



Universidade Federal do Amapá
Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação



Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade Tropical

Mestrado e Doutorado

UNIFAP / EMBRAPA-AP / IEPA / CI-Brasil

BRUNNA STEFANNY SANGEL DE OLIVEIRA

INTERFERÊNCIAS E AMEAÇAS DE HIDRELÉTRICAS À
CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE BRASILEIRA

MACAPÁ - AP

2019

BRUNNA STEFANNY SANGEL DE OLIVEIRA

INTERFERÊNCIAS E AMEAÇAS DE HIDRELÉTRICAS À CONSERVAÇÃO DA
BIODIVERSIDADE BRASILEIRA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade Tropical (PPGBIO) da Universidade Federal do Amapá, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Biodiversidade Tropical.

Orientador: Dr. Alan Cavalcanti da Cunha

MACAPÁ - AP
2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca Central da Universidade Federal do Amapá
Elaborada por Orinete Costa Souza – CRB11/920

Oliveira, Brunna Stefanny Sangel de.

Interferências e ameaças de hidrelétricas à conservação da biodiversidade brasileira / Brunna Stefanny Sangel de Oliveira ; Orientador, Alan Cavalcanti da Cunha. – Macapá, 2019.

35 f.

Dissertação (Mestrado) – Fundação Universidade Federal do Amapá, Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade Tropical.

1. Usinas hidrelétricas. 2. Amazônia Brasileira. 3. Biodiversidade - Conservação. 4. Mata Atlântica. 5. Cerrado. I. Cunha, Alan Cavalcanti da, orientador. II. Fundação Universidade Federal do Amapá. III. Título.

627.8 O482i
CDD. 22 ed.

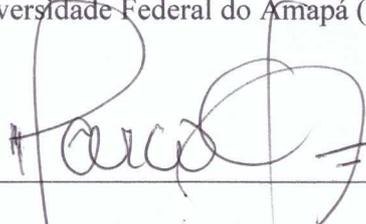
BRUNNA STEFANNY SANGEL DE OLIVEIRA

INTERFERÊNCIAS E AMEAÇAS DE HIDRELÉTRICAS À CONSERVAÇÃO DA
BIODIVERSIDADE BRASILEIRA



Alan Cavalcanti da Cunha

Universidade Federal do Amapá (UNIFAP)



Marco Antônio Augusto Chagas

Universidade Federal do Amapá (UNIFAP)



Alexandro Cezar Fiorentino

Universidade Federal do Amapá (UNIFAP)

Aprovada em 15 de março de 2019, Macapá, AP, Brasil

À minha mãe, minha heroína, que me ensinou desde cedo a importância dos estudos e da dedicação.

AGRADECIMENTOS

A Deus, acima de tudo, por me trazer até aqui com saúde, por me proteger todos os dias e por proporcionar oportunidades e desafios que me fazem a cada dia uma pessoa melhor.

Sendo assim, agradeço ao meu orientador por todo apoio da idéia desde o início, por sofrer e comemorar todas as etapas e desafios alcançados, e principalmente compreender todas as minhas limitações profissionais.

A toda a minha família biológica, principalmente minha mãe e avó, que acompanharam todos os detalhes dessa jornada e torcem por mim com todo vigor que muitas vezes me faltou.

As minhas amigas Renata e Kattrynna, que junto comigo ingressaram em Mestrados da UNIFAP e foram as confidentes de todos os “causos” dessa trajetória.

Aos meus colegas do Mestrado, por todas as perguntas e questionamentos sobre a minha pesquisa. Aos meus colegas de trabalho do IBAMA, em especial a Renata Leitão que me deu o apoio dentro do trabalho que eu precisava.

Ao PPGBio pela estrutura física e acadêmica do programa, pela oportunidade de conhecer verdadeiros Mestres que me levaram a ser uma pessoa mais crítica e não aceitar todas as verdades que me são impostas.

E por fim, minha estrutura física e mental, meu equilíbrio e minha válvula de escape, meu companheiro Cristian. Agradeço por toda paciência, compreensão, apoio e “tietagem” desses últimos 2 anos de mestrado e dos quase 10 anos de vida juntos. Obrigada por assistir horas de todas os meus ensaios de apresentação, por evidenciar a importância do meu trabalho sem ter conhecimento algum da área, e por me ensinar a importância de não desistir dos desafios que encontramos na vida.

RESUMO

Oliveira, Brunna. Interferências e Ameaças de Hidrelétricas à Conservação da Biodiversidade Brasileira. Macapá, 2019. Dissertação (Mestre em Biodiversidade Tropical) – Programa de Pós-graduação em Biodiversidade Tropical – Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação - Universidade Federal do Amapá.

Os impactos ambientais gerados por usinas hidrelétricas são evidenciados em vários estudos ao redor do mundo e a cada tempo os retornos energéticos e econômicos destes empreendimentos são questionados diante das externalidades negativas causadas pela construção de suas barragens. Os danos ainda podem ser agravados, por exemplo, por estarem localizadas cumulativamente em mesmos cursos d'água, ou em ambientes de ecossistemas sensíveis. Estes casos já foram evidenciados em países como a China e os EUA, que são os maiores geradores de energia hidrelétrica do mundo, e no Brasil, que ocupa terceiro lugar deste *ranking* e mantém uma política energética expansionista voltada ao investimento em energia de fontes renováveis com as hidrelétricas contribuindo significativamente na capacidade geradora do país. As alterações socioambientais geradas por usinas na Amazônia, por exemplo, são alvo de pesquisas que incluem vários meios e alertam o mundo para os problemas de médio e longo prazo que o bioma pode sofrer, considerando a biodiversidade da Amazônia como de grande importância mundial. Diante disto, a presente dissertação realizou um estudo sobre a distribuição das usinas hidrelétricas do Brasil, em operação e em planejamento, sobre os biomas brasileiros. Com auxílio de ferramentas SIG e análises geoestatísticas, buscamos realizar um diagnóstico da expansão das usinas com objetivo de investigar se existe preferência na instalação nos biomas e se as características das usinas (ex. área do reservatório, Estado em que esta instalada, etc.) podem influenciar na potência da usina. Como resultado principal, encontramos significativa dependência do bioma Mata Atlântica na atual geração de energia hidrelétrica do país. O Cerrado e Amazônia, que receberão o maior incremento de potência das usinas planejadas, se caracterizam como novas fronteiras expansionistas hidroenergéticas. Diante da importância em termos de biodiversidade destes biomas, acreditamos que os resultados são de suma importância para uma visão em escala nacional da distribuição das usinas hidrelétricas do país, servindo como instrumento e estímulo para uma política governamental que vise priorizar estratégias da conservação voltadas para os biomas mais sensíveis de forma mais eficaz.

Palavras-chave: Usinas hidrelétricas; Mata Atlântica; Amazônia brasileira; Cerrado; SIG.

ABSTRACT

Oliveira, Brunna. Interference and threats from hydroelectric dams to the conservation of Brazilian biodiversity. Macapá, 2019. Dissertação (Mestre em Biodiversidade Tropical) – Programa de Pós-graduação em Biodiversidade Tropical – Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação - Universidade Federal do Amapá.

The environmental impacts generated by hydroelectric plants are evidenced in several studies around the world and each time the energy and the enterprises are questioned in the face of the negative externalities caused by the construction of their dams. Damage can still be aggravated, for example, because they are located cumulatively in the same watercourses, or in sensitive ecosystem environments. These cases have already been demonstrated in countries such as China and the USA, which are the largest generators of hydroelectric energy in the world, and in Brazil, which occupies third place in this ranking and maintains an expansionary energy policy focused on energy investment from renewable sources with hydroelectric plants contributing significantly to the country's generating capacity. The socio-environmental changes generated by plants in the Amazon, for example, are the subject of research that includes various means and alert the world to the medium and long-term problems that the biome may suffer, considering the biodiversity of the Amazon as of great global importance. In spite of this, this dissertation carried out a study on the distribution of hydroelectric plants in Brazil, in operation and planned, on the Brazilian biomes. With the help of GIS tools and geostatistical analysis, a diagnosis is made of the expansion of the plants with the objective of investigate whether there is a preference for the installation of the plants in the biomes and if the characteristics of the plants (eg. reservoir area, brasilian State which the plant is installed, etc.) may influence the power of the plant. As a main result, we found a significative dependence of Brazilian Atlantic Forest on the current generation of hydroelectric in the country. The Brazilian Cerrado and Amazon Forest, which will receive the greatest power increase of the planned plants, are characterized as new expansionary hydro-energy frontiers. In view of the biodiversity importance of these biomes, we believe that the results are of the utmost importance for a nationwide view of the distribution of the country's hydroelectric power plants, serving as an instrument and stimulus for a government policy aimed at prioritizing conservation strategies for the sensitive biomes more effectively.

Keywords: Hidroelectric plants; Brazilian Atlantic Forest; Brazilian Amazon; Brazilian Cerrado; GIS.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL.....	8
2. HIPÓTESES.....	10
3. OBJETIVOS	11
3. 1. GERAL	11
3. 2. ESPECÍFICOS.....	11
4. REFERÊNCIAS	12
ARTIGO CIENTÍFICO.....	14
1. Introdução	15
2.1 Obtenção dos dados das usinas hidrelétricas (unidades amostrais)	17
2.2 Uso de SIG para obtenção das variáveis geoestatísticas	17
2.3 Delineamento amostral e análises estatísticas.....	17
2.4 Proposições de modelos estatísticos utilizando ANCOVA (Análise de Covariância) – Interações entre um ou mais fatores e uma variável contínua	18
3. Resultados.....	18
3.1. Cenário atual (operacional)	18
3.2. Cenário Futuro (planejado).....	23
4. Discussão.....	28
5. Conclusões	31
Referencias.....	31
5. CONCLUSÕES	35

1. INTRODUÇÃO GERAL

A energia de origem hídrica, gerada através da conversão da força cinética da água, é responsável hoje por 16,3% da energia elétrica e 71% da energia gerada por fontes renováveis do mundo (MME 2015, World Energy Council 2016). No Brasil a dependência deste tipo de geração é de aproximadamente 64% (ANEEL 2019), colocando o país no patamar dos maiores produtores de energia de origem hídrica do planeta (EPE 2016, World Energy Council 2016). Isto se dá devido à crescente demanda de energia para atender necessidades de crescimento econômico e populacional (ANEEL e EPE 2018), consequentemente causando severas e intensas pressões ambientais sobre os ecossistemas, em especial os aquáticos.

Isto porque as usinas hidrelétricas funcionam basicamente através do barramento do curso do rio que inibe o seu fluxo natural (ANEEL 2008). Esta intervenção causa problemas de escala local como a sedimentação (Piekielek e Hansen 2012, Cochrane et al. 2017), alagamento ao redor do reservatório (Fearnside 2016), potenciais alterações hidro-geomorfológicas à jusante, especialmente em zonas estuarinas (Santos et al. 2018), além de problemas regionais e até globais, que podem gerar consequências severas como a perda da biodiversidade em nível de bacia e sub-bacia, relatados por diversos estudos ao redor do mundo (Dudgeon et al. 2006, Winemiller et al. 2016).

Os impactos ambientais originários desta atividade são diversos e, no caso do Brasil, agravados ao fato das usinas estarem localizadas no país mais biodiverso do mundo (MMA 2008). Alterações ambientais decorrentes desses empreendimentos como da Usina Hidrelétrica de Energia (UHE) de Belo Monte (Leturcq 2016, Ritter et al. 2017) e das UHE do Rio Madeira (Pinto et al. 2014, Cochrane et al. 2017, Latrubesse et al. 2017), são exemplos dos impactos significativos, no meio biótico e abiótico, além do social e econômico (Fearnside 1999, 2016) causados por estes empreendimentos.

Por ser um país de características continentais, o território brasileiro abrange zonas climáticas e características distintas que favorecem a diversidade e a riqueza de espécies faunísticas e florísticas que nelas habitam (MMA 2008, Luca et al. 2009). Esta diversidade está distribuída em 6 biomas, ou domínios fitogeográficos, de características homogêneas que apresentam relevância internacional para conservação da natureza (Forzza et al. 2010). A Mata Atlântica e o Cerrado brasileiro, por exemplo, estão entre as 25 áreas mundiais prioritárias para conservação da biodiversidade do planeta (Myers et al. 2000). A Amazônia brasileira, da mesma forma, apresenta ecossistemas distintos que favorecem a formação de habitats diversificados para as mais diversas espécies, muitas delas endêmicas, principalmente da ictiofauna (Lees et al. 2016, Winemiller et al. 2016). Porém, é o bioma onde estão instaladas as maiores UHE

brasileiras, que vem gerando maior deterioração destes ecossistemas (Lees et al. 2016, Latrubesse et al. 2017).

Diante disto, a presente dissertação buscou responder se a distribuição das usinas hidrelétricas brasileiras ocorre de forma diferenciada nos biomas brasileiros. Para isto, realizou-se um levantamento da localização das usinas hidrelétricas brasileiras, de diferentes porte, em relação aos biomas do país, associando variáveis da usina às tendências de expansão no território.

Portanto, o presente estudo é uma contribuição inédita aos estudos e análises que visem um diagnóstico geoespacial simples sobre as potenciais ameaças representadas pelas usinas hidrelétricas em relação aos biomas brasileiros. Este diagnóstico geoespacial servirá não somente como um instrumento útil à tomada de decisão para a conservação da biodiversidade em uma escala continental, mas também a setores de múltiplos interesses do governo, como o hidroenergético, licenciamentos, fiscalização e outorga. O Objetivo é dispor de uma nova reflexão sobre os possíveis direcionamentos alternativos da expansão do setor energético e das estratégias de conservação da biodiversidade.

Os resultados serão relevantes para alertar a sociedade em geral e os governos sobre o crescente e conflitante risco de perda da biodiversidade no país ante a ameaça da expansão de novas hidrelétricas em ecossistemas sensíveis como os da Amazônia. Estes resultados se concentrarão na descrição dos possíveis cenários enfrentados em cada um dos biomas brasileiros que influenciam significativamente o equilíbrio ecológico terrestres e aquáticos.

2. HIPÓTESES

- Biomassas brasileiros que abrangem cidades de maior concentração populacional e mais economicamente desenvolvidas possuem uma maior concentração de usinas hidrelétricas.

3. OBJETIVOS

3. 1. GERAL

- Elaborar um diagnóstico sobre a distribuição e a tendência de expansão geográfica das usinas hidrelétricas de todos os portes do Brasil por bioma.

3. 2. ESPECÍFICOS

- Descrever o comportamento e a tendência geográfico-temporal da distribuição das usinas nos diferentes biomas brasileiros;
- Compreender como, onde e quando está ocorrendo a expansão e a concentração de implementação de usinas hidrelétricas (adensamento energético por categoria de geração);
- Identificar quais variáveis das usinas hidrelétricas que mais influenciam as tendências de expansão de usinas hidrelétricas nos biomas brasileiros

4. REFERÊNCIAS

- ANEEL. 2008. Atlas de energia elétrica do Brasil.
- ANEEL. 2019. BIG - Banco de Informações de Geração. <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>. Acessado em 10/02/2019.
- ANEEL, e EPE. 2018. Plano Decenal de Expansão de Energia 2027.
- Cochrane, S. M. V, E. A. T. Matricardi, I. Numata, e P. A. Lefebvre. 2017. Landsat-based analysis of mega dam flooding impacts in the Amazon compared to associated environmental impact assessments_ Upper Madeira River example 2006–2015. *Remote Sensing Applications: Society and Environment* 7:1–8.
- Dudgeon, D., A. H. Arthington, M. O. Gessner, Z.-I. Kawabata, D. J. Knowler, C. Lévêque, R. J. Naiman, A.-H. Prieur-Richard, D. Soto, M. L. J. Stiassny, e C. A. Sullivan. 2006. Freshwater biodiversity: importance, threats, status and conservation challenges. *Biological Reviews* 81:163.
- EPE. 2016. Brazilian Energy Balance 2015. *Epe*:292.
- Fearnside, P. M. 1999. Biodiversity as an environmental service in Brazil ' s Amazonian forests : risks , value and conservation. *Environmental Conservation* 26:305–321.
- Fearnside, P. M. 2016. Environmental and Social Impacts of Hydroelectric Dams in Brazilian Amazonia: Implications for the Aluminum Industry. *World Development* 77:48–65.
- Forzza, R. C., J. F. A. Baumgratz, C. E. Bicudo, D. A. L. Canhos, A. A. Carvalho Jr, A. Costa, &..., e E. N. A. Lughadha. 2010. Introdução: Síntese da diversidade brasileira. *Catálogo de plantas e fungos do Brasil*:19–42.
- Latrubesse, E. M., E. Y. Arima, T. Dunne, E. Park, V. R. Baker, F. M. D’Horta, C. Wight, F. Wittmann, J. Zuanon, P. A. Baker, C. C. Ribas, R. B. Norgaard, N. Filizola, A. Ansar, B. Flyvbjerg, e J. C. Stevaux. 2017. Damming the rivers of the Amazon basin. *Nature* 546:363–369.
- Lees, A. C., C. A. Peres, P. M. Fearnside, M. Schneider, e J. A. S. Zuanon. 2016. Hydropower and the future of Amazonian biodiversity. *Biodiversity and Conservation* 25:451–466.
- Leturcq, G. 2016. Differences and similarities in impacts of hydroelectric dams between north and south of Brazil. *Ambiente & Sociedade* 19:265–286.
- Luca, A. C. De, P. F. Develey, G. A. Bencke, e J. M. G. (orgs.). 2009. Áreas Importantes para a Conservação das Aves no Brasil. Parte II - Amazônia, Cerrado e Pantanal. SAVE Brasil, São Paulo.
- MMA. 2008. Áreas Prioritárias para a Conservação, Uso Sustentável e Repartição de Benefícios da Biodiversidade Brasileira: Atualização - Portaria MMA nº9, de 23 de janeiro de 2007. Página

Série Biodiversidade e Florestas. 2nd editio.

MME. 2015. Plano Decenal de Expansão de Energia 2024.

Myers, N., R. A. Mittermeier, C. G. Mittermeier, G. A. B. da Fonseca, e J. Kent. 2000. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature* 403:853–858.

Piekielek, N. B., e A. J. Hansen. 2012. Extent of fragmentation of coarse-scale habitats in and around U.S. National Parks. *Biological Conservation* 155:13–22.

Pinto, R., P. V. Eisenlohr, e I. L. Lima. 2014. Tree Species Distribution along Environmental Gradients in an Area Affected by a Hydroelectric Dam in Southern Amazonia. *Biotropica* 46:367–376.

Ritter, C. D., G. McCrate, R. H. Nilsson, P. M. Fearnside, U. Palme, e A. Antonelli. 2017. Environmental impact assessment in Brazilian Amazonia: Challenges and prospects to assess biodiversity. *Biological Conservation* 206:161–168.

Santos, E. S. dos, P. P. P. Lopes, H. H. da S. Pereira, O. de O. Nascimento, C. D. Rennie, L. da S. L. O. Sternberg, e A. C. da Cunha. 2018. The impact of channel capture on estuarine hydro-morphodynamics and water quality in the Amazon delta. *Science of the Total Environment* 624:887–899.

Winemiller, K. O., P. B. McIntyre, L. Castello, E. Fluet-Chouinard, T. Giarrizzo, S. Nam, I. G. Baird, W. Darwall, N. K. Lujan, I. Harrison, M. L. J. Stiassny, R. A. M. Silvano, D. B. Fitzgerald, F. M. Pelicice, A. A. Agostinho, L. C. Gomes, J. S. Albert, E. Baran, M. Petrere, C. Zarfl, M. Mulligan, J. P. Sullivan, C. C. Arantes, L. M. Sousa, A. A. Koning, D. J. Hoeinghaus, M. Sabaj, J. G. Lundberg, J. Armbruster, M. L. Thieme, P. Petry, J. Zuanon, G. T. Vilara, J. Snoeks, C. Ou, W. Rainboth, C. S. Pavanelli, A. Akama, A. v. Soesbergen, e L. Saenz. 2016. Balancing hydropower and biodiversity in the Amazon, Congo, and Mekong. *Science* 351:128–129.

World Energy Council. 2016. World Energy Resources 2016.

ARTIGO CIENTÍFICO

Expansão de usinas hidrelétricas nos biomas brasileiros: cenários operacional e planejado

Artigo submetido ao periódico “Renewable & Sustainable Energy Reviews”

Expansão de usinas hidrelétricas nos biomas brasileiros: cenários operacional e planejado

Brunna Oliveira ¹, Alan Cunha ²

¹ Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade Tropical – PPGBio, Universidade Federal do Amapá - UNIFAP; Brunna_sangel@hotmail.com

² Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade Tropical – PPGBio, Universidade Federal do Amapá - UNIFAP; alancunha12@gmail.com

Resumo: Os ecossistemas brasileiros têm sido significativamente impactados pela expansão hidroenergética. Diante da disponibilidade hídrica e do aumento da demanda energética, o país transformou-se numa potência mundial do setor. O objetivo da pesquisa é analisar cenários de distribuição geográfica hidroenergética brasileira por bioma, considerando características funcionais das usinas. Os seguintes procedimentos metodológicos foram utilizados: a) uso de SIG para caracterizar as usinas hidrelétricas brasileiras; b) análise geoestatística para correlacionar diferentes variáveis explicativas da expansão das usinas nos biomas (descritiva, Friedman e ANCOVA). Os resultados indicaram diferença significativa de potência instalada nos biomas brasileiros ($p < 0.01$), sendo a Mata Atlântica com a maior densidade hidroenergética operacional. Também foi observado que o Cerrado e a Amazônia são as novas fronteiras expansionistas brasileiras ($p < 0.05$). Contudo, a Amazônia contemplará a construção de grandes barragens na qual elevarão este bioma à categoria de principal região hidroenergética no cenário futuro ($p < 0.01$). Por outro lado, no cenário futuro, as menores usinas se concentrarão na Mata Atlântica e Cerrado ($p < 0.01$), com ocupação mais intensa em bacias hidráulicas mais saturadas em comparação às de outras regiões ($p < 0.05$). Concluímos que ambos os cenários apresentam contribuições inéditas e relevantes à gestão hidroenergética e de conservação da natureza nos biomas brasileiros.

Palavras-chave: usinas hidrelétricas; biomas brasileiros; expansão de energia; *hotspots* da biodiversidade.

1. Introdução

O Brasil é um país de características continentais, formado por zonas hidroclimáticas e aspectos geográficos distintos, com grande importância para a manutenção da vida na terra [1,2]. Os seus 8515759 km² abrangem seis espaços geográficos de ambientes homogêneos: o bioma Amazônia (49.3% do território brasileiro); o Cerrado (23.9%); a Mata Atlântica (13.0%); a Caatinga (9.9%); o Pampa (2.1%); e o Pantanal (1.8%) [3,4]. Estes biomas têm importância significativa para o equilíbrio e qualidade dos recursos ecossistêmicos e da biodiversidade brasileira. Por exemplo, o Cerrado e a Mata Atlântica são considerados biomas prioritários para conservação mundial devido a riqueza em biodiversidade e às ameaças a estes recursos [5–9]. Além destes, a Amazônia, que abriga a maior floresta tropical úmida do mundo, têm aproximadamente ¼ de todas as espécies conhecidas de peixes de água doce do planeta [10–12]. Ainda, a Caatinga é um bioma exclusivo do Brasil e, por esta razão, também abriga uma quantidade expressiva de espécies endêmicas [6,13].

Por outro lado, nos países em desenvolvimento, como o Brasil, a exploração dos recursos naturais disponíveis cresce proporcionalmente ao aumento populacional e ao seu crescimento econômico e social, sendo a geração de energia hidráulica um ótimo indicador desta lógica [14,15]. Neste contexto, o aproveitamento hidrelétrico tornou-se a fonte hegemônica de geração de energia elétrica no Brasil [16–18], principalmente aliado à intensa busca por investimentos em energia de fontes renováveis, como a hidráulica [19,20]. Tal fato coloca o Brasil no patamar dos maiores produtores de energia de origem hídrica do mundo. Segundo dados da World Energy Council [21], o Brasil está classificado em 3^o lugar neste *ranking*, apenas atrás da China e Estados Unidos.

Atualmente o Brasil gera um total de 162936 MW de energia elétrica sustentado por 7290 empreendimentos em operação, incluindo-se as usinas hidrelétricas, eólicas, fotovoltaicas, termelétricas e term nucleares [16]. Deste total, 107762 MW (63.9%) são gerados por 1339 usinas hidrelétricas classificadas em três categorias, de acordo com sua potência instalada: a) Centrais Geradoras Hidrelétricas (CGH), que geram até 3 MW; b) as Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH), que geram entre 3 MW e 30 MW e com área de reservatório até 13 km² [22]; e as c) Usinas Hidrelétricas de Energia (UHE), que geram acima de 30 MW [22,23]. Contudo, é notável que esta classificação varie significativamente entre os países do globo. Na China, por exemplo, país com maior potência instalada de UHE e PCH do mundo, considera-se PCH as usinas com

potência maior que 50 MW [24]. Além de representar um sistema de classificação menos restritivo na China, tais potências representam um valor 60% superior em relação à classificação brasileira.

No ambiente físico-geográfico, as usinas hidrelétricas são formadas por barragens cujo objetivo é o de represar e potencializar a queda d'água e a sua respectiva vazão, para transformar energia hidráulica potencial (a montante) em energia cinética ou de movimento da água (a jusante) [10,23]. Porém, com a construção destas barragens, também ocorre a interrupção e alteração parcial do fluxo natural dos rios, causando seríssimos impactos ambientais, econômicos e sociais [14]. Tais impactos vêm sendo discutidos por diversos pesquisadores ao redor do mundo e registrados em quase toda a literatura da área, desde o surgimento das grandes barragens em meados da década de 20 [24–28] até as atuais megabarragens construídas na China e na Amazônia brasileira [19,29–31].

A formação dos reservatórios a montante da barragem, por exemplo, impacta desde a vida da população que vive nas margens e dos recursos do rio [31,32] até a biota e os processos naturais daqueles ecossistemas [12,29]. Esses impactos registrados ocorrem tanto a montante como a jusante das barragens, e durante as diferentes fases de implementação (planejamento, construção, enchimento e operação) [33–35]. Além disto, existem agravantes ambientais que afetam significativamente as bacias hidrográficas com potencial hidráulico de geração, como a instalação de mais de uma usina no mesmo trecho de rio [36]. Fatores como estes podem ser ambientalmente cumulativos e os impactos sinérgicos podem dificultar a avaliação de efeitos não previstos que tendem a se acentuar ao longo do ciclo de vida útil do reservatório [24,29,37].

Na escala territorial brasileira alguns autores têm revelado a distribuição das hidrelétricas em operação no país em relação as suas bacias hidrográficas [12,17,34], bem como sua distribuição sob os Estados da federação [38], relacionando-as às mudanças climáticas. Porém, até onde foi pesquisado, nenhum outro estudo analisa cenários desta distribuição que representem a dinâmica de expansão destas usinas em relação aos diferentes biomas brasileiros. Ademais, não há na literatura estudos que considerem variáveis destas usinas que podem influenciar no processo de distribuição e implantação da potência destes empreendimentos. Isto é, que busquem uma melhor compreensão sobre como e porquê destas usinas estarem associadas a ocupação dos biomas, através da avaliação de algumas características como porte das usinas e período de instalação das mesmas. Além disto, esta investigação considera as usinas de menor porte (PCH e CGH) para fins de análise, visto que há uma tendência global da expansão de pequenas barragens nos diversos biomas terrestres [15,39]. Aparentemente, nos casos das PCH, ocorrem em tese menores impactos socioeconômicos e ambientais. Entretanto, estes também têm sido percebidos tão prejudiciais quanto os empreendimento gerados por grandes barragens [24,40] porque tendem a ser instaladas em bacias hidrográficas menores ou associados a empreendimentos maiores.

Nesta perspectiva, a principal hipótese da presente pesquisa é que a dinâmica de expansão das usinas hidrelétricas brasileiras, distribuídas nos seus diferentes biomas, apresenta-se de acordo com a concentração populacional e o desenvolvimento econômico das cidades de abrangência destes biomas. Estas características tornam atrativos certos tipos de empreendimentos em detrimento de outros em cada bioma. Na Amazônia, por exemplo, há razões logísticas relevantes em relação à definição do empreendimento hidroenergético e ao seu interesse econômico-ambiental envolvido. As distâncias entre os centros de consumo urbano em regiões mais desenvolvidas (sudeste) e a localização dos sítios hidroenergéticos, em áreas pouco acessíveis logisticamente (Amazônia), são fatores que tendem a inviabilizar projetos que apresentem baixa razão de retorno energético-econômico. Por outro lado, a proximidade com estes centros (Mata Atlântica) possibilita investimentos em empreendimentos de menor geração, porém com potencialmente melhor taxa de retorno energético-econômica [18].

Com base nas hipóteses levantadas, a presente pesquisa tem como objetivo geral elaborar uma análise simplificada e objetiva sobre a distribuição e a tendência da expansão geográfica das usinas hidrelétricas de todos os portes do Brasil. Esta análise foi realizada considerando os diferentes biomas brasileiros, com base em dois critérios: a) as usinas em operação (cenário atual); e b) as planejadas (cenário futuro). Como objetivos específicos, buscamos: a) descrever e testar o comportamento e a tendência geográfico-temporal da distribuição das usinas nos diferentes biomas brasileiros; b) compreender como, onde e quando está ocorrendo a expansão e as regiões de intensidade de sua implementação (adensamento energético por categoria de geração); e c) disponibilizar informações sobre quais são os fatores ou variáveis facilmente mensuráveis que mais influenciam tais tendências de expansão por bioma.

2. Material e Métodos

2.1 Obtenção dos dados das usinas hidrelétricas (unidades amostrais)

Os dados das usinas hidrelétricas brasileiras em operação e planejadas foram obtidos em Julho de 2018 do Sistema de Informações Geográficas do Setor Elétrico – SIGEL¹ da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL do Brasil [41]. Foram realizados *downloads* de 3 arquivos contendo os dados das usinas hidrelétricas de cada porte em diferentes estágios, com o respectivo quantitativo: 1) 498 unidades de UHE; 2) 2082 unidades de PCH; 3) e 655 unidades de CGH. Foram excluídas destes arquivos 697 usinas que se apresentavam em estágios com nomenclatura desconhecida ou extinta, revogada e desativada. Deste modo, o número de unidades resultantes para o delineamento amostral do presente estudo foi o seguinte: 466 UHE, 1417 PCH e 655 CGH, totalizando 2538 usinas válidas para o tratamento estatístico a ser detalhado mais adiante.

2.2 Uso de SIG para obtenção das variáveis geoestatísticas

Os polígonos dos biomas, dos Estados e regiões brasileiras, foram obtidos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE [42] e inseridos juntamente com os pontos referenciais das usinas (eixos das barragens) no *software* QGIS, versão 2.18.14 [43], onde também foram gerados todas as figuras apresentadas no tópico de resultados. As camadas temáticas foram sobrepostas utilizando-se como referência os referidos eixos das barragens e os polígonos para adicionar 3 novos atributos às usinas hidrelétricas: localização em relação ao bioma, Estado e Região do país.

De posse dos dados das bases citadas, foram definidas as seguintes variáveis concernentes às usinas hidrelétricas brasileiras: (1) fator porte (UHE, PCH ou CGH), (2) variável dependente potência instalada (MW), (3) variável independente área do reservatório (km²), (4) fator estágio de implementação (operação ou planejamento), (5) fator rio e (6) variável independente tempo de início de operação (anos), as quais foram obtidas diretamente dos arquivos do SIGEL [41]. Informações complementares, tais como (7) fator Estado, (8) fator Região e (9) fator bioma brasileiro foram adquiridos como descrito no parágrafo anterior. É importante citar que nos arquivos obtidos do SIGEL não constam nem estão disponíveis os dados sobre as CGH planejadas e das respectivas áreas de reservatórios das CGH em operação (se houverem). Enfatizamos também que 60 UHE, 112 PCH e 222 CGH não apresentam data de início de operação, e 32 UHE e 128 PCH não apresentam dados da área do reservatório. Para estes casos, estas unidades amostrais também foram desconsideradas nas análises.

2.3 Delineamento amostral e análises estatísticas

As unidades amostrais foram organizadas de diferentes formas para os diferentes testes utilizados. Após organização da tabela geral foi realizada inicialmente uma estatística descritiva com auxílio do *software* R, com a interface RStudio versão 1.1.383 [44], a qual gerou uma série de valores descritivos referentes à soma (Σ), média (μ) e desvio padrão (sd) das variáveis numéricas utilizadas. Para as variáveis categóricas realizamos análise de frequência.

Para as análises inferenciais e testes de hipóteses realizamos diversos testes para avaliar as premissas de normalidade (Shapiro-Wilk), variância (Levene) e distribuição de frequência das variáveis numéricas. Estas premissas serviram como parâmetro para o uso dos testes de hipóteses para avaliar a pertinência ou escolha dos métodos multivariados específicos (item 2.4) ao nível de significância de $\alpha > 0.05$. Posteriormente, para as distribuições não normais, aplicamos o teste de Friedman para testar as hipóteses cujas variáveis eram numéricas com base em fatores (classificadas por variáveis categóricas). O objetivo foi de testar diferenças significativas entre a potência instalada/fator em função de variáveis numéricas, tais como área do reservatório e ano de início de operação, com foco no fator bioma brasileiro. O mesmo procedimento foi utilizado para avaliar estas diferenças entre as categóricas de estágio (operacional e planejamento) e porte do empreendimento (UHE, PCH e CGH).

¹ O SIGEL é um portal de geoprocessamento da ANEEL na qual disponibiliza dados geoespaciais do setor elétrico brasileiro, tanto para visualização na própria plataforma como para download de dados em formato *shapefile* e *kmz* [41].

2.4 Proposições de modelos estatísticos utilizando ANCOVA (Análise de Covariância) – Interações entre um ou mais fatores e uma variável contínua

Utilizamos uma análise de covariância (ANCOVA), complementar, para testar a relação entre as variáveis estudadas (descritas no item 2.2), adotando a potência instalada das usinas hidrelétricas como a variável resposta ou dependente (Y_i), e as demais variáveis como preditoras ou independentes (X_i). A ANCOVA combina elementos de regressões e análise de variância onde a variável resposta é contínua (potência) ou quando há pelo menos uma variável explicativa contínua (no presente caso o tempo de instalação e a área do reservatório) e pelo menos uma variável explicativa categórica (no presente caso, dispõe-se de várias, tais como: bioma, região, estágio, porte, Estado) [45]. A utilização do método consiste em 3 etapas fundamentais: a) ajustar duas ou mais regressões lineares Y_i contra X_i (uma para cada nível de fator); b) estimar os diferentes coeficientes e intercepções para cada nível; e c) utilizar a simplificação do modelo (testes de exclusão) para eliminar parâmetros desnecessários. Todos os testes foram realizados no *software* R, com a interface RStudio versão 1.1.383 [44–46].

3. Resultados

Os resultados estão apresentados relacionando as diferentes análises utilizadas (estatística descritiva, teste Friedman e ANCOVA) para cada variável testada. Ao final desta seção foi incluída a Tabela 5 com a síntese dos resultados da ANCOVA, como proposto na metodologia. Para facilitar a identificação do modelo citado da ANCOVA, criou-se uma coluna de indexação na Tabela 5, que foi denominada com o termo MX no decorrer do texto, onde X é o número da linha citada.

3.1. Cenário atual (operacional)

Atualmente existem 1310 usinas hidrelétricas em operação no Brasil. Os Estados que apresentam o maior número de usinas são Minas Gerais, Santa Catarina e Mato Grosso, indicado na Figura 1(a). Consequentemente, as regiões Sudeste e Sul abrangem o maior número de usinas, 465 e 479 respectivamente. Porém, quando analisadas a potência instalada por Estado, conforme a escala de graduação de cores indicada na Figura 1, a região Norte é onde atualmente são gerados aproximadamente 29% da energia hidráulica total do país (M31 da Tabela 5, $p < 0.01$). Esta frequência é seguida pela região Sudeste, com 26% e a região Sul, com 23% do total. Apesar de uma relativamente baixa frequência de usinas na região Norte, o Estado do Pará, com 9 usinas em operação, contribui com uma geração elevada de 19860 MW (M30 da Tabela 5, $p < 0.01$) na região.

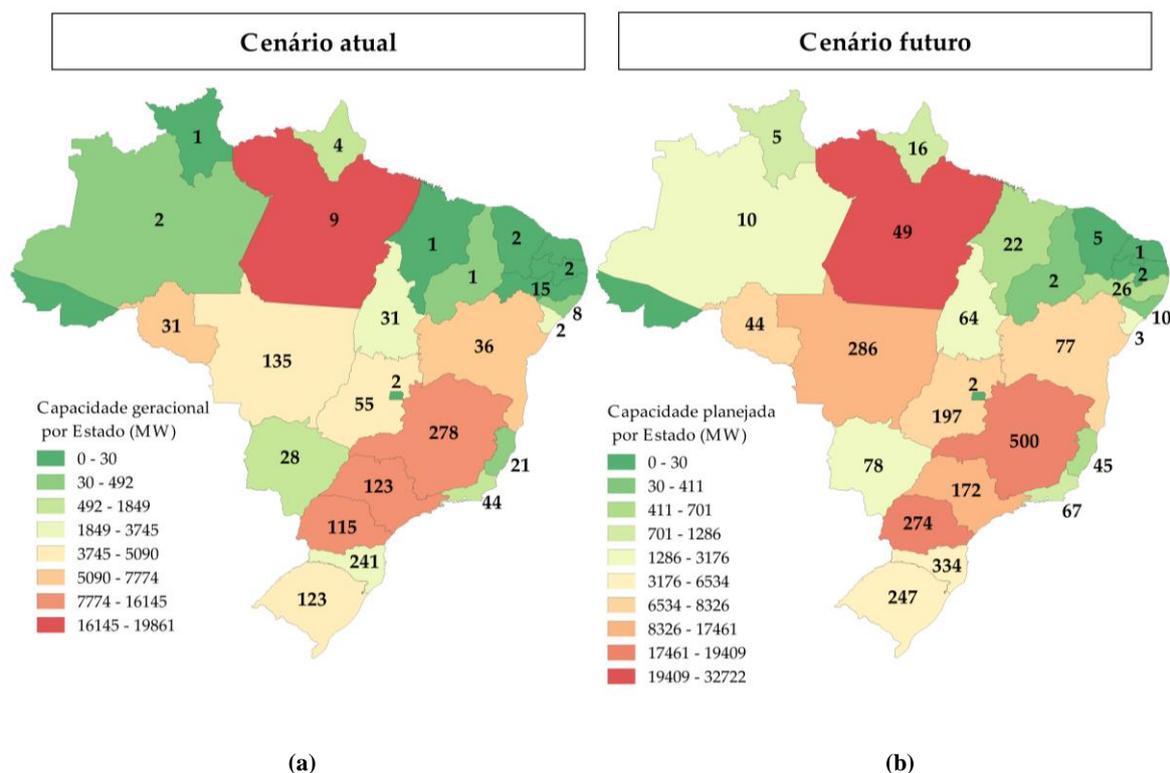


Fig. 1. Mapas graduados da geração de energia (MW) por usina hidrelétrica nos Estados brasileiros. No cenário atual (a) é apresentada a capacidade instalada das usinas em operação e no cenário futuro (b) a capacidade instalada planejada, acrescentadas às usinas atuais. Os números nos mapas indicam distribuições de frequência de usinas por Estado.

Quanto ao porte destas usinas, se observada a distribuição geográfica apresentada na Figura 2, o número de pequenas e médias usinas é significativamente superior em relação ao das grandes barragens no Brasil. Na presente investigação, as 466 UHE estão classificadas 221 delas em operação e 245 em estágios de planejamento. Por outro lado, as PCH somam um total de 1417 usinas, sendo 434 em operação e 983 em estágios de planejamento. E as CGH, que geram até 3 MW, somam 655 em operação distribuídas no território. Sendo assim, enquanto as UHE contribuem com 94.7% da geração de energia do país, as PCH em operação geram apenas 4.7% deste total e as CGH geram 0.5% da produção de energia hidrelétrica do país. Além disso, existem 25 PCH e 25 CGH com potências no limite máximo estipulado pela legislação brasileira, cujos enquadramentos poderiam, hipoteticamente, ser classificadas nas de maiores portes.

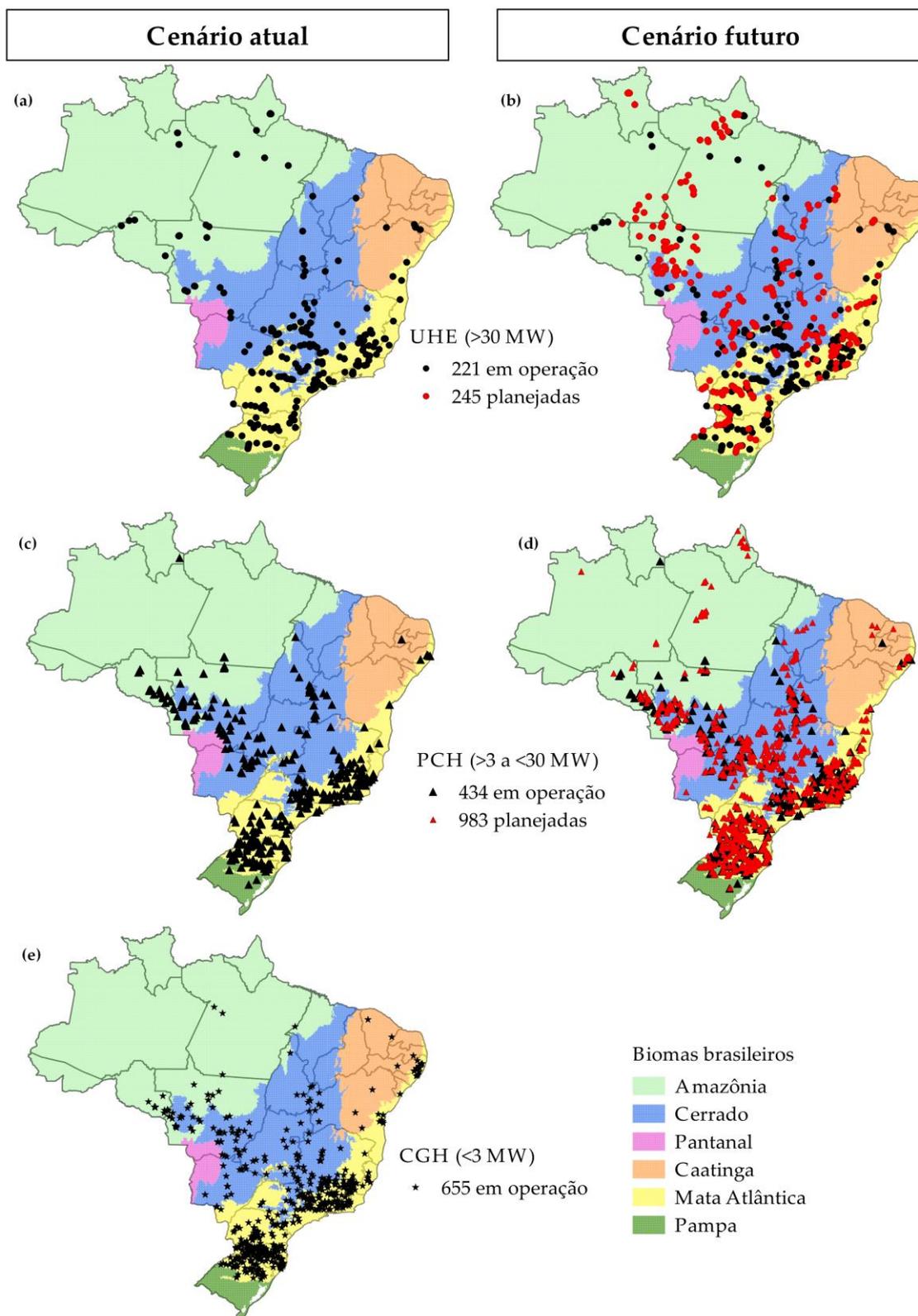


Fig. 2. Mapa dos cenários atual e futuro e localização das usinas hidrelétricas geograficamente distribuídas nos biomas brasileiros em operação (preto) e planejadas (vermelho): (a) UHE em operação, (b) UHE em operação somadas às planejadas, (c) PCH em operação, (d) PCH em operação somadas às planejadas, (e) CGH em operação.

Quanto a localização das UHE em operação em relação aos biomas brasileiros, o teste de Friedman indicou uma significativa diferença entre eles ($p < 0.006$). Isto porque as UHE estão concentradas 65.1% no bioma Mata Atlântica, gerando 44.5% da energia proveniente das UHE. Este fato faz com que este bioma seja o maior gerador hidroenergético para esta categoria de potência instalada (Tabela 1). Por outro lado, as usinas hidrelétricas localizadas na Amazônia apresentam maior potência instalada por unidade geradora. Neste bioma estão presentes apenas 9.9% das UHE, mas estas geram aproximadamente 31% da energia do país proveniente deste porte de empreendimento. Ou seja, a maior média de geração por usina é gerada na Amazônia, enquanto a Mata Atlântica apresenta uma média 4 vezes menor de geração por usina (Tabela 1). Este fato ocorre devido as chamadas megabarragens localizadas na Amazônia, na qual 4 delas estão entre as 5 maiores do país, são elas: Belo Monte (11233 MW), Tucuruí (8535 MW), Jirau (3750 MW) e Santo Antonio (3568 MW).

Tabela 1

Estatística descritiva de frequência (N); potência instalada (MW); área dos reservatórios (km^2); e tempo de operação (ano) das Usinas Hidrelétricas de Energia (UHE) em operação e em planejamento do Brasil, por bioma (Amazônia – AM; Caatinga-CA; Cerrado – CE; Mata Atlântica - MA, Pampa - PP e Pantanal - PT).

Bioma	N UHE		Potência Instalada (MW)				Área do Reservatório (km^2)				Tempo de Operação (ano)
	Oper.	Plan.	Operacional		Planejada		Operacional		Planejada		
			(Atual)		(Futuro)		(Atual)		(Futuro)		
			Σ	$\mu \pm sd$	Σ	$\mu \pm sd$	Σ	$\mu \pm sd$	Σ	$\mu \pm sd$	
AM	21	59	31714	1510±3018	27836	417±690	9828.94	468.04±1118.40	14586.73	247.23±358.01	16.2±14.4
CA	9	5	9991	1110±1077	779	155±130	5506.58	611.84±1438.31	431.59	86.32±37.82	41.8±10.6
CE	47	94	14892	316 ±395	7706	81±82	10483.24	223.05 ±348.12	7917.28	84.23±141.41	25.5±17.1
MA	144	86	45367	315 ±748	6869	79±101	14345.99	99.62 ±313.31	4455.31	51.81±208.03	28.6±18.6
PP	0	1	0	0	1	1	0	0	642.04	642.04	0
PT	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	221	245	101965	-	43192	-	40164.75	-	28032.95	-	-

De modo similar à Amazônia, no bioma Caatinga existem apenas 9 UHE gerando um total significativo de energia (Tabela 1). O teste da ANCOVA apresentou significância para Caatinga ao relacionarmos a potência instalada das usinas em operação com os biomas brasileiros (M32 da Tabela 5, $p < 0.01$). É importante citar que 8 das 9 UHE instaladas na Caatinga estão localizadas no rio São Francisco, região Nordeste.

Assim como a Mata Atlântica, o Cerrado também apresenta relativamente baixa média de geração por UHE. Os resultados da ANCOVA sugeriram que a influência do Cerrado e Mata Atlântica na potência da usina hidrelétrica é significativa e negativa para este porte de geração (M5 da Tabela 5, $p < 0.01$). Isto é, o fato de a UHE estar localizada nestes dois biomas sugere ou indica menor capacidade geradora em relação aos demais biomas.

As UHE do Cerrado apresentam menor efetividade de geração em relação aos demais biomas (menores números de grandes barragens com menor capacidade de geração por usina). Observa-se este fato também no tamanho dos reservatórios das UHE no Cerrado, as quais apresentam uma área média alagada de 223.05 km^2 , enquanto na Mata Atlântica, que apresenta a maior área total alagada por UHE, a média de apenas 99.62 km^2 de reservatório por usina (Tabela 1). Conclui-se então que no Cerrado as maiores barragens geram menos energia por unidade geradora em relação aos demais biomas e/ou com formação de maiores reservatórios. Confirma-se então esta diferença significativa entre os tamanhos dos reservatórios por bioma com o teste de Friedman, com resultado de $p < 0.002$.

Observa-se, nas Tabelas 2 e 3, que 60.8% das PCH e 71.3% das CHG em operação também se localizam na Mata Atlântica (teste de Friedman de comparação das potências instaladas de todas as usinas por bioma com

$p < 0.002$). Isso mostra que nas regiões Nordeste, onde predomina a Caatinga, e Sul, com a predominância do Pampa, as usinas hidrelétricas em operação estão majoritariamente instaladas na porção de Mata Atlântica (Figura 2). Além disso, existem outras 265 pequenas e médias usinas hidrelétricas instaladas no Cerrado, segundo bioma com maior capacidade nesta tipologia de geração.

Tabela 2

Estatística descritiva de frequência (N); potência instalada (MW); área dos reservatórios (km²); e tempo de operação (ano) das Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH) em operação e em planejamento do Brasil, por bioma (Amazônia – AM; Caatinga- CA; Cerrado – CE; Mata Atlântica - MA, Pampa - PP e Pantanal - PT).

Bioma	N PCH		Potência Instalada (MW)				Área do Reservatório (km ²)				Tempo de Operação (ano)
	Oper.	Plan.	Operacional		Planejada		Operacional		Planejada		
			(Atual)		(Futuro)		(Atual)		(Futuro)		
			Σ	μ ± sd	Σ	μ ± sd	Σ	μ ± sd	Σ	μ ± sd	
AM	47	74	618	13±10	712	9±7	116.16	2.47±3.32	353.47	4.78±6.06	11.1±6
CA	1	4	3	3	20	5±2	97.94	97.94	786.2	196.55±108.88	NA
CE	119	373	1789	15±10	3768	10±7	876.49	7.37±45.35	1507.83	4.04±7.35	11.5±9.7
MA	264	516	2710	10±8	4340	8±8	7388.89	4.13*±36.05	934.67	1.81±4.32	10.4±8
PP	3	16	24	8±8	116	7±4	0.86	0.29±0.47	146.64	9.16±11.43	6.6±2.8
PT	0	0	0	-	0	-	0	0	0	0	0
Total	434	983	5146	-	8958	-	8480.34	-	3728.81	-	-

*Excluído o outlier de 6303 km² da PCH Chave de Vaz

Tabela 3

Estatística descritiva de frequência (N); potência instalada (MW); e tempo de operação (ano) das Centrais Geradas Hidrelétricas (CGH) em operação do Brasil, por bioma (Amazônia – AM; Caatinga- CA; Cerrado – CE; Mata Atlântica - MA, Pampa - PP e Pantanal - PT).

BIOMA	N CGH	Potência Instalada (MW)		Tempo de operação (anos)
		Σ	μ ± sd	μ ± sd
AM	32	29	0.9±0.8	15.6±10.9
CA	8	5	0.7±0.3	6.2±0.5
CE	146	133	0.9±0.8	19.7±15.4
MA	467	443	0.9±0.7	17.2±16.5
PP	1	0,7	0,7	NA
PT	1	0,8	0,8	35
Total	655	613	-	-

Os reservatórios formados por PCH no Brasil correspondem a 17.4% da área total de reservatórios de hidrelétricas quando também somados às UHE, considerando que não há dados disponíveis sobre os reservatórios das CGH (Tabela 2). O maior reservatório observado de PCH foi gerado com a construção da Chave do Vaz (1 MW de potência e 6303 km² de reservatório), localizada na Mata Atlântica, no Estado do Rio de Janeiro. A Tabela

2 mostra que a Mata Atlântica apresenta 87.1% dos reservatórios das PCH de todo o país. Porém, se excluído o valor extremo (*outlier*) correspondente ao reservatório da PCH Chave do Vaz, a área média do reservatório da Mata Atlântica se reduz, com apenas 4.13 km² em média e o Cerrado passa então a ser o bioma com maior área média de reservatório da categoria PCH em operação, na condição de desconsiderarmos a área do reservatório da única PCH em operação na Caatinga, que é de 97.94 km².

O bioma Mata Atlântica apresenta o maior tempo de operação das usinas. A primeira registrada historicamente foi a UHE Rasgão, no Estado de São Paulo, com o início da operação em 06 de setembro de 1925. A partir desta data as usinas foram se expandindo geograficamente em direção ao Cerrado, a partir de 1957. E em direção à Caatinga a partir de 1961. Na Caatinga, especificamente, estão instaladas UHE antigas, com início de operação nas décadas de 60 e 70. A última instalada naquele bioma foi a UHE Xingó, que começou a operar em 1994.

As médias de idade das usinas hidrelétricas em operação são mostradas nas Tabelas 1, 2 e 3. Os resultados mostram que as usinas hidrelétricas em operação seguiram um determinado padrão geográfico de distribuição, segundo o porte e o bioma onde se instalaram. Por exemplo, as UHE têm as maiores médias de idade de operação, com aproximadamente 41 anos na Caatinga e 28 anos na Mata Atlântica, indicando picos de instalação/operação nestes períodos. Como esperado, o bioma Amazônia historicamente apresenta usinas recentemente instaladas com a menor média de idade das UHE, com 16 anos de operação no bioma. Por outro lado, as PCH e CGH apresentam uma homogeneidade de tempo de operação na Amazônia, Mata Atlântica e no Cerrado, as quais iniciaram sua operação em maior quantidade, com média de 11 e 17,5 anos, respectivamente. No Pampa as 3 PCH do bioma entraram em operação há 6 anos em média. As CGH apresentaram um “boom” de construção no Cerrado há 19 anos e, mais recentemente, na Caatinga.

A ANCOVA, para usinas em operação, demonstrou que as potências instaladas das UHE e PCH, surpreendentemente, não são significativamente correlacionadas com as áreas dos reservatórios (como pode-se observar nas regressões M2, M14 e M29). Por fim, propomos um modelo simplificado que explica 92% da potência instalada das usinas em operação no Brasil (M37 da Tabela 5), na qual relaciona esta variável ao porte, Estado, ano de operação e área do reservatório. Este resultado indica que estas variáveis, quando interagindo entre si, apresentam significância estatística, cuja explicabilidade é relevante para entender o padrão da potência instalada por tipologia de usina hidrelétrica no Brasil.

3.2. Cenário Futuro (planejado)

Existem atualmente 1228 usinas hidrelétricas planejadas no Brasil, segundo a ANEEL, dentre as quais 245 UHE e 983 PCH. Se todas estas forem instaladas serão acrescidas 52151 MW à atual geração brasileira (Figura 2, Tabelas 1, 2, e 4). Como mostrado na Tabela 4, estas usinas estão classificadas em nove estágios de planejamento, os quais indicam a fase específica do processo de implantação da usina.

Tabela 4

Fases específicas de implementação das UHE e PCH planejadas no Brasil. A sigla EVTE significa Estudo de Viabilidade Técnica-Econômica e Ambiental e PB o Projeto Básico. O sentido da seta indica o fluxo para implementação do empreendimento.

Etapa	Fase de implementação	UHE	PCH
Etapa de inventário	Eixo inventariado	150	653
	EVTE em elaboração	27	-
Etapa de viabilidade	EVTE aceito	13	111
	EVTE aprovado	9	-
Etapa de Projeto Básico	PB em elaboração	2	54
	PB aceito	23	-
	PB aprovado	4	13
Implementação	Construção não iniciada	6	26
	Construção com outorga	11	126
Total de usinas planejadas		245	983

As UHE planejadas, em termos quantitativos, se concentram em sua maioria na região Centro-Oeste, com 45 delas no estado de Mato Grosso e 24 em Goiás, e nas regiões Sudeste e Sul com 46 em Minas Gerais e 27 no Paraná (Figura 1). Porém, quando analisadas as potências planejadas, a região Norte gerará 43.1% desta nova energia expandida (M42 da Tabela 5, $p < 0.01$) com 46 UHE planejadas. Os Estados que se destacam na geração/usinas planejadas no Norte são o Pará, com a instalação de mais 20 UHE, as quais acrescentarão 12648 MW à geração do país; o Amazonas, com 5 novas UHE, as quais gerarão mais 2156 MW; e Rondônia, com 13 novas usinas que irão gerar mais 551 MW (M7 e M41 da Tabela 5, $p < 0.01$) (Figura 1).

Como consequência deste incremento, a região Norte continuará responsável pela geração da maior fração energética do país, com 21.9% da geração total por hidrelétricas, se considerarmos as usinas atuais e as futuras conjuntamente. Logo em seguida a região Sudeste deverá produzir mais 22.1% da energia hidrelétrica. E o Sul 19.9%. Neste novo cenário, a região Centro-Oeste passa a gerar adicionalmente aproximadamente 17.8% da energia de hidrelétrica brasileira.

Assim como as UHE, as novas PCH em termos de distribuição geográfica estarão localizadas principalmente nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste, com 329, 262 e 261 novos empreendimentos, respectivamente. Conjuntamente, as três regiões deverão gerar 86.5% da energia das PCH planejadas no Brasil. Por estes motivos os resultados da ANCOVA apresentaram significância entre a potência de todas as usinas planejadas do país correlacionadas com os níveis das variáveis categóricas regiões Sul e Sudeste. Porém, os coeficientes resultaram em valores negativos (M42 da Tabela 5, $p < 0.01$). Estes resultados sugerem que, nestas regiões, as potências das futuras usinas tendem a ser significativamente menores ou de menor porte, porém haverá um maior adensamento das mesmas nestes respectivos biomas.

Como consequência desta expansão nas regiões e Estados brasileiros, a distribuição da geração hidráulica brasileira, em relação aos biomas do país, apresentará um significativo incremento quando comparadas à matriz geradora operacional atual. Na Amazônia, por exemplo, o Estado do Amapá passará das atuais 4 usinas para futuramente 14 usinas, sugerindo um incremento de aproximadamente 400%. No Estado do Pará, já bastante explorado pelo setor, passará de 9 para 49 usinas, representando um acréscimo de quase 544%. Citando ainda o Estado do Maranhão, na qual este incremento será de 1 usina para 21, correspondendo ao acréscimo de aproximadamente 2200%. Estes resultados indicam que estes empreendimentos podem ser responsáveis por impactos ambientais significativos na Amazônia e em áreas de transição com o bioma Caatinga.

Como mais um agravante, dentre as novas UHE na Amazônia, seis estarão localizadas no rio Juruena, localizado no Estado do Mato Grosso e afluente do rio Tapajós. Estas novas usinas em sequência nesta bacia acrescentarão 7368 MW à produção brasileira. Além disso, duas serão instaladas no rio Tapajós, que acrescentarão 5066 MW à matriz energética brasileira. Com a instalação destas novas usinas, serão nove UHE em operação somente no rio Juruena. Na Amazônia existem 17 rios com mais de 2 UHE em operação ou planejadas, sendo 10 destes com novas usinas. Isto revela uma significativa tendência da expansão das usinas no referido bioma, especificamente, de forma cumulativa nos rios.

Em nível nacional, de acordo com a Figura 3, podemos observar a mudança em capacidade geradora dos biomas brasileiros nos cenários atual, em que a Mata Atlântica é responsável pela maior geração, para o cenário futuro, a qual a Amazônia apresenta-se como nova fronteira da expansão das usinas hidrelétrica. E embora a expansão das usinas continue ocorrendo, em termos quantitativos, na Mata Atlântica, na qual no futuro terão 1477 usinas em operação, este bioma passará ao segundo posicionado no *ranking* com a maior potência de usinas hidrelétricas do país. Em contrapartida, a Amazônia, com apenas 133 novas usinas, apresentará um aumento de 28549 MW, totalizando 60911 MW gerados por apenas 233 usinas totais no cenário futuro. Este cenário mostra uma tendência de continuação de construção de megabarragens na Amazônia.

Por conta disto os maiores reservatórios também deverão ser gerados em função das novas megabarragens da Amazônia, refletindo em maiores médias de áreas alagadas em relação aos demais biomas, independentemente do período de construção decorrido, como observamos na Tabela 1. Em termos de área alagada, em média, esta diferença será de quase 5 vezes maior do que a média de reservatórios gerados na Mata Atlântica. Isto pode ser observado na escala de graduação do tamanho dos reservatórios destes biomas no cenário futuro (Figura 3).

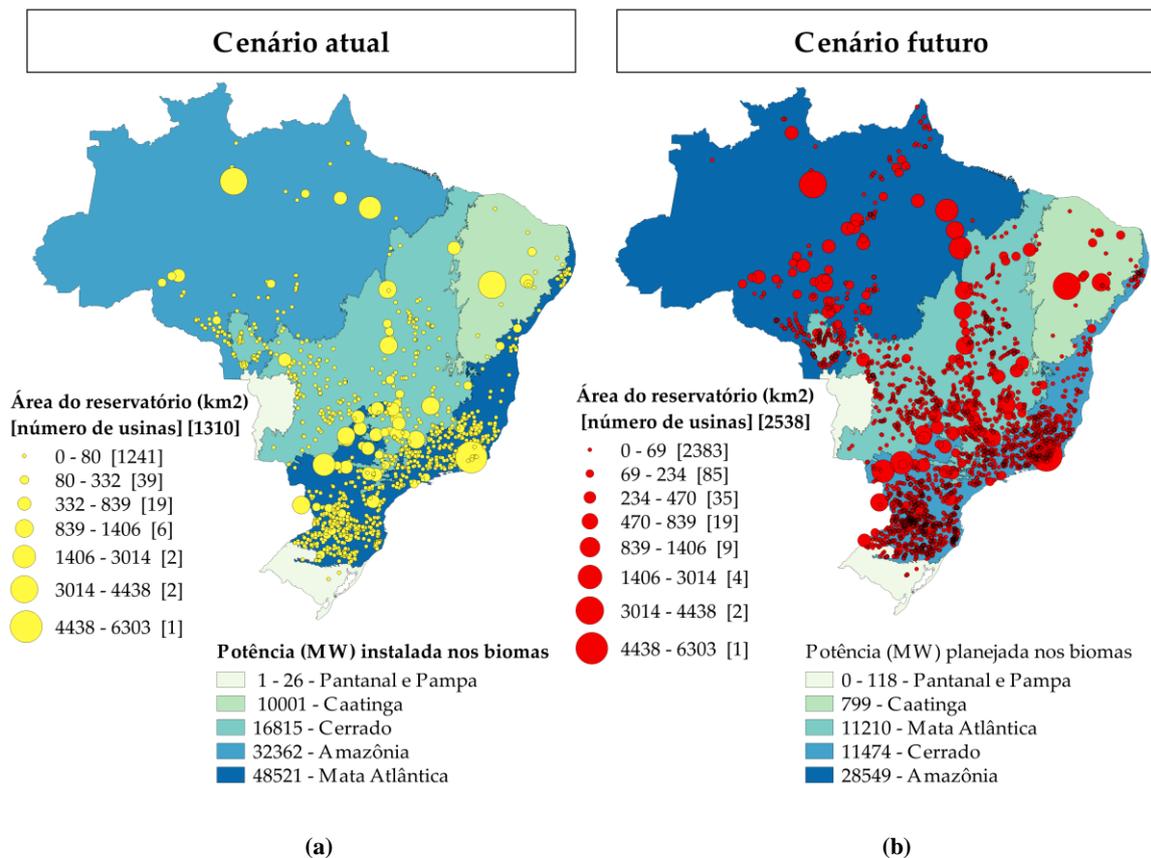


Fig. 3. Mapas em escala graduada da potência (MW) de hidrelétricas nos biomas brasileiros: (a) cenário atual (operação), e (b) cenário futuro (operação mais as planejadas). Os círculos coloridos representam proporcionalmente as áreas dos reservatórios das usinas. Os números entre colchetes indicam o número de usinas para cada faixa categórica de área do reservatório.

Quanto à expansão das usinas de menor porte por bioma, foi identificado um aumento significativo do número (Tabela 2). No Cerrado este aumento foi de aproximadamente 400%. Na Mata Atlântica a tendência do número de PCH quase triplicou. E na Amazônia esta tendência atingirá pouco mais de 200%. O aumento de números de usinas no Cerrado será significativo, sendo o segundo bioma com maior incremento em potência de novas PCH. O fato evidencia a tendência da expansão de hidrelétricas neste bioma, assim como na Amazônia (Tabelas 1 e 2).

Como observado na Figura 3 e nas Tabelas 1 e 2 para o cenário futuro, evidencia-se que os reservatórios das usinas em operação e as planejadas sofrerão acréscimos e variações quantitativas e significativas. Na Amazônia terá a formação de 14940.20 km² de área alagada de novas usinas, seguidos pelos 9425.11 km² do Cerrado. Contudo, no cenário futuro, a Mata Atlântica terá a maior área alagada do país, com 27124.86 km² e uma média de 29.68 km² por usina. E isto se dá devido ao número de usinas atualmente em operação no bioma.

Nos resultados da ANCOVA as potências das usinas planejadas, assim como a análise para as usinas em operação, não apresentaram correlação com a área dos reservatórios (M40 da Tabela 5, $p=0.90$). Porém, quando associado às demais variáveis houve influência em relação à variável dependente. Por exemplo, quando associamos a área do reservatório à Unidade Federativa (UF) e ao Bioma, os resultados mostraram correlações negativas (M46 e M47 da Tabela 5, $p<0.01$). Com isso, hipotetiza-se que os tamanhos dos reservatórios formados pelas usinas hidrelétricas não são geograficamente homogêneos e não são proporcionais ao porte da usina, como observamos nos casos da PCH Chave do Vaz ou nas UHE instaladas na Mata Atlântica. Por fim, o modelo proposto que melhor explica a potência das novas usinas, com 45.3% de explicabilidade, é quando há interação entre as variáveis categóricas Estado (UF) e a área alagada do reservatório e o porte da usina (M48 da Tabela 5, $p<0.01$).

Tabela 5

Modelos descritivos para potência instalada ou planejada Y_i (KW) em função das variáveis independentes utilizadas na presente pesquisa.

Potência (KW) Y_i	Indexação	Variáveis Independentes (X_j)	Coeficientes				R^2_{adj}	p-value	Interpretação
			(X_{j1})	(X_{j2})	(X_{j3})	(X_{j4})			
Regressão Simples									
Y_{UHE}	(M1)	ANOOP (ano)					-0.0052	0.68	Não significativa
	(M2)	AREA (km ²)					-0.0022	0.85	Não significativa
	(M3)	UF (Unidade da Federação)	2762000				0.1029	< 0.01	Significante [SE]
	(M4)	REGIÃO	581650				0.0444	<0.01	Significante [Norte]
	(M5)	BIOMA (Fator)	-584116	-517268			0.0563	< 0.01	Significante [CE e MA]
	(M6)	ESTÁGIO (Fator)	-285086				0.0244	< 0.01	Significante [PLANEJADA]
Regressão Múltipla									
Y_{UHE}	(M7)	EESTÁGIO*UF	-5450358				0.3881	< 0.01	Significante [PA * PLANEJADA]
	(M8)	ANOOP*UF					0.5318	< 0.01	Significante
	(M9)	ANOOP*UF*AREKM	8.8e+01	7.3e+02	4.6e+2		0.8979	< 0.01	Significante [MG, MT e PR]
	(M10)	ANOOP*UF*AREKM*REGIÃO	8.8e+01	7.3e+02	4.6e+2		0.8979	< 0.01	Significante [MG, MT e PR]
	(M11)	ANOOP*UF*AREKM*BIOMA	-9.4e+05				0.9084	< 0.01	Significante [PR]
Regressão Simples									
Y_{PCH}	(M12)	ANOOP (Ano)					0.0129	0.02	Não significativa
	(M13)	UF (Unidade da Federação)	25875				0.0410	< 0.01	Significante [DF]
	(M14)	AREA (km ²)					-0.1000	0.32	Não significativa
	(M15)	BIOMA (Fator)	-1959				0.01497	< 0.01	Significante [MA]
	(M16)	ESTÁGIO (Fator)	-2745				0.0202	< 0.01	Significante [PLANEJADA]
	(M17)	POTEFE (Potência/Área)					0.2320	0.03	Não significativa
	Regressão Múltipla								
Y_{PCH}	(M18)	BIOMA*ESTÁGIO					0.0408	< 0.01	Significante
	(M19)	ANOOP*UF*AREKM					0.2725	<0.01	Significante
	(M20)	ANOOP*UF*AREKM*BIOMA					0.2788	<0.01	Significante
	(M21)	BIOMA*ESTÁGIO+POTEFE					0.3344	< 0.01	Significante
Regressão Simples									
Y_{CGH}	(M22)	ANOOP (Ano)					0.0502	<0.01	Significante
	(M23)	UF (Unidade da Federação)					0.0297	<0.01	Significante [MT, PR, RO, SC, SP e TO]

	(M24)	REGIÃO	451.88			0.0153	<0.01	Significante [Norte]	
	(M25)	BIOMA (Fator)				-0.0061	0.96	Não significante	
	Regressão Múltipla								
Y_{CGH}	(M26)	UF*BIOMA*ANOOP				0.1298	<0.01	Significante	
	(M27)	BIOMA*ANOOP*REGIÃO				0.1078	<0.01	Significante	
	Regressão Simples								
Y_{OPERACIONAL}	(M28)	ANOOP (Ano)				0.0083	<0.01	Significante	
	(M29)	AREA (km ²)				-0.0014	0.67	Não significante	
	(M30)	UF (Unidade da Federação)	1530870	2156322		0.1256	<0.01	Significante [SE, PA]	
	(M31)	REGIÃO	350481			0.0239	<0.01	Significante [Norte]	
	(M32)	BIOMA (Fator)	231972	-269727	-268169	0.0272	< 0.01	Significante [CA, CE e MA]	
	(M33)	PORTE	460446			0.1085	<0.01	Significante [UHE]	
	Regressão Múltipla								
Y_{OPERACIONAL}	(M34)	PORTE*BIOMA	-1.19e+06	-1.19e+06		0.1902	<0.01	Significante [UHE*CE e UHE*MA]	
	(M35)	PORTE*UF	1500958.5	2761913.3	6199213.3	0.4881	<0.01	Significante [UHE*RO, UHE*SE, UHE*PA]	
	(M36)	PORTE*UF*ANOOP	2.317e+05			0.6422	<0.01	Significante [ANOOP*PA, UHE*ANOOP*RO]	
	(M37)	PORTE*UF*ANOOP*AREKM				0.9240	<0.01	Significante	
	(M38)	PORTE*UF*ANOOP*BIOMA				0.6445	<0.01	Significante	
	(M39)	PORTE*UF*ANOOP*AREKM*BIOMA	3.900e+05	1.318e+07		0.9384	< 0.01	Significante [ANOOP*CA, GO*CE]	
	Regressão Simples								
Y_{PLANEJADA}	(M40)	AREA (km ²)				-0.0008	0.90	Não significante	
	(M41)	UF (Unidade da Federação)	317423	269633	258200	0.0952	<0.01	Significante [PA, AM e RO]	
	(M42)	REGIÃO	124812	-28745	-31946	0.0532	<0.01	Significante [Norte, Sudeste e Sul]	
	(M43)	BIOMA (Fator)	-125811	-190085	-196034	-207708	0.1047	<0.01	Significante [CA, CE, MA e PP]
	(M43)	PORTE	167182				0.1311	<0.01	Significante [UHE]
	Regressão Múltipla								
Y_{PLANEJADA}	(M44)	BIOMA*PORTE	-311534	-390308	-390718	-46841	0.2907	<0.01	Significante [UHE*CA, UHE*CE, UHE*MA, UHE*PP]
	(M45)	BIOMA*PORTE*UF	463710	261760			0.2711	<0.01	Significante [PA*UHE, AM*UHE]
	(M46)	BIOMA*PORTE*AREKM					0.3987	<0.01	Significante [Influência negativa para UHE na MA e CE]
	(M47)	UF*AREKM					0.2227	<0.01	Significante [Influência negativa em AM, AP, GO, MG, MS, MT, PA, PR]
	(M48)	UF*AREKM*PORTE					0.4530	< 0.01	Significante

4. Discussão

A Mata Atlântica foi o primeiro bioma povoado e explorado do Brasil, por estar situado no litoral e historicamente ser a primeira região ocupada do país [47,48]. Atualmente o bioma abriga 72% da população brasileira e 3 dos maiores centros urbanos da América Latina [49,50]. E, por conta da intensa exploração dos recursos naturais, apresenta hoje somente entre 11,4% a 16,0% de floresta original, formada por milhares de fragmentos [49]. Considerando a riqueza e a biodiversidade daquele bioma, e por ter reduzido mais de 70% de sua vegetação primária, este foi classificado como um *hotspots* da biodiversidade mundial estando entre as 25 áreas prioritárias para conservação no planeta, juntamente com o Cerrado brasileiro [7]. E atualmente ainda estão instaladas 66,8% das usinas hidrelétricas em operação do Brasil (Tabelas 1, 2 e 3). Contudo, há previsão de construção de mais 602 novas usinas neste bioma.

Quando comparadas as áreas dos biomas com as áreas dos reservatórios das usinas hidrelétricas no cenário futuro, a Mata Atlântica apresenta a maior porcentagem, com 2,4% do seu território de área alagada, seguida pelo Cerrado com 1,02%. Esta área, representada em uma mesoescala continental, é muito significativa. Mesmo sem considerar outros potenciais impactos diretos e indiretos das áreas de influências das usinas hidrelétricas que, são significativamente maiores [37] e normalmente subestimados [29].

Apesar de apresentar muitas áreas protegidas, a atual rede de conservação da Mata Atlântica tem se mostrado ineficaz em sua missão de conservação [49]. Por exemplo, um estudo revelou que apenas 18% de áreas chave para conservação da biodiversidade na Mata Atlântica encontram-se cobertas por áreas protegidas [51]. Por estes motivos, novas pesquisas devem considerar a existência de ações conjuntas que busquem implementar políticas mais eficientes de conservação da biodiversidade, considerando o atual e futuro cenário da distribuição das usinas hidrelétricas na Mata Atlântica. Isto porque se for mantida esta tendência de expansão, o conflito entre ambos os setores (energético e conservacionista) será inevitável, principalmente sem uma efetiva política de planejamento.

O tempo de instalação das usinas planejadas depende de vários fatores agregados, visto que o processo de implementação demanda várias fases [18]. A ANEEL estipula que a construção de uma UHE demore em média 45 meses e uma PCH 29 meses [52]. Porém a fase de planejamento, na qual as usinas planejadas utilizadas na pesquisa estão classificadas (Tabela 4), pode demorar anos e décadas. Isso porque cada empreendimento apresenta um nível diferenciado de sensibilidade, viabilidade e interesses hidroenergético específico. Porém, o Plano Decenal de Expansão de Energia - PDE é um documento elaborado e atualizado anualmente com o objetivo de informar as previsões do Governo sobre a expansão do setor energético para os próximos 10 anos.

O PDE 2027 [18], último plano publicado pelo governo federal, apresenta o indicativo de instalação de nove novas UHE que adicionarão 1966 MW a geração do país até 2027. Este resumo é mostrado na Tabela 6. Adicionalmente, mais 16 empreendimentos são apresentados para início de operação após 2027. Destas novas UHE, cinco delas estarão na Amazônia gerando 61% da nova cota de energia do país. O Plano também menciona que a expansão das UHE na Amazônia é condicionada às dificuldades socioambientais encontradas nas fases prévias e de implementação destas usinas. Além disso, porque em muitos casos estão relacionadas às Terras Indígenas. Este, aliás, tem sido o caso emblemático ocorrido na implantação da UHE Belo Monte [31], e que está também ocorrendo com a implantação da UHE São Luiz do Tapajós [31].

Tabela 6

UHE indicativas para início de operação para os próximos anos, segundo PDE 2027 [18]. O bioma e estágio da usina resultam.

Fonte: adaptado de [18].

Ano previsto para início de operação	Nome da UHE	Potência (MW)	UF	Bioma	Estágio descrito na pesquisa
2024	Apertados	139	PR	Mata Atlântica	EVTE aceito
	Castanheira	140	MT	Amazônia	EVTE aceito
	Divinópolis	74	MG/GO	Cerrado	EVTE aprovado
	Ercilândia	87	PR	Mata Atlântica	EVTE aceito

	Tabajara	400	RO	Amazônia	EVTE aceito
	Telêmaco Borba	118	PR	Mata Atlântica	EVTE aceito
2025	Comissário	140	PR	Mata Atlântica	EVTE aceito
	Itaocara I	150	RJ	Mata Atlântica	Construção não iniciada
2027	Bem Querer	650	RR	Amazônia	EVTE em elaboração
	Alta Floresta	127	MT	Amazônia	EVTE em elaboração
	Buriti Queimado	142	GO	Cerrado	EVTE em elaboração
	Couto Magalhães	150	MT/GO	Cerrado	EVTE em elaboração
	Formoso	342	MG	Cerrado	EVTE em elaboração
	For do Piquiri	93	PR	Mata Atlântica	EVTE aceito
	Foz do Xaxim	63	SC	Mata Atlântica	EVTE em elaboração
	Itaguaçu	92	GO	Mata Atlântica	EVTE em elaboração
Após 2027	Itapiranga	724	SC/RS	Mata Atlântica	EVTE em elaboração
	Jatobá	1650	PA	Amazônia	EVTE aceito
	Maranhão	125	GO	Cerrado	EVTE elaboração
	Mirador	80	GO	Cerrado	EVTE elaboração
	Paraná	90	TO	Cerrado	EVTE aceito
	Porteiras	86	GO	Cerrado	EVTE elaboração
	Porto Galeano	81	MS	Cerrado	EVTE elaboração
	Santo Antônio	84	SC/RS	Mata Atlântica	EVTE elaboração
	Saudade	61	SC	Mata Atlântica	EVTE elaboração
	TOTAL	5890			

Foram incluídos, para fins de comparação na Tabela 6, o bioma e a fase de implementação encontrada para as UHE previstas no PDE 2027. Observa-se então que 11 delas encontram-se na Mata Atlântica, 9 no Cerrado e 5 na Amazônia. Este fato reforça a tendência de expansão encontrada em nossa pesquisa. Pode-se observar ainda que todas as UHE previstas na Tabela 6 encontram-se em estágios de Estudo de Viabilidade, e uma com a construção não iniciada. Ou seja, a partir desta fase de implementação há maior possibilidade da usina se instalar, considerando o fluxo apresentado na Tabela 4. Isto indica que, dentre as 245 UHE e 983 PCH planejadas da pesquisa, 40% das UHE e 33% das PCH têm maior possibilidade de serem implementadas mais rapidamente. Isto porque se encontram em fases de viabilidade ou posteriores (Tabela 4).

Esta expansão das usinas hidrelétricas na Amazônia, nos últimos anos, vem sendo discutida por diversos autores [10,33,34,38,53]. E, como foi mostrado na presente pesquisa, apesar da expansão em número de hidrelétricas se direcionarem principalmente à Mata Atlântica, a Amazônia deve receber a maior potência instalada e, do mesmo modo, também os maiores impactos ambientais relacionados às grandes barragens [33]. Este, na verdade, deveria ser um dos focos das preocupações aos danos socioambientais do maior ecossistema de florestas do planeta [38].

As usinas planejadas nos Estados do Amazonas e no Pará (Figura 1) irão tornar a Amazônia o maior gerador de energia hidrelétrica do país, ultrapassando em valores absolutos a Mata Atlântica. Este fato indica a continuação de construção de megabarragens na Amazônia, com o agravante de elevação da frequência de usinas instaladas no mesmo curso d'água, como mostramos na pesquisa, cujos efeitos de impactos ambientais são não lineares e normalmente cumulativos [40]. Ainda, os impactos gerados pelas megabarragens no bioma são muito abrangentes e

diffíceis de ser mensurados. Por exemplo, um estudo analisou as áreas desmatadas e as áreas dos reservatórios previstas nos estudos ambientais das megabarragens do rio Madeira, em Rondônia. Estes estudos mostraram que as UHE Jirau e Santo Antônio geraram 52% a mais de supressão da vegetação prevista e os reservatórios foram 69% maiores do que esperado [29].

Estudos sugerem que as novas usinas planejadas na Amazônia irão gerar impactos não somente relacionados aos reservatórios, mas também relacionados à construção de novas estradas e linhas de transmissão [18,33,54], assim como à biodiversidade gerados pela fragmentação e consequente perda de habitat [10]. Além do mais, os impactos sobre a ictiofauna na Amazônia são preocupantes porque muitas espécies não têm sido sequer descritas [10,12]. Ainda, o fato de que 80% das mais de 2.500 espécies conhecidas de peixes amazônicos serem endêmicos, aumenta o risco de extinção diante dos impactos gerados por estes empreendimentos [11,14,34]. Este cenário pode ser agravado se o padrão de expansão de PCH se mantiver neste bioma. Assim como já ocorre na Mata Atlântica, onde as menores bacias e suas nascentes já devem ser afetadas.

Em consonância à análise do bioma Amazônia, o Cerrado vem efetivamente se transformando em mais uma nova fronteira de expansão das usinas hidrelétricas brasileiras, como observado com os biomas das UHE previstas no PDE 2027 (Tabela 6). No entanto, o Cerrado é considerado altamente sensível e historicamente devastado principalmente pela agropecuária [7,8,55]. Por conta disto, esse *hotspots* da biodiversidade apresenta grande taxa de desmatamento, queimadas e ocupação acelerada [8]. Porém, apesar desta importância, estudos que relacionam o desmatamento do bioma com a expansão de hidrelétricas são escassos, sendo de suma importância o conhecimento e disponibilização de informações que subsidiem novas e mais eficientes estratégias de conservação diante da relevância internacional dos ecossistemas deste bioma [5].

Como na Mata Atlântica, sobretudo a porção da região sudeste do país, as bacias hidrográficas já estão saturadas de usinas hidrelétricas [17,38]. Constatado estes fatos sobre a grande disponibilidade de recursos na Amazônia e no Cerrado, a expansão de novos empreendimentos para ambos parece ser inevitável, considerando a tendência de alta dependência do Brasil da energia hidrelétrica [10,38]. Ademais, o fato do Brasil ser um país altamente dependente dos recursos hídricos para geração de energia gera certa insegurança, visto que a dependência dos ciclos hidrológicos tem mostrado problemas crescentes no abastecimento e na disponibilidade de água em várias regiões do Brasil nos últimos anos, principalmente nos maiores centros urbanos localizados na Mata Atlântica e Cerrado [38,53,56].

O PDE 2027 também enfatiza a tendência do investimento em usinas de menor porte e da expansão das PCH da região Sudeste e em direção às demais regiões. O Plano indica o incremento periódico de geração de PCH de 350 MW/ano entre 2023 e 2024; 450 MW/ano para 2025 a 2027; e 600 MW/ano a partir de 2027. Existem 166 PCH com outorga para implementação localizadas em grandes áreas das regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste do país. Ainda, segundo dados do Ministério de Minas e Energia, estas regiões apresentam 92% do potencial disponível de PCH do país [18].

Tal cenário expansionista mostra um “boom” de PCH nas regiões Sul e Centro-Oeste, especialmente na Mata Atlântica e Cerrado. Mas também sugere aumento significativo no número destas usinas no bioma Amazônico (Tabela 2). Por outro lado, esta tendência está ocorrendo em várias regiões do mundo, como fonte alternativa de geração de energia sustentável e reconhecida como de menor impacto socioambiental por unidade de geração energética [15,57].

As pequenas hidrelétricas são consideradas fontes “verdes” por emitirem relativamente pouco carbono no seu processo de instalação, em relação às grandes barragens, além de necessitarem de reservatórios bem menores ou quase inexistentes [39,58]. Por outro lado, estudos similares ao redor do mundo vêm mostrando os potenciais problemas gerados mesmo com este porte de usina hidrelétrica [24,39], especialmente quando relacionados à instalação em cascata de PCH, ou em combinação com UHE, que geram impactos no abastecimento e no fluxo dos rios, além de impactos indiretos causados por indústrias que se utilizam desta modalidade de usina [24].

Considerando a sensibilidade dos biomas brasileiros e o histórico de exploração, principalmente da Mata Atlântica e do Cerrado, acredita-se que a instalação das novas usinas hidrelétricas deveria ser melhor repensada. As novas usinas devem, portanto, estar situadas em sítios que gerem menos impactos quando comparados ao cenário atual (operacional), principalmente quanto aos fragmentos de florestas que apresentam maior sensibilidade às alterações ambientais. Outras alternativas seriam a melhoria da gestão e o maior estímulo à modernização e ao aprimoramento construtivo-operacional das usinas já existentes [28]. Por exemplo, algumas usinas apresentam-se muito antigas, com baixa eficiência e frequentemente inadequadas em relação aos padrões internacionais atuais, por

exemplo, quando se aplica o critério de potência por área alagada. Portanto, evitar novas construções, além de investir na melhoria da eficiência energética das usinas já instaladas, parece ser uma opção ambiental relevante. Países da Europa e os EUA têm adotado esta prática. E os resultados mostraram que, além de evitar a construção de novas barragens, os casos de sucesso maximizam a geração de energia, diminuem os custos de investimentos e evitam maiores danos ou impactos ambientais [28,59], evitando-se a expansão territorial exagerada ou, eventualmente desnecessária, para novas áreas.

5. Conclusões

Conclui-se que há significativa diferença na distribuição das usinas hidrelétricas brasileiras em relação aos biomas do país. Por ser considerado um hotspots da biodiversidade e apresentar maior capacidade instalada de pequenas e grandes usinas, a Mata Atlântica foi considerada como o bioma mais ameaçado atualmente pela expansão das usinas hidrelétricas. No cenário futuro, a expansão das usinas neste bioma tende a ser mantida, principalmente concentrada nas usinas de menor porte, devido a aparente exaustão dos recursos hídricos de grandes bacias no Sudeste. Por outro lado, o Cerrado e a Amazônia apresentam-se como as mais novas fronteiras expansionistas hidroenergética brasileiras, alertando-se para o planejamento e construção desenfreada de megabarragens em ambos os biomas.

A presente pesquisa disponibiliza informações valiosas, eficientes e racionais que podem ser úteis na tomada de decisão considerando as dimensões hidroenergética e ambiental, suprimindo lacunas de conhecimento e reduzindo a ausência de estudos similares com visão mais sistêmica do processo de expansão de usinas no território brasileiro. Assim, considerando a situação da expansão energética no Brasil (atual ou operacional) e planejada (futura), é possível vislumbrar possíveis conflitos e impactos ambientais nestes biomas de suma importância para conservação da biodiversidade mundial.

A análise geoestatística descreveu uma série de informações úteis em processos de decisão e redução de potenciais conflitos atuais e futuros onde estejam envolvidas tanto a gestão do setor hidrelétrico quanto a do setor de conservação da biodiversidade, os quais poderão se tornar críticos em um horizonte temporal de poucos anos ou décadas. Portanto, a presente pesquisa fornece uma base de informações estratégica, útil como ferramenta de integração e planejamentos destes setores. Além disso, observa-se que as melhores soluções para resolver conflitos, considerando ambos os setores, é o caráter preventivo do estudo na gestão. Evitar futuros conflitos, bem como problemas causados pela intensa expansão do setor energético nos biomas brasileiros, dependerá da análise de várias variáveis. A presente pesquisa apresentou as variáveis e suas interrelações, as quais poderão ser úteis durante a tomada de decisões sobre os atuais e futuros cenários postos em evidência.

Referências

- [1] Ministério do Meio Ambiente. Áreas Prioritárias para a Conservação, Uso Sustentável e Repartição de Benefícios da Biodiversidade Brasileira: Atualização - Portaria MMA n° 9, de 23 de janeiro de 2007. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Biodiversidade e Florestas; 2007.
- [2] Luca ACD, Develey PF, Bencke GA, Goerck JM. Áreas importantes para a conservação das aves no Brasil: parte II -Amazônia, Cerrado e Pantanal. São Paulo, SP, Brasil: SAVE Brasil; 2009.
- [3] Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Brasil: cidades e estados 2019. <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados.html> (accessed January 11, 2019).
- [4] Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Brasil em síntese 2004. <https://brasilemsintese.ibge.gov.br/territorio.html> (accessed January 11, 2019).
- [5] Oliveira DA, Pietrafesa JP, Barbalho MG da S. Manutenção da Biodiversidade e o Hotspots Cerrado. *Caminhos Da Geografia* 2008:101–14.
- [6] Peixoto AL, Luz JRP, Brito MA de. *Conhecendo a biodiversidade*. Brasília, DF: MCTIC, CNPq, PPBio; 2016.
- [7] Myers N, Mittermeier RA, Mittermeier CG, Fonseca GAB, Kent J. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature* 2000;403:853–8. doi:<https://doi.org/10.1038/35002501>.
- [8] Bezerra AS. *Considerações sobre conservação da biodiversidade nas ecoregiões do bioma cerrado*. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília, 2018.

- [9] Scarano F, Ceotto P. Brazilian Atlantic forest: impact, vulnerability, and adaptation to climate change. *Biodiversity and Conservation* 2015;23:19–31. doi:<https://doi.org/10.1007/s10531-015-0972-y>.
- [10] Lees AC, Peres CA, Fearnside PM, Schneider M, Zuanon JAS. Hydropower and the future of Amazonian biodiversity. *Biodiversity and Conservation* 2016;25:451–66. doi:10.1007/s10531-016-1072-3.
- [11] Nogueira C, Buckup PA, Menezes NA, Oyakawa OT, Kasecker TP, Ramos Neto MB, et al. Restricted-Range Fishes and the Conservation of Brazilian Freshwaters. *PLoS ONE* 2010;5:e11390. doi:10.1371/journal.pone.0011390.
- [12] Winemiller KO, McIntyre PB, Castello L, Fluet-Chouinard E, Giarrizzo T, Nam S, et al. Balancing hydropower and biodiversity in the Amazon, Congo, and Mekong. *Science* 2016;351:128–9. doi:10.1126/science.aac7082.
- [13] Salvatierra LHA, Ladle RJ, Barbosa H, Correia RA, Malhado ACM. Protected areas buffer the Brazilian semi-arid biome from climate change. *Biotropica* 2017;49:753–60. doi:10.1111/btp.12459.
- [14] Zarfl C, Lumsdon AE, Berlekamp J, Tydecks L, Tockner K. A global boom in hydropower dam construction. *Aquatic Sciences* 2015;77:161–70. doi:10.1007/s00027-014-0377-0.
- [15] Korkovelos A, Mentis D, Siyal S, Arderne C, Rogner H, Bazilian M, et al. A Geospatial Assessment of Small-Scale Hydropower Potential in Sub-Saharan Africa. *Energies* 2018;11:3100. doi:10.3390/en11113100.
- [16] Agência Nacional de Energia Elétrica. BIG - Banco de Informações de Geração 2019. <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm> (accessed January 22, 2019).
- [17] Dias V de S, Luz MP d, Medero G, Nascimento DTF. An Overview of Hydropower Reservoirs in Brazil: Current Situation, Future Perspectives and Impacts of Climate Change. *Water* 2018;10:592. doi:10.3390/w10050592.
- [18] Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética. Plano Decenal de Expansão de Energia 2027. Brasília, DF: 2018.
- [19] Ye L-C, Lin HX, Tukker A. Future scenarios of variable renewable energies and flexibility requirements for thermal power plants in China. *Energy* 2019;167:708–14. doi:10.1016/j.energy.2018.10.174.
- [20] Vliet MTH van, Wiberg D, Leduc S, Riahi K. Power-generation system vulnerability and adaptation to changes in climate and water resources. *Nature Climate Change* 2016;6:375–80. doi:10.1038/nclimate2903.
- [21] World Energy Council. *World Energy Resources 2016*. United Kingdom: 2016.
- [22] Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução n° 673 de 04 de Agosto de 2015. 2015.
- [23] Agência Nacional de Energia Elétrica. *Atlas de energia elétrica do Brasil*. 3a edição. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica; 2008.
- [24] Hennig T, Harlan T. Shades of green energy: Geographies of small hydropower in Yunnan, China and the challenges of over-development. *Global Environmental Change* 2018;49:116–28. doi:10.1016/j.gloenvcha.2017.10.010.
- [25] Alho CJR, Reis RE, Aquino PPU. Amazonian freshwater habitats experiencing environmental and socioeconomic threats affecting subsistence fisheries. *Ambio* 2015;44:412–25. doi:10.1007/s13280-014-0610-z.
- [26] Branquinho A, Brito D. Impact of dams on global biodiversity: A scientometric analysis. *Neotropical Biology and Conservation* 2016;11:101–9. doi:10.4013/nbc.2016.112.07.
- [27] Benchimol M, Peres CA. Predicting local extinctions of Amazonian vertebrates in forest islands created by a mega dam. *Biological Conservation* 2015;187:61–72. doi:10.1016/j.biocon.2015.04.005.
- [28] Moran EF, Lopez MC, Moore N, Müller N, Hyndman DW. Sustainable hydropower in the 21st century. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 2018;115:11891–8. doi:10.1073/pnas.1809426115.
- [29] Cochrane SMV, Matricardi EAT, Numata I, Lefebvre PA. Landsat-based analysis of mega dam flooding impacts in the Amazon compared to associated environmental impact assessments: Upper Madeira River example 2006–2015. *Remote Sensing Applications: Society and Environment* 2017;7:1–8. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.rsase.2017.04.005>.
- [30] Sohr R. *Petróleo: el mundo y las energías del futuro*. Santiago de Chile: Random Hou; 2009.
- [31] Fearnside PM. Belo Monte: Actors and arguments in the struggle over Brazil's most controversial Amazonian dam. *Journal of the Geographical Society of Berlin* 2017:14–26. doi:10.12854/erde-148-27.

- [32] Tilt B, Braun Y, He D. Social impacts of large dam projects: A comparison of international case studies and implications for best practice. *Journal of Environmental Management* 2009;90:S249–57. doi:10.1016/j.jenvman.2008.07.030.
- [33] Finer M, Jenkins CN. Proliferation of Hydroelectric Dams in the Andean Amazon and Implications for Andes-Amazon Connectivity. *PLoS ONE* 2012;7:e35126. doi:10.1371/journal.pone.0035126.
- [34] Latrubesse EM, Arima EY, Dunne T, Park E, Baker VR, d’Horta FM, et al. Damming the rivers of the Amazon basin. *Nature* 2017;546:363–9. doi:10.1038/nature22333.
- [35] Chen G, Powers RP, Carvalho LMT, Mora B. Spatiotemporal patterns of tropical deforestation and forest degradation in response to the operation of the Tucuruí hydroelectric dam in the Amazon basin. *Applied Geography* 2015;63:1–8. doi:https://doi.org/10.11717.3198.
- [36] Santos ES, Lopes PPP, Pereira HH da S, Nascimento O de O, Rennie CD, Sternberg L, et al. The impact of channel capture on estuarine hydro-morphodynamics and water quality in the Amazon delta. *Science of The Total Environment* 2018;624:887–99. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.12.211.
- [37] Sánchez LE. Avaliação de impacto ambiental: conceitos e métodos. Oficina de Textos; 2008.
- [38] Soito JL da S, Freitas MAV. Amazon and the expansion of hydropower in Brazil: Vulnerability, impacts and possibilities for adaptation to global climate change. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2011;15:3165–77. doi:10.1016/j.rser.2011.04.006.
- [39] Manzano-Agugliaro F, Taher M, Zapata-Sierra A, Juaidi A, Montoya FG. An overview of research and energy evolution for small hydropower in Europe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2017;75:476–89. doi:10.1016/j.rser.2016.11.013.
- [40] Fencel JS, Mather ME, Costigan KH, Daniels MD. How Big of an Effect Do Small Dams Have? Using Geomorphological Footprints to Quantify Spatial Impact of Low-Head Dams and Identify Patterns of Across-Dam Variation. *PLoS ONE* 2015;10. doi:https://doi.org/10.1371/journal.pone.0141210.
- [41] SIGEL/ANEEL. Sistema de Informações Geográficas do Setor Elétrico 2018. <https://sigel.aneel.gov.br/Down/> (accessed July 30, 2018).
- [42] Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Malhas digitais 2018. <https://mapas.ibge.gov.br/bases-e-referenciais/bases-cartograficas/malhas-digitais.html> (accessed July 29, 2018).
- [43] QGIS Development Team. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. 2017.
- [44] RStudio Team. RStudio: Integrated Development Environment for R. Boston, MA: RStudio, Inc.; 2016.
- [45] Crawley MJ. *The R Book*. United Kingdom: Wiley; 2007.
- [46] R Development Core Team. *R: A language and environment for statistical computing*. 2018.
- [47] Morellato LPC, Haddad CFB. Introduction: The Brazilian Atlantic Forest. *Biotropica* 2000;32:786–92. doi:https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2000.tb00618.x.
- [48] Ribeiro MC, Martensen AC, Metzger JP, Tabarelli M, Scarano F, Fortin M-J. The Brazilian Atlantic Forest: A Shrinking Biodiversity Hotspot. *Biodiversity Hotspots: Distribution and Protection of Conservation Priority Areas*, Luxembourg: Springer; 2011.
- [49] Ribeiro MC, Metzger JP, Martensen AC, Ponzoni FJ, Hirota MM. The Brazilian Atlantic Forest: How much is left, and how is the remaining forest distributed? Implications for conservation. *Biological Conservation* 2009;142:1141–53. doi:https://doi.org/10.1016/j.biocon.2009.02.021.
- [50] Rezende CL, Scarano FR, Assad ED, Joly CA, Metzger JP, Strassburg BBN, et al. From hotspot to hopespot: An opportunity for the Brazilian Atlantic Forest. *Perspectives in Ecology and Conservation* 2018;16:208–14. doi:https://doi.org/10.1016/j.pecon.2018.10.002.
- [51] Paese A, Paglia A, Pinto LP, Foster MN, Fonseca M, Sposito R. Fine-scale sites of global conservation importance in the Atlantic forest of Brazil. *Biological Conservation* 2010;19:3445–58. doi:https://doi.org/10.1007/s10531-010-9906-x.
- [52] Agência Nacional de Energia Elétrica. Relatório de Acompanhamento da Implantação de Empreendimentos de Geração N11 2018.
- [53] Prado FA, Athayde S, Mossa J, Bohlman S, Leite F, Oliver-Smith A. How much is enough? An integrated examination of energy security, economic growth and climate change related to hydropower expansion in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2016;53:1132–6. doi:10.1016/j.rser.2015.09.050.

- [54] Hyde JL, Bohlman SA, Valle D. Transmission lines are an under-acknowledged conservation threat to the Brazilian Amazon. *Biological Conservation* 2018;228:343–56. doi:10.1016/j.biocon.2018.10.027.
- [55] Mustin K, Carvalho WD, Hilário RR, Costa-Neto SV, Silva C, Vasconcelos IM, et al. Biodiversity, threats and conservation challenges in the Cerrado of Amapá, an Amazonian savanna. *Nature Conservation* 2017;22:107–27. doi:10.3897/natureconservation.22.13823.
- [56] Hunt. JD, Stilpen D, de Freitas MAV. A review of the causes, impacts and solutions for electricity supply crises in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2018;88:208–22. doi:10.1016/j.rser.2018.02.030.
- [57] Kadier A, Kalil MS, Pudukudy M, Hasan HA, Mohamed A, Hamid AA. Pico hydropower (PHP) development in Malaysia: Potential, present status, barriers and future perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2018;81:2796–805. doi:10.1016/j.rser.2017.06.084.
- [58] Balkhair KS, Rahman KU. Sustainable and economical small-scale and low-head hydropower generation: A promising alternative potential solution for energy generation at local and regional scale. *Applied Energy* 2017;188:378–91. doi:10.1016/j.apenergy.2016.12.012.
- [59] Pohl MM. Bring dow our dams: trends in american dam removal rationales. *Journal of the American Water Resources Association* 2002;38:1511–9. doi:10.1111/j.1752-1688.2002.tb04361.x.

5. CONCLUSÕES

- Confirmamos a hipótese de que a concentração das usinas hidrelétricas brasileiras é maior em biomas onde estão localizadas concentrações populacionais e cidades de maior desenvolvimento econômico;
- Com isso, no cenário atual, a Mata-Atlântica é o bioma que apresenta o maior quantitativo de usinas de diferentes portes instaladas, bem como a maior capacidade geradora do país;
- A Amazônia e o Cerrado apresentam-se como nova fronteira expansionista do Brasil, pois as usinas planejadas serão implantadas preferencialmente nestes biomas;
- No cenário futuro, com o acréscimo das usinas em planejamento, a Amazônia será o bioma que gerará mais energia proveniente de usinas hidrelétricas do país, com instalação de grandes usinas em mesmos cursos d'água;
- A expansão de pequenas hidrelétricas será significativamente maior no Cerrado e na Mata Atlântica, sendo os dois considerados *hotspots* da biodiversidade mundial e encontram-se historicamente devastado pela exploração de recursos e ocupação urbana;
- As variáveis estudadas se correlacionam significativamente com a potência das usinas hidrelétricas, e indicaram tendências como o elevado incremento de energia nos Estados do Para, Amazonas e Roraima no futuro;
- Os resultados da ANCOVA comprovaram a continuação da construção de megabarragens na Amazônia, que irão gerar grandes reservatórios aumentando assim a vulnerabilidade do bioma a impactos gerados por estes mega empreendimentos;
- Concluimos que os resultados obtidos são de suma importância para aplicação das políticas energéticas do país bem como para estratégias de conservação dos biomas brasileiros.