



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

PAULILO PALÁCIO BRASIL

**PROPOSTA DE USO RACIONAL DA ÁGUA DE RESERVATÓRIOS NÃO-
ESTRATÉGICOS PARA AGRICULTURA IRRIGADA**

FORTALEZA

2016

PAULILO PALÁCIO BRASIL

PROPOSTA DE USO RACIONAL DA ÁGUA DE RESERVATÓRIOS NÃO-
ESTRATÉGICOS PARA AGRICULTURA IRRIGADA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso 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

2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- B83 Brasil, Paulilo Palácio.
Proposta de uso racional da água de reservatórios não-estratégicos para agricultura irrigada / Paulilo Palácio Brasil. – 2016.
51 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Fortaleza, 2016.
Orientação: Prof. Dr. Pedro Henrique Augusto Medeiros.
1. Disponibilidade hídrica. 2. Operação de reservatórios. 3. Pequenos sistemas hídricos. 4. Maximização da renda na agricultura. 5. Semiárido. I. Título.

CDD 630

PAULILO PALÁCIO BRASIL

PROPOSTA DE USO RACIONAL DA ÁGUA DE RESERVATÓRIOS NÃO-
ESTRATÉGICOS PARA AGRICULTURA IRRIGADA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso 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: 09/08/2016.

BANCA EXAMINADORA

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

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

Prof. Dr. José Carlos de Araújo
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Francisco Dirceu Duarte Arraes
Instituto Federal do Sertão Pernambucano (IFSERTÃO)

Aos meus pais, Pedro Palácio Beserra e Francisca Teixeira Brasil Palácio, e aos meus irmãos, Patrick e Pollyanna, pelo amor, união e companheirismo.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, a Deus;

Aos meus amados pais, Pedro Palácio Beserra e Francisca Teixeira Brasil Palácio, pelo exemplo de seres humanos, pais dedicados e que são minha fonte de inspiração e motivação diária. Aos meus irmãos, Patrick Palácio Brasil e Pollyanna Palácio Brasil, por todo companheirismo, apoio e afeto;

Ao meu orientador e professor Pedro Henrique Augusto Medeiros por todos os ensinamentos, paciência, dedicação e experiência que me ajudaram no meu crescimento e amadurecimento pessoal e profissional;

Aos professores: José Carlos de Araújo, Francisco Dirceu Arraes Carlos Alexandre Gomes Costa e George Leite Mamede, pela ajuda na organização de ideias, pelas dicas e pela paciência.

Aos colegas: Emanuel Firmino, Rafael, Tayslan, Josivan, Esmayle, Daniele, Christiny, José Wellington, José Ribeiro pelo apoio e amizade;

Ao grupo de pesquisa e extensão HidroSed e todos seus integrantes, do qual sem eles essa pesquisa não seria possível;

Aos amigos do laboratório de hidrologia, Tatiane, Alisson e Bruno, pela parceria e amizade;

Ao pessoal do assentamento 25 de maio pelo acolhimento, carinho e ajuda conosco;

À Universidade Federal do Ceará e ao PPGA do Centro de Ciências Agrárias, pela oportunidade de realização do curso;

Agradecer o coordenador da Pós-Graduação, Daniel Albiero, pela excelente qualidade do ensino proporcionado. Aos professores, em especial: Eunice Andrade, José Carlos de Araújo, Luiz Alberto Mendonça, Adunias Teixeira, Marcus Bezerra, Carlos Alexandre e George Mamede;

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pela concessão da bolsa de estudo e financiamento dessa pesquisa;

Agradecer aos meus amigos Eldir, David, Clylton, Bebeto, Thiago, Bennamy, Kaíque, Áquila, José, Juarez, Kleber que sempre estão comigo onde quer que eu esteja;

Quero agradecer ainda, a todos da minha família que sempre estiveram do meu lado, especialmente agradeço ao meu pai, minha mãe e meus irmãos, por que é por eles que sigo em frente buscando ser uma pessoa e um profissional cada dia melhor e a quem eu quero muito orgulhar;

Meu muito obrigado!!!

“Tanto as lágrimas quanto o suor são líquidos e salgados, mas provocam resultados diferentes. As lágrimas atrairão solidariedade, enquanto o suor lhe trará progresso”. (Jesse Jackson)

RESUMO

A escassez hídrica enfrentada por regiões áridas e semiáridas exige a adoção de medidas como construção de grandes barragens estratégicas com o objetivo de acumulação de água do período chuvoso para uso no período de estiagem. Porém pequenas cidades, agricultores e comunidades rurais também vêm construindo espontaneamente milhares de pequenos reservatórios para garantir seu suprimento hídrico, devido ao não atendimento pelos reservatórios estratégicos. No entanto, os pequenos reservatórios geralmente não conseguem atravessar longos períodos sem o completo esvaziamento e, portanto, não garantem vazão regularizada com elevada garantia. Com o exposto, objetivou-se com este trabalho o desenvolvimento de um modelo para definir critérios para a operação racional de reservatórios não-estratégicos, com foco na maximização da renda proveniente da agricultura irrigada, no semiárido brasileiro. O modelo é composto por três rotinas: i) balanço hídrico no reservatório em função das afluências e efluências hídricas, geometria do açude e características da bacia hidrográfica; ii) balanço hídrico da cultura e simulação do cultivo agrícola; iii) análise econômica para cálculo da renda proveniente do cultivo agrícola irrigado. Foram analisados quatro reservatórios localizados no assentamento rural 25 de Maio, Madalena, Ceará, tendo se utilizado uma série de dados climáticos de 1986 a 2014. A cultura utilizada para essas análises foi a do milho (*Zea mays*), devido existir cultivares adaptadas a diferentes condições de temperatura e umidade e dentre os cereais cultivados no Brasil, o milho é o mais expressivo. A simulação indicou que a regra de uso racional da água dos reservatórios é variável entre eles, e que a operação com 90% de garantia, praticada nos reservatórios estratégicos, é ineficiente em pequenos reservatórios destinados ao uso da água na agricultura irrigada. O modelo mostra ser possível racionalizar o uso da água dos açudes com vista à maximização da renda de agricultores através da agricultura irrigada.

Palavras-chave: Disponibilidade hídrica. Operação de reservatórios. Pequenos sistemas hídricos. Maximização da renda na agricultura. Semiárido.

ABSTRACT

Water scarcity faced by arid and semiarid regions requires the adoption of measures such as construction of major strategic dams for the purpose of accumulation of water during the rainy season for use in the dry season. But small towns, farmers and rural communities are also building spontaneously thousands of small reservoirs to ensure their water supply due to non-compliance by the strategic reservoirs. However, small reservoirs often cannot get through long periods without complete emptying and therefore do not guarantee regulated flow with high security. With the above, the aim of this work with the development of a model to define criteria for the rational operation of non-strategic reservoirs, focused on maximizing income from irrigated agriculture in the Brazilian semiarid region. The model is composed of three routines: i) water balance in the reservoir due to the water inflows and effluents, the reservoir geometry and characteristics of the river basin; ii) water balance of culture and simulation of agricultural cultivation; iii) economic analysis for the calculation of income from irrigated agricultural cultivation. Four reservoirs were analyzed located in the rural settlement May 25, Madalena, Ceará, having used a series of climate data from 1986 to 2014. The crop used for these analyzes was the corn (*Zea mays*), because there cultivars adapted to different temperature and humidity conditions and among the cereals grown in Brazil, corn is the most significant. The simulation indicated that the rational use of Rule water reservoir is variable between them, and that the operation with 90% guarantee, practiced in strategic reservoirs, it is inefficient in small reservoirs for water use in irrigated agriculture. The model shows that it is possible to rationalize the use of water from dams in order to maximize the income of farmers through irrigated agriculture.

Keywords: Water availability. Reservoir operation. Small water systems. Maximising income in agriculture. Semiarid region.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Delimitação da região semiárida no Nordeste do Brasil.....	17
Figura 2 – Curvas de garantia de vazões regularizáveis dos reservatórios Orós (a), Benguê (b) e Boqueirão (c).....	20
Figura 3 – Localização do Assentamento 25 de Maio, Madalena-CE.....	36
Figura 4 – Vazões regularizáveis para diferentes garantias de fornecimento hídrico dos reservatórios (a) Marengo, (b) Raiz, (c) São Joaquim e (d) São Nicolau.....	43
Figura 5 – Rendimento da cultura do milho versus a garantia de fornecimento hídrico dos reservatórios (a) Marengo, (b) Raiz, (c) São Joaquim e (d) São Nicolau.....	45
Figura 6 – Análise de sensibilidade do rendimento total na garantia racional nos reservatórios Marengo, Raiz, São Joaquim e São Nicolau, a variações nos custos de produção (a) e na produtividade máxima e preço de venda (b) do milho.....	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1– Características dos reservatórios utilizados nas simulações	38
Tabela 2– Coeficientes de cultivo (Kc) para cada fase de desenvolvimento do milho	39

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	15
3	REVISÃO LITERATURA	16
3.1	Hidrologia de regiões semiáridas	16
3.2	Política de açudagem no semiárido	18
3.3	Uso da água de pequenos reservatórios	22
4	MATERIAL E MÉTODOS	25
4.1	Desenvolvimento do modelo	25
4.1.1	Disponibilidade de hídrica de pequenos reservatórios	25
4.1.2	Balanço hídrico de cultivo para irrigação.....	27
4.1.3	Crítérios de viabilidade econômica	33
4.2	Aplicação do modelo	35
4.2.1	Entradas e saídas de dados do modelo matemático.....	35
4.2.2	Análise de sensibilidade do modelo	40
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
6	CONCLUSÕES	49
	REFERÊNCIAS	50

1 INTRODUÇÃO

O semiárido brasileiro, além de ser o mais populoso do mundo, apresenta alta vulnerabilidade às secas, ocasionado pelo regime pluviométrico anual altamente concentrado em poucos meses do ano, altas evaporações, e solos rasos e predominantemente cristalinos contribuem para a intermitência dos rios. Sendo assim, o armazenamento de água no solo é restrito e o regime de chuvas rápidas e intensas também dificulta a infiltração de água no subsolo.

O estado Ceará tem aproximadamente 93% do seu território inserido na região semiárida, em consequência disso, é fortemente dependente de reservatórios superficiais para atendimento de demandas hídricas no período de escassez, por exemplo, 90% da água ofertada aos usuários vêm dos açudes (ARAÚJO; GÜNTNER; BRONSTERT, 2006).

Em uma política de açudagem bem elaborada, açudes pequenos, médios e grandes têm suas utilidades e funções a desempenhar, tais como sustentar a subsistência das comunidades rurais difusas através do uso doméstico de água, da irrigação em pequena escala, da pesca, da dessedentação animal e do cultivo de fruteiras. Aos grandes açudes cabe o papel de reserva estratégica, aos pequenos a distribuição espacial das reservas hídricas e aos médios a função intermediária (CAMPOS, 2005).

A definição de como operar esses reservatórios é uma tarefa complexa, pois envolve diversos aspectos técnicos, econômicos, sociais e políticos. Esta complexidade se traduz nos mais diversos objetivos a serem atingidos com o uso da água, muitas vezes conflitantes, como por exemplo, abastecimento humano, atendimento as indústrias, irrigação, dessedentação de animais, manutenção de níveis mínimos de qualidade de água, turismo, entre outros.

Pequenas cidades, agricultores e comunidades rurais também vêm construindo espontaneamente milhares de pequenos e micro reservatórios (ou por particulares ou com ajuda governamental), devido essas demandas não serem atendidas pelos reservatórios estratégicos, porém com baixa eficiência relativa dos recursos hídricos armazenados durante o período de escassez hídrica. Em consequência disso, esses reservatórios são praticamente ignorados em políticas de gestão de recursos hídricos e assim dificultando o planejamento, pois a gestão adequada exige um conhecimento da capacidade de regularização de vazão para diferentes níveis de garantia e regras de operação.

A agricultura é uma atividade econômica que, por estar sujeita à variabilidade do clima, dos preços agrícolas, do mercado e da política agrária, torna-se instável e de alto

risco, devendo ser bem planejada para que as chances de sucesso sejam maximizadas. A agricultura familiar é um segmento da atividade agrícola com ampla relevância, em âmbito nacional, na produção de alimentos básicos consumidos pela população brasileira. A disponibilidade e a distribuição hídrica são alguns dos fatores limitantes para a produção, principalmente nas regiões áridas e semiáridas.

Os programas oficiais do governo na área de irrigação para o Nordeste têm sido caracterizados por excessivos incentivos para a implantação de projetos voltados para a fruticultura irrigada, sob a premissa de que apenas esse tipo de exploração apresenta rentabilidade econômica (FRIZZONE; ANDRADE JUNIOR, 2005).

No Ceará, especificamente nas áreas onde não chega o atendimento dos grandes e médios reservatórios estratégicos e os pequenos não oferecem a garantia hídrica durante o ano todo, é cultivado principalmente em regime dependente de chuvas (cultivo de sequeiro), ficando assim susceptível a períodos de deficiência hídrica, o que geralmente ainda está associado ao manejo inadequado, que geralmente resulta em redução expressiva da produção de biomassa e em baixas produtividades, com isso causando um prejuízo considerável na renda do pequeno agricultor, e um impacto na economia de municípios e do estado.

Desta forma, a irrigação é uma prática necessária para se eliminar ou minimizar os riscos, suprindo a quantidade de água necessária para o adequado crescimento e desenvolvimento das plantas.

Nesse contexto, este trabalho aborda algumas questões científicas relevantes “Como operar os pequenos reservatórios para o aproveitamento na agricultura familiar?” e “Esses reservatórios irão operar com a mesma garantia?”. Daí faz-se um planejamento dinâmico e de diferentes ópticas: operar com uma garantia elevada e assim ter água por uma maior parte do tempo e reduzir a área cultivada ou; maximizar a área plantada e ter água disponível em menor tempo. Com isso, suscita-se outra questão “Qual óptica é economicamente melhor para o pequeno agricultor?”.

2 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é definir critérios para a operação racional de reservatórios não-estratégicos, com foco na maximização da renda proveniente da agricultura irrigada, no semiárido brasileiro.

São objetivos específicos:

- i. Calcular o balanço hídrico do reservatório para determinar as vazões regularizadas para diferentes níveis de garantia;
- ii. Simular modelos de produção agrícola com bases nas vazões regularizadas pelo reservatório para diferentes cultivos;
- iii. Calcular os fluxos de caixa resultantes dos modelos de produções agrícolas simulados;
- iv. Aplicar e avaliar o desempenho do modelo desenvolvido em reservatórios do Assentamento Federal Rural 25 de Maio (Madalena, Ceará), e;
- v. Contribuir com a gestão integrada de recursos hídricos através da definição de critérios para o aproveitamento racional de pequenos açudes na agricultura irrigada.

3 REVISÃO LITERATURA

3.1 Hidrologia de regiões semiáridas

Na região Nordeste do Brasil, há uma área semiárida de 1 milhão de km² (Figura 1), onde as secas ocorrem em média uma vez a cada década, por vezes de forma contínua durante vários anos. Apesar da adversidade natural imposta pelas condições climáticas do Nordeste, essa região é altamente povoada, com uma população de mais de 25 milhões de habitantes (densidade de aproximadamente 25 habitantes por km²) (BRASIL, 2005). Essa região e diversas outras localidades do mundo encontram-se num grupo de regiões que enfrentam profundos problemas relativos à água. Na região comentada é frequente a escassez de água, devido a precipitações variando entre 500 e 800 mm mal distribuídas no tempo e no espaço, além de ser associada a altas taxas de evaporação entre 2.000 a 2.800 mm ano⁻¹.

No semiárido brasileiro a evaporação potencial supera a precipitação três a quatro vezes (ARAÚJO; PIEDRA, 2009). A precipitação apresenta elevada concentração temporal (MEDEIROS; ARAÚJO, 2014) e os solos são geralmente rasos sobre o substrato cristalino, impedindo o armazenamento de quantidades significativas de água no subsolo, tornando os rios intermitentes.

As precipitações apresentam alta variabilidade e má distribuição espaço-temporal, segundo Costa (2007) é comum em anos chuvosos que metade da precipitação se concentre em um mês, com eventos isolados e elevada variabilidade espacial.

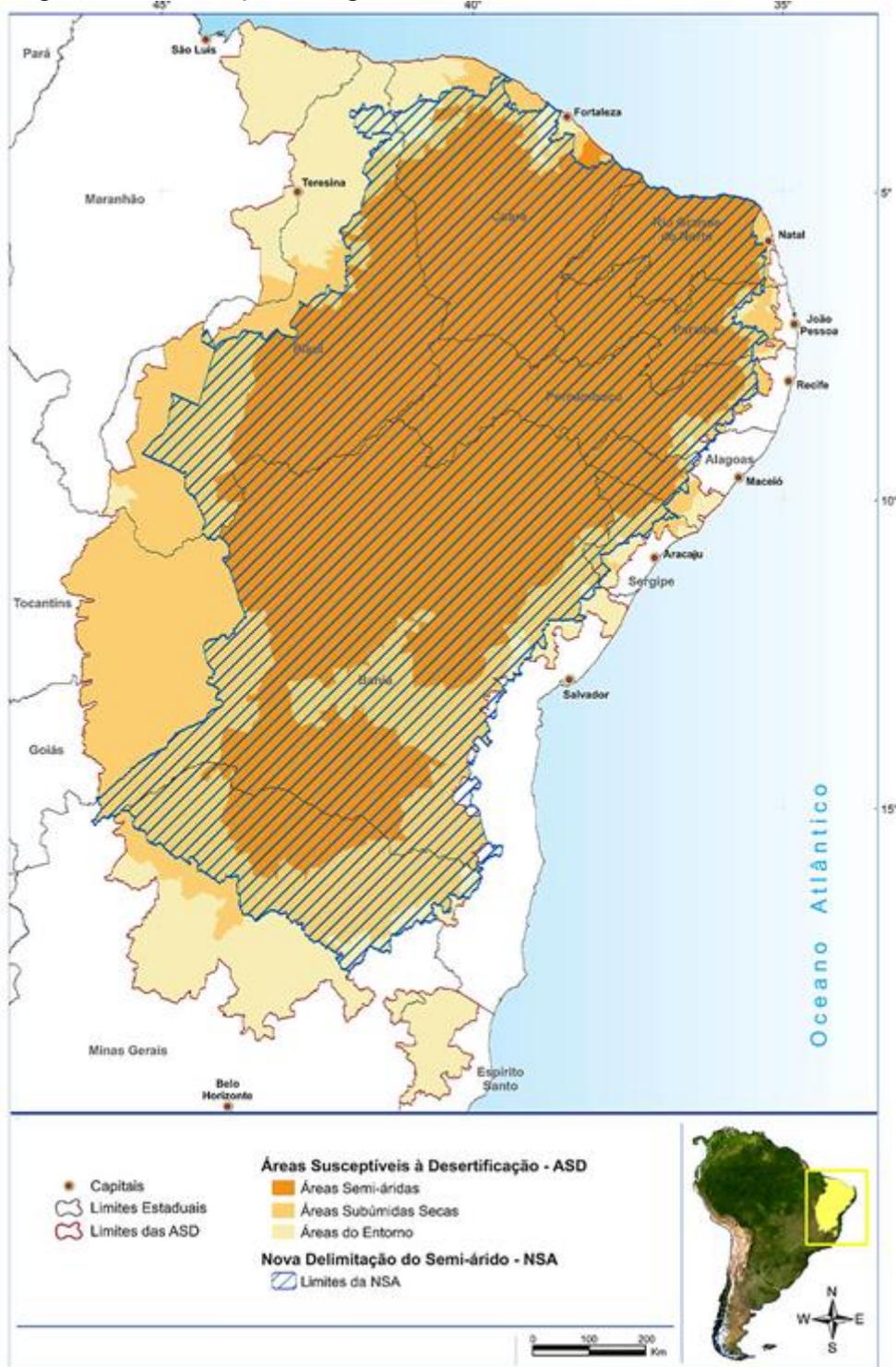
Segundo Pinheiro *et al.* (2016), no bioma Caatinga em torno de 75% da chuva corresponde à evapotranspiração real, 13% representam o escoamento superficial e 9% é o abastecimento subterrâneo (FRISCHKORN; ARAÚJO; SANTIAGO, 2003). Em regiões semiáridas, esse cenário pode representar um dos principais fatores limitantes ao desenvolvimento econômico, com graves consequências sociais (ARAÚJO *et al.*, 2004).

A importância de cada um desses fatores no balanço hídrico como um todo depende da localização e da escala de estudo. A variação desses processos interfere diretamente na disponibilidade hídrica que já é sensível pelas dificuldades inerentes às peculiaridades climatológicas e geológicas de regiões semiáridas.

O déficit hídrico dessas áreas cresce a cada ano, em virtude: do crescimento da população, com maior demanda de água para consumo, além de mudanças no ciclo hidrológico induzidas pelo uso e ocupação inadequados do solo; das modificações no estilo de vida da população local e da urbanização; e das alterações climáticas, que levam à

escassez hídrica, propiciando, assim, o aumento na competição por água entre a agricultura, indústrias e cidades (ALI; TALUKDER, 2008).

Figura 1– Delimitação da região semiárida no Nordeste do Brasil



Fontes: PAN-Brasil (BRASIL, 2005).

Diante dessa situação, a solução adotada para o suprimento hídrico tem sido a construção de reservatórios superficiais através do barramento de cursos d'água. Os açudes têm como principal função o armazenamento dos volumes escoados verificados nos períodos chuvosos para a disponibilização da água nos períodos de estiagem. Essa política é adotada há décadas pelos Governos Estaduais e Federal, tendo sido implantados centenas de reservatórios estratégicos de médio e grande porte.

3.2 Política de açudagem no semiárido

A política de açudagem no Nordeste é antiga e esteve intrinsecamente interligada ao fenômeno natural das secas, e os primórdios de açudagem vêm do início da colonização brasileira pelos portugueses (MOLLE, 1994). Esses açudes atuam como veículo que transporta a água ao longo dos tempos: os excedentes dos períodos úmidos são estocados para o uso nos períodos de estiagem, fazendo também com que haja diminuição nas águas que são perdidas para o mar na foz dos grandes rios. Ainda hoje a maioria das políticas públicas praticadas no Nordeste brasileiro no século passado foi formulada no âmbito do combate às secas.

Por essa razão, a ocupação dos sertões nordestinos se deu concomitantemente à implantação da política de açudagem, inserida na política de combate às secas. Mas por se tratar de políticas públicas, sempre são dotadas de problemas, alguns de ordem geográfica natural e outros de natureza sociopolítica associada à corrupção e complacência com o descaso ambiental, ao uso indevido e a esmo dos poucos recursos hídricos disponíveis.

Os reservatórios são formados por barragens implantadas nos cursos d'água com a finalidade de acumular parte das águas disponíveis nos períodos chuvosos, para compensação das deficiências nos períodos de estiagem exercendo, assim, um efeito regularizador das vazões naturais. Suas características físicas, como a capacidade de armazenamento, dependem das características topográficas do vale no qual está situado.

No Nordeste brasileiro existem pequenos, médios e grandes açudes. Os grandes açudes, construídos pelo poder público, são aqueles em que se desenvolvem as principais atividades de irrigação, piscicultura e abastecimento das populações na região, e que evidenciaram a atuação de instituições como o Departamento Nacional de Obras Contra as Secas - DNOCS na sua construção e no manejo de suas águas, nos chamados perímetros irrigados. Esses corpos de água, por terem grandes capacidades de acumulação, reduzem o risco de exaustão, permitindo, face à extensão da área de acumulação em suas bacias, a

contenção de um volume de água apreciável, capaz de alcançar o período subsequente das chuvas mesmo com o seu uso continuado.

Os pequenos e médios açudes representam 80% dos corpos de água nos estados do Nordeste. No estado de Ceará, apenas na bacia do Alto Jaguaribe a rede de reservatórios consistia, em 1970, de pouco mais de 2.000 açudes, sendo cerca de 4.000 em 2002 e 4.700 em 2010 (ARAÚJO; MEDEIROS; MAMEDE, 2012; MALVEIRA, ARAÚJO; GÜNTNER, 2012; MAMEDE *et al.*, 2012). Esses açudes, por apresentarem formas geométricas variadas e considerando que geralmente há falta de planejamento inicial no momento da sua construção, em que o principal fator levado em consideração sempre foi a ânsia ou mesmo a vontade de se fazer um barramento, trazem inevitáveis problemas de dimensionamento, não sendo raros açudes que nunca vieram a sangrar.

Em uma política de açudagem bem elaborada, açudes pequenos, médios e grandes têm suas utilidades e funções a desempenhar. Na década de 1960, a Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE) elaborou um importante trabalho que resultou na publicação da série “Estudos de base do vale do Jaguaribe”. O volume cinco dessa série, intitulado “Políticas das águas”, abordou a questão do que seria uma rede ideal de açudes (SUDENE, 1967). Aos grandes açudes cabia o papel de reserva estratégica, aos pequenos açudes caberia a distribuição espacial da água, aos médios açudes caberia uma função intermediária ofertando água com segurança em torno de 90%. Em essência, essa política incorpora a hipótese de que os grandes açudes são mais eficientes que os pequenos (CAMPOS, 2005).

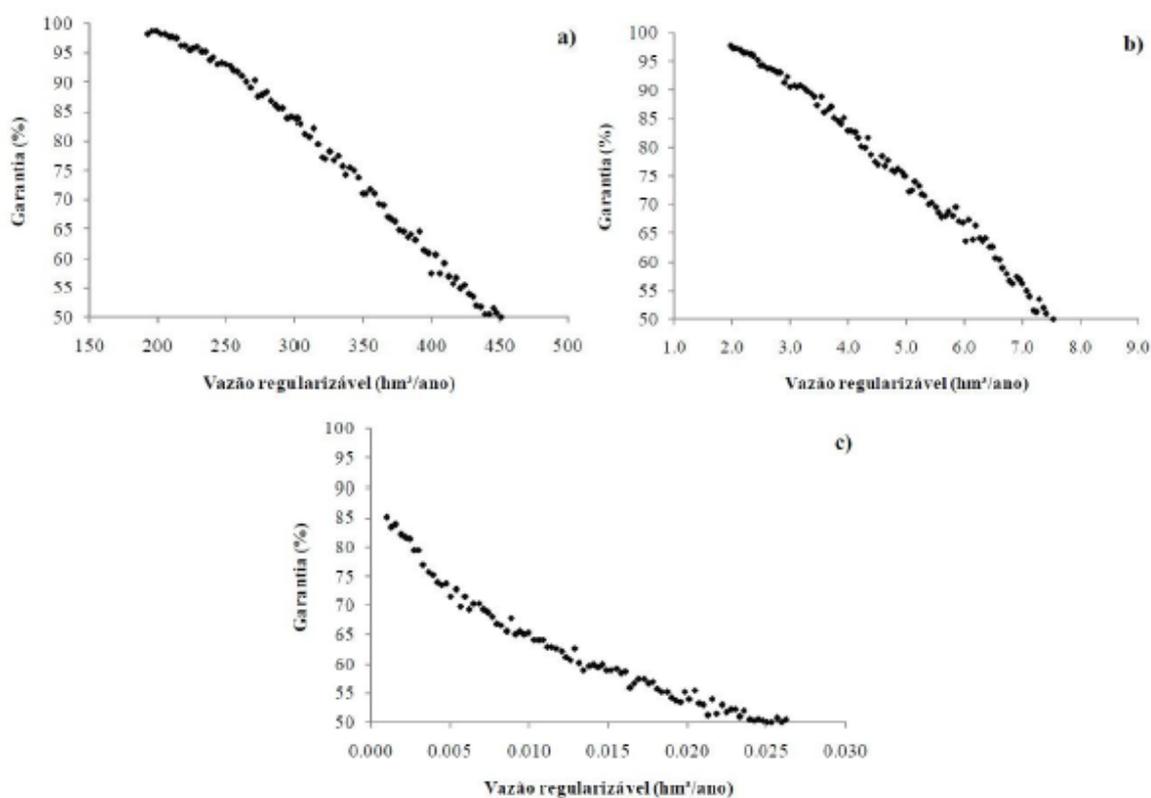
Campos *et al.* (2003), analisando a eficiência de diferentes classes de reservatórios no Alto Jaguaribe, observaram claramente que, em média, os grandes reservatórios são mais eficientes que os pequenos, porém havendo inúmeros pequenos reservatórios eficientes. Com isso, concluíram que a escolha do local do barramento é de extrema importância para uma boa política de açudagem, independentemente do tamanho do reservatório.

No que diz respeito à operação, defende-se que a regra utilizada para os reservatórios estratégicos não deve ser aplicada aos pequenos açudes, devendo-se desenvolver critérios apropriados para os mesmos. Isso pode ser argumentado avaliando-se as curvas de garantia (Figura 2) calculadas por Costa *et al.* (2009) para os açudes Orós, Benguê e Boqueirão na bacia do Alto Jaguaribe, com capacidades de acumulação de 1.940 hm³, 19,6 hm³ e 0,06 hm³ respectivamente.

Observa-se que para os açudes de grande e médio porte (Orós e Benguê) a curva de vazão regularizada *versus* garantia apresenta concavidade para baixo, indicando que a taxa de decréscimo da garantia é pequena quando se aumenta a retirada para elevados níveis de garantia de suprimento. Nesse caso, é possível aumentar a vazão fornecida sem comprometer excessivamente o nível de garantia. Já para o pequeno açude (Boqueirão), observa-se uma concavidade da curva de garantia para cima, ou seja, para elevadas garantias, um pequeno acréscimo da vazão regularizada produz uma redução drástica do nível de garantia. É necessário, portanto, que se estabeleça uma relação ótima entre o nível de garantia pretendido e a capacidade do pequeno açude de fornecer a vazão desejada.

A definição de como operar esses reservatórios é uma tarefa complexa, pois envolve diversos aspectos técnicos, econômicos, sociais e políticos. Esta complexidade se traduz nos mais diversos objetivos a serem atingidos com usos múltiplos da água, muitas vezes conflitantes, como por exemplo, abastecimento humano, atendimento as indústrias, irrigação, dessedentação de animais, manutenção de níveis mínimos de qualidade de água, turismo, entre outros.

Figura 2 – Curvas de garantia de vazões regularizáveis dos reservatórios Orós (a), Benguê (b) e Boqueirão (c)



Fonte: Costa *et al.* (2009).

O Decreto estadual de número 31.076, de 12 de dezembro de 2012, regulamenta alguns artigos da Lei Nº 14.844, de 28 de dezembro de 2010, referente à outorga de direito de uso de água e de execução de obras e serviços de interferência hídrica e dá outras providências. Em seu artigo 17 diz que a disponibilidade hídrica será função das características hidrológicas e hidrogeológicas dos mananciais sobre os quais incidem a outorga, observando que quando se tratar de água superficial a vazão mínima natural será nula e o valor de referência será a descarga regularizada anual com garantia de 90% (noventa por cento). Em vista com o apresentado por Costa et al. (2009), essa forma de operar não pode ser aplicada a pequenos reservatórios, devido a pequena garantia de permanência e ainda, caso do reservatório Boqueirão, não conseguir ter uma vazão regularizada que obtenha uma garantia igual a 90%.

Alexandre (2012) informa que há dificuldades na obtenção de informações precisas acerca de pequenos reservatórios em termos de disponibilidade hídrica, de utilização de suas águas e de preservação das mesmas. A escassez de dados e de informações técnicas consolidadas dificulta a implantação dos instrumentos previstos na Legislação Federal de Recursos Hídricos.

Pequenas cidades, agricultores e comunidades rurais também vêm construindo espontaneamente milhares de pequenos e micro reservatórios (ou por particulares ou com ajuda governamental), devido essas regiões não serem atendidas pelos reservatórios estratégicos, porém com baixa eficiência relativa dos recursos hídricos armazenados durante o período de escassez hídrica. Em consequência disso, esses reservatórios são praticamente ignorados em políticas de gestão de recursos hídricos e como consequência dificultando o planejamento, pois a gestão adequada exige um conhecimento de informações técnicas consolidadas (MALVEIRA, ARAÚJO; GÜNTNER, 2012; MAMEDE *et al.*, 2012).

Apesar da baixa eficiência relativa, os pequenos reservatórios desempenham um papel importante na distribuição espacial da disponibilidade, bem como na retenção de sedimentos que, caso contrário, assoreariam os reservatórios estratégicos (MECHERGUI, 2000; MAMEDE, 2007; LIMA NETO; WIEGAND; ARAÚJO, 2011; MALVEIRA, ARAÚJO; GÜNTNER, 2012). Além disso, são capazes de armazenar uma quantidade relevante de água a montante dos grandes e assim reduzindo a vulnerabilidade a grandes enchentes e secas (PETER *et al.*, 2014). Assim, tais reservatórios não devem ser ignorados em políticas de gestão de recursos hídricos (COSTA *et al.*, 2009).

Para Mamba *et al.* (2007), os reservatórios de pequeno porte têm múltiplas funções, tais como sustentar a subsistência das comunidades rurais difusas através do uso

doméstico de água, da irrigação em pequena escala, da pesca, da dessedentação animal e do cultivo de fruteiras. Porém, para um planejamento de longo prazo, esses reservatórios não oferecem segurança hídrica para o desenvolvimento de uma agricultura familiar sustentável que é um segmento da atividade agrícola com ampla relevância, em âmbito nacional, na produção de alimentos básicos consumidos pela população brasileira, sendo responsável por 49% do milho (*Zea mays* L) e 67% do feijão (*Vigna unguiculata*) produzidos no País (LISITA, 2009). É necessário, portanto, definir as condições de aproveitamento racional das águas estocadas nessas estruturas.

3.3 Uso da água de pequenos reservatórios

A região semiárida do Brasil, de acordo com Viana *et al.* (2011), dispõe de mais de 70.000 pequenos açudes, com áreas superiores a 1 hectare, espalhados pelos diversos estados, isto sem contar com os grandes açudes públicos, considerados estratégicos. No estado de Ceará, apenas na bacia do Alto Jaguaribe, de acordo com Araújo *et al.* (2012), Malveira *et al.* (2012) e Mamede *et al.* (2012), a rede de reservatórios na referida bacia consistia, de pouco mais de 4.700 em 2010. Isso corresponde a pouco mais de um açude a cada 6 km². Em todo o estado do Ceará estima-se ter mais de 21.000 espelhos d'água com áreas superiores a 1 hectare, sendo que a Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH) monitora apenas 153 desse total (COGERH, 2015).

Viana *et al.* (2011) informam que os principais usos dos pequenos açudes são o abastecimento humano rural, o abastecimento animal e a pequena irrigação de subsistência. No entanto, a alta taxa de evaporação nesses equipamentos hidráulicos não possibilita assegurar a continuidade desses usos, devido à certeza de secarem rapidamente. Mesmo assim, apresentam vantagens econômicas, por se tratarem da melhor opção para o abastecimento e para a manutenção da vida rural no clima semiárido brasileiro.

Com relação ao uso das águas dos açudes para produção de alimentos, há três alternativas: através da irrigação, da agricultura de vazante e da piscicultura. Nesse particular, quando o assunto é produção de alimentos, é importante fazer algumas ponderações e distinções no tocante aos açudes, principalmente no que diz respeito à escala que está sendo referida (SUASSUNA, 1997).

Mamba *et al.* (2007) e Alexandre (2012) constataram que os principais usos das águas dos pequenos açudes são, em ordem decrescente de prioridade: uso doméstico; dessedentação animal; pesca; irrigação e dessedentação humana. Sawunyama *et al.* (2005)

identificaram os mesmos usos para o açude Sibasa, na bacia do rio Limpopo, no Zimbábue. Boelee *et al.* (2009) citam a mesma utilidade da água em Burkina Faso.

Segundo Molle e Cadier (1992) sobre o aproveitamento de pequenos açudes, é óbvio que não haverá sempre possibilidade de desenvolver todas essas atividades ao mesmo tempo. Cada situação é específica e, levando-se em conta as prioridades locais, bem como as características da represa, devem-se propor diferentes opções. Os mesmos autores realizaram uma linha de estudos que orienta os proprietários de pequenos e médios açudes a utilizarem suas águas para a produção de alimentos através da irrigação, mesmo com a certeza de se promover a exaustão desses mananciais.

Alexandre (2012) sugere que os pequenos reservatórios, ao invés de terem múltiplos usos, deveriam ter uma função definida: como “grandes tanques bebedouros”, por exemplo, para dessedentação animal, que os torna incompatíveis a outros usos devido à poluição dos corpos hídricos; ou como fonte de renda para o pequeno agricultor. A mesma autora sugere, ainda, o uso de cisternas de placa como principal fonte de abastecimento para a dessedentação humana, servindo de reservatório de água de chuva nos períodos úmidos e de água proveniente de açudes nos períodos de estiagem.

Silva (2015), analisando os critérios adotados para operação de pequenos açudes no semiárido cearense, obteve como resultado que 100% dos entrevistados responderam que não utilizam critérios técnicos para definir a retirada de água, pois segundo os mesmos, retiram a água conforme a necessidade, o que torna de fundamental importância a definição de critérios de uso de água para pequenos açudes.

No processo de produção agrícola, em que os fatores solo e planta são limitados pela falta de umidade, torna-se essencial o uso da irrigação. Embora seja de grande importância, principalmente em regiões onde a distribuição errática das chuvas é um fator constante, é necessário um planejamento para se estabelecer qualquer sistema produtivo com base em cultivo irrigado.

A irrigação deve ser utilizada com o objetivo de aumentar o rendimento através da redução dos riscos, com o aumento da produção e da qualidade, ou de incorporar à agricultura áreas que não seriam possíveis de se cultivar sem o uso da irrigação. Bernardo (1989) e Frizzone e Andrade Junior (2005) inferiram que o planejamento e operação de um sistema de irrigação devem ser baseados nos objetivos e nas condições em que se executará o sistema. Em regiões onde a água é fator limitante, o objetivo deve ser a obtenção da máxima produção por unidade de água aplicada. Em outras condições, o objetivo pode ser a

obtenção de máxima produção por unidade de área cultivada, custo de mão-de-obra ou de energia consumida.

Diante do cenário de escassez hídrica, onde a economia das regiões semiáridas gira em torno da produção da agricultura de pequeno porte, onde os pequenos reservatórios são utilizados. Suassuna (1997) realizou estudo com pequenos agricultores que já haviam tido alguma experiência com irrigação na produção de alimentos, utilizando a pequena açudagem. O autor observou que os produtores que experimentam a irrigação uma vez não têm coragem de experimentar a segunda. Os produtores avaliaram que a administração da vida, nessas horas, certamente parece ser mais forte do que a tentativa de qualquer experiência tecnológica. Essa constatação reforça a recomendação de Alexandre (2012) de estabelecer usos específicos para os açudes.

Assim, tradicionalmente em regiões onde o atendimento hídrico para a produção agrícola é totalmente dependente das precipitações pluviométricas, a chamada “Agricultura de Sequeiro” é predominante. A irregularidade e variabilidade, tanto temporal como espacial, das precipitações favorece a ocorrência de déficits hídricos, que conferem uma extrema aleatoriedade ao rendimento das principais culturas agrícolas exploradas. Com isso, a irrigação torna-se uma prática fundamental para viabilizar e incrementar a produção agrícola, apresentando caráter suplementar na estação chuvosa e de irrigação total na estação seca (FRIZZONE; ANDRADE JUNIOR, 2005).

Mousinho (2005), avaliando a viabilidade econômica do feijão (*Vigna unguiculata*) no estado do Piauí, observou na região sudeste do Estado, onde o clima semiárido é predominante, que o cultivo de sequeiro da cultura citada só se mostrou economicamente viável quando a sementeira ocorre em janeiro ou fevereiro, desde que em solos com capacidade água disponível (CAD) de 40 mm e, ainda assim, estando o agricultor disposto a se expor a um risco alto (75%). Segundo o mesmo autor, o cultivo irrigado não apresentou restrição quanto ao local de cultivo e que as receitas líquidas crescem em função do aumento dos índices pluviométricos.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Desenvolvimento do modelo

O modelo é composto de três rotinas: i) balanço hídrico em reservatório em função das aflúncias e efluências hídricas, geometria do açude e características da bacia hidrográfica; ii) balanço hídrico de cultivo e simulação da produção agrícola; iii) análise econômica para cálculo da renda proveniente do cultivo agrícola irrigado. Para tal foi desenvolvida uma planilha eletrônica no Microsoft Excel 2013 para as simulações de operações em reservatórios, produção agrícola e rendimento.

4.1.1 Disponibilidade de hídrica de pequenos reservatórios

A primeira etapa consistiu na realização de uma caracterização morfológica recente os reservatórios selecionados por meio de levantamentos topográficos e batimétricos, resultando em curvas de cota/área/volume (VERSTRAETEN; POESEN, 2001). O volume de água no açude é estimado de acordo com a seguinte equação:

$$V_{ij}(h_i) = k \times h_i^\alpha \quad (01)$$

Em que:

$V_{ij}(h_i)$ – volume do reservatório para cada diferença de cota, entre a cota inicial e a sua cota posterior até a cota de sangria no dia i e garantia j, m³;

k – coeficiente de abertura dos reservatórios;

h_i – diferença de cotas no dia i, m e;

α – coeficiente de forma do reservatório.

Quando a cota (h) for igual à cota máxima de sangria, o reservatório analisado vai estar em seu volume máximo. O coeficiente de abertura (k) (CAMPOS, 1996) indica o grau de exposição do espelho de água proporcional ao volume armazenado (ARAÚJO; GÜNTNER; BRONSTERT, 2006). Este coeficiente baseia-se na curva/cota/volume do reservatório.

A determinação da área do espelho d'água do reservatório, também baseada na diferença de cotas entre a cota inicial e a sua posterior até a cota de sangria, utilizando-se a equação (2) proposta por Molle (1994).

$$A_i(h_i) = \alpha \times k \times h_i^{\alpha-1} \quad (02)$$

Em que:

$A_i(h_i)$ – área do espelho d'água do reservatório no dia i , m^2 .

Para avaliar a disponibilidade de água em reservatórios essa etapa consiste em simulações do balanço hídrico para quantificação das entradas e saídas hídricas em reservatórios para determinar diferentes níveis de vazões de regularizadas (Q_w). O modelo consiste em calcular o equilíbrio de água simplificado em reservatórios, com passo de tempo diário para uma dada regra de operação do reservatório. O balanço hídrico foi estimado pela lei de conservação de massa:

$$\frac{\partial V(t)}{\partial t} = Q_{in}(t) - Q_{out}(t) \quad (03)$$

$$Q_{ini} = Q_{Vi} + Q_{Pi} + Q_{Gi} \quad (04)$$

$$Q_{outi} = Q_{Ei} + Q_{Li} + Q_{Wi} + Q_{Oi} \quad (05)$$

Em que:

V_i – volume armazenado no reservatório no tempo no dia i , m^3 ;

Q_{ini} – soma de todas as afluências no dia i , m^3 ;

Q_{outi} – soma de todas as efluências no dia i , m^3 ;

Q_{Vi} – vazão afluyente no dia i , m^3 ;

Q_{Pi} – precipitação direta sobre o lago no dia i , m^3 ;

Q_{Gi} – recarga subterrânea no dia i , m^3 ;

Q_{Ei} – evaporação do lago no dia i , m^3 ;

Q_{Li} – infiltração no dia i , m^3 ;

Q_{WPj} – volume de água regularizada potencial para suprimento da irrigação na garantia j , $m^3 \text{ dia}^{-1}$ e;

Q_{Oi} – vertimento no dia i , m^3 .

Os volumes excedentes a cota máxima serão totalmente vertidos (Q_0) ao fim de cada dia de ocorrência na simulação. A retirada de água para a irrigação durante a estação chuvosa ocorre para suplementar déficit hídrico devido a ocorrência de veranicos durante a estação. Ao fim de cada dia o nível do reservatório será determinado pelo volume acrescido pelas afluições menos a evaporação direta no reservatório e, se caso necessário, a retirada para irrigação. A estação seca foi caracterizada pela depleção de volume devido à evaporação simultânea (Q_E) e o volume regularizado potencial para a irrigação (Q_{WP}). Segundo de Araújo *et al.* (2006) $Q_G \approx Q_I$ no Nordeste brasileiro, podendo-se desconsiderar ambos os termos.

A operação do reservatório, basicamente, consiste em definir um volume de retirada de água (Q_{WP}), o qual será definido por demanda de água pelos utilizadores. Se o Q_{WP} no fim de cada passo simulado for menor do que o volume de água armazenado no reservatório, o passo foi considerado bem-sucedido, enquanto a falha será toda vez que a Q_{WP} não for atendida ao fim de cada passo na simulação. A garantia de atendimento (G) da Q_{WP} foi calculada da seguinte forma:

$$G = \frac{ND - \sum F}{ND} \quad (06)$$

Em que:

ND – número de dias da simulação e;

$\sum F$ – número total dias em que à volume regularizado potencial (Q_{WP}) não é atendida.

4.1.2 Balanço hídrico de cultivo para irrigação

O balanço hídrico de cultivo (BHC), em escala diária, foi realizado considerando o manejo de irrigação via clima. Esse manejo simplesmente repõe a quantidade de água que a planta extrai do solo pelo efeito da evapotranspiração no dia ou nos dias anteriores desde a última recarga de água no solo.

O BHC considera todos os fluxos de água que entram e saem do volume de solo explorado pelas raízes. A irrigação e a precipitação são as componentes de entrada. Já as perdas por percolação profunda, escoamento superficial e consumo de água pelas plantas (evapotranspiração) são as componentes de saída do BHC. As perdas por escoamento

superficial ou percolação profunda devem ser eliminadas com o manejo de água adequado. Portanto, para fins de controle do BHC restam às irrigações, as precipitações e a evapotranspiração.

Para estimativa da evapotranspiração de referência (ET_0) existem vários métodos, a escolha depende do clima local, finalidade e material meteorológico existente. Os diferentes métodos podem utilizar uma ou mais variáveis e as estimativas podem ser feitas por meio de equações simples a complexas. A (ET_0) foi estimada utilizando a equação de Hargreaves e Samani (1985):

$$ET_{oi} = 0,0023 \times (T_{xi} - T_{ni})^{0,5} \times (T_{mi} - 17,8) \times Ra_i \times 0,408 \quad (07)$$

Em que:

ET_{oi} – evapotranspiração de referência do dia i, mm;

T_{xi} – temperatura máxima do dia i, °C;

T_{ni} – temperatura mínima do dia i, °C;

T_{mi} – temperatura média do dia i, °C e;

Ra_i – radiação solar no topo da atmosfera do dia i, $MJ m^{-2}$.

A radiação solar no topo da atmosfera (R_a) ou irradiância solar extraterrestre, para períodos diários, em uma superfície horizontal, foi calculada com a seguinte equação:

$$Ra = \frac{24 \cdot 60}{\pi} G_{SC} d_r (\omega_s \cdot \text{sen}\varphi \cdot \text{sen}\delta + \cos\varphi \cdot \cos\delta \cdot \text{sen}\omega_s) \quad (08)$$

Em que:

G_{SC} – constante solar, com valor de $0,0820 MJ m^{-2} min^{-1}$;

d_r – inverso da distância relativa Terra-Sol, adimensional;

ω_s - ângulo horário do nascer ou pôr-do-sol, radianos;

φ - latitude local, radianos e;

δ – declinação solar, radianos.

O inverso da distância relativa Terra-Sol (d_r) é dada por:

$$d_r = 1 + 0,033 \times \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right) \quad (09)$$

Em que:

J – dia juliano que representa a ordem numérica do dia do ano, ou seja para o primeiro de janeiro o dia Juliano é 1 e para 31 de dezembro, o dia Juliano é 365 ou 366.

A declinação solar (δ) é dada pela seguinte equação:

$$\delta = 0,409 \times \text{sen}\left(\frac{2\pi}{365} J - 1,39\right) \quad (10)$$

Ângulo horário do nascer ou pôr-do-sol (ω_s) pode ser obtido por:

$$\omega_s = \arccos(-\tan(\varphi) \times \tan(\delta)) \quad (11)$$

A estimativa do consumo de água pelas culturas (ET_c) representa a quantidade de água que deve ser reposta ao solo para manter o crescimento e a produtividade em condições ideais. O cálculo da evapotranspiração da cultura (ET_c) é feito, normalmente, empregando-se a seguinte equação:

$$ET_{c_{ik}} = ET_{oi} \times Kc_{ik} \quad (12)$$

Em que:

$ET_{c_{ik}}$ – evapotranspiração da cultura no dia i e cultura k , mm;

Kc_{ik} – coeficiente de cultivo no dia i e cultura k , adimensional.

O Kc varia com a planta, local, clima, práticas culturais, desenvolvimento vegetativo, disponibilidade de água no solo, estágio de desenvolvimento e condições de cultivo com ou sem controle de ervas daninhas. Na realidade o valor de Kc integra o efeito dos fatores acima mencionados.

Face as grandes variabilidades de tipos de solos presentes e, conseqüentemente, das suas diferentes capacidades de retenção de água. A Capacidade de Água Disponível no solo (CAD) pode ser definida como o armazenamento máximo de água no solo, disponível para as plantas, sendo calculada pela equação:

$$CAD = \left(\frac{U_{CC} - U_{PMP}}{10}\right) \times d_s \times Z \quad (13)$$

Em que:

- CAD – capacidade de água disponível no solo, mm;
 U_{CC} – umidade do solo na capacidade campo, %;
 U_{PMP} – umidade do solo no ponto de murcha permanente, %;
 d_s – densidade aparente do solo, g cm⁻³ e;
 Z – profundidade efetiva do sistema radicular, cm.

Na realização do balanço hídrico, considerou-se uma adoção de turno rega variável, utilizando lâmina de irrigação visando sempre elevar o armazenamento da água no solo à capacidade de campo antes que as plantas apresentem sinal da falta de água. Desta forma, a irrigação deve ser realizada antes das plantas atingirem este ponto. Este ponto representa um percentual da CAD denominado Água Facilmente Disponível (AFD), isto é, aquele que pode ser extraído do solo a partir do armazenamento máximo, sem que ocorra déficit hídrico à cultura (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002), expressa por:

$$AFD = f \times CAD \quad (14)$$

Em que:

- AFD – água facilmente disponível para as plantas, mm e;
 f – fração de depleção da água no solo, adimensional.

Desta forma, na realização do balanço hídrico, realizou-se a irrigação quando foi consumida a água facilmente disponível (AFD). O coeficiente f estabelece o ponto da água no solo em que não haverá perda de rendimento da cultura em decorrência do estresse hídrico provocado por demanda evaporativa elevada. Esse coeficiente varia com o tipo da cultura e das necessidades hídricas em cada estágio de desenvolvimento, sendo, portanto, variável durante o ciclo da cultura.

A irrigação pode ser manejada com lâmina constante ou não, combinada com intervalos fixos ou não. A adoção de um critério está associada ao nível tecnológico da propriedade, instrumentação disponível, cultura, condições edafoclimáticas do local, custo e disponibilidade de água, sistema de irrigação utilizado e a rentabilidade da cultura. As lâminas variáveis devem representar a lâmina de irrigação mais o ajuste para o valor da evapotranspiração da cultura no período.

Para realização do manejo das irrigações via BHC são necessárias estimativas da lâmina de irrigação, ETc e das precipitações. O BHC é simples, eficiente e de fácil manejo

nas propriedades agrícolas, e ainda, com o equipamento necessário para estimativa da evapotranspiração e precipitação pode-se realizar o BHC de várias culturas e em diferentes estádios de desenvolvimento numa mesma propriedade ou região.

O monitoramento da precipitação e da ETc durante o ciclo serve para acompanhar o volume de água presente no solo. A lâmina de água armazenada no solo (LAS) foi estimada pela seguinte equação:

$$LAS_0 = CAD \quad (15)$$

$$LAS_i = LAS_{i-1} - ETc_{i-1} + P_i + LL_{i-1} \quad (16)$$

Em que:

LAS_0 – lâmina de água armazenada no solo no início da simulação, mm;

LAS_i – lâmina de água armazenada no solo no dia i, mm;

LAS_{i-1} – lâmina de água armazenada no solo no dia anterior, mm;

ETc_{i-1} – evapotranspiração do dia anterior, mm;

P_i – precipitação do dia i, mm e;

LL_{i-1} – lâmina líquida de irrigação do dia anterior, mm.

A lâmina líquida de irrigação (LL) vai ser a lâmina de água necessária para que o solo atinja a capacidade de água disponível (CAD), em que o limite para que se aplique a irrigação necessária vai ser quando a água no solo (LAS) seja menor ou igual a água facilmente disponível para a cultura (AFD). Assim a (LL) foi determinada da seguinte forma:

$$\text{Se } LAS_i > AFD, \text{ então } LL_i = 0 \quad (17)$$

$$\text{Se } LAS_i \leq AFD, \text{ então } LL_i = CAD - (LAS_i - ETc_i) \quad (18)$$

Em que:

LL_i – lâmina de irrigação a ser aplicada no dia i, mm;

ETc_i – evapotranspiração do dia i, mm.

A lâmina bruta ou lâmina total necessária (LB) deverá ser aplicada prevendo-se perdas (devido à deriva, vazamentos etc.) e a uniformidade de distribuição, por isso é obtida pela seguinte equação:

$$LB_i = \frac{LL_i}{Ei} \quad (19)$$

Em que:

LB_i – lâmina bruta de irrigação no dia i , mm;

Ei – eficiência de aplicação da irrigação, adimensional.

O volume de água real de irrigação (Q_{WR}) que o reservatório irá disponibilizar foi calculado através da lâmina bruta (LB) do dia em que a irrigação for indispensável para evitar estresse hídrico na cultura e da área cultivada máxima (A_{CM}). A A_{CM} determina uma área cultivada que depende da demanda hídrica da cultura, ciclo e do volume do reservatório no início do ciclo, assim garantido uma área máxima a ser cultivada evitando perdas por escassez hídrica e é expressa pelas seguintes equações:

$$A_{CMijk} = Máx \left\{ Mín \left[\frac{V_{ij} - \left(\frac{A_i / 2}{Ea / 1000} \right)}{1,1 \times DC_k \times V_{dk}}, \frac{Q_{dj}}{V_{dk}}, 0 \right] \right\} \quad (20)$$

$$Q_{WRijk} = \frac{LB_i}{1000} \times 10000 \times A_{CMijk} \quad (21)$$

Em que:

A_{CMijk} – Área cultivada máxima no dia i , garantia j e cultura k , ha;

V_{ij} – volume do reservatório no dia i e garantia j , m^3 ;

A_i – área do espelho d'água do reservatório no dia i , m^2

Ea – evaporação anual total, mm;

DC_k – total de dias do ciclo da cultura k , dia;

V_{dk} – volume diário por área para a cultura k , $m^3 \text{ ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$;

Q_{dj} – Vazão diária disponível na garantia j , $m^3 \text{ dia}^{-1}$ e;

Q_{WRij} – volume de água real retirada para atendimento da irrigação no dia i , garantia j e cultura k , m^3 .

Q_{WR} será a responsável pela retirada real de água no reservatório. Como o manejo de irrigação é de turno de rega variável, dessa forma, Q_{WR} não é constante no tempo, ou seja, o volume água no reservatório será subtraído de Q_{WR} ao final de cada dia quando a irrigação for necessária na simulação.

4.1.3 Critérios de viabilidade econômica

Para a análise econômica das culturas sob regime irrigado, os custos foram considerados os custos de implantação durante um ciclo da cultura ou custo de produção (CP), em que esses custos são de preparo do solo, sementes, defensivos agrícolas, mão-de-obra, entre outros. O custo unitário de investimento de irrigação (CUI) depende do sistema de irrigação que será empregado no seu cultivo. O custo total de implantação (CTP) foi calculado pela seguinte equação:

$$CTP_{ijk} = \frac{1}{DC} \times CP_k \times A_{CMijk} \quad (22)$$

Em que:

CTP_{ij} – custo total de implantação no dia i, garantia j e cultura k, R\$;

CP_k – custo de produção da cultura k, R\$ ha⁻¹.

O investimento inicial (CI) necessário para irrigação foi calculado pela seguinte equação:

$$CI_r = CUI_r \times Ac_{máxjk} \quad (23)$$

Em que:

CI_r – investimento inicial para sistema de irrigação r, R\$;

CUI_r – custo unitário para sistema de irrigação r, R\$ ha⁻¹ e;

$Ac_{máxjk}$ – área máxima cultivada na garantia j e cultura k, ha.

O custo de energia elétrica (CE) foi estimado pela equação adaptada de Frizzzone (2005):

$$CE_i = \frac{10LB_i \times Hm \times \gamma_a \times Tc}{3,6 \times 10^6 \eta} \times A_{CMijk} \quad (24)$$

Em que:

CE_i – custo da energia elétrica no dia i , R\$;

H_m – altura manométrica total, m;

γ_a – peso específico da água, 9.806,65 N m⁻³;

T_c – tarifa de energia elétrica referente ao período do ciclo, R\$ kWh⁻¹ e;

η – eficiência global do conjunto moto-bomba, adimensional.

O custo total para a cultura é dada por:

$$CT_{ijk_r} = CTP_{ijk} + CI_r + CE_i \quad (25)$$

Em que:

CT_{ijk_r} – custo total de produção para dia i , garantia j , cultura k e sistema de irrigação r , R\$.

No fim do ciclo da cultura na simulação, a produção total da cultura (Y_r) foi calculada pela seguinte equação:

$$Y_{r_{ijk}} = Rc_k \times A_{CM_{ijk}} \quad (26)$$

Em que:

$Y_{r_{ijk}}$ – produção da cultura no dia i , garantia j e cultura k , kg e;

Rc_k – Rendimento total da cultura, kg ha⁻¹.

A receita líquida foi determinada a partir do rendimento relativo e da lâmina bruta obtida para cada nível de garantia (G) utilizando as expressões:

$$RL_{ijk_r} = RB_{ijk} - CT_{ijk_r} - Rf_{jkr} \pm RR_{ijk_r} \quad (27)$$

$$RB_{ijk} = Y_{r_{ijk}} \times Pf_k \quad (28)$$

$$\text{Se, } RL_{ijk_r} < 0 \text{ temos} \quad (29)$$

$$RR_{ijk_r} = -RL_{i-1,jkr} \times Tjd_i, e \quad (30)$$

$$\text{Se, } RL_{ijk_r} \geq 0 \text{ temos} \quad (30)$$

$$RR_{ijk_r} = +RL_{i-1,jkr} \times Rp_i \quad (31)$$

Em que:

RL_{ijk} – receita líquida obtida pelo cultivo no dia i , garantia j , cultura k e sistema de irrigação r , R\$;

RB_{ijk} – receita bruta obtida pelo cultivo no dia i , garantia j e cultura k , R\$;

Rf_{jkr} – renda fixa adquirida pela garantia j , cultura k e sistema de irrigação r , R\$;

RR_{ijkr} – rendimento investido no dia i , garantia j , cultura k e sistema de irrigação r , R\$;

Pf_k – preço médio da venda da cultura k , R\$ kg^{-1} ;

RL_{i-1jkr} – receita líquida do passo anterior na garantia j , cultura k e sistema de irrigação r , R\$;

Tjd_i – taxa de juros diária da dívida do investimento no dia i , % e;

Rp_i – rendimento na poupança no dia i , %.

O passo final da simulação será a otimização da renda fixa (Rf) até que a receita líquida fique igual a zero ($RL=0$) no último dia da simulação. Assim terá os valores da renda mensal de cada garantia, cultura e sistema de irrigação empregado na simulação.

As hipóteses simplificadoras do modelo são: a) toda água excedente durante um dia de simulação do balanço hídrico será vertido no fim do dia da simulação; b) o reservatório só terá um único uso; c) não há restrição de solo para cultivo, sendo assim a cultura sempre terá produtividade máxima; d) não se admite variação na CAD de acordo com desenvolvimento da cultura; e) não foi considerada a variação do mercado no preço de venda; f) a operação ótima vai ser aquela que obtiver a maior renda mensal para durante todo o período simulado.

4.2 Aplicação do modelo

4.2.1 Entradas e saídas de dados do modelo matemático

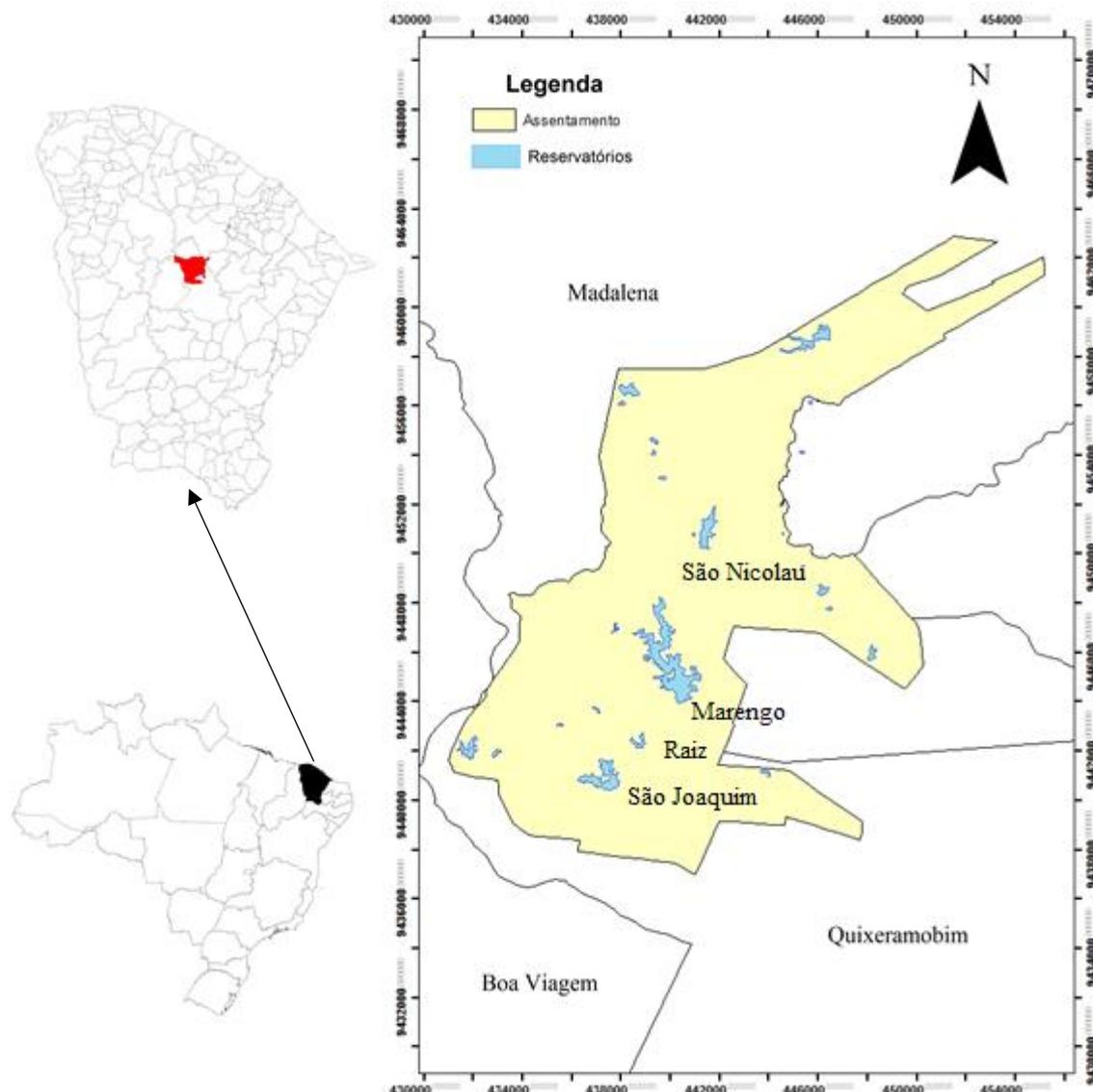
O estudo de caso foi desenvolvido no Assentamento 25 de Maio, localizado na divisa dos municípios de Madalena, Boa Viagem e Quixeramobim, todos pertencentes ao estado do Ceará (Figura 3). O assentamento foi criado em 1989, em uma área de 23.000 hectares, pertencendo à Bacia Hidrográfica do Banabuiú (BHB). No assentamento residem, atualmente, 586 famílias, com atividades econômicas voltadas para a agricultura, apicultura e pecuária extensiva (PINHEIRO, 2011). No referido assentamento está instalada a Bacia

Experimental de Madalena, monitorada pelo grupo de pesquisa Hidrosed (ANDRADE; NASCIMENTO; MEDEIROS, 2015).

Segundo Pinheiro (2011), a área de estudo está situada entre as altitudes 250 a 360 m, com formação geológica datada do período Pré-Cambriano composta por rochas do embasamento cristalino. O assentamento está inserido na região semiárida brasileira, apresentando déficit hídrico natural, com elevadas temperaturas, predominância de longos períodos sem chuva e intensas taxas de evaporação, apresentando uma precipitação média anual de aproximadamente 600 mm e evaporação potencial média de 2.100 mm ano⁻¹. Somando a esses fatores a ocorrência de ventos fortes e secos, as temperaturas ficam em torno de 26 a 28°C, podendo chegar a 25°C, em média, no período chuvoso (LOPES, 2013).

O programa computacional foi estruturado de forma a permitir ao usuário a entrada de informações tais como: a) dados de características geométricas do reservatório, volume máximo, cota máxima de sangria, bacia hidrográfica, vazão regularizada; b) informações sobre a cultura, tipo de irrigação, informações sobre o solo; c) informações sobre custo de irrigação, custo de implantação da cultura, tarifa de energia elétrica, altura manométrica, rendimento do conjunto motor-bomba, produtividade da cultura, preço de venda da produção.

Figura 3 – Localização do Assentamento 25 de Maio, Madalena-CE



Fonte: Próprio Autor, 2016.

As simulações foram realizadas durante o período de janeiro de 1986 a novembro de 2014, pois foram disponibilizadas séries medidas de precipitação, evaporação, escoamento superficial, temperatura máxima e mínima. Os dados de precipitação foram adquiridos dos postos pluviométricos na cidade de Madalena e Quixeramobim da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME) de janeiro de 1986 à novembro de 2014. A evaporação foi obtida das NORMAIS CLIMATOLÓGICAS (INMET, 2009), e a estação que representa a Bacia Hidrográfica do Banabuiú é de Quixeramobim, sendo as medições realizadas através do método de Piché. As aflúências para os pequenos açudes (Q_R) podem ser obtidas através de registros fluviométricos e utilizando-se técnicas de regionalização de vazões que foram obtidos no trabalho realizado por Nascimento (2015).

As temperaturas foram obtidas na estação meteorológica de Quixeramobim, que está disponível no banco de dados do INMET.

O modelo foi aplicado nos reservatórios Marengo, Raiz, São Joaquim e São Nicolau que estão localizados no assentamento. A escolha desses reservatórios foi por apresentarem características diferentes entre si e assim podendo fazer uma análise do modelo sobre esses fatores geométricos (Tabela 1). Esses reservatórios iniciaram a simulação com 1/3 da sua capacidade máxima de armazenamento.

Tabela 1– Características dos reservatórios utilizados nas simulações

Açude	Capacidade máxima (hm³)	Altura máxima (m)	Bacia hidrográfica (km²)	Coefficiente α	Coefficiente k
Marengo	16,8	16,1	120,0	2,7	9.266
Raiz	1,5	9,0	5,0	2,7	3.942
São Joaquim	5,15	7,5	30,8	2,7	22.586
São Nicolau	0,89	6,3	36,1	2,7	6.290

Fonte: Próprio Autor, 2016.

Após de determinação da disponibilidade hídrica nos reservatórios para uma dada garantia (G), foi realizado o balanço hídrico da cultura e simulação do cultivo agrícola. A cultura escolhida para a simulação foi a do milho (*Zea mays*) devido existir cultivares adaptadas a diferentes condições de temperatura e umidade e dentre os cereais cultivados no Brasil o milho é o mais expressivo, com cerca de 80 milhões de toneladas de grãos produzidos, em uma área de aproximadamente 15,6 milhões de hectares (CONAB, 2016).

Na área que abrange o assentamento, em uma análise generalista e em pequena escala, pode-se dizer que há forte presença de solos Litólicos Eutróficos e do Brumo Não-Cálcico e em menor extensão o Vertissolo, com vários níveis texturais e diferentes características, que apresentam horizontes com fases pedregosas.

A vegetação do assentamento é composta de caatinga arbórea e arbustiva preservada, que ocupa 21% da área total. Já os terrenos destinados às culturas temporárias e à criação de gado bovino e caprino equivalem a 61% da área do assentamento. Os terrenos de uma forma em geral são utilizados pela agricultura de subsistência e a pecuária extensiva, principalmente bovina e caprina. O extrativismo vegetal é basicamente a exploração de madeira para a construção de cercas e carvão para uso doméstico.

O milho, em virtude das condições climáticas presentes no assentamento, pode ser cultivado em qualquer época do ano, desde que haja suplementação hídrica, sendo que a

duração do seu ciclo praticamente não varia ao longo do ano. Sendo assim, para fins de execução dos balanços hídricos diários, considerou-se o seu ciclo igual a 110 dias com demanda hídrica igual a 650 mm por ciclo para todas as épocas de semeadura utilizadas. Considerando que a colheita, o preparo do solo e o replantio sejam realizados em 10 dias, então o ciclo total do milho foi de 120 dias para todas as épocas de semeaduras.

Segundo dados adaptados de Allen *et al.* (1998), para diversas regiões do mundo, a duração do ciclo fenológico do milho para produção de grãos, varia de 110 a 180 dias, cujas fases 1, 2, 3 e 4 correspondem a 17%, 28%, 33% e 22%, respectivamente, do ciclo total.

As fases de desenvolvimento da cultura do milho foram definidas assim: I – estabelecimento; II – desenvolvimento vegetativo; III – floração e frutificação e IV – maturação que vai da maturação até a colheita. O valores de K_c é variável em cada fase de desenvolvimento da cultura (Tabela 2).

Tabela 2– Coeficientes de cultivo (K_c) para cada fase de desenvolvimento do milho

Fase	Dias após a semeadura (DAS)	K_c
I	0-20	0,66
II	21-51	0,97
III	52-88	1,29
IV	89-110	0,82

Fonte: Albuquerque e Andrade, 2001 adaptada.

A profundidade efetiva do sistema radicular (Z) para o milho foi considerada de 45 cm, considerando constante durante o ciclo da cultura para fins da obtenção da CAD. O coeficiente de depleção (f) foi considerado igual a 0,5, de acordo com as recomendações de Doorenbos e Kassam (2000).

O solo para essa simulação foi considerado de textura média (solo franco), sendo que umidade média na capacidade de campo (U_{CC}) foi de 22%, ponto de murcha permanente (U_{PMP}) 10% e densidade média do solo (d_s) $1,4 \text{ g cm}^{-3}$ (VERMEIREN; JOBLING, 1997).

O preço de venda do milho utilizado nesse estudo foi de R\$ $0,80 \text{ kg}^{-1}$, sendo este em nível de produtor rural e refere-se ao preço médio obtido junto à CONAB para a cidade de Barreiras na Bahia em junho de 2016.

A produtividade máxima da cultura do milho foi considerada a cultivada com médio grau tecnológico no Brasil, que é entre 6.000 a $10.000 \text{ kg ha}^{-1}$ (IMEA, 2016), e nesse trabalho foi considerado um valor de produtividade de 8.500 kg ha^{-1} . O custo de implantação

da cultura ou custo de produção (CP) utilizado nas análises foi de R\$ 3.000 ha⁻¹. Este custo é um valor médio representativo das condições de mercado para produção do milho com médio grau tecnológico com utilização da irrigação fornecido pelo IMEA (2016).

Para fins de estimativa de lâmina bruta de irrigação (LB) considerou-se que a irrigação seria feita por aspersão convencional, sendo a eficiência do sistema (Ei) pré-fixada em 75%. Utilizou-se este valor de eficiência por ser um valor que no nível de propriedade rural pode ser perfeitamente obtido com o manejo adequado do sistema (MOUSINHO, 2005). O custo médio de aquisição do sistema de irrigação por aspersão convencional foi de R\$ 7.000 ha⁻¹ (FLORES, 2014).

Para a estimativa do custo da energia elétrica (CE), o valor da tarifa utilizado representa a tarifa de consumo obtida junto à Companhia Energética do Ceará (COELCE) no mês de março de 2016 na bandeira vermelha (R\$ 0,09143 kWh⁻¹), com subsídio da Lei Estadual de incentivo à irrigação. O valor da altura manométrica (Hm) utilizada foi 40 m, esse valor representa uma situação hipotética. Mousinho (2005), avaliando a viabilidade econômica da irrigação do feijão-caupi no estado do Piauí, utilizou um valor de altura manométrica de 60 m, sendo que representava a situação da maioria dos sistemas de irrigação por aspersão convencional instalados no Estado.

A taxa do rendimento na caderneta de poupança foi de 0,65% mensal para valores positivos de receita líquida (RL). A taxa de juros da dívida foi de 10% para valores negativos de receita líquida.

Com isso, analisando as vazões regularizadas obtidas nas garantias (G), partindo de 20 até 90%, pretende-se propor critérios e indicar uma regra de operação racional que otimize a renda do pequeno agricultor com o uso da água de pequenos reservatórios, permitindo, assim, um melhor aproveitamento racional da água armazenada nesses sistemas.

A regra sugerida nesse modelo é que os pequenos reservatórios tenham apenas uma finalidade de uso de seus recursos hídricos, sugerindo o uso para a produção agrícola. Dessa forma fica possível um planejamento com os recursos do reservatório e também diminui a pressão sobre os médios e grandes reservatórios.

4.2.2 Análise de sensibilidade do modelo

A análise de sensibilidade foi realizada para os parâmetros de entrada: custos de implantação da cultura (CP) e a produtividade máxima e preço de venda da cultura do milho, para verificar o efeito deles na garantia racional determinada pelo modelo. Cada um desses

parâmetros sofreram variações para mais e para menos seguindo acréscimos positivos de +10%, +20%, +30%, +40%, 50% e negativos de -10%, -20%, -30%, -40%, -50%.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Segundo Alexandre (2012) a operação desses pequenos sistemas hídricos, na maioria dos estados do Nordeste, é realizada sem que os órgãos gestores tenham conhecimento e segurança da real disponibilidade hídrica e da qualidade das águas dos mananciais, já que poucos são monitorados. Faltam, portanto, critérios para gerir de forma otimizada esses pequenos açudes. Pequenos reservatórios não podem ser operados da mesma forma que os médios e grandes reservatórios são geridos (regra de operação igual 90% de garantia de permanência no tempo), pois esses reservatórios - além de não possuir garantia de permanência de longos períodos para abastecimento humano, que é a maior prioridade segundo a legislação dos recursos hídricos - não atendem às finalidades múltiplas que também são incentivadas. E sem uma forma concreta de operação racional haverá um “prejuízo hídrico”, no qual a água estocada no período chuvoso poderá ser perdida, em sua grande maioria, por evaporação.

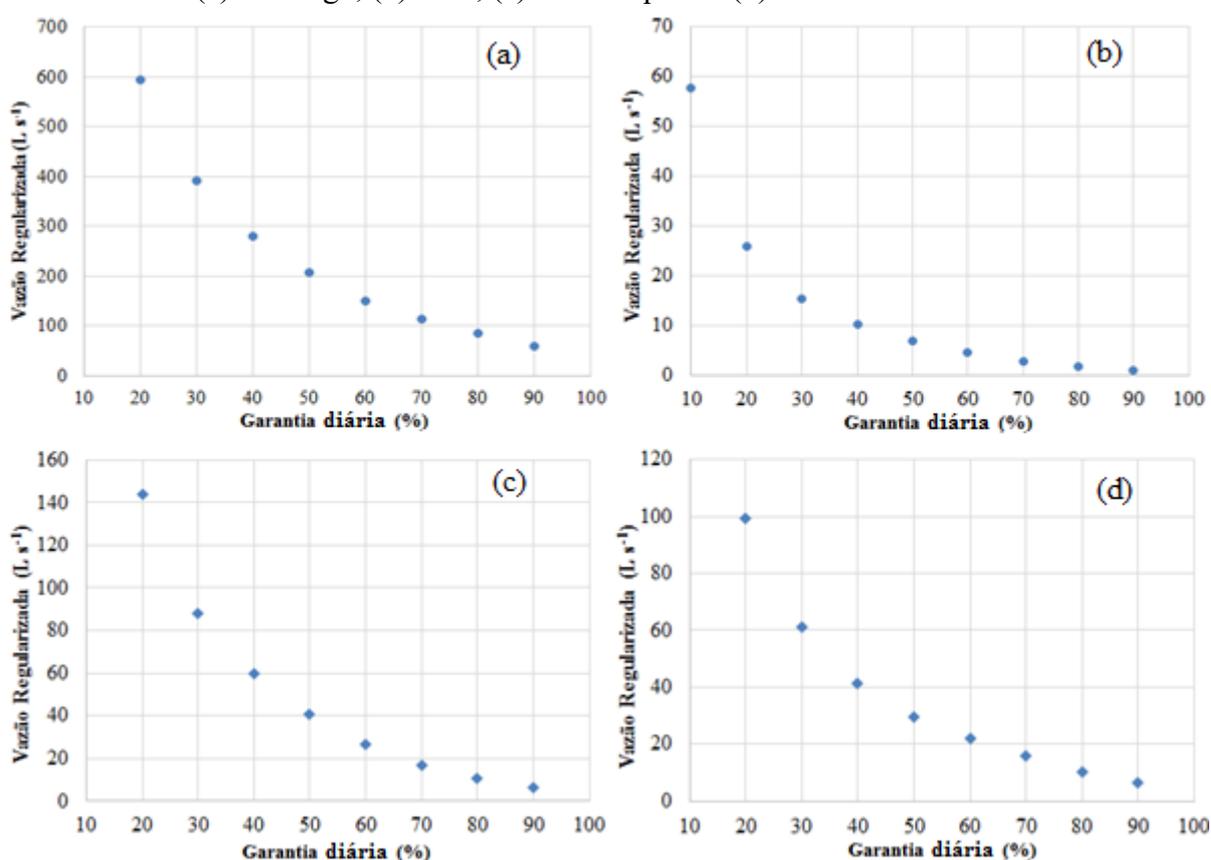
De acordo com as simulações, quando se utiliza vazão regularizada com garantia igual a 90%, as vazões regularizadas foram 84, 525 e 541 m³ dia⁻¹ para os reservatórios Raiz, São Joaquim e São Nicolau, respectivamente (Figura 4bcd). O reservatório de médio porte, o Marengo, obteve uma vazão regularizável diária de 5.030 m³ dia⁻¹ para a mesma garantia (Figura 4a), que demonstra que esse reservatório pode disponibilizar uma vazão superior que as dos três outros reservatórios estudados e com isso o reservatório Marengo se mostra mais eficiente para uso como reserva estratégica na comunidade.

Alexandre (2012) sugere um plano emergencial contra secas na comunidade de Paus Branco, que é localizada no mesmo assentamento deste estudo, que no caso de escassez de chuvas seja realizado levantamento do uso nos abastecimentos prioritários, uso de cisternas para uso doméstico no período de estiagem, uso do reservatório com maior capacidade de armazenamento para distribuição de água para a comunidade para uso da vazão de outorga que é de garantia igual a 90% (nesse caso a autora também recomendou o uso do reservatório Marengo), construção de tanques bebedouros para os animais e de adutora por parte do órgão municipal para atendimento hídrico na comunidade e ainda podendo considerar perfuração de poços para consumo humano.

De acordo com a Organização das Nações Unidas, cada pessoa necessita de 3,3 m³ mês⁻¹ por pessoa (cerca de 110 litros por dia), então, assumindo que na comunidade, que possui 586 famílias e cada família tem em média quatro pessoas, o consumo diário vai ser de 258 m³ dia⁻¹. Deste modo, o reservatório Marengo será mais que o suficiente para o

abastecimento humano e ainda suprir as necessidades para outras finalidades, porém com a necessidade de construções de adutoras ou de estação de elevação para facilitar o atendimento hídrico para toda a comunidade. Segundo Alexandre (2012) alguns pequenos reservatórios não conseguem regularizar vazões com 99% de garantia anual, devido à baixa eficiência em anos secos e maior susceptibilidade ao regime de vazões. Assim o uso dos pequenos reservatórios pode ter melhor eficiência se conter uma única finalidade, que proposta por este trabalho, que é na melhoria da renda familiar, através da agricultura irrigada.

Figura 4 – Vazões regularizáveis para diferentes garantias de fornecimento hídrico dos reservatórios (a) Marengo, (b) Raiz, (c) São Joaquim e (d) São Nicolau



Fonte: Próprio Autor, 2016.

Analisando a eficiência hídrica, levando em consideração o coeficiente de abertura dos reservatórios (k), o São Nicolau ($k = 6.290$), mesmo sendo o reservatório com a menor capacidade de armazenamento, apresentou curva semelhante à do reservatório São Joaquim ($k = 22.586$), cuja capacidade é quase seis vezes maior quando comparada com a do São Nicolau. Isso demonstra a importância da geometria do reservatório, pois quanto menor o valor do coeficiente k , menor será a área do espelho d'água disponível para

evaporação direta. Costa *et al.* (2009) comenta que a eficiência hidrológica aumenta juntamente com aumento da escala da bacia que se situa o reservatório e que a vazão regularizável em pequenos reservatórios são sensíveis aos fatores climáticos e ao coeficiente de abertura.

O reservatório Raiz, apesar de ter uma capacidade 1,5 hm³ e um coeficiente de abertura ($k = 3.942$), não tem muita eficiência em disponibilizar vazões com elevada garantia segundo as simulações realizadas pelo modelo. Isso se deve principalmente ao pequeno volume afluente, proveniente do escoamento superficial, no reservatório. O reservatório possui a menor bacia hidrográfica dentre os reservatórios usados para este estudo. Segundo Campos *et al.* (2003) pequenos reservatórios podem ter boa eficiência hidrológica quando se há um bom planejamento e dimensionamento.

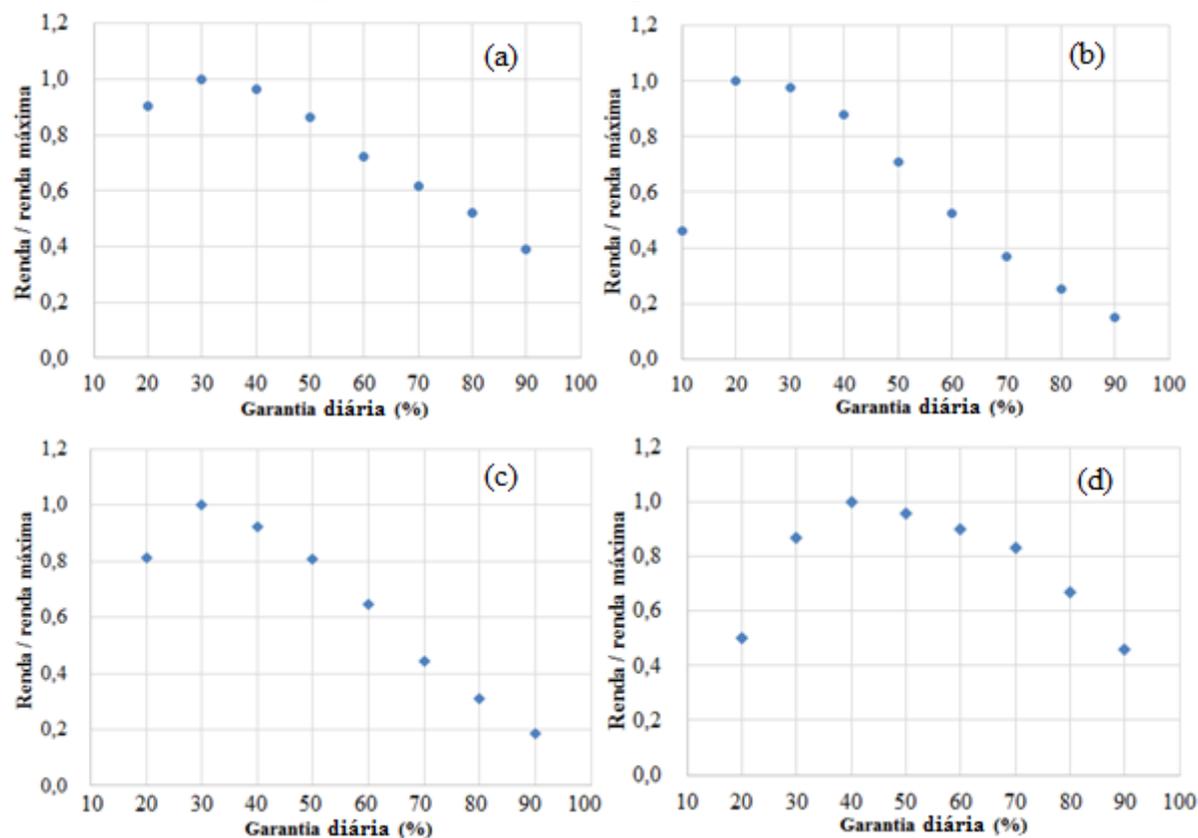
Para fins de decisão de como operar esses reservatórios com finalidade na produção agrícola, o que foi sugerido por Molle e Cadier (1992), que ainda sugerem o uso da água desses mananciais mesmo que promovam a exaustão dos mesmos. Porém, perante o modelo, deve haver um planejamento e conhecimento de características do clima e técnicos do reservatório para assim definir uma vazão de retirada para maximizar a área cultivada e evitar perdas por mau uso do recurso disponível.

Na Figura 5 observa-se que o uso racional da água dos reservatórios com finalidade na agricultura irrigada da cultura do milho, que o rendimento máximo é variável entre pequenos reservatórios, pois depende do regime hidrológico da região em que o reservatório foi construído e das características hidráulicas de cada um, pois açudes rasos tendem a perder água mais facilmente por evaporação devido a sua maior área ocupada. E com isso se faz necessário um planejamento e um conhecimento das características de um reservatório antes do seu uso. Os reservatórios Marengo, Raiz, São Joaquim e São Nicolau, liberam, no ponto de rendimento máximo, uma vazão regularizada de 33.739, 2.224, 7.613 e 3.568 m³ dia⁻¹ para a garantia na renda máxima e cultiva uma área máxima de 571, 38, 129, e 89 ha para a cultura do milho, respectivamente.

Avaliando as operações racionais da Figura 5abcd, observa-se que a produção ótima da cultura do milho será nas garantias de 20% (Raiz), 30% (Marengo e São Joaquim) e 40% (São Nicolau). Esses dados demonstram que o cultivo irrigado da cultura do milho nas condições de mercado utilizados nesse trabalho é variável entre reservatórios, pois dependem das características que interferem nas entradas e saídas de água pelo modelo (vazão afluente e evaporação direta). Esse ponto de rendimento máximo, para estes

reservatórios, pode mudar mediante aos fatores do clima da região, tipo de cultura implantada, nível de tecnologia de cultivo e preço de venda da cultura.

Figura 5 – Rendimento da cultura do milho versus a garantia de fornecimento hídrico dos reservatórios (a) Marengo, (b) Raiz, (c) São Joaquim e (d) São Nicolau



Fonte: Próprio Autor, 2016.

Observando os reservatórios de pequeno porte (Figura 5bcd), nota-se que pequenos reservatórios que a regra de operação está intimamente ligada ao local da construção dos mesmos, pois dos quais o reservatório São Nicolau (Figura 5d) foi o que apresentou a curva de operação com a concavidade mais aberta, demonstrando que o uso da água armazenada sofre menos interferência dos fatores climáticos e da vazão de retirada. Já os reservatórios Raiz e São Joaquim apresentaram curva com concavidade mais fechada, dessa maneira o modelo mostrou-se sensível a vazão afluente, que é fator limitante para disponibilidade, caso do reservatório Raiz, e ainda a forma que os reservatórios possuem, caso do reservatório São Joaquim. O conhecimento das características geométricas é importante ao se relacionar ao uso do reservatório. Para o abastecimento humano, a profundidade é um indicador do tempo em que a água estará disponível. Por outro lado, para

o uso na irrigação, preferem-se reservatórios com o espelho d'água limitado diminuindo a perda por evaporação (PEREIRA, 2014).

O modelo mostra a necessidade de planejamento do uso da água em pequenos reservatórios e de também criar um sistema de reservatórios como suporte para planejamento hídrico, tanto para não descartar os pequenos reservatórios dos planos de gestão, como prática no auxílio da renda familiar. Com isso há a necessidade de enquadramento quanto a finalidade do uso racional da água de pequenos reservatórios.

Apesar de se ter simulado o reservatório Marengo, vale ressaltar que o modelo desenvolvido no âmbito deste trabalho não deve ser aplicado em reservatórios que atendem a usos prioritários de abastecimento, pois o mesmo prioriza o uso da água para a maximização do rendimento agrícola do pequeno agricultor com baixas garantias de fornecimento hídrico.

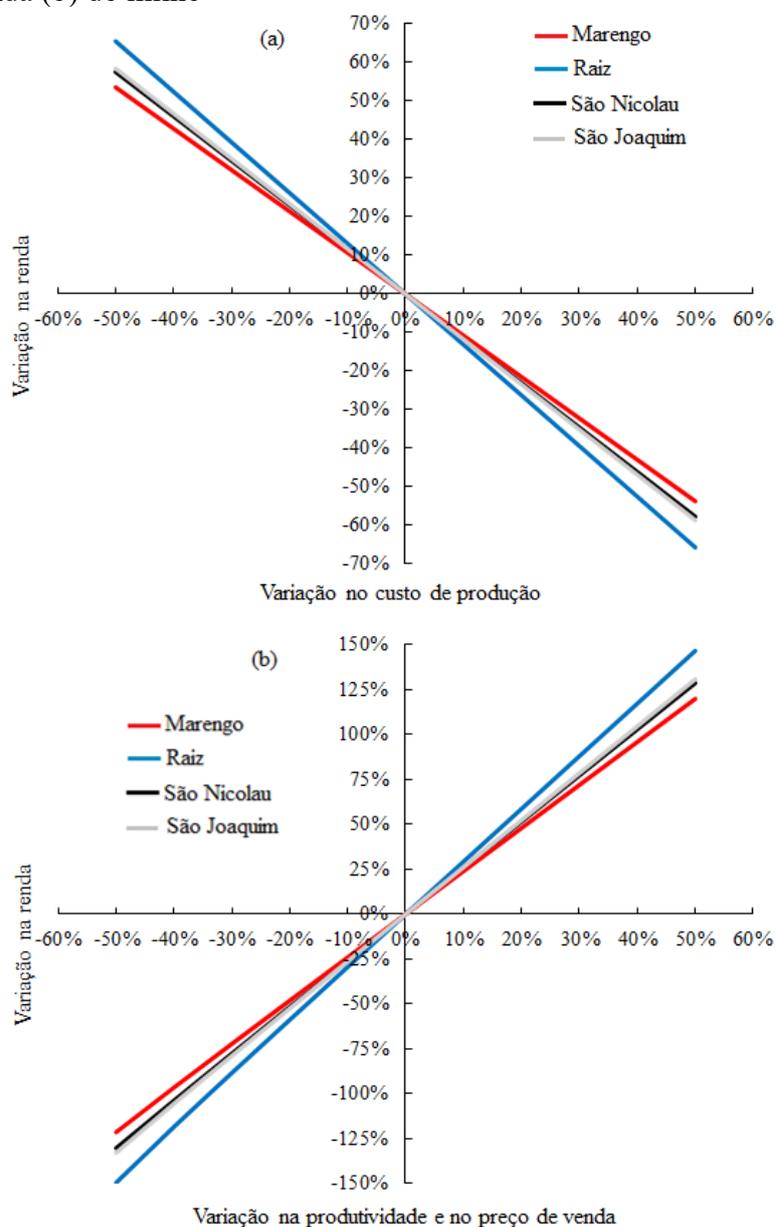
A respeito da outorga de direito do uso, deve ser implantada como medida econômica, racionalização do uso dos pequenos reservatórios e internalização dos custos sociais (VIANA *et al.*, 2006). Porém, segundo Bruno e Dias (2004) e Alexandre (2012), indicam que a baixa condição socioeconômica dos assentados induz a uma baixa capacidade de pagamento.

O melhoramento do grau tecnológico na agricultura é de fundamental importância, principalmente com uso de irrigação, pois, além de ser um bem de alto custo de aquisição, a irrigação não deve ser utilizada pelo simples prazer de que se está fazendo agricultura irrigada, mas, sim, com o objetivo de aumentar o rendimento através da redução dos riscos, com o aumento da produção e da qualidade, ou de incorporar à agricultura áreas que não seriam possíveis de se cultivar sem o uso da irrigação.

Assim, com a realização da análise de sensibilidade do rendimento total para os parâmetros de custos de produção (CP) e produtividade máxima e preço de venda da cultura do milho, observou-se que os parâmetros têm comportamento linear e leves diferenças entre as variações entre os reservatórios nas análises, sendo que a produtividade máxima e o preço de venda possuem o mesmo comportamento diante o modelo (Figura 6). Avaliando a sensibilidade do CP, o modelo apresentou leve diferença entre os reservatórios estudados submetidos à variação nos custos, onde apresentou uma oscilação de quase 1:1, ou seja, mudança na ordem de 10% no CP irá ter uma diminuição na renda de mais ou menos 10% para todos os reservatórios deste estudo, porém mostrando um leve aumento na variação quando a vazão de entrada é um fator limitante, caso que acontece com o reservatório Raiz (Figura 6ab).

Considerando a sensibilidade do rendimento total quanto a produtividade máxima e o preço de venda do milho, verifica-se que uma maior sensibilidade as mudanças na produção e variação de preço de venda, podendo chegar a variação na ordem 3:1, com isso modificando o ponto de rendimento máximo para os reservatórios avaliados (Figura 6b). Desse modo, o planejamento de operação da irrigação nesses casos deve ter como objetivo maximizar a produção por unidade de água e assim racionalizar o uso da água desses reservatórios a fim de evitar perdas tanto hídricas como econômicas.

Figura 6 – Análise de sensibilidade do rendimento total na garantia racional nos reservatórios Marengo, Raiz, São Joaquim e São Nicolau, a variações nos custos de produção (a) e na produtividade máxima e preço de venda (b) do milho



Isso demonstra que o grau tecnológico e a elasticidade preço de venda do milho também são fatores a ser avaliados no planejamento hídrico para uso dos reservatórios não-estratégicos na agricultura irrigada. Segundo Caldarelli e Bacchi (2012) a elasticidade do preço do milho para o produtor sofre interferência de fatores como renda, taxa juros e preços dos mercados externos influenciam no processo de formação no preço do milho.

6 CONCLUSÕES

O modelo mostrou-se como um bom suporte para planejamento da agricultura familiar, sendo possível proporcionar um aumento da renda do pequeno agricultor e ainda destinando uso definitivo para os reservatórios não-estratégicos, que atualmente encontram-se em sua maioria subutilizados como consequência da cultura de poupar água.

A alta garantia para operação, praticada pelos órgãos gestores nos grandes sistemas e que às vezes não é possível para pequenos reservatórios, devido à sua baixa profundidade, o que acaba por provocar o completo esvaziamento em intervalos de tempo de poucos anos, não se mostra economicamente a melhor proposta para esse tipo de reservatório.

Diante das simulações das diversas garantias, constatou-se que, para ter maior segurança hídrica, o reservatório Marengo pode atender as demandas de abastecimento no assentamento 25 de Maio e, assim, retirando a obrigatoriedade dos pequenos reservatórios desse tipo de abastecimento, permitindo seu uso para a agricultura irrigada e adotando o modelo ora proposto. Nesse contexto, ressalta-se a importância de uma comissão gestora para definir como os usos múltiplos podem ser atendidos de forma mais eficiente e eficaz por diferentes açudes em um sistema hídrico.

Pequenos reservatórios não possuem regras de operação iguais entre si para maximizar o rendimento na agricultura irrigada, pois a vazão regularizável é sensível tanto aos fatores climáticos como às características geométricas do açude, características da bacia hidrográfica e modelo de produção agrícola adotado.

O grau tecnológico e a elasticidade do preço de venda do milho se mostraram fatores limitantes para o uso desse modelo na operação de pequenos reservatórios, assim se faz necessário um planejamento para cultivar com mais eficiência e por fim melhorar a renda na agricultura familiar.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, P.E.P.; ANDRADE, C.L.T. **Planilha eletrônica para a programação da irrigação de culturas anuais**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2001. 14 p.
- ALEXANDRE, D.M.B. **Gestão de pequenos sistemas hídricos no semiárido nordestino**. 146 f. Tese (Doutorado), Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza – CE, 2012.
- ALI, M.H.; TALUKDER, M.S.U. Increasing water productivity in crop production: a synthesis. **Agricultural Water Management**. Amsterdam, v. 95, n. 11, p. 1201-1213, Nov. 2008.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, FAO. **Irrigation and Drainage Paper 56**. 1998, 297 p.
- ANDRADE, D.A. NASCIMENTO, A.T.P.; MEDEIROS, P.H.A. Hidrologia experimental no Ceará – contribuição para compreensão da hidrologia no semiárido. **In: II Simpósio brasileiro de recursos Naturais do Semiárido. Convivência com o semiárido: certezas e incertezas**. Quixadá, CE, 2015.
- ARAÚJO, J.C.; DÖLL, P.; GÜNTNER, A.; KROL, M.; ABREU, C.B.R.; HAUSCHILD, M.; MENDIONDO, E. M. Water scarcity under scenarios for global climate change and regional development in semiarid Northeastern Brazil. **Water International**, v. 29, n. 2, p. 209-220, 2004.
- ARAÚJO, J.C.; GÜNTNER, A.; BRONSTERT, A. Loss of reservoir volume by sediment deposition and its impact on water availability in semiarid Brazil. **Hydrol. Sci. J.**, v. 51, n. 1, p. 157–170, 2006.
- ARAÚJO, J.C.; PIEDRA, J.I.G. Comparative hydrology: analysis of a semiarid and a humid tropical watershed. **Hydrological Processes**, v. 23, p. 1169-1178, 2009.
- ARAÚJO, J.C.; MEDEIROS, P.H.A.; MAMEDE, G.L. Impactos da densa rede de açudes no semiárido brasileiro. **In: I Simpósio Brasileiro de Recursos Naturais do Semiárido, Iguatu, CE, 2012**.
- BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. 5. ed. Viçosa: Imprensa Universitária, 1989. 596 p.
- BOELEEE, E.; CECCHI, P.; KONE, A. **Health impacts of small reservoirs in Burkina Faso**. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute, (IWMI Working Paper 136), 2009.
- BRASIL. Ministério da Integração – MI. **Nova delimitação do semiárido**. Portaria n. 89/2005, Brasília, 2005.
- BRUNO, R.A.L.; DIAS, M.M. **As políticas públicas de crédito para os assentamentos rurais no Brasil**. Relatório de Consultoria. Rio de Janeiro, 2004.

CALDARELLI, C.E.; BACCHI, M.R.P. Fatores de influência no preço do milho no Brasil. **Nova Economia**, v. 22, n. 1, p. 141-164, 2012.

CAMPOS, J.N.B. **Dimensionamento de reservatórios**. UFC – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil, 1996.

CAMPOS, J.N.B.; STUDART, T.M.C.; MARTINZ, D.D.G.; NASCIMENTO, L.S.V. Contribuições ao debate sobre as eficiências de pequenos e grandes reservatórios. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 2, p. 32-38, 2003.

CAMPOS, N. **Dimensionamento de reservatórios: o método do diagrama triangular de regularização**. Expressão Gráfica e Editora, Fortaleza, CE, 2005.

COGERH. **Portal hidrológico do Ceará**. Disponível em: <<http://www.hidro.ce.gov.br/>>. Acesso em: 10 ago. 2015.

CONAB – **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**. v. 3, n. 8, maio 2016.

COSTA, A.C. **Hidrologia em uma bacia experimental em caatinga conservada no semi-árido brasileiro**. 166 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE. 2007.

COSTA, C.A.G.; ALEXANDRE, D.M.B.; MEDEIROS, P.H.A.; de ARAÚJO, J.C. Análise de sensibilidade da vazão regularizável em reservatórios de diferentes escalas. **In: XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Campo Grande, MS, 2009.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Trad. De H.R. Gheyi *et al.* 2.ed. Campina Grande; UFPB, Estudos FAO: Irrigação e Drenagem 33,2000. 221 p.

FLORES, D.M. **Irrigar: aplicativo computacional para o dimensionamento econômico de sistemas de irrigação por aspersão convencional**. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados-MS, 2014.

FRISCHKORN, H.; de ARAÚJO, J.C.; SANTIAGO, M.M.F. Water resources of Piauí and Ceará. In: Gaiser; Krol; Frischkorn; de Araújo. (Org.), **Global change and regional impacts**. 1 ed. Berlin: Springer Verlag, p. 87-94, 2003.

FRIZZONE, J.A.; ANDRADE JUNIOR, A.S. **Planejamento de irrigação: análise de decisão de investimento**. Embrapa Informação Tecnológica, Brasília, DF, 2005.

FRIZZONE, J.A. **Análise de decisão econômica em irrigação**. Série Didática, 17. Piracicaba: ESALQ, 2005. 371 p.

HARGREAVES, G.H.; SAMANI, Z.A. Reference crop evapotranspiration from temperature. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 01, n. 02, p. 96-99, 1985.

IMEA – **Custos de produção do milho safra 2015/2016**. Disponível em:

<<http://www.imea.com.br/site/publicacoes.php?categoria=3&subcategoria=3>>. Acesso em: 17 maio 2016.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. **Normais Climatológicas do Brasil 1961-1990**. Edição revista e ampliada. Brasília, DF, 2009.

LIMA NETO, I.E.; WIEGAND, M.C.; de ARAÚJO J.C. Sediment redistribution due to a dense reservoir network in a large semi-arid Brazilian basin. **Hydrological Sciences Journal**, v. 56, n. 2, p. 319-333, 2011.

LISITA, F.O. **Agricultura familiar**. 2009. Disponível em:

<http://www.embrapa.gov.br/linhas_de_acao/desenvolvimento/agri_familiar/index_html/mostra_documento>. Acesso em: 10 ago. 2015.

LOPES, J.W.B. **Modelagem hidrossedimentológica em meso-bacia no semiárido**. 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola); Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE. 2013.

MALVEIRA, V.T.C.; ARAÚJO, J.C.; GÜNTNER, A. Hydrological impact of a high-density reservoir network in the semiarid north-eastern Brazil. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 17, p. 109-117, 2012.

MAMBA, G.; SENZANJE, A., MHIZHA, A., MUNAMATI, M. Formulation of Water Productivity-Based Allocative Strategy for Multiple-Use Small Reservoirs in Mzingwane Catchment, Zimbabwe. **In: WATERNET/ WARFSA/ GWP SYMPOSIUM**, 8, 2007, Lusaka. Anais..., Zâmbia, 2007.

MAMEDE, G.L. **Reservoir sedimentation in dryland catchments: modelling and management**. 120 f. Tese (Doutorado), Instituto de Geocologia, Universidade de Potsdam, Alemanha. 2007.

MAMEDE, G.L.; ARAÚJO, N.A.M; SCHNEIDER, C.M.; de ARAÚJO, J.C.; HERRMANN H.J. Overspill avalanching in a dense reservoir network. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 109, n. 19, p. 7191-7195, 2012.

MECHERGUI, M. **La petite hydraulique et son impact sur la vie du paysan, les eaux de ruissellement, la conservation en eau et en sol et les ressources en eau vers l'aval dans un bassin versant: cas de deux bassins versants de Siliana et du Kef en Tunisie**. Atelier Électronique. Étude de cas 18, Rome: FAO. 2000.

MEDEIROS, P.H.A.; ARAÚJO, J.C. Temporal variability of rainfall in a semiarid environment in Brazil and its effect on the sedimentological processes. **Journal of Soils Sediments**, v. 14, n. 7, p. 1216-1223, 2014.

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

MOLLE, F. **Marcos históricos e reflexões sobre a açudagem e seu aproveitamento**. Recife: SUDENE, (Série Hidrologia, 30), 1994.

- MOUSINHO, F.E.P. **Variabilidade econômica da irrigação do feijão-caupi no Estado do Piauí**. 103 f. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP, 2005.
- NASCIMENTO, A.T.P. **Análise da disponibilidade hídrica nos pequenos açudes do assentamento 25 de Maio, Madalena-CE**. 65 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Campus Maracanaú, CE, 2015.
- PEREIRA, A.R.; ANGELOCCI, L.R.; SENTELHAS, P.C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Agropecuária, 2002. 478 p.
- PEREIRA, B.S. **Caracterização geométrica de pequenos açudes no semiárido cearense**. 51 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Campus Maracanaú, CE, 2014.
- PETER, S.J.; de ARAÚJO, J.C.; ARAÚJO, N.A.M; HERRMANN, H. Flood avalanches in a semiarid basin with a dense reservoir network. **Journal of Hydrology**, v. 512, p. 408-420, 2014.
- PINHEIRO, E.A.R; METSELAAR, K.; van LIER; Q.J; ARAÚJO, J.C. Importance of soil-water to the Caatinga biome, Brazil. **Ecohydrology**. DOI: 10.1002/eco.1778. 29. February 2016.
- PINHEIRO, L.S. **Proposta de índice de priorização de áreas para saneamento rural: estudo de caso assentamento 25 de Maio**. 110 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – PRODEMA, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.
- SAWUNYAMA, T.; BUSANE, L.B.; CHINODA, G.; TWIKIRIZE, D.; LOVE, D.; SENZANJE, A.; HOKO, Z.; MANZUNGU, E.; MANGEYA, P.; MATURA, N.; MHIZHA, A; SITHOLE, P. An integrated evaluation of a small reservoir and its contribution to improved rural livelihoods: Sibasa dam, Limpopo basin, Zimbabwe. In: SYMPOSIUM OF WARFSA/WATERNET/GWP, 6, 2005. **Anais...**Ezulwini, 2005.
- SILVA, R.A.A. **Análise dos critérios adotados para uso da água de pequenos açudes no semiárido cearense**. 47 f. Monografia (Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Maracanaú-CE. 2015.
- SUASSUNA, J. **A pequena e média açudagem no semi-árido nordestino: uso da água para a produção de alimentos**. 1997.
- SUDENE. **Política das águas**. IN: Estudos de Base do Vale do Jaguaribe. Recife, 1967.
- VERMEIREN, L., JOBLING, G.A. **Irrigação localizada**, In Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 36. Tradução de H.R. Ghey *et al.*, Campina Grande, UFPB, 1997. 184 p.
- VERSTRAETEN, G.; POESEN, J. Variability of dry sediment bulk density between and within retention ponds and its impact on the calculation of sediment yields. **Earth Surf. Processes Landf**. v. 26, p. 375-394, 2001.

VIANA, L.F.G.; PINHO, A.I.M.; ALEXANDRE, D.M.B.; ARAÚJO, J.C. Identificação dos principais usos de pequenos açudes a montante do açude Benguê, Ceará, Brasil. **In:** XL Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola – CONBEA. Cuiabá, MT, 2011.

VIANNA, P.J.R.; AMARAL FILHO, J.; LÓCIO, A.B. **Os recursos hídricos do Ceará:** integração, gestão e potencialidades. Texto para Discussão nº 22, Ipece, 2006.