

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS

ANTÔNIA TATIANA PINHEIRO DO NASCIMENTO

**EFEITO DA Densa REDE DE RESERVATÓRIOS SUPERFICIAIS SOBRE A
DEMANDA ENERGÉTICA PARA DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA EM UMA BACIA
HIDROGRÁFICA SEMIÁRIDA**

MARACANAÚ, 2018

ANTÔNIA TATIANA PINHEIRO DO NASCIMENTO

**EFEITO DA DENSA REDE DE RESERVATÓRIOS SUPERFICIAIS SOBRE A
DEMANDA ENERGÉTICA PARA DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA EM UMA BACIA
HIDROGRÁFICA SEMIÁRIDA**

Dissertação de Mestrado apresentada como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Energias Renováveis, outorgado pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – IFCE - Campus Maracanaú.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Henrique Augusto Medeiros

MARACANAÚ, 2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Ficha catalográfica elaborada pelo Bibliotecário
Luiz Carlos Silveira de Sousa - CRB-3/942

N244 Nascimento, Antônia Tatiana Pinheiro do.
Efeito da densa rede de reservatórios
superficiais sobre a demanda energética para
distribuição de água em uma bacia hidrográfica
semiárida / Antônia Tatiana Pinheiro do Nascimento
-- 2018.
65 f.

Dissertação (Mestrado em Energias Renováveis) --
Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia
do Ceará, *campus* Maracanaú, 2018.

Orientador: Prof.Dr. Pedro Henrique A. Medeiros.

1.RECURSOS HÍDRICOS - SEMIÁRIDO. 2.REDE DE
RESERVATÓRIOS. 3.EFICIÊNCIA ENERGÉTICA. I.Título.

628.1

PARECER DA BANCA EXAMINADORA

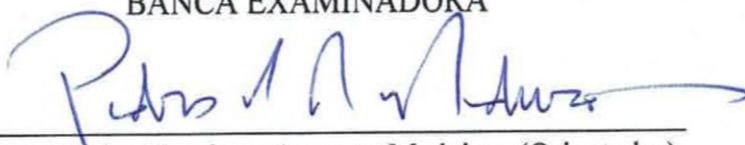
ANTÔNIA TATIANA PINHEIRO DO NASCIMENTO

EFEITO DA DENSA REDE DE RESERVATÓRIOS SUPERFICIAIS SOBRE A DEMANDA ENERGÉTICA PARA DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA EM UMA BACIA HIDROGRÁFICA SEMIÁRIDA

Dissertação submetida à Coordenação do Curso de Pós-graduação em Energias Renováveis do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Energias Renováveis, área de concentração Energias Renováveis.

Aprovada em 26/02/2018.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Pedro Henrique Augusto Medeiros (Orientador)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE



Prof. Dr. Marcos Erick Rodrigues Silva
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE



Prof. Dr. Iran Eduardo Lima Neto
Universidade Federal do Ceará - UFC

DEDICATÓRIA

A todas as Mulheres, que assim como eu, sonham com dias melhores, com uma sociedade justa onde possamos ser livres de todos os tabus impostos por essa sociedade machista e excludente.

AGRADECIMENTOS

Eu passei mais tempo para escrever os “agradecimentos” do que minha dissertação. Não pensem que foi fácil escrever minha dissertação, não mesmo! Isso ocorreu porque chegar até aqui foi muito mais que um sonho meu, essa conquista foi esforço do coletivo, na qual estão incluídos família, amigos, “namorado”, professores, organizações não governamentais, etc. e fechar esse ciclo foi uma mistura de sentimentos que resolvi adiar.

Deixarei escrito, em algumas linhas, nesse documento que considero o fruto de meu crescimento pessoal, minha Gratidão a “Todos” que me ajudaram direta e indiretamente, mas escolherei apenas alguns nomes devido ao pequeno espaço que tenho; peço aos demais que se sintam homenageados e tenham certeza que jamais esquecerei nossa história.

Primeiramente, Fora Temer e Todos! Caro Leitor, não considere esse protesto como algo direcionado para um indivíduo, até porque eu não sujaria meu trabalho com um nome tão temeroso, mas ao retrocesso que nosso país vive ao permitir o retorno de grupos políticos que não almejam o avanço do seu povo, que exploram, não fornecem saúde e educação de qualidade, congelam verbas por duas décadas e vendem seu país de forma escancarada. Certamente você deverá estar se perguntando por qual motivo está lendo um protesto político em uma dissertação de exatas, eu respondo: Nós precisamos **DENUNCIAR** em todos os meios os diversos **GOLPES** vividos no Brasil e demais países da América Latina. Essa é uma parte da minha contribuição e uma forma de lutar pelo povo que financiou meus estudos, que permitiu que minha pesquisa avançasse. Um povo que ri mesmo em dias difíceis, que sempre tem uma solução para tudo; Que enfrenta dias de luta como se estivesse dançando em baile de carnaval, portanto minha GRATIDÃO ao povo brasileiro, “verás que um filho teu não foge à luta”, jamais te abandonarei “Ó Pátria Amada”.

Então vamos avançar! Meu agradecimento segue para um grupo mais próximo, minha família. Eu sou a pessoa mais grata do universo por ter essas pessoas do meu lado, como seria a vida sem elas? É verdade que cuido de todos e que em alguns momentos isso é cansativo, mas no fundo do coração tenho muito amor por vocês, especialmente, pela velhinha mais marrenta que conheci e a quem dedico esse trabalho e minha vida, obrigada por tudo, Rita.

Agora vem a família que escolhi. E não podia começar de outra forma, tenho que seguir a ordem cronológica da minha vida escolar, pois foi lá que o sonho começou. Santa Rita, exatamente, o nome de minha avó e da creche onde aprendi a ler e descobri como é legal andar de ônibus lendo todas as placas (faço isso até hoje). Eu era muito pequena, mas lembro com muita alegria dos momentos vividos na creche e digo aos pais que por ventura estejam lendo meus agradecimentos: escolham a escola que esteja além do ABC ou da tabuada, a melhor escola é aquela que forma pessoas. Eu digo com toda certeza que ali eu aprendi a ser “gente”. Muito obrigada Tia Marta, por sua dedicação àquele espaço que nunca te forneceu dinheiro, mas que te deu a felicidade de ver tantos meninos e meninas se tornarem Pessoas.

Vou interromper o fluxo para agradecer aos colegas de trabalho, isso mesmo, iniciei minha vida profissional aos 6 anos. Na Ceasa eu conheci muitas pessoas e aprendi muita coisa, mas um rapaz marcou muito. Eu confesso que não lembro o nome dele, mas sei que ele já morreu. Então, *in memoriam* do garoto que cantava as músicas do Gabriel O Pensador para mim, sempre apertando seu cigarro, eu deixo meu muito obrigada e uma reflexão: “essa tribo é atrasada demais, eles querem acabar com a violência, mas a paz é contra a lei e a lei é contra a paz”.

Seguimos o fluxo. Os sete anos seguintes foram na escola de ensino fundamental, Almir Dutra. Lá eu descobri que as mulheres têm o poder. A diretora (Maria Augusta) foi a criatura mais firme que conheci em minha vida. A lição com ela foi a seguinte: ame o que você faz e não deixe que ninguém diga que sua altura ou que seu gênero não lhe permite fazer algo. Mas naquela escola não foi só isso que aprendi. Foi lá também que percebi que gosto de movimentos sociais, que tenho habilidades para gestão, e que o ambiente escolar é minha vida. Ao participar do jornal da escola (Desperta Jovem) eu iniciei minha jornada em busca de dias melhores. O jornal contava com o apoio do Comunicação e Cultura, uma ONG muito boa (esse ano eles fecharam o espaço físico por falta de verbas do governo. Escrevo isso com lágrimas rolando pelo meu rosto), e devo parte de minha formação a eles. Falar dessa fase e não citar minha fonte de inspiração não tem sentido. Conheci a Margarida Pimentel (coordenadora da escola) e ela se tornou a imagem que eu tinha na cabeça sobre meu futuro, eu sempre pensava que seria igual a ela. Atualmente, a Meg é professora da UFC e eu continuo pensando nela como antes. Um dia Meg seremos amigas de trabalho e vou lhe abraçar, pois palavra nenhuma

conseguirá dizer o que sinto por você, muito obrigada. Mas como nem tudo são flores, eu digo que também ouvi o NÃO que mais doeu. Um dia uma professora disse que eu nunca iria entrar na universidade. A essa criatura também sou grata, pois seu não me encheu de vontade.

Terceira fase da vida escolar, ensino médio. Para muitos adolescentes o fim da vida, para mim os três anos mais rápidos e cheios de comédia. Aprontei todas, mas sem deixar os sonhos de lado, muito menos a minha atuação no palco da vida escolar. Participei do grêmio, fui líder de sala, organizei inúmeras gincanas, rádio, fiz amigos e não podia faltar aquela velha amizade com professores. Para agradecer a todos elegi duas mulheres fantásticas Teomária, professora de matemática, atualmente minha amiga de segredos íntimos e a Madrinha que escolhi, Eridan, atual inspiração de aventuras, GRATIDÃO meninas.

Entre o ensino médio e a graduação muita coisa aconteceu, foram quatro anos sem vida escolar, portanto obrigada aos sins e aos nãoos. Especialmente, ao pessoal do cursinho que me forçaram a fazer Engenharia Ambiental.

Finalmente chegamos à graduação, certamente você deve estar achando estranho esse agradecimento. Essa menina é louca? Nos agradecimentos não devemos escrever um livro sobre nossas vidas, o padrão diz para agradecermos quem participou da pesquisa e familiares. Eu te pergunto: como alguém pode agradecer quem participou da pesquisa se não consegue deixar registrados os agradecimentos a quem te trouxe até aqui? Nós não somos esse momento, mas várias bandas que formam uma única cena.

Seguimos o baile! Engenharia Ambiental nunca foi o sonho, mas ela veio e eu não podia perder a oportunidade de entrar na universidade. Eu ficava pensando que iria mudar de vida (não a vida financeira, pois isso seria apenas consequência), mas o amadurecimento para debates, agora eu iria lutar contra a desigualdade, mas o que encontrei foram números e algumas reprovações iniciais. Eu que queria fazer filosofia estava sentada estudando cálculo. Até fui chamada para cursar filosofia na UFC, mas como ia pagar as passagens? Mal tinha dinheiro para ir ao IFCE que está localizado no meu município, fiquei na engenharia mesmo, não me arrependi. Vivi tanta coisa e vou citar as que sempre lembro com lágrimas nos olhos:

Jhanes, essa foi a amiga que escolhi para representar os demais. Não foi uma escolha aleatória, nós vivemos muito em pouco tempo. Somos muito diferentes,

só preciso dizer que ela é evangélica, mas sempre nos respeitamos. A Jhanes esteve ao meu lado quando tudo era muito complicado. Eu tinha apenas o dinheiro da passagem e tinha que ficar no IF para estudar cálculo, pois aquilo era muito difícil com livros, imagina sem eles. Ela me acompanhou nos estudos e sempre levava biscoito recheado para comermos durante o dia todo, isso não era motivo de tristeza para nós. Em meio a tantas dúvidas, números, erros e acertos, a gente ria como meninas molecas que éramos. Passar em cálculo, física e outras, só foi possível por ter a Jhanes sempre por perto. Eu não conheço nenhum outro ser humano igual a ela. A pessoa que faz a professora Karine (essa professora é linda, inteligente, educada, eu escreveria um livro sobre ela...como estou gostando de escrever esses agradecimentos, talvez eu escreva um livro, certamente terá uma personagem perfeita como a Karine) chorar, que entra na sala de aula, em dia de prova, sempre atrasada, soltando aquela velha e boa vaia cearense, sempre bem acompanhada da bolsa do gato Félix, só pode ser muito especial. Amo-Te, Jhanes. Outros amigos surgiram na minha caminhada, tinha um para cada momento, a amiga de farra, Laila. O irmão de pesquisa Bruno, mais conhecido como Barak, os colegas do Laboratório de Hidrologia e uma lista extensa, vocês todos são importantes.

Cheguei à pesquisa! Minha vida como pesquisadora começou no laboratório de águas. Em pouco tempo eu aprendi a analisar águas para abastecimento e esgoto. Minha primeira orientadora foi a professora Emília, eu agradeço a oportunidade e ensinamentos, além disso, obrigada por ter me apresentado a família HIDROSED.

Prezados, depois que conheci esse grupo minha vida deu mais um salto. Comecei a ajudar a Carol, Diego e Thiago, esse trio me fez passar carnavais, feriados, finais de semana e até madrugadas em um laboratório, mas confesso que eu nunca tinha experimentado tantos risos. Fomos muito felizes com todo aquele trabalho. Nossa amizade cresceu e continua até hoje, até porque junto com esses três veio mais um. Eles trouxeram meu “Namorado” (uma mistura de namorado com marido) a quem tenho imenso amor e gratidão pelo companheirismo, por suas contribuições, por nossas aventuras, conquistas e tudo que vivemos. MC, você é muito importante para mim. Seguiremos nossas vidas sempre pertinho um do outro, mesmo que distante fisicamente em alguns momentos, como combinamos. Gosto “Muitão” de Você!

Quanto ao grupo HIDROSED, vocês são sinônimo de ética, dedicação a pesquisas, principalmente, a pesquisa que almejo fazer para sempre, a que está voltada para pequenos agricultores e sistemas, com o intuito de ajudar o homem do campo, vocês sempre serão o espelho. Sei que a caminhada não está sendo fácil, mas acreditamos que dias melhores virão, eu quero estar sempre por perto, aprendendo e sonhando.

O HIDROSED também me deu outro presente, um carinha de 1,49 m que pensa ter 1,5 m. Conhecido como Pedrinho, mas que sempre escreve no final de cada e-mail Pedro Medeiros. Se todos os agradecimentos escritos até agora foram digitados com água nos olhos, esse foi necessário um lençol de 5 metros para enxugar as lágrimas. Eu não preciso escrever aqui o carinho e respeito que tenho por esse pedacinho de gente. Às vezes me pego pensando: “como pode uma pessoa pequenininha ter um coração tão grande? ” Pedro é isso! Um exemplo de profissional, de pai, pessoa...Ele é um homem humano. Professor, muito obrigada pelos conselhos, por me aguentar por 5 anos seguidos, ouvindo meus choros, me dando carona quase todos os dias, por confiar em mim deixando o Barak e eu conduzindo viagens ao Assentamento (vou já falar sobre ele), inclusive sabendo que eu ia cuidar direitinho da Shuping. Obrigada por permitir viver experiências incríveis, por me apoiar quando eu queria me aventurar pelo mundo. Você é o Cara! Eu não quero me afastar de você jamais.

Quando Pedro mandou o primeiro projeto, ainda na graduação eu sabia que era diferente, foi ali que me apaixonei pelos pequenos açudes, a paixão acabou e virou amor. Outra paixão foi o Assentamento 25 de Maio. Nunca trabalhei com dados primários, mas ajudar os colegas sempre foi um grande prazer, além do mais eu viajava várias vezes para Madalena. Conheci as melhores pessoas do mundo, que são donas de saberes indiscutíveis, entre elas mais uma mulher guerreira, dona Gorete. Ela é símbolo de resistência, uma figura ímpar e a melhor forma de agradecer ao Universo por eu existir e poder aprender com esse povo.

Aos professores Iran (eu prefiro chamar de Lima Neto, 2011) e Marcos Erick, muito obrigada por suas contribuições, eu ouvi cada uma com muito carinho e admiração.

Por último e não menos importante, eu preciso agradecer ao Instituto Federal:

Primeiramente, ao Presidente Lula pelos investimentos nos IF's, (quero dizer que sou crítica à quantidade gritante de Institutos, pois eles devem chegar ao interior, mas a qualidade deve ser mantida também), isso mesmo, nunca antes na história desse país se investiu tanto em educação. Depois que entrei na universidade eu vi tantos investimentos, meus colegas viajaram pelo mundo através do projeto Ciência Sem Fronteiras, nós tínhamos tanta verba para pesquisa, compra de equipamentos, tudo parecia um sonho. Então Presidente Lula e Presidenta Dilma eu acredito, não na inocência, mas no desejo de ajudar o povo. Presidenta, talvez você nunca leia minha dissertação, muito menos meus agradecimentos, mas a Senhora também é a mulher porreta que desejo ser.

Falando em mulher, eu jamais poderia deixar de homenagear os professores sem citar a mãe adotiva que ganhei, professora Adriana. Eu a conheci no dia que ela veio entregar a documentação para assumir o concurso que tinha acabado de passar. Ela não lembra e eu nem sabia que seria professora, parecia uma aluna, mas em seu primeiro semestre eu tive o prazer de ser sua aluna. Hoje também somos grandes amigas. Professora, a senhora não é desse mundo, não existe ninguém com o coração mais puro e de alma leve. Sou grata por sua amizade e sei que estaremos sempre uma do lado da outra. Minha coisinha Linda! Todos os demais professores por quem tenho admiração sintam-se abraçados. Aos que não gosto (é necessário falar, pois a vida não é um conto de fadas) muito obrigada também, com vocês eu aprendi muitas coisas, inclusive como não devemos ser, agir ou fazer.

Nem só de professores vive uma universidade. Muita gente esquece que existem outras pessoas por trás e a eles sou grata. Em todos esses anos eu fiz amizade com todos os terceirizados, conheço maior parte por nome, e quero agradecer-los em nome do Seu Augusto (jardineiro), Henrique (eletricista), Shirley e Vanessa (recepcionistas), Adriana e Expedito (seguranças), Luiz (biblioteca) e a todas as Tias que ganhei, sem vocês nada disso poderia acontecer.

No setor administrativo eu fiz amigos também. A secretária mais linda e competente do PPGER e Andreia, meninas sinto tanta saudade de nossas conversas. Vocês foram um presentinho muito lindo nessa caminhada. A todos os outros, vocês são sinônimos de competência. Estendo esse agradecimento aos bolsistas do PPGER Simone e Neuman, com quem tive o prazer em dividir a organização do SERES. Como resultado até ouvi um elogio do Professor Geraldo

Ramalho (eu não podia deixar esse comentário passar, eu espero que ele leia).
OBRIGADA IFCE Campus de Maracanaú, por todas as experiências vividas.

Para finalizar, eu não poderia deixar de citar o Poeta Belchior: "...Amar e mudar as coisas me interessa mais..." quem sabe uma nova mudança em breve possa acontecer. Penso que ter fé na vida e acreditar que podemos chegar nos lugares mais longe, sempre acompanhada de pessoas e vivências é o que levamos na bagagem. **GRATIDÃO!**

CONTINUA...

“... Mas é preciso ter força é preciso ter
raça é preciso ter sonho sempre quem
traz na pele essa marca possui a estranha
mania de ter fé na vida...”

Milton Nascimento e Fernando Brant

RESUMO

O crescimento populacional e econômico tem aumentado a demanda por energia. No Brasil, a produção de energia elétrica se dá principalmente por usinas hidrelétricas, no entanto, nos últimos anos o país tem passado por crises hídricas. O Nordeste brasileiro (NEB) sofre naturalmente por déficits hídricos, uma vez que a precipitação anual é da ordem de 700 mm e os processos hidrológicos apresentam alta variabilidade temporal. Devido à sua importância para o abastecimento de água, uma densidade de pequenas barragens foi construída ao longo do tempo. Apesar de incompatíveis com a geração hidrelétrica, que representa um uso conflitante com o abastecimento de água humana na região, pequenos reservatórios apresentam um benefício energético porque acumulam água em altitudes elevadas. Ainda assim, a disponibilidade de água para as comunidades requer a instalação de sistemas de adução e distribuição, ambos com consumo de energia elétrica. Com este trabalho, objetivou-se avaliar como o arranjo de pequenos, médios e grandes reservatórios afeta a demanda de energia para distribuição de água na Bacia Hidrográfica do Banabuiú – BHB (aproximadamente 20.000 km²). Os 1.405 reservatórios analisados foram classificados de acordo com as capacidades de armazenamento: classe 1: $2 \times 10^5 \text{ m}^3$; classe 2: 2×10^5 a $5 \times 10^5 \text{ m}^3$; classe 3: 5×10^5 a $2 \times 10^6 \text{ m}^3$; classe 4: 2×10^6 a $3,5 \times 10^7 \text{ m}^3$; e classe 5: $> 3,5 \times 10^7 \text{ m}^3$, e foram estabelecidos diferentes cenários para a estimativa da demanda de energia para distribuição de água na BHB: I) disposição real dos reservatórios; II) reservatórios das classes 2 a 5, apenas; III) classes 3 a 5, IV) classes 4 a 5; V) classe 5; e VI) somente o reservatório Arrojado Lisboa (capacidade de $1,6 \times 10^9 \text{ m}^3$). A disponibilidade hídrica com 90% de garantia foi estimada através do balanço hídrico nos reservatórios, e a energia elétrica necessária foi obtida com base na demanda hídrica associada à distância e diferença de altitude do centro de demanda para o respectivo reservatório. No cenário I, a energia necessária para bombear água dos reservatórios para todos os centros de demanda da BHB é de 6,5 GWh / ano, enquanto que no cenário II eleva-se para 9,5 GWh / ano. A demanda de energia relativamente baixa no arranjo real resulta da distribuição de água por pequenos reservatórios em altitudes mais elevadas. Nos cenários III e IV, à medida que os reservatórios menores e mais abundantes são retirados da análise, a demanda de energia aumenta. O cenário V que compreende os 12 reservatórios estratégicos, que apesar de apresentar alta disponibilidade de água, exigem mais energia para distribuir água para as comunidades mais altas e remotas, requerem no total 45,3 GWh / ano. No cenário em que apenas o reservatório Arrojado Lisboa fornece água, são necessários anualmente 195 GWh / ano. A partir das simulações conclui-se que, ao armazenar água em altitudes elevadas e distribuí-la espacialmente, os pequenos reservatórios aumentam a eficiência energética no sistema de distribuição de água. Na bacia Banabuiú, a demanda de energia para distribuição de água pode ser aumentada em até 30 vezes em cenários sem os reservatórios menores.

Palavras-chave: Rede de reservatórios; abastecimento hídrico; eficiência energética; semiárido.

ABSTRACT

Population and economic growth have increased the demand for energy. In Brazil, the production of electric power is mostly from hydroelectric plants, however, in recent years the country has been experiencing water crises. The Brazilian Northeast (NEB) naturally suffers from water deficits, since the annual precipitation is of the order of 700 mm and the hydrological processes present high temporal variability. Due to its importance for water supply, a density of small dams has been built over time. Although incompatible with hydropower generation, which represents a conflicting use with human water supply in the region, small reservoirs present an energy benefit because they accumulate water at high altitudes. Still, water availability to the communities requires the installation of adduction and distribution systems, both with consumption of electric power. With this work, we aim to assess how the arrangement of small-, medium- and large-size reservoirs impact the power demand for water distribution in the Banabuiú River Basin– BRB (approximately 20,000 km²), Brazil. The 1,405 reservoirs analysed were classified according to the storage capacities: class 1: $2 \times 10^5 \text{ m}^3$; class 2: 2×10^5 to $5 \times 10^5 \text{ m}^3$; class 3: 5×10^5 to $2 \times 10^6 \text{ m}^3$; class 4: 2×10^6 to $3.5 \times 10^7 \text{ m}^3$; and class 5: $>3.5 \times 10^7 \text{ m}^3$, and different scenarios were established for the estimation of power demand for water distribution in the BRB: I) actual reservoir arrangement; II) reservoirs of classes 2 to 5, only; III) classes 3 to 5; IV) classes 4 to 5; V) class 5; and VI) the Arrojado Lisboa reservoir (capacity of $1.6 \times 10^9 \text{ m}^3$). The water availability with 90% reliability was estimated through the water balance computation in the reservoirs, and the required electric power was obtained based on the water demand associated to the distance and height difference of the demand centre to the respective reservoir. In scenario I, the power required to pump water from the reservoirs to all the BRB human demand centres is 6.5 GWh/year, whereas in scenario II it is raised to 9.3 GWh/year. The relatively low energy demand in the actual reservoir arrangement results from the water distribution by small reservoirs in higher altitudes. In scenarios III and IV, as the smaller and more abundant reservoirs are withdrawn from the analysis, the energy demand increases accordingly. Scenario V comprises the 12 larger reservoirs of the BRB, which although presenting high water availability, demand more power to distribute water to the highest and most remote communities, totalling 45.3 GWh/year. In the scenario in which only the Arrojado Lisboa reservoir provides water, 195 GWh/year would be required annually. From the simulations it is concluded that, by storing water at high altitudes and distributing it spatially, the small reservoirs increase the energy efficiency on the water distribution system. In the Banabuiú River Basin, the power demand for water distribution may be increased by a factor of up to 30 in the scenarios without the smaller reservoirs.

Key-words: Reservoir network; water supply; energy efficiency; semiarid.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema do sistema de abastecimento de água.....	28
Figura 2 - Croqui do posicionamento dos açudes na bacia hidrográfica.	31
Figura 3 - Região semiárida brasileira e bacia hidrográfica do Banabuiú. Na BHB estão todos os reservatórios com área maior que 5 hectares.	33
Figura 4: Representação do sistema cascata de reservatórios sugerida por Güntner (2004).	36
Figura 5 - Formato dos reservatórios recomendado por Molle (a) e a equação modificada proposta por Pereira (2017) (b).	38
Figura 6: Tabela de proximidade estimada pelo programa ArcGis 10.2. (Imagem ilustrativa)	42
Figura 7: Fluxograma da rotina para definição do arranjo de abastecimento dos centros de demanda pelos reservatórios, em que: D - demanda do distrito; O - oferta do açude; n – número total de centros de demanda.....	43
Figura 8: Soma da capacidade (hm ³) de todos os reservatórios por município	50
Figura 9 - Demanda (L/s) dos municípios da bacia hidrográfica do Banabuiú.....	50
Figura 10: Modelo de elevação digital do terreno e energia requerida acumulada (kWh/mês) necessária para bombear água para os distritos para cada cenário de reservação simulado.....	54

LISTA DE TABELA

Tabela 1 - Secas: classificação e definições	30
Tabela 2 - Característica dos reservatórios estratégicos da bacia do Banabuiú.	35
Tabela 3 - Classes dos reservatórios de acordo com a capacidade (m ³).	37
Tabela 4 - Coeficientes de abertura e de forma calculados por Pereira et al., (em revisão) para os reservatórios do estado do Ceará, Brasil.	38
Tabela 5 - Disponibilidade hídrica nos diversos cenários para as cinco classes de reservatório.....	52

LISTA DE SIGLAS

ANA – Agência Nacional da Águas

BHB – Bacia Hidrográfica do Banabuiú

CAV - Cota Área Volume

COGERH – Companhia de Gestão de Recursos Hídricos

CN – Número de Curva

ETA – Estação de Tratamento de Água

FUNCEME – Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos

IBGE - Instituto Brasileiro Geografia e Estatística

NEB – Nordeste Brasileiro

PSH - Pequenos Sistemas Hidrelétricos

SCS - Serviço de Conservação do Solo

SRTM - Shuttle Radar Topography Mission

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	20
2. OBJETIVOS.....	23
2.1 Objetivo geral	23
2.2 Objetivos específicos	23
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	24
3.1 Energia e eficiência energética.....	24
3.2 Recursos hídricos e rede de reservatórios do semiárido	29
4. METODOLOGIA	32
4.1 Área de estudo	32
4.2 Arranjos de reservatórios.....	35
4.3 Capacidade dos reservatórios	37
4.4 Demanda hídrica.....	39
4.5 Levantamento de dados secundários para simulação da disponibilidade hídrica ...	39
4.5.1 Escoamento.....	39
4.6 Disponibilidade hídrica	40
4.7 Dados de relevo	41
4.8 Atendimento das demandas hídricas	41
4.9 Definição do arranjo de abastecimento dos centros de demanda pelos reservatórios	42
4.10 Energia	43
4.10.1 Potência dos conjuntos elevatórios.....	43
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	46
5.1 Arranjos de reservatórios.....	46
5.2 Capacidades dos açudes	48
5.3 Capacidade de armazenamento dos reservatórios versus demanda hídrica	49
5.4 Energia requerida para abastecimento humano na bacia do Banabuiú	51
6. CONCLUSÕES	57
REFERÊNCIAS.....	58

1. INTRODUÇÃO

O crescimento populacional atrelado ao acelerado desenvolvimento tecnológico tem aumentado a demanda por energia elétrica. Por outro lado, a crise ambiental, vivenciada em todos os continentes, tem causado déficit na produção de energia. Sendo assim, a busca por sistemas eficientes e de produção limpa tem sido uma tarefa corriqueira (FARAHNAK et al., 2015; ZHEN et al., 2016).

As usinas hidrelétricas se encaixam dentro da perspectiva da produção de energias limpas e são mundialmente aceitas. No Brasil, são responsáveis por aproximadamente 70% da produção de energia elétrica (HUNT et al, 2014; BRASIL, 2017). Todavia, a região Nordeste não contribui significativamente com energias de fontes hidrelétricas. Isso ocorre devido sua localização massiva no polígono das secas. A área é caracterizada por precipitações irregulares, elevada evaporação e por solos rasos sob embasamento cristalino, o que acarreta à referida região frequentes períodos de déficit hídrico (DE ARAÚJO E PIEDRA, 2009).

Aproximadamente um terço da população residente nas regiões áridas e semiáridas dos países em desenvolvimento, sofrem com a escassez de água corrente (ROCHA E SOARES, 2015). A história dessas civilizações foi construída na busca de desenvolvimento de técnicas para abastecimento hídrico. Todavia, até os dias hodiernos métodos científicos e empíricos são pensados por diversos setores da sociedade a fim de melhorar a convivência com a escassez hídrica.

Uma das alternativas utilizadas para aumentar a disponibilidade hídrica é a construção de reservatórios para o aproveitamento de águas superficiais. Nesse contexto, De Araújo (2011) relatou que a construção de múltiplas redes de açudes no Nordeste Brasileiro (NEB) tem tornado menor a sua vulnerabilidade a períodos secos, constituindo-se praticamente na única fonte de água para mais de 90% da população local.

Isso resultou na construção de açudes sem auxílio técnico. Assim sendo, uma densa rede de reservatórios foi se desenvolvendo ao longo dos anos. Malveira et al. (2012) realizaram estudo na bacia hidrográfica do Alto Jaguaribe e identificaram cerca de 2.000 açudes em 1970, um acréscimo de aproximadamente 2.000 açudes em 2002 e um total de cerca de 4.700 reservatórios em 2010.

Salienta-se que essa rede é constituída por açudes de diversos tamanhos. Entretanto a Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Ceará (COGERH) monitora apenas 159 açudes em todo o Estado.

Segundo Peter et al. (2014), a rede de reservatórios, mesmo sendo construída sem auxílio técnico possui um formato natural em que reservatórios de pequeno porte se encontram à montante dos reservatórios estratégicos. Essa teoria foi discutida por diversos autores, entre eles Güntner (2002) e Mamede (2008), nos quais os autores identificaram o formato da rede de reservatórios. Em âmbito acadêmico, discute-se sobre o papel dos pequenos açudes. Há estudos que atestam que pequenos reservatórios reduzem o aporte de água aos açudes estratégicos; em outros trabalhos, por exemplo, Lima Neto et al. (2011) os autores relataram que pequenos açudes contribuem com a retenção de sedimento, sendo, portanto, benéficos à rede.

Todavia, a efetiva disponibilidade de água para as comunidades requer a instalação de sistemas de adução e distribuição, ambos com elevado consumo de energia elétrica. Estima-se que entre dois e três por cento do consumo de energia do mundo são usados no bombeamento e tratamento de água para residências e indústrias (JAMES et al., 2002). Coelho e Andrade-Campos (2014) relatam que o aumento com os gastos de energia pode se elevar pela falta de planejamento para a construção das redes de distribuição.

Existe uma preocupação não apenas no setor de abastecimento hídrico, mas em todos os setores da economia na redução com os gastos energéticos. Entretanto, os objetivos dos diversos estudos (DUDHANI et al., 2006; ROCHA, 2014; DE LAVEGA e ALEM, 2015) estão voltados para otimização de energia na rede de distribuição de água, nas estações de tratamento de água e/ou propõem a produção de energia hidráulica em pequeno reservatório ou em rios perenes.

Por outro lado, de Araújo e Medeiros (2013) relataram que os pequenos reservatórios são responsáveis por distribuir água de forma democrática com maior racionalidade energética, como consequência da melhor distribuição espacial dos recursos hídricos. Em concordância Nascimento et al. (2016) também constataram que a introdução de reservatórios de pequeno porte próximos das cabeceiras da bacia, e, portanto, em cotas mais elevadas, promove um aumento de altitude média no que concerne à disponibilidade hídrica do sistema, resultando em um ganho de

energia hidráulica potencial. Dentro desse contexto, a presente pesquisa avaliou o arranjo de reservatórios da bacia hidrográfica do Banabuiú a fim de analisar a eficiência energética do sistema.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar como o arranjo de pequenas, médias e grandes barragens na Bacia Hidrográfica do Banabuiú contribuem para a eficiência energética do sistema.

2.2 Objetivos específicos

- Elaborar cenários de reservatórios a partir de arranjos variados de pequenas, médias e grandes barragens capazes de atender à demanda hídrica populacional da bacia em estudo;
- Calcular a disponibilidade hídrica do sistema nos diferentes cenários de reservação propostos;
- Simular as condições de abastecimento hídrico e calcular a demanda energética nos diferentes cenários de reservação propostos;
- Avaliar como o arranjo de reservatórios contribui com a eficiência energética do sistema hídrico.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Energia e eficiência energética

A geração de energia elétrica através de fontes renováveis tem crescido mundialmente (FITZGERALD et al., 2012). Essa por sua vez, é consequência do crescimento econômico da sociedade contemporânea. Tolmasquim et al., (2007) afirmaram que o Brasil se desenvolveu economicamente no século XX, o que refletiu em uma crescente demanda por energia primária. Hodiernamente, a produção de eletricidade no país é basicamente proveniente de usinas hidrelétricas que foram responsáveis por 64,5% da potência instalada em 2016 (BRASIL, 2017).

As hidrelétricas brasileiras estão distribuídas em sua maioria nas regiões sul e sudeste, onde o potencial para crescimento, atualmente, é baixo. Em contrapartida, as regiões Norte e Centro-Oeste possuem grande potencial para desenvolvimento hidrelétrico (LESSA et al., 2015). Todavia, mesmo com forte abastecimento de energia advindas do setor hidrelétrico o Brasil passou por duas crises recentes.

No início do século XXI o país enfrentou sua primeira deficiência energética, que para Fearnside (2006) esse déficit deu-se pela combinação da falta de planejamento voltada para a infraestrutura e para a geração de eletricidade, do uso inconsciente nos diversos setores, além de problemas governamentais. A segunda crise enfrentada pelo Brasil aconteceu durante o período que se iniciou em 2013 e que foi até 2015, causado por uma das maiores crises hídricas da história (HUNT et al., 2017), na região sudeste onde estão concentradas grandes hidrelétricas.

Contudo, mesmo com a possibilidade de crises energéticas, quando se compara a produção em centrais hidrelétricas com energias geradas a partir de combustíveis fósseis, por exemplo, seu impacto no meio ambiente torna-se menor (BOTELHO et al., 2017). Não obstante, as construções das usinas hidrelétricas causam diversos impactos ambientais e sociais (FEARNSIDE, 2016). Entretanto, as hidrelétricas são fontes de “segurança elétrica” (YÜKSEL, 2010).

A produção de energia hidrelétrica por bombeamento dar-se pelo armazenamento da energia potencial da água. O processo de carregamento converte energia mecânica em energia elétrica através da passagem da água por

turbinas que bombeiam água de um reservatório de montante para um reservatório de jusante (BARBOUR et al., 2016). Esse tipo de sistema foi comercialmente implantado desde a década de 1980, todavia, só na década de 2000 houve maior interesse na ampliação de hidrelétricas pelo mundo (YANG, 2016).

Dentro do eixo da produção de energia elétrica em sistemas hídricos a geração de energia através das Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH's) tem se tornado uma realidade. Okot (2013) relatou que esses sistemas são comuns nas áreas rurais dos países desenvolvidos e em desenvolvimento e são incluídos de forma sustentável nas redes energéticas.

Mishra e Khatod (2011) discorreram sobre a geração de energia em pequenos reservatórios e afirmaram que essas estruturas possuem diferentes usos associados, entre eles: a geração de energia, abastecimento humano e animal, irrigação, prevenção de inundações e proteção ambiental. Outros pesquisadores afirmaram que os projetos das PCH's são elaborados no fluxo dos rios evitando impactos ambientais a montante e a jusante (SANDT e DOYLE, 2013).

Segundo Dudhani et al. (2006), quando comparada com as demais fontes de energias renováveis as micro hidrelétricas possuem elevada densidade. É importante salientar que as pesquisas sobre esse tipo de geração de energia ainda são bastante discutidas na área acadêmica, por se tratar de uma alternativa recente.

A identificação de locais para a construção e exploração de pequenas centrais hidrelétricas em muitos casos é limitada devido à falta de informações, por exemplo, da topografia e hidrologia. Nesses casos o uso de sensoriamento remoto para elaboração de estudos é uma realidade (FITZGERALD et al., 2012; LARENTIS, et al., 2010; KUSRE, et al., 2010).

Diante ao exposto, é perceptível que a produção de energia elétrica através de hidrelétricas de diversos tamanhos é uma prática corriqueira. Entretanto, existem regiões brasileiras em que a produção desse tipo de energia é fraca, como no nordeste brasileiro que possui baixa disponibilidade de água. Todavia, essa região possui geração de energia solar e eólica. Jong et al. (2013) escreveram sobre o assunto e apresentaram dados consistentes na área. Vale ressaltar que o Nordeste não possui cadeia energética autossuficiente, estando sujeito às oscilações do sistema.

A eficiência energética se refere a ações de diversas naturezas, culminando na redução da energia necessária para atender às demandas da sociedade por serviços, sob forma de luz, calor/frio, acionamento, transportes e uso em processos (BRASIL, 2011). Nos anos 2000 foi sancionada a Lei 9.991, de 24 de julho que “dispõe sobre a realização de investimentos em pesquisa e desenvolvimento em eficiência energética por parte das empresas concessionárias, permissionárias e autorizadas do setor de energia elétrica e das outras providências” (BRASIL, 2000). Hodiernamente, a lei passou por reparos (Lei 13.280, de 3 de maio de 2016) e uma das definições da mesma é direcionar as empresas a investirem em pesquisa no setor de eficiência energética.

Cientificamente, Bukarica e Tomšić (2017) definiram a eficiência energética como uma estratégia básica para equilíbrio da energia no meio e o principal instrumento para resolver três problemas: alterações climáticas, segurança energética e crescimento da economia. Ambientalmente falando, a eficiência em sistemas energéticos e hidráulicos são metas para o desenvolvimento sustentável (ROCHA, 2014).

Todavia, em países desenvolvidos, o custo do abastecimento de água pode facilmente representar metade do orçamento do município (JAMES et al., 2002). Os mesmos autores ainda frisaram que em porcentagem, o consumo mundial de eletricidade, destinado ao setor de abastecimento de água e tratamento de esgotos para residências urbanas e industriais, é entre 2 e 3%.

É notório que os custos com energia elétrica para tratamento, bombeamento, e infraestrutura com redes de distribuição são elevados. Segundo o Ministério de Minas e Energia, o sistema de abastecimento de água consome 9.812.457 MWh/ano (BRASIL, 2011). O percentual é semelhante ao mundial, sendo que, desse total, mais de 90% da energia destina-se ao uso de motores e bombas (PROSAB, 2009), o que justifica a busca pela eficiência energética nesses sistemas.

Camboim (2012) afirmou que a ineficiência em um sistema de abastecimento é consequência da utilização de equipamentos com baixo rendimento, perda de carga elevada, falta de manutenção dos sistemas, etc. O mesmo autor ratificou que a qualidade pode ser melhorada com o uso de sistemas computacionais (por exemplo, controle fuzzy, programação não linear) e equipamentos eficientes e sofisticados.

Perroni (2005) relatou que no Brasil, desde 1983, várias ações vêm sendo desenvolvidas por grandes órgãos de saneamento devido ao aumento gradativo das tarifas de energia elétrica. Essa preocupação está sendo pesquisada mundialmente, a exemplo, Li et al. (2008) desenvolveram modelo para otimização e gerenciamento dos recursos hídricos utilizando técnica fuzzy e programação linear de intervalo.

Em 1994, Ormsbee e Lansey (1994) já estudavam o controle ótimo para sistemas de bombeamento em abastecimento de água e sugeriram que os componentes básicos para controle na rede são: modelos de rede hidráulica, modelos de previsão de demanda e modelos de controle ótimo.

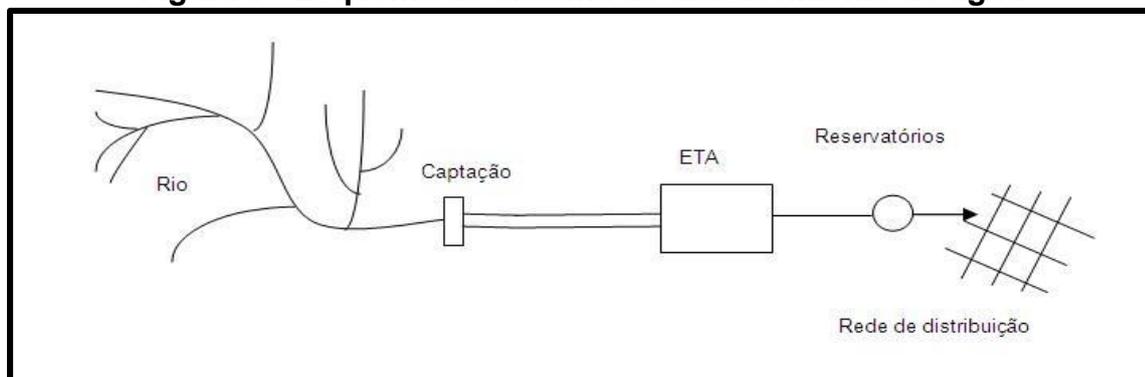
Outro fator importante para uma efetiva eficiência energética no sistema é a qualidade dos recursos hídricos. Martins (2014) descreveu que até o final do século XIX, o controle da qualidade da água para consumo humano era feito sem caráter científico avaliando a aparência sobre o consumo. No decorrer dos anos os estudos sobre tratamento de água foram avançando (LIU et al., 2017; SANTHOSH et al., 2016; ZHANG, et al., 2017).

Atualmente, os sistemas de tratamento de água são robustos e fornecem água tratada para todos os setores. A composição desse sistema impacta diretamente sobre o consumo excessivo de energia e foi discutida por Pádua e Eller (2010). Um sistema simples de abastecimento de água é composto pelas seguintes unidades (Fig. 1):

- Manancial: fonte de água responsável pelo abastecimento do sistema, os mananciais podem ser superficiais ou subterrâneos;
- Captação: estrutura responsável por extrair a água nos mananciais e transportar para os locais de uso;
- Adução: destina-se a transportar a água interligando as unidades desde a captação até a distribuição na rede.
- Estações elevatórias: são utilizadas quando a água atinge níveis elevados, vencendo os desníveis geométricos;
- Estação de Tratamento de Água (ETA): etapa que compatibiliza a água ao requerido pela legislação;

- Reservatórios: destinam-se, principalmente, a compensação entre vazão de produção e a de consumo;
- Rede de distribuição: é composta por tubulações, peças e é construída nas cidades com objetivo de distribuir água nas comunidades.

Figura 1 - Esquema do sistema de abastecimento de água



Fonte: adaptado de Pádua e Eller (2010)

Diante das informações sobre o formato da rede de distribuição de água e os custos energéticos, necessários para a manutenção e funcionamento da rede, a Eletrobrás elaborou um manual prático para obter eficiência energética nos sistemas de abastecimento de bombeamento e sugere algumas medidas para que os sistemas alcancem os objetivos:

“Reduzir as perdas por vazamento, reduzir a altura manométrica – uso de mais de um reservatório, reposicionamento, reduzir a perda de carga aumentando o diâmetro da tubulação, melhorar a rugosidade, deslocar o horário de energia do horário de ponta, usar reservatórios de jusante e abastecimento em marcha, etc.” (BRASIL, 2011).

É notório que os recursos hídricos e a energia estão intrinsecamente relacionados (FANG e CHEN, 2017). Para Abegaz e Mahajan (2017) o crescente número de estudos sobre essa interdependência (água e energia) é causada pela crise climática que provoca incerteza tanto na disponibilidade hídrica quanto na produção de eletricidade. Hamicheet al. (2016) arguíram que a capacidade da sociedade de lidar com as incertezas do nexos entre água e energia é resultado da limitação sobre a compreensão da natureza e pela falta de instrumentos políticos.

3.2 Recursos hídricos e rede de reservatórios do semiárido

A escassez de recursos hídricos ocorre em âmbito internacional e é influenciada por condições locais de clima e demanda hídrica, podendo ser intensificada por mudanças climáticas (NKKHONJERA, 2017; De ARAÚJO e BRONTESRT, 2016)

No Brasil, durante a década de 2010, diversos Estados passaram por uma limitação dos recursos hídricos. Esse fenômeno não é diferente no semiárido do Nordeste Brasileiro (NEB). A região é caracterizada por período de escassez hídrica, pois, os processos hidrológicos apresentam elevada variabilidade temporal (MEDEIROS e ARAÚJO, 2014). Entretanto, os períodos de secas estão cada vez mais prolongados o que pode ser resultado dos efeitos climáticos causados por ações antropogênicas.

Seca é um fenômeno que causa a escassez de água em um determinado tempo (ZOMBRANO, et al, 2017). Entretanto, a definição torna-se mais complexa quando se analisa seca como um processo natural, econômico e social. Para a *National Drought Mitigation Center*, (2017) a seca é um perigo capcioso da natureza. É um desequilíbrio natural, mas temporário, da disponibilidade de água, consistindo de uma precipitação persistente inferior à média, de frequência, duração e severidade incertas, de ocorrência imprevisível ou difícil de prever, resultando na diminuição da disponibilidade dos recursos hídricos e capacidade de suporte dos ecossistemas (PAULO e PEREIRA, 2006).

Diferenças nas variáveis hidrometeorológicas e fatores socioeconômicos, bem como a natureza das demandas por água, em diferentes regiões ao redor do mundo, tornaram-se óbices para uma definição precisa de seca. Desta forma, na prática, a seca é definida por distintos ramos que refletem várias perspectivas e interesses sendo comumente classificada como meteorológica, de agricultura, hidrológica ou socioeconômica (MISHRA e SINGH, 2010). E, mais recentemente, em seca ecológica que inclui perda de crescimento de plantas, aumento de surtos de insetos, aumento de incêndios e extinção de espécies (NMDC, 2017). A tabela 1 ilustra a classificação e as distintas definições para cada tipo de seca.

Tabela 1 - Secas: classificação e definições

Tipo de Seca	Definição
Meteorológica ¹	É definida como um déficit de precipitação sobre uma região durante um período de tempo.
Hidrológica ¹	Está relacionada a um período com recursos superficiais e subterrâneos inadequados para os usos de água estabelecidos para um determinado sistema de gestão de recursos hídricos.
Agrícola ¹	Comumente refere-se a um período com a diminuição da umidade do solo e consequente declínio de culturas agrícolas, sem qualquer referência aos recursos hídricos superficiais
SócioEconômica ¹	Está associada ao fracasso dos sistemas de recursos hídricos em atender as demandas de Água e assim associar as secas à oferta e demanda de um bem econômico – água.
Ecológica ²	É definida como um déficit prolongado e generalizado dos suprimentos de água naturalmente disponíveis, incluindo mudanças na hidrologia natural e gerenciada, os quais criam múltiplos estresses nos ecossistemas.

Fonte: [1] Mishra e Singh (2010); [2] NMDC (2017)

O nordeste brasileiro destaca-se por ser a região semiárida com maior índice populacional. Estima-se que tenha aproximadamente 20 milhões de habitantes em uma área de quase um milhão de km², incluindo nove estados federais (De ARAÚJO et al, 2006). Essa densidade populacional em uma região com elevada escassez hídrica só é possível devido ao desenvolvimento de técnicas de sobrevivência na área.

Construídos como alternativa para os períodos de escassez hídrica, os reservatórios superficiais se tornaram a principal fonte de abastecimento hídrico. Essas estruturas funcionam como regularizadores de vazão, acumulando água no período de cheia e liberando no período de estiagem. Em regiões semiáridas, os açudes regularizam em média 40% da vazão afluente, os 60% restantes são perdidos entre evaporação e/ou extravasamento (CAMPOS, 2005).

Historicamente falando, conta-se que a construção de açude se deu quando os homens iniciaram revolução agrícola, onde eles passam de nômades, que transitavam em busca de alimentos, para viverem em locais fixos. No Brasil, o processo na construção de açude iniciou no século XIX a partir da construção do reservatório Cedro, Ceará. Somente em 1906 o Açude Cedro foi concluído, mas já havia diversos reservatórios de todos os tamanhos. No século seguinte foi criado o principal gerenciador o Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS) (ASSUNÇÃO e LIVINGSTONE, 1993).

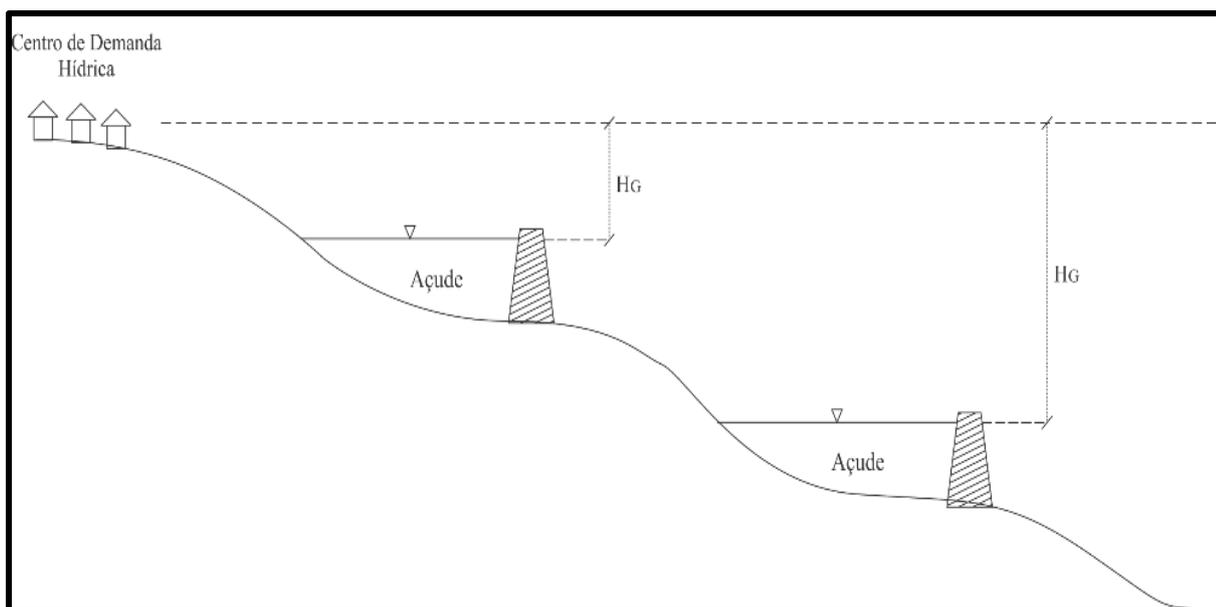
Silva (2012) relatou que a expansão da construção de reservatórios, principalmente, no NEB, foi resultado das intervenções políticas, econômicas e

técnicas, chamada pelo autor de “politécnica” e foi realizada por trocas por voto, propagando uma densa rede de açudes. Em concordância, De Araújo e Medeiros (2013) frisaram que muitos reservatórios foram construídos sem instruções técnicas.

Contudo, deu-se ênfase para a construção de pequenas barragens. A principal vantagem na construção dessas estruturas é o fato de elas atenderem comunidades rurais mais remotas, contribuindo para o cultivo de sequeiro e/ou em vazante, abastecimento humano, animal, cultivo de peixes, entre outras funções. Devido sua importância para a vida do homem do campo, uma densidade de pequenas barragens foi construída ao longo do tempo. Estudo realizado por Malveira et al. (2012), na bacia hidrográfica do Alto Jaguaribe, identificou-se a existência de milhares de pequenos açudes, com área média de contribuição direta que pode chegar a 6,6 km²/açude.

Liu et. al (2010) argumentaram que a espacialização da água é uma tendência que contribui na gestão dos recursos hídricos, na geração de energia e na tomada de decisões pelo governo ou pela comunidade. Além disso, a rede de pequenos açudes auxilia na retenção de sedimento (LIMA NETO et al., 2011), e ainda armazena água em cotas mais elevadas, proporcionando ganho de energia hidráulica potencial e diminuindo custos com energia elétrica para bombeamento (ver Figura 2) (NASCIMENTO et al., 2016). Portanto, pressupõe-se que estruturas como pequenos açudes possam maximizar o acesso a água em diversos setores.

Figura 2 - Croqui do posicionamento dos açudes na bacia hidrográfica.



Fonte: Autora, 2018.

4. METODOLOGIA

4.1 Área de estudo

O estudo foi aplicado na Bacia Hidrográfica do Banabuiú (BHB), no sertão central do estado do Ceará, Brasil (Fig. 2). A região está inserida no “Polígono das Secas”, que contempla nove estados, todos do nordeste brasileiro (exceto o Maranhão) e parte do estado de Minas Gerais (DE ARAÚJO et al., 2006).

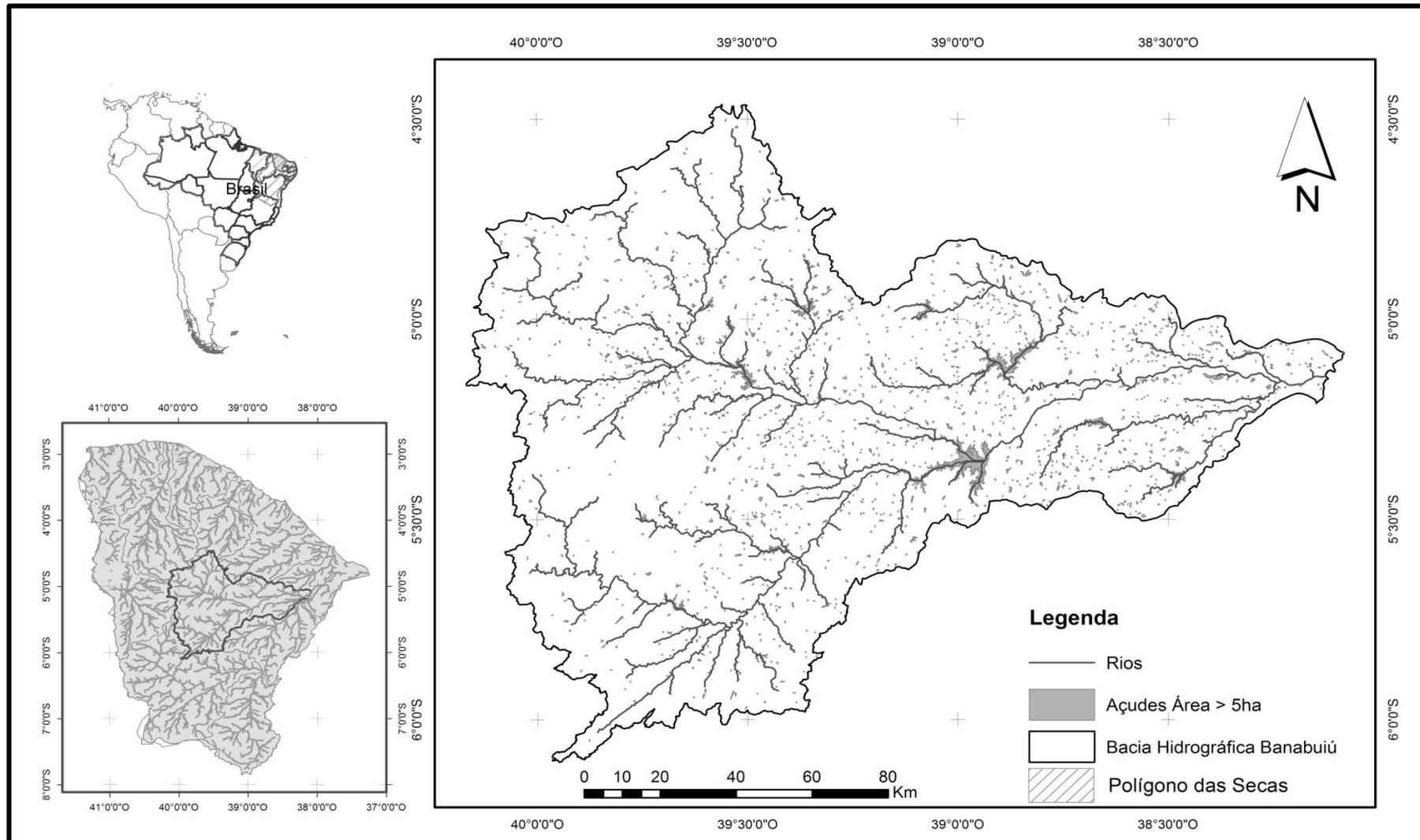
A bacia drena 15 municípios: Banabuiú, Boa Viagem, Ibicuitinga, Itatira, Madalena, Mombaça, Monsenhor Tabosa, Morada Nova, Pedra Branca, Piquet Carneiro, Quixadá, Quixeramobim, Senador Pompeu, Limoeiro do Norte e Milhã, estão inseridos no sertão central do Ceará; contempla uma área de 19.810 km² e seu principal corpo hídrico, o rio Banabuiú, percorre um curso de 314 km (CEARÁ, 2009).

A região possui clima semiárido ‘Bs’ (Gaiser et al., 2003). As temperaturas médias anuais estão em torno de 27 °C, com média pluviométrica anual de 725 mm (CEARÁ, 2009) e taxa de evaporação média de 2.000 mm/ano (DE ARAÚJO e PIEDRA, 2009). Na região, predominam as unidades geomorfológicas da depressão sertaneja e os maciços residuais, a declividade máxima é de 15° (CEARÁ, 2011).

Consoante ao armazenamento de água superficial, na BHB existe 18 reservatórios estratégicos monitorados pela Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH) com capacidades entre 1.070.000 a 1.601.000.000 m³. Entretanto, a bacia possui uma densa rede de reservatórios de diversos tamanhos.

Com base no estudo de Pekel et al. (2016), na BHB é possível visualizar cerca de 3.300 reservatórios maiores que 1 hectare. Todavia, Ceará (2008) identificou cerca de 5.800 açudes de diversos tamanhos e, em trabalho com objetivo semelhante, a Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME), mapeou os reservatórios com área maior que 5 ha e identificou 1.415 açudes na referida bacia (FUNCEME, 2008).

Figura 3 - Região semiárida brasileira e bacia hidrográfica do Banabuiú. Na BHB estão todos os reservatórios com área maior que 5 hectares.



Fonte: Autora,2018

4.2 Arranjos de reservatórios

Com base no mapeamento da FUNCEME (2008), se identificou o arranjo de armazenamento hídrico para a BHB. A bacia foi dividida em 13 sub-bacias, tendo como exutório alguns dos açudes estratégicos monitorados pela COGERH (Tabela 2). A quantificação de açudes, por sub-bacia, foi desenvolvida na ferramenta ArcGis 10.2. Utilizou-se o *shapefile* com o mapeamento dos reservatórios com bacia hidráulica maior que 5 ha (FUNCEME, 2008).

Tabela 2 - Característica dos reservatórios estratégicos da bacia do Banabuiú.

Nome	Reservatórios da BHB		Quantidade de açudes por classe				
	Capacidade do açude m ³	Área da bacia Km ²	1	2	3	4	5
Arrojado Lisboa	1.601.000.000	14.244	204	84	31	12	1
Cedro	126.000.000	213	8	0	0	0	1
Cipoada	86.090.000	361	27	17	5	5	1
Curral Velho	12.165.745	85	6	5	1	2	1
Fogareiro	118.868.346	4.115	144	38	30	11	1
Patu	63.906.297	993	22	8	6	3	1
Pedra Branca	434.040.000	1.987	89	65	26	1	5
Pirabibu	74.000.000	510	17	6	8	4	1
Poço do Barro	52.000.000	383	28	16	2	2	1
Quixeramobim	54.000.000	7.013	91	16	18	7	1
Serafim Dias	40.936.943	1.624	22	8	6	3	1
Umari	35.040.000	991	12	3	4	0	1
Bacia Não Controlada	0	2.509	178	48	33	10	1

Fonte: Autora

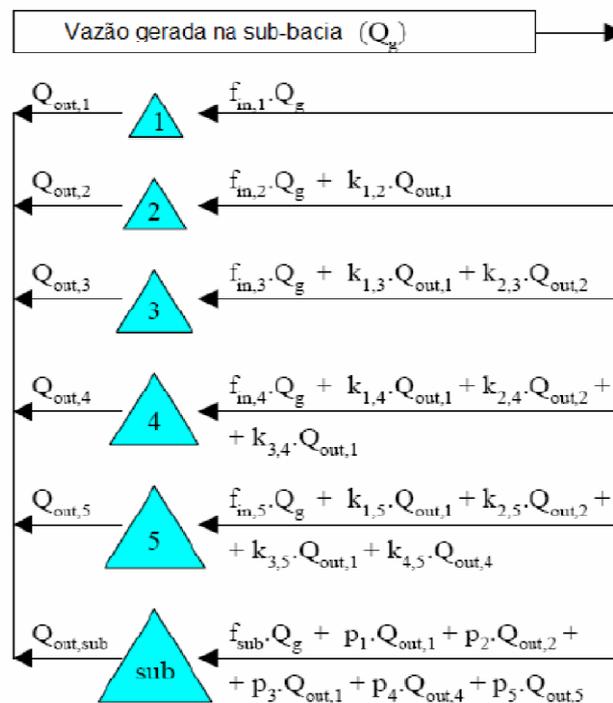
A definição de arranjos de armazenamento de água na Bacia do Banabuiú, compostos por diferentes configurações de açudes, tem por objetivo avaliar como a quantidade de barragens, em diferentes classes e distribuição espacial, impacta sobre a disponibilidade hídrica e demanda energética para distribuição da água.

Conforme descrito por Malveira et al. (2012), a inclusão de novos açudes na rede de reservatórios tende a aumentar a disponibilidade hídrica do sistema havendo restrição hidráulica, ou seja, enquanto existe excesso de água associada a uma capacidade de acumulação reduzida. Com a crescente inclusão de novas estruturas de armazenamento, em determinado ponto se atinge a saturação, a partir do qual a vazão regularizada por novos açudes é menor que a redução da disponibilidade hídrica dos açudes maiores impactados pela nova configuração. A partir desse ponto, a disponibilidade hídrica do sistema sofre redução com a inclusão

de novos açudes, provocada pela restrição hidrológica (elevada capacidade de acumulação, porém escoamentos relativamente baixos).

A rede de reservatórios segue um padrão já detectado em bacias hidrográficas do semiárido brasileiro em estudos pretéritos (GÜNTNER et al., 2004; MALVEIRA et al., 2012), geralmente com açudes pequenos situando-se a montante de açudes maiores. Nesse modelo, a vazão afluente a cada reservatório é constituída pela soma da sua bacia de contribuição direta (Q_g) com as vazões vertidas (Q_{out}) dos reservatórios de montante.

Figura 4: Representação do sistema cascata de reservatórios sugerida por Guntner (2004).



Fonte: GUNTNER et al. (2004)

No presente trabalho, os reservatórios foram distribuídos em cinco classes, a combinação foi realizada de acordo com a capacidade de armazenamento dos açudes (Tabela 3).

Tabela 3 - Classes dos reservatórios de acordo com a capacidade (m³).

Classe	Volume (m³)
1	50 - 200.000
2	200.000 - 500.000
3	500.000 - 2.000.000
4	2.000.000 - 35.000.000
5	> 35.000.000
6	Arrojado Lisboa

Fonte: Autora (2018)

Para avaliar os diversos cenários da disponibilidade hídrica da bacia foram estabelecidos seis arranjos de reservatórios, são eles:

Arranjo 1: Cenário Real;

Arranjo 2: Somente os reservatórios de classes 2 a 5;

Arranjo 3: Somente os reservatórios de classes 3 a 5;

Arranjo 4: Somente os reservatórios de classes 4 a 5;

Arranjo 5: Somente os reservatórios de classe 5;

Arranjo 6: Apenas o açude Arrojado Lisboa.

4.3 Capacidade dos reservatórios

Devido à falta de informações sobre a rede de reservatórios, se estimou a capacidade dos açudes através do método de Pereira et al. (em revisão). Além disso, somou-se a capacidade dos açudes por município, a fim de saber a capacidade de armazenamento em cada um.

Pereira et al. (em revisão) caracterizaram a geometria das barragens de pequeno e médio porte e analisaram os coeficientes geométricos por sensoriamento remoto (Eq. 1 e 2), tendo como base os estudos de Molle e Cardier (1994).

$$V = V_0 + A_0 \cdot h + K_{\text{mod}} \cdot h'^{\alpha_{\text{mod}}} \quad \text{Eq. 1}$$

$$A = A_0 + \alpha_{\text{mod}} \cdot h'^{(\alpha_{\text{mod}}-1)} \quad \text{Eq. 2}$$

A metodologia estabelece 3 classes para os coeficientes através da variação da área máxima inundada (m²) (Tabela 3).

Tabela 4 - Coeficientes de abertura e de forma calculados por Pereira et al., (em revisão) para os reservatórios do estado do Ceará, Brasil.

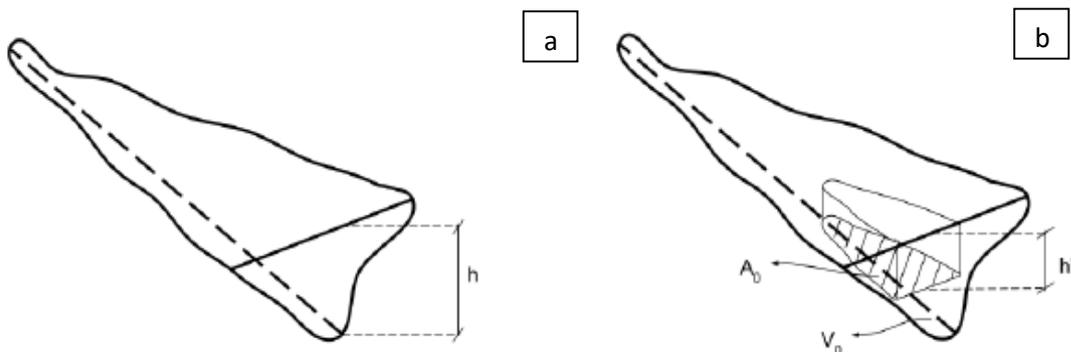
Características das Classes	Classes			
		1	2	3
Variação da área máx inundada m ²	Min	5.10E+04	3.50E+05	6.40E+05
	Máx	3.50E+05	6.40E+05	3.20E+06
α_{mod}		2.58	2.67	2.96
K_{mod}		3.136	5.342	4.942

Fonte: adaptado (Pereira et al. em revisão)

Em que: V_0 é área inicial de referência (2096 m³), A_0 área inicial de referência (5.000 m²). K_{mod} coeficiente de abertura modificado, α_{mod} coeficiente de forma modificado, h' altura da água acima da linha de referência.

A fim de diminuir as incertezas na estimativa da Cota Área Volume - CAV, Pereira (2017) estabeleceu uma área e volume de referência inicial (Fig. 4) arbitrariamente de 5.000 m² e 2096 m³, respectivamente, o que facilita o cálculo dos coeficientes modificados α e k .

Figura 5 - Formato dos reservatórios recomendado por Molle (a) e a equação modificada proposta por Pereira (2017) (b).



Fonte: Pereira (2017)

4.4 Demanda hídrica

A demanda de água para abastecimento humano de cada localidade foi calculada através do produto da vazão *per capita* pela respectiva população. As informações dos municípios e dados populacionais foram obtidas do Instituto Brasileiro Geografia e Estatística - IBGE (BRASIL, 2016) com base no censo 2010. A população foi estimada para o ano de 2015 pelo IBGE e adota neste estudo. Os dados populacionais de cada município foram divididos por região rural e urbana e computados proporcionalmente por comunidade. Essas, por sua vez, são localidades e/ou bairros identificados pelo IBGE, de maneira tal que cada município tem várias comunidades. A taxa de consumo *per capita* utilizada foi de 100L/hab.dia.

4.5 Levantamento de dados secundários para simulação da disponibilidade hídrica

4.5.1 Escoamento

Para a simulação da disponibilidade hídrica de reservatórios, foi necessário o conhecimento prévio das afluências aos mesmos. Informações de escoamento podem ser obtidas de forma direta em bancos de dados como o Sistema de Informações Hidrológicas da Agência Nacional de Águas – HIDROWEB, de maneira indireta através de equações empíricas ou a partir do cálculo do balanço hídrico em reservatórios monitorados (NASCIMENTO, 2015).

Por exemplo, Nascimento (2016) realizou o zoneamento dos postos fluviométricos no Ceará e relatou que na bacia do Banabuiú, apenas dois postos encontram-se em operação e contêm séries consistentes de dados de vazão: Morada Nova II e Senador Pompeu. Assim sendo, o escoamento na bacia foi calculado utilizando o método empírico do Número de Curva - CN.

Esse modelo chuva-escoamento consiste em calcular a lâmina de escoamento através dos dados de precipitação em bacias hidrográficas de pequenas escalas analisando os dados pedológicos e a ocupação do solo, conforme definidos pelo Serviço de Conservação do Solo (SCS) (USDA, 1986). O modelo é mundialmente utilizado (CARLESSO et al, 2011; EL-HAMES, 2012; ISIK et al, 2013; DESHMUKH et al, 2013).

A equação empírica do modelo é expressa matematicamente pela seguinte equação:

$$Q = \frac{(P - 0,2 \cdot S)^2}{P + 0,8 \cdot S} \quad \text{Eq. 3}$$

Em que: Q (mm): escoamento superficial; P (mm): precipitação; S (mm) é a retenção potencial do solo.

O parâmetro S é estimado através da curva adimensional e é calculado a partir da seguinte equação:

$$S = \frac{254 \cdot (100 - CN)}{CN} \quad \text{Eq. 4}$$

Em que: S (mm): retenção potencial do solo; CN: valor retirado do Número de Curva.

Com base nos estudos desenvolvidos pelo SCS, Araújo Neto et al. (2012) realizaram a calibração e validação do CN para diferentes manejos da vegetação caatinga no semiárido brasileiro. Os autores identificaram CN 75, para caatinga nativa, com solo em condição 2 de umidade, caracterizada por situações médias nos períodos chuvosos, com chuva acumulada nos últimos cinco dias entre 15 e 40 mm.

No presente trabalho utilizou-se CN 75 para condição de umidade 2, valor calibrado para condições do semiárido brasileiro (ARAÚJO NETO, et al., 2012) e verificado nesta pesquisa comparando-se o escoamento médio anual simulado com os valores medidos em estações fluviométricas da região (Nascimento, 2016). Os dados de precipitação para cálculo do método descrito anteriormente foram obtidos do portal da ANA – HIDROWEB. Apenas três postos pluviométricos possuíam série histórica de cem anos (Quixeramobim – 539016 - 539012, Boa Viagem – 539029, Senador Pompeu - 539037). Os dados de chuva utilizados apresentavam falhas na série histórica, as quais foram preenchidas com dados dos postos mais próximos.

4.6 Disponibilidade hídrica

A oferta da bacia, disponibilidade hídrica, foi estimada a partir da equação do balanço hídrico (Eq. 5). A metodologia foi aplicada, por exemplo, por de Araújo et al., (2006), Fowe et al., (2015), e permite a compreensão da dinâmica da oferta hídrica dos reservatórios.

$$V_{t+1} = v_t + Esc - (Ev + R + Vert) \quad \text{Eq. 5}$$

Em que:

V_{t+1} – volume acumulado no reservatório no final do intervalo de tempo;

V_t – volume acumulado no reservatório no início do intervalo de tempo;

Es – volume escoado na bacia hidrográfica no intervalo de tempo;

Ev – volume evaporado do reservatório no intervalo de tempo;

R – volume retirado do reservatório no intervalo de tempo;

$Vert$ – volume vertido do reservatório no intervalo de tempo;

Adotou-se para o volume acumulado, inicialmente, um quinto da capacidade do açude (DE ARAÚJO et al, 2006). Os dados de evaporação foram obtidos das NORMAIS CLIMATOLÓGICAS (INMET, 2009) para o posto de Quixeramobim, localizado na bacia em estudo. O escoamento na bacia foi calculado utilizando o método empírico do Número de Curva - CN. O volume de retirada dos reservatórios foi estimado a partir das simulações de garantia, considerando-se uma garantia de 90%. Levando em consideração que os reservatórios estão em formato de cascata, como já apresentado anteriormente, a partir da segunda classe, o vertimento excedente da classe anterior soma-se às afluições da classe seguinte, fazendo assim, a conexão entre eles.

4.7 Dados de relevo

Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) é um modelo mundial de elevação digital do terreno (DEM). O valor da elevação é dado em metros, utilizando como referência horizontal e vertical o WGS84 (Rabus et al., 2003). No presente trabalho, utilizou-se o SRTM com resolução de 90 m, fornecido pelo *United States Geological Survey* (USGS). A partir de um *shapfile* com todos os açudes da bacia, e das informações de elevação do terreno, foi possível obter as cotas (m) na ferramenta ArcGis 10.2. O mesmo procedimento foi realizado com os centros de demanda.

4.8 Atendimento das demandas hídricas

Distâncias entre os reservatórios e os centros de demanda

Utilizou-se a ferramenta ArcGis 10.2 para relacionar a distância entre os açudes e os centros de demanda. A informação foi obtida através da função de proximidade (tabela de proximidade) que gerou uma combinação entre cada reservatório e todas as localidades, sem limitações de busca, fazendo todas as combinações possíveis. Como resultado, a ferramenta criou uma tabela em que se registrou o código de identificação (ID) do reservatório “Y” mais próximo à comunidade “X”, que também teve seu ID registrado, e calculado a distância entre eles. O método foi repetido para todas as combinações possíveis. A figura 5 exemplifica o arquivo de saída.

Figura 6: Tabela de proximidade estimada pelo programa ArcGis 10.2. (Imagem ilustrativa)

OBJECTID *	IN_FID	NEAR_FID	NEAR_DIST	NEAR_X	NEAR_Y	NEAR_ANGLE
1	1	2851	375.372699	760138.164133	5276211.017398	-152.681072
		3768	409.757634	743051.000944	5332929.999613	-140.16396
		2864			5222707.156896	-174.596187
		3898			5415323.0	
4	4				5437608.2	
6	7	3819	372.913636	740681.99947	5368182.9	
7	9	3645	171.140982	792837.161781	5310511.6	
8	10	2826	156.86993	772635.642368	5313727.5	
9	11	3832	36.235701	766558.514541	5359417.063716	138.776653
10	12	1204	312.038087		53697801	-87.342416
11	13	1213	321.656185		537000367	-151.126955
12	14	3823	304.849234		5370074.80727	179.541906
13	15	130			5506	179.541906

Fonte: ESRI (2018)

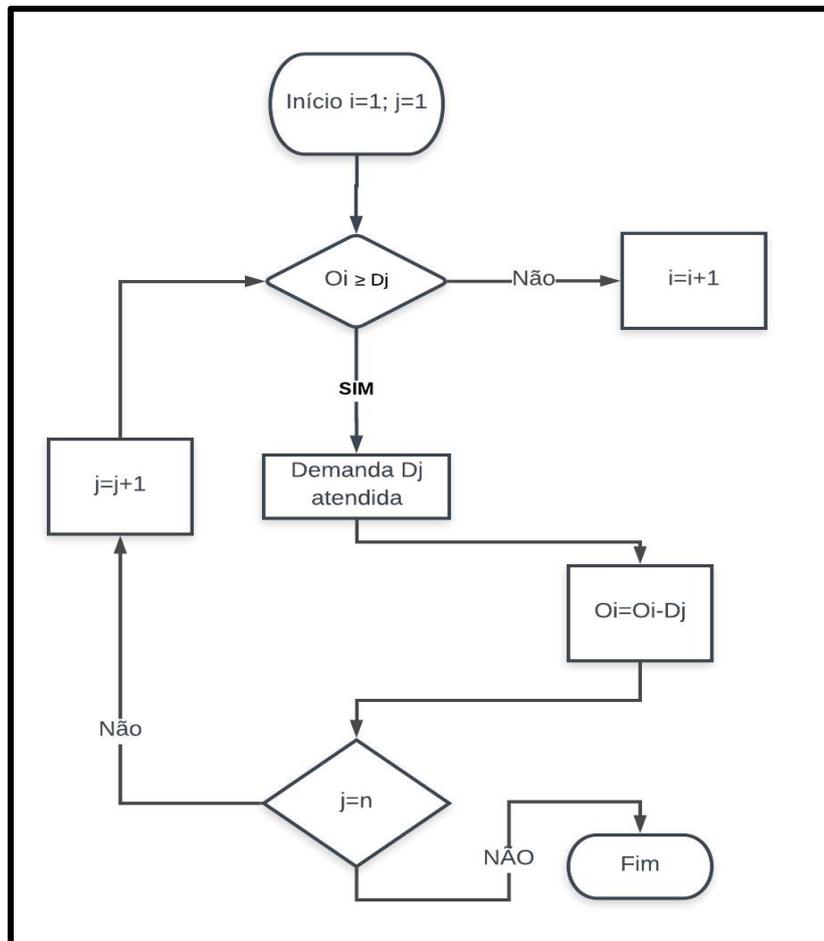
4.9 Definição do arranjo de abastecimento dos centros de demanda pelos reservatórios

Para simular a distribuição da água disponível na bacia, criou-se uma rotina no MATLAB. O programa possui três arquivos de entrada: distância (descrita anteriormente) demanda (arquivo que possui número de identificação de cada localidade e consumo de água), e oferta (arquivo com número de identificação de cada reservatório e a disponibilidade hídrica de cada um por classe). Para cada cenário de reservação na bacia, com exclusão de classes de reservatórios nos arranjos, os açudes das classes excluídas obtiveram oferta igual a zero.

Com essas informações de entrada o programa busca o reservatório mais próximo do centro de demanda “x” capaz de atendê-lo. Se o açude não possuir disponibilidade hídrica suficiente para atender aquele centro de demanda, o

programa busca o próximo açude com menor distância. Caso haja um açude com elevada disponibilidade hídrica, capaz de abastecer vários centros de demanda, a água não utilizada no centro de demanda mais próximo pode ser remanejada para a próxima localidade (Figura 7).

Figura 7: Fluxograma da rotina para definição do arranjo de abastecimento dos centros de demanda pelos reservatórios, em que: D - demanda do distrito; O - oferta do açude; n - número total de centros de demanda.



Fonte: Autora

4.10 Energia

4.10.1 Potência dos conjuntos elevatórios

Os cálculos hidráulicos foram realizados utilizando a vazão demandada para abastecimento humano por cada centro de demanda, a ser suprida pelos reservatórios. A presente pesquisa utilizou a hipótese simplificadora de que as demandas hídricas estavam concentradas no centro das localidades.

Para efeito de simplificação, as adutoras que seriam necessárias para atender todos os centros de demanda foram consideradas como as distâncias em linha reta entre o açude e centro de demanda a ser atendido.

A energia potencial hidráulica foi obtida através do desnível da massa de água (LU e WANG et al., 2017; ROGEAU et al., 2017). No sistema pode ser observado através da equação da potência (Eq. 6).

$$P = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_{man}}{\eta} \quad \text{Eq. 6}$$

Em que: P: Potência do sistema de bombeamento (W) γ : (10.000 N/m³); Q: demanda hídrica do distrito (m³/s); η : Rendimento médio dos sistemas elevatórios (75%), H_{man}: altura manométrica, soma da altura geométrica (diferença entre a cota do centro de demanda e a do reservatório) mais a perda de carga.

O diâmetro, utilizado na equação de Hazen-Williams, foi estimado com base na equação de Bresse (Eq. 7), que calcula o diâmetro econômico da tubulação de recalque (DIOTTO et al., 2014; CHUECO-FERNÁNDEZ et al., 2010). Optou-se por não utilizar o diâmetro comercial, tendo em vista que: i) não é objetivo deste trabalho dimensionar adutoras; ii) na prática, a construção de adutoras se dá de forma ramificada, com um ramal principal e ramais secundários conectados a ele, o que não foi adotado neste estudo. Como resultado, as tubulações adotadas variaram de 20 a 146 mm.

$$D_{eco} = K \cdot \sqrt{Q} \quad \text{Eq. 7}$$

Em que: D_{eco}: diâmetro econômico (m); coeficiente K igual a 1,3 (PERRONI et al. (2011) indicam esse coeficiente para vazões menores que 0,011 m³/s); Q: demanda hídrica (m³/s).

A altura manométrica foi calculada a partir da altura geométrica, diferença de cota (m) entre o centro de demanda e o açude que o abasteceria, somando a perda de carga. A perda de carga, ao longo das tubulações, foi calculada através da equação de Hazen-Williams (Eq. 8).

$$h_f = 10.64 \frac{L}{D^{4.87}} \left(\frac{Q}{C} \right)^{1.85} \quad \text{Eq. 8}$$

Em que: h_f : perda de carga ao longo da tubulação (m); D : diâmetro da tubulação em (m), adotado como o diâmetro econômico obtido pela equação de Bresse; L : comprimento da tubulação, ou seja, a distância entre o centro de demanda e o açude (m); C coeficiente de rugosidade (valor adotado constante e igual a 135), Q : demanda hídrica (m^3/s).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Arranjos de reservatórios

Dos reservatórios com área maior que 5 ha, 63% pertencem à classe 1, 18,5% classe 2, 15% classe 3; 2,65% classe 4 e apenas 0,65% a classe 5. Peter et al. (2014) estudaram a bacia hidrográfica do Alto Jaguaribe, Ceará e verificaram que os pequenos reservatórios (classe 1 e 2) estão em maior concentração. Essas classes representam 97% dos reservatórios da bacia, portanto as classificações nas duas áreas são semelhantes.

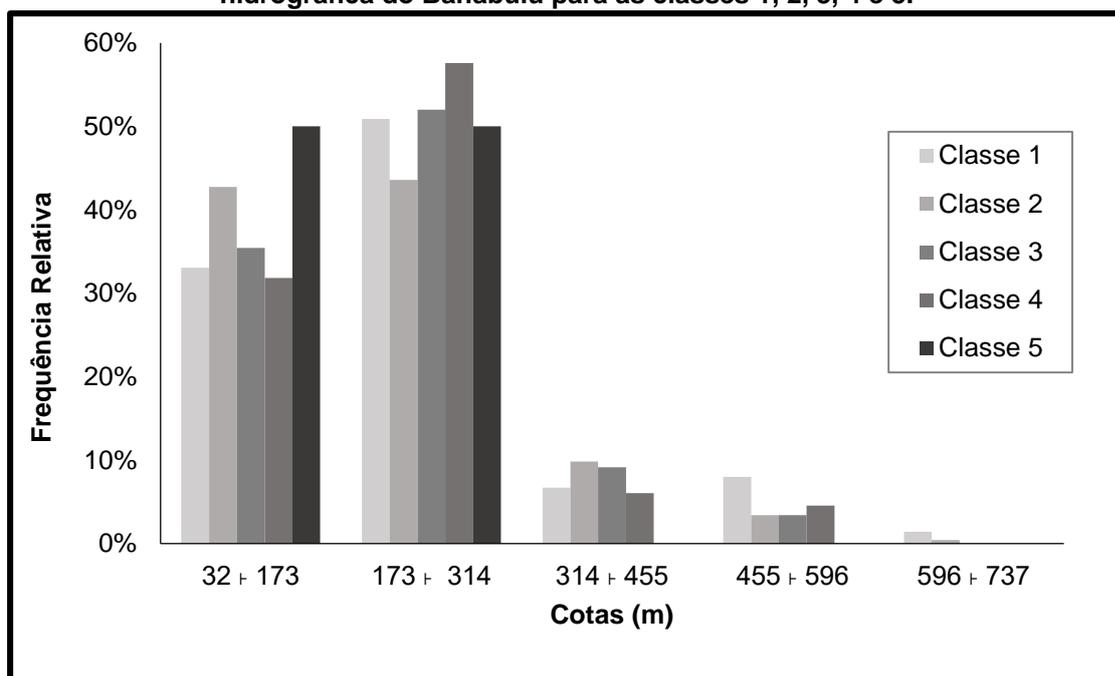
Outros autores relatam que a densidade de pequenos açudes possui pontos positivos, já que contribui maciçamente na retenção de sedimentos, evitando o assoreamento dos corpos hídricos a jusante, além de armazenarem água a montante dos reservatórios estratégicos, diminuindo a sobrecarga dos açudes de grande porte (KROL et al., 2011; LIMA NETO et al., 2011; ISSA et al., 2017).

A bacia hidrográfica do Banabuiú possui 0,07 reservatórios por km². Ghansah et al. (2018) realizaram mapeamento na sub-bacia de White Volta, Gana (49.583 Km²) por imagem de satélite e identificaram 254 reservatórios com área mínima de 1 ha e máxima de 54 ha, ou seja, a região possui 0,005 açudes por km². A razão da quantidade de açudes por km² entre a bacia do Banabuiú e White Volta é igual a 14. Em relação a outras regiões semiáridas o nordeste brasileiro possui maior concentração de açudes. Na BHB a densidade volumétrica, capacidade de armazenamento pela área da bacia, é de 0,14 hm³/km². Malveira et al. (2012), em estudo na bacia hidrográfica do Alto Jaguaribe, relataram que o armazenamento é da ordem de 0,215 hm³/km².

Analisando a rede de reservatórios e sua relação com a cota do terreno, verificou-se que 33% dos reservatórios de classe 1 estão entre as cotas 32 e 172 m, regiões mais baixas. Entretanto, 51% desses reservatórios estão entre as cotas 173 e 314 m. 43% dos reservatórios de classe 2, também considerados açudes de pequeno porte, estão nas cotas mais baixas. 54% estão entre as cotas 173 e 455 m. Os açudes de classe 3 e 4 estão concentrados, assim como os demais, entre as cotas 32 e 314 m. Do valor total, 80% dos açudes estão nesse intervalo de cotas.

Os reservatórios estratégicos encontram - se em cotas mais altas que parte dos açudes de pequeno porte. Por exemplo, as barragens Quixeramobim, Cedro, Fogareiro, Pirabibu, Serafim Dias estão entre as cotas 206 e 257 m. A montante desses reservatórios existem cerca de 280 açudes de classe 1. Desses, 33% estão concentrados na sub-bacia hidrográfica do Quixeramobim e 51% na sub-bacia do Fogareiro. Isso ocorre porque a bacia é caracterizada geomorfologicamente por seus maciços residuais, cuja altitude varia entre 550 e 1.125 m (COSTA et al, 2016).

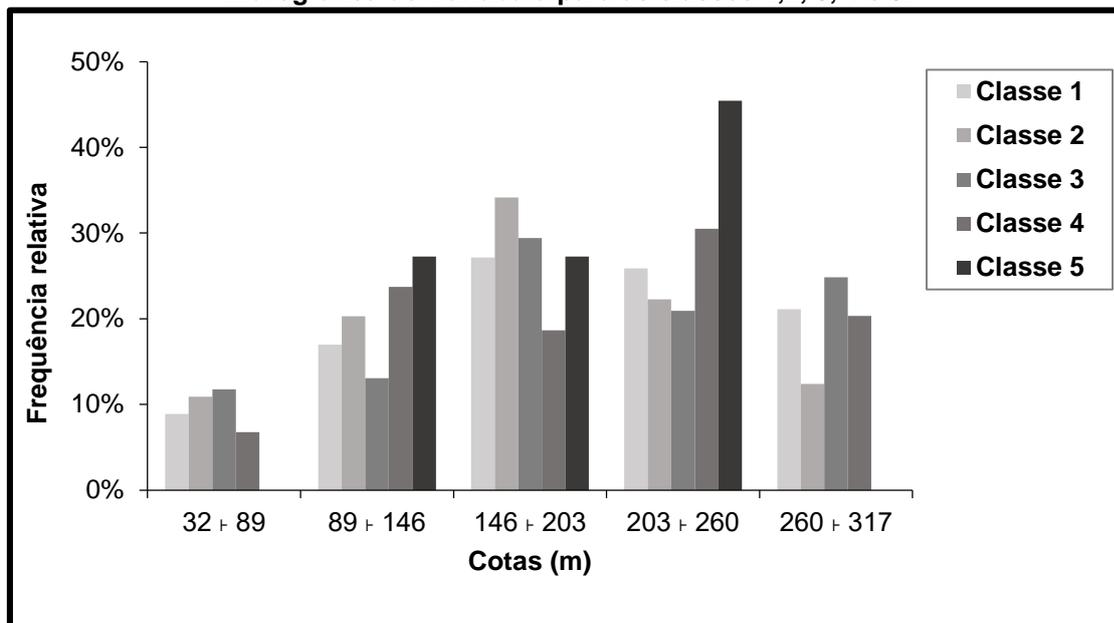
Gráfico 1 - Histograma das cotas, entre o intervalo 32 e 737 m, dos reservatórios da bacia hidrográfica do Banabuiú para as classes 1, 2, 3, 4 e 5.



Analisaram-se os açudes que estão entre as cotas 32 e 317 m (Gráf. 2), intervalo onde estão concentrados maior parte dos reservatórios de classe 1 e 5. Foi possível verificar que 9% dos açudes de classe 1 estão nas menores altitudes desse intervalo (32 a 89 m), onde não há nenhum açude da classe 5. Contudo, 47% dos pequenos reservatórios de classe 1 estão no intervalo entre a cota 203 e 317 m, onde estão também 45% dos reservatórios de classe 5.

Assim como as barragens estratégicas, os reservatórios de classe 4 são grandes armazenadores de água, 31% dessa categoria se encontra entre as cotas 32 e 146 m, contribuindo significativamente para o armazenamento de água nas cotas mais baixas.

Gráfico 2: Histograma das cotas, entre o intervalo 32 e 317, dos reservatórios da bacia hidrográfica do Banabuiú para as classes 1, 2, 3, 4 e 5.

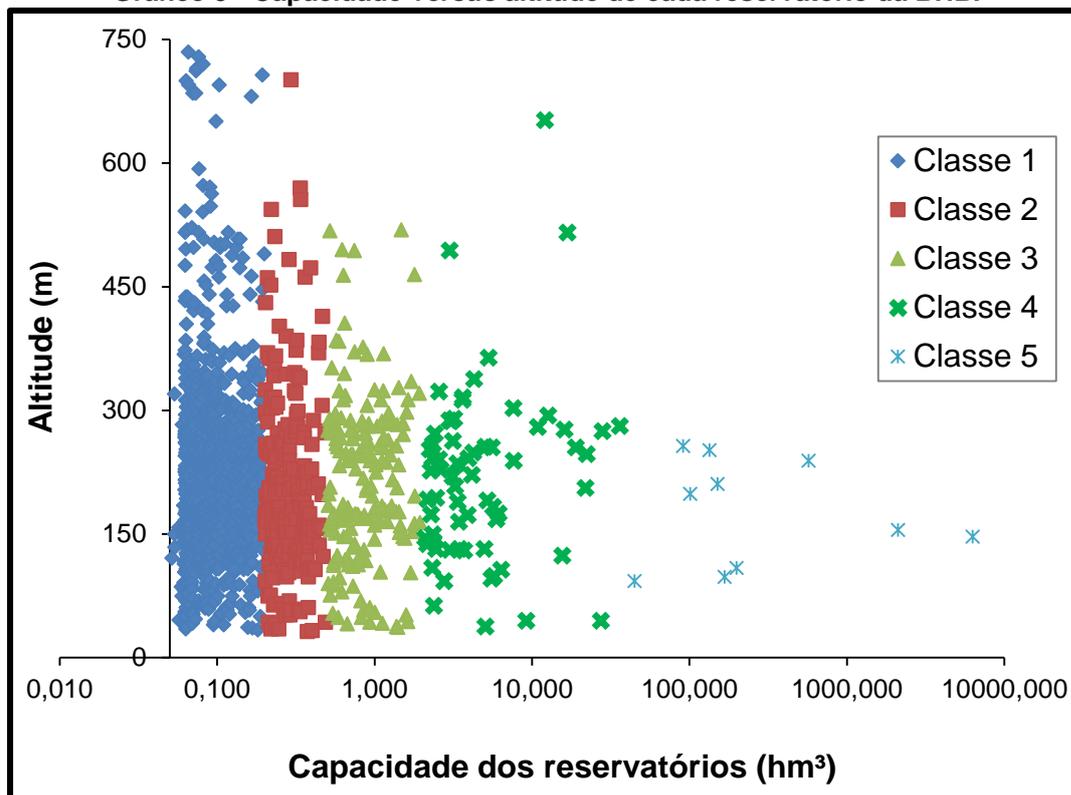


5.2 Capacidades dos açudes

A soma das capacidades dos reservatórios de classe 1 e 2 é de 164 hm³, enquanto reservatórios estratégicos (classe 5) armazenam cerca de 2.698 hm³, dos quais aproximadamente 60% desse volume se encontram na cota 147 m, onde está situado o reservatório Arrojado Lisboa. Ou seja, o volume acumulado nos reservatórios estratégicos é 16 vezes maior que nos de classe 1 e 2 (Gráf. 3).

Os reservatórios de classe 1 e 2, que estão a montante dos estratégicos (acima da cota 257), armazenam no total 50 hm³. Já a capacidade dos açudes de classe 3 e 4 é de aproximadamente 237 hm³. Retirando o açude Arrojado Lisboa os demais reservatórios de classe 5 acumulam 1.097 hm³. Sendo assim, os açudes das demais classes que estão à montante dos estratégicos são responsáveis por 26% da capacidade de armazenamento.

Gráfico 3 - Capacidade versus altitude de cada reservatório da BHB.



5.3 Capacidade de armazenamento dos reservatórios versus demanda hídrica

O mapa com capacidade hídrica (Fig. 7) mostra que os municípios que possuem maior capacidade de acumulação em reservatórios, são: Quixeramobim, Quixadá, Boa Viagem, Mombaça, Pedra Branca e Morada Nova.

Observa-se que o padrão espacial da demanda acompanha o da oferta, municípios com maior capacidade de acumulação são também aqueles que apresentam maiores demandas. Esse comportamento demonstra que pode haver uma demanda reprimida em alguns municípios, ou seja, haveria demanda se houvesse água (por exemplo, no setor agrícola). Vale ressaltar, que essa análise se baseia no abastecimento apenas por reservatórios, não considerando outras fontes hídricas como poços, que são reconhecidamente menos expressivas que as reservas superficiais na região de estudo (CEARÁ, 2009).

Outro fator relevante é que os reservatórios estratégicos fornecem água para os grandes centros de demanda, pois esses possuem infraestrutura de distribuição. Por exemplo, o açude Arrojado Lisboa (1.601 hm³), terceiro maior açude do Estado do Ceará, encontra-se no município de Banabuiú. O atendimento nessa região não atinge muitas vezes a população rural, pois há um déficit na infraestrutura

impossibilitando o atendimento integral do município, ainda que haja oferta no açude. Ciente desse problema, Ceará (2009) sugere a ampliação da capacidade das adutoras e das redes de distribuição em vários municípios da bacia em estudo.

Figura 8: Soma da capacidade (hm³) de todos os reservatórios por município

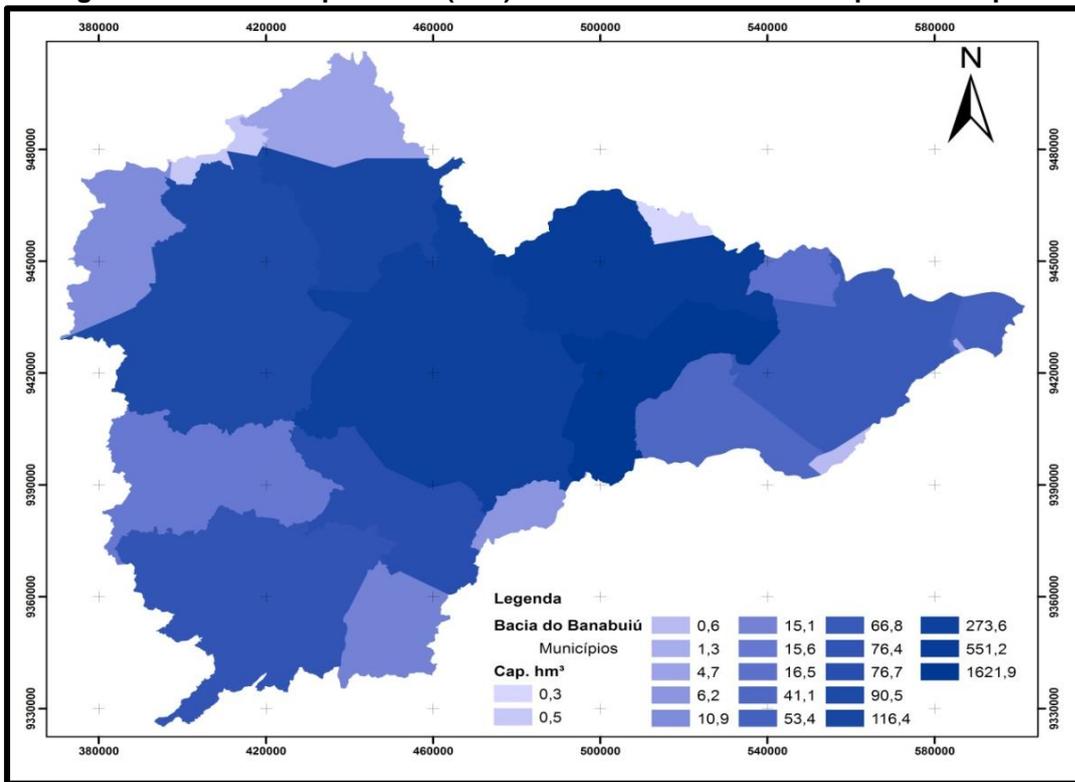
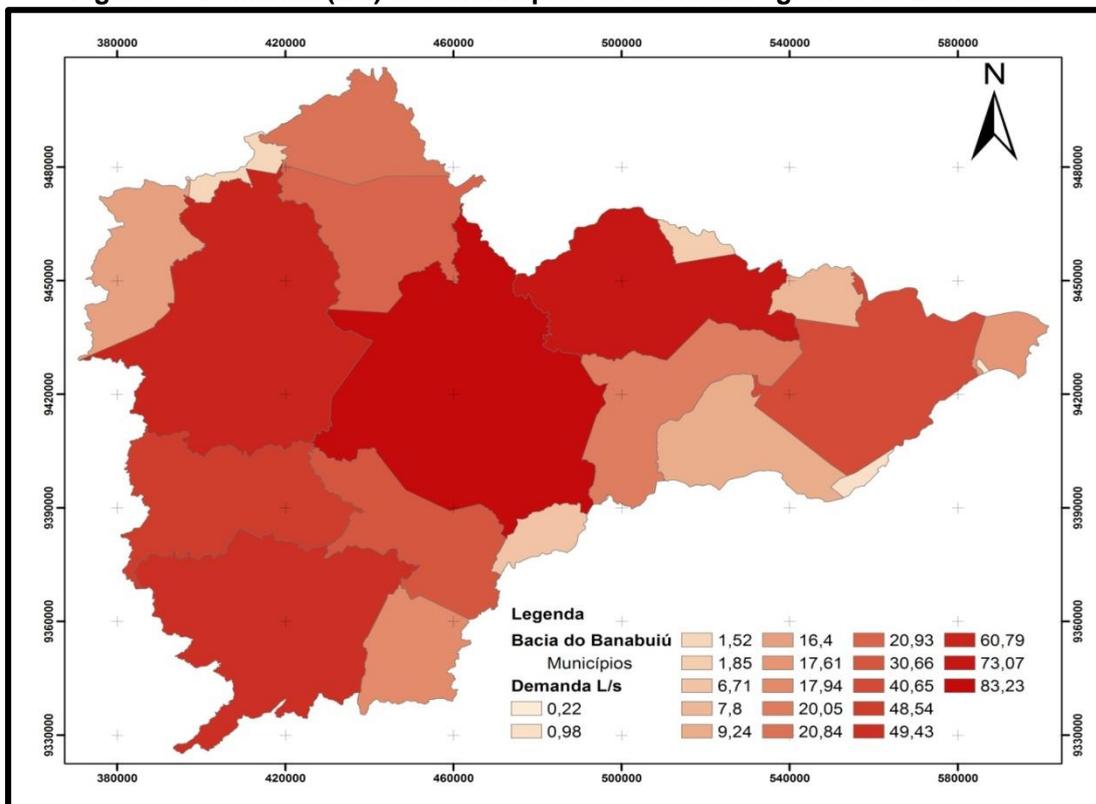


Figura 9 - Demanda (L/s) dos municípios da bacia hidrográfica do Banabuiú.



5.4 Energia requerida para abastecimento humano na bacia do Banabuiú

Nas simulações para o cenário real, observou-se que a potência requerida para bombear água dos açudes para os centros de demanda é de 6.578.634 Kwh/mês. Com essa energia seria possível abastecer cerca de 3.000 residências mensalmente, considerando um consumo de 180 Kwh/mês por residência.

No cenário 2, em que são excluídos os reservatórios com área de até 20 ha, ocorre um aumento na energia requerida, totalizando 9.252.423,9 Kwh/mês. A diferença de energia entre o cenário real e cenário 2 abasteceria 1.238 casas. A quantidade de reservatórios e a capacidade acumulada nesta classe são menores em relação ao cenário 1. Entretanto, a energia requerida é maior que a do cenário anterior, isso ocorre pelo fato de os reservatórios de classe 1 serem excluídos, aumentando a distância e a energia requerida para atendimento de centros de demanda que seriam atendidos por reservatórios de classe 1 no cenário real.

No sul do Brasil, Hunt et al. (2017) relatam que as pequenas centrais hidrelétricas possuem potencial para descentralizar e gerar energia durante as estações secas, sendo, portanto, essas obras responsáveis pelo acréscimo de energia. Neste estudo não se propõe a geração de energia a partir de pequenos açudes, mas se verifica a importância das pequenas estruturas na acumulação de energia hidráulica na bacia.

Os reservatórios do cenário 4 possuem relevante disponibilidade hídrica, entretanto, restringem a distribuição, haja vista que estão em menor quantidade que os reservatórios dos cenários anteriores. Quando analisados os reservatórios de classe 5 verifica-se que os açudes estratégicos gastam mais energia em relação aos demais cenários. Apesar de serem reservatórios com grande potencial de disponibilidade hídrica, precisam de mais energia para distribuir água, uma vez que estão situados em poucos locais e há grandes distâncias de muitos centros de demanda hídrica.

A disponibilidade hídrica na bacia do Banabuiú está apresentada na Tabela 4. É possível verificar que os reservatórios de classe 1 e 2 apresentam baixa disponibilidade hídrica, apesar de possuírem maior quantidade de açudes, em relação às demais classes.

O cenário 3 possui 5 vezes mais açudes que o cenário 4, mas a disponibilidade hídrica é apenas 12% maior que no referido cenário. Isso ocorre por serem açudes com capacidade maior que os das classes iniciais e por estarem em maior quantidade que os açudes do cenário 4.

É também na classe 3 que ocorre a melhor disponibilidade hídrica do sistema. A disponibilidade volta a aumentar quando apenas os reservatórios de classe 5 fornecem água. Por outro lado, se apenas o açude Arrojado Lisboa disponibilizasse água na bacia ocorreria uma perda de 29% em relação ao cenário real. Já em relação ao cenário 3 essa perda seria de 40%.

Tabela 5 - Disponibilidade hídrica nos diversos cenários para as cinco classes de reservatório

Disponibilidade hídrica (m³/mês)						
Cenário	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5	Somatório
1	3.648.047,28	3.886.116,66	9.483.796,55	7.184.369,35	53.679.779,94	77.882.109,78
2		4.234.126,07	10.632.326,30	7.904.588,04	58.303.345,55	81.074.385,96
2		4.234.126,07	10.632.326,30	7.904.588,04	58.303.345,55	81.074.385,96
4				9.916.212,17	71.709.171,38	81.625.383,55
5					82.860.391,79	82.860.391,79
6					54.883.075,76	54.883.075,76

Em relação à energia requerida acumulada para bombear água para os distritos, é possível observar que no cenário em que apenas o açude Arrojado Lisboa fornece água, seria demandado anualmente 195,6 GW/h, cerca de 30 vezes a demanda requerida no cenário real. Essa energia é capaz de abastecer 90.569 casas, se comparada com o cenário 1 a diferença é de 87.523 casas abastecidas.

Guanais et al. (2017) analisaram o consumo de energia elétrica em um sistema de abastecimento de água em Feira de Santana para 21.440.780 m³ e constataram que a demanda de energia acumulada anualmente é de 75,2 GWh/ano, ou seja, a energia requerida no cenário 6 é 2,5 maior que a energia acumulada na referida estação de abastecimento.

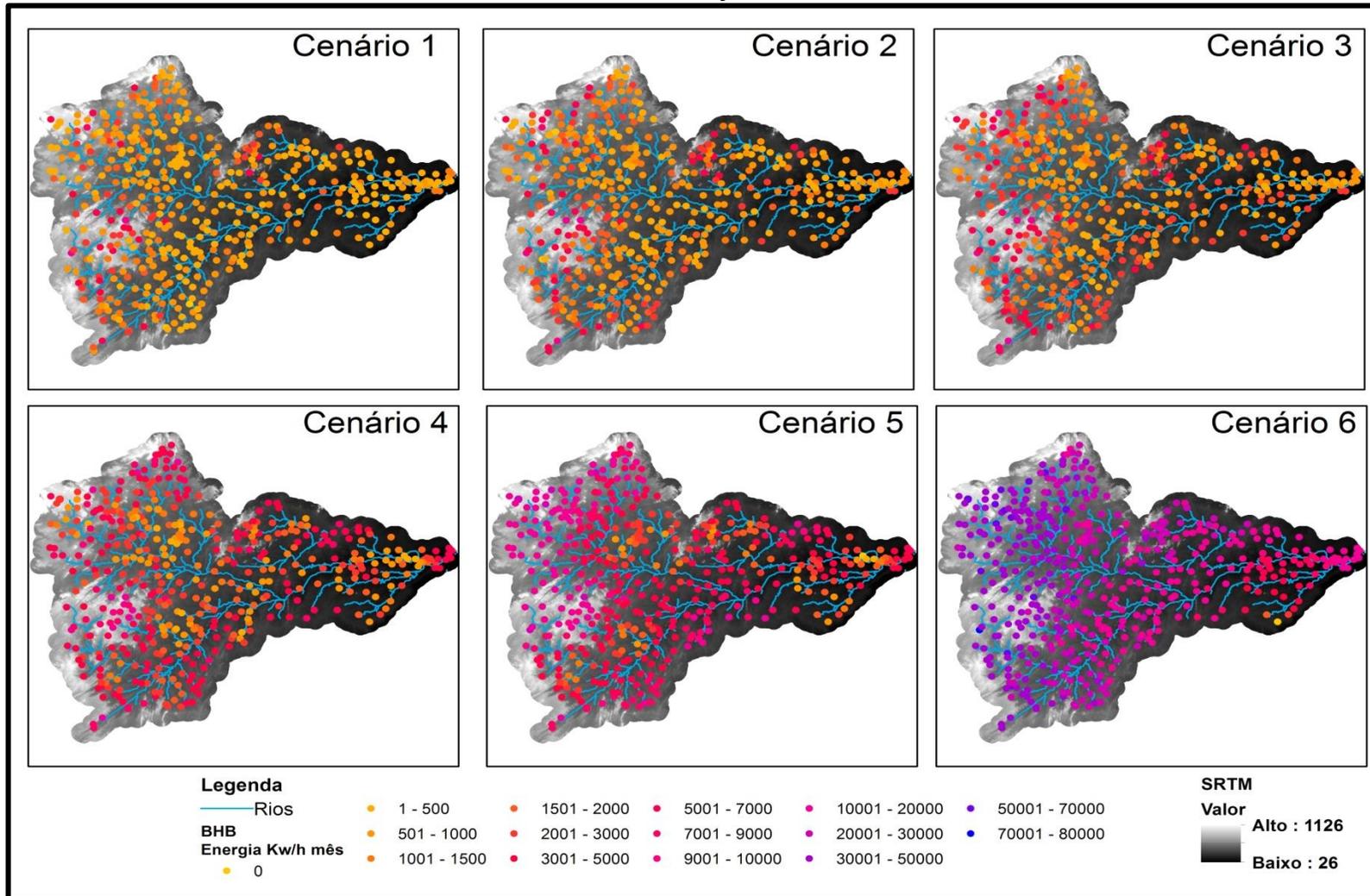
Se comparado com sistemas geradores de energia é possível observar que, em muitos dos pequenos sistemas hidrelétricos (PSH) é gerado menor quantidade de energia que a requerida na BHB para cenário 6. Balkhair e Palman

(2017) observaram que o potencial dos principais locais do canal superior do reservatório Swat, a produção anual foi de 18.931.777 kW h. Além disso, foi verificada uma produção de 15.526.873 kW h ao longo das ramificações do reservatório Machai, localizado na região semiárida do Paquistão.

Fitzgerald et al. (2012) enfatizam, com base em simulações, que a construção de reservatório a jusante de hidrelétricas contribui de maneira efetiva na produção de energia. Ainda dentro desse contexto, Bayazit et al. (2017) identificaram locais para construção de mini-hidrelétricas na região de Belick, Turquia, em que o potencial energético foi entre 100,13 a 224 Kw/ano.

Balkhair e Rahman (2017) estudaram a produção econômica de energia hidrelétrica de pequena e baixa potência no Paquistão utilizando pequenos corpos hídricos. Somando a energia produzida, no verão, em dez locais no canal Swat os autores encontraram energia igual a 18.922.781 kWh. Essas usinas abastecem mais de 1.500 casas. Assim sendo, verifica-se que a energia requerida na bacia hidrográfica do Banabuiú, nos diversos cenários

Figura 10: Modelo de elevação digital do terreno e energia requerida acumulada (kWh/mês) necessária para bombear água para os distritos para cada cenário de reservação simulado.



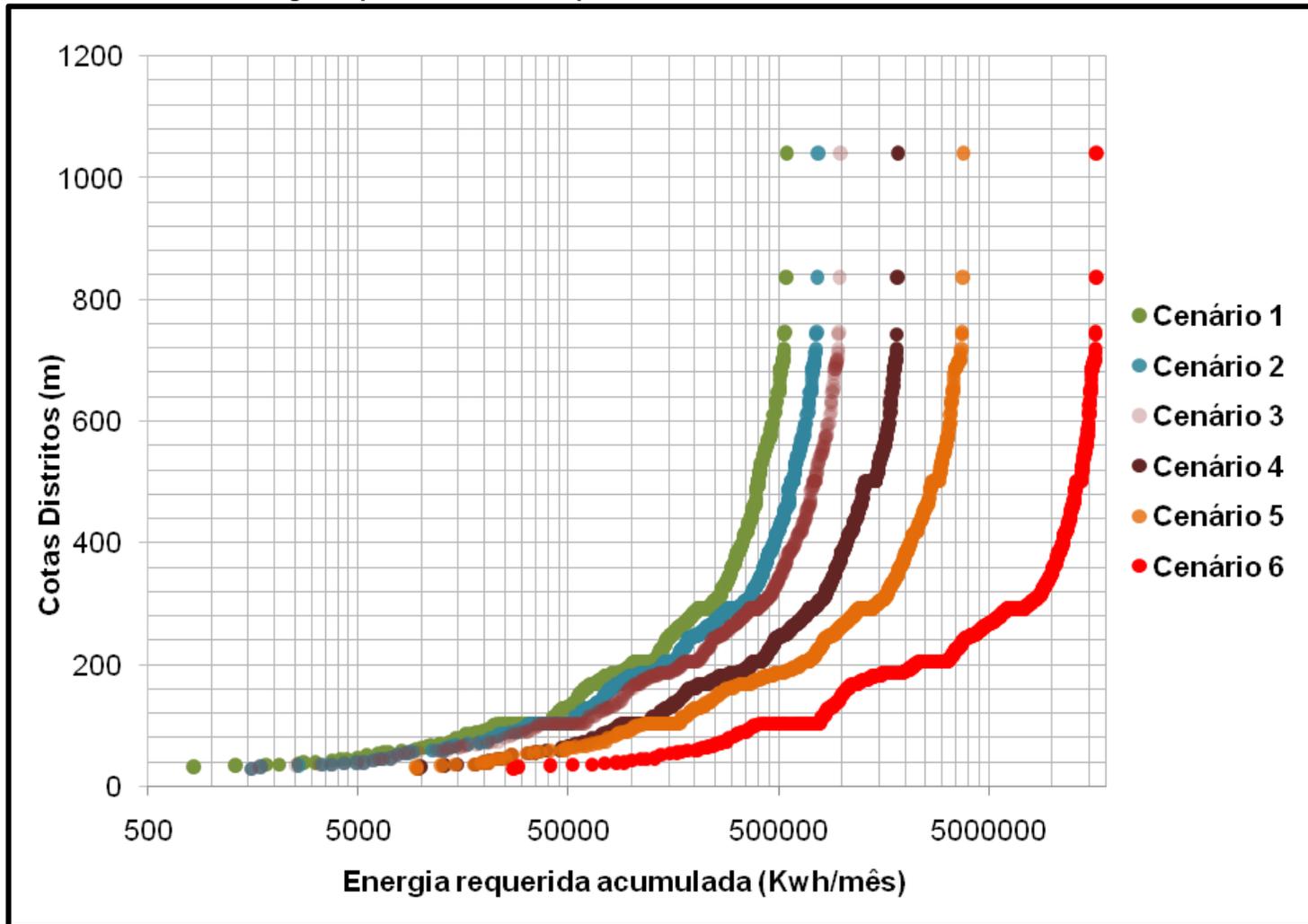
A energia requerida na bacia, nos diversos cenários, em relação à altitude de cada distrito está representada no gráfico 4. Nos cenários 1, 2 e 3 não há grandes alterações na energia requerida, isso acontece devido a boa distribuição dos açudes de classe 1, 2 e 3 na bacia nas diversas cotas permitindo, por exemplo, que os centros de demanda possam ser atendidos a pequena distância de algum desses reservatórios.

Liu et. al (2010) argumentam que a espacialização da água é uma tendência que contribui na gestão dos recursos hídricos, na geração de energia e na tomada de decisões pelo governo ou pela comunidade. Em concordância, Ceará (2010) relata que a construção de barragens de pequeno e médio porte nas cabeceiras das bacias hidrográficas contribui na distribuição de água espacialmente, reduzindo os custos com bombeamento. As simulações realizadas neste estudo indicam um benefício adicional, correspondente à maior eficiência energética em sistema com muitos reservatórios.

Diferente dos primeiros cenários, é perceptível que nos cenários 4 e 5, para cotas baixas a energia requerida acumulada possui o mesmo padrão. Entretanto, à medida que as cotas crescem a energia demanda pelo sistema aumenta significativamente. Por exemplo, na maior cota, a energia no cenário 5 é aproximadamente 4 vezes maior que no cenário 4, já na menor cota essa relação é de

1.

Gráfico 4 - Energia requerida acumulada para abastecimento humano versus a cota dos distritos.



6. CONCLUSÕES

As simulações de distribuição de água dos reservatórios superficiais para abastecimento dos distritos na Bacia Hidrográfica Banabuiú - BHB (19.800 km², no semiárido brasileiro) indicam que, além de promover uma distribuição espacial da água, os milhares de pequenos reservatórios superficiais não estratégicos aumentam substancialmente a eficiência energética do sistema de abastecimento de água. Os pequenos reservatórios armazenam água em altitudes mais elevadas e mais próximos dos distritos mais remotos, demandando menos energia para bombear água para esses centros de demanda.

No cenário com o arranjo real de reservatórios, a demanda total de energia do sistema é de 6,5 GWh / ano, que aumenta em 43% (para um total de 9,3 GWh / ano) se os reservatórios com capacidade de armazenamento inferior a 2×10^5 m³ não são considerados como parte do sistema. Além disso, se apenas os onze reservatórios estratégicos monitorados pela Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Ceará - COGERH forem considerados como fontes hídricas, a demanda de energia para fornecer água para toda a bacia é 7 vezes maior que a do cenário real.

Embora represente cerca de 60% da disponibilidade de água da BHB e seja capaz de abastecer todos os distritos, o reservatório Arrojado Lisboa sozinho demandaria 30 vezes a energia necessária no arranjo real do reservatório para fornecer água para todos os distritos da bacia.

Sugere-se para trabalhos futuros considerar diâmetros comerciais na rede de distribuição, estimando-se os custos com tubulação, execução e operação dos sistemas. Com isso, é possível avaliar a economia financeira com energia elétrica no sistema de abastecimento, promovida pelos pequenos reservatórios. Além disso, recomenda-se considerar outros usos da água (por exemplo, irrigação, uso industrial, dessedentação animal, etc.) de acordo com a qualidade da água de cada reservatório do sistema. Outra análise importante seria reproduzir esse estudo para outras bacias hidrográficas, para avaliar o efeito do relevo e da composição da rede de reservatórios (cascata) sobre a eficiência energética do sistema.

REFERÊNCIAS

- ABEGAZ, B. W.; DATTA, T.; MAHAJAN, S. M. Sensor technologies for the energy-water nexus—A review. **Applied Energy**. 2017. doi 10.1016/j.apenergy.2017.01.033.
- ANDRADE, A. L.; SANTOS, M. A. Hydroelectric plants environmental viability: Strategic environmental assessment application in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. 52, 1413-1423, 2015. doi 10.1016/j.rser.2015.07.152.
- ARAÚJO NETO, J. B.; PALÁCIO, H. A. Q.; ANDRADE, E. M.; SANTOS, J. C. N.; PINHEIRO, E. A. R. Otimização do Número de Curva (CN-SCS) para diferentes manejos na região semiárida, Ceará, Brasil. **Irriga**. 264 – 279, 2012. ISSN 1808-3765.
- ASSUNÇÃO, L. M.; LIVINGSTONE, L. Desenvolvimento inadequado: construção de açudes e secas do sertão do Nordeste. **Revista Brasileira de Economia**. 425448, 1993.
- BALKHAIR, K. S.; RAHMAN, K. U. 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**. 188, 378 – 391, 2017.
- BARBOUR, E. WILSON, I. A. G.; RADCLIFFE, J.; DING, Y.; LI, Y. A review of pumped hydro energy storage development insignificant international electricity markets. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. 61, 421-432, 2016. doi 10.1016/j.rser.2016.04.019
- BOTELHO, A.; FERREIRA, P.; LIMA, F.; PINTO, L. M. C.; SOUSA, S. Assessment of the environmental impacts associated with hydropower. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. 70, 896-904, 2017. doi 10.1016/j.rser.2016.11.271.
- BUKARICA, V.; TOMŠIĆ, Ž. Energy efficiency policy evaluation by moving from techno-economic towards whole society perspective on energy efficiency market. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. 70, 968-975, 2017. doi 10.1016/j.rser.2016.12.002.
- BRASIL. Ministério da Integração -MI. **Nova delimitação do semi-árido**. Brasília, 2005.
- BRASIL. Ministérios de Minas e Energia. **Matriz Energética Nacional 2030**. Brasília, 2007.
- BRASIL. **Plano Nacional de Eficiência Energética: premissas e diretrizes básicas**. Ministério de Minas e Energia, Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético, 2011.
- BRASIL. **SIDRA-Banco de Tabelas Estatísticas**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2016. [Online] Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/home/pnadcm>. Acesso em 03 de maio de 2016.
- BRASIL. **Ministério de Minas e Energia**. Capacidade Instalada de Geração Elétrica – Brasil e Mundo (2016). Brasília, 2017.
- CAITANO, R. F. LOPES, F. B.; TEIXEIRA, A. D. Estimativa da aridez no Estado do Ceará usando sistemas de informações geográficas. **Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, Curitiba, PR, INPE p.8904. 2011.
- CAMBOIM, W. L. L. **Aplicação de técnicas de controle fuzzy em sistemas de abastecimento de água visando melhoria no rendimento energético e hidráulico**. Tese (Doutorado) Universidade Federal da Paraíba, PB, 2012.

- CAMPOS, J.N.B. **Dimensionamento de reservatórios: o método do diagrama triangular de regularização**. Ed. UFC, 112 p., 2005.
- CARLESSO, R.; SPOHR, R. B.; ELTZ, F. L. F.; FLORES, C. H. Runoff estimation in southern Brazil based on Smith's modified model and the Curve Number method. **Agricultural Water Management**. 98, 1020 – 1026, 2011. doi10.1016/j.agwat.2011.01.012.
- CEARÁ, Assembléia Legislativa. **Cenário Atual dos recursos hídricos do Ceará**. Conselho de Altos estudos e Assuntos estratégicos, Assembléia Legislativa do Estado do Ceará; Eudoro Walter de Santana (Coordenador) –Fortaleza: INESP, 2009. 174p.: I1. (Coleção Pacto das Águas).
- CEARÁ. **Inventário Ambiental do Açude Banabuiú**. Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos. Fortaleza, 2011.
- CHUECO-FERNÁNDEZ, J. F.; BAYOD-RÚJULA, A. A. Power supply for pumping systems in northern Chile: Photovoltaics as alternative to grid extension and diesel engines. **Energy**. 35, 2909 – 2921, 2010. Doi :10.1016/j.energy.2010.03.022
- ANDRADE-CAMPOS, COELHO, B.; A. Efficiency achievement in water supply systems-A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**.30, 59-84, 2014. doi 10.1016/j.rser.2013.09.010.
- De ARAÚJO, J.C; GÜNTNER, A.; BRONSTERT, A. Loss of reservoir by sediment deposition and its impact on water availability in semiarid Brazil. **Hydrological Sciences Journal**. 51:1, 157-170, 2006. doi 10.1623/hysj.51.1.157.2006.
- De ARAÚJO, J. C.; PIEDRA, J. I. G. Comparative hydrology: analysis of a semiarid and a humid tropical watershed. **Hydrological Processes**,.23(8),1169-1178, 2009. doi.org/10.1002/hyp.7232.
- De ARAÚJO, J. C. Gestão das águas de pequenos açudes na região semiárida, In: MEDEIROS, S. S.; GHEYI, H. R.; GALVÃO, C. O.; PAZ, V. P. S. (Org.). **Recursos hídricos em regiões áridas e semiáridas. Campina Grande, Instituto Nacional do Semiárido**, 307-324, 2011.
- De ARAÚJO, JC; MEDEIROS, PHA. Impact of dense reservoir networks on water resources in semiarid environments. **Australian Journal of Water Resources**, 17, 87-100, 2013.
- De ARAÚJO, J. C.; BRONSTERT, A. A method assess hydrological drought in semiarid environments and its application to the Jaguaribe river basin, Brazil. **Water International**. 2016. doi 10.1080/02508060.2015.1113077.
- De LA VEGA, J.; ALEM, D. Energy Rationalization in Water Supply Networks via Stochastic Programming. **IEEE Latin America Transactions**. 13 (8) 2742-2756, 2015.
- DIOTTO, A. V.; FOLEGATTI, M. V.; DUARTE, S. N. ROMANELLI, T. L. Embodied energy associated with the materials used in irrigation systems: Drip and centre pivot. **Biosystems Engineering**. 123, 38 – 45, 2014. Doi 10.1016/j.biosystemseng.2014.02.002.
- DESHMUKH, D. S.; CHAUBE, U. C.; HAILU, A. E.; GUDETA, D. A.; KASSA, M. T. Estimation and comparison of curve numbers based on dynamic land use land cover change, observed rainfall-runoff data and land slope. **Journal of Hydrology** 492, 89 – 101, 2013. doi 10.1016/j.jhydrol.2013.04.001.

- DUDHANI, S.; SINHA, A. K.; INAMDAR, S. S. Assessment of small hydropower potential using remote sensing data for sustainable development in India. **Energy Policy**, 34, 3195-3205, 2006. doi 10.1016/j.enpol.2005.06.011.
- EL-HAMES, A. S. An empirical method for peak discharge prediction in ungauged arid and semi-arid region catchments based on morphological parameters and SCS curve number. **Journal of Hydrology**. 94 (100), 456-457, 2012. doi10.1016/j.jhydrol.2012.06.016.
- FARAHNAK, M.; FARZANEH-GORD, M.; DEYMI-DASHTEBAYAZ, M.; DASHTI, F. Optimal sizing of power generation unit capacity in ICE-driven CCHP systems for various residential building sizes. **Applied Energy**. 158, 203 – 219, 2015. doi 10.1016/j.apenergy.2015.08.050.
- FANG, D.; CHEN, B. Linkage analysis for the water–energy nexus of city. **Applied Energy**. 189, 770-779, 2017. doi 10.1016/j.apenergy.2016.04.020.
- FEARNSIDE, P. M. Brazil's Samuel Dam: Lessons for Hydroelectric Development Policy and the Environment in Amazonia. **Environmental Management**. 35, (1), 1-19, 2006. doi 10.1007/s00267-004-0100-3.
- FEARNSIDE, P. M. Environmental and Social Impacts of Hydroelectric Dams in Brazilian Amazonia: Implications for the Aluminum Industry. **World Development**. 77, 48-65, 2016. doi 10.1016/j.worlddev.2015.08.015.
- FITZGERALD, N.; ARÁNTÉGUI, R. L.; MCKEOGH, E.; LEAHY, P.A GIS-based model to calculate the potential for transforming conventional hydropower schemes and non-hydro reservoirs to pumped hydropower schemes. **Energy**. 41, 483-490, 2012. doi:10.1016/j.energy.2012.02.044.
- FOWE, T.; KARAMBIRI, H.; PATUREL, JH.; POUSSIN, JC; CECCHI, P. Water balance of small reservoir in the Volta basin: A case study of Boura reservoir in Burkina Faso. **Agricultural Water Management**, 152, 99-109, 2015. doi 10.1016/j.agwat.2015.01.006.
- FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS. **Mapeamento dos espelhos d'água do Brasil**. Ceará: FUNCEME, 2008. Disponível em: <http://www.funceme.br/documents/Projetos/espelhos_dagua.pdf>. Acesso em: 22 set. 2016.
- GAISER, T.; KROL, M. S.; FRISCHKORN, H.; DE ARAÚJO, J. C. **Global change and regional impacts: Water availability and vulnerability of ecosystems and society in the semi-arid northeast of Brazil**. Berlin, 2003.
- GUANAIS, A. L. R.; COHIM, E. B.; MEDEIROS, D. L. Avaliação energética de um sistema integrado de abastecimento de água. **Engenharia Sanitária Ambiental**. 22, 6, 1187 – 1196, 2017.
- GÜNTNER, A.; BRONSTERT, A. Representation of landscape variability and lateral redistribution processes for large-scale hydrological modelling in semi-arid areas. **Journal of Hydrology**, 297 (1-4), 136-161, 2004. doi 10.1623/hysj.49.5.901.55139
- HUNT, J. D.; FREITAS, M. A. V.; PEREIRA JUNIOR, A. O. Enhanced-Pumped-Storage: Combining pumped-storage in a yearly storage cycle with dams in cascade in Brazil. **Energy**. 78, 513 – 523, 2014. doi 10.1016/j.energy.2014.10.038.
- HUNT, J. D.; FREITAS, M. A. V.; PEREIRA JUNIOR, A. O. A review of seasonal pumped-storage combined with dams in cascade in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. 70, 385-398, 2017. doi 10.1016/j.rser.2016.11.255.

- INMET –Instituto Nacional de Meteorologia. **Normais Climatológicas do Brasil 1961-1990**. Edição revista ampliada. Brasília, DF, 2009.
- ISIK, S.; KALIN, L.; SCHOONOVER, J. E.; SRIVASTAVA, P.; LOCKABY, B. G. Modeling effects of changing land use/cover on daily streamflow: An Artificial Neural Network and curve number based hybrid approach. **Journal of Hydrology**. 485, 103-112, 2013. doi 10.1016/j.jhydrol.2012.08.032. doi 10.1016/j.jhydrol.2012.08.032.
- ISSA, I. E.; AL-ANSARI, N.; SHERWANY, G.; KNUTSSON, S. Evaluation and modification of some empirical and semi-empirical approaches for prediction of area-storage capacity curves in reservoirs of dams. **International Journal of Sediment Research**. 32, 127 – 135, 2017. doi 10.1016/j.ijsrc.2015.12.001.
- JAMES, K, CAMPBELL, SL, GODLOVE, CE. **Água e Energia - Aproveitando as oportunidades de eficiência de água e energia não exploradas nos sistemas municipais**. ALLIANCE - Aliança para Conservação de Energia. Washington, USA, 2002.
- JONG, P.; SÁNCHEZ, A. S.; ESQUERRE, K.; KALID, R. A.; TORRES, E. A. Solar and wind energy production in relation to the electricity load curve and hydroelectricity in the northeast region of Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. 23, 526-535, 2013. doi 10.1016/j.rser.2013.01.050.
- KUSRE, B. C.; BARUAH, D. C.; BORDOLOI, P. K.; PATRA, S. C. Assessment of hydropower potential using GIS and hydrological modeling technique in Kopili River basin in Assam (India). **Applied Energy**. 87, 298-309, 2010. DOI: 10.1016/j.apenergy.2009.07.019.
- KROL, S. M. VRIES, M. J. de. OEL, P. R. van. ARAÚJO, J. C. de. Sustainability of Small Reservoirs and Large Scale Water Availability Under Current Conditions and Climate Change. **Water Resour Manage** 25, 3017–3026, 2011. doi 10.1007/s11269-011-9787-0.
- LARENTIS, D. G.; COLLISCHONN, W.; OLIVEIRA, F.; TUCCI, C. E. M. Gis-based procedures for hydropower potential spotting. **Energy**, 35 (10), 4237-4243, 2010. doi 10.1016/j.energy.2010.07.014.
- LI, XG; WEI, X. An improved genetic algorithm-simulated annealing hybrid algorithm for the optimization of multiple reservoirs. **Water Resources Management**, 22, 031-1049, 2008. Doi 10.1007/s11269-007-9209-5.
- LIMA NETO, I. E., WIEGAND, M. C., de ARAÚJO, J. C. Sediment redistribution due to a dense reservoir network in a large semi-arid Brazilian basin. **Hydrological Sciences Journal**, 56, 319– 333, 2011.
- LIU, S.; BUTLER, D.; MEMON, F. A.; MAKROPOULOS, C.; AVERY, L.; JEFFERSON, B. Impacts of residence time during storage on potential of water saving for grey water recycling system. **Water Research** 44, 267 – 277, 2010. doi 10.1016/j.watres.2009.09.023
- LIU, G.; HAN, K.; YE, H.; ZHU, C.; GAO, Y.; LIU, Y.; ZHOU, Y. Graphene oxide/triethanolamine modified titanate nanowires as photocatalytic membrane for water treatment. **Chemical Engineering Journal**. 320, 74 – 80, 2017. Doi 10.1016/j.cej.2017.03.024.
- LESSA, A. C. R.; SANTOS, M. A.; MADDOCK, J. E. L.; BEZERRA, C. S. Emissions of greenhouse gases in terrestrial areas pre-existing to hydroelectric plant reservoirs in the Amazon: The case of Belo Monte hydroelectric plant. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. 51, 1728-1736, 2015. doi 10.1016/j.rser.2015.07.067.

- LU, X.; WANG, S. A GIS-based assessment of Tibet's potential for pumped hydropower energy storage. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. 69, 1045 – 1064, 2017. doi 10.1016/j.rser.2016.09.089.
- MALVEIRA, V. T. C.; ARAÚJO, J. C.; GÜNTNER, A. Hydrological impact of a high-density reservoir network in the semiarid north-eastern Brazil. **Journal of Hydrologic Engineering**, 17 (1), 109-117, 2012. doi 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000404.
- MAMEDE, L. G. **Reservoir Sedimentation in Dryland Catchments: Modelling and Management**. Dissertation for the Degree of Doctor of natural sciences. Faculty of Mathematics and Sciences at the University of Potsdam. 86 f. Potsdam – Germany, 2008.
- MAMEDE, G. L.; ARAÚJO, N. A. M.; SCHNEIDER, C. M.; DE ARAÚJO, J. C.; HERRMANN, H. J. Overspill avalanching in a dense reservoir network. **Proceedings of the National Academy of Sciences**. 109 (19), 7191 – 7195, 2012. doi10.1073/pnas.1200398109.
- MARTINS, T. J. C. **Sistemas de Abastecimento de Água para Consumo Humano – Desenvolvimento e Aplicação de Ferramenta Informática para a sua Gestão Integrada**. Dissertação (Mestrado). Instituto Politécnico de Bragança – Escola Superior Agrária, Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental. Bragança, Portugal. p. 113, 2014.
- MEDEIROS, P. H. A.; De ARAÚJO, J. C.; ANDRELLO, A. C. Uncertainties of the 137cs technique for validation of soil redistribution modelling in a semiarid meso-scale watershed. **Engenharia Agrícola**, 34 (2), 222-235, 2014. doi 10.1590/S0100-69162014000200004.
- MISHRA, A. K.; SINGH, V. P. A review of drought concepts. **Journal of Hydrology**, vol. 391, p. 202–216, 2010. doi:10.1016/j.jhydrol.2010.07.012.
- MISHARA, S.; SINGAL, S. K.; KHATOD, D. K. Optimal installation of small hydropower plant - A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. 15, 3862 – 3869, 2011. doi:10.1016/j.rser.2011.07.008.
- MOLLE, F. **Geometria dos pequenos açudes**. 3. ed. Recife: SUDENE, 131 p. (Brasil SUDENE. Hidrologia Nº 29), 1994.
- NASCIMENTO, A. T. P. de. **Análise da disponibilidade hídrica nos pequenos açudes do assentamento 25 de maio, MADELANA-CE**. Monografia (Bacharelado 51 em Engenharia Ambiental e Sanitária). 65 f. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará. Maracanaú, 2015.
- NASCIMENTO, A. T. P.; MACAMBIRA, A. G.; MEDEIROS, P. H. A. Efeito da rede de reservatórios sobre energia hidráulica acumulada em bacia hidrográfica de meso-escala no semiárido brasileiro. **Conexões – Ciência e Tecnologia**. 10 (5), 49-56, 2016. doi 10.21439/conexoes.v10i5.1176.
- NASCIMENTO.
- NDMC, National Drought Mitigation Center. <http://drought.unl.edu/>. Acesso em 23/05/2017.
- NKHHONJERA, G. K. Understanding the impact of climate change on the dwindling water resources of South Africa, focusing mainly on Olifants River basin: A review. **Environmental Science & Policy**. 71, 19-29, 2017. doi 10.1016/j.envsci.2017.02.004.
- OKOT, D. K. Review of small hydropower technology. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. 26, 515-520, 2013. doi 10.1016/j.rser.2013.05.006.

ORMSBEE, L.; LANSEY, K. (1994). Optimal control of water supply pumping systems. **Journal of Water Resources Planning and Management**, 120, 2, 237-252, 1994 doi.org/10.1061/(ASCE)0733.

HELLER, L.; PÁDUA, V. L. **Abastecimento de água para consumo humano**. 2. Ed. UFMG, 2010.

PAPAEFTHIMIOU, S.; KARAMANOU, E.; PAPATHANASSIOU, S.; PAPADOPOULOS, M. Operating policies for wind-pumped storage hybrid power stations in island grids. **Renewable Power Generation**. 3, 293 – 307. Doi 10.1049/iet-rpg.2008.0071.

PAULO, A. A.; PEREIRA, L. S. Drought concepts and characterization: comparing drought indices applied at local and regional scales. **Water International**, 31, 1, 37-49, 2006.

PEREIRA, B. S. **Estimativa de volumes de reservatórios em região semiárida com alta densidade de reservatórios por sensoriamento remoto**. Dissertação (Mestrado em Tecnologia e Gestão Ambiental) – Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia – Campus Fortaleza, Fortaleza, 2017.

PERRONI, J. C. A. **Avaliação do consumo de energia elétrica para a produção de água subterrânea – o caso do abastecimento público da cidade de São Carlos – SP**. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2005.

PERRONI, B. L. T.; CARVALHO, J. A.; FARIA, L. C. Velocidade econômica de escoamento e custos de energia de bombeamento. **Eng. Agríc., Jaboticabal**, 31, 3, 487-496, 2011.

PETER, S.; de ARAÚJO, J.C.; ARAUJO, N.; HERRMANN, H.J. **Flood avalanches in a semiarid basin with a dense reservoir network**. Journal of Hydrology, 512, 408-420, 2014. doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.03.001.

PEKEL, J.F.; COTTAM, A.; GORELICK, N.; BELWARD, A.S. **High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes**. Nature 540, 418-422, 2016. DOI: 10.1038/nature20584.

PROSAB. **Conservação de água e energia em sistemas prediais e públicos de abastecimento de água**. Ricardo Francisco Gonçalves (coordenador). Rio de Janeiro: ABES, 2009.

RITTER, C. D.; MCCRATE, G.; NILSSON, R. H.; FEARNSIDE, P. M.; PALME, U.; ANTONELLI, A. Environmental impact assessment in Brazilian Amazonia: Challenges and prospects to assess biodiversity. **Biological Conservation**. 206, 161-168, 2017. doi dx.doi.org/10.1016/j.biocon.2016.12.031.

ROCHA, N. B. S. **Eficiência energética de sistemas de abastecimento de água para diferentes pressões disponíveis nas entradas das edificações**. Dissertação (mestrado). Universidade Federal da Paraíba. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental. João Pessoa, PB. p. 97. 2014.

ROCHA, R.; SOARES, R. R. Water scarcity and birth outcomes in the Brazilian semiarid. **Journal of Development Economics**, 112, 72 – 91, 2015. doi [10.1016/j.jdeveco.2014.10.003](https://doi.org/10.1016/j.jdeveco.2014.10.003).

Rogean, A.; Girard, R.; Kariniotakis, G. A generic GIS-based method for small Pumped Hydro Energy Storage (PHES) potential evaluation at large scale. **Applied Energy**. 197, 241 – 253, 2017.

- SANDT, C. J.; DOYLE, M. W. The hydrologic and economic feasibility of micro hydropower up fitting and integration of existing low-head dams in the United States. **Energy Policy**. 63, 261 – 271, 2013. doi10.1016/j.enpol.2013.08.087.
- SANTHOSH, C.; VELMURUNGAN, V.; JACOB, G.; JEONG, S. K.; GRACE, A. N.; BHATNAGAR, A. Role of nanomaterials in water treatment applications: A review. **Chemical Engineering Journal**. 306, 1116 – 1137, 2016. doi org/10.1016/j.cej.2016.08.053.
- SILVA, A. W. **Engenharia nos sertões nordestinos: o Gargalheiras, a Barragem Marechal Dutra e a comunidade de Acari**. Dissertação (Mestrado em História) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Ciências Humanas, Letras e Artes. Programa de Pós-Graduação em História, Natal, 2012.
- YANG, C. J. Chapter 2 - Pumped Hydroelectric Storage. **Storing Energy**. 2016.
- YÜKSEL, I. Hyropower for sustainable energy reviews. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. 14, 462-469, 2010. doi 10.1016/j.rser.2009.07.025.
- VON SPERLING, E. Hydropower in Brazil: overview of positive and negative environmental aspects. **Energy Procedia**, 18, 110-118, 2012. doi 10.1016/j.egypro.2012.05.023.
- TOLMASQUIM, Mauricio T.; GUERREIRO, Amilcar; GORINI, Ricardo. Matriz energética brasileira: uma prospectiva. **Novos estudos - CEBRAP**, São Paulo, 79, 47-69, 2007.
- TUNDISI, J. G.; GOLDEMBERG, J.; MATSUMURA-TUNDISI, T.; SARAIVA, A. C. F. Howmany more dams in theAmazon? **Energy Policy**. 74, 703-708, 2014. doi10.1016/j.enpol.2014.07.013.
- TVEDT, Terje. The River Nile in the Age of the British: Political ecology and the quest for economic power. New York: Palgrave Macmillan, 2004.
- U.S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **Urban Hydrology for Small Watersheds**. Washington, 1986.
- ZHANG, S.; GITUNGO, S. W.; AXE, L.; RACZKO, R. F.; DYKSEN, J. E. Biologically active filters e An advanced water treatment process for contaminants of emerging concern. **Water Research**. 114, 31 – 41, 2017. doi 10.1016/j.watres.2017.02.014.
- ZAMBRANO, F.; WARDLOW, B.; TADESSE, T.; LILLO-SAAVEDRA, M.; LAGOS, O. Evaluating satellite-derived long-term historical precipitation data sets for drought monitoring in Chile .**Atmospheric Research**. 186, 26 – 42, 2017. doi: 10.1016/j.atmosres.2016.11.006.
- ZHEN, W.; MINGMING, L.; HAITAO, G. A strategic path for the goal of clean and low-carbon energy in China. **Natural Gas Industry**. B 3, 305 – 311, 2016. doi 10.1016/j.ngib.2016.12.006.