



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

ROSAMA SILVA OLIVEIRA

APROVEITAMENTO RACIONAL DE AÇUDES NÃO ESTRATÉGICOS PARA
IRRIGAÇÃO DE CULTURAS AGRÍCOLAS TEMPORÁRIAS NO SEMIÁRIDO
BRASILEIRO

FORTALEZA

2023

ROSAMA SILVA OLIVEIRA

APROVEITAMENTO RACIONAL DE AÇUDES NÃO ESTRATÉGICOS PARA
IRRIGAÇÃO DE CULTURAS AGRÍCOLAS TEMPORÁRIAS NO SEMIÁRIDO
BRASILEIRO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Manejo e Conservação de Bacias Hidrográficas no Semiárido.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Henrique Augusto Medeiros.

FORTALEZA

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- O51a Oliveira, Rosama Silva.
Aproveitamento racional de açudes não estratégicos para irrigação de culturas agrícolas temporárias no semiárido brasileiro / Rosama Silva Oliveira. – 2023.
45 f. : il.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Mestrado Profissional em Avaliação de Políticas Públicas, Fortaleza, 2023.
Orientação: Prof. Dr. Pedro Henrique Augusto Medeiros.
1. Escassez hídrica. 2. Operação de pequenos reservatórios. 3. Agricultura irrigada. I. Título.
CDD 320.6
-

ROSAMA SILVA OLIVEIRA

APROVEITAMENTO RACIONAL DE AÇUDES NÃO ESTRATÉGICOS PARA
IRRIGAÇÃO DE CULTURAS AGRÍCOLAS TEMPORÁRIAS NO SEMIÁRIDO
BRASILEIRO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Manejo e Conservação de Bacias Hidrográficas no Semiárido.

Aprovada em ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Pedro Henrique Augusto Medeiros (Orientador)
Instituto Federal do Ceará (IFCE)

Prof. Dr. Lucas Melo Vellame
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB)

Prof. Dr. Carlos Alexandre Gomes Costa
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Aos meus pais, pelo amor incondicional, às
minhas irmãs por se fazerem sempre presente
na minha vida.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus, por sempre me guiar no caminho certo e me dá forças diante das batalhas. Aos meus pais: José Airton de Oliveira e Maria do Socorro da Silva Oliveira, pelos princípios e valores ensinados. As minhas irmãs, pelos conselhos e apoio nas minhas decisões.

Agradeço em especial ao meu orientador, Prof. Dr. Pedro Medeiros, pela disponibilidade e orientação, pelos ensinamentos, pela confiança e pela amizade. A banca examinadora, Prof. Dr. Lucas Vellame e Prof. Dr. Carlos Alexandre, pela disponibilidade e sugestões dadas para melhoramento do trabalho e aos Suplentes: Prof. Dra. Waleska Martins Eloi e Prof. Dr. José Carlos de Araújo.

Agradeço ao Programa Cientista-Chefe em Agricultura e seu coordenador, Prof. Dr. Claudivan Lacerda, no âmbito da Macroação “Reserva estratégica alimentar de rebanhos no estado do Ceará: pesquisa e inovação tecnológica na pecuária leiteira”, coordenada pelo Prof. Dr. Magno Cândido, pelo apoio financeiro para realização da pesquisa.

Ao Prof. Dr. Nonato pela ajuda no levantamento de dados das culturas agrícolas e por sempre estar à disposição para tirar minhas dúvidas.

Ao colega Dr. Paulilo Brasil, desenvolvedor do modelo NeStRes.

À Prof. Dra. Isabel Cristina, pelo incentivo, pelo apoio, pela amizade de longas datas e pela disponível em ajudar no que for preciso.

A todos os professores que contribuíram com minha formação acadêmica.

À Universidade Federal do Ceará (UFC), ao Departamento de Engenharia Agrícola, ao grupo de pesquisa HIDROSED: Glauber Pontes, Eveline Silva, Christine Faria, Gabriela Domingos, Bruno Pereira, Thales Bruno, Suziane Soares e demais integrantes. A vocês toda minha gratidão pelo acolhimento.

À FUNCAP pelo apoio financeiro com a manutenção da bolsa de estudo. E a todos aqueles que, mesmo não citados, sempre lembrarei como pessoas de fundamental importância durante todo o Mestrado.

RESUMO

Em regiões semiáridas como no Nordeste brasileiro, a dinâmica hidrológica, com chuvas irregulares, altas taxas de evaporação e secas frequentes, deixam a população vulnerável em relação ao abastecimento hídrico. Nesse contexto, o suprimento hídrico é garantido por redes de reservatórios construídos pelo poder público e pela sociedade civil. No entanto, a maioria dos reservatórios de pequeno porte não apresentam elevada garantia de fornecimento hídrico, esvaziando com elevada frequência e, portanto, são geralmente utilizados para atender as demandas de produção agropecuária das comunidades rurais. Nesse contexto, o modelo NeStRes, composto por três módulos (hidrológico, agrícola e econômico) foi desenvolvido com o objetivo de definir condições de irrigação de culturas temporárias a partir de reservatórios não estratégicos em regiões secas, com vista à maximização da renda do irrigante. Neste estudo, o modelo foi aplicado em 23 açudes da bacia hidrográfica do Fogareiro no estado do Ceará, considerando a irrigação de 5 culturas agrícolas temporárias: arroz, batata-doce, feijão, milho e sorgo. Os resultados indicaram que condições de uso da água que maximizam a renda proveniente da produção variam de acordo com o açude e a cultura. No entanto, é possível estabelecer condições de uso da água que resultam em bom rendimento para todos os açudes simulados e para as diferentes culturas.

Palavras-chave: escassez hídrica; operação de pequenos reservatórios; agricultura irrigada.

ABSTRACT

In semi-arid regions such as the Brazilian Northeast, hydrological dynamics, with irregular rainfall, high evaporation rates and frequent droughts, leave the population vulnerable in relation to water supply. In this context, water supply is guaranteed by networks of reservoirs built by public authorities and civil society. However, most small reservoirs do not have a high guarantee of water supply, emptying with high frequency and, therefore, are generally used to meet the agricultural production demands of rural communities. In this context, the NeStRes model, composed of three modules (hydrological, agricultural and economic) was developed with the objective of defining irrigation conditions for temporary crops from non-strategic reservoirs in dry regions, with a view to maximizing the irrigator's income. In this study, the model was applied to 23 dams in the Fogareiro watershed in the state of Ceará, considering the irrigation of 5 temporary agricultural crops: rice, sweet potatoes, beans, corn and sorghum. The results indicated that water use conditions that maximize income from production vary according to the reservoir and the culture. However, it is possible to establish water use conditions that result in good yields for all simulated reservoirs and for different crops.

Keywords: water scarcity; operation of small reservoirs; irrigated agriculture.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 -	Mapa de localização da bacia do Fogareiro -----	24
Figura 2 -	Relação entre a garantia de fornecimento hídrico e renda relativa proveniente da produção irrigada do arroz (a), batata-doce (b), feijão (c), milho (d) e sorgo (e) -----	31
Figura 3 -	Garantia de fornecimento hídrico e a renda relativa obtida ao se admitir uma garantia fixa para os 23 açudes analisados -----	33
Figura 4 -	Relação entre a vazão específica para irrigação e a renda relativa da produção irrigada de arroz (a), batata doce (b), feijão (c), milho (d) e o sorgo (e) -----	36
Figura 5 -	Relação entre a área irrigável específica e a renda relativa proveniente da produção irrigada de arroz (a), batata doce (b), feijão (c), milho (d) e sorgo (e) -----	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Características dos reservatórios estudados -----	29
Tabela 2 -	Dados das culturas -----	30
Tabela 3 -	Área irrigável de cada cultura que promove as maiores rendas no conjunto de reservatórios simulados -----	40

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	14
3	REFERENCIAL TEÓRICO	15
3.1	Aspectos hidrológicos do semiárido brasileiro e disponibilidade hídrica	15
3.2	Uso da água de açudes para a produção agrícola	17
3.3	Eficiência do uso da água em culturas agrícolas em regiões semiáridas	19
3.4	Modelagem do uso da água na agricultura	21
3.5	Modelo NeStRes	22
4	MATERIAIS E MÉTODOS	24
4.1	Área de Estudo	24
4.2	Simulações utilizando o modelo NeStRes	25
4.2.1	<i>Reservatórios simulados e culturas adotadas</i>	28
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
5.1	Regras de operação de açudes não estratégicos	31
5.2	Condições de irrigação de diferentes culturas agrícolas	35
6	CONCLUSÕES	41
	REFERÊNCIAS	42

1 INTRODUÇÃO

Os recursos naturais, como a água e o solo, desempenham um papel fundamental no desenvolvimento das culturas agrícolas, haja visto que o solo é o principal meio de desenvolvimento, sustentação, reservatório hídrico e de nutrientes das plantas e a água garante o transporte e a absorção de nutrientes essenciais para a respiração de manutenção, trocas gasosas e produção de carboidratos para estas. Nesse contexto, conhecer as características climáticas e de solos de cada região é fundamental para a produção agrícola.

Em regiões semiáridas com precipitações pluviométricas irregulares e concentradas no tempo, o principal desafio da agricultura é a disponibilidade hídrica, cuja variabilidade afeta o sistema de produção agrícola, resultando em perdas econômicas significativas.

Nessas regiões, a água é um recurso natural escasso e aliado às atividades antrópicas, podem impactar negativamente no solo, na água e no meio ambiente em geral, pois a qualidade do solo pode ser afetada por práticas agrícolas inadequadas, como o uso excessivo de pesticidas ou a falta de rotação de culturas. Além disso, as mudanças nos padrões de chuva devido às alterações climáticas podem ter um impacto significativo na produção agrícola.

Boa parte do Nordeste brasileiro, apresenta clima semiárido, com chuvas intensas e de curta duração, com intervalos longos entre a estiagem e a quadra chuvosa e altas taxas de evaporação. Essas regiões possuem grandes restrições quanto à produtividade agrícola, como o uso apenas de culturas temporárias, curto intervalo de tempo para o cultivo e elevado risco de perda da produção por causa da irregularidade pluviométrica. Visto que, o setor agropecuário é de extrema importância para a economia e subsistência da população rural e para o restante da sociedade que se beneficia com os insumos adquiridos pelo setor.

Uma das medidas adotadas pelo Poder Público para amenizar os impactos da escassez de água na região Nordeste do Brasil, foi investir na construção de grandes reservatórios espelhados pela região, porém, esses foram destinados exclusivamente a atender os centros urbanos, industriais e grandes projetos de irrigação, deixando as comunidades rurais desassistida pelo benefício.

A falta de assistência às comunidades rurais fez com que os moradores e agricultores construíssem pequenos reservatórios para suprir a necessidade local, sem o apoio do Governo. A construção destes pequenos reservatórios pelas comunidades rurais é uma resposta às desigualdades no acesso aos recursos hídricos, exercendo um papel importante no fornecimento de água para o consumo humano e o uso em atividades agrícolas e pecuárias.

Os pequenos açudes em conjunto com os maiores, formaram uma densa rede de

reservatórios na região. No entanto, os reservatórios com menor capacidade de acumulação, chamados de reservatórios não estratégicos são muito vulneráveis à irregularidade de chuvas, chegando a secar completamente durante o ano. Essa instabilidade no acúmulo das águas, possibilita a população buscar outros meios de abastecimento, como cacimbas, poços e cisternas.

Portanto, a diversificação das fontes de água é fundamental para garantir o abastecimento contínuo, mesmo quando os pequenos reservatórios secam. Nesse contexto, é extremamente importante que as políticas de gestão de recursos hídricos considerem as necessidades das comunidades rurais, agricultores familiares e populações que dependem da agricultura de subsistência.

A utilização de açudes menores para a produção de culturas de ciclo curto é uma estratégia para maximizar o uso da água disponível em áreas rurais. Quando esse benefício é gerenciado de forma eficiente, é possível otimizar o aproveitamento da água, reduzir perdas por evaporação e garantir um retorno financeiro mais consistente.

Com base nesse cenário, o modelo NeStRes foi desenvolvido para simular o uso da água de açudes não estratégicos para irrigação, com foco nas culturas de ciclo curto. O modelo é composto de três módulos: o módulo hidrológico: avalia a disponibilidade hídrica do reservatório; o módulo agrícola: simula a safra com base na água disponível do reservatório e o módulo econômico: calcula a receita possível da cultura irrigada.

O modelo consiste de uma ferramenta que busca contribuir com a racionalização do uso da água para enfrentar os desafios e as limitações da escassez de água, que condiciona as atividades humanas e o desenvolvimento da região. É importante ainda que a gestão estratégica de manejo do solo e uso da água seja baseada na sustentabilidade, de modo a garantir segurança alimentar a longo prazo.

Tendo em vista o apresentado, este trabalho tem como objetivo definir condições de irrigação de culturas temporárias a partir de reservatórios não estratégicos no semiárido brasileiro, com vista à maximização da renda do irrigante, ou seja, usar a água mais intensamente, converte-se em produção e, conseqüentemente em renda, já que a reserva de água no açude quando se adota a cultura de poupar água está sujeita ao aumento de perdas de água por evaporação.

A hipótese de que é possível usar a água dos açudes não estratégicos de forma racional para irrigação de culturas agrícolas temporárias no semiárido brasileiro, sendo o critério de operação do reservatório variável não apenas com as características do reservatório, mas também de acordo com a cultura.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral é definir condições de irrigação de culturas temporárias a partir de reservatórios não estratégicos no semiárido brasileiro, com vista à maximização da renda do irrigante.

São objetivos específicos:

- i. Elaborar banco de dados de culturas temporárias, no que diz respeito à demanda hídrica e produtividade;
- ii. Simular as condições de irrigação de diversas culturas agrícolas a partir de reservatórios não estratégicos, para maximização da renda;
- iii. Propor critérios de operação de reservatórios não estratégicos visando seu aproveitamento para irrigação;
- iv. Contribuir para o planejamento agrícola e a gestão de recursos hídricos no semiárido brasileiro.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Aspectos hidrológicos do semiárido brasileiro e disponibilidade hídrica

O semiárido brasileiro corresponde a 12% do território nacional e engloba uma população de aproximadamente 27 milhões de habitantes (SUDENE, 2017). A maior parte do semiárido situa-se na região Nordeste, ocupando uma área de pouco mais de 1,5 milhões de km² e uma população estimada da ordem de 53 milhões de habitantes (IBGE, 2010).

A região é caracterizada por precipitações pluviométricas baixas e irregulares, concentradas em poucos meses do ano, com chuvas médias anuais em torno de 500mm a 800mm e altas taxas de evaporação (WORLD BANK, 2014).

Os solos são rasos, sobre substrato cristalino, o que reduz a capacidade de armazenamento subsuperficial e subterrâneo da água (MEDEIROS, 2010). Por conta disso, os canais dos rios passam a maior parte do ano seco, em decorrência da reduzida capacidade de armazenamento de água no solo e da falta de conexão com os aquíferos, fazendo com que o escoamento dependa exclusivamente da intensidade das chuvas (DE FIGUEIREDO et al., 2016; KOCH et al., 2020).

Além disso, as características naturais do solo, seu material, sua porosidade, bem como a cobertura vegetal e o relevo, aliados às atividades antrópicas, influenciam na retenção e na velocidade do escoamento hídrico. O escoamento é caracterizado como hortoniano, em que a intensidade da precipitação excede a capacidade de infiltração (MEDEIROS, 2009).

Os rios são intermitentes ou efêmeros, isto é, são cursos de água que normalmente escoam durante a estação chuvosa e secam na estiagem, ou sua existência tem curta duração, apenas durante ou logo após os períodos de precipitação (DE ARAUJO, 2012), portanto, esses rios não apresentam condições de garantia hídrica para a população. No entanto, os mesmos podem ser perenizados, seja através da construção de barragens (DE ARAÚJO et al., 2006; VAN OEL et al., 2008), ou da transposição de bacias e uso conjunto de águas subterrâneas e superficiais (GONZÁLEZ, 2011).

Ademais, o volume de água armazenada nos reservatórios superficiais é influenciado pela quadra chuvosa, mal distribuída no tempo e espaço, afetando intensamente a população que necessita desse recurso para o abastecimento humano, dessedentação de animais e para o desenvolvimento de atividades econômicas (MEDEIROS, 2009; MARENGO et al., 2011).

Diante da problemática escassez hídrica vivenciada na região, uma das estratégias

elaboradas pelo poder público para ampliar a oferta hídrica e minimizar os impactos negativos nos períodos de estiagem, foi a construção de reservatórios artificiais (MOLLE; CADIER, 1992).

O poder público investiu na construção de grandes reservatórios, com capacidade superior a 50 milhões de m³ (GÜNTNER, 2002), e atendem prioritariamente os centros urbanos, distritos industriais e projetos de irrigação. Por outro lado, a população que vive nas comunidades rurais, a maioria desassistida pelos grandes reservatórios, depende fortemente dos pequenos açudes, considerados não estratégicos, construídos por moradores sem apoio governamental (LIMA, 2020).

Os açudes não estratégicos atuam na tentativa de suprir a demanda hídrica na ausência de chuva. No entanto, tais reservatórios proporcionam uma baixa disponibilidade *per capita*, principalmente nos períodos de estiagem, tornando um fator limitante para o desenvolvimento socioeconômico da região (De ARAÚJO; BRONSTERT, 2016; De ARAÚJO; MAMEDE; De LIMA, 2018).

Contudo, a construção dos inúmeros reservatórios estratégicos e não estratégicos criaram uma densa rede de reservatórios (MAMEDE et al., 2012; MALVEIRA; DE ARAÚJO; GÜNTNER, 2012; DE ARAÚJO; MEDEIROS et al., 2014; MAMEDE et al., 2018; PEREIRA et al., 2019) distribuído pela região Nordeste, e são destinados a diversas finalidades.

Para Araújo et. al. (2002), os reservatórios têm uma importância tão expressiva no Estado do Ceará que mais de 90% da demanda atendida é proveniente deles, embora os pequenos reservatórios não sejam capazes de atender grandes demandas, e mesmo que nos períodos de estiagem cheguem a secar completamente, cumprem um papel essencial para a sobrevivência das pequenas e esparsas comunidades rurais.

Além disso, os pequenos reservatórios servem de bacias de detenção de sedimentos, estendendo a vida útil dos reservatórios maiores. Porém, a retenção de sedimentos pode afetar a capacidade dos açudes menores.

Vale salientar ainda que uma pequena parte da população é atendida por água subterrânea, correspondendo a aproximadamente 10% da demanda (DE ARAÚJO et al., 2006), apesar da vazão limitada e elevada salinidade (VOERKELIUS et al., 2003; BURTE et al., 2005), algumas comunidades rurais utilizam a água subterrânea como única fonte de abastecimento para consumo humano e animal.

3.2 Uso da água de açudes para a produção agrícola

A agricultura irrigada desempenha um papel crucial no setor de recursos hídricos e no desenvolvimento regional do Brasil. No entanto, esta prática também apresenta uma série de desafios para a gestão dos recursos hídricos (ANA, 2020).

A disponibilidade de água tem gerado preocupações e debates entre pesquisadores, agricultores e formuladores de políticas a respeito do planejamento e gerenciamento dos cursos hídricos (FOLEY et al., 2005) na perspectiva de estabelecer ações estratégicas que permitam a manutenção e a disponibilidade de água em condições adequadas para as presentes e futuras gerações (FILHO, 2019).

O uso da água de açudes como suplementação hídrica na produção agrícola é uma das alternativas que vem sendo adotada, principalmente nas regiões com déficit hídrico. De acordo com os dados da ANA (2020), os açudes construídos ao longo dos córregos são as principais fontes de armazenamento de água durante o período chuvoso e fornecem 90% da água para irrigação.

Nessa perspectiva, a Política Nacional de Recursos Hídricos, instituída pela Lei nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997, estabeleceu pressupostos fundamentais para a gestão democrática das águas, criando o Sistema Nacional de Gerenciamento dos Recursos Hídricos.

No estado do Ceará os recursos hídricos são geridos pela Política Estadual de Recursos Hídricos, Lei nº 14.844 de 28 de dezembro de 2010, que tem como um dos seus objetivos planejar e gerenciar a oferta de água, os usos múltiplos, o controle, a conservação, a proteção e a preservação dos recursos hídricos de forma integrada, descentralizada e participativa.

A referida lei menciona princípios fundamentais, dentre os quais concede o direito de outorga sobre o uso da água, para execução de obras ou serviços de interferência hídrica. A retirada da água dos cursos hídricos para os perímetros irrigados só é possível mediante autorização do órgão responsável pelo seu monitoramento e controle, sendo um dos instrumentos essenciais para seu gerenciamento. Essas medidas são adotadas para os reservatórios estratégicos, por apresentar vazão com elevada garantia e segurança hídrica. Vale destacar que um dos principais princípios estabelecidos na Lei nº 14 844, se refere ao uso prioritário dos recursos hídricos em caso de escassez, priorizando o consumo humano e a dessedentação de animais.

Mediante o exposto, várias estratégias de armazenamento de água foram adotadas pelo poder público para mitigar os impactos negativos nos períodos de estiagem e ampliar a

oferta hídrica, dentre elas: a construção de diversos reservatórios, com capacidade superior a 50 milhões de m³ (GÜTNER, 2002), a implantação de infraestrutura hídrica composta de barragens, eixos de interligação e adutoras. Só no Estado do Ceará foram contabilizados mais de 4.850 reservatórios com área superior a 5 hectares, dos quais 155 reservatórios são monitorados pelo setor público (PEREIRA, 2019).

Araújo; Mamede e Lima (2018), estudaram quatro açudes no Estado do Ceará, o açude Orós, Araras, Pentecoste e Aracoíaba, estabelecendo garantias de suprimento hídrico de acordo com os usos, 99% para consumo humano e dessedentação de animais, 95% para Indústria e Energia, 90% para irrigação e 80% para culturas temporárias. Essas garantias são válidas apenas para os reservatórios estratégicos, monitorados pelo setor público, destinados a atender os centros urbanos, as indústrias e os grandes perímetros irrigados (LIMA, 2021).

Para os reservatórios não estratégicos, considerados os de pequeno porte, construídos por particulares ou por moradores de comunidades rurais sem a participação do poder público, são desprovidos de elevada garantia hídrica, por não apresentar vazão regularizada por muito tempo.

A baixa garantia de vazão regularizada nos pequenos reservatórios é ocasionada pela pequena capacidade de armazenamento e os fatores climáticos como a temperatura, radiação solar, umidade relativa do ar e o vento, intensificam ainda mais a evaporação, reduzindo o volume de água disponível, chegando a secar completamente no período de estiagem (BRASIL & MEDEIROS, 2019). Esses fatores geram incerteza e insegurança hídrica para as comunidades rurais que necessitam dos pequenos açudes para agricultura, consumo humano e dessedentação de animais.

Para Lima (2020), os pequenos açudes podem ser explorados de forma intensa para atender outras demandas, como a irrigação de culturas temporárias em pequena escala, sendo que para isso, é necessário considerar outros meios de dispositivos hídricos para garantir o abastecimento humano e a dessedentação de animais.

O mesmo é mencionado por Brasil e Medeiros (2019) como estratégia para reverter o impacto da variabilidade no semiárido brasileiro sobre a produção agrícola. Os autores sugerem que açudes não estratégicos sejam utilizados para agricultura irrigada de pequena escala, adotando outros meios como açudes estratégicos, poços profundos ou cisternas para o abastecimento humano e animal.

3.3 Eficiência do uso da água em culturas agrícolas em regiões semiáridas

A agricultura é um setor que está intrinsecamente ligado à disponibilidade de água, e essa dependência influencia diretamente na economia em nível local, regional e global. A escassez de água ou secas prolongadas podem levar à redução das colheitas e à insegurança alimentar.

Algumas culturas agrícolas são indicadores de consumo de água devido à sua elevada demanda hídrica, é o caso da cultura do arroz, da banana, do tomate e etc. Por outro lado, determinadas culturas apresentam período produtivo curto, o que reduz o tempo de consumo de água. São as culturas produzidas em regime de sequeiro, sendo seu cultivo comum em regiões com recursos hídricos limitado. A quantidade de água que uma cultura agrícola requer para seu desenvolvimento depende de vários fatores e pode variar conforme a temperatura e o clima da região (VICO, 2020).

Em regiões secas, como o semiárido brasileiro, a oferta hídrica é restrita em decorrência das condições climáticas. A escassez de água no período fora da quadra pluviométrica, reduz a oferta de água na região, provocando disputa entre os pequenos produtores pelo uso da água nos perímetros irrigados (PAIVA, 2019). Para amenizar os efeitos na agricultura diante das interferências climáticas, Rasmussen et al; (2018) sugere que novas práticas de cultivos adaptadas ao clima sejam desenvolvidas. Além disso, culturas com período de semeadura curto sofrem menos interferências climáticas (BREINL, 2020).

Porém, a prática comum adotada pelos pequenos produtores para irrigação das culturas no semiárido brasileiro é de forma empírica, sem a preocupação com a quantidade de água necessária para a planta, o que leva a um aumento de demanda hídrica acima do necessário (SANTOS, 2000). É o caso da região do Baixo Jaguaribe no Estado do Ceará: segundo informações da Agência de Desenvolvimento do Estado do Ceará (ADECE, 2015), a quantidade de água destinada para os perímetros irrigados do Baixo Jaguaribe chega a ser 22% a mais do que o necessário. Segundo Paiva (2019), nos perímetros irrigados de Morada Nova, o consumo de água para a cultura do arroz chega a ser 5% superior à necessidade hídrica da cultura, e para o sorgo esse valor vai para 100% a mais do que o necessário.

Isso mostra a má gestão das águas para irrigação, bem como carência de informações da demanda hídrica das culturas por parte dos agricultores, corroborando com os autores citados anteriormente.

As culturas mais cultivadas na região semiárida são o feijão, o milho, a mandioca, o arroz, a cana-de-açúcar e o amendoim (DE MELO; VOLTOLINE, 2019). Essas culturas são

dependentes de chuvas, sendo a maioria produzidas por pequenos agricultores em regime de sequeiro. O feijão é um dos alimentos disponíveis à população, principalmente a de baixa renda, por ser de fácil adaptação aos mais diversos solos e climas, necessitando de cuidados simples e de baixo custo (CARVALHO, 2013). É uma cultura de ciclo curto com duração entre 70 a 120 dias e demanda hídrica na faixa de 600mm (BRASIL, 2019). O milho também é uma cultura muito significativa na região semiárida, ela é usada tanto na alimentação humana como animal. Possui ciclo produtivo na faixa de 110 dias e demanda hídrica em torno de 650mm (BRASIL, 2019), o custo de produção também é baixo e a maioria do cultivo ocorre no sistema de sequeiro (EMBRAPA, 2017).

Além do feijão e do milho, destaca-se também a produção de arroz principalmente para consumo humano. O cultivo pelo sistema de irrigação apresenta alto custo devido à necessidade de técnicas de manejo, preparo do solo, adubação, semente, entre outros. Já para o sistema de sequeiro, a cultura necessita de poucos insumos e baixo investimento (COLOMBO; JÚNIOR, 2015). É sensível às variáveis climáticas, porém quando as exigências da cultura são satisfatórias, têm-se bons resultados de produção (STONE; MOREIRA, 2005).

De acordo com dados da ADECE (2015), no Estado do Ceará, a rizicultura vem sendo implantada na região do Baixo Jaguaribe, sendo cultivada nos municípios de Jaguaruana, Morada Nova, Limoeiro do Norte, Quixeré, Russas, São João do Jaguaribe e Tabuleiro do Norte. A demanda hídrica da cultura é em torno de 850mm e duração do ciclo produtivo de 120 dias (PAIVA, 2019). Estudos recentes realizados por Frizzone (2021) na bacia hidrográfica do Jaguaribe, identificou que a cultura do arroz, dentre outras, como a cana-de-açúcar, a banana e o coco verde são as que mais consomem água.

Além das culturas citadas, vale destacar a cultura do sorgo, que aos poucos vem se tornando crescente na região, com produção destinada a forragem que é o principal componente na alimentação dos rebanhos nas bacias leiteiras (DE MELO, 2019). Possui alta capacidade de se adaptar às regiões semiáridas, apresenta elevada produção de matéria verde e grande quantidade nutricional, além de rebrotar após a colheita. Assim como o sorgo, a cana-de-açúcar também usada para consumo tanto humano como animal. É uma excelente fonte de energia, sendo capaz de suprir a demanda dos rebanhos na época de seca.

Outra cultura que também vem ganhando espaço nos perímetros irrigados é a palma forrageira, a mesma apresenta até 90% de água em sua massa, garantindo saciedade aos rebanhos nos períodos de seca. A palma desidratada constitui o farelo-de-palma, possui excelente concentração de energia para o rebanho, mantendo-os em boa condição corporal nos períodos de estiagem (CÂNDIDO, 2005).

Todas essas culturas produzidas no semiárido são culturas adaptáveis as condições climáticas da região e fazem parte tanto da alimentação humana como animal. Contudo, é importante avaliar o manejo da irrigação e dos fatores que interferem na produtividade, como a necessidade de aporte hídrico e a eficiência do sistema de irrigação (KIRCHNER, 2019). Além disso, é de fundamental importância para os produtores ter uma estimativa de quanto de água será usado em cada cultura e de qual manancial será captada.

3.4 Modelagem do uso da água na agricultura

A complexidade dos fatores que influenciam o ciclo hidrológico e das alterações ocasionadas pelo crescimento populacional, demandaram cada vez mais dos recursos naturais, principalmente a água. Essas alterações estimularam vários estudos com o propósito de desenvolver modelos hidrológicos para auxiliar no uso e gestão das águas.

De acordo com SINGH; WOOLHISER (2003), a partir da década de 1960, houve um avanço significativo nos modelos computacionais destinados a compreender a dinâmica hidrológica das bacias hidrográficas. Essas ferramentas são aplicadas para simular variáveis ambientais que influenciam nos fluxos de água e na sua utilização para as atividades humanas (LIMA, 2021).

Dentre os vários modelos computacionais desenvolvidos, destaca-se, o modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*), usado para simulação de bacias hidrográficas. Tzoraki (2015) usou esse modelo para simular o fluxo de massas de água no rio *Evrotas*, na Grécia.

Também foi desenvolvido o modelo WASA (*Model of Water Availability in Semi-Arid Environments*) usado na simulação de ambientes secos, tem sido largamente utilizado no semiárido brasileiro. Recentemente, Lima (2020) utilizou o modelo para analisar as respostas hidrológicas da Bacia Hidrográfica do Jaguaribe em diferentes cenários.

Outro modelo também usado na dinâmica hidrológica é o MGB-IPH, usado por Felix e da Paz (2016) para representar os padrões espaço-temporais dos processos hidrológicos (evapotranspiração, umidade do solo e geração de escoamento) na bacia do Rio Piancó – PB.

O método AguiarVM, desenvolvido por Oliveira (2021), foi usado para operação de reservatórios não monitoradas no semiárido. O autor aplicou o modelo em três reservatório do estado do Ceará: o açude Joaquim Tavares, General Sampaio e Marengo.

Apesar da existência de vários modelos computacionais usados como ferramenta de simulação hidrológica e gerenciamento de recursos hídricos, ainda existe uma carência de modelos direcionados ao uso da água na agricultura em regiões secas.

Diante da necessidade de um olhar voltado para o pequeno produtor rural no semiárido brasileiro, usando a água dos açudes não estratégicos para irrigação de culturas anuais, Brasil & Medeiros (2020) desenvolveram o modelo NeStRes como ferramenta para auxiliar no planejamento do uso racional das águas dos açudes não estratégicos como suplementação hídrica para as culturas de ciclo curto, de modo a elevar a renda com a produção agrícola.

3.5 Modelo NeStRes

O modelo NeStRes (*Model for Operation of Non-Strategic Reservoirs for Irrigation in Drylands*) desenvolvido por Brasil e Medeiros (2020) é um modelo físico-matemático escrito na linguagem Fortran com a finalidade de auxiliar na operação de reservatórios não estratégicos em ambientes com escassez de água para agricultura de pequena escala, visando a maximização da renda através da cultura irrigada.

O conceito de reservatórios não estratégicos surgiu através dos reservatórios que não são monitorados pelo Poder Público. Os reservatórios estratégicos geralmente apresentam maior capacidade de acumulação, destinados a atender grandes demandas e suprir a necessidade da população e dos centros industriais, enquanto os não estratégicos, são aqueles com menor capacidade e que secam com frequência, tendo sido construídos por agricultores ou moradores em comunidades rurais.

Contudo, nem todo reservatório de pequeno porte pode ser considerado como reservatório não estratégico, é o caso do açude Tijuquinha no Estado do Ceará. Conforme Lira (2017), o açude possui capacidade máxima inferior a um milhão de m³, apesar de possuir pequena capacidade de acumulação, o reservatório é considerado estratégico, por suprir a demanda hídrica das cidades de Aracoiaba e Baturité, e é monitorado pelos gestores de recursos hídricos. Por outro lado, o açude Marengo, situado no assentamento 25 de maio em Madalena (OLIVEIRA, 2012), possui mais de 15 milhões de m³ de capacidade de acumulação de água e, no entanto, é considerado não estratégico por não ser monitorado pelo setor hídrico (BRASIL, 2021).

Portanto, o principal critério na escolha dos açudes usados na simulação do modelo NeStRes é identificar se existe monitoramento dos reservatórios por parte dos gestores públicos e que os mesmos sequem com frequências no período de estiagem, o que os torna inviáveis para abastecimento humano.

O modelo considera a água como principal fator limitante à produção agrícola. A simulação é realizada com base na disponibilidade hídrica do reservatório na escala de tempo

diária e é composto por três módulos operacionais: módulo hidrológico, calcula a disponibilidade hídrica do reservatório e a vazão de retirada; módulo agrícola que simula a safra de acordo com a quantidade de água disponível e o módulo econômico, que calcula a renda da cultura irrigada.

No módulo hidrológico, responsável por calcular a disponibilidade de água no reservatório, é considerada diversos fatores, como a vazão de entrada de água no açude (por meio de chuvas e afluentes), a evaporação da água do reservatório e as saídas de água para usos. Com base nessas informações é determinada a garantia da captação de água para a irrigação suplementar das culturas.

O módulo Agrícola, uma vez determinada a disponibilidade de água, é simulado o ciclo de crescimento das culturas que serão irrigadas com base na água disponível no reservatório.

Por fim, é usado o módulo econômico de modo a avaliar a concessão financeira da agricultura irrigada no contexto do reservatório. Ele calcula a receita que pode ser obtida com a cultura irrigada, levando em consideração os custos de produção, os preços de mercado dos produtos agrícolas e outros fatores econômicos.

É importante mencionar que os açudes simulados no modelo sejam destinados exclusivamente para irrigação, deixando os demais para atender as demandas diversas, como consumo humana e dessedentação de animais.

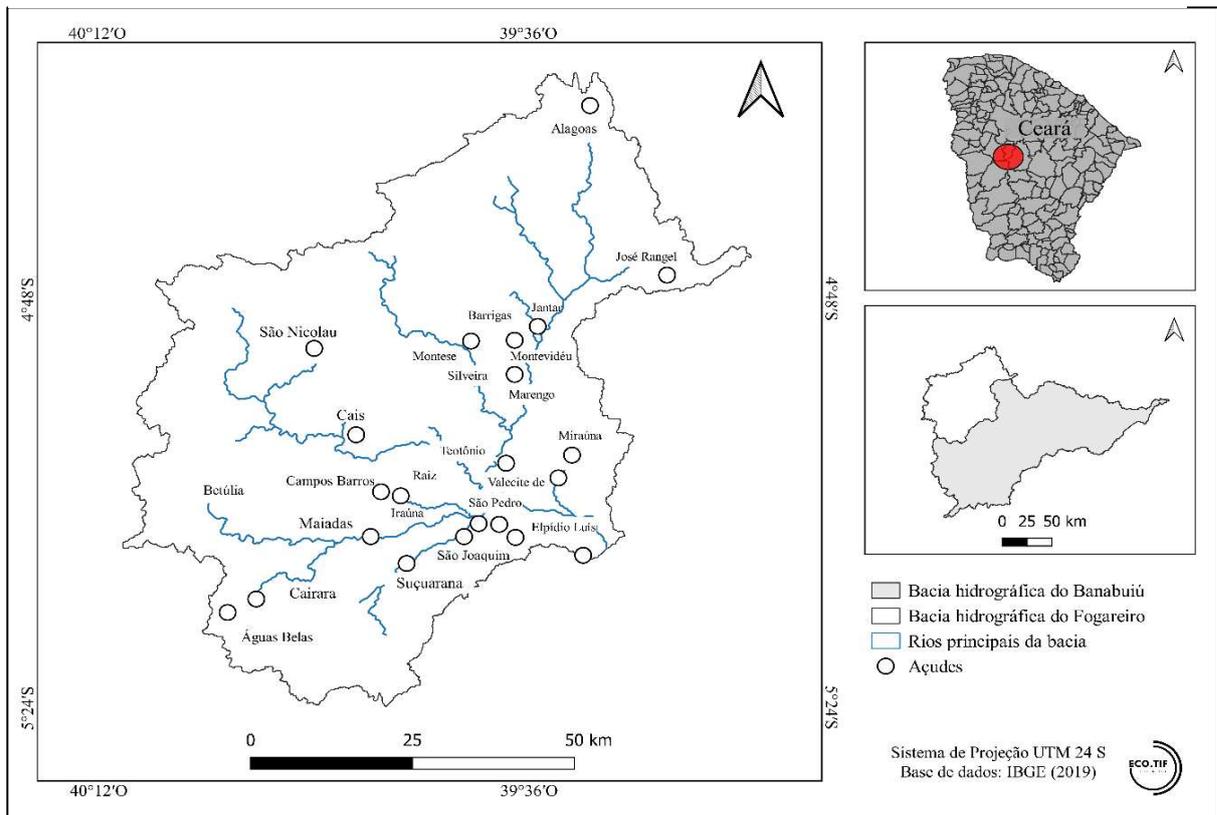
4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Área de Estudo

O estudo foi realizado na bacia hidrográfica do açude Antônio Ferreira Antero, conhecido como reservatório Fogareiro, situado na região do Sertão Central do Estado do Ceará, aproximadamente a 220 km de Fortaleza. A bacia do Fogareiro possui 23 açudes construídos pelo DNOCS em cooperação com proprietários rurais (PINHEIRO, 2004), com capacidade máxima de armazenamento entre $4,9.10^5 \text{ m}^3$ a $1,7.10^7 \text{ m}^3$, faz parte da bacia hidrográfica do Banabuiú e abrange parte dos municípios de boa Viagem, Monsenhor Tabosa, Madalena, Itatira, Quixeramobim e Santa Quitéria (Figura 1).

Conforme dados apresentados por Cavalcante (2018), a bacia possui área de aproximadamente 5.000 km^2 , perímetro de 680 km e o comprimento do rio principal (L) de 114 km.

Figura 1 - Mapa de localização da bacia do Fogareiro



De acordo com a classificação climática Köppen, a região apresenta clima semiárido quente, com temperaturas mensais variando de 25°C a 29°C , precipitação média

anual em torno de 700 mm e evaporação potencial de aproximadamente 2000 mm.ano⁻¹.

As precipitações se concentram entre três a cinco meses por ano e apresentam duas estações climáticas bem definidas, inverno e verão, com chuvas entre os meses de janeiro a junho e estiagem entre julho a dezembro (SANTOS, 2019).

A vegetação natural é composta em sua maioria por espécies da caatinga, prevalecendo a caatinga arbustiva aberta e arbustiva densa. A geologia é caracterizada pela predominância de rochas do embasamento cristalino, os solos são rasos e a água subterrânea é limitada. De acordo com CEARA (2020), o déficit hídrico na referida bacia é ocasionado pela baixa pluviometria da região, fazendo com que a drenagem natural fique restrita apenas à quadra chuvosa.

4.2 Simulações utilizando o modelo NeStRes

O modelo NeStRes, foi utilizado para simulação de 23 reservatórios da bacia do Fogareiro, com capacidade máxima de armazenamento entre 4,9.105 m³ a 1,7.107 m³. A escolha pelos referidos açudes se deu por se tratarem de estruturas não estratégicas, ou seja, não utilizados para abastecimento de sedes municipais ou aglomerados urbanos e, portanto, passíveis de aproveitamento na agricultura familiar, e para os quais dispunha-se de dados técnicos necessários para as simulações. As culturas agrícolas usadas na simulação foram o arroz, a batata-doce, o feijão, o milho e o sorgo. Essas culturas foram escolhidas por apresentarem ciclo de produção curto e já serem exploradas pela comunidade local, cultivadas por pequenos agricultores em regime de sequeiro fazendo parte da dieta da população da região.

Para a simulação, primeiramente é calculado o balanço hídrico dos reservatórios através do módulo hidrológico, em que a vazão de retirada é baseada na quantidade de água disponível no reservatório. Nesse módulo, a disponibilidade de água é avaliada pelo cálculo da dinâmica temporal (ARAÚJO, 2006), em que as componentes de entrada (precipitação direta no lago, fluxo do rio, recarga subterrânea) e as de saída (evaporação, infiltração, retiradas) são as determinantes para o dimensionamento da vazão de retirada para irrigação.

$$\frac{dV}{dt} = Q_{in}(t) - Q_{out}(t) \quad (1)$$

Em que: dV (m³) é a variação do volume armazenado no reservatório durante o intervalo de tempo dt ; Q_{in} é a soma de todas as recargas hídricas no reservatório e Q_{out} é a soma de todas as saídas. As vazões foram calculadas em m³·dia⁻¹.

Para determinar a vazão afluyente foi utilizado a modelo da *Curve Number* (CN),

que estima o escoamento superficial direto (Pe) em função das precipitações individuais em pequenas e médias bacias hidrográficas.

$$S = \left(\frac{25400}{CN} \right) - 254 \quad (2)$$

$$Pe = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad (3)$$

Em que: S é capacidade total de água no solo em função do CN (mm); Pe é o escoamento superficial (mm); P é a precipitação (mm).

A disponibilidade hídrica do reservatório é estimada através da simulação de diferentes retiradas de água para uso. Através dessa simulação o modelo fornece a vazão de água do reservatório e o nível de garantia.

Para a geometria do reservatório, foi utilizado a fórmula da cota/área/volume de Pereira et al. (2019).

$$V(h) = K \cdot h^\alpha \quad (4)$$

$$A(h) = \alpha \cdot K \cdot h^{\alpha-1} \quad (5)$$

Em que a $A(h)$ é a área alagada em função do nível da água (m^2); h é o nível da água (m); K e α são os coeficientes de abertura e forma, respectivamente.

No segundo módulo é calculado o balanço hídrico do cultivo, em que, o tempo e a quantidade a irrigar são definidos pela demanda hídrica da cultura. Nesse módulo são considerados os fluxos de entrada de água no solo (precipitação infiltrada e a irrigação) e os fluxos de saída (perdas por evapotranspiração, escoamento superficial e percolação). Nos dias sem precipitação, a irrigação é calculada para atender a capacidade de campo, eliminando o escoamento superficial e a percolação profunda, restando apenas a irrigação e a evapotranspiração (BRASIL & MEDEIROS, 2020).

$$Pe_{eff_i} = \begin{cases} P_i \times \left(\frac{4,17 - 0,02 \times P_i}{4,17} \right) & P_i < 83\text{mm} \\ 41,7 + 0,1 \times P_i & P_i \geq 83\text{mm} \end{cases} \quad (6)$$

Em que Pe_{eff_i} é a precipitação efetiva que fica disponível para as plantas (mm) e P_i é a precipitação total diária (mm).

A evapotranspiração de referência é estimada usando a equação proposta por Hargreaves e Samani (1985). Apesar de existirem outras maneiras de calcular a evapotranspiração, o método proposto foi escolhido pela limitação de dados climatológicos a longo prazo (BARIL & MEDEIROS, 2020; LIMA JÚNIOR et al., 2016).

$$ET_o = 0.408 \cdot \left(0.0023 \cdot (T_{\max} - T_{\min})^{0.5} \cdot (T_{\text{av}} - 17.8) \cdot Ra \right) \quad (7)$$

$$ET_c = ET_o \cdot kc \quad (8)$$

Em que: ET_o é a evapotranspiração de referência (mm); T_{\max} é a temperatura máxima no dia ($^{\circ}\text{C}$), T_{\min} é a temperatura mínima do dia ($^{\circ}\text{C}$) e T_{av} é a temperatura média no dia ($^{\circ}\text{C}$), e Ra é a radiação solar no topo da atmosfera ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$), ET_c é a evapotranspiração da cultura no dia i (mm) e; kc é o coeficiente de evapotranspiração da cultura para o dia i (adimensional).

Para irrigação é adotado turno de rega variável. O cálculo se baseia na quantidade máxima de água disponível no solo e tem como objetivo elevar o teor de umidade do solo à capacidade de campo antes que a cultura sofra com o estresse hídrico.

$$W_{Ra} = W_{\max} \cdot f \quad (9)$$

$$W_{\max} = (\theta_{FC} - \theta_{WP}) \cdot (\rho_s / \rho_w) \cdot Z_{RD} \quad (10)$$

Em que: W_{Ra} é a água disponível para as plantas (mm); f é a fração de água no solo em que a cultura começa a sentir os efeitos do estresse hídrico (adimensional); W_{\max} é a disponibilidade máxima de água no solo (mm); θ_{FC} e θ_{WP} são as umidades do solo na capacidade do campo e no ponto murcho (%), ρ_s e ρ_w são as densidades de solo e água ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$); Z_{RD} é a profundidade do sistema radicular (cm).

No início do ciclo, a demanda de água pela evapotranspiração de uma cultura durante todo o ciclo, por área cultivada, é determinada a partir da Equação 11.

$$q_d = \frac{DHC \cdot kc_{\max}}{tc} \cdot 10 \quad (11)$$

Em que: q_d é a demanda de água por unidade de área de uma cultura ($\text{m}^3\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{dia}^{-1}$); DHC é a demanda hídrica média de uma cultura (mm); kc_{\max} é o coeficiente de cultivo durante o período de maior demanda hídrica da cultura (adimensional).

A partir desses dados é determinada a área potencialmente cultivada, relação entre a água retirada para a irrigação (Q_{abs}) e a demanda da cultura por unidade de área. Essa relação determina o limite da área cultivada a partir da demanda de uma cultura durante um ciclo.

$$A_p = \frac{Q_{abs}}{q_d} \quad (12)$$

Em que: A_p é a área potencial para cultivo de uma cultura para uma Q_{abs} (ha).

Por último, o módulo econômico calcula os custos e as receitas para a produção do sistema agrícola. Foram considerados como custos, o sistema de produção (preparo do solo, sementes, suplementos agrícolas, mão de obra, entre outros); eletricidade; e custo de aquisição

inicial do sistema de irrigação. A receita corresponde ao valor obtido com a venda da produção ao final de cada ciclo, admitindo-se um preço fixo (R\$. kg⁻¹) do produto.

Esses valores são calculados ao longo do período de simulação, pois estão sujeitas as variações financeiras, como juros no caso de dívida e rendimento da poupança no caso de balanço positivo. São calculados pelas seguintes equações:

$$RL = RB - Ct \quad (13)$$

$$RL = RB - (Cp + Ce + Ic \pm Rs) \quad (14)$$

$$RL_n = 0 \rightarrow \text{Max}(Ic) \quad (15)$$

Em que: RL é a receita líquida na produção agrícola (R\$); RB é a receita bruta na produção agrícola (R\$); Ct são os custos totais na produção agrícola (R\$); Cp são os custos de operação da agricultura (\$); Ce são os custos da energia elétrica (R\$); Ic é a renda mensal do agricultor adquirida na produção agrícola (R\$); Rs é o rendimento do saldo sendo que pode ser positivo ou negativo (R\$); o índice n é a contagem do último dia de simulação no modelo.

4.2.1 Reservatórios simulados e culturas adotadas

Os dados dos 23 reservatórios da bacia do Fogareiro foram obtidos da base de dados disponibilizada por Brasil (2020). Em seu trabalho, o autor elaborou um banco de dados com mais de 400 reservatórios situados no Estado do Ceará, no qual constam as informações da capacidade máxima, extensão da bacia hidrográfica, profundidade e os coeficientes de abertura e forma dos açudes.

Uma observação importante a ser destacada é que os açudes simulados no modelo para irrigação das culturas de ciclo curto, são destinados exclusivamente para este fim, deixando outros reservatórios para uso prioritário, que é o consumo humano e a dessedentação de animal.

Na Tabela 1 são apresentados os dados dos açudes selecionados, especificando a extensão da bacia hidrográfica, a capacidade máxima de acumulação de água, a profundidade e os coeficientes de abertura e forma. As capacidades dos açudes simulados no modelo variam de $4,9 \cdot 10^5 \text{ m}^3$ a $1,7 \cdot 10^7 \text{ m}^3$.

Tabela 1- Características dos reservatórios estudados

Açude	Bacia hidrográfica (km ²)	Cap. Máx. (m ³)	h (m)	K ¹	α^1
Águas Belas	20,90	1.046.491	11,50	1654	2,64
Alagoas	3,10	576.560	10,83	1105	2,63
Barrigas	17,00	3.212.500	11,11	792	3,45
Betúlia	37,42	3.823.516	8,44	6754	2,97
Cairara	3,57	499.832	7,23	1330	3,00
Cais	3,51	705.657	10,38	3542	2,26
Campos Barros	22,84	3.393.500	10,05	5813	2,76
Elpídio Luís	8,00	931.600	9,37	1084	3,02
Iraúna	34,91	3.023.600	12,90	187	3,79
Jantar	3,74	648.859	7,60	2370	2,77
José Rangel	4,85	845.000	11,86	2024	2,44
Maiadas	6,48	816.100	9,48	1226	2,89
Marengo	120,00	17.325.834	16,23	8655	2,73
Miraúna	5,52	882.700	9,31	2282	2,67
Montese	50,20	885.834	7,74	2160	2,94
Montevideu	30,00	3.596.100	15,00	749	3,13
Raiz	5,00	1.500.000	9,03	3942	2,70
São Joaquim	30,80	5.086.159	8,96	21550	2,49
São Nicolau	36,10	890.000	6,26	6290	2,70
Silveira	67,86	4.976.300	13,77	1808	3,02
Suçuarana	4,88	930.671	8,00	6840	2,36
Teotônio	140,00	10.291.879	14,01	21783	2,33
Valecite de São Pedro	18,45	3.363.700	14,48	2403	2,71

Fonte: Elaborada pelo autor.

*K¹ é o coeficiente de abertura e α^1 coeficiente de forma: $V = K \cdot h^\alpha$

Para as características do solo no módulo agrícola, admitiram-se condições médias na área de estudo: solo com textura média, umidade de campo de (θ_{FC}) 22%, umidade no ponto de murcha (θ_{WP}) de 10% e a densidade (ρ_s) de 1,4g·cm⁻³ (BRASIL, 2020).

As culturas agrícolas selecionadas para a simulação no modelo (arroz, feijão, milho, batata doce e sorgo) são culturas exploradas pela comunidade local, possuem ciclo produtivo curto e geralmente são cultivadas por pequenos agricultores em regime de sequeiro, são culturas adaptadas em áreas com recursos hídricos limitado.

O arroz é a única cultura dentre as selecionadas que requer maiores cuidados no preparo do solo e na quantidade de água, caso contrário, seu cultivo é muito dispendioso. Apesar da demanda hídrica dessas culturas variar em torno de 600mm a 850mm, apresentam ciclo produtivo curto, o que torna viável seu cultivo utilizando a água dos açudes não estratégicos, permitindo que a cultura finalize seu ciclo antes que o açude esvazie completamente.

Os dados das culturas foram obtidos de trabalhos desenvolvidos na região semiárida do Nordeste do Brasil. As informações do arroz foram retiradas do trabalho de Paiva (2019) sobre o Perímetro Irrigado de Morada Nova; a batata doce foi do banco de dados da Embrapa (2020), produção da batata doce na região Nordeste do Brasil; os dados do feijão e do milho foram obtidos do trabalho desenvolvido por Brasil e Medeiros (2020) na bacia hidrográfica do Banabuiú; e o sorgo foi extraído do trabalho desenvolvido por Barbosa (2005) na região do Baixo Jaguaribe. Para cada ciclo da cultura foi considerado um período de folga de 10 dias entre o fim e o início do próximo ciclo.

Os custos de produção e o preço de venda dos produtos foram obtidos da base de dados da CONAB (2022). O valor gasto com energia elétrica foi considerado à parte, em função das condições de irrigação. Os dados das culturas estão organizados e apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Dados das culturas agrícolas simuladas neste estudo

Cultura	DH (mm)	DC (dias)	Z (m)	Kc ₁	Kc ₂	Kc ₃	Kc ₄	Produção (kg/ha)	Custo de produção (R\$·ha ⁻¹)	Preço de mercado (R\$·kg ⁻¹)
Arroz	850	120	0,30	1,10	1,15	1,20	1,00	7.000	6.900,00	1,45
Batata doce	800	120	0,80	0,50	0,85	1,05	0,65	16.000	8.600,00	1,10
Feijão	600	70	0,25	0,40	0,80	1,10	0,75	1.040	1.800,00	4,52
Milho	650	110	0,45	0,66	0,98	1,29	0,82	3.000	8.500,00	1,50
Sorgo	800	120	1,00	0,40	0,75	1,15	0,80	65.000	5.000,00	1,14

Fonte: Elaborada pelo autor.

¹ DH - Demanda hídrica da cultura; DC – Duração do ciclo produtivo; Z – Zona radicular; Kc – Coeficiente da cultura em quatro estágios fenológicos.

² Arroz com casca; feijão caupí e o sorgo bruto.

No módulo econômico foi aplicada a taxa de rendimento mensal de 0,65% ao mês e uma taxa de juros de 12% ao ano sobre o saldo negativo. Esses valores foram baseados no rendimento da poupança para o ano de 2022 e a taxa SELIC. A tarifa elétrica, calculada fora do valor de custo da produção, foi obtida da tabela da Enel (2022), para produtor rural no valor de R\$ 0,18 por quilowatt.

O sistema de irrigação utilizado foi por aspersão convencional devido a fácil operação e pode ser usado em diferentes tipos de solos. Foi considerado um valor médio de investimento de R\$ 9.000/ha, obtido da tabela de investimentos para agricultura (2022).

Os resultados obtidos para cada vazão de retirada (L/s), o modelo informa a garantia de fornecimento hídrico (%), a área irrigável (há) e a renda (R\$) adquirida com a produção da cultura.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

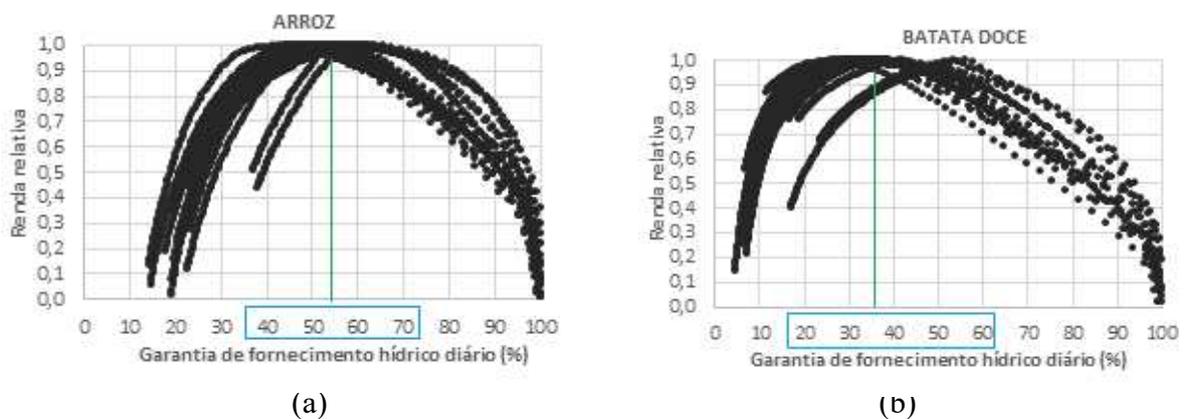
Neste capítulo são apresentados os resultados da pesquisa, fruto das simulações dos 23 açudes da bacia do Fogareiro e das 5 culturas de ciclo curto. Os resultados foram divididos em duas etapas: a primeira versa sobre as regras de operação dos açudes não estratégicos, com foco no setor de recursos hídricos, e a segunda sobre as condições de irrigação das diferentes culturas agrícolas, com foco no setor agrícola. Os dados obtidos nas simulações do modelo foram organizados em gráficos contendo a renda relativa, a garantia de abastecimento hídrico, a vazão de retirada e a área máxima irrigável.

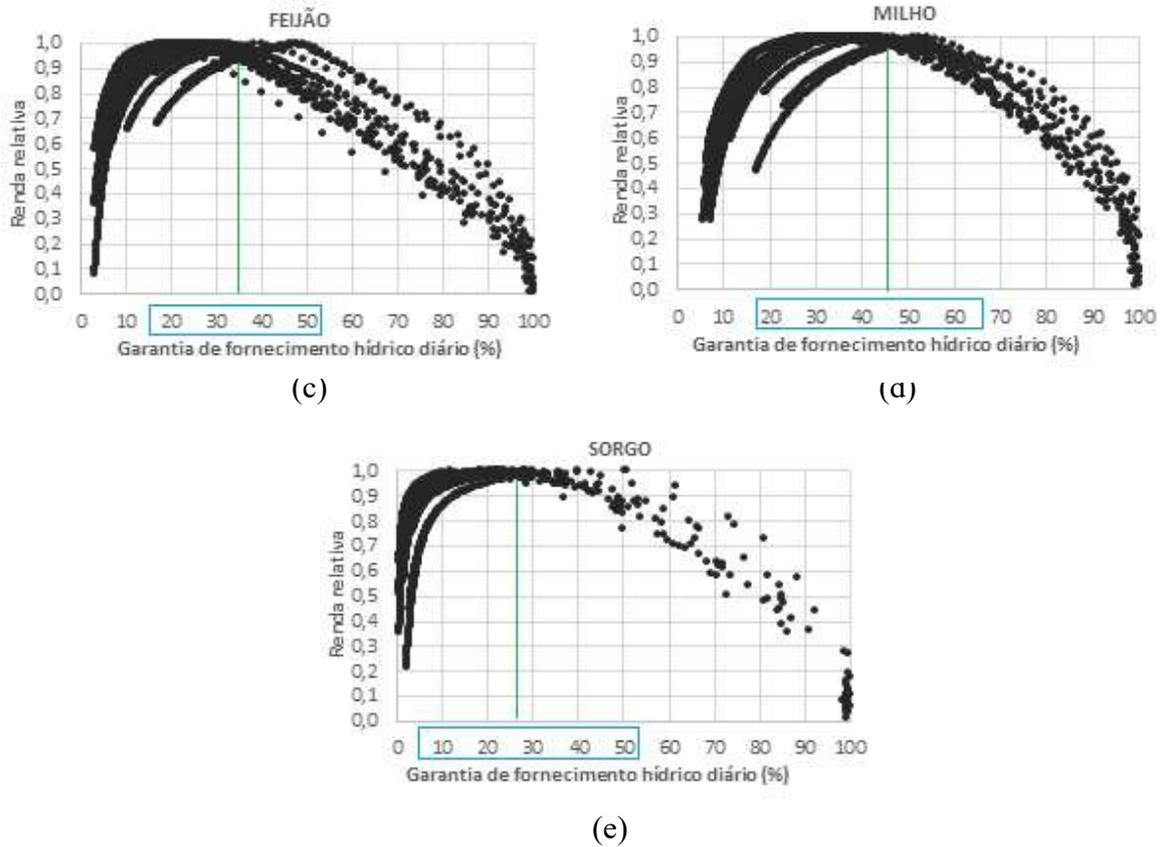
5.1 Regras de operação de açudes não estratégicos

Os resultados obtidos para os 23 açudes da bacia do Fogareiro simulados com o modelo NeStRes para irrigação de cinco culturas agrícolas temporárias demonstraram que, de um modo geral, o maior rendimento possível foi atingido quando os açudes foram operados com nível de garantia de fornecimento hídrico entre 10% a 70%. Observa-se, portanto, que a condição de operação ótima dos açudes para irrigação pode variar bastante em função da cultura agrícola e, portanto, da demanda hídrica, e também do açude.

A Figura 2 ilustra, para as diferentes culturas agrícolas simuladas e para todos os açudes, a relação entre garantia de fornecimento hídrico e renda relativa, ou seja, a razão entre renda obtida em uma simulação específica e a renda máxima possível proveniente de cada açude.

Figura 3 – Relação entre a garantia de fornecimento hídrico e renda relativa proveniente da produção irrigada de arroz (a), batata-doce (b), feijão (c), milho (d) e sorgo (e).





Fonte: Elaborada pelo autor.

Para a cultura do arroz (a) pode-se obter renda acima de 80% da máxima possível (ou seja, renda relativa entre 0,8 e 1,0) quando os açudes são operados com nível de garantia de fornecimento hídrico entre 35% e 70%. Para a batata-doce (b), essa faixa de renda relativa é obtida para garantias de fornecimento hídrico entre 20% a 60%, enquanto que para o feijão (c) deve ser entre 15% a 50%, para o milho (d) de 20% a 65% e para o sorgo (d) entre 5% a 50% de garantia de fornecimento hídrico. Portanto, ao se operar um açude qualquer com garantia de fornecimento hídrico entre 35% e 50%, é possível obter uma renda superior a 80% da renda máxima em qualquer combinação de açude e cultura agrícola testada neste estudo, essa podendo ser uma recomendação geral para operação de pequenos açudes para irrigação de culturas temporárias na área de estudo.

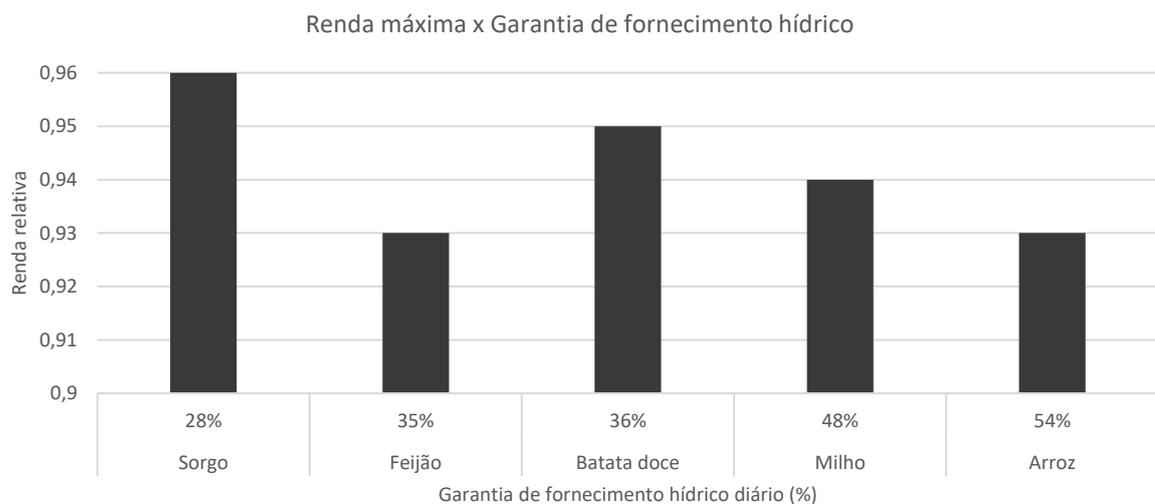
Essa garantia de abastecimento hídrico está relacionada à capacidade do açude de suprir a demanda hídrica da cultura sem que a mesma sofra com estresse hídrico ou que o açude venha a secar antes que a cultura finalize seu ciclo produtivo. Geralmente, elevados níveis de garantia (por exemplo, de 90%, como adotado no Ceará pela Companhia de Gestão de Recursos Hídricos – COGERH) são usadas para vazões regularizadas de açudes que atendam grandes centros de demanda (Araújo et al., 2019), porém, para os açudes não estratégicos pode-se estabelecer vazão de garantia hídrica para a irrigação de culturas de ciclo curto.

Essa regra de operação que busca elevada garantia restringe a retirada de água para

uso, configurando uma estratégia de por água. Porém, para açudes não estratégicos de pequenas dimensões, tais como os simulados neste estudo, essa prática é hidrologicamente muito ineficiente, como indicam os resultados acima. Conforme argumentam Brasil e Medeiros (2020), a manutenção da água por muito tempo em açudes pequenos promove maiores perdas por evaporação, e ainda assim, geralmente os mesmos são incapazes de disponibilizar água com elevada garantia devido ao esvaziamento completo dessas estruturas. Nesse contexto, pode-se estabelecer vazão com menor garantia de fornecimento hídrico para a irrigação de culturas de ciclo curto, que se adaptam à dinâmica hidrológica desse tipo de estrutura hidráulica, permitindo variar a área irrigada em cada ciclo, de acordo com o volume de água armazenado no açude.

Também pode-se obter o valor máximo de rendimento financeiro com garantia de abastecimento hídrico específico para cada cultura (Figura 3). Para a cultura do arroz, a renda obtida de qualquer açude é de pelo menos 93% da máxima (renda relativa de 0,93) ao se adotar um nível fixo de garantia de fornecimento hídrico de 54%. Para a batata-doce, a renda de qualquer açude chega a 95% da máxima para garantia fixa de 36%; para o feijão, a renda é de pelo menos 93% da máxima para garantia de 35%; a renda proveniente do milho é de pelo menos 94% da máxima para garantia de 48%; por fim, o sorgo atinge renda de 96% da máxima para qualquer açude, caso eles sejam simulados com uma garantia de fornecimento hídrico fixa de 28%.

Figura 4 - Garantia de fornecimento hídrico e a renda relativa obtida ao se admitir uma garantia fixa para os 23 açudes analisados.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Com base nos resultados das simulações, entende-se que as rendas máximas são

obtidas para valores relativamente baixos de garantia, ou seja, aumentando-se a probabilidade de esvaziamento e evitando-se manter as águas nos açudes por muito tempo. É o caso da cultura do sorgo, apresentando maior rendimento com garantia de abastecimento hídrico muito baixa, por outro lado, as culturas de feijão, milho, batata-doce e arroz, apresentaram os maiores rendimentos para maiores garantias hídricas.

Portanto, considerando uma faixa de garantia hídrica que abrange todas as culturas analisada para todos os açudes simulados neste estudo, pode-se afirmar que é possível atingir renda acima de 80% da renda máxima quando os açudes estiverem trabalhando com faixa de garantia hídrica entre 20% a 55%.

Percebe-se que a garantia hídrica para racionalização do uso da água de pequenos açudes apresenta valores compatíveis com culturas temporárias, onde se pode admitir um maior risco de falha, diferente da elevada garantia adotada nos reservatórios de maior porte utilizados para abastecimento humano, por exemplo.

É importante destacar que os açudes não estratégicos são muito susceptíveis às condições climáticas, chegando a secar pelo menos uma vez a cada dois anos, mesmo quando não utilizados, causando instabilidade e insegurança para as comunidades rurais, porém os resultados apresentados mostraram sua eficiência para irrigação de culturas temporárias.

Em East Mississipi, EUA, um açude com capacidade de 1×10^5 m³ usado para irrigação de milho, algodão e soja, chega a secar duas vezes a cada dez anos. A região apresenta precipitação anual em torno de 1300mm e a evapotranspiração chega a 600mm (Ouyang et al., 2018), enquanto no semiárido nordestino a taxa de evaporação potencial varia de 2000mm a 2600mm e a precipitação em torno de 500mm a 850mm (ARAÚJO, 2018).

O exposto mostra a influência do clima sobre as perdas por evaporação dos pequenos reservatórios e, conseqüentemente, as condições de uso da água. No entanto, a produção agrícola não é sensível apenas ao déficit hídrico, mas também ao estágio de desenvolvimento da cultura, quanto mais curto for o período de semeadura, menos interferências climáticas a cultura sofrerá (BREINL, 2020).

Diante desse cenário, a aplicação do modelo NeStRes mostra que é possível o aproveitamento racional das águas dos açudes não estratégicos de forma eficiente na irrigação de culturas de ciclo curto, podendo ser usado como ferramenta para auxiliar na gestão de pequenos açudes para agricultura irrigada.

Para BRASIL & MEDEIROS (2020), usar a água dos pequenos açudes de forma estratégica pode reduzir as perdas por evaporação e aumentar a renda máxima de agricultores. Regiões com precipitações elevadas e menores taxas de evaporação são favoráveis à produção

agrícola, maiores rendimentos e menores custos com irrigação, por outro lado, regiões mais secas, nem sempre é possível obter bom rendimento, pois além das condições climáticas não muito favoráveis, o modelo usado nas simulações indica que a renda é muito sensível às despesas e ao preço de venda no mercado.

Os valores das receitas e despesas, bem como o preço de venda das culturas usadas no estudo, foram obtidos principalmente da base de dados da CONAB (2022) considerando também a incidência de taxas e juros. Portanto, os resultados podem sofrer alterações em cenários de mudança da economia, o que pode favorecer ou prejudicar o arranjo produtivo.

Outra característica adotada na modelagem é o tempo de duração do ciclo das culturas. Foram adotadas culturas com ciclo de semeadura variando entre 70 a 120 dias, com intervalo de 10 dias entre o fim de um ciclo e o início do outro. Essa duração permite que ambas as culturas sejam reproduzidas pelo menos duas a três durante o ano.

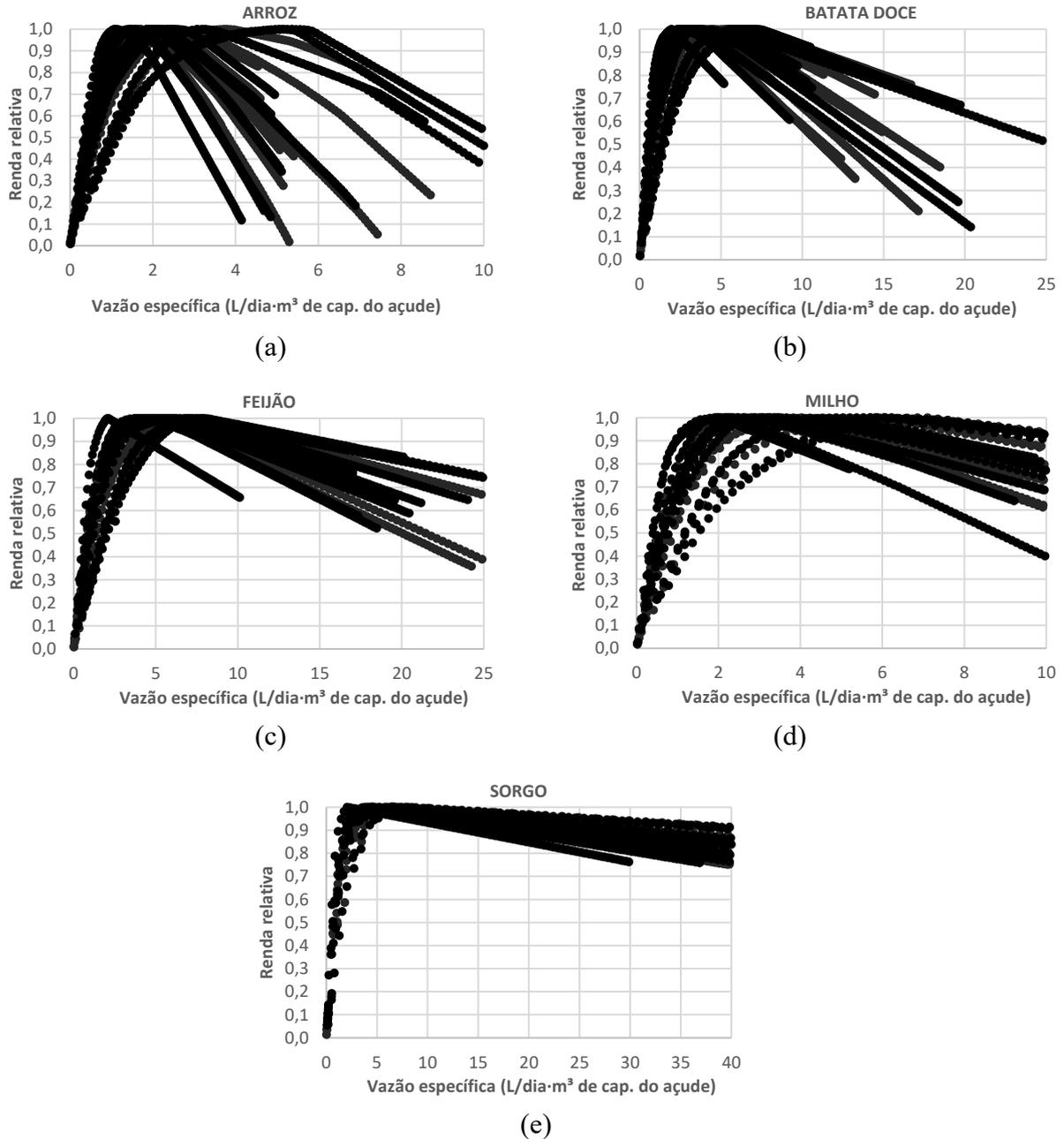
Portanto, diante das variações climáticas e da baixa confiabilidade do acúmulo das águas dos açudes não estratégicos para o abastecimento humano, o modelo NeStRes indica que é possível o uso das águas desses açudes de forma racional e eficiente para produção agrícola, fortalecendo o papel dos açudes não estratégicos e descentralizando o sistema de recursos hídricos, que atualmente é concentrado nos açudes estratégicos.

Os resultados também corroboraram com BRASIL & MEDEIROS, (2020) sobre a prática de guardar água adotada pelas comunidades rurais. Nessa prática tem-se uma maior perda por evaporação, enquanto que é possível usar a água de forma mais intensa e racional, gerando maiores retornos financeiros.

5.2 Condições de irrigação de diferentes culturas agrícolas

Para os 23 açudes simulados, também foram calculadas as vazões específicas para irrigação de cada cultura, através do modelo foi possível determinar a quantidade máxima de água em L/s por m³ que a cultura iria consumir (Figura 4). Sendo assim, para cada cultura, a vazão específica calculada pelo modelo atinge um ponto máximo da renda relativa, ou seja, a razão entre a vazão diária de retirada e a capacidade do respectivo açude.

Figura 5 - Relação entre a vazão específica para irrigação (L/dia por m³ de capacidade do açude) e a renda relativa da produção irrigada de arroz (a), batata-doce (b), feijão (c), milho (d) e o sorgo (e).



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para a cultura do arroz, a máxima renda foi obtida quando os açudes foram operados com vazão de retirada de 2 L/dia por m³ de capacidade máxima do açude, para a batata-doce, essa vazão foi de 5 L/dia por m³, para o feijão a vazão de retirada que maximiza a renda foi de 6 L/dia por m³, para a cultura do milho, a retirada de água do açude foi de 2 L/dia por m³ e para a cultura do sorgo, a vazão específica de retirada para irrigação foi de 5 L/dia por m³ para obtenção da máxima renda possível.

Observa-se que, conforme os dados apresentados para cada cultura, existe uma vazão específica de retirada máxima de água, permitindo que o agricultor produza de forma adequada, usando a quantidade de água ideal para o desenvolvimento da planta, obtendo o maior rendimento financeiro com a produção.

Considerando uma faixa de retirada de água por dia para obtenção de renda equivalente a pelo menos 80% da máxima na maioria dos açudes, observa-se que para a cultura do arroz essa faixa está entre 1,5 a 3 L/dia por m³ de capacidade do açude, o mesmo pode ser interpretado para a cultura da batata-doce, com vazão de retirada na faixa de 3 a 8 L/dia por m³, para o feijão essa faixa é de 3 a 12 L/dia por m³, para o milho entre 2 a 6,5 L/dia por m³, e para a cultura do sorgo, qualquer vazão de retirada acima de 1 L/dia por m³ de capacidade do açude conseguirá renda acima de 80% da renda máxima possível. Com base nos valores obtidos nas simulações, constata-se que qualquer açude especificado no estudo operado com vazão de retirada de 3 L/dia por m³ garantirá uma renda acima de 80% da renda máxima possível em cada reservatório.

Portanto, com base nos valores apresentados, pode-se deduzir que qualquer açude especificado no estudo operado com vazão de retirada de 3 L/dia por m³ atingirá renda das culturas acima de 80% da renda máxima possível.

Esses dados servem de base na ausência de informações mais detalhadas de operação de reservatórios não estratégicos, auxiliando o pequeno produtor rural quanto de água deve ser utilizado para se atingir um bom patamar de renda financeira das culturas, além disso, é importante mencionar que a maioria dos agricultores operam os reservatórios de forma empírica e acabam consumindo mais água do que o necessário para o desenvolvimento da cultura ou adotam a prática de poupar água, o que eleva as perdas por evaporação, fazendo com que o açude seque mais rapidamente (BRASIL & MEDEIROS, 2020).

Os valores apresentados são de extrema importância para o planejamento do uso da água dos reservatórios não estratégicos para irrigação de culturas temporárias no semiárido brasileiro, já que os mesmos carecem de dados para definição de critérios específicos de operação em cada caso, uma vez que, localizados em regiões secas são desprovidos de garantia hídrica para múltiplos usos, mas que podem ser usados de forma racional para irrigação de culturas temporárias.

Neste estudou, considerou-se irrigação compatível com a demanda hídrica das culturas, mas outro aspecto relevante a ser considerado no aproveitamento de açudes não estratégicos diz respeito à eficiência do uso da água. Por exemplo, trabalho desenvolvido por Paiva (2019) no perímetro irrigado de Morada Nova, indica que a quantidade de água usada

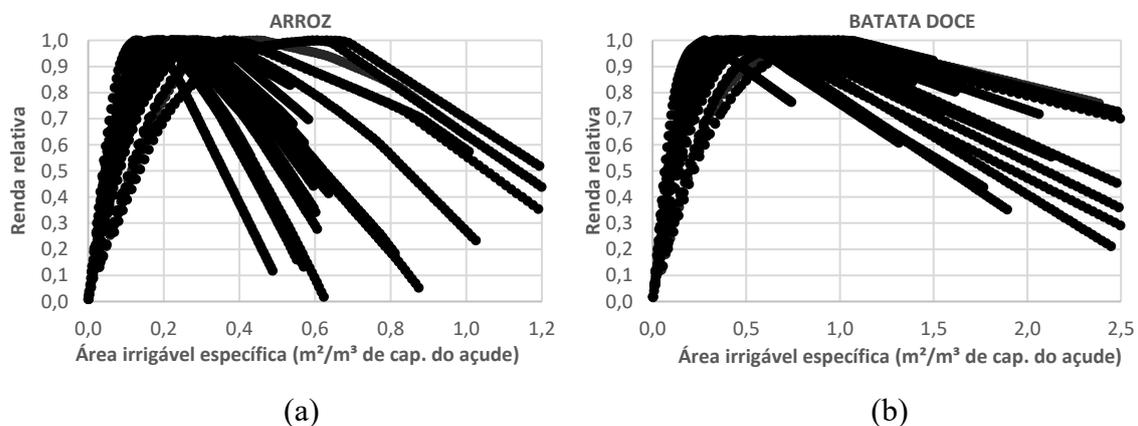
para irrigação de arroz, milho, feijão e sorgo foi maior do que a necessária pelas culturas, o mesmo tendo sido identificado por Frizzone (2021) na bacia hidrográfica do Rio Jaguaribe. De acordo com a Agência de Desenvolvimento do Estado do Ceará (ADECE, 2015), para as culturas produzidas no Baixo Jaguaribe, a quantidade de água destinada para os perímetros irrigados chega a ser 22% a mais do que o necessário. Esses estudos mostram a má gestão das águas para irrigação, sendo possível intervenções técnicas relacionadas ao manejo do solo no sistema água-planta, visando melhorar a produtividade com menor quantidade de água e, assim, garantir um melhor aproveitamento dos açudes não estratégicos.

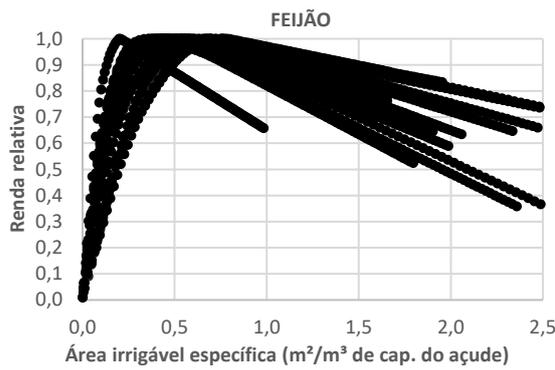
Comparando os resultados deste estudo com a prática de irrigação no semiárido brasileiro, constata-se que o potencial de irrigação na região apresenta subutilizado, prejudicando a produção agropecuária nas pequenas comunidades que é altamente dependente dos pequenos reservatórios.

Dessa forma, a manutenção familiar e o desenvolvimento agropecuário têm a precipitação como fonte principal de água (PORTO, 2011), inexistindo uma política agrícola que garanta do ponto de vista dos recursos hídricos, segurança mínima ao setor produtivo (CEARÁ, 2018).

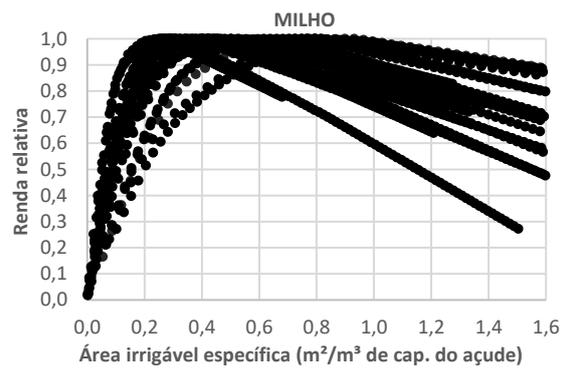
Calculou-se também a variação da renda proveniente da irrigação suplementar a partir de pequenos açudes em função da área máxima irrigável específica, que consiste na razão entre a área irrigável em cada simulação (em função da vazão de retirada) e a capacidade do respectivo açude. Os resultados são apresentados na Figura 5.

Figura 6 - Relação entre área irrigável específica (m^2 por m^3 de capacidade do açude) e a renda relativa proveniente da produção irrigada de arroz (a), batata-doce (b), feijão (c), milho (d) e sorgo (e).

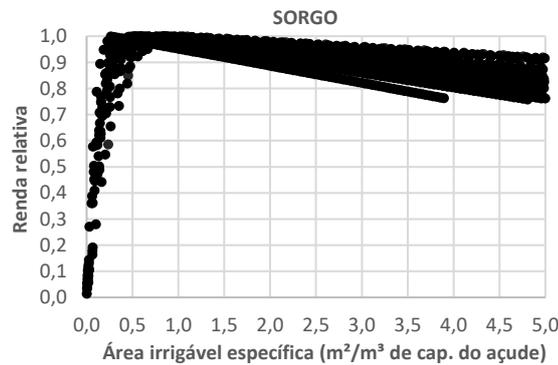




(c)



(d)



(e)

Fonte: Elaborada pelo autor.

Considerando uma faixa de área irrigável para cada cultura de modo a obter renda acima de 80% da máxima, foram obtidas áreas máximas irrigáveis específicas entre 0,18 m² e 0,38m² por m³ de capacidade do açude para o arroz; de 0,40 a 1,0 m²/m³ para a batata-doce e o feijão; para o milho a faixa é de 0,30 m²/m³ a 0,90 m²/m³; e para o sorgo, a área irrigável específica que garante renda de pelo menos 80% da máxima em cada açude varia de 0,04 m²/m³ a 5,0 m²/m³.

A área irrigável específica que promove as maiores rendas varia de acordo com as culturas, como indicado na Tabela 3. Na cultura do arroz(a), para cada m³ de capacidade do açude é possível irrigar uma área de 0,3 m² para se obter as maiores rendas no conjunto de reservatórios simulados. Para a batata-doce e o feijão, essa área passa a ser 0,6 m² por m³ de capacidade do açude, enquanto para o milho, a área específica irrigável é de 0,5 m² por m³ de capacidade e para o sorgo é de 0,7 m² por m³. Esses resultados demonstram a capacidade dos açudes em converter volume de água armazenado em área produzida, podendo servir de indicador de seleção de culturas.

Tabela 3 - Área irrigável de cada cultura que promove as maiores rendas no conjunto de reservatórios simulados.

Cultura	Área irrigável específica (m²/m³)
Arroz	0,3
Batata doce	0,6
Feijão	0,6
Milho	0,5
Sorgo	5,0

Fonte: Elaborada pelo autor.

De todas as culturas analisadas, é possível constatar que o sorgo é a que possui maior faixa de área irrigável obtendo rendimento acima de 80%, ou seja, é a cultura que melhor se adapta às condições de irrigação a partir açudes não estratégicos, de maneira que independentemente das condições de uso da água e área irrigada, é possível se obter bons rendimentos.

Os resultados obtidos neste estudo indicam que o uso racional dos açudes não estratégicos para a irrigação de culturas temporárias beneficia não somente o setor agrícola, mas também o de recursos hídricos, ao propor estratégias de melhor aproveitamento das águas do estado. Ressalta-se ainda que o estabelecimento de critérios para operação de pequenos açudes contribui para a diversificação das fontes hídricas para produção agrícola, gerando menor dependência dos açudes estratégicos e, portanto, aliviando a pressão sobre os mesmos. Na ausência de dados para operação de pequenos reservatórios, os valores obtidos neste estudo de níveis de garantia, vazões específicas para irrigação e áreas irrigáveis específicas que promovem bons rendimentos para o agricultor podem servir como indicadores.

Portanto, pode-se destacar que o modelo NeStRes representa uma importante ferramenta de planejamento da atividade agrícola no semiárido brasileiro, ao propor o uso racional dos açudes não estratégicos para a produção de culturas temporárias.

Nessa perspectiva, surge uma reflexão sobre algumas características importantes que devem ser consideradas em trabalhos futuros:

- Qual é a aceitação dos agricultores em adotar nova ferramenta que auxilie no planejamento e na decisão da cultura a ser cultivada?
- Qual é o impacto ocasionado pelo uso intenso das águas dos açudes não estratégicos para irrigação sobre todo o sistema hídrico?
- É viável a aplicação dessa ferramenta em políticas públicas, auxiliando na gestão dos reservatórios não estratégicos?

6 CONCLUSÕES

As simulações de 23 açudes na bacia do Fogareiro para a irrigação de culturas agrícolas temporárias, utilizando o modelo NeStRes, permitiram concluir que as condições de uso da água que maximizam a renda proveniente da produção variam de acordo com o açude e a cultura. No entanto, observam-se faixas fixas de uso da água que resultam em bom rendimento para todos os açudes simulados, indicando que é possível propor condições médias de operação para um conjunto de açudes no caso de escassez de dados para cada estrutura.

Para a cultura do arroz, a renda máxima do agricultor foi atingida quando os açudes foram operados com garantia de abastecimento hídrico diário na faixa de 35% a 70%, para a batata-doce essa garantia ficou entre 20% a 60%, o feijão entre 15% a 50%, o milho em torno de 20% a 65% e o sorgo entre 0,5% a 50% de garantia de fornecimento hídrico diário.

É possível obter renda acima de 80% da máxima em cada açude se todos forem operados com garantia de fornecimento hídrico entre 35% a 70%, independentemente da cultura. Essa faixa de valores corresponde a um uso intenso da água, com probabilidade de esvaziamento do reservatório entre 65% e 30%, o que indica que a cultura de poupar água para aumentar a garantia de fornecimento hídrico é pouco eficiente para açudes não estratégicos.

Conclui-se também que é possível estabelecer vazão específica para irrigação de acordo com a capacidade do açude. O arroz apresentou vazão específica diária na faixa de 1,5 a 3 L/dia por m³ de água para obter rendimento financeiro acima de 80%, o mesmo pode ser interpretado para a cultura da batata-doce, com vazão de retirada na faixa de 3 a 8 L/dia por m³, para o feijão essa faixa de retirada chega a ser de 3 a 12 L/dia por m³, para o milho entre 2 a 6,5 L/dia por m³ e para a cultura do sorgo, qualquer vazão de retirada acima de 1 L/dia por m³ conseguirá renda máxima acima de 80%.

Por sua vez, as áreas irrigáveis específicas (razão entre a área irrigável em cada simulação e a capacidade do respectivo açude) que maximizam a renda são de 0,3m²/m³ para a cultura do arroz, 0,6 m²/m³ para as culturas da batata-doce e do feijão, 0,5 m²/m³ para o milho e 0,7 m²/m³ para a cultura do sorgo.

Portanto, conclui-se que o uso das águas dos açudes não estratégicos da bacia do Fogareiro usados exclusivamente para irrigação de culturas de ciclo curto pode gerar bons resultados de rendimento financeiro, mostrando que é possível utilizar as águas desses reservatórios de forma eficiente e racional.

REFERÊNCIAS

- ADECE. Agência de Desenvolvimento do Estado do Ceará. **Estudo técnico para a alocação de água destinada à irrigação no médio e baixo Jaguaribe**: definindo os critérios e o monitoramento - relatório final. 2015. Disponível em: https://www.adece.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/98/2017/07/relatrio_3.1-7.pdf. Acesso em 02 out. 2021.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements). FAO. Irrigation and Drainage Paper N°56, FAO, Rome, 298 p. 1998.
- ANA – Agência Nacional de Águas, Atlas irrigação: **Uso da água na agricultura irrigada**. Brasília: 2017.
- ANA – Agência Nacional de Águas. **Manual de usos consultivos da água no Brasil**. Brasília: 2019. Disponível em: http://www.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/central-de-publicacoes/ana_manual_de_usos_consultivos_da_agua_no_brasil.pdf/view. Acesso em: 03 out. 2021.
- ANA. **Uso da água na agricultura de sequeiro no Brasil (2013-2017)**. Agência Nacional de Águas, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. - Brasília: ANA, 2020.
- BARDOSA, F. C. **Estimativa das necessidades de irrigação e avaliação do impacto da cobrança pelo uso de recursos hídricos na bacia do Baixo Jaguaribe – Ce**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2005.
- BRASIL, P.; MEDEIROS, P. NeStRes – Model for Operation of Non-Strategic Reservoirs for Irrigation in Drylands: Model Description and Application to a Semiarid Basin. **Water Resources Management**, 2019.
- BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 1997. Institui a **Política Nacional de Recursos Hídricos**, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei no 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei no 7.990, de 28 de dezembro de 1989.
- BRASIL. Lei nº 14.844 de 28 de dezembro de 2010. Dispõe sobre a **Política Estadual de Recursos Hídricos**, institui o Sistema Integrado de Gestão de Recursos Hídricos - SIGERH, e dá outras providências.
- BREINL K.; DI BALDASSARE G.; MAZZOLENI M.; LUN D. e VICO G.; **Extreme dry and wet spells face changes in their duration and timing**, 2020. Environmental Research Letters 15 074040.
- BURTE, J.; COUDRAIN, A.; FRISCHKORN, H.; CHAFFAUT, I.; KOSUTH, P. Human impacts on components of hydrological balance in an alluvial aquifer in the semiarid Northeast, Brazil. **Hydrological Sciences Journal**, v.50, p.95-110, 2005
- CAVALCANTE, R. R.; CAMPOS, A. D.; LOPES, F. B.; ANDRADE, E. M. **Caracterização Morfométrica e Uso e Ocupação: Estudo de caso da Bacia Hidrográfica do açude Fogareiro**- Ce. V WINOTEC – O semiárido brasileiro – Realidade e Perspectivas, 2018.
- CÂNDIDO M. J. D.; ARAÚJO G. G. L.; CAVALCANTE M. A. B. **Pastagens no ecossistema semi-árido brasileiro**: Atualização e perspectivas futuras. Anais, 42º Revisão

Anual da Sociedade Brasileira de Zootecnia, Goiânia, 2005.

CARVALHO V. R., KORCELSKI C., PELISSARI G., HANUS A. D., DA ROSA G. M. **Demanda hídrica das culturas de interesse econômico**. Centro Científico Conhecer, Goiânia v.9, n.17; p.2013.

CEARÁ. **Cenário Atual dos Recursos Hídricos do Ceará**. Fortaleza: INESP, 2008. 174 p. Disponível em: <https://www.al.ce.gov.br/index.php/pacto-das-aguas>. Acesso em: 27 ago. 2021.

CEARÁ. **Plano de Ações Estratégicas de Recursos Hídricos do Ceará**. Fortaleza: 2018. Disponível em: <https://www.srh.ce.gov.br/plano-de-acoes-estrategicas-de-recursos-hidricos-do-ceara-pae-rh/>. Acesso em: 28 set. 2021.

CEASA – Central de Abastecimento do Ceará. **Boletim informativo diário de 30/10/2021**. Sistema Nacional de Informação de Mercado Agrícola-SIMA: Fortaleza, 2021.

CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA. **Análise dos principais polos produtores de banana no Brasil**. Piracicaba: CEPEA, 1 ago 2003. Disponível em: <https://www.cepea.esalq.usp.br/imprensa/?page=342&search=1>. Acesso em: 29 nov.2021.

CHRISTOFIDIS D. **Água, irrigação e agropecuária sustentável**. Revista Política Agrícola, 2013. Disponível em: <https://seer.sede.embrapa.br/index.php/RPA/article/view/286/247>. Acesso em 15 nov. 2021.

COLOMBO, T. C.; JÚNIOR, A. M. **Comparativo dos custos na produção entre arroz irrigado e arroz sequeiro**: Um estudo de caso em uma propriedade no Sul Catarinense. ABCustos Associação Brasileira de Custos. Vol. X nº2 – Maio - Agosto 2015.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Custos de Produção Agrícola: A metodologia da Conab**. Brasília: Conab, 2021. Disponível em: www.conab.gov.br/images/arquivos/informacoes_agricolas/metodologia_custo_prod. Acesso em: 15 out. 2021.

COSTA, A. C. M.; SANTOS, M. A. dos. A gestão dos recursos hídricos no Brasil e a questão da água subterrânea. **Águas Subterrâneas**, 2000.

CURI, R. C.; CURI, W. F.; ALMEIDA, M. A. de. Alternativas de operação de perímetros irrigados com base no uso da água de reservatórios superficiais e subterrâneos. **Águas Subterrâneas**, n. 1, 2002.

DE ARAÚJO, J. C. **Recursos hídricos em regiões semiáridas**. In: GHEYI, H. R. et al. Recursos hídricos em regiões semiáridas. Campina Grande, PB: Instituto Nacional do Semiárido, 2012, p. 29-43.

DE ARAÚJO, J. C. Variações climáticas e suas implicações para o semi-árido brasileiro – a contribuição do programa WAVES. In: HOFMEISTER, W. **Água e desenvolvimento sustentável no semi-árido**. Fortaleza: Fundação Konrad Adenauer, 2002.

DE ARAÚJO, J. C.; GÜNTNER, A.; BRONSTERT, A. Loss of reservoir volume by sediment deposition and its impact on water availability in semiarid Brazil. **Hydrological Sciences Journal**, v. 51, n. 1, p. 157-170, 2006.

DE ARAÚJO, J. C.; MAMEDE, G. L.; DE LIMA, B. P. Hydrological guidelines for reservoir operation to enhance water governance: Application to the Brazilian Semiarid region. **Water (Switzerland)**, v. 10, n. 11, 2018.

DE ARAÚJO, J. C.; PIEDRA, J. I. G. The cold regions hydrological model: a platform for basing evidence. **Hydrological Processes**, v. 23, p. 1169-1178, Jan. 2009.

DE ARAÚJO, J.C.; MAMEDE, G.L.; de LIMA, B.P. Hydrological guidelines for reservoir operation: Application to the Brazilian semiarid region. **Water**. 10, 16-28, 2018. DOI: 10.3390/w101116628

DE ARAÚJO, J.C.; MAMEDE, G.L.; de LIMA, B.P. Hydrological guidelines for reservoir operation: Application to the Brazilian semiarid region. **Water**. 10, 16-28, 2018. DOI: 10.3390/w101116628

DE ARAÚJO, José C.; BRONSTERT, Axel. A method to assess hydrological drought in semi-arid environments and its application to the Jaguaribe River basin, Brazil. **Water International**. 2015. DOI: 10.1080/02508060.2015.1113077

DE FIGUEIREDO, J. V. et al. Runoff initiation in a preserved semiarid Caatinga small watershed, Northeastern Brazil. **Hydrological Processes**, v. 30, n. 13, p. 2390-2400, 2016.

DE MELO R. F.; VOLTOLINE T. V., Agricultura familiar dependente de chuva no semiárido. EMBRAPA. BRASÍLIA, 2019.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Indicações técnicas para o cultivo de milho e sorgo no Rio Grande do Sul, safra 2017/18 e 2018/2019. Brasília, 2017.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Faostat. Disponível em: <http://www.fao.org>. Acesso em: 21 out. 2021.

FILHO, E. R. V. **Diagnóstico e desafios da agricultura brasileira**. Rio de Janeiro: IPEA, 2019. Disponível em: https://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com_content&view=article&id=35200. Acesso em: 02 out. 2021.

FILHO, J. B. M. **Aspectos técnicos, econômicos e sociais da produção de batata doce**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021.

FOLEY, J. A. *et al.* Global consequences of land use. *Science*, v. 309, n. 5734, p. 570-574, 2005

FRIZZONE, J. A.; LIMA, S. C. R. V.; LACERDA, C. F.; MATEOS, L. Socio-Economic Indexes for Water Use in Irrigation in a Representative Basin of the Tropical Semiarid Region. *Water*, v. 13, n. 2643, 2021.

GHEYI, H. R. et al. **Recursos hídricos em regiões semiáridas: estudos e aplicações**. Campina Grande: INSA, 2012.

GONZÁLEZ, N. A. C. La hidrogeología urbana y el papel de las aguas subterráneas en el desarrollo económico y social de la ciudad de Pinar del Río, Cuba. In: Convención Internacional de Geografía, Medioambiente y Ordenamiento Territorial, 2, 2011, Havana. Anais.

GÜNTNER, A. **Large-scale hydrological modelling in the semi-arid north-east of Brazil**. Postdam: Postdam Institute for Climate Impact Research (PIK), 2002a.

GÜNTNER, Andreas. **Large-Scale Hydrological Modelling in the Semi-Arid North-East of Brazil**. 2002. 128 f. Dissertation (Doctor of Natural Sciences) – Department of Geocology, University of Potsdam, Potsdam, 2002.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo agropecuário. Rio de Janeiro

2017. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/>. Acesso em: 23 agosto 2021.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo demográfico 2010. Disponível em: www.ibge.gov.br. Acesso em: 11 outubro. 2021.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/>. Acesso em: 23 agosto 2021.

IPECE - Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará, enfoque econômico 2019. Disponível em: <https://www.ipece.ce.gov.br/enfoque-economico/>. Acesso em 03 dez 2021.

JÚNIOR A. S. V. Célula de Estudos e Pesquisas Macroeconômicas, Banco do Nordeste/ETENEE. Ano I - Nº 165 - 10.10.2018 ISSN 2594-7338. Disponível em: https://www.bnb.gov.br/documents/1342439/3950249/165_10_10_2018. Acesso em 15 novembro 2021.

KIRCHNER, Jardel Henrique et al. Funções de produção e eficiência no uso da água em sorgo forrageiro irrigado. **Brazilian Journal of Agricultural Sciences/Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 14, n. 2, 2019.

KOCH, H. et al. Effects of model calibration on hydrological and water resources management simulations under climate change in a semi-arid watershed. **Climatic Change**, v. 163, n. 3, p. 1247-1266, 2020.

LIMA I. M. A. **Fontes e doses de nitrogênio na cultura da banana em regiões semiáridas**. 2017. Dissertação (Doutorado em Ciências do Solo) - Programa de Pós-Graduação em Ciências do Solo, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

LIMA, T. B. R. **Resposta hidrológica de uma grande bacia hidrográfica no semiárido brasileiro diante de cenários de transposição hídrica e racionalização do uso de reservatórios não estratégicos**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2020.

LIRA-SAADE, R. L. Estudios taxonomicos y ecogeograficos de las cucurbitaceae latinoamericanas de importancia económica. Rome: IPGRI, 1995. 281 p. (IPGRI. **Systematic and Ecogeographic Studies on Crop Genepools**, 9).

LIWEN H.; WU H.; WANG G.; MENG Q.; ZHOU Z. The effects of including corn silage, corn stalk silage, and corn grain in finishing ration of beef steers on meat quality and oxidative stability. **ELSEVIER: Meat Science**, 2018.

MALVEIRA, V. T. C.; DE ARAÚJO, J. C.; GÜNTNER, A. Hydrological Impact of a High Density Reservoir Network in Semiarid Northeastern Brazil. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 17, n. 1, p. 109-117, 2012.

MAMEDE, G. L. et al. Modeling the Effect of Multiple Reservoirs on Water and Sediment Dynamics in a Semiarid Catchment in Brazil. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 23, n. 12, p. 05018020, dez. 2018.

MAMEDE, G. L. et al. Overspill avalanching in a dense reservoir network. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 109, n. 19, p. 7191-7195, 2012.

MARENGO, J. A. et al. Variabilidade e mudanças climáticas no semiárido brasileiro.

Recursos hídricos em regiões áridas e semiáridas, v. 1, p. 385-422, 2011.

MEDEIROS, P. H. A. et al. Connectivity of sediment transport in a semiarid environment: a synthesis for the Upper Jaguaribe Basin, Brazil. **Journal of Soils and Sediments**, v. 14, n. 12, p. 1938-1948, 2014.

MEDEIROS, P. H. A. et al. Modelling spatio-temporal patterns of sediment yield and connectivity in a semi-arid catchment with the WASA-SED model. **Hydrological Sciences Journal**, v. 55, p. 636-648, 2010.

MEDEIROS, P. H. A. **Processos hidrossedimentológicos e conectividade em bacia semiárida: modelagem distribuída e validação em diferentes escalas**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.

MEDEIROS, Pedro H.A.; de ARAÚJO, José C. Temporal variability of rainfall in a semiarid environment in Brazil and its effect on sediment transport processes. **J Soils Sediments**. 14, 1216–1223, 2014. DOI:10.1007/s11368-013-0809-9.

MOLLE, F.; CADIER, E. **Manual do pequeno açude**. Recife: SUDENE/Cooperación Française/ORSTON, 1992.

OUYANG, Y.; FENG, G.; LEININGER, T. D.; READ, J.; JENKINS, J. N. Pond, and irrigation model (PIM): a tool for simultaneously evaluating pond water availability and crop irrigation demand. *Water Resour Manag*, v. 32, p. 2969–2983, 2018.

PAIVA, P. V. V. **Análise econômico-social dos principais sistemas de produção no perímetro irrigado Morada Nova, Ceará**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

PEREIRA, B. et al. Assessment of the geometry and volumes of small surface water reservoirs by remote sensing in a semi-arid region with high reservoir density. **Hydrological Sciences Journal**, v. 64, p. 66-79, 2019.

PORTO, E. R.; SILVA, A. DE S.; BRITO, L. T. DE L. **Conservação e uso racional de água na agricultura dependente de chuvas**. Capítulo em livro técnico – INFOTECA-E 2011. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/887538>. Acesso em: 02 out. 2021.

RAMOS S. R. R.; LIMA N. R. S.; ANJOS J. L.; OLIVEIRA I. R.; SOBRAL L. F.; CURADO F. F. **Aspectos técnicos do cultivo da abóbora na região Nordeste do Brasil**. EMBRAPA, Aracaju SE 2010, ISSN 1517 – 1329.

RASMUSSEN, L. V, COOLSAET B., MARTIN A., MERTZ O., PASCUAL U., CORBERA E., DAWSON N., FISHER J. A., FRANKS P. e RYAN C. M.; 2018. **Social-ecological outcomes of agricultural intensification** *Nat. Sustain.* 1 275–82.

RODRIGUES L. N., DOMINGUES A. F. Agricultura Irrigada: Desafios e oportunidades para o desenvolvimento sustentável, **INOVAGRI**, Brasília, DF, 2017.

ROLÃO K. P.; ROSA R. O.; NETO L. F. F. Análise de rentabilidade entre o cultivo de arroz irrigado e cultivo de arroz sequeiro. XX ENGEMA – Encontro Internacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente. ISSN: 2359 – 1049 2018.

SANTOS M. D. S. **Rendimento da abóbora sob dois métodos de irrigação, duas**

qualidades de água e diferentes níveis de potássio. 2011. Dissertação (Mestrado em Irrigação e drenagem) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.

SILVA B. L.; TROLEIS A. L. **Crise hídrica e reestruturação produtiva agrícola no Rio Grande do Norte.** Revista franco-brasileira de geografia, 34/ 2018.

STONE L. F.; MOREIRA J. A. A. Irrigação do arroz de terras altas em função da porcentagem de cobertura do solo pela palha, no sistema plantio direto. Santo Antônio de Goiás: EMBRAPA, 2005.

STONE L. F.; MOREIRA J. A. A. **Irrigação do arroz de terras altas em função da porcentagem de cobertura do solo pela palha, no sistema plantio direto.** Santo Antônio de Goiás: EMBRAPA, 2005.

SUDENE. Resolução nº 115, de 23 de novembro de 2017. Aprova a Proposição nº 113/2017, que acrescenta municípios a relação aprovada pela Resolução CONDEL no 107, e 27 de julho de 2017. **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Brasília, DF, 5 dez. 2017. Seção 1, p. 26.

VAN OEL, P. R. V; Krol, M.; Hoekstra, A. Y.; Araújo, J. C. de. The impact of upstream water abstractions on reservoir yield: the case of the Orós Reservoir in Brazil. *Hydrological Sciences Journal des Sciences Hydrologiques*, v.53, p.857-867, 2008.

VICO, Giulia; TAMBURINO, Lucia; RIGBY, James R. Designing on-farm irrigation ponds for high and stable yield for different climates and risk-coping attitudes. **Journal of Hydrology**. 584, 2020. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.124634

VIEIRA, A.C.P.; WATANABE, M.; YAMAGUCHI, C. K.; BRUCH, K. L.; TEIXEIRA, L. X. **Rizicultura: a influência das inovações em cultivares da cadeia produtiva na região sul catarinense.** In: Anais 50º Congresso da Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural (SOBER), 2012, Vitória-ES. Brasília - DF: SOBER, 2012.

VIEIRA, V. P. P. B. Recursos hídricos e o desenvolvimento sustentável do Semiárido nordestino. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.1, n.1, p.92-98, 1996.

VOERKELIUS, S.; KULLS, C.; SANTIAGO, M. M. F.; FRISCHKORN, H.; SEMRAU, L. A. S.; HEINRICHS, G.; Gil, M. M. L. Investigations on water management and water quality in Picos/ PI and Tauá/CE. In: Gaiser, T.; Krol, M.; Frischkorn, H.; Araújo, J. C.de. **Global change and regional impacts.** Berlin: Springer-Verlag, 2003. p.173-184.

VOLTOLINE T. V.; CAVALCANTE A. C. R. **Pastos e manejos em áreas irrigadas.** EMBRAPA, Brasília, 2011. Disponível em: <https://www.sementessantafe.com.br/informacoes-conheca-os-principais-tipos-de-capim-paragado-4687289>. Acesso em 06 nov. 2021.

YOHANNES, Degol F.; RITSEMA, C.J.; SOLOMON, H.; FROEBRICH, J.; van DAM, J.C. Irrigation water management: Farmers' practices, perceptions, and adaptations at Gumselassa irrigation scheme, North Ethiopia. **Agricultural Water Management**. 191, 16–28, 2017. DOI: 10.1016/j.agwat.2017.05.009