as usinas ou blocos de usinas que se considera implementadas em cada um dos cenários, além de apresentar os resultados em termos de potência instalada na bacia e índice de conectividade dendrítica ponderado (DCIPD).

Tabela 8: Cenários relevantes identificados com base nos resultados do índice de conectividade e de potência instalada na bacia do rio Cuiabá (o X indica se a barragem ou bloco de barragens está presente no cenário analisado).

Bloco	Descrição	Cenário			
		A	B	T	R
1	Barragens já em operação	X	X	X	X
2	Aricá-Mirim I		X	X	
3	São Tadeu II		X	X	
4	Rancho Queimado I		X	X	
5	Rancho Queimado 4		X	X	
6	Mutum I		X	X	
7	Rancho Queimado 2		X	X	
8	Santo Antônio		X	X	
9	Rancho Queimado 3		X	X	
10	Rancho Queimado 5		X	X	
11	Mantovilis		X	X	
12	Guapira II			X	X
13	Iratambé I			X	
14	Iratambé II			X	
15	Angatu I			X	
16	Angatu II Montante			X	
17	Perudá Montante			X	
	Potência Instalada (MW)	256,86	296,92	435,24	282,82
	DCIP <sub>D</sub> (%)	90,80	90,79	15,60	15,60
	Incremento de Potência em relação ao cenário atual (MW)	0,00	40,06	178,38	25,96
	Incremento de DCIPD em relação ao cenário atual (%)	0,00	-0,01	-75,2	-75,2

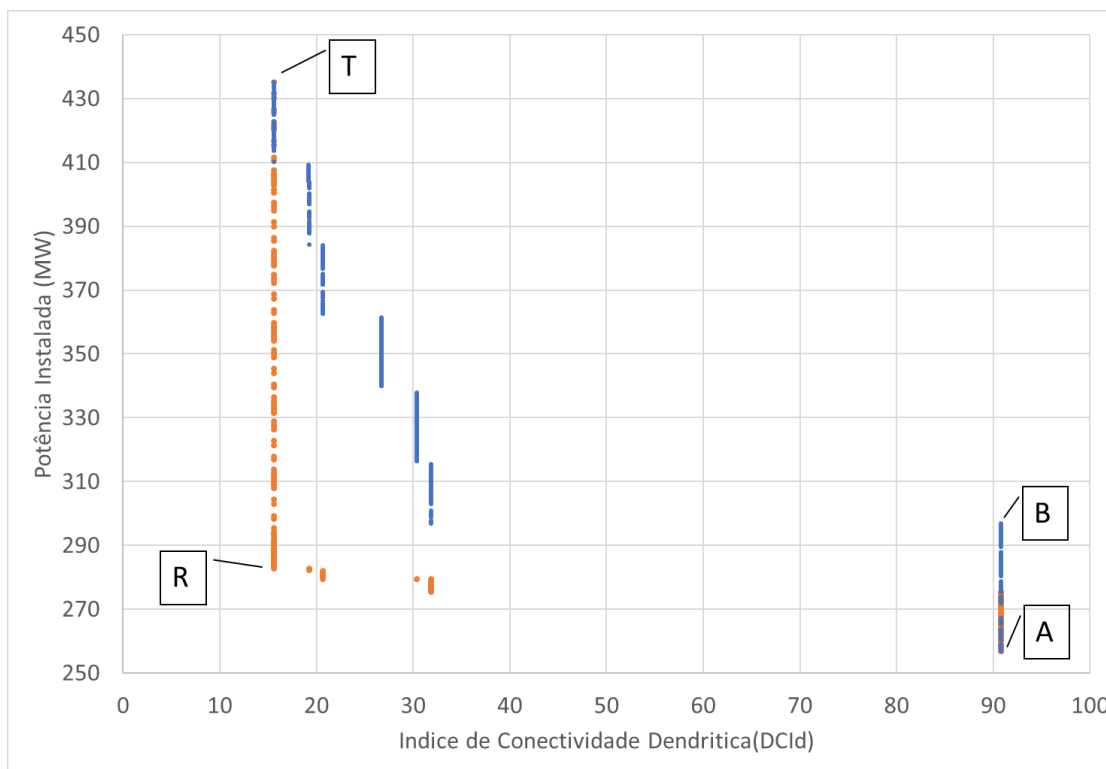


Figura 24: Resultados da linha de Pareto superior (pontos azuis) e da linha de Pareto inferior (pontos vermelhos) da análise de mais de 65 mil cenários de construção de barragens na bacia do rio Cuiabá, com a indicação do cenário atual (A); do cenário com inclusão de todas as 16 barragens propostas (T); e de outros cenários relevantes da linha de Pareto superior e inferior, conforme o texto.

A análise de cenários de instalação de novas usinas hidrelétricas na bacia do rio Cuiabá e seu impacto sobre a conectividade fluvial revela que os rios atualmente utilizados ativamente para a desova de peixes migradores poderão ser desconectados do restante da rede de drenagem, e do Pantanal em particular, caso todas as usinas identificadas no inventário hidrelétrico venham a ser construídas, o que pode afetar profundamente as populações de peixes na região. As usinas propostas sobre o rio Cuiabá propriamente dito são as que mais teriam consequências negativas neste sentido.

### 4.3 Análise de conectividade na bacia do rio São Lourenço

Para realizar a análise de conectividade fluvial na bacia do rio São Lourenço foram considerados dados da rede de drenagem oficial da ANA, cenários de construção de barragens e informações sobre fluxo de ovos e larvas de peixes obtidos durante o projeto pela equipe de ictiologia.

#### 4.3.1 A rede de drenagem, barragens já existentes e os obstáculos naturais

Para a análise de conectividade e fragmentação de habitat, a bacia hidrográfica do rio São Lourenço foi delimitada até um ponto localizado já no interior do Pantanal, cerca de 130 km a jusante da cidade de Rondonópolis. Os principais rios, além do próprio São Lourenço, são os rios Vermelho, Ponte de Pedra, Jurigão e Tadarimana, conforme ilustrado na Figura 25. No rio São Lourenço há dois afluentes relevantes em termos de aproveitamentos hidrelétricos existentes

ou propostos, que são os rios Tenente Amaral e Prata. Na sua parte mais alta o rio Tadarimana também recebe o nome de Prata, conforme mostra a figura.

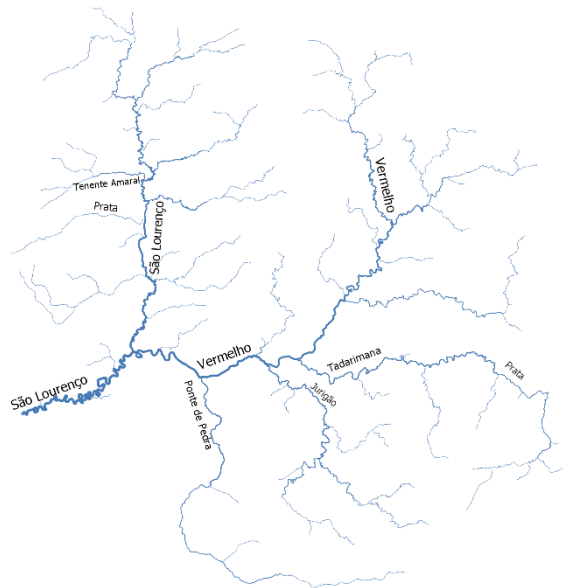


Figura 25: Rede de drenagem da bacia do rio São Lourenço, e os principais rios da região.

A rede de drenagem utilizada na análise é a rede vetorial disponibilizada pela ANA e denominada BHO5K, e conta com 1516 trechos de rio, com comprimento médio de 5,4 km por trecho. Entretanto, os cursos d'água muito pequenos foram desconsiderados da análise, através da eliminação da base BHO5K de todos os trechos de rio cuja área de drenagem total (atributo NUAREAMONT) é inferior a 90 km<sup>2</sup>. Estes trechos foram desconsiderados porque sua largura é pequena e sua declividade é, normalmente, alta demais para configurar locais adequados para migração e desova de peixes. A rede de drenagem resultante, com 504 trechos de rio com comprimento médio de 5 km é a que está apresentada na figura anterior.

Na bacia do rio São Lourenço já existem 10 usinas hidrelétricas em operação e há outras 13 identificadas no inventário, conforme mostra a Figura 26.



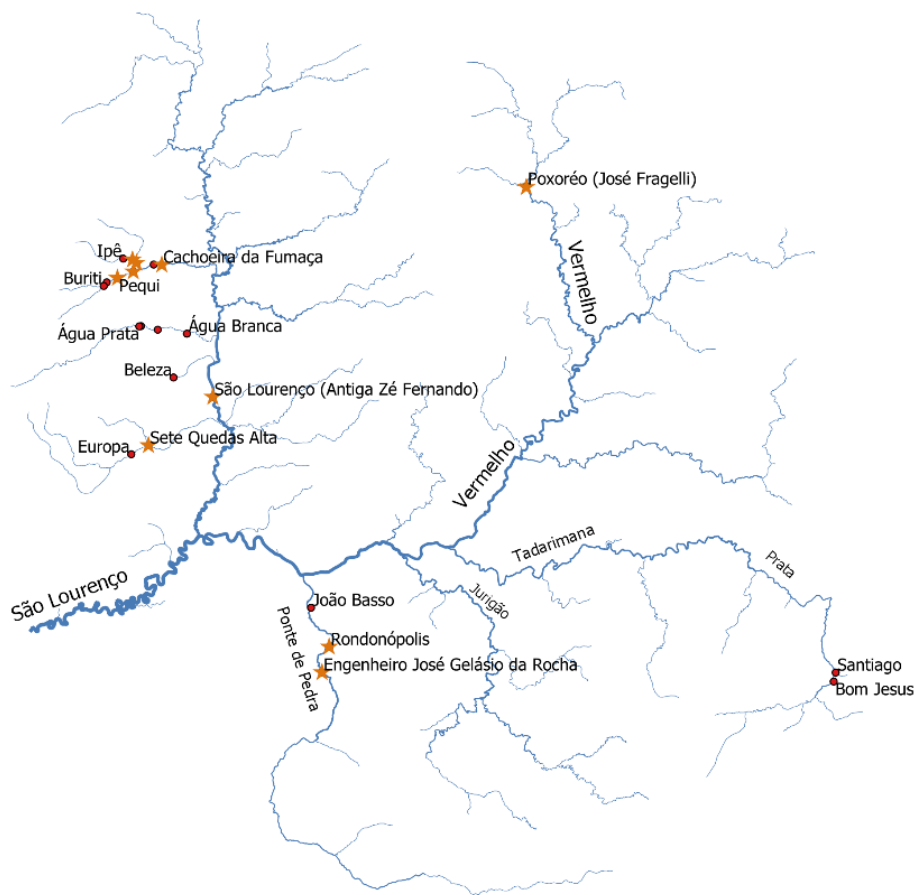


Figura 26: Localização das usinas hidrelétricas em operação (estrelas amarelas) e das usinas hidrelétricas projetadas (pontos vermelhos) na bacia do rio São Lourenço.

Além das barragens já existentes, existem alguns obstáculos naturais que também dificultam a migração de peixes para montante no período de piracema. Os obstáculos naturais foram identificados com base em dados de declividade dos rios estimados a partir do modelo digital de elevação do SRTM e de imagens de satélite de alta resolução. Estas informações foram complementadas ainda com fotografias do local e com informações obtidas no campo, quando possível. A identificação de obstáculos naturais foi priorizada em trechos de rio a jusante de onde há aproveitamentos hidrelétricos inventariados.

Na totalidade foram identificados 3 obstáculos naturais ao deslocamento de peixes migratórios na bacia. A cada um dos obstáculos foi atribuída uma probabilidade de passagem de peixes migratórios. Esta probabilidade foi estimada com base em fotografias do obstáculo, imagens de satélite, estimativas de declividade e comparação com obstáculos semelhantes. A localização dos obstáculos está apresentada na Figura 27, em que a cor do ponto representa a probabilidade de passagem de peixes migradores através do obstáculo.

Não há obstáculos naturais relevantes ao longo dos principais rios da bacia. Entretanto, há obstáculos naturais que possivelmente impedem a migração de peixes no rio Prata, afluente do rio São Lourenço, e no rio Ibo, próximo a uma PCH que já está operando. No rio Prata na

cabeceira do Tadarimana foi identificada uma sequência de corredeiras que possivelmente representam um obstáculo pouco relevante para a migração de peixes.

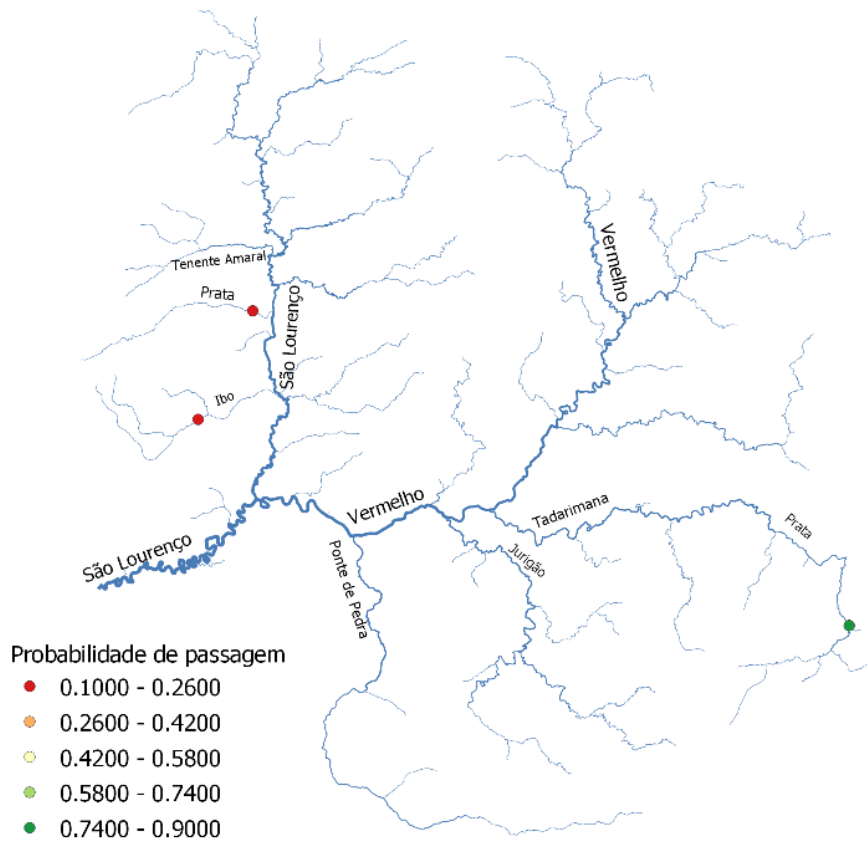


Figura 27: Localização e probabilidade de passagem de obstáculos naturais para migração de peixes na bacia do rio São Lourenço.

#### 4.3.2 Cenários de construção de barragens

Conforme mencionado antes, existem 10 usinas hidrelétricas em operação e há outras 13 usinas identificadas no inventário na bacia do rio São Lourenço.

O impacto de cada uma delas sobre a conectividade fluvial na bacia depende da construção ou não de outras barragens. Assim, idealmente seria necessário calcular o índice de conectividade para todas as combinações possíveis da inclusão ou não de 13 novas barragens, além das já existentes. O número de cenários a ser analisado, portanto, é igual a 2 elevado a 13, o que corresponde 8192 cenários. Analisar todos estes cenários é viável computacionalmente, por esse motivo não foi necessário agrupar as barragens em blocos.

#### 4.3.3 Fator ponderador da rede de drenagem

Como fator ponderador da rede de drenagem foi atribuído um peso a cada trecho de rio, procurando refletir a importância do trecho para o processo de reprodução dos peixes na bacia.

Para isto foram utilizados os dados de fluxo de ovos e larvas nos pontos de amostragem apresentados no mapa da Figura 28 e na Tabela 9.

Tabela 9: Pontos de amostragem de ovos e larvas de peixes na bacia do rio São Lourenço, com os respectivos valores de fluxo médio diário de ovos e larvas.

Local	Rio	Fluxo de ovos+larvas (milhões de indivíduos por dia)
ANHU	Anhumas	3,9
IBO	Ibo	0,0
POP	Ponte de Pedra	18,6
PPD	Ponte de Pedra	18,3
PRAT	Prata	0,0
SALO	São Lourenço	1241,7
SLO1	São Lourenço	853,8
TAD	Tadarimana	15,5
TAM	Tenente Amaral	56,3
VER1	Vermelho	2083,1
VER2	Vermelho	2982,2

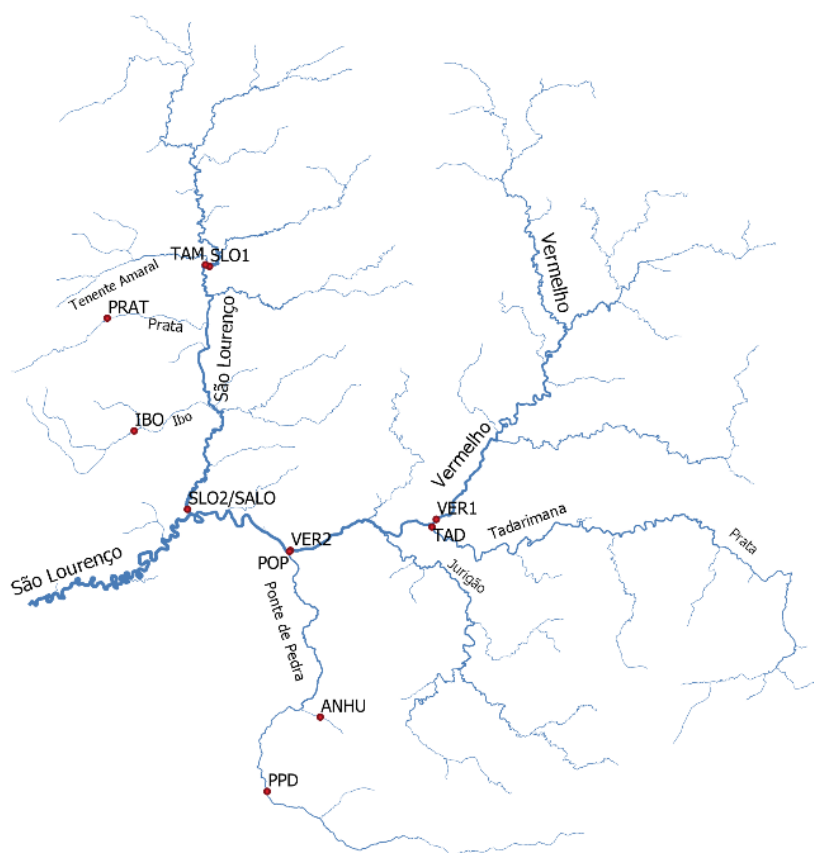


Figura 28: Mapa da localização dos pontos de coleta de ovos e larvas na bacia do rio São Lourenço.

Os valores de número de indivíduos por dia, apresentados na Tabela 9, foram divididos pelo comprimento da rede de drenagem na área de captação de ovos e larvas de cada ponto de amostragem, para obter a densidade de ovos e larvas por km de rio. A área de captação de ovos e larvas de cada ponto de amostragem foi definida considerando toda a rede de drenagem localizada a montante do ponto de amostragem, limitada pela posição de obstáculos naturais e artificiais à migração de peixes. A Tabela 10 apresenta os valores finais de fluxo diário de ovos e larvas por km de rio.

*Tabela 10: Pontos de amostragem de ovos e larvas de peixes na bacia do rio São Lourenço, com os respectivos valores de fluxo médio diário de ovos e larvas, e densidade de fluxo por km de rio.*

Local	Rio	Fluxo de ovos+larvas (milhões de indivíduos por dia)	Comprimento dos rios (km)	Fluxo (milhões de indivíduos por dia por km)
ANHU	Anhumas	3,9	6	0,70
IBO	Ibo	0,0	62	0,00
POP	Ponte de Pedra	18,6	22	0,86
PPD	Ponte de Pedra	18,3	102	0,18
PRAT	Prata	0,0	43	0,00
SALO	São Lourenço	1241,7	178	6,98
SLO1	São Lourenço	853,8	366	2,33
TAD	Tadarimana	15,5	302	0,05
TAM	Tenente Amaral	56,3	16	3,52
VER1	Vermelho	2083,1	516	4,04
VER2	Vermelho	2982,2	1211	2,46

O valor final do fluxo diário de ovos e larvas por km de rio, obtido para cada ponto de amostragem, foi definido como atributo da rede de drenagem, refletindo a sua qualidade como habitat para reprodução de peixes. O resultado é apresentado na Figura 29.

Para obter o mapa da Figura 29 foi necessário preencher regiões em que a metodologia descrita acima não permitiu estimar o fluxo de ovos e larvas, como a região a montante dos barramentos já existentes e a região a jusante dos pontos de coleta VER2 e SALO.

Para a região a jusante dos pontos VER2 e SALO foi adotado o valor obtido no ponto SALO, que está localizado mais próximo desta região (6,98 ovos e larvas por dia por km de rio). Para as regiões a montante das usinas existentes e a montante dos grandes obstáculos naturais foi adotado o valor mais baixo encontrado entre todos os pontos de monitoramento (0,0 ovos e larvas por dia por km de rio).

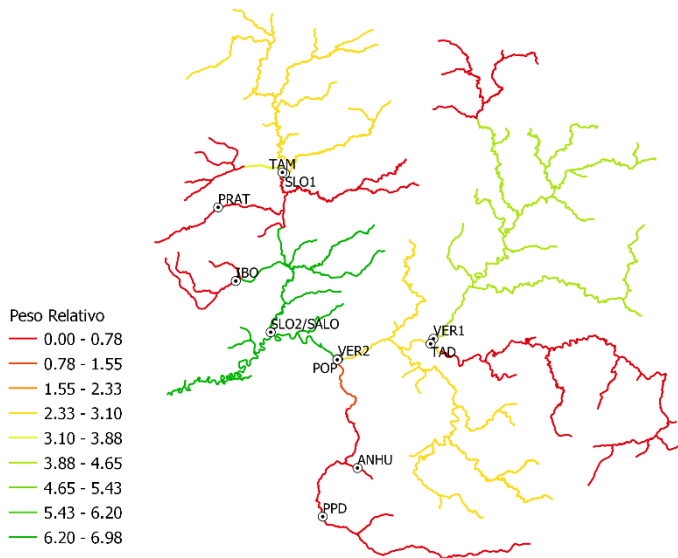


Figura 29: Mapa da rede de drenagem da bacia do rio São Lourenço (somente rios com área de drenagem superior a 100 km<sup>2</sup>) com cores indicando o peso para o cálculo do DCIP (Índice de Conectividade Dendrítico Ponderado para peixes Diádromos) com pontos indicando os locais de amostragem de ovos e larvas.

Observa-se no mapa da Figura 29, que a bacia do rio São Lourenço tem áreas mais favoráveis a desova de peixes (identificadas em verde) e áreas menos favoráveis à desova (identificadas em vermelho). Entre as áreas mais favoráveis à desova está o trecho final do rio São Lourenço, a montante e a jusante da sua confluência com o rio Vermelho. Já os rios Ponte de Pedra e Tadarimana parecem ser menos favoráveis à desova.

#### 4.3.4 Resultados da análise de fragmentação da rede fluvial

Para cada um dos 8192 cenários foi calculado o valor do DCIP<sub>D</sub> e da potência instalada total na bacia.

Os resultados podem ser analisados em um gráfico com os eixos DCIP<sub>D</sub> e Potência Instalada, como mostra a Figura 30. Neste gráfico cada ponto representa o resultado de um cenário. Entretanto, o número de pontos neste gráfico é grande demais para uma análise objetiva. Por este motivo, é conveniente selecionar os pontos que combinam os melhores resultados em termos de Potência Instalada e Conectividade Fluvial, na forma de uma linha de Pareto. A linha de Pareto, ou região de Pareto, está ilustrada pelos pontos azuis na Figura 30, e é constituída de cenários que não são superados por nenhum outro cenário pelos dois critérios (DCIP e Potência) ao mesmo tempo. Para complementar a análise, foram escolhidos também os pontos de uma linha de Pareto inferior (em cor vermelha). Estes pontos correspondem aos cenários com as mais baixas combinações de valores de DCIP e Potência Instalada.

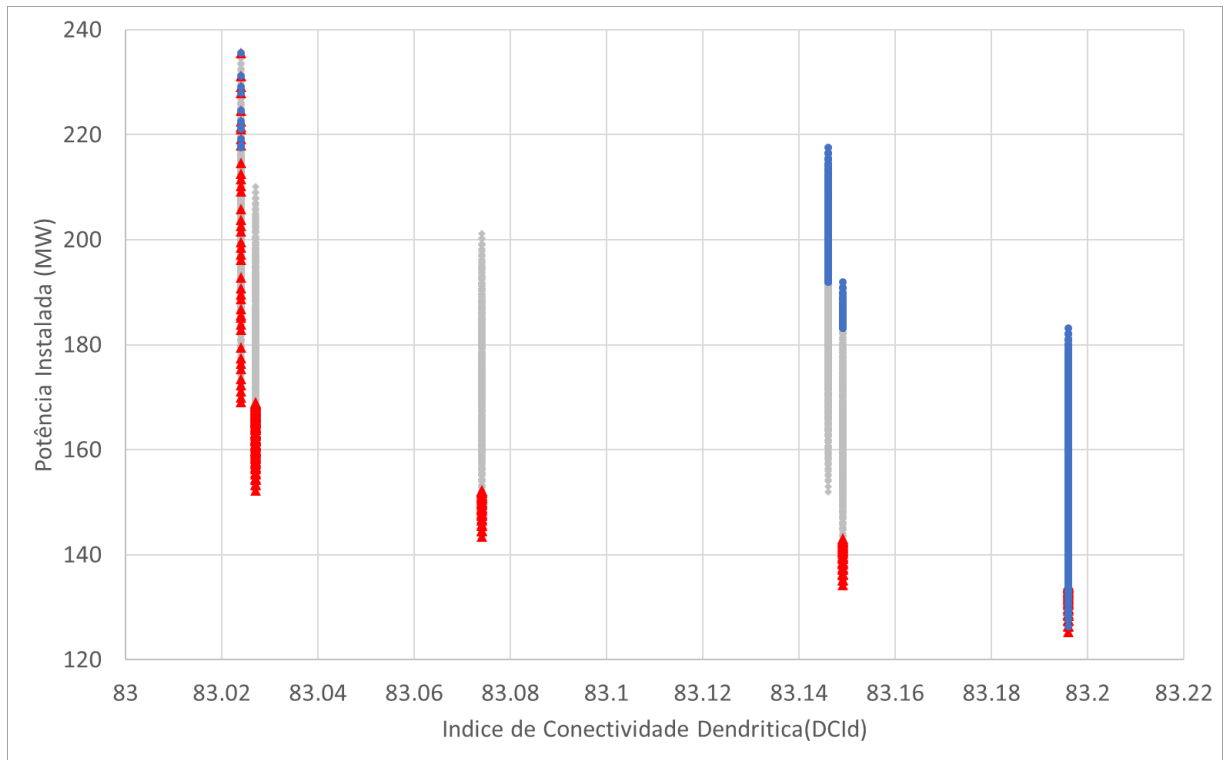


Figura 30: Figura ilustrativa com resultados de DCId e Potência instalada na bacia do rio São Lourenço em todos os cenários (pontos cinzas), nos cenários da região de Pareto superior (pontos vermelhos) e nos cenários da região de Pareto inferior (pontos azuis).

Os resultados dos cenários da linha de Pareto inferior e da linha de Pareto superior são apresentados em na Figura 31.

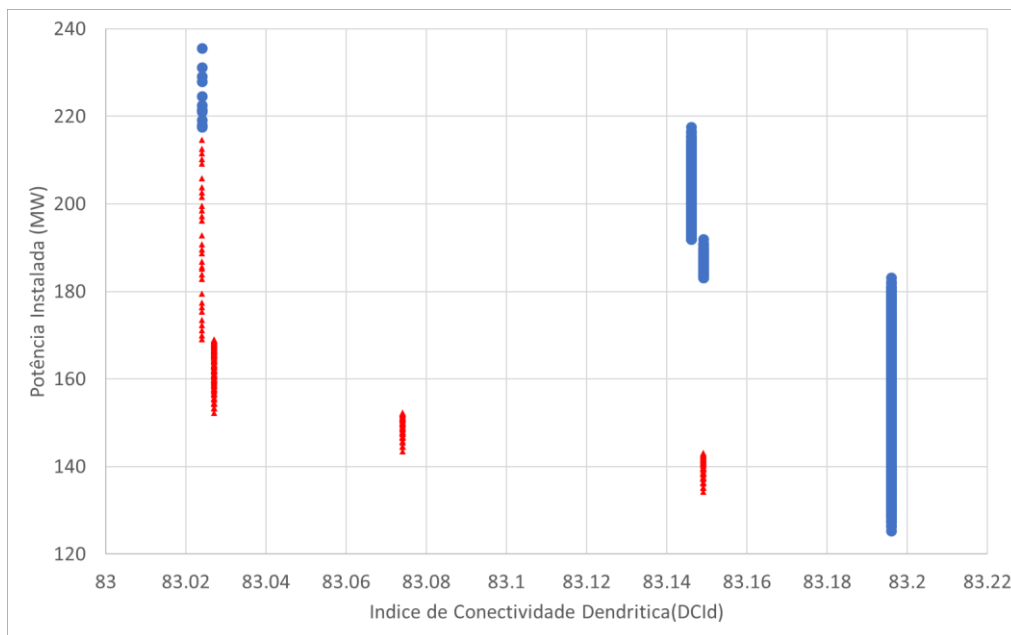


Figura 31: Resultados da linha de Pareto superior (pontos azuis) e da linha de Pareto inferior (pontos vermelhos) da análise de 8192 cenários de construção de barragens na bacia do rio São Lourenço.

Os resultados mostram que existe um *trade-off* entre as variáveis Potência instalada total na bacia (eixo vertical) e Conectividade da rede de drenagem (DCIP<sub>D</sub>). De forma geral, a inclusão de novas barragens na bacia permite aumentar a potência instalada, mas tende a fazer com que o índice de conectividade tenha seu valor reduzido. Da mesma forma, o valor original do índice de conectividade só pode ser mantido se não forem construídas novas barragens, ou se forem construídas apenas barragens a montante de barragens já existentes ou de grandes obstáculos naturais, que já representam impedimento para a migração de peixes.

Entretanto, boa parte das usinas previstas está localizada a montante de barramentos já existentes. Assim, a alteração do índice de conectividade é baixa, mesmo na situação hipotética de construção de todas as usinas.

Observa-se, na Figura 31, que no cenário atual, a potência instalada na bacia equivale a 125,38 MW, e o valor de DCIPD é de 83.2%. Num cenário futuro em que fossem implementadas todas as usinas previstas, a potência instalada atingiria 235,61 MW e o valor de DCIPD ainda se manteria em 83,0%, ou seja, com alteração muito pequena em relação ao cenário atual.

As únicas barragens que contribuiriam para a perda de conectividade seriam as das usinas previstas no rio Prata (cabeceira do Tadarimana), denominadas Santiago e Bom Jesus (ver Figura 26), e a da usina João Basso, localizada no rio Ponte de Pedra, a jusante da usina Rondonópolis, que já está em operação. Entretanto, a perda de conectividade nestes 3 casos seria relativamente baixa, porque as duas primeiras estão localizadas próximas à cabeceira do rio Prata e a usina João Basso está localizada pouca distancia a jusante de uma usina já em operação.

A Figura 32 e a Tabela 11 apresentam os detalhes dos cenários que foram destacados entre os resultados obtidos. Considerando os resultados resumidos na Figura 32, é interessante identificar quais os empreendimentos que participam dos cenários com melhor e pior desempenho, em termos de ganho de potência e perda de conectividade fluvial. A Tabela 11 identifica com o símbolo X quais as usinas ou blocos de usinas que se considera implementadas em cada um dos cenários, além de apresentar os resultados em termos de potência instalada na bacia e índice de conectividade dendrítica ponderado (DCIPD).

Tabela 11: Cenários relevantes identificados com base nos resultados do índice de conectividade e de potência instalada na bacia do rio São Lourenço (o X indica se a barragem ou bloco de barragens está presente no cenário analisado).

B loco	Descrição	Cenário				
		A	B	C	R	T
1	Barragens já em operação	X	X	X	X	X
2	Santiago			X		X
3	Europa		X	X		X
4	João Basso				X	X
5	Jatobá		X	X		X
6	Ipê		X	X		X
7	Beleza		X	X		X
8	Água Branca		X	X		X
9	Bom Jesus			X	X	X
10	Água Brava		X	X		X
11	Água Clara		X	X		X
12	Água Branca		X	X		X
13	Mangaba		X	X		X
14	Buriti		X	X		X
	Potência Instalada (MW)	125,4	183,1	217,5	152,3	235,61
	DCIP <sub>D</sub> (%)	83,20	83,20	83,15	83,03	83,02
	Incremento de Potência em relação ao cenário atual (MW)	-	57,7	92,1	26,9	110,21
	Incremento de DCIP <sub>D</sub> em relação ao cenário atual (%)	-	0	-0,05	-0,17	-0,18



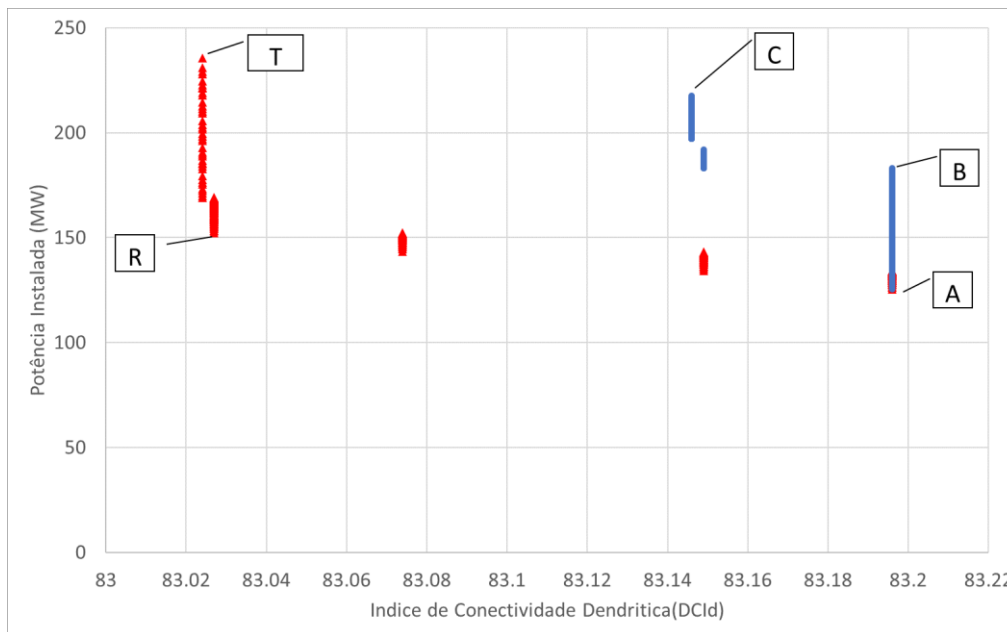


Figura 32: Resultados da linha de Pareto superior (pontos azuis) e da linha de Pareto inferior (pontos vermelhos) da análise de mais de 65 mil cenários de construção de barragens na bacia do rio São Lourenço, com a indicação do cenário atual (A); do cenário com inclusão de todas as 13 barragens propostas (T); e de outros cenários relevantes da linha de Pareto superior e inferior, conforme o texto.

A análise de cenários de instalação de novas usinas hidrelétricas na bacia do rio São Lourenço e seu impacto sobre a conectividade fluvial revela que a construção de novos barramentos na região, de acordo com o inventário atual, terá pouco impacto sobre a conectividade dos rios da bacia com o Pantanal. A exceção são as usinas Santiago, Bom Jesus e João Basso, entretanto mesmo estas têm impacto relativamente pequeno.

#### 4.4 Análise de Conectividade na bacia do rio Piquiri

Para realizar a análise de conectividade fluvial na bacia do rio Piquiri foram considerados dados da rede de drenagem oficial da ANA, cenários de construção de barragens e informações sobre fluxo de ovos e larvas de peixes obtidos durante o projeto pela equipe de ictiologia.

##### 4.4.1 A rede de drenagem, barragens já existentes e os obstáculos naturais

Para a análise de conectividade e fragmentação de habitat, a bacia hidrográfica do rio Piquiri-Itiquira foi delimitada até um ponto localizado já no interior do Pantanal, cerca de 26 km a jusante da confluência dos rios Piquiri e Itiquira.

Além dos rios Itiquira e Piquiri, o principal rio na bacia é o rio Corrente, conforme ilustrado na Figura 33.

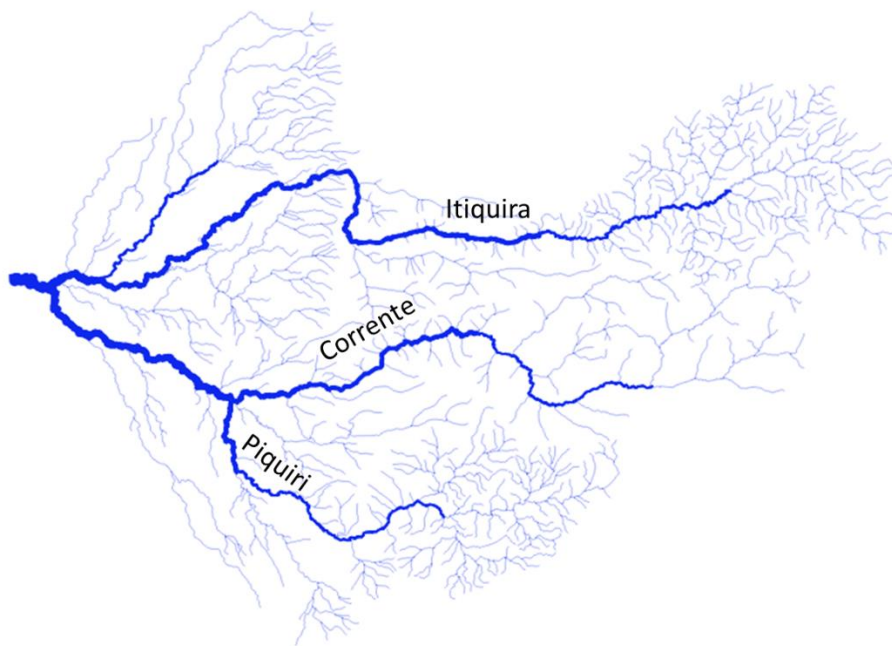


Figura 33: Rede de drenagem da bacia dos rios Piquiri e Itiquira, e os principais rios da região.

A rede de drenagem utilizada na análise é a rede vetorial disponibilizada pela ANA e denominada BHO5K, e conta com 1177 trechos de rio, com comprimento médio de 5,8 km por trecho. Entretanto, os cursos d'água muito pequenos foram desconsiderados da análise, através da eliminação da base BHO5K de todos os trechos de rio cuja área de drenagem total (atributo NUAREAMONT) é inferior a 80 km<sup>2</sup>. Estes trechos foram desconsiderados porque sua largura é pequena e sua declividade é, normalmente, alta demais para configurar locais adequados para migração e desova de peixes. A rede de drenagem resultante, com 446 trechos de rio com comprimento médio de 6,8 km está representada na Figura 34, juntamente com as oito usinas hidrelétricas atualmente em operação na bacia e as 11 usinas projetadas que constam no inventário.

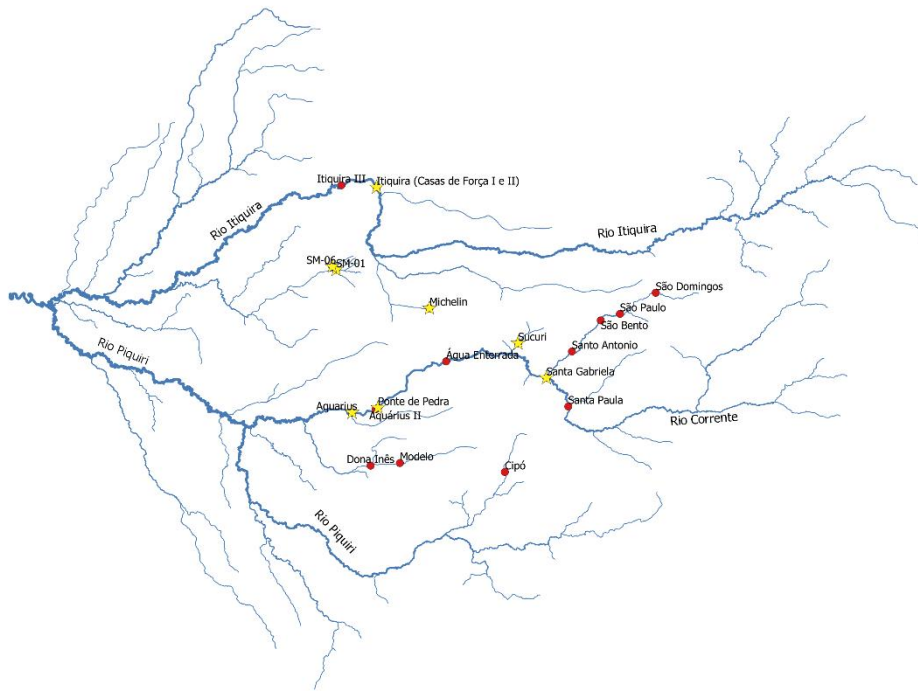


Figura 34: Localização das usinas hidrelétricas em operação (estrelas amarelas) e das usinas hidrelétricas projetadas (pontos vermelhos) na bacia dos rios Piquiri e Itiquira.

Além das barragens já existentes, existem alguns obstáculos naturais que também dificultam a migração de peixes para montante no período de piracema. Os obstáculos naturais foram identificados com base em dados de declividade dos rios estimados a partir do modelo digital de elevação do SRTM e de imagens de satélite de alta resolução. Estas informações foram complementadas ainda com fotografias do local e com informações obtidas no campo, quando possível. A identificação de obstáculos naturais foi priorizada em trechos de rio a jusante de onde há aproveitamentos hidrelétricos inventariados.

Na totalidade foram identificados 5 obstáculos naturais ao deslocamento de peixes migratórios na bacia. A cada um dos obstáculos foi atribuída uma probabilidade de passagem de peixes migratórios. Esta probabilidade foi estimada com base em fotografias do obstáculo, imagens de satélite, estimativas de declividade e comparação com obstáculos semelhantes. A localização dos obstáculos está apresentada na Figura 35, em que a cor do ponto representa a probabilidade de passagem de peixes migradores através do obstáculo.

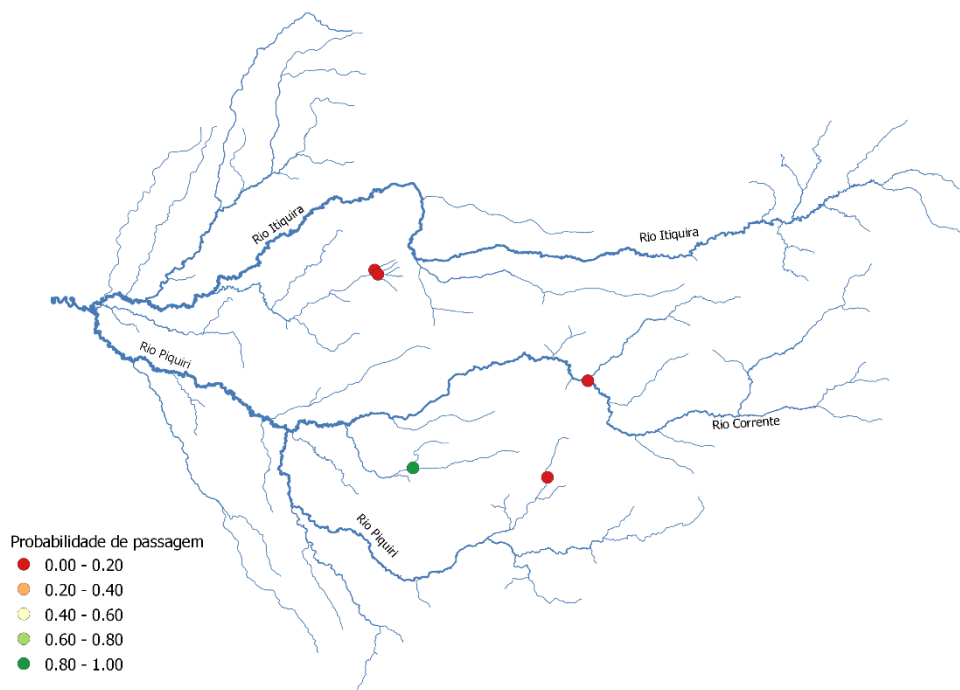


Figura 35: Localização e probabilidade de passagem de obstáculos naturais para migração de peixes na bacia do rio Piquiri.

#### 4.4.2 Cenários de construção de barragens

Conforme mencionado antes, existem 8 usinas hidrelétricas em operação e há outras 11 usinas identificadas no inventário na bacia do rio Piquiri.

O impacto de cada uma delas sobre a conectividade fluvial na bacia depende da construção ou não de outras barragens. Assim, idealmente seria necessário calcular o índice de conectividade para todas as combinações possíveis da inclusão ou não de 11 novas barragens, além das já existentes. O número de cenários a ser analisado, portanto, é igual a 2 elevado a 11, o que corresponde 2048 cenários. Analisar todos estes cenários é viável computacionalmente, por esse motivo não foi necessário agrupar as barragens em blocos.

#### 4.4.3 Fator ponderador da rede de drenagem

Como fator ponderador da rede de drenagem foi atribuído um peso a cada trecho de rio, procurando refletir a importância do trecho para o processo de reprodução dos peixes na bacia.

Para isto foram utilizados os dados de fluxo de ovos e larvas nos pontos de amostragem apresentados no mapa da Figura 36 e na Tabela 12.

Tabela 12: Pontos de amostragem de ovos e larvas de peixes na bacia do rio Piquiri, com os respectivos valores de fluxo médio diário de ovos e larvas.

Local	Rio	Fluxo de ovos+larvas (milhões de indivíduos por dia)
COMP	Comprido	7,2
CORR	Corrente	0,4
PIBE	Benjamim/Piranema	4,7
PIQ	Piquiri	1146,4
TAU	Tauá	192,3

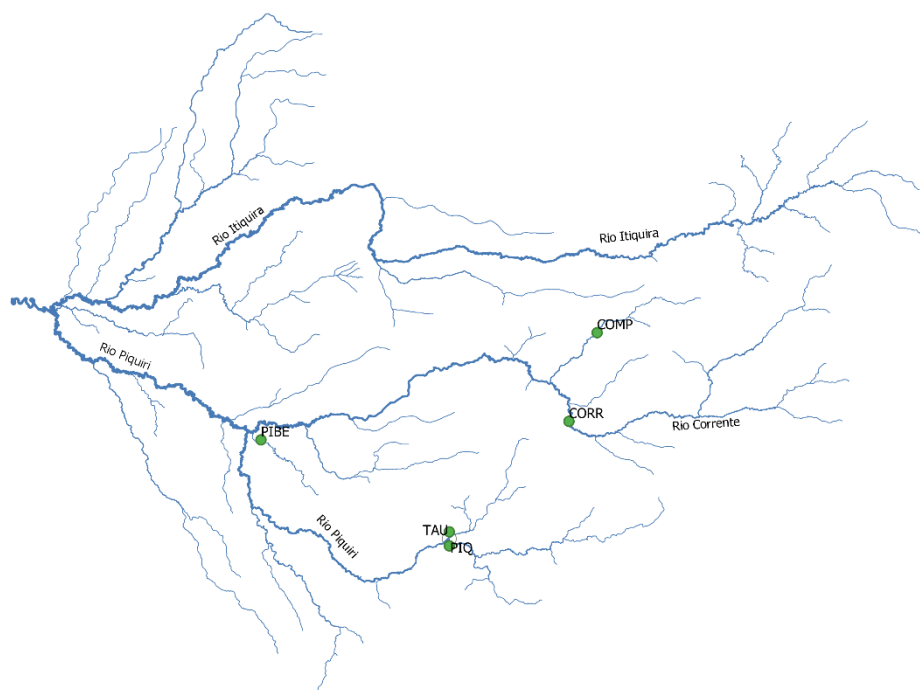


Figura 36: Mapa da localização dos pontos de coleta de ovos e larvas na bacia do rio Piquiri.

Os valores de número de indivíduos por dia, apresentados na Tabela 12, foram divididos pelo comprimento da rede de drenagem na área de captação de ovos e larvas de cada ponto de amostragem, para obter a densidade de ovos e larvas por km de rio. A área de captação de ovos e larvas de cada ponto de amostragem foi definida considerando toda a rede de drenagem localizada a montante do ponto de amostragem, limitada pela posição de obstáculos naturais e artificiais à migração de peixes. A Tabela 13 apresenta os valores finais de fluxo diário de ovos e larvas por km de rio.

Tabela 13: Pontos de amostragem de ovos e larvas de peixes na bacia do rio Piquiri, com os respectivos valores de fluxo médio diário de ovos e larvas, e densidade de fluxo por km de rio.

Local	Rio	Fluxo de ovos+larvas (milhões de indivíduos por dia)	Comprimento dos rios (km)	Fluxo (milhões de indivíduos por dia por km)
COMP	Comprido	7,2	46	0,16
CORR	Corrente	0,4	268	0,002
PIBE	Benjamim/Piranema	4,7	106	0,04
PIQ	Piquiri	1146,4	138	8,31
TAU	Tauá	192,3	65	2,96

O valor final do fluxo diário de ovos e larvas por km de rio, obtido para cada ponto de amostragem, foi definido como atributo da rede de drenagem, refletindo a sua qualidade como habitat para reprodução de peixes. O resultado é apresentado na Figura 37.

Para obter o mapa da Figura 37 foi necessário preencher regiões em que a metodologia descrita acima não permitiu estimar o fluxo de ovos e larvas, como os rios da sub-bacia do Itiquira, e a região a jusante de todos os pontos de monitoramento.

Na região do rio Itiquira, a montante da barragem da usina Itiquira, foi considerado o valor mínimo encontrado nos pontos de monitoramento (0,002 milhões de ovos e larvas por dia por km). Na região do rio Corrente, a montante da barragem localizada mais a jusante, até os pontos de monitoramento CORR e COMP, também foi considerado o valor mínimo encontrado nos pontos de monitoramento.

No trecho do rio Piquiri localizado a jusante da confluência com o Ribeirão Comprido até a confluência com o rio Corrente, foi adotado o valor médio entre os valores encontrados nos pontos de coleta TAU e PIQ (5,6 milhões de ovos e larvas por dia por km). Finalmente, nos trechos dos rios Piquiri e Itiquira localizados na planície pantaneira, bem como em todos os afluentes desses dois rios nesta região, foi adotado o valor médio entre todos os pontos de coleta (2,29 milhões de ovos e larvas por dia por km).

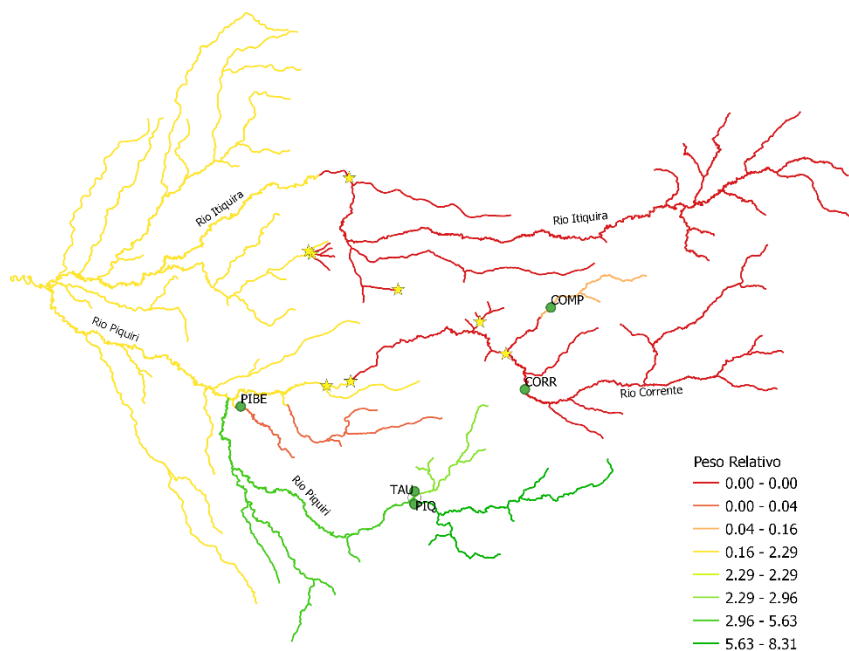


Figura 37: Mapa da rede de drenagem da bacia do rio Piquiri (somente rios com área de drenagem superior a 80 km<sup>2</sup>) com cores indicando o peso para o cálculo do DCIP (Índice de Conectividade Dendrítico Ponderado para peixes Diádromos) com pontos indicando os locais de amostragem de ovos e larvas, e estrelas indicando a localização de usinas atualmente em operação.

Observa-se no mapa da Figura 37, que a bacia do rio Piquiri tem áreas mais favoráveis a desova de peixes (identificadas em verde) e áreas menos favoráveis à desova (identificadas em vermelho). Entre as áreas menos favoráveis estão todos os trechos de rio a montante de usinas já existentes ou de obstáculos naturais. Entre as áreas mais favoráveis à desova destaca-se o rio Piquiri, e seu afluente Córrego Tauá.

#### 4.4.4 Resultados da análise de fragmentação da rede fluvial

Para cada um dos 2048 cenários foi calculado o valor do DCIP<sub>D</sub> e da potência instalada total na bacia.

Os resultados podem ser analisados em um gráfico com os eixos DCIP<sub>D</sub> e Potência Instalada, como mostra a Figura 38. Neste gráfico cada ponto representa o resultado de um cenário. Entretanto, o número de pontos neste gráfico é grande demais para uma análise objetiva. Por este motivo, é conveniente selecionar os pontos que combinam os melhores resultados em termos de Potência Instalada e Conectividade Fluvial, na forma de uma linha de Pareto. A linha de Pareto, ou região de Pareto, está ilustrada pelos pontos azuis na Figura 38, e é constituída de cenários que não são superados por nenhum outro cenário pelos dois critérios (DCIP e Potência) ao mesmo tempo. Para complementar a análise, foram escolhidos também os pontos de uma linha de Pareto inferior (em cor vermelha). Estes pontos correspondem aos cenários com as mais baixas combinações de valores de DCIP e Potência Instalada.

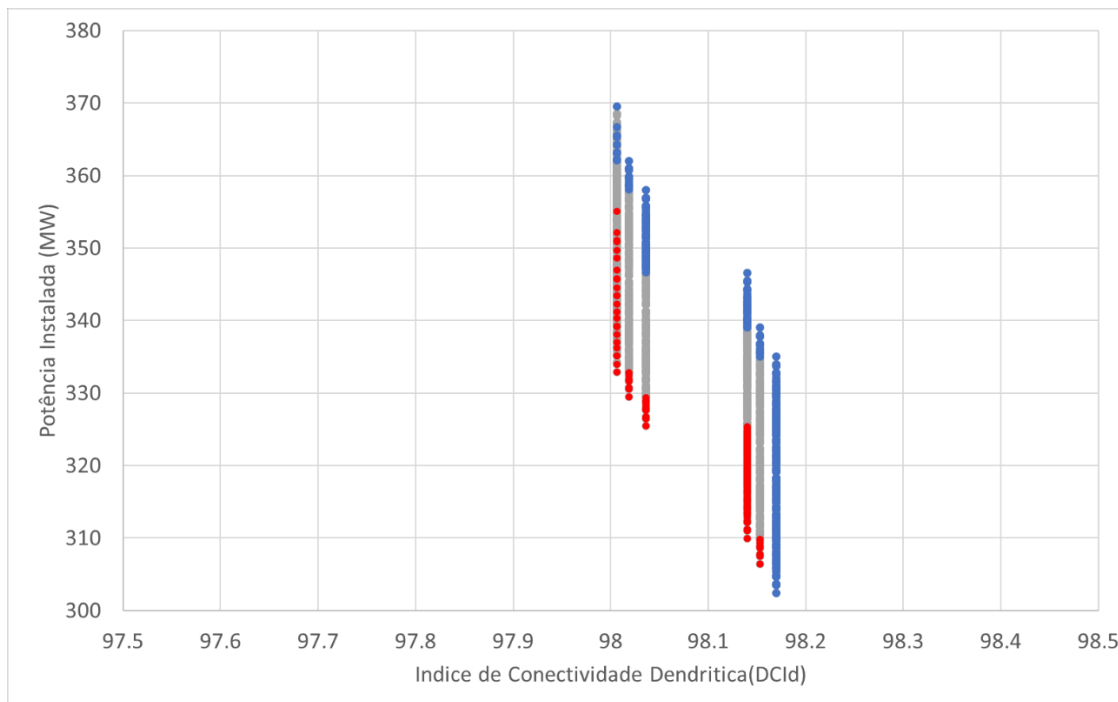


Figura 38: Figura ilustrativa com resultados de DCId e Potência instalada na bacia do rio Piquiri em todos os cenários (pontos cinzas), nos cenários da região de Pareto superior (pontos vermelhos) e nos cenários da região de Pareto inferior (pontos azuis).

Os resultados dos cenários da linha de Pareto inferior e da linha de Pareto superior são apresentados em na Figura 39.

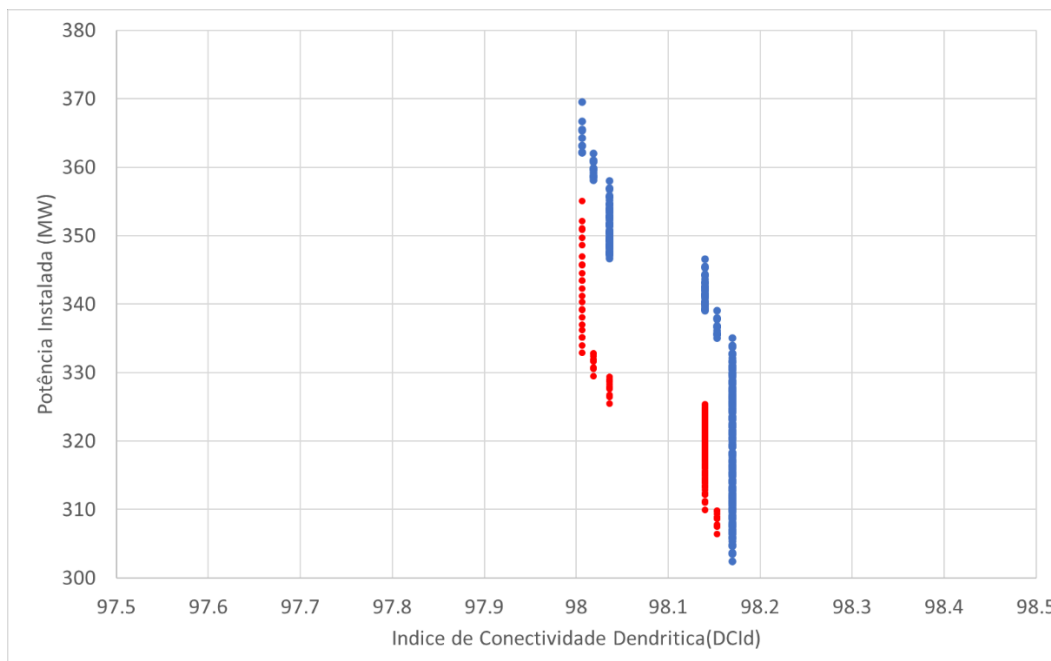


Figura 39: Resultados da linha de Pareto superior (pontos azuis) e da linha de Pareto inferior (pontos vermelhos) da análise de 2048 cenários de construção de barragens na bacia do rio Piquiri.



Os resultados mostram que existe um *trade-off* entre as variáveis Potência instalada total na bacia (eixo vertical) e Conectividade da rede de drenagem (DCIP<sub>D</sub>). De forma geral, a inclusão de novas barragens na bacia permite aumentar a potência instalada, mas tende a fazer com que o índice de conectividade tenha seu valor reduzido. Da mesma forma, o valor original do índice de conectividade só pode ser mantido se não forem construídas novas barragens, ou se forem construídas apenas barragens a montante de barragens já existentes ou de grandes obstáculos naturais, que já representam impedimento para a migração de peixes.

Entretanto, boa parte das usinas previstas na bacia do rio Piquiri está localizada a montante de barramentos já existentes, ou em locais em que existem obstáculos naturais relevantes. Assim, a alteração do índice de conectividade é baixa, mesmo na situação hipotética de construção de todas as usinas.

Observa-se, na Figura 39, que no cenário atual, a potência instalada na bacia equivale a 302,43 MW, e o valor de DCIPD é de 98,0%. Num cenário futuro em que fossem implementadas todas as usinas previstas, a potência instalada atingiria 369,56 MW e o valor de DCIPD ainda se manteria em 98,2%, ou seja, com alteração muito pequena em relação ao cenário atual.

As únicas barragens que contribuiriam para a perda de conectividade seriam as das usinas previstas no Córrego Benjamim, denominadas Dona Inês e Modelo (ver Figura 34), e a da usina Itiquira III, localizada no rio Itiquira, a jusante da usina já existente, que conta com as casas de força I e II. Entretanto, a perda de conectividade nestes 3 casos seria relativamente baixa, porque as duas primeiras estão localizadas próximas à cabeceira do Córrego Benjamim e a usina Itiquira III está localizada pouca distância a jusante de uma barragem.

A Figura 40 e a Tabela 14 apresentam os detalhes dos cenários que foram destacados entre os resultados obtidos. Considerando os resultados resumidos na Figura 40, é interessante identificar quais os empreendimentos que participam dos cenários com melhor e pior desempenho, em termos de ganho de potência e perda de conectividade fluvial. A Tabela 14 identifica com o símbolo X quais as usinas ou blocos de usinas que se considera implementadas em cada um dos cenários, além de apresentar os resultados em termos de potência instalada na bacia e índice de conectividade dendrítica ponderado (DCIPD).

Tabela 14: Cenários relevantes identificados com base nos resultados do índice de conectividade e de potência instalada na bacia do rio Piquiri (o X indica se a barragem ou bloco de barragens está presente no cenário analisado).

B loco	Descrição	Cenário				
		A	B	C	R	T
1	Barragens já em operação	X	X	X	X	X
2	Água Enterrada		X	X		X
3	Cipó		X	X		X
4	Santo Antonio		X	X		X
5	São Domingos		X	X		X
6	São Bento		X	X		X
7	Santa Paula		X	X		X
8	São Paulo		X	X		X
9	Itiquira III				X	X
10	Dona Inês			X	X	X
11	Aquáriu II		X	X		X
12	Modelo			X		X
Potência Instalada (MW)		302,4	335,0	346,6	332,9	369,6
DCIP <sub>D</sub> (%)		98,17	98,17	98,14	98,01	98,01
Incremento de Potência em relação ao cenário atual (MW)		-	32,6	44,2	30,5	67,2
Incremento de DCIP <sub>D</sub> em relação ao cenário atual (%)		-	0	-0,03	-0,16	-0,16

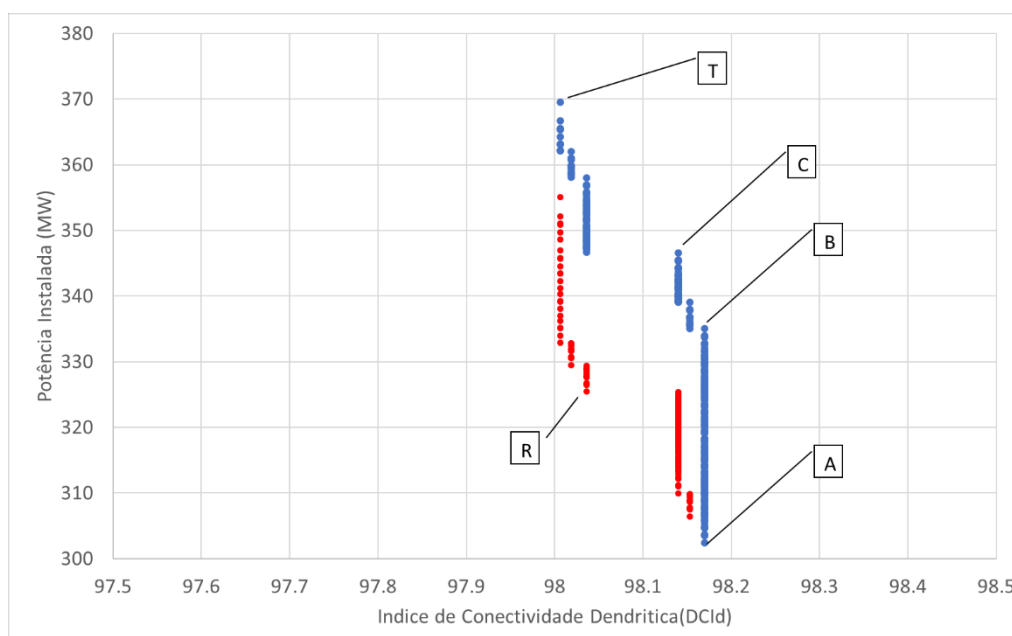


Figura 40: Resultados da linha de Pareto superior (pontos azuis) e da linha de Pareto inferior (pontos vermelhos) da análise de 2048 cenários de construção de barragens na bacia do rio Piquiri, com a indicação do cenário atual (A); do cenário com inclusão de todas as 11 barragens propostas (T); e de outros cenários relevantes da linha de Pareto superior e inferior, conforme o texto.

A análise de cenários de instalação de novas usinas hidrelétricas na bacia do rio Piquiri e seu impacto sobre a conectividade fluvial revela que a construção de novos barramentos na região, de acordo com o inventário atual, terá pouco impacto sobre a conectividade dos rios da bacia com o Pantanal. A exceção são as usinas Dona Inês, Modelo e Itiquira III, entretanto mesmo estas têm impacto relativamente pequeno.

#### 4.5 Análise de conectividade na bacia do rio Taquari

Para realizar a análise de conectividade fluvial na bacia do rio Taquari foram considerados dados da rede de drenagem oficial da ANA, cenários de construção de barragens e informações sobre fluxo de ovos e larvas de peixes obtidos durante o projeto pela equipe de ictiologia.

##### 4.5.1 A rede de drenagem, barragens já existentes e os obstáculos naturais

Para a análise de conectividade e fragmentação de habitat, a bacia hidrográfica do rio Taquari foi delimitada até um ponto localizado já no interior do Pantanal, cerca de 180 km a jusante da cidade de Coxim. Os principais rios, além do próprio Taquari, são os rios Coxim, Jauru, Verde, Camapuã e Ariranha, conforme ilustrado na Figura 41.

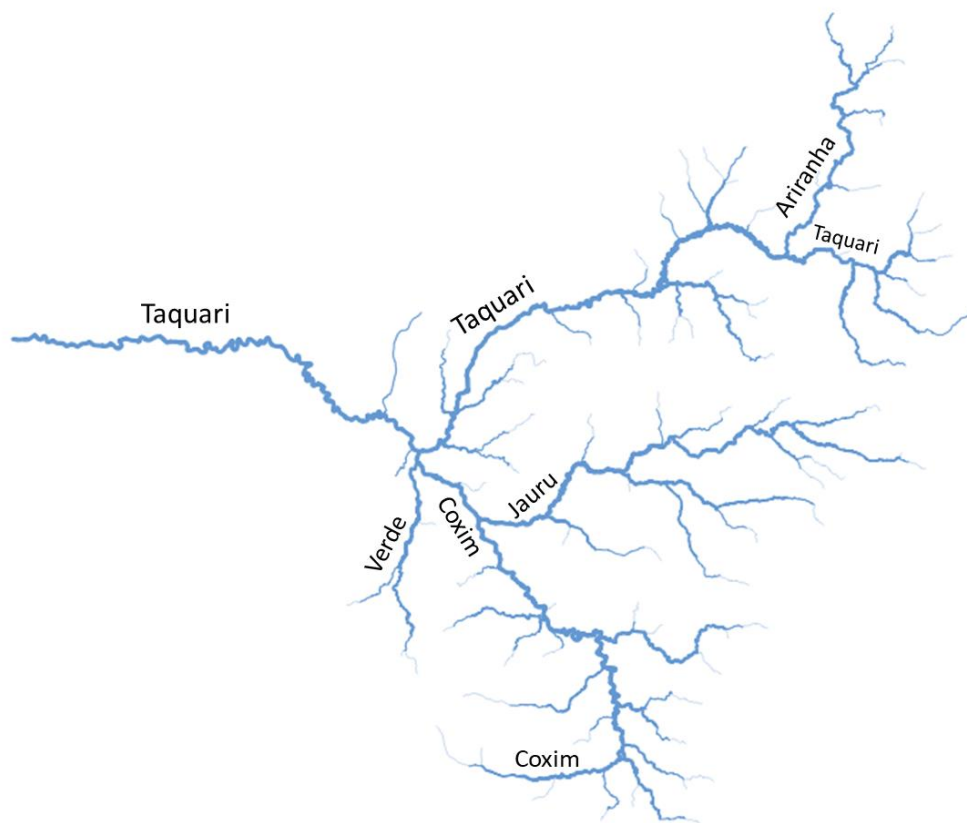


Figura 41: Rede de drenagem da bacia do rio Taquari, e os principais rios da região.

A rede de drenagem utilizada na análise é a rede vetorial disponibilizada pela ANA e denominada BHO5K, e conta com 2376 trechos de rio, com comprimento médio de 4,5 km por trecho (Figura 41). Entretanto, os cursos d'água muito pequenos foram desconsiderados da análise, através da eliminação da base BHO5K de todos os trechos de rio cuja área de drenagem total (atributo NUAREAMONT) é inferior a 100 km<sup>2</sup>. Estes trechos foram desconsiderados porque sua largura é

pequena e sua declividade é, normalmente, alta demais para configurar locais adequados para migração e desova de peixes. A rede de drenagem resultante, com 747 trechos de rio com comprimento médio de 3,6 km está apresentada na Figura 42.

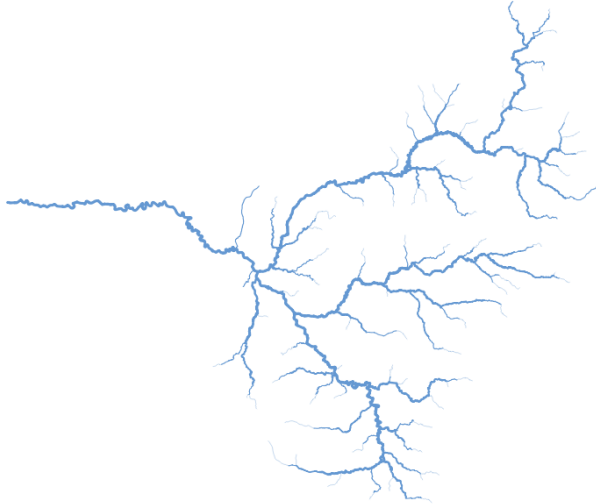


Figura 42: Rede de drenagem da bacia do rio Taquari mostrando apenas os rios com área de drenagem superior a 100 km<sup>2</sup>.

Na bacia do rio Taquari já existem 3 usinas hidrelétricas em operação e há outras 31 identificadas no inventário, conforme mostra a Figura 43.

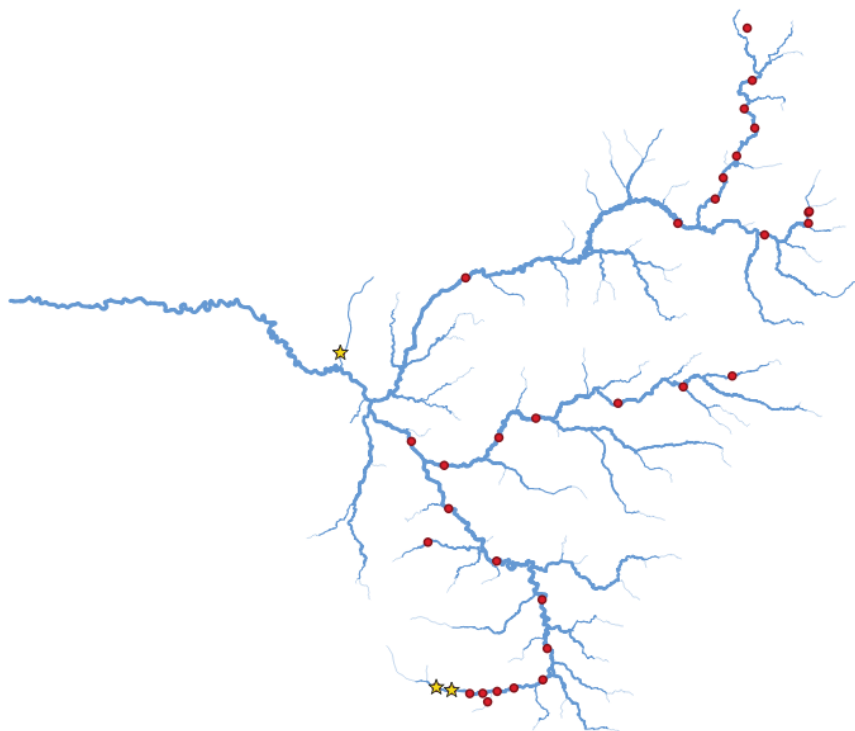


Figura 43: Localização das usinas hidrelétricas em operação (estrelas amarelas) e das usinas hidrelétricas projetadas (pontos vermelhos) na bacia do rio Taquari.

Além das barragens já existentes, existem alguns obstáculos naturais que também dificultam a migração de peixes para montante no período de piracema. Os obstáculos naturais foram identificados com base em dados de declividade dos rios estimados a partir do modelo digital de elevação do SRTM e de imagens de satélite de alta resolução. Estas informações foram complementadas ainda com fotografias do local e com informações obtidas no campo, quando possível.

Não há obstáculos naturais relevantes ao longo dos principais rios da bacia, entretanto, há obstáculos naturais que possivelmente impedem a migração de peixes nas cabeceiras dos rios Taquari, Verde e Coxim.

Na totalidade foram identificados 17 obstáculos naturais totais ou parciais ao deslocamento de peixes migratórios na bacia. A cada um dos obstáculos foi atribuída uma probabilidade de passagem de peixes migratórios. Esta probabilidade foi estimada com base em fotografias do obstáculo, imagens de satélite, estimativas de declividade e comparação com obstáculos semelhantes. A localização dos obstáculos está apresentada na Figura 44, em que a cor do ponto representa a probabilidade de passagem de peixes migradores através do obstáculo.

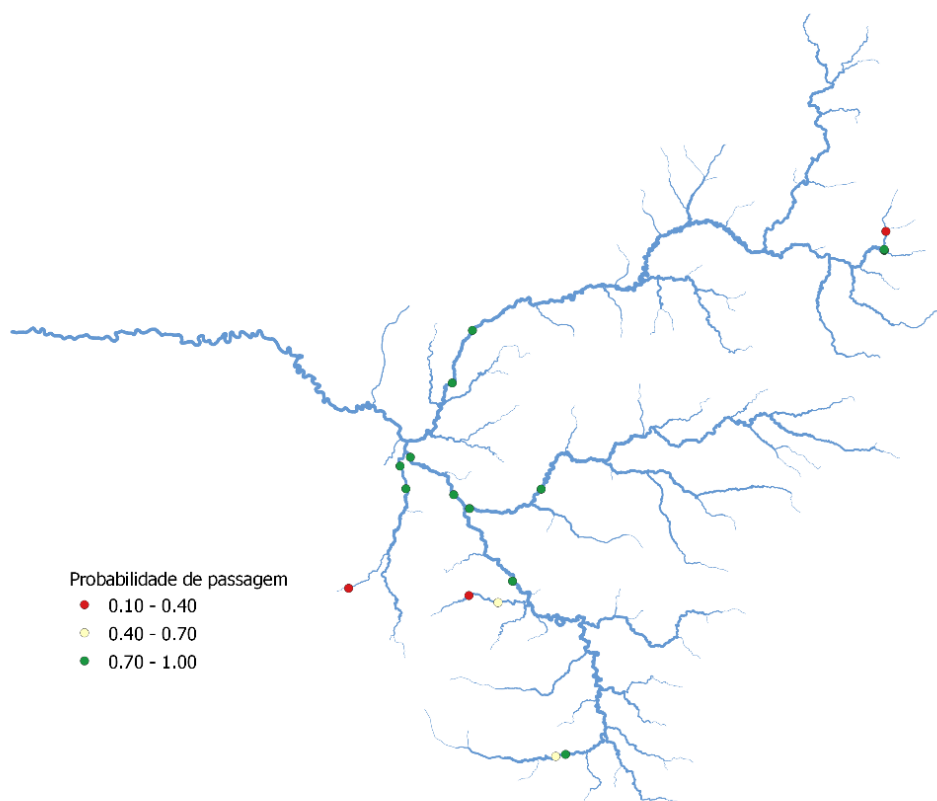


Figura 44: Localização e probabilidade de passagem de obstáculos naturais para migração de peixes na bacia do rio Taquari.

#### 4.5.2 Cenários de construção de barragens

Conforme mencionado antes, existem 3 usinas hidrelétricas em operação e há outras 31 usinas identificadas no inventário na bacia do rio Taquari. No entanto, duas usinas identificadas no inventário foram revogadas, restando 29 usinas que ainda podem ser implementadas, de acordo com o inventário atual.

O impacto de cada uma delas sobre a conectividade fluvial na bacia depende da construção ou não de outras barragens. Assim, idealmente seria necessário calcular o índice de conectividade para todas as combinações possíveis da inclusão ou não de 29 novas barragens, além das já existentes. O número de cenários a ser analisado, portanto, é igual a 2 elevado a 29, o que corresponde a mais de 536 milhões de cenários. Analisar todos estes cenários representa um desafio computacional inviável, assim as barragens atualmente existentes foram unificadas em único bloco, e as demais foram agrupadas conforme a Tabela 15 e a Figura 45, resultando em 25 blocos de barragens, sendo o bloco 1 o conjunto de barragens já existentes.

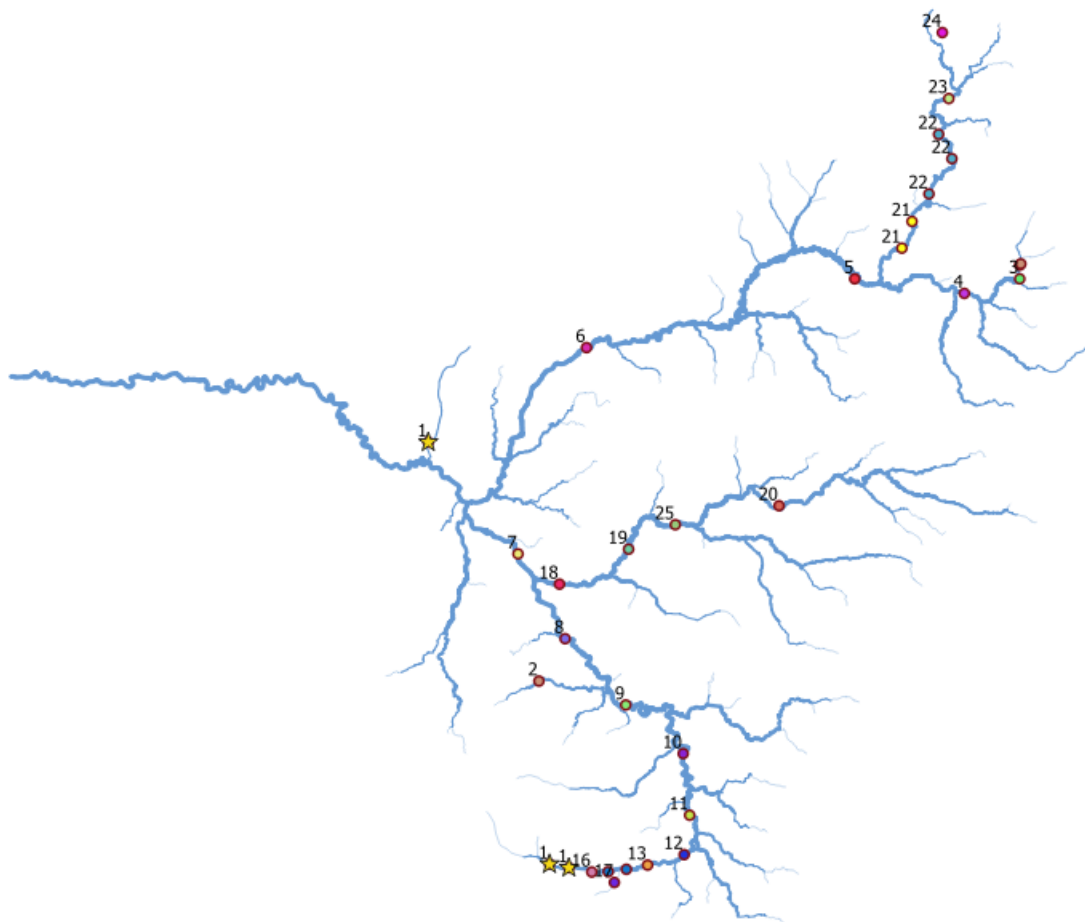


Figura 45: Agrupamento das barragens da bacia do Taquari em 25 blocos (estrelas representam barragens já existentes).

Tabela 15: Blocos de usinas para análise de cenários na bacia do rio Taquari.

Bloco	Barragens
1	Usinas em operação
2	Usinas em locais com grandes obstáculos naturais (Lajari; Serra Vermelha e Andorinha)
3	Mutum
4	Taquarizinho
5	Barra do Ariranha
6	Pedro Gomes
7	Sucuri
8	São Domingos
9	Água Vermelha
10	Peralta
11	Fazenda Caranda
12	Entre Rios
13	Lagoa Alta
14	Ponte Vermelha
15	Maringá
16	Calcutá
17	Santa Fé
18	Mundo Novo
19	Vila Jauru
20	Água Fria
21	Hortência e Primavera
22	Orquídea, Violeta e Lírio
23	Dália
24	Girassol
25	Figueirão
Revogada	Barra do Piraputanga
Revogada	Jauruzinho

Considerando que as barragens do bloco 1 já estão em operação, e devem estar presentes em todos os cenários, e que as usinas de Barra do Piraputanga e Jauruzinho, embora constem do inventário, tiveram o andamento revogado, o número final de cenários analisados foi de 2 elevado a 24, que corresponde a, aproximadamente, 16,8 milhões.

#### 4.5.3 Fator ponderador da rede de drenagem

Como fator ponderador da rede de drenagem foi atribuído um peso a cada trecho de rio, procurando refletir a importância do trecho para o processo de reprodução dos peixes na bacia.

Para isto foram utilizados os dados de fluxo de ovos e larvas nos pontos de amostragem apresentados no mapa da Figura 46 e na Tabela 16.

Tabela 16: Pontos de amostragem de ovos e larvas de peixes na bacia do rio Taquari, com os respectivos valores de fluxo médio diário de ovos e larvas.

Local	Rio	Fluxo de ovos+larvas (milhões de indivíduos por dia)
ARI	Ariranha	165.5
CAM	Camapuã	42.3
COX1	Coxim	4628.2
COX2	Coxim	3365.7
COX3	Coxim	390.1
FIG	Figueirão	463.1
JAU1	Jauru	305.5
JAU2	Jauru	281.6
TAME	Taquari	1061.1
TAQ	Taquari	949.8
VER	Verde	104.4

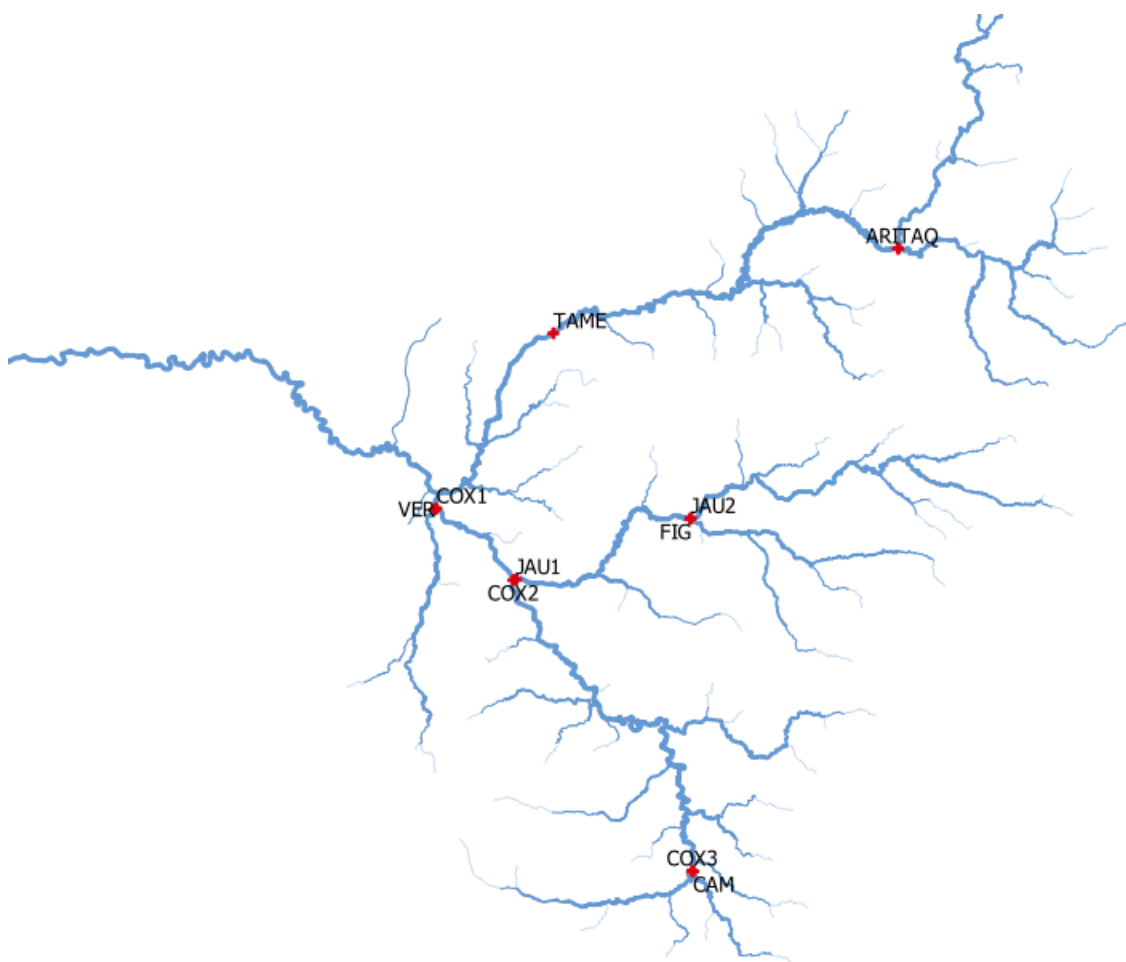


Figura 46: Mapa da localização dos pontos de coleta de ovos e larvas na bacia do rio Taquari.

Os valores de número de indivíduos por dia, apresentados na Tabela 16, foram divididos pelo comprimento da rede de drenagem na área de captação de ovos e larvas de cada ponto de amostragem, para obter a densidade de ovos e larvas por km de rio. A área de captação de ovos



e larvas de cada ponto de amostragem foi definida considerando toda a rede de drenagem localizada a montante do ponto de amostragem, limitada pela posição de obstáculos naturais e artificiais à migração de peixes. A Tabela 17 apresenta os valores finais de fluxo diário de ovos e larvas por km de rio.

*Tabela 17: Pontos de amostragem de ovos e larvas de peixes na bacia do rio Taquari, com os respectivos valores de fluxo médio diário de ovos e larvas, e densidade de fluxo por km de rio.*

Local	Rio	Fluxo de ovos+larvas (milhões de indivíduos por dia)	Comprimento dos rios (km)	Fluxo (milhões de indivíduos por dia por km)
ARI	Ariranha	165.5	209	0,79
CAM	Camapuã	42.3	53	0,80
COX1	Coxim	4628.2	1229	3,77
COX2	Coxim	3365.7	645	5,22
COX3	Coxim	390.1	85	4,59
FIG	Figueirão	463.1	151	3,07
JAU1	Jauru	305.5	549	0,56
JAU2	Jauru	281.6	268	1,05
TAME	Taquari	1061.1	847	1,25
TAQ	Taquari	949.8	211	4,50
VER	Verde	104.4	125	0,84

O valor final do fluxo diário de ovos e larvas por km de rio, obtido para cada ponto de amostragem, foi definido como atributo da rede de drenagem, refletindo a sua qualidade como habitat para reprodução de peixes. O resultado é apresentado na Figura 47.

Para obter o mapa da Figura 47 foi necessário preencher regiões em que a metodologia descrita acima não permitiu estimar o fluxo de ovos e larvas, como a região a jusante dos pontos COX1 e TAME, e as regiões a montante das barragens dos aproveitamentos hidrelétricos atualmente em operação na bacia.

Para a região a jusante dos pontos COX1 e TAME foi adotado a média entre os valores destes dois pontos (2,51 ovos e larvas por dia por km de rio). Para as regiões a montante das usinas existentes e a montante dos grandes obstáculos naturais foi adotado o valor mais baixo encontrado entre todos os pontos de monitoramento (0,56 ovos e larvas por dia por km de rio).

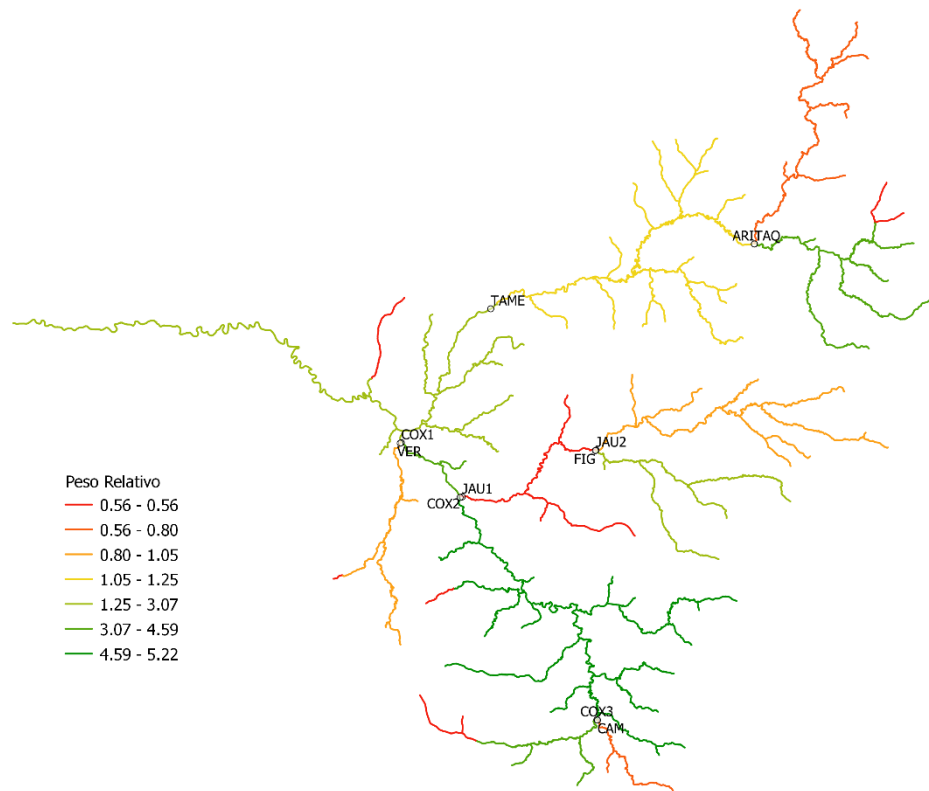


Figura 47: Mapa da rede de drenagem da bacia do rio Taquari (somente rios com área de drenagem superior a 100 km<sup>2</sup>) com cores indicando o peso para o cálculo do DCIP (Índice de Conectividade Dendrítico Ponderado para peixes Diádromos) com pontos indicando os locais de amostragem de ovos e larvas.

Observa-se no mapa da Figura 47, que a bacia do rio Taquari tem áreas mais favoráveis a desova de peixes (identificadas em verde) e áreas menos favoráveis à desova (identificadas em vermelho). Entre as áreas mais favoráveis à desova está o rio Coxim, em praticamente toda a sua extensão, e a cabeceira do rio Taquari, a montante da sua confluência com o rio Ariranha.

O rio Jauru parece ser uma área menos favorável à desova, com exceção do seu afluente Figueirão, em que os valores de fluxo de ovos e larvas são intermediários. Os rios Verde, Camapuã e Ariranha também parecem ser áreas menos favoráveis à desova.

#### 4.5.4 Resultados da análise de fragmentação da rede fluvial

Para cada um dos 16.777.216 (mais de 16,7 milhões) de cenários foi calculado o valor do DCIP<sub>D</sub> e da potência instalada total na bacia.

Os resultados podem ser analisados em um gráfico com os eixos DCIP<sub>D</sub> e Potência Instalada, como mostra a Figura 48. Neste gráfico cada ponto representa o resultado de um cenário. Entretanto, o número de pontos neste gráfico é grande demais para uma análise objetiva. Por este motivo, é conveniente selecionar os pontos que combinam os melhores resultados em termos de Potência Instalada e Conectividade Fluvial, na forma de uma linha de Pareto. A linha de Pareto, ou região de Pareto, está ilustrada pelos pontos azuis na Figura 48, e é constituída de cenários que não são superados por nenhum outro cenário pelos dois critérios (DCIP e Potência) ao mesmo tempo. Para complementar a análise, foram escolhidos também os pontos de uma

linha de Pareto inferior (em cor vermelha). Estes pontos correspondem aos cenários com as mais baixas combinações de valores de DCI<sub>p</sub> e Potência Instalada.

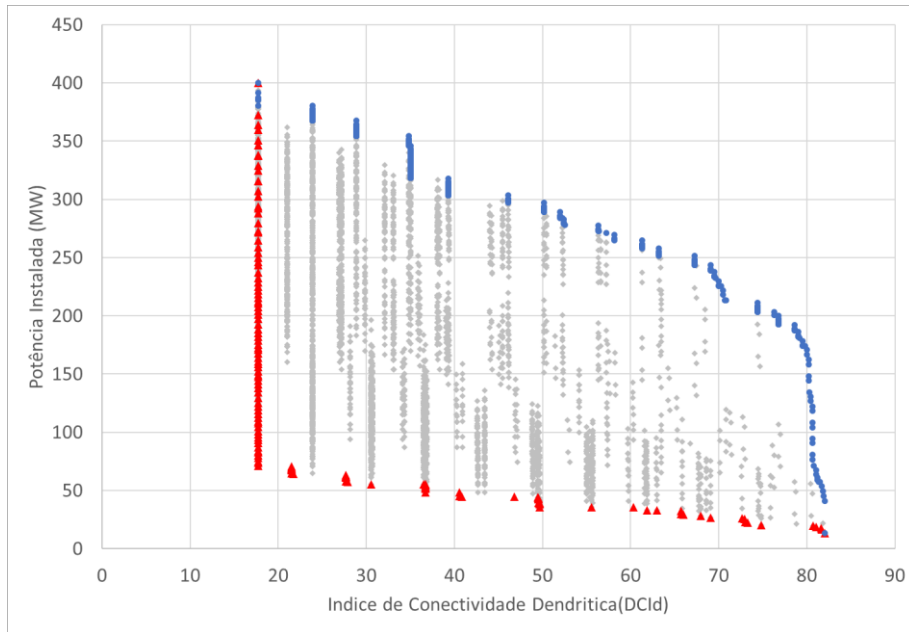


Figura 48: Resultados de DCI<sub>p</sub> e Potência instalada na bacia do rio Taquari em muitos cenários (pontos cinzas), nos cenários da região de Pareto superior (pontos vermelhos) e nos cenários da região de Pareto inferior (pontos azuis).

Os resultados dos cenários da linha de Pareto inferior e da linha de Pareto superior são apresentados em na Figura 49.

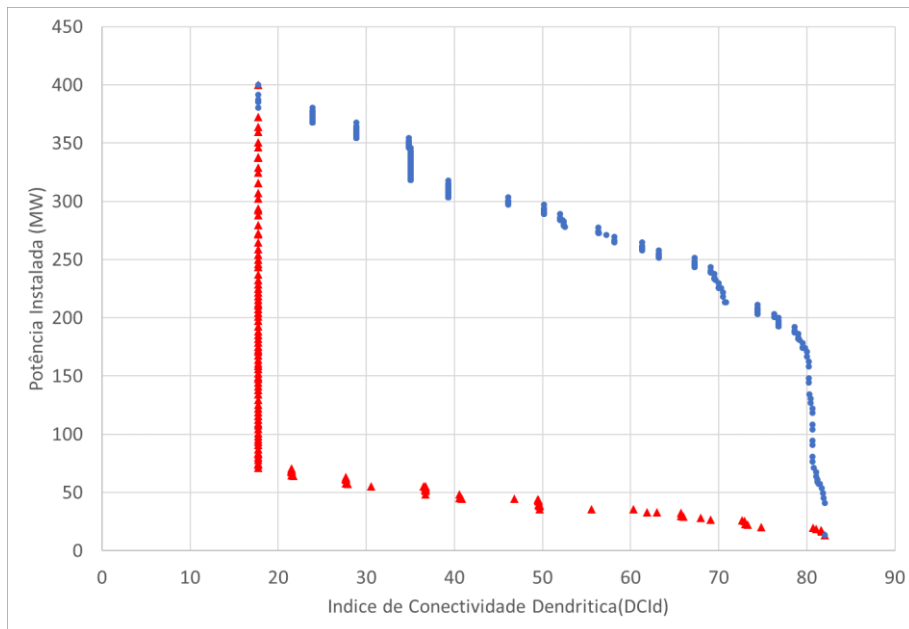


Figura 49: Resultados da linha de Pareto superior (pontos azuis) e da linha de Pareto inferior (pontos vermelhos) da análise de mais de 1 milhão de cenários de construção de barragens na bacia do Taquari.

Os resultados mostram que existe um *trade-off* entre as variáveis Potência instalada total na bacia (eixo vertical) e Conectividade da rede de drenagem (DCIP<sub>D</sub>). De forma geral, a inclusão de novas barragens na bacia permite aumentar a potência instalada, mas tende a fazer com que o índice de conectividade tenha seu valor reduzido. Da mesma forma, o valor original do índice de conectividade só pode ser mantido se não forem construídas novas barragens, ou se forem construídas apenas barragens a montante de barragens já existentes ou de grandes obstáculos naturais, que já representam impedimento para a migração de peixes.

Observa-se, na Figura 49, que no cenário atual, a potência instalada na bacia equivale a 13,6 MW, e o valor de DCIPD é de 82,1%. Num cenário futuro em que fossem implementadas todas as usinas previstas, a potência instalada atingiria 400,1 MW e o valor de DCIPD cairia para 17,8%. Isto significa que a rede de drenagem adequada para a reprodução (desova) dos peixes migradores na bacia do rio Taquari seria amplamente desconectada do Pantanal, tornando se inacessível para estes peixes, caso fossem construídas todas as barragens identificadas no inventário hidrelétrico.

As barragens que mais contribuiriam para a perda de conectividade seriam as das usinas Sucuri (sobre o rio Coxim) e Pedro Gomes (sobre o rio Taquari). Num cenário em que apenas estas duas usinas fossem construídas, além das atualmente em operação, o valor de DCIP cairia para 17,8%, e a potência instalada aumentaria para 71,1 MW, correspondendo a um aumento de apenas 57,5 MW em relação ao valor atual. Este cenário é denominado cenário R, e está identificado na Figura 50 e na Tabela 18.

Por outro lado, existem usinas identificadas no inventário que não afetariam profundamente o valor do índice DCIP, mantendo a conectividade fluvial para peixes migradores, ao mesmo tempo que permitiriam aumentar a potência instalada, conforme ilustrado pelo ponto B na Figura 50. O ponto B corresponde ao cenário em que seriam construídas, as usinas e barragens do bloco 2, que são aquelas localizadas junto a obstáculos naturais importantes (Lajari; Serra Vermelha e Andorinha), a usina Mutum, localizada na cabeceira do rio Taquari, pouco a jusante da usina de Serra Vermelha, e as sete usinas do rio Ariranha (Hortêncina, Primavera, Orquídea, Violeta, Lírio, Dália e Girassol).

O cenário B permite aumentar a potência instalada para 170,7 MW, com pequena alteração do DCIP, que reduziria para 80,0%.

A Figura 50 e a Tabela 18 apresentam os detalhes dos cenários que foram destacados entre os resultados obtidos. Considerando os resultados resumidos na Figura 50, é interessante identificar quais os empreendimentos que participam dos cenários com melhor e pior desempenho, em termos de ganho de potência e perda de conectividade fluvial. A Tabela 18 identifica com o símbolo X quais as usinas ou blocos de usinas que se considera implementadas em cada um dos cenários, além de apresentar os resultados em termos de potência instalada na bacia e índice de conectividade dendrítica ponderado (DCIPD).

Tabela 18: Cenários relevantes identificados com base nos resultados do índice de conectividade e de potência instalada na bacia do rio Taquari (o X indica se a barragem ou bloco de barragens está presente no cenário analisado).

Bloco	Descrição	Cenário						
		A	B	C	D	E	R	T
1	Barragens já em operação	X	X	X	X	X	X	X
2	Usinas em locais com grandes obstáculos naturais (Lajari; Serra Vermelha e Andorinha)		X	X	X	X		X
3	Mutum		X	X	X	X		X
4	Taquarizinho							X
5	Barra do Ariranha							X
6	Pedro Gomes						X	X
7	Sucuri						X	X
8	São Domingos							X
9	Água Vermelha							X
10	Peralta							X
11	Fazenda Caranda							X
12	Entre Rios				X	X		X
13	Lagoa Alta				X	X		X
14	Ponte Vermelha			X	X	X		X
15	Maringá			X	X	X		X
16	Calcutá			X	X	X		X
17	Santa Fé			X	X	X		X
18	Mundo Novo					X		X
19	Vila Jauru					X		X
20	Água Fria					X		X
21	Hortênciã e Primavera		X	X	X	X		X
22	Orquídea, Violeta e Lírio		X	X	X	X		X
23	Dália		X	X	X	X		X
24	Girassol		X	X	X	X		X
25	Figueirão					X		X
	Potência Instalada (MW)	13,6	170,7	186,2	200,2	251,6	71,1	400,1
	DCIP <sub>D</sub> (%)	82,1	80,0	79,0	76,8	67,2	17,8	17,8
	Incremento de Potência em relação ao cenário atual (MW)	-	157,1	172,6	186,6	238,0	57,5	386,5
	Incremento de DCIP <sub>D</sub> em relação ao cenário atual (%)	-	-2,1	-3,1	-5,3	-14,9	-64,3	-64,3

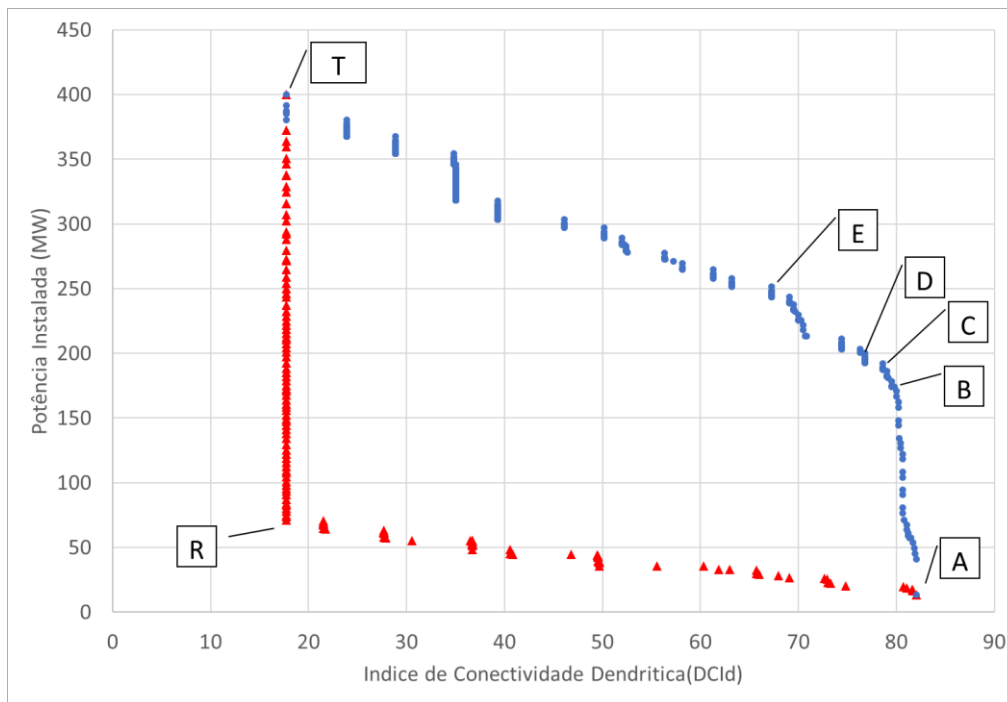


Figura 50: Resultados da linha de Pareto superior (pontos azuis) e da linha de Pareto inferior (pontos vermelhos) da análise de mais de 65 mil cenários de construção de barragens na bacia do rio Taquari, com a indicação do cenário atual (A); do cenário com inclusão de todas as 16 barragens propostas (T); e de outros cenários relevantes da linha de Pareto superior e inferior, conforme o texto.

A análise de cenários de instalação de novas usinas hidrelétricas na bacia do rio Taquari e seu impacto sobre a conectividade fluvial revela que os rios atualmente utilizados ativamente para a desova de peixes migradores poderão ser desconectados do restante da rede de drenagem, e do Pantanal em particular, caso todas as usinas identificadas no inventário hidrelétrico venham a ser construídas, o que pode afetar profundamente as populações de peixes na região. As usinas propostas na parte de jusante dos rios Coxim e Taquari são as que mais teriam consequências negativas neste sentido.

#### 4.6 Análise de conectividade na bacia do rio Negro

A bacia do rio Negro é relativamente pequena, e tem menos locais com potencial de aproveitamento hidrelétrico segundo o inventário. Além disso, quase todos os locais das usinas identificadas no inventário coincidem com pontos em que já existem obstáculos naturais relevantes. Estas duas características permitem que nesta bacia seja aplicada uma análise simplificada da potencial alteração de conectividade.

Para realizar a análise de conectividade fluvial na bacia do rio Negro foram considerados dados da rede de drenagem oficial da ANA, cenários de construção de barragens e informações sobre fluxo de ovos e larvas de peixes obtidos durante o projeto pela equipe de ictiologia.

##### 4.5.1 A rede de drenagem, barragens já existentes e os obstáculos naturais

Para a análise de conectividade e fragmentação de habitat, a bacia hidrográfica do rio Negro foi delimitada até um ponto localizado já no interior do Pantanal, na confluência com o córrego

Anhuma, cerca de 90 km a jusante da cidade de Rio Negro. Os principais rios, além do próprio Negro, são os rios Negrinho e do Peixe, e os córregos Garimpo e Rico, conforme ilustrado na Figura 51.

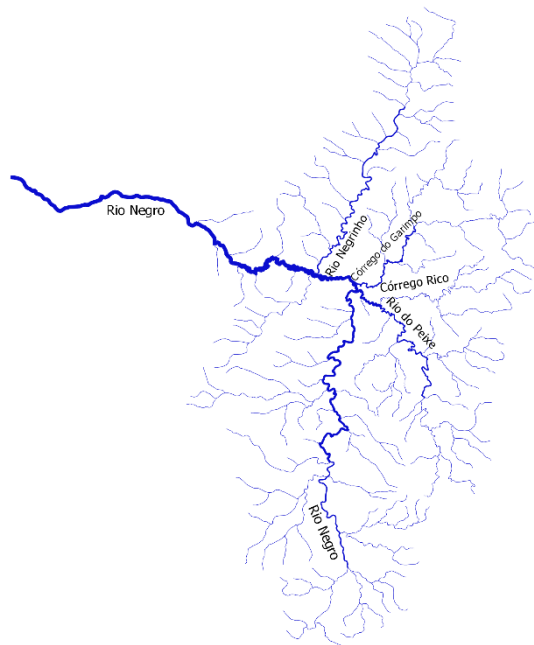


Figura 51: Rede de drenagem da bacia do rio Negro, e os principais rios da região.

Na bacia do rio Negro não há usinas hidrelétricas em operação e há sete identificadas no inventário de potencial hidrelétrico, conforme mostra a Figura 52.

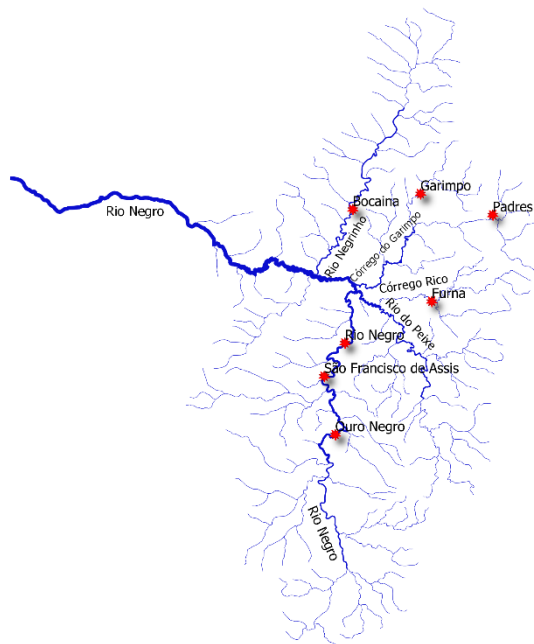


Figura 52: Localização das usinas hidrelétricas projetadas na bacia do rio Negro.

Na bacia do rio Negro existem alguns obstáculos naturais relevantes, que ficam localizados em quase todos os rios da bacia, na transição entre a região do planalto e o a planície pantaneira. Os obstáculos naturais foram identificados com base em dados de declividade dos rios estimados a partir do modelo digital de elevação do SRTM e de imagens de satélite de alta resolução. Estas informações foram complementadas ainda com fotografias do local e com informações obtidas no campo, quando possível.

Na totalidade foram identificados 5 obstáculos naturais totais ou parciais ao deslocamento de peixes migratórios na bacia. A cada um dos obstáculos foi atribuída uma probabilidade de passagem de peixes migratórios. Esta probabilidade foi estimada com base em fotografias do obstáculo, imagens de satélite, estimativas de declividade e comparação com obstáculos semelhantes. A localização dos obstáculos está apresentada na Figura 53, em que a cor do ponto representa a probabilidade de passagem de peixes migradores através do obstáculo.

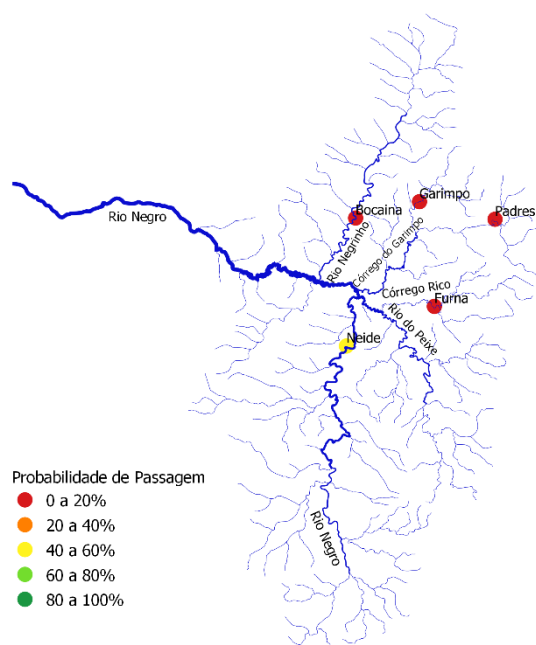


Figura 53: Localização e probabilidade de passagem de obstáculos naturais para migração de peixes na bacia do rio Negro.

#### 4.5.2 Dados de coleta de ovos e larvas

Na bacia do rio Negro foram realizadas coletas de ovos e larvas de peixes em quatro pontos, localizados de acordo com a Tabela 19 e a Figura 54. Em cada um destes pontos foi calculado o fluxo médio de ovos e larvas de peixes, em milhões de indivíduos por dia. Este número reflete a importância relativa da região localizada a montante do ponto no processo de reprodução de peixes na bacia.

Observa-se que os pontos com maior fluxo de ovos e larvas são os localizados no rio do Peixe e no córrego Rico, que apresentam um fluxo cerca de 10 a 80 vezes maior do que o verificado nos rios Negrinho e Negro.



O ponto de coleta no rio Negro, que apresenta um fluxo médio de ovos e larvas particularmente baixo, fica localizado cerca de 2 km a jusante do local em que está prevista a usina Rio Negro, onde existe um obstáculo natural relevante, porém aparentemente transponível por peixes migradores. Os dados de coleta de ovos e larvas neste local sugerem que a bacia do rio Negro, a montante do ponto de coleta de ovos e larvas, não é uma área preferencial de reprodução de peixes.

Tabela 19: Pontos de amostragem de ovos e larvas de peixes na bacia do rio Negro, com os respectivos valores de fluxo médio diário de ovos e larvas.

Local	Rio	Fluxo de ovos+larvas (milhões de indivíduos por dia)
NEGRI	Negrinho	9,9
NEGRO	Negro	1,7
PEIXE	Peixe	137,3
RICO	Rico	110,7

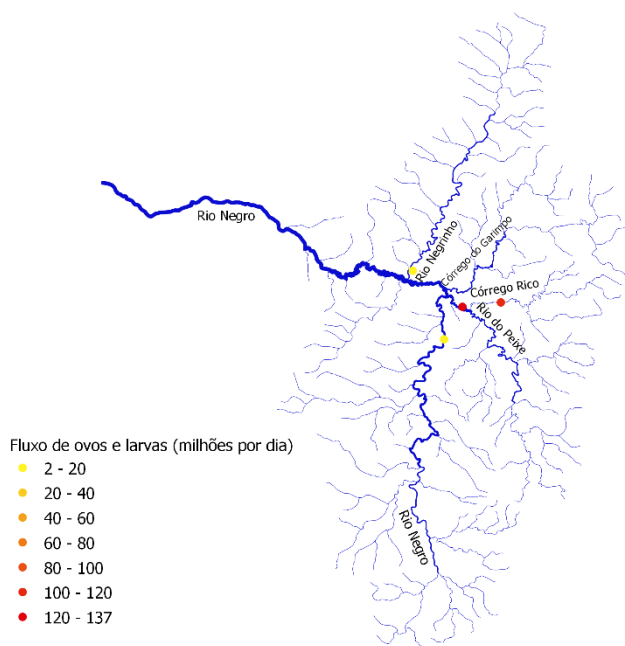


Figura 54: Mapa da localização dos pontos de coleta de ovos e larvas na bacia do rio Negro (cores indicam fluxo de ovos e larvas, de acordo com a legenda).

#### 4.5.3 Análise simplificada de cenários

Na bacia do rio Negro existe uma grande coincidência entre os locais onde há previsão de construção de barragens, segundo o inventário hidrelétrico, com os pontos em que já existem obstáculos naturais relevantes à migração de peixes. A Figura 55 apresenta o mapa da rede de

drenagem da bacia com a sobreposição entre os locais das barragens previstas no inventário e os locais onde existem obstáculos naturais.

Observa-se que as usinas Bocaina, Padres, Furna e Garimpo estão localizadas em trechos de rio em que existem obstáculos naturais consideráveis, aos quais foi atribuída uma probabilidade de passagem próxima de zero. Já a usina Rio Negro está localizada em um trecho de rio em que existe um obstáculo natural relevante, porém ao qual foi atribuída uma probabilidade de passagem de 50%.

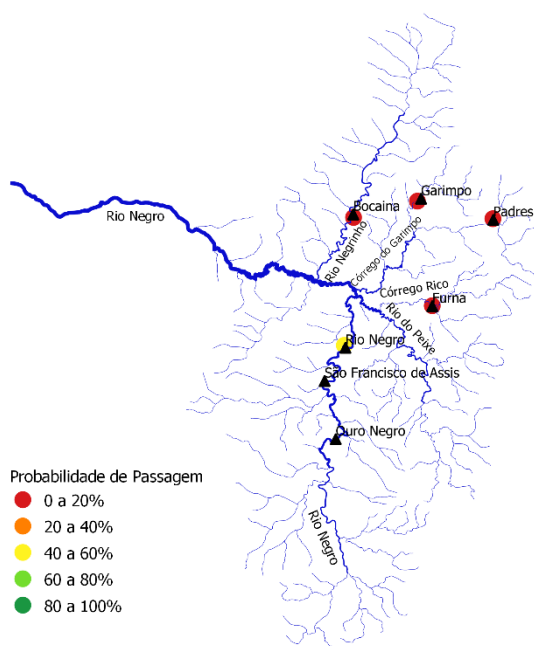


Figura 55: Localização de usinas hidrelétricas previstas no inventário e de obstáculos naturais relevantes para a migração de peixes na bacia do rio Negro (triângulos pretos indicam a localização das sete usinas previstas, círculos coloridos indicam a presença de obstáculos naturais, com probabilidade de passagem de acordo com a legenda).

O mapa da Figura 55 sugere que a eventual construção das usinas Bocaina, Furna, Garimpo e Padres não terá impacto relevante sobre a migração de peixes, já que a conectividade fluvial já se encontra afetada nestes locais pela presença de obstáculos naturais.

Já as usinas Rio Negro, São Francisco de Assis e Ouro Negro podem ter algum impacto sobre a conectividade, pois os obstáculos naturais existentes neste rio aparentemente são menos relevantes para a migração de peixes. Por outro lado, os dados de coleta de ovos e larvas de peixes sugerem que a região em que estão localizadas estas três usinas não é uma área preferencial de reprodução.

#### 4.7 Análise simplificada de conectividade na bacia do rio APA

A bacia do rio Apa é uma bacia relativamente grande, porém apresenta poucos locais com potencial de aproveitamento hidrelétrico, segundo o inventário. Além disso, todos os locais das usinas identificadas no inventário estão sobre o mesmo rio, que é o rio Perdido, um tributário do rio Apa.

A Figura 56 apresenta a rede de drenagem da bacia do rio Apa, de acordo com os dados oficiais BHO5K, utilizados pela ANA, juntamente com a localização das usinas hidrelétricas do inventário.

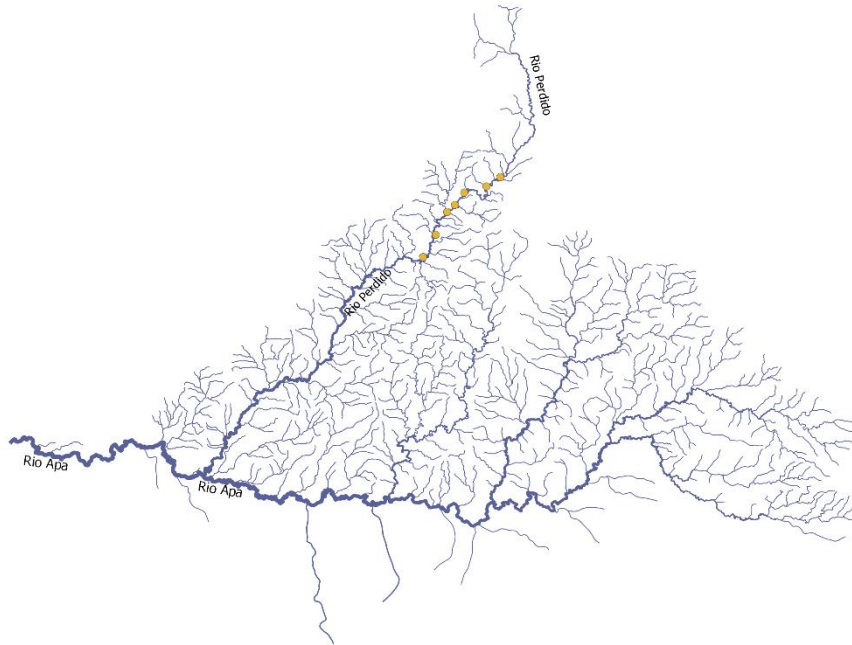


Figura 56: Rede de drenagem da bacia do rio Apa, destacando o rio Perdido e as usinas hidrelétricas identificadas no inventário (pontos amarelos).

Para esta bacia a análise de conectividade pode ser realizada de forma simplificada, já que todos os aproveitamentos hidrelétricos identificados no inventário estão sobre o mesmo rio. Assim, qualquer um dos empreendimentos que venha a ser implementado vai ter como consequência a fragmentação do habitat a montante da barragem, pois não foram identificados obstáculos naturais relevantes ao longo do rio Perdido.

Caso a usina localizada mais a jusante no rio Perdido venha a ser construída, aproximadamente 10% da rede de drenagem total da bacia será desconectada do restante, ficando indisponível para a migração de peixes. Caso a usina localizada mais a montante no rio Perdido venha a ser construída, cerca de 3% da rede de drenagem total da bacia ficará desconectada do restante.

## 5 Conclusões

Um dos impactos ambientais potencialmente mais relevantes decorrentes da implantação de empreendimentos hidrelétricos em uma bacia é a interrupção da continuidade existente em um rio. Esta interrupção ocorre porque as barragens atuam como barreiras que dificultam a migração de peixes. As tentativas de mitigação destes impactos através da implementação de mecanismos de transposição, como escadas de peixes, têm tido pouca efetividade.

A continuidade e a liberdade para a migração podem ser medidas através de índices de conectividade, e o impacto de obstáculos naturais e artificiais sobre esta continuidade pode ser medido pela alteração dos índices de conectividade.

A extensão dos impactos de perda de conectividade deve ser avaliada antes da construção de novas barragens, e deve estar baseada em uma análise regional (por bacia) e não individualizada em cada empreendimento. Essa análise, juntamente com estudos ecológicos e socioeconômicos, permite estabelecer a troca (ou trade-off) que existe entre as opções de usos da água em uma bacia hidrográfica.

Em situações como a atualmente vivenciada na Bacia do Alto Paraguai, quando ainda é possível planejar de forma sistêmica e regional, antes da construção de um grande número de barragens, é possível buscar configurações ou arranjos de barragens que permitem maximizar os benefícios energéticos, minimizando os impactos ecológicos e para a sociedade, pelo menos do ponto de vista da perda de conectividade.

No presente texto é apresentada a análise da perda de conectividade causada nos rios da Bacia Hidrográfica do Alto Paraguai pela construção de barragens identificadas no inventário da ANEEL de 2017. A metodologia foi baseada em um índice de conectividade desenvolvido em 2009 e amplamente utilizado para quantificar impactos de fragmentação de habitat em todo o mundo.

Os resultados revelam que as bacias dos rios Cuiabá e Taquari apresentam maior impacto potencial de perda de conectividade para peixes migradores caso as usinas previstas no inventário hidrelétrico atual sejam construídas.

Na bacia do rio Cuiabá, o índice de conectividade pode cair dos atuais 90% para cerca de 15%, caso sejam construídas as usinas localizadas ao longo do eixo do rio principal. Caso o impacto sobre a população de peixes seja da mesma ordem de grandeza, esta alteração possivelmente inviabilizaria as atividades econômicas relacionadas com os peixes migradores (turismo, pesca difusa e profissional).

Na bacia do rio Taquari, o índice de conectividade pode cair dos atuais 83% para cerca de 18%, caso sejam construídas as usinas localizadas ao longo dos rios Coxim, Jauru e Taquari. Também nesta bacia, a perda de conectividade pode resultar em uma queda relevante na população de peixes migradores.

Na bacia do rio Paraguai, o índice de conectividade pode cair do valor atual de 90% para cerca de 82%. Neste caso, a perda de conectividade pode ser limitada caso não sejam construídas as barragens em trechos bem específicos dos rios Sepotuba e Formoso, que são particularmente relevantes para a desova de peixes.

Nas bacias dos rios Negro, Piquiri e São Lourenço a construção das novas usinas hidrelétricas identificadas pelo inventário hidrelétrico atual não deverá trazer alterações profundas de perda de conectividade.

Na bacia do rio Apa a construção das barragens identificadas no inventário poderá resultar na perda de conectividade de 3 a 10%.

## Referências

- Agostinho AA, Pelicice FM, Gomes LC (2008) Dams and the fish fauna of the Neotropical region: impacts and management related to diversity and fisheries. *Braz J Biol* 68:1119–1132
- Barletta, M., Jaureguizar, A. J., Baigun, C., Fontoura, N. F., Agostinho, A. A., Almeida-Val, V. M. F. D., ... & Fabr e, N. N. (2010). Fish and aquatic habitat conservation in South America: a continental overview with emphasis on neotropical systems. *Journal of fish biology*, 76(9), 2118-2176.
- Barradas, J. R. S., Silva, L. G., Harvey, B. C., & Fontoura, N. F. (2012). Estimating migratory fish distribution from altitude and basin area: a case study in a large Neotropical river. *Freshwater Biology*, 57(11), 2297-2305.
- Buddendorf, W. B., Jackson, F. L., Malcolm, I. A., Millidine, K. J., Geris, J., Wilkinson, M. E., & Soulsby, C. (2019). Integration of juvenile habitat quality and river connectivity models to understand and prioritise the management of barriers for Atlantic salmon populations across spatial scales. *Science of the Total Environment*, 655, 557-566.
- Buddendorf, W. B., Malcolm, I. A., Geris, J., Wilkinson, M. E., & Soulsby, C. (2017). Metrics to assess how longitudinal channel network connectivity and in-stream Atlantic salmon habitats are impacted by hydropower regulation. *Hydrological Processes*, 31(12), 2132-2142.
- Celestino, L. F., Sanz-Ronda, F. J., Miranda, L. E., Makrakis, M. C., Dias, J. H. P., & Makrakis, S. (2019). Bidirectional connectivity via fish ladders in a large Neotropical river. *River Research and Applications*, 35(3), 236-246.
- Cote, D., Kehler, D. G., Bourne, C., & Wiersma, Y. F. (2009). A new measure of longitudinal connectivity for stream networks. *Landscape Ecology*, 24(1), 101-113.
- Er s, T., O'Hanley, J. R., & Czegl di, I. (2018). A unified model for optimizing riverscape conservation. *Journal of applied ecology*, 55(4), 1871-1883.
- Fuller, M. R., Doyle, M. W., & Strayer, D. L. (2015). Causes and consequences of habitat fragmentation in river networks. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1355(1), 31-51.
- Grill, G., Dallaire, C. O., Chouinard, E. F., Sindorf, N., & Lehner, B. (2014). Development of new indicators to evaluate river fragmentation and flow regulation at large scales: A case study for the Mekong River Basin. *Ecological Indicators*, 45, 148-159.
- Grill, G., Lehner, B., Lumsdon, A. E., MacDonald, G. K., Zarfl, C., & Liermann, C. R. (2015). An index-based framework for assessing patterns and trends in river fragmentation and flow regulation by global dams at multiple scales. *Environmental Research Letters*, 10(1), 015001.
- Ioannidou, C., & O'Hanley, J. R. (2018). Eco-friendly location of small hydropower. *European Journal of Operational Research*, 264(3), 907-918.
- Jager, H. I., Efroymson, R. A., Opperman, J. J., & Kelly, M. R. (2015). Spatial design principles for sustainable hydropower development in river basins. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 808-816.

- Lopes, J. D. M., Pompeu, P. S., Alves, C. B. M., Peressin, A., Prado, I. G., Suzuki, F. M., ... & Kalapothakis, E. (2019). The critical importance of an undammed river segment to the reproductive cycle of a migratory Neotropical fish. *Ecology of Freshwater Fish*, 28(2), 302-316.
- Mahlum, S., Kehler, D., Cote, D., Wiersma, Y. F., & Stanfield, L. (2014). Assessing the biological relevance of aquatic connectivity to stream fish communities. *Canadian journal of fisheries and aquatic sciences*, 71(12), 1852-1863.
- Marques, H., Dias, J. H. P., Perbiche-Neves, G., Kashiwaqui, E. A. L., & Ramos, I. P. (2018). Importance of dam-free tributaries for conserving fish biodiversity in Neotropical reservoirs. *Biological conservation*, 224, 347-354.
- McKay, S. K., Schramski, J. R., Conyngham, J. N., & Fischenich, J. C. (2013). Assessing upstream fish passage connectivity with network analysis. *Ecological applications*, 23(6), 1396-1409.
- Pelicice, F. M., & Agostinho, A. A. (2008). Fish-passage facilities as ecological traps in large neotropical rivers. *Conservation biology*, 22(1), 180-188.
- Pelicice, F. M., Pompeu, P. S., & Agostinho, A. A. (2015). Large reservoirs as ecological barriers to downstream movements of Neotropical migratory fish. *Fish and Fisheries*, 16(4), 697-715.
- Perkin, J. S., Gido, K. B., Al-Ta'ani, O., & Scoglio, C. (2013). Simulating fish dispersal in stream networks fragmented by multiple road crossings. *Ecological Modelling*, 257, 44-56.
- Resende, E.K. 2008 Estratégias reprodutivas dos peixes do pantanal. Artigo em Hypertexto. Disponível em: <[http://www.infobibos.com/Artigos/2008\\_3/peixes/index.htm](http://www.infobibos.com/Artigos/2008_3/peixes/index.htm)>. Acesso em: 19/2/2020.
- Santos, L. (2011). Conectividade de hábitat em bacias hidrográficas: simulações com múltiplas barragens e hierarquia de segmentos para conservação. Dissertação de Mestrado. UFRGS.
- Schmutz, S., & Moog, O. (2018). Dams: ecological impacts and management. In *Riverine Ecosystem Management* (pp. 111-127). Springer, Cham.
- Schmutz, S., & Sendzimir, J. (Eds.). (2018). *Riverine Ecosystem Management: Science for Governing Towards a Sustainable Future* (Vol. 8). Springer.
- Seliger, C., & Zeiringer, B. (2018). River Connectivity, Habitat Fragmentation and Related Restoration Measures. In *Riverine Ecosystem Management* (pp. 171-186). Springer, Cham.
- Seliger, C., Scheickl, S., Schmutz, S., Schinegger, R., Fleck, S., Neubarth, J., ... & Muhar, S. (2016). Hy: Con: a strategic tool for balancing hydropower development and conservation needs. *River Research and Applications*, 32(7), 1438-1449.
- Shaad, K., Souter, N. J., Farrell, T., Vollmer, D., & Regan, H. M. (2018). Evaluating the sensitivity of dendritic connectivity to fish pass efficiency for the Sesan, Srepok and Sekong tributaries of the Lower Mekong. *Ecological Indicators*, 91, 570-574.
- van Puijenbroek, P. J., Buijse, A. D., Kraak, M. H., & Verdonschot, P. F. (2019). Species and river specific effects of river fragmentation on European anadromous fish species. *River Research and Applications*, 35(1), 68-77.