



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA

GIOVANA CRISTINA SANTOS DE MEDEIROS

**METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DA SECA HIDROLÓGICA
SOB A PERSPECTIVA DA DEMANDA HÍDRICA**

NATAL, RN

2016

GIOVANA CRISTINA SANTOS DE MEDEIROS

**METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DA SECA HIDROLÓGICA
SOB A PERSPECTIVA DA DEMANDA HÍDRICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Sanitária.

Orientadora:

Prof^a. Dr^a. Adelena Gonçalves Maia

Co-orientadora:

Prof^a. Dr^a. Joana Darc Freire de Medeiros

Natal/RN

2016

Catálogo da Publicação na Fonte
Universidade Federal do Rio Grande do Norte - Sistema de Bibliotecas
Biblioteca Central Zila Mamede / Setor de Informação e Referência

Medeiros, Giovana Cristina Santos de.

Metodologia de Avaliação da Seca Hidrológica Sob a Perspectiva da Demanda Hídrica / Giovana Cristina Santos de Medeiros. - Natal, RN, 2016.

78 f. : il.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Adelena Gonçalves Maia.

Coorientadora: Prof.^a Dr.^a Joana Darc Freire de Medeiros.

Dissertação (mestrado) Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária.

1. Seca hidrológica - Dissertação. 2. Demanda hídrica - Dissertação. 3. Semiárido - Dissertação. 4. Recursos hídricos - Dissertação. I. Maia, Adelena Gonçalves. II. Medeiros, Joana Darc Freire de. III. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 556.18

GIOVANA CRISTINA SANTOS DE MEDEIROS

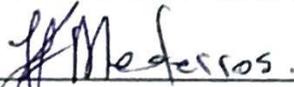
**METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DA SECA HIDROLÓGICA SOB A
PERSPECTIVA DA DEMANDA HÍDRICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Sanitária.

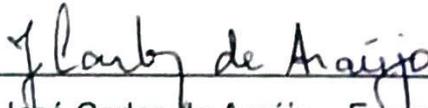
BANCA EXAMINADORA:



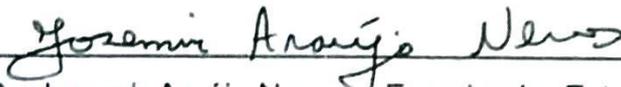
Prof^a. Dr^a. Adelenia Gonçalves Maia – Orientadora
(Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN)



Prof^a. Dr^a. Joana Darc Freire de Medeiros – Co-orientadora
(Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN)



Prof. Dr. José Carlos de Araújo – Examinador Externo
(Universidade Federal do Ceará - UFC)



Dr. Josemir Araújo Neves – Examinador Externo
(Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte – EMPARN)

Natal/RN

2016

À minha amada família pelo apoio incondicional em todos os momentos da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus por todas as oportunidades, pela saúde e pela graça alcançada na conclusão desta etapa.

Aos meus pais, Maria José Fernandes dos Santos e Nilton Alexandre Medeiros, e aos meus irmãos, Marília Cristina, Nilton Júnior e Silvana Cristina por todo amor, carinho, apoio e confiança depositados em mim. Tudo que tenho e tudo que sou é de vocês para sempre.

Aos meus demais familiares, por sempre estarem ao meu lado me apoiando.

À minha orientadora, Prof^a Dr^a Adelená Gonçalves Maia, que sempre soube me orientar com sabedoria, paciência e compreensão. Serei eternamente grata pela confiança e ensinamentos.

À minha co-orientadora, Prof^a Dr^a Joana Darc Freire de Medeiros, pela imprescindível ajuda no desenvolvimento deste trabalho, sempre com muita gentileza e atenção comigo.

Aos avaliadores, Prof. José Carlos de Araújo e Josemir Araújo Neves, por aceitarem o convite para participar da Banca Examinadora e pelas suas valiosas contribuições.

À equipe do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária – PpgES da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, professores, técnicos e secretários, pelo suporte e atenção.

Ao meu namorado, Mário Sérgio Freitas Ferreira Cavalcante, pelo amor compartilhado, pela compreensão e ajuda em todos os momentos desta caminhada, por me proporcionar inúmeros momentos felizes acima de tudo.

Aos meus amigos de graduação e de mestrado, Danielle Alves, Larissa Caroline, Larynne Dantas, Giovana Alves, Silvana Santana, Carlos André, pelos momentos compartilhados de alegria e amizade.

Enfim, a todos que colaboraram, direta ou indiretamente, para o desenvolvimento desta pesquisa. Muito obrigada.

*Sem a curiosidade
que me move,
que me inquieta,
que me insere na
busca,
não aprendo nem
ensino.*

Paulo Freire

RESUMO

A avaliação adequada da seca hidrológica para auxiliar o monitoramento de um possível déficit hídrico pode ser crucial na adoção de medidas de combate à seca, principalmente na região semiárida, onde esse fenômeno é mais recorrente. Porém, as metodologias tradicionais utilizam índices padronizados de seca, que não expressam a sua severidade em termos do volume de déficit e nem consideram a demanda hídrica como uma componente do seu cálculo. Como forma de superar essas desvantagens, este trabalho apresenta uma metodologia de avaliação da seca hidrológica, a qual determina o volume de água abaixo da demanda requerida para diferentes intervalos de tempo, de onde se pode caracterizar a seca em função de sua duração, severidade e magnitude, baseando-se no método do Nível Limite. Para tanto, foram estudadas as secas ocorridas entre 1997 e 2015 em dois reservatórios de diferentes capacidades da bacia hidrográfica do Rio Piranhas-Açu. De forma complementar, foi utilizado o método de avaliação de seca hidrológica desenvolvido por Araújo e Bronstert (2016) a fim de comparar as características dos eventos de seca identificados por diferentes métodos para os mesmos reservatórios. Pelas duas metodologias, os resultados mostraram que o reservatório com maior capacidade de acumulação é mais eficiente e, assim, menos susceptível à seca do que o de menor porte. Foi verificado que a diferença básica entre as duas abordagens é o tempo de análise dos eventos de seca: enquanto pelo método do Nível Limite é possível estudar as secas ocorridas no passado para diagnosticar e fazer um planejamento dos usos dos reservatórios no futuro, o método de Araújo e Bronstert (2016) possibilita a avaliação das condições atuais para prever o início de uma seca hidrológica. Nessa perspectiva, sugere-se que as duas metodologias apresentadas neste trabalho possam ser utilizadas simultaneamente pelos gestores de recursos hídricos, a fim de possibilitar uma análise mais abrangente dos eventos de seca ocorridos na bacia.

Palavras-chave: seca hidrológica; demanda hídrica; semiárido; recursos hídricos.

ABSTRACT

The proper assessment of hydrologic drought to assist the monitoring of a possible water deficit may be crucial in the adoption of anti-drought attitudes, especially in the semiarid region, where this phenomenon is most frequent. However, traditional methodologies use standardized drought indices, which do not express its severity in terms of the volume deficit and neither consider water demand as a component of its calculation. In order to overcome these disadvantages, this work presents evaluation methodology of hydrological drought, which determines the volume of water below its demand. It can be characterized in function of its duration, severity and magnitude, based on Threshold Level Method. For this purpose, the droughts that occurred between 1997 and 2015 were studied in two reservoirs of different capacities of the Piranhas-Açu River basin. Complementarily, it was used the method of valuation of hydrological drought developed by Araújo and Bronstert (2016) to compare the characteristics of drought events identified by different methods to the same reservoirs. For both methods, the results showed that the reservoir with higher storage capacity is more efficient and thus less susceptible to drought than the smaller. It was found that basic difference between the two approaches is the time analysis of drought events: while the Threshold Level Method is possible to study what occurred in the past to diagnose and make a planning of the use of water in future, the Araújo and Bronstert (2016) method enables the assessment of current conditions to anticipate the start of a hydrologic drought. In this perspective, it is suggested that the two methodologies presented in this paper can be used simultaneously by managers of water resources in order to enable a more comprehensive analysis of drought events in the basin.

Keywords: hydrological drought; water demand; semiarid; water resources.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Anomalia de vazão acumulada para (a) Rio Willamette e (b) Rio Columbia, dois dos principais rios do Estado de Oregon, Estados Unidos	30
Figura 2. Severidade da seca dada pelo produto entre a duração e a média da magnitude pelo método do Déficit Total de Água (TWD).	31
Figura 3. Características do déficit hídrico: início da seca (t_i), duração da seca (d_i), déficit de volume ou severidade (vi) e a vazão mínima que ocorre durante a seca ($Q_{min, i}$).....	31
Figura 4. Localização da bacia hidrográfica do rio Piranhas-Açu, nos estados do Rio Grande do Norte e Paraíba	34
Figura 5. Localização do Açude Cruzeta no município de Cruzeta-RN.....	36
Figura 6. Precipitação média mensal em Cruzeta/RN (mm)	38
Figura 7. Evaporação média mensal estimada para o lago do açude Cruzeta/RN (mm).....	38
Figura 8. Vazão média mensal afluyente ao Açude Cruzeta (m^3/s)	39
Figura 9. Vazões médias anuais afluentes ao Açude Cruzeta no período de 1962 a 2009 (m^3/s).....	39
Figura 10. Localização do reservatório Eng. Armando Ribeiro Gonçalves no Estado do Rio Grande do Norte	41
Figura 11. Precipitação média mensal em São Rafael (mm)	42
Figura 12. Vazão média mensal afluyente à barragem ARG (m^3/s).....	43
Figura 13. Vazões médias anuais afluentes à barragem ARG no período de 1962 a 2009 (m^3/s).....	44
Figura 14. Representação das variáveis relacionadas ao agrupamento de secas mutuamente dependentes pelo método IT.....	54

Figura 15. Níveis limites para cada fator e evolução volumétrica mensal do açude Cruzeta no período entre 1997 e 2015.....	55
Figura 16. Níveis limites para cada fator e evolução volumétrica mensal da barragem ARG no período entre 1997 e 2015.	56
Figura 17. Ocorrência de períodos chuvosos e secos ao longo do tempo para cada fator.....	57
Figura 18. Volume do déficit hídrico para os fatores 1,0, 1,5, 2,0, 2,5, 3,0 e 3,5, referente ao açude Cruzeta, no período entre 1997 e 2015.....	58
Figura 19. Volume do déficit hídrico para os fatores 2,5, 3,0, 3,5, 4,0, 4,5 e 5,0, referente à barragem ARG, no período entre 1997 e 2015.....	59
Figura 20. Frequência e duração média dos eventos de seca hidrológica por fator para o açude Cruzeta.....	62
Figura 21. Frequência e duração média dos eventos de seca hidrológica por fator para a barragem ARG.....	62
Figura 22. Severidade e magnitude média dos eventos de seca por fator para os reservatórios (a) e (b) Cruzeta e (c) e (d) ARG.	63
Figura 23. Relação entre as perdas por evaporação e por demanda pelo volume máximo dos reservatórios (a) Cruzeta e (b) ARG, de acordo com os fatores.	64
Figura 24. Déficit hídrico dado pela variável de seca hidrológica X , referente ao açude Cruzeta, no período entre 1997 e 2009.....	66
Figura 25. Déficit hídrico dado pela variável de seca hidrológica X , referente à barragem ARG, no período entre 1997 e 2009.	66
Figura 26. Períodos de seca identificados pelo Método do Nível Limite (a) e através do Método de Araújo e Bronstert (2016) (b), para o açude Cruzeta entre 1997 e 2009, em função da vazão afluente e da taxa do volume pela capacidade de armazenamento.	69

Figura 27. Períodos de seca identificados pelo Método do Nível Limite (a) e através do Método de Araújo e Bronstert (2016) (b), para a barragem ARG entre 1997 e 2009, em função da vazão afluente e da taxa do volume pela capacidade de armazenamento.70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Classificação do Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI).....	25
Tabela 2. Classificação para períodos secos e úmidos	25
Tabela 3. Classificação do Índice de Suprimento de Água na Superfície (SWSI).....	28
Tabela 4. Avaliação dos índices de seca hidrológica	33
Tabela 5. Usos outorgados retirados do Açude Cruzeta e volume anual correspondente.	40
Tabela 6. Volume total anual de retirada por tipo de uso da Barragem Armando Ribeiro Gonçalves	45
Tabela 7. Principais características hidrológicas utilizadas na determinação da seca para $T_R = 5$ anos.	52
Tabela 8. Secas mutuamente dependentes e minoritárias identificadas em cada fator para os reservatórios Cruzeta e ARG.	61
Tabela 9. Duração, severidade e magnitude mínima, máxima e média dos eventos de seca hidrológica para Cruzeta e ARG, no período entre 1997 e 2009.	67
Tabela 10. Severidade e magnitude média dos reservatórios Cruzeta e ARG pelo Método do Nível Limite e pelo Método de Araújo e Bronstert (2016).....	72

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Adutoras ligadas à Barragem Armando Ribeiro Gonçalves	45
Quadro 2. Fatores utilizados para o cálculo do nível limite dos reservatórios Cruzeta e ARG.	49
Quadro 3. Período analisado para cada nível limite de acordo com o fator e o reservatório	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABP	Abastecimento Público
ANA	Agência Nacional de Águas
APICRUZ	Associação dos Irrigantes do Perímetro Irrigado Cruzeta
AQU	Aquicultura e Pesca
ARG	Armando Ribeiro Gonçalves
CAERN	Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte
CAFEC	Precipitação Climatologicamente Apropriada para as Condições Existentes
CSA	<i>Cumulative Streamflow Anomaly</i>
DIBA	Perímetro Irrigado do Baixo Açu
DNOCS	Departamento Nacional de Obras Contra a Seca
EMPARN	Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte
ETP	Evapotranspiração Potencial
IGARN	Instituto de Gestão das Águas do Rio Grande do Norte
INCRA	Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária
IND	Industrial
IRR	Irrigação
IT	<i>Inter-event Time Method</i>
MIN	Mineração
OUT	Outros
PDSI	<i>Palmer Drought Severity Index</i>
PHDI	<i>Palmer Hydrological Drought Index</i>
SEMARH	Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Rio Grande do Norte
SMAP	<i>Soil Moisture Accounting Procedure</i>
SWSI	<i>Surface Water Supply Index</i>
TER	Termoelétrica
TWD	<i>Total Water Deficit</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

ft	fator de tempo
t	tempo
NL	nível limite
Dem	demandas anuais
EVP	volume evaporado
E	média histórica da evaporação mensal do lago
P	média histórica da precipitação mensal
A	área média mensal da bacia hidráulica do reservatório
Vol	volume mensal de armazenamento do reservatório
DH	déficit hídrico
X	variável de avaliação da seca hidrológica
Q_o	vazão de oferta
Q_D	vazão de demanda
Q_{O1}	vazão do rio-reservatório
Q_{O2}	vazão de oferta difusa
Q_{D1}	vazão de demanda concentrada
Q_{D2}	vazão de demanda difusa
Q_R	vazão afluyente ao reservatório
δ	fator <i>on-off</i>
η	eficiência do reservatório
V_0	volume armazenado no primeiro dia do mês t
$N(T_R)$	número de meses de déficit hidrológico por ano, associado ao período de retorno (T_R)
τ	tempo de residência do reservatório
V_{SC}	capacidade de armazenamento do reservatório
\bar{Q}_R	média da vazão afluyente de longo prazo
f	fator de aridez
λ	fator de demanda
Q_{90}	vazão regularizada com 90% de garantia
H_w	precipitação no período úmido anterior à estação seca
\bar{H}_w	precipitação média de longo prazo da estação chuvosa

∇U	gradiente de uso consuntivo
Q_w	demanda mensal para atender todos os usos
t_c	período de um mês entre duas secas mutuamente dependentes
$DS_{agrup.}$	duração de um evento de seca agrupado
d_i	duração do primeiro evento de seca dependente
d_{i+1}	duração do segundo evento de seca dependente
τ_i	período entre duas secas mutuamente dependentes
$SS_{agrup.}$	severidade da seca agrupada
v_i	volume de déficit do primeiro evento de seca dependente
v_{i+1}	volume de déficit do segundo evento de seca dependente
s_i	volume de excesso do evento intermediário

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	20
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1. ÍNDICES DE SECA.....	22
2.2. ÍNDICE DE SECA HIDROLÓGICA DE PALMER (<i>PALMER HYDROLOGIC DROUGHT INDEX - PHDI</i>)	23
2.2.1. Limitações do PHDI e PDSI.....	25
2.3. ÍNDICE DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA EM SUPERFÍCIE (<i>SURFACE WATER SUPPLY INDEX - SWSI</i>).....	27
2.3.1. Limitações do SWSI.....	29
2.4. ANOMALIA DE VAZÃO ACUMULADA (<i>CUMULATIVE STREAMFLOW ANOMALY - CSA</i>).....	29
2.5. DÉFICIT TOTAL DE ÁGUA (<i>TOTAL WATER DEFICIT - TWD</i>)	30
2.6. COMPARAÇÃO ENTRE OS ÍNDICES DE AVALIAÇÃO DA SECA HIDROLÓGICA.	32
3. MATERIAL E MÉTODOS	33
3.1. ÁREA DE ESTUDO	33
3.1.1. Açude Cruzeta	35
3.1.1.1. <i>Clima</i>	37
3.1.1.2. <i>Vazões afluentes ao Açude Cruzeta</i>	38
3.1.1.3. <i>Demandas associadas ao Açude Cruzeta</i>	40
3.1.2. Barragem Armando Ribeiro Gonçalves	41
3.1.2.1. <i>Clima</i>	42
3.1.2.2. <i>Vazões afluentes à Barragem Armando Ribeiro Gonçalves</i>	43
3.1.2.3. <i>Demandas associadas à Barragem Armando Ribeiro Gonçalves</i>	44
3.2. METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DA SECA HIDROLÓGICA	46
3.2.1. Método do Nível Limite	47
3.2.2. Método de avaliação da seca hidrológica de Araújo e Bronstert	50

3.2.3. Características da seca hidrológica	52
3.2.4. Secas mutuamente dependentes e secas minoritárias	53
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
4.1. SECA HIDROLÓGICA ATRAVÉS DO MÉTODO DO NÍVEL LIMITE	55
4.1.1. Características da seca hidrológica	61
4.1.2. Relação entre os níveis limites e a gestão de reservatórios	65
4.2. SECA HIDROLÓGICA ATRAVÉS DO MÉTODO DE ARAÚJO E BRONSTERT (2015)	66
4.2.1. Características da seca hidrológica	67
4.3. ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA SECA HIDROLÓGICA	68
5. CONCLUSÕES	72
REFERÊNCIAS.....	74

1. INTRODUÇÃO

A seca é um fenômeno natural capaz de provocar impactos significativos de caráter socioeconômico, agrícola e ambiental. Ela pode ser percebida de diferentes maneiras em regiões com características climáticas variadas e com diferentes níveis de utilização de água e geralmente está associada à escassez de precipitação, elevada evapotranspiração e/ou demasiada exploração dos recursos hídricos.

Dependendo da escolha das variáveis hidrológicas ou das variáveis de interesse, a seca pode ser caracterizada em diferentes perspectivas, a saber: seca meteorológica, seca hidrológica, seca agrícola e seca socioeconômica (YANG, 2010; WILHITE; GLANTZ, 1987).

A seca hidrológica, objeto desta pesquisa, é o tipo de seca que se caracteriza por um período de não atendimento da demanda, causado por um déficit de precipitação pluviométrica e está associada à redução dos níveis médios de água em reservatórios superficiais e subterrâneos por um determinado tempo. Ela pode ser causada ainda por uma sequência de anos com deficiência no escoamento superficial ou ainda por um mau gerenciamento dos recursos hídricos acumulados nos reservatórios (CAMPOS; STUDART, 2001).

Como forma de detectar, monitorar e avaliar eventos de seca é bastante comum o uso de índices desenvolvidos por vários pesquisadores ao redor do mundo para determinar o início e o fim desse evento, bem como medir a severidade desse fenômeno (BARUA *et al.*, 2011). Os índices de seca geralmente assimilam vários anos de variáveis meteorológicas, por exemplo: precipitação, temperatura do ar, evapotranspiração, escoamento superficial (*runoff*), umidade do solo, entre outras variáveis, que, de forma combinada, possibilitam a identificação do início de um período de seca (FERNANDES *et al.*, 2009).

No caso da seca hidrológica, os índices mais importantes são o Índice de Seca Hidrológica de Palmer (*Palmer Hydrological Drought Index - PHDI*) (PALMER, 1965), o Déficit Total de Água (*Total Water Deficit - TWD*) (DRACUP *et al.*, 1980), o Índice de Abastecimento de Água em Superfície (*Surface Water Supply Index - SWSI*) (SHAFER; DEZMAN, 1982) e Anomalia de Vazão Acumulada (*Cumulative Streamflow Anomaly – CSA*) (KEYANTASH; DRACUP, 2002).

Apesar de existirem diversos índices destinados a quantificar a seca hidrológica, os mais utilizados são o PHDI e o SWSI. No entanto, observa-se que

estes índices possuem diversas limitações e refletem as condições de seca com base apenas em variáveis hidrometeorológicas, sendo incapazes de quantificar as perdas econômicas e sociais (MISHRA; SINGH, 2010).

Sendo assim, os índices de seca devem ser explorados mais profundamente considerando as necessidades do usuário na região e a partir de então serem classificados com base em sua severidade (MISHRA; SINGH, 2010). Um exemplo disso é que se a mesma quantidade de precipitação anual cai em duas bacias hidrográficas, uma com menor população e outra com população superior, a região com maior população será mais susceptível à seca. Porém, quando um índice de seca considera apenas as condições meteorológicas baseado na precipitação, as duas regiões apresentarão o mesmo grau de severidade de seca, mascarando as condições reais daquela bacia. Portanto, a demanda de água de uma região é uma componente que precisa ser incorporada aos índices de seca (MISHRA; SINGH, 2010).

Wilhite e Glantz (1987) também afirmam que o contexto social não deve ser dissociado do estudo da seca, pois, além de estar relacionado à duração, intensidade e extensão geográfica, um evento de seca depende da demanda por água requerida pelas atividades humanas e pela vegetação da região.

O uso de metodologias de avaliação da seca que auxiliem no monitoramento de um possível déficit hídrico pode ser extremamente importante na adoção de medidas de combate à seca, principalmente na região semiárida brasileira, onde esse fenômeno é mais recorrente. Além disso, nota-se que, em geral, nestas regiões as consequências da seca são ainda mais graves, uma vez que a disponibilidade de água já é baixa em condições normais e a demanda frequentemente supera a disponibilidade hídrica (DAI, 2011).

Dessa forma, o desenvolvimento de pesquisas sobre os eventos de seca que levem em consideração as características próprias dessas regiões, bem como a variável relacionada à demanda hídrica, torna-se cada vez mais fundamental para auxiliar a gestão de recursos hídricos das bacias hidrográficas do semiárido.

Nessa perspectiva, a fim de fornecer uma medida de seca que seja mais representativa das condições de déficit hídrico das bacias hidrográficas do semiárido, esta pesquisa tem como objetivo a proposição de uma metodologia de avaliação da seca hidrológica que considere a demanda hídrica como variável.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. ÍNDICES DE SECA

A seca tem sido definida em termos gerais pela comunidade meteorológica internacional como a “ausência prolongada ou deficiência de precipitação”, a “deficiência de precipitação que resulta em escassez hídrica para alguma atividade”, ou “um período anormalmente seco suficientemente prolongado sem precipitação capaz de provocar um grave desequilíbrio hidrológico” (World Meteorological Organization, 1992; American Meteorological Society, 1997).

O método mais simples para monitorar condições de seca é através do uso de índices apropriados que permitam avaliar o grau de severidade da seca e o seu tempo de duração. Entretanto, a discordância que existe sobre a definição de seca torna impossível conceber um índice de seca universal (HEIM, 2002).

A Sociedade Americana de Meteorologia (1997) sugere que os processos de oferta e demanda em escala temporal e espacial sejam os processos básicos que devem ser incluídos em uma definição objetiva de seca e, conseqüentemente, na derivação de um índice de seca, independente do tipo.

Friedman (1957) *apud* Heim (2002) acrescenta ainda cinco critérios básicos que qualquer índice de seca deve atender para ser utilizado no monitoramento da seca:

- i) A escala de tempo de análise deve ser apropriada ao estudo;
- ii) O índice deve ser uma medida quantitativa de condições de seca de longa duração;
- iii) O índice deve ser aplicável ao problema em estudo;
- iv) Uma série histórica longa e precisa de valores do índice deve estar disponível para análise e,
- v) O índice deve ser capaz de ser calculado próximo ao tempo real.

Uma abordagem mais detalhada sobre os índices de seca hidrológica mais conhecidos na literatura é dada a seguir.

2.2. ÍNDICE DE SECA HIDROLÓGICA DE PALMER (*PALMER HYDROLOGIC DROUGHT INDEX - PHDI*)

Vários índices de seca foram desenvolvidos para caracterizar a seca hidrológica ao longo dos anos (DRACUP *et al.*, 1980; TATE; GUSTARD, 2000; HEIM, 2002; TALLAKSEN; VAN LANEN, 2004). O Índice de Severidade de Seca de Palmer (*Palmer Drought Severity Index – PDSI*) (PALMER, 1965) é provavelmente o índice de seca mais amplamente utilizado nos Estados Unidos (KEYANTASH; DRACUP, 2002). Embora seja reconhecido como um índice de seca meteorológica, o PDSI leva em consideração a precipitação, evapotranspiração e as condições de umidade do solo, as quais são variáveis determinantes da seca hidrológica (ALLEY, 1984, 1985; KARL *et al.*, 1987).

Desde sua concepção, algumas versões modificadas do PDSI foram elaboradas. Karl (1986), por exemplo, descreveu a versão conhecida como Índice de Seca Hidrológica de Palmer (PHDI), utilizado para monitorar o abastecimento de água. O PHDI é muito parecido com o PDSI, com a diferença de que o primeiro tem um critério mais rigoroso para estabelecer o fim da seca ou de um período úmido, o que resulta em um índice de recuperação do estado de seca para o estado normal mais lento do que o PDSI (KARL *et al.*, 1987; KEYANTASH; DRACUP, 2002). Em outras palavras, o PDSI retorna abruptamente para níveis próximos do normal durante o primeiro mês em uma sequência de meses com umidade suficiente próximo ao fim da seca, enquanto o PHDI é geralmente mais gradual em seu retorno aos níveis próximos do normal (KARL *et al.*, 1987).

Ainda de acordo com Karl *et al.* (1987), as mudanças do PHDI para um novo estágio de seca ocorrem somente quando a umidade necessária associada com a recarga, a demanda e a vazão voltam ao normal ou próximo do normal, isto é, o último mês em uma sequência de meses com umidade suficiente para determinar o final da seca. Este retardamento é apropriado para a avaliação da seca hidrológica, visto que esse é um fenômeno que se desenvolve mais lentamente em relação à seca meteorológica (KEYANTASH; DRACUP, 2002).

Para compreender a origem do PHDI, faz-se necessário analisar primeiro o desenvolvimento do índice PDSI. Palmer formulou o PDSI com base no balanço hídrico climático proposto por Thornthwaite e Mather (1955). Ele utilizou um modelo de duas camadas de solo para calcular a umidade e fez algumas premissas relativas

à capacidade de campo e transferência de umidade entre as camadas: a camada superior de solo tem uma capacidade de campo de 1 (uma) polegada, equivalente a 2,54 cm; a umidade não é transferida para a camada inferior até que a camada superior esteja saturada; o escoamento superficial não ocorre até que as duas camadas de solo estejam saturadas e, por fim, toda a precipitação que ocorre em um mês é utilizada nesse mesmo mês para suprir a evapotranspiração e a demanda de umidade do solo ou então ser perdida como escoamento (HEIM, 2002).

Uma ressalva quanto às hipóteses adotadas por Palmer relaciona-se ao fato de que o valor da capacidade de campo é adotado com base nas características físicas locais e que, portanto, varia de acordo com a região estudada (YANG, 2010).

O cálculo do PDSI é feito a partir de um algoritmo sequencial de balanço hídrico, originalmente realizado mensalmente, a partir do qual os conceitos básicos do índice são derivados: a precipitação CAFEC (precipitação climatologicamente apropriada para as condições existentes) e o desvio de umidade em relação às condições normais (d). Os dados de entrada são a temperatura média do ar, a partir da qual a evapotranspiração potencial (ETP) é calculada usando a equação de Thornthwaite, a precipitação e a capacidade de armazenamento de água no solo, ou seja, a capacidade de campo.

A expressão final para o índice de severidade de seca de Palmer indicado pelo termo $PDSI_i$ é uma combinação do índice Z_i do corrente mês e o valor do PDSI do mês anterior (Equação 1).

$$PDSI_i = 0,897 * PDSI_{i-1} + Z_i/3 \quad \text{Eq. 1}$$

O índice de anomalia de umidade (Z) é um índice intermediário produzido pelo algoritmo do PDSI, resultado da normalização dos desvios de umidade (d) através de um fator de ponderação denominado Característica Climática (K), que permite que Z seja comparado entre diferentes regiões e meses (KARL, 1986; QUIRING; PAPAKRYIAKOU, 2003; BLAIN; BRUNINI, 2007).

Palmer (1965) considerou 11 categorias de classificação de eventos de seca para o índice PDSI, conforme demonstrado na Tabela 1.

Tabela 1. Classificação do Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI)

PDSI	CLASSIFICAÇÃO
≤ -4,00	Extremamente seco
-3,00 a -3,99	Muito seco
-2,00 a -2,99	Moderadamente seco
-1,00 a -1,99	Seca suave
-0,50 a -0,99	Período seco incipiente
0,49 a -0,49	Caso normal
0,50 a 0,99	Período úmido incipiente
1,00 a 1,99	Ligeiramente úmido
2,00 a 2,99	Moderadamente úmido
3,00 a 3,99	Muito úmido
≥ 4,00	Extremamente úmido

Fonte: Palmer (1965)

Em seu trabalho, Karl (1986) atribuiu uma classificação parecida para o índice PHDI (Tabela 2). Nela, as onze categorias definidas inicialmente por Palmer foram resumidas em sete, que também variam de extremamente seco (menor do que 4) a extremamente úmido (maior do que 4) e podem ser aplicadas tanto para o PDSI quanto para o PHDI.

Tabela 2. Classificação para períodos secos e úmidos

PDSI ou PHDI	CLASSIFICAÇÃO
≤ -4,00	Extremamente seco
-3,00 a -3,99	Seca severa
-1,50 a -2,99	Ligeiro a moderadamente seco
-1,49 a 1,49	Próximo ao normal
1,50 a 2,99	Ligeiro a moderadamente úmido
3,00 a 3,99	Umidade severa
≥ 4,00	Extremamente úmido

Fonte: Karl (1986)

2.2.1. Limitações do PHDI e PDSI

Os índices de Palmer representam um marco no desenvolvimento de índices de seca e são amplamente utilizados para o monitoramento da seca nos Estados Unidos. Entretanto, o PDSI apresenta algumas limitações importantes referenciadas por diversos autores (ALLEY, 1984; KARL; KNIGHT, 1985; HEDDINGAUS; SABOL, 1991; GUTTMAN, 1998; HAYES *et al.*, 1999; NARASIMHAN; SRINIVASAN, 2005).

Uma das primeiras críticas ao PDSI foi formulada por Alley (1984) e relaciona-se ao modelo de balanço hídrico adotado no cálculo do índice. Para ele, a equação de Thornthwaite resulta em uma evapotranspiração generalizada, já que recorre apenas à temperatura média mensal e à latitude, e que outros métodos mais aplicados poderiam ter sido empregados na avaliação deste parâmetro. Jensen *et al.* (1990) avaliaram e classificaram diferentes métodos para estimar a evapotranspiração e concluíram que o método de Thornthwaite apresentou o desempenho mais baixo entre eles. Em seu próprio trabalho, Palmer sugeriu a substituição da equação de Thornthwaite para um método mais adequado, recaindo, porém, na limitação dos dados disponíveis (PALMER, 1965).

Ainda de acordo com Alley (1984), outra consideração acerca do índice de Palmer refere-se à atribuição de uma polegada para o valor da capacidade de campo do solo de forma arbitrária, afetando a taxa de evapotranspiração potencial, uma vez que esta ocorre apenas enquanto houver água disponível na camada superficial.

Além disso, o método assume que o escoamento superficial não ocorre até que o solo atinja a máxima capacidade de retenção para a água, fato contestado por Rushton e Ward (1979). Eles encontraram que essa suposição conduz a uma subestimativa do escoamento em aproximadamente 25% quando comparado com os modelos diários de balanço hídrico. Isso porque, na realidade, o escoamento superficial depende do tipo de solo, do uso da terra e das práticas de gestão (NARASIMHAN; SRINIVASAN, 2005). Entretanto, Palmer (1965) não leva estes fatores em consideração na estimativa do escoamento superficial.

Outra deficiência do PDSI apontada por Alley (1984) como um dos principais problemas desse índice é a designação arbitrária das classes de severidade de seca e das regras que estabelecem o início e o fim de uma seca.

Ademais, ao tentar normalizar seu índice para que ele pudesse ser comparado entre diferentes regiões e períodos, Palmer utilizou um fator de ponderação (característica climática K) que foi baseado em um número limitado de observações de nove divisões climáticas nos Estados Unidos. Isso faz com que o PDSI não seja espacialmente comparável entre todo território americano (ALLEY, 1984; GUTTMAN *et al.*, 1992; GUTTMAN, 1998) e nem diretamente comparável entre os meses do ano (ALLEY, 1984). Heddinghaus e Sabol (1991) acrescentam

ainda que o fator de ponderação definido por Palmer é fracamente justificável em termos físicos e estatísticos.

2.3. ÍNDICE DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA EM SUPERFÍCIE (*SURFACE WATER SUPPLY INDEX - SWSI*)

O Índice de Abastecimento de Água em Superfície (SWSI) foi desenvolvido por Shafer e Dezman no início da década 1980 para fornecer um indicador mais adequado para a disponibilidade de água no oeste dos Estados Unidos do que o índice de seca de Palmer (GAREN, 1992).

O objetivo do índice SWSI é associar características hidrológicas e climatológicas em um único valor de índice a fim de monitorar alterações nos reservatórios superficiais de abastecimento de água (SHAFER; DEZMAN, 1982). Ele é calculado com base na probabilidade mensal de não-excedência dos registros históricos disponíveis do nível de armazenamento do reservatório, vazão, acúmulo de neve e precipitação, sendo essas as variáveis necessárias para o cálculo do SWSI (MISHRA; SINGH, 2010). Por ter sido desenvolvido em uma área montanhosa dos Estados Unidos, a neve é uma componente que exerce um papel significativo dentro do índice. Porém, durante os meses de verão, a neve acumulada é substituída pelo fluxo de água dos rios, córregos e lagos (*streamflow*) dentro da equação do SWSI (SHAFER; DEZMAN, 1982).

Uma das vantagens do SWSI é que ele fornece uma medida representativa da disponibilidade de água superficial para toda a bacia hidrográfica (BARUA *et al.*, 2011). Na determinação do SWSI, dados mensais de precipitação, nível do reservatório, fluxo em superfície/bloco de neve são coletados e somados para todas as estações de medição sobre a bacia.

Cada componente é normalizada usando uma análise de frequência acumulada de uma série de dados históricos. A probabilidade de não excesso é avaliada para cada componente com base na análise de frequência. Isso permite que comparações das probabilidades sejam feitas entre as componentes. Cada componente tem um peso atribuído, dependendo de sua contribuição típica para a água em superfície dentro dessa bacia. Esses componentes ponderados são somados para determinar um valor de SWSI representando a bacia inteira (FERNANDES *et al.*, 2009). A equação 2 representa o índice SWSI.

$$SWSI = \frac{aP_{neve} + bP_{prec} + cP_{strm} + dP_{reserv} - 50}{12} \quad \text{Eq. 2}$$

Onde:

a, b, c, d = pesos para neve, precipitação, fluxo em superfície e armazenamento de reservatório, respectivamente.

P_i = probabilidade (%) de não excesso para cada um destes quatro componentes do balanço hídrico.

As operações de subtração por 50 e divisão por 12 são requeridas para fazer os valores de SWSI terem uma escala similar ao índice PDSI (GAREN, 1992). Para cada mês, os valores de cada componente medido em todas as estações (ou reservatórios) são somados. Cada soma é normalizada e sua probabilidade de não excesso é determinada.

Esse índice é relativamente fácil de calcular e fornece uma medida representativa da disponibilidade de água de uma bacia hidrográfica ou de uma região selecionada. Entretanto, é improvável que possa ser usado com sucesso para grandes regiões com significativa variabilidade hidrológica espacial. Os pesos podem diferir substancialmente de uma região para outra (DOESKEN *et al.*, 1991). Se as medidas em qualquer estação de coleta de dados forem interrompidas, ou as observações em uma ou mais componentes também forem interrompidas, uma nova distribuição de frequência precisará ser calculada. Similarmente, novas represas ou desvios na bacia requererão modificações dos pesos para cada componente do balanço hídrico.

Similar ao índice de Palmer, o SWSI é centrado em zero e tem uma escala entre -4,0 e 4,0 (Tabela 3).

Tabela 3. Classificação do Índice de Suprimento de Água na Superfície (SWSI)

SWSI	Classificação
-4,00 a -3,00	Extremamente seco
-2,99 a -2,00	Seca moderada
-1,99 a -1,00	Seca inicial
-0,99 a 0,99	Normal
1,00 a 1,99	Suprimento acima do normal
2,00 a 2,99	Suprimento moderado
3,00 a 4,00	Suprimento abundante

Fonte: Shafer e Dezman (1982)

2.3.1. Limitações do SWSI

O SWSI de Shafer e Dezman (1982) foi desenvolvido como um índice de seca hidrológica considerando algumas variáveis hidrometeorológicas como precipitação, nível do reservatório, fluxo em superfície ou acúmulo de neve para mensurar a quantidade de água superficial disponível. No entanto, o SWSI não considera outras componentes importantes do ciclo hidrológico que afetam as secas, como a umidade do solo e a evapotranspiração potencial (BARUA *et al.*, 2011).

Embora esse índice seja muito útil para avaliar a situação de abastecimento de água superficial, o SWSI apresenta ainda outras limitações: há uma falta de consenso sobre a definição de abastecimento de água de superfície; os pesos dos fatores variam de estado para estado e, em alguns casos, de mês para mês, devido a diferenças na variabilidade hidroclimática resultando em SWSIs com diferentes propriedades estatísticas (HEIM, 2002; DOESKEN *et al.*, 1991).

Além disso, o SWSI é mais indicado para as regiões onde a neve contribui significativamente para a vazão anual e para as reservas superficiais de água (KEYANTASH; DRACUP, 2002; TABARI *et al.*, 2013).

2.4. ANOMALIA DE VAZÃO ACUMULADA (*CUMULATIVE STREAMFLOW ANOMALY - CSA*)

A anomalia de vazão acumulada (*Cumulative Streamflow Anomaly – CSA*) representa o quanto a vazão acumulada está distante das condições médias, mostrando as tendências em longo prazo da disponibilidade de água. Dessa forma, os desvios acentuados do valor médio indicarão os períodos de seca (Figura 1).

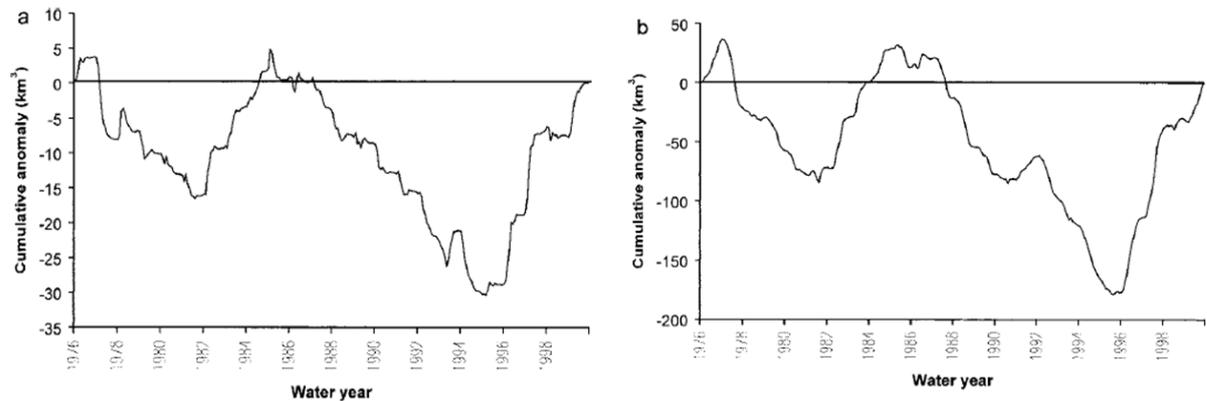


Figura 1. Anomalia de vazão acumulada para (a) Rio Willamette e (b) Rio Columbia, dois dos principais rios do Estado de Oregon, Estados Unidos. Na figura, o valor médio de longo prazo está centrado em zero. Fonte: Keyantash e Dracup (2002)

Apesar de ter apresentado um melhor desempenho nos critérios avaliativos propostos por Keyantash e Dracup (2002) em relação aos índices de seca hidrológica PHDI e SWSI, a anomalia de vazão acumulada ainda é um método pouco explorado na quantificação da seca hidrológica.

2.5. DÉFICIT TOTAL DE ÁGUA (*TOTAL WATER DEFICIT - TWD*)

A análise do Déficit Total de Água (*Total Water Deficit – TWD*) consiste em uma avaliação tradicional da seca hidrológica, que fornece a severidade da seca com base na duração e na magnitude desse fenômeno.

A duração (D) da seca hidrológica pode ser definida como o tempo durante o qual uma variável hidrológica (ou uma combinação de variáveis) está consistentemente abaixo de um nível limite, enquanto a magnitude (M) é a média da vazão que está abaixo desse limite durante o período de seca (LEBLANC *et al.*, 2009). Dessa forma, a severidade da seca (S) é o resultado do produto entre a duração e a magnitude (Figura 2) (DRACUP *et al.*, 1980).

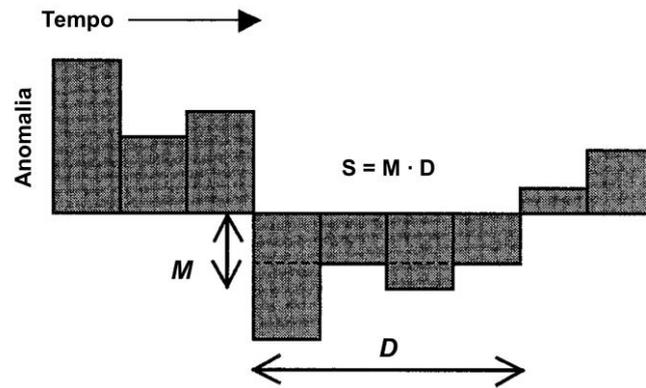


Figura 2. Severidade da seca dada pelo produto entre a duração e a média da magnitude pelo método do Déficit Total de Água (TWD). Fonte: adaptado de Keyantash e Dracup (2002)

Uma vez que o nível limite é avaliado, o déficit total de armazenamento de água abaixo deste limite pode ser utilizado como uma medida da severidade de seca (Figura 3) (LEBLANC, 2009).

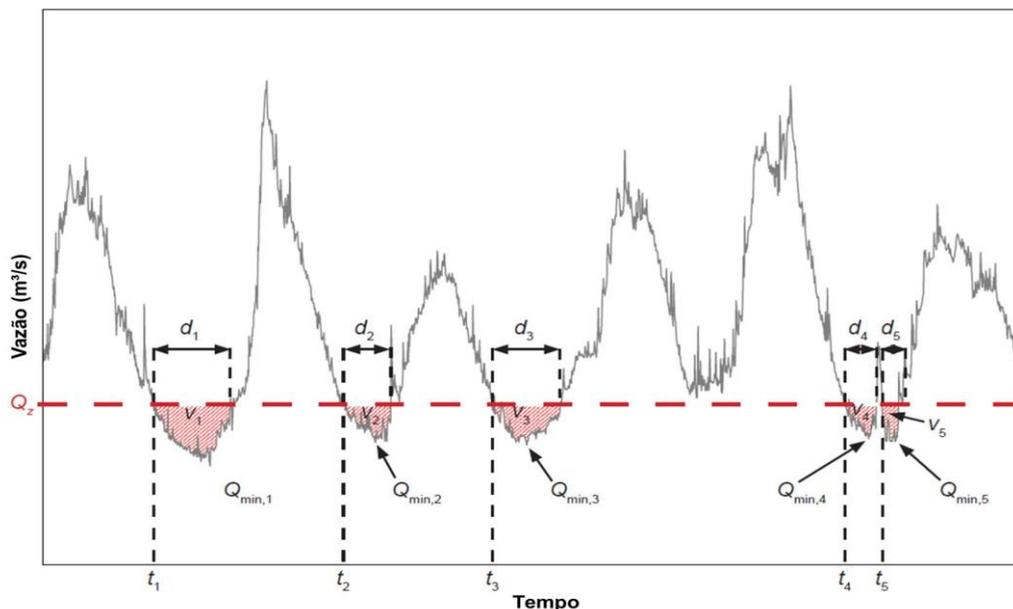


Figura 3. Características do déficit hídrico: início da seca (t_i), duração da seca (d_i), déficit de volume ou severidade (v_i) e a vazão mínima que ocorre durante a seca ($Q_{min,i}$). Fonte: adaptado de FLEIG *et al.*, 2006.

A avaliação do nível limite teve origem na Teoria de *Runs*, introduzida por Yevjevich (1967), que definiu a seca como sendo o período em que o abastecimento de água não é capaz de atender às demandas hídricas. Tanto o volume de abastecimento quanto a demanda são expressos em séries temporais e o evento de seca é definido como uma sequência ininterrupta de valores negativos de fornecimento de água menos demanda (FLEIG *et al.*, 2006).

O valor da demanda pode ser entendido como o nível limite e, a partir disso, a seca seria determinada pelo período em que a vazão ficou abaixo da demanda (YEVJEVICH, 1983). Esse nível limite pode ser um valor fixo ou variável ao longo do ano a fim de refletir, por exemplo, diferentes demandas de água sazonais. No entanto, nem todos os períodos de baixa vazão comparados com um nível limite variável podem ser considerados como seca (FLEIG *et al.*, 2006). Nesses casos, Stahl (2001) e Hisdal *et al.* (2004) usaram os termos deficiência ou anomalia de vazão para definir períodos de déficit hídrico (períodos de vazão abaixo do nível limite variável).

2.6. COMPARAÇÃO ENTRE OS ÍNDICES DE AVALIAÇÃO DA SECA HIDROLÓGICA

Keyantash e Dracup (2002) fizeram uma avaliação dos quatro índices de seca apresentados anteriormente considerando seis critérios estabelecidos com base nas propriedades que um índice ideal deveria possuir: robustez, flexibilidade, transparência, sofisticação, extensibilidade e dimensionalidade.

A robustez está associada à utilidade de um índice sobre uma variedade de condições físicas. A flexibilidade representa os aspectos práticos do índice de seca relacionados ao método de cálculo e a base de dados necessários. A transparência considera a clareza do objetivo e a razão por trás de cada índice de seca. A sofisticação se opõe em parte à transparência, mas deve ser incluída por causa dos méritos conceituais de sua abordagem. Assim como a flexibilidade, o nível de sofisticação deve ser suportado pela qualidade dos dados disponíveis. A extensibilidade pode ser interpretada como o grau em que o índice pode ser estendido ao longo do tempo para alternar cenários de seca. E, por último, a dimensionalidade refere-se à ligação do índice com o mundo físico a fim de permitir a comparação de características de diferentes locais e em diferentes períodos (KEYANTASH; DRACUP, 2002).

A cada um desses critérios, os autores atribuíram um peso associado conforme seu grau de importância na definição de um índice de seca, sendo o maior deles dado à robustez. As pontuações, que variaram de 1 a 5, foram multiplicadas

pelos respectivos pesos e as somas das pontuações ponderadas são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4. Avaliação dos índices de seca hidrológica

CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO	PESO	PONTUAÇÃO (1 – 5)			
		PHDI	SWSI	CSA	TWD
Robustez	8	2	4	2	3
Flexibilidade	6	1	1	4	4
Transparência	5	1	2	4	5
Sofisticação	5	4	3	2	2
Extensibilidade	3	3	2	3	3
Dimensionalidade	2	1	3	5	5
TOTAL	-	58	75	89	102

Fonte: adaptado de Keyantash e Dracup (2002)

Keyantash e Dracup (2002) mostraram que, para a seca hidrológica, o déficit total de água (TWD) foi o índice que apresentou melhor resultado quando comparado aos demais; e os dois índices utilizados mais tradicionalmente na avaliação da seca hidrológica (PHDI e SWSI) ficaram longe da máxima pontuação ponderada possível (145 pontos).

Diante disso, a metodologia de avaliação da seca hidrológica proposta neste trabalho foi desenvolvida com base na concepção do método do Déficit Total de Água (TWD), o qual é derivado da Teoria de Runs (mesma base conceitual do Método do Nível Limite).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. ÁREA DE ESTUDO

A bacia hidrográfica do Rio Piranhas-Açu localizada nos Estados do Rio Grande do Norte e da Paraíba está totalmente inserida na região semiárida do Nordeste brasileiro, com área total de 43.580 km² (ANA, 2015). Possui 147 municípios, dos quais 47 pertencem ao Rio Grande do Norte e 100 à Paraíba e conta com uma população total aproximada de 1,3 milhão de habitantes (ANA, 2013) (Figura 4).

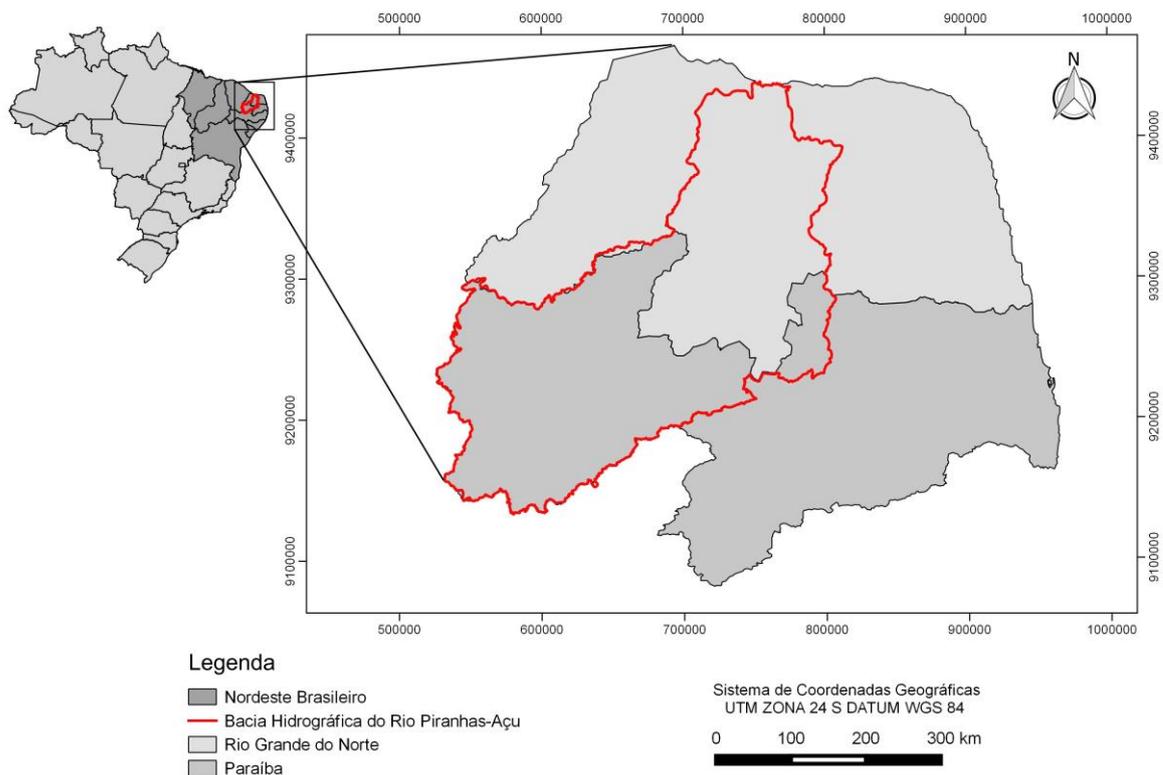


Figura 4. Localização da bacia hidrográfica do rio Piranhas-Açu, nos estados do Rio Grande do Norte e Paraíba. Fonte: Elaborado pela autora.

A região apresenta extrema irregularidade temporal-espacial do regime de chuvas, com médias pluviométricas anuais menores do que 800 mm concentradas entre os meses de fevereiro e maio (ARAÚJO, 2013). Essa variabilidade da precipitação associada com outras características adversas, como geologia cristalina, solos rasos com rochas aflorantes e altas taxas de evaporação, fazem com que as secas marquem bastante a região favorecendo a ocorrência de períodos cíclicos de estiagem (ANA, 2013).

Dadas essas condições climáticas naturais, a construção de reservatórios para acumulação de água foi fundamental para reduzir a vulnerabilidade das áreas submetidas à escassez e irregularidade das precipitações pluviométricas. Somente na bacia Piranhas-Açu, estima-se que haja mais de 2.400 espelhos d'água artificiais com área superficial igual ou superior a 5 ha (SERHID, 2006). Desse total, os que estão presentes na porção potiguar da bacia representam aproximadamente 70% de todos os açudes do Estado (SERHID, 2006).

As principais fontes hídricas responsáveis pelo atendimento das demandas de água, especialmente para abastecimento humano, animal e irrigação, são os reservatórios estratégicos que possuem capacidade de acumulação próxima ou

superior a 10 hm³. Dentre eles, estão o Açude Cruzeta e a Barragem Armando Ribeiro Gonçalves (ARG), dois reservatórios artificiais, situados dentro da bacia Piranhas-Açu, que serão objetos deste estudo.

O Açude Cruzeta, com capacidade atual de acumular 23,54 hm³, foi escolhido por este manancial ser um reservatório de uso múltiplo, sendo utilizado para abastecimento público da cidade de Cruzeta, além de atender o perímetro irrigado (localizado à jusante da bacia do reservatório), e as captações para irrigação de pequenas áreas de culturas de vazantes e a pesca (MELO, 2002).

A barragem ARG, por sua vez, foi escolhida por ser o reservatório mais importante do Estado com 2.400 hm³ de água e 80,4% da capacidade de acumulação da parte potiguar da bacia Piranhas-Açu. Ele é responsável pela perenização do rio a jusante, onde se desenvolvem diversos usos da água, com destaque para o abastecimento humano e a irrigação, além de ser responsável pelo atendimento de demandas de água externas, que estão associadas a bacias adjacentes (ANA, 2015).

Além disso, esses reservatórios de portes diferentes foram escolhidos no intuito de analisar a adequação das metodologias utilizando reservatórios com capacidades de acumulação distintas.

3.1.1. Açude Cruzeta

O Açude Cruzeta teve seu projeto desenvolvido em 1910 pelo Departamento Nacional de Obras Contra a Seca (DNOCS) e foi concluído em 1929, com capacidade máxima de armazenamento de 35 hm³, para regularizar vazões do rio São José, na bacia hidrográfica do rio Piranhas-Açu, na cidade de Cruzeta (SERHID, 2006) (Figura 5).

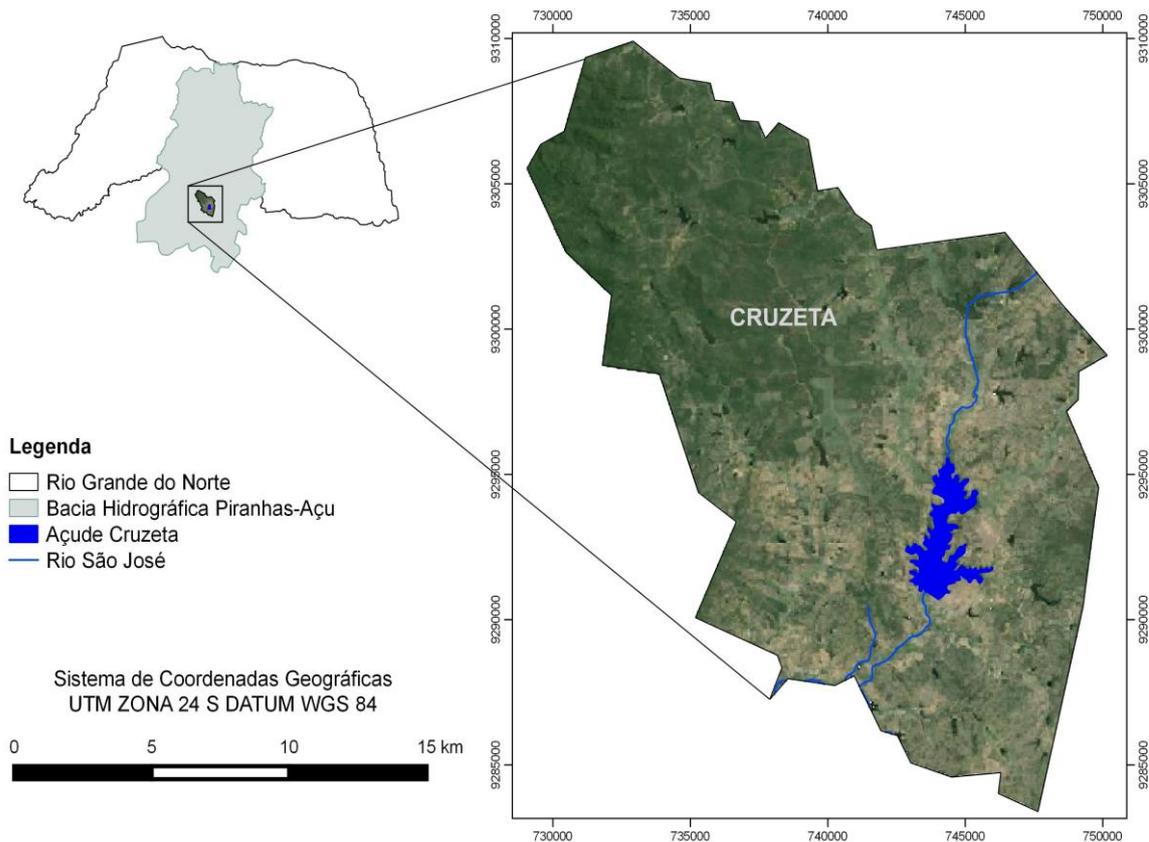


Figura 5. Localização do Açude Cruzeta no município de Cruzeta-RN. Fonte: Elaborado pela autora.

Construído com o objetivo de promover a convivência do homem com a seca, o açude destina-se ao abastecimento humano da cidade e de comunidades rurais, agricultura irrigada do perímetro administrado pelo DNOCS e à exploração de pequenas culturas a jusante e a montante (SERHID, 2006).

O açude Cruzeta tem o seu barramento localizado no ponto de coordenadas geográficas dadas pela Latitude 9.291.070 m S e Longitude 743.311 m E. A barragem tem 880,00 m de extensão, medido pelo coroamento, construída em solo compactado do tipo seção homogênea, com altura máxima de 15,00 m.

A partir da nova batimetria realizada no ano de 2010 pelo Instituto de Gestão das Águas do Rio Grande do Norte (IGARN) em conjunto com a Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Rio Grande do Norte (SEMARH), verificou-se que a área da bacia hidráulica é de 616,11 ha, a capacidade máxima do reservatório é de 23.545.745,33 m³ e o volume da reserva intangível (volume morto) é de 1.179.186,00 m³ (SEMARH, 2014).

Por ser um dos reservatórios estratégicos da bacia, a SEMARH realiza o monitoramento constante do açude Cruzeta, onde são registrados os dados diários de cota, área e volume desde 1997, o que tornou possível a obtenção dos dados necessários para o desenvolvimento das metodologias.

3.1.1.1. *Clima*

O clima da região é predominantemente do tipo *BSw'h'*, da classificação climática de Köppen, caracterizado como muito quente e semiárido, tipo estepe, com a evaporação sempre maior que a precipitação com breves períodos sazonais (BRASIL, 2007).

O regime de chuvas observado na bacia hidrográfica do Açude Cruzeta é do tipo tropical, com a estação de chuvas ocorrendo de janeiro a junho e valores máximos nos meses de março e abril (Figura 6). Neste trabalho, foram consideradas as precipitações médias mensais do posto de Cruzeta nos períodos de 1921 a 1985 e 1991 a 2015, disponibilizados pela Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte (EMPARN). A precipitação média anual climatológica no posto pluviométrico de Cruzeta é de 591,6 mm.

A evaporação na bacia do açude Cruzeta atinge valores máximos nos meses de setembro a dezembro, período em que as precipitações são escassas e os valores mínimos de evaporação ocorrem exatamente no período chuvoso que contempla os meses de fevereiro a junho. Os dados de evaporação utilizados neste trabalho foram retirados do Plano Estadual de Recursos Hídricos do Rio Grande do Norte (SERHID, 1998).

A evaporação no lago foi avaliada a partir da evaporação em tanque classe "A" multiplicada pelo coeficiente do tanque igual a 0,7 (Figura 7). A evaporação média anual estimada para a área superficial do açude Cruzeta é de 2326,6 mm/ano, valor característico da região semiárida brasileira.

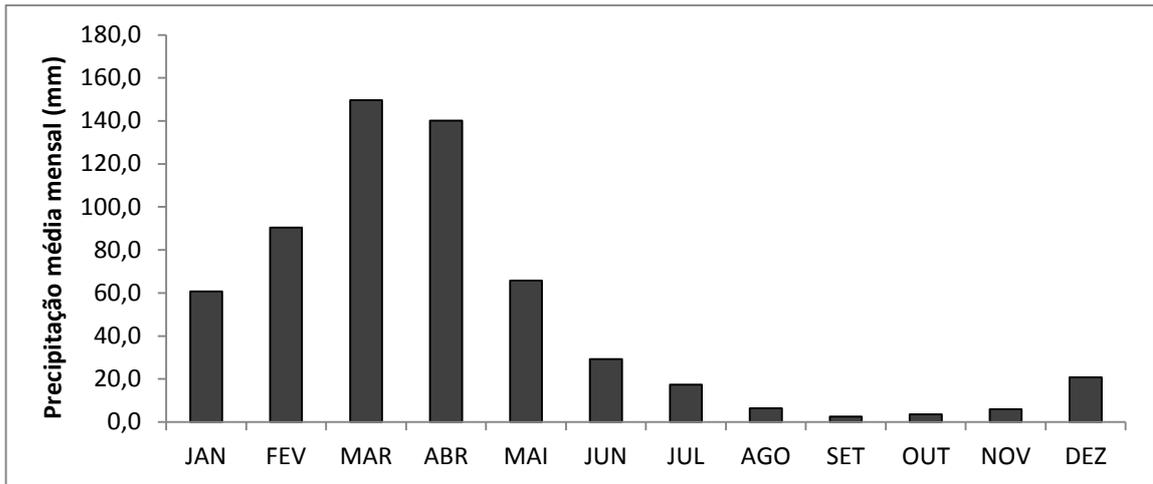


Figura 6. Precipitação média mensal em Cruzeta/RN (mm). Fonte: EMPARN

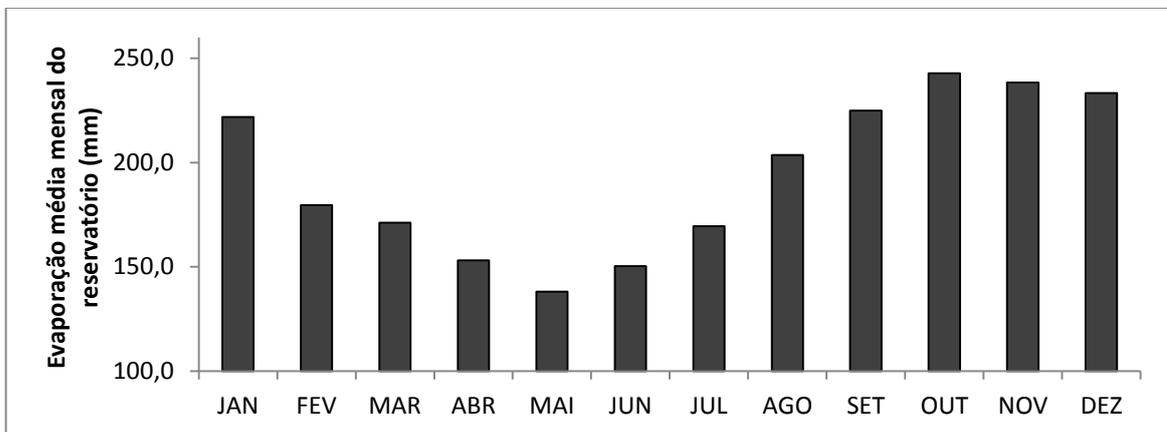


Figura 7. Evaporação média mensal estimada para o lago do açude Cruzeta/RN (mm). Fonte: SERHID, 1998

Em escala anual, a insolação na região se situa em torno de 2.893 horas, sendo o período chuvoso com menor insolação devido à presença de nebulosidade (ARAÚJO, 2007). A temperatura média é de 27 °C, com valores máximos ocorrendo nos meses de setembro a janeiro e as menores temperaturas são verificadas no meio do ano.

3.1.1.2. Vazões afluentes ao Açude Cruzeta

A série de vazões afluentes utilizada no presente trabalho foi obtida do Plano de Recursos Hídricos da Bacia Piranhas-Açu em elaboração (ANA, 2013), que empregou o modelo chuva-vazão *Soil Moisture Accounting Procedure* – SMAP (LOPES *et al.*, 1981, 1982), para geração, em base mensal, das vazões afluentes ao reservatório Cruzeta para o período de 1962 a 2009 (48 anos).

O trimestre de maiores vazões afluentes ao açude Cruzeta é março, abril e maio, sendo abril o mês de maior vazão média mensal, com 4,51 m³/s; o trimestre de menores vazões médias mensais é setembro, outubro e novembro, com vazões nulas neste período (Figura 8).

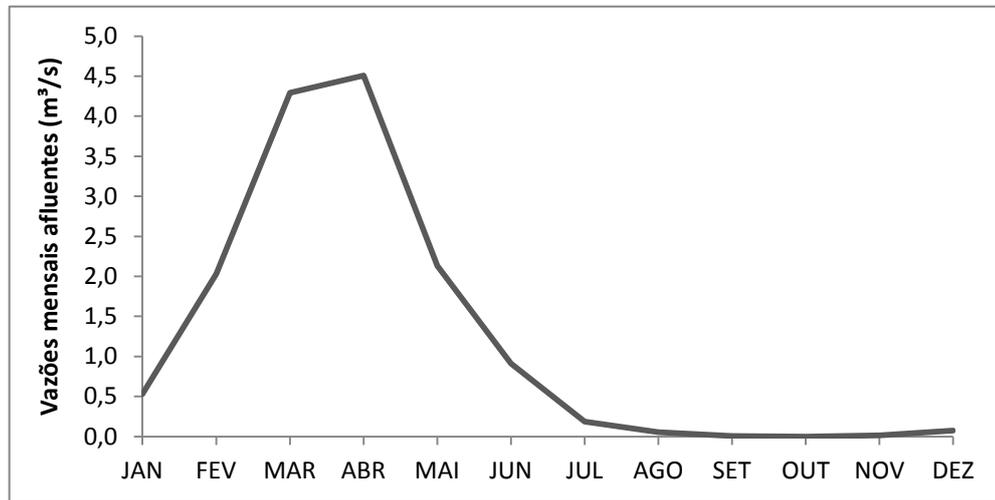


Figura 8. Vazão média mensal afluyente ao Açude Cruzeta (m³/s). Fonte: ANA, 2013

A Figura 9 mostra a distribuição anual das vazões afluentes ao açude Cruzeta no período de 1962 a 2009, cuja média corresponde a 1,23 m³/s ou 38,74 hm³/ano.

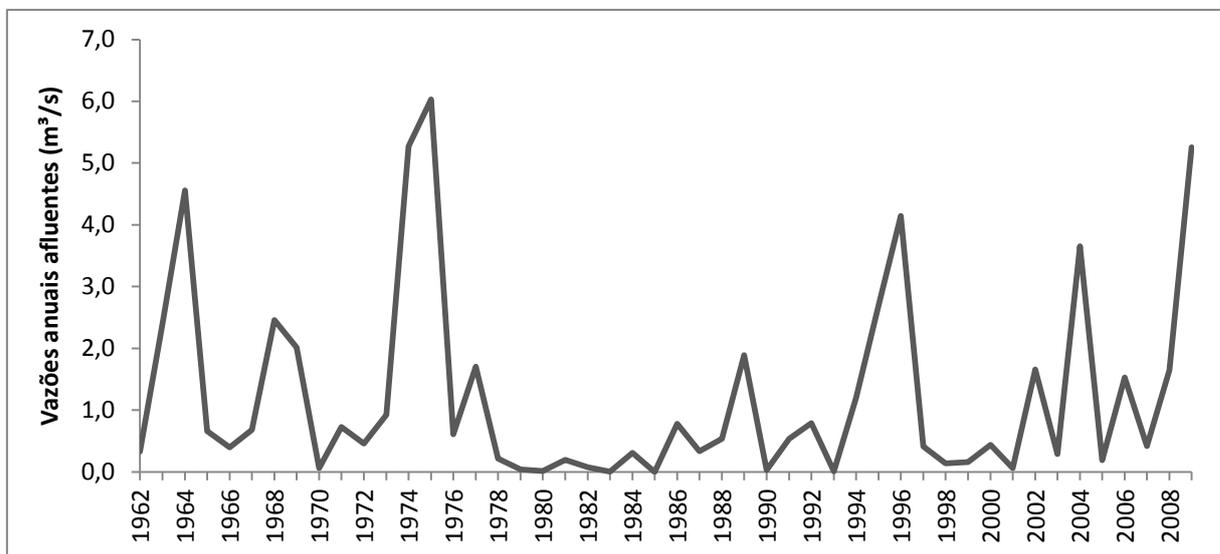


Figura 9. Vazões médias anuais afluentes ao Açude Cruzeta no período de 1962 a 2009 (m³/s). Vazões obtidas através da simulação pelo SMAP. Fonte: ANA, 2013

3.1.1.3. Demandas associadas ao Açude Cruzeta

As demandas hídricas atendidas pelo açude Cruzeta avaliadas neste trabalho foram obtidas do cadastro de outorgas emitidas pela Agência Nacional de Águas (ANA) durante o período compreendido entre 2001 e 2015 (ANA, 2016).

Vale salientar que esta demanda não representa todos os usos atuais do açude, pois se tem conhecimento que alguns usuários, principalmente irrigantes à montante do reservatório, não se encontram outorgados e que alguns usos são dispensados de outorga, como é o caso daqueles com vazões de captação máximas instantâneas inferiores a 1,0 L/s. No entanto, como não se dispõe de um cadastro completo de usuários do açude Cruzeta, optou-se por trabalhar com os usuários outorgados.

Esses usos são referentes ao abastecimento humano e a irrigação. O primeiro é responsabilidade da Companhia de Águas e Esgoto do Rio Grande do Norte (CAERN), que faz a distribuição da água para a população, e o segundo refere-se ao perímetro irrigado administrado pela Associação dos Irrigantes do Perímetro Irrigado Cruzeta – APICRUZ. Juntos, eles totalizam um volume de água retirado do açude equivalente a 2.374.573 m³/ano, correspondente a 0,075 m³/s (Tabela 5).

Tabela 5. Usos outorgados retirados do Açude Cruzeta e volume anual correspondente.

Identificação	Município	Corpo Hídrico	Finalidade Principal	Volume anual (m ³)
CAERN	Cruzeta	Açude Cruzeta	Abastecimento Público	674.520
APICRUZ	Cruzeta	Açude Cruzeta	Irrigação	1.699.053
TOTAL	-	-	-	2.373.573

Fonte: ANA, 2016

O Perímetro Irrigado Cruzeta é a demanda mais expressiva dentro da bacia do açude Cruzeta. Ele foi implantado pelo DNOCS no início da década de 1970. A área de 141,84 ha é irrigada por um sistema de canais (infiltração por sulco) e está distribuída em 23 lotes individuais. Além da área irrigada, são dispostos também 274,43 ha de área de sequeiro, resultando numa área total de 416,27 ha (BRASIL, 2007).

3.1.2. Barragem Armando Ribeiro Gonçalves

A Barragem Engenheiro Armando Ribeiro Gonçalves está situada entre as coordenadas de Latitude 9.373.211 m S e Longitude 733.825 m E, no distrito de Oiticica II, a 2 km da cidade de Itajá e a 13 km do município de Assu, no Rio Grande do Norte (SERHID, 2006) (Figura 10).

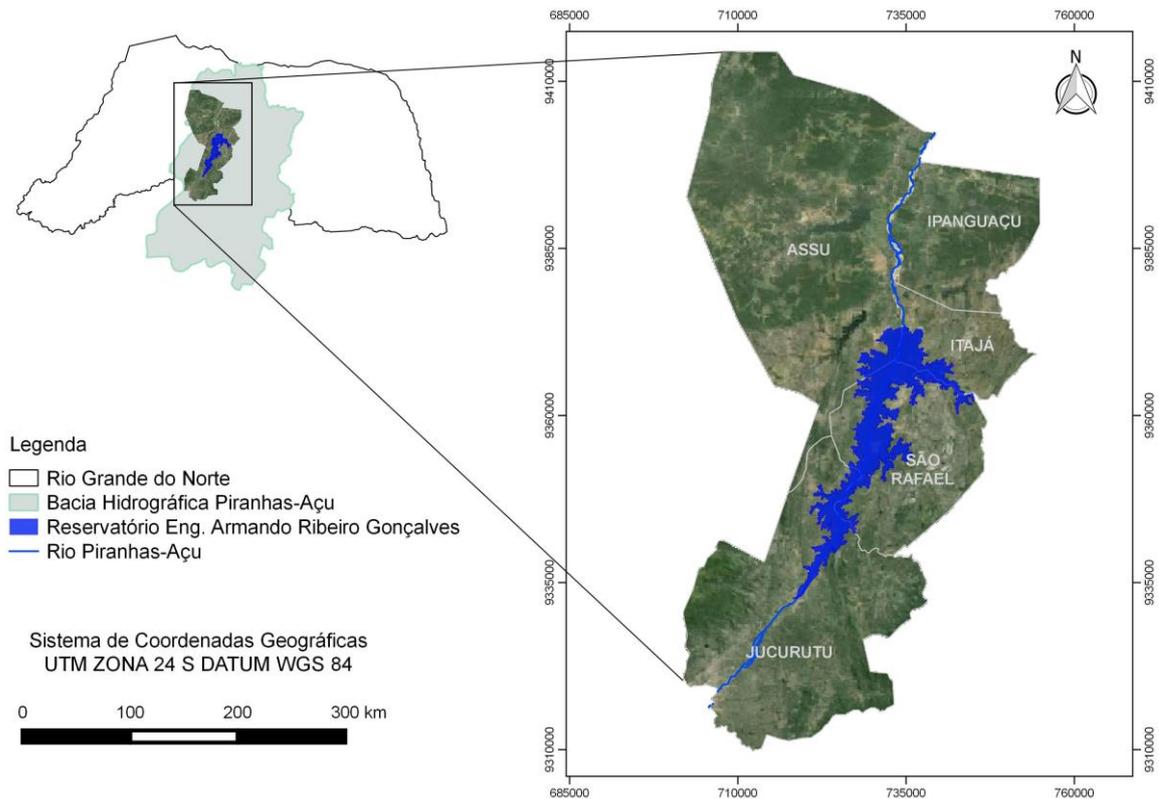


Figura 10. Localização do reservatório Eng. Armando Ribeiro Gonçalves no Estado do Rio Grande do Norte. Fonte: Elaborado pela autora.

A barragem foi construída pelo DNOCS sobre o rio Piranhas-Açu, importante e mais extenso rio do Estado, com conclusão no ano de 1983. O reservatório é essencial para o desenvolvimento econômico e abastecimento de água no Rio Grande do Norte, uma vez que ele é responsável pelo fornecimento de água para 20 municípios e mais de noventa comunidades rurais, além de se destinar também à pesca, lazer, aquicultura e fruticultura irrigada (COSTA, 2003).

Com capacidade volumétrica máxima de 2.400 hm³, a bacia hidráulica do reservatório cobre uma área de 19.200 ha, abrangendo os municípios de Assu, São Rafael, Itajá e Jucurutu.

A barragem principal é do tipo zoneada, com altura máxima de 40 m, extensão pelo coroamento de 2.540 m e largura no coroamento de 8 m. A tomada da água está localizada na ombreira direita na cota de 31,60 m e atravessa a barragem por um túnel, com diâmetro de 2,80 m e 165 m de extensão (DNOCS, 2016; SEMARH, 2014).

Assim como no açude Cruzeta, a SEMARH faz o monitoramento constante da barragem ARG, registrando os dados diários de cota, área e volume desde 1997, dados fundamentais para determinação da seca hidrológica.

3.1.2.1. Clima

O clima regional é também é do tipo *BSw'h'*, da classificação climática de Köppen, caracterizado como muito quente e semi-árido, com grande déficit hídrico.

As chuvas observadas na bacia hidrográfica do reservatório ocorrem com mais intensidade de janeiro a junho, com valores máximos nos meses de março e abril (Figura 11). Neste trabalho, foram consideradas as precipitações médias mensais do posto de São Rafael nos períodos de 1923 a 2015, disponibilizados pela Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte (EMPARN). Foi escolhida a série histórica de precipitações de São Rafael devido à bacia hidráulica do reservatório ser maior neste município, e também pela indisponibilidade de dados de precipitação na bacia do reservatório.

Com base na série histórica, a precipitação média anual climatológica no posto de São Rafael é de 651,3 mm.

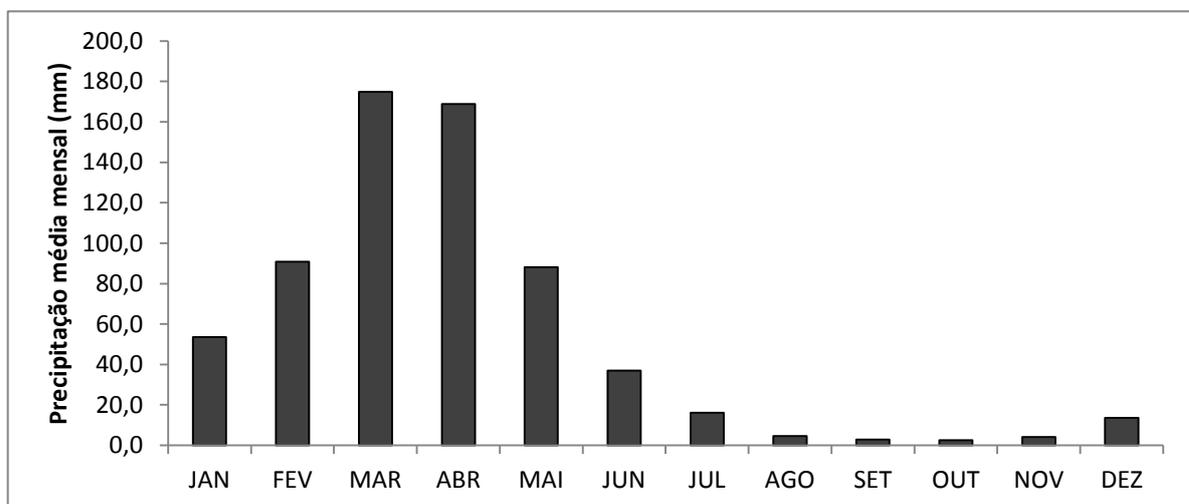


Figura 11. Precipitação média mensal em São Rafael (mm). Fonte: EMPARN

Pela indisponibilidade de dados de evaporação na bacia hidrográfica da barragem ARG, considerou-se neste trabalho a evaporação na região a mesma do açude Cruzeta, estação meteorológica mais próxima (Figura 7).

A temperatura média é de 27,5°C, com máxima de 33,6°C e mínima de 21,5°C. A insolação média anual é da ordem de 2.960 horas de sol por ano, sendo o período de agosto a novembro o que recebe a maior insolação.

3.1.2.2. Vazões afluentes à Barragem Armando Ribeiro Gonçalves

A série de vazões afluentes utilizada neste trabalho também foi obtida do Plano de Recursos Hídricos da Bacia Piranhas-Açu em elaboração (ANA, 2013), que utilizou o modelo chuva-vazão *Soil Moisture Accounting Procedure – SMAP*, para geração das vazões mensais afluentes ao reservatório Armando Ribeiro Gonçalves no período de 1962 a 2009 (48 anos).

O trimestre de maiores vazões afluentes à barragem ARG é março, abril e maio, sendo abril o mês de maior vazão média mensal, com 334,17 m³/s; já os meses de menores vazões médias mensais vão de setembro a dezembro, com vazão média próxima a 1,0 m³/s (Figura 12).

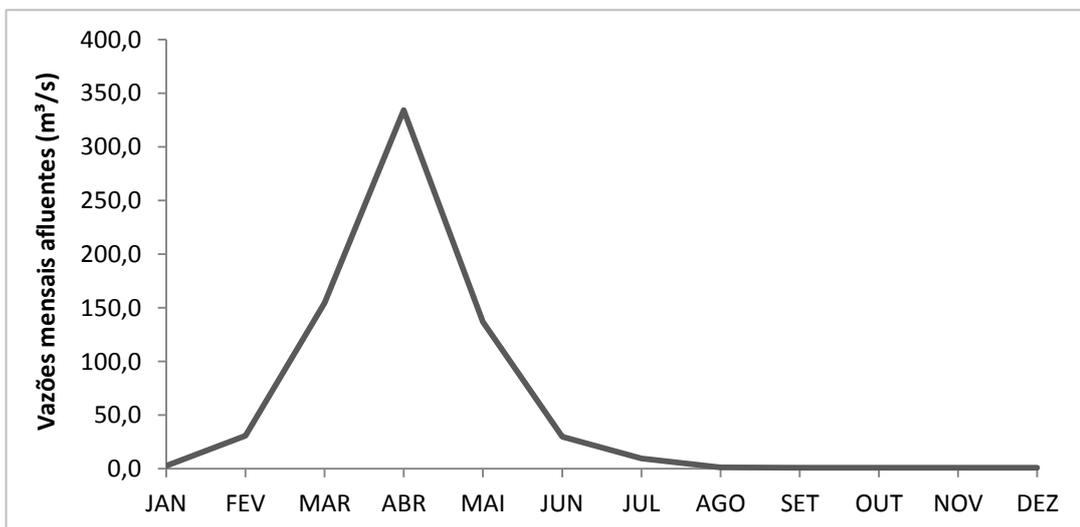


Figura 12. Vazão média mensal afluyente à barragem ARG (m³/s). Fonte: ANA, 2013

A Figura 13 mostra a distribuição anual das vazões afluentes à barragem ARG no período de 1962 a 2009, cuja média corresponde a 58,70 m³/s ou 1.851,24 hm³/ano.

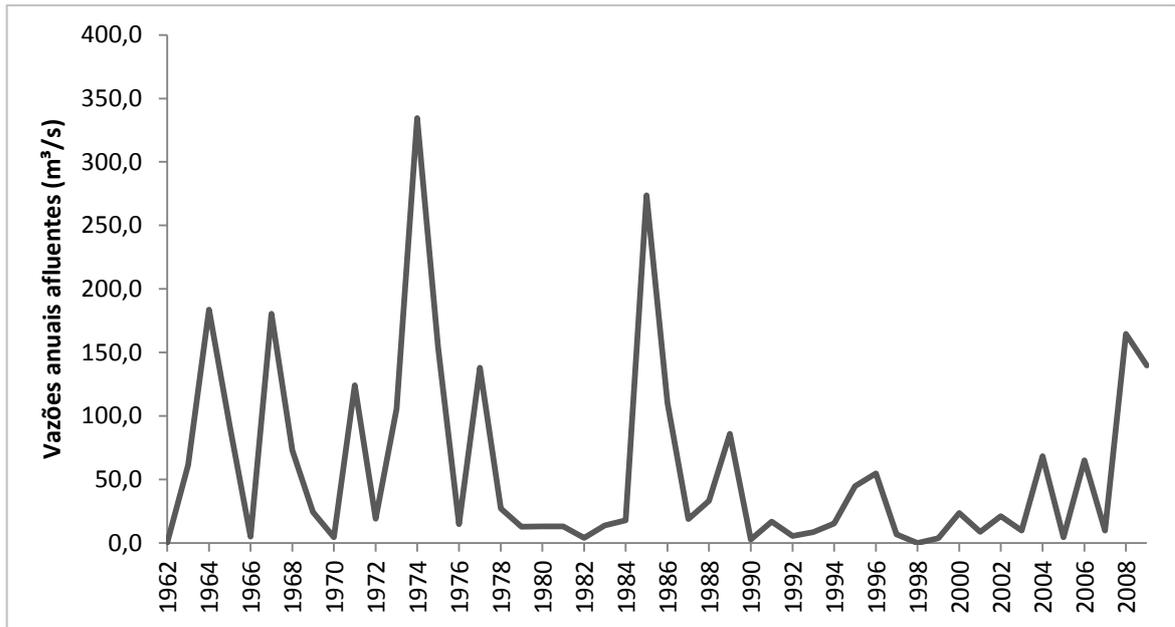


Figura 13. Vazões médias anuais afluentes à barragem ARG no período de 1962 a 2009 (m³/s). Vazões obtidas através da simulação pelo SMAP. Fonte: ANA, 2013.

3.1.2.3. Demandas associadas à Barragem Armando Ribeiro Gonçalves

Por ser o maior reservatório do Estado, a barragem ARG abastece vários municípios através de grandes adutoras, além dos municípios onde ele se encontra. Destacam-se ainda as demandas para implantação de projetos de irrigação, culturas de vazante, atividade pesqueira, derivação de água para o canal do Pataxó, perenização do rio Piranhas-Açu, piscicultura e lazer.

Assim como para o Açude Cruzeta, a identificação dos usos associados à barragem ARG foi obtida do cadastro de outorgas da ANA, no período de 2001 a 2015.

Os usos outorgados foram agrupados por tipologia e codificados da seguinte forma: ABP – abastecimento público; IRR – abastecimento para irrigação; AQU – abastecimento para aquicultura e pesca; IND – abastecimento industrial; MIN – abastecimento para mineração; TER – abastecimento para usina termelétrica; e OUT – outros abastecimentos. Os valores estimados dos volumes de retirada para os diversos tipos de usos totalizam 289.114.851 m³/ano, ou seja, 9,17 m³/s (Tabela 6).

Tabela 6. Volume total anual de retirada por tipo de uso da Barragem Armando Ribeiro Gonçalves

Tipo de Uso	Volume anual (m³)
Abastecimento Público (ABP)	27.822.373
Irrigação (IRR)	96.166.852
Aquicultura (AQU)	109.639.704
Indústria (IND)	4.760.482
Mineração (MIN)	1.752.000
Usina Termoelétrica (TER)	8.760.000
Outros (OUT)	40.213.440
TOTAL	289.114.851

Fonte: ANA, 2016

Os usos identificados como abastecimento público referem-se às retiradas de água realizadas pela CAERN para atender o abastecimento humano urbano e rural, assim como para atender às adutoras que fazem a transposição da água da barragem para bacias vizinhas. As adutoras que retiram água do açude ARG e que estão em operação atualmente são: Adutora Jerônimo Rosado, Adutora Sertão Central Cabugi, Adutora Serra de Santana, Adutora do Médio Oeste e Adutora Macau-Guamaré. O Quadro 1 mostra quais cidades são atendidas pelas adutoras e de onde é feita a captação da água.

Quadro 1. Adutoras ligadas à Barragem Armando Ribeiro Gonçalves

Adutora	Captação	Cidades beneficiadas
Adutora Jerônimo Rosado	Rio Piranhas-Açu	Mossoró, Serra do Mel.
Adutora Médio Oeste	Barragem Armando Ribeiro Gonçalves	Triunfo Potiguar, Paraú, Campo Grande, Janduí, Messias Targino, Patú, Almino Afonso e localidade de Serra de João do Vale.
Adutora Sertão Central Cabugi	Canal Pataxó	Angicos, Fernando Pedroza, Pedro Avelino, Lajes, Caiçara do Rio dos Ventos, Riachuelo, Pedra Pedra, Jardim de Angicos e 32 comunidades rurais.
Adutora Serra de Santana	Barragem Armando Ribeiro Gonçalves	Florânia, São Vicente, Lagoa Nova, Tenente Laurentino, Bodó e 92 comunidades rurais.
Adutora Macau-Guamaré	Barragem Armando Ribeiro Gonçalves	Macau, Guamaré e Pendências.

Fonte: adaptado de ANA, 2015

Outro sistema importante que é abastecido pelo ARG é o Canal do Pataxó. Com extensão de 9 km, ele efetua a transferência da tomada de água do reservatório ARG para o rio Pataxó, aproveitando a força da gravidade. As águas do

canal são aproveitadas para irrigação em áreas de assentamento do Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA), criação de peixes e abastecimento humano, essa última associada à presença da captação do sistema adutor Sertão Central Cabugi (ANA, 2013).

Dentro dos usos para irrigação estão incluídos os perímetros irrigados que constituem uma demanda significativa na bacia do açude. O Perímetro Irrigado do Baixo Açú (DIBA) é um perímetro público administrado pelo DNOCS e um dos que captam água da barragem ARG. Em funcionamento desde 1997, ele abrange 6.000 ha de área para produção de diversas culturas, entre elas, melão, melancia, banana e tomate.

Além dessa área pública, existe a irrigação difusa praticada às margens do açude e vales perenizados, onde se cultiva gêneros alimentícios e pastagens. Mais recentemente na área do Baixo Açú tem havido a expansão da agricultura irrigada em grandes lotes empresariais particulares onde se cultiva principalmente banana, como é o caso dos perímetros irrigados DELMONTE e FINOBRASA (ANA, 2013).

A aquicultura também é uma importante atividade econômica da bacia do açude, com um volume de água retirado do açude ainda maior do que para as atividades irrigantes. Ela ocorre tanto em tanques-rede quanto em viveiros escavados e a produção é voltada para a criação de peixes e camarões.

3.2. METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DA SECA HIDROLÓGICA

Neste trabalho, foram utilizadas duas metodologias de análise da seca hidrológica. A primeira foi uma adaptação ao Método do Nível Limite (*Threshold Level Method*), derivada da Teoria de Runs, introduzida por Yevjevich (1967). Através desse método, um evento de seca ocorre quando a variável de interesse (precipitação, umidade do solo, volume de armazenamento ou vazão, por exemplo) está abaixo de um limite pré-estabelecido.

De maneira similar, a segunda metodologia empregada, desenvolvida por Araújo e Bronstert (2016), considera a seca hidrológica como uma variável resultante do balanço hídrico no reservatório, onde o início da seca ocorre sempre que a demanda é maior do que a oferta hídrica. Dessa forma, a demanda

funcionaria como o nível limite em que acima dele, caracteriza-se um evento de excesso hídrico e, abaixo, um evento de déficit hídrico.

Para os dois casos, os eventos de seca foram caracterizados pela sua duração, severidade e magnitude. Com isso, foi possível fazer uma comparação entre os eventos de seca identificados pelas metodologias citadas.

3.2.1. Método do Nível Limite

Uma das formas de análise da seca hidrológica é através dos índices padronizados de seca, os quais representam as anomalias de uma situação normal de uma forma padronizada, como é feito, por exemplo, nos índices PHDI, SWSI e outros. Porém, uma desvantagem desses índices é que a severidade de um evento de seca é expressa somente em termos relativos, enquanto que na gestão dos recursos hídricos, geralmente, o que se deseja obter é o valor absoluto da quantidade de água necessária para se atingir as condições normais, ou seja, o volume de déficit (VAN LOON, 2015).

Essa desvantagem pode ser superada utilizando o Método do Nível Limite, uma vez que ele mede o volume de água abaixo de um dado limite (déficit hídrico), de onde se podem derivar as características da seca (duração, severidade e magnitude).

O nível limite é tido como o elemento chave para definir um evento de seca e é diretamente influenciado pelo objetivo de cada estudo, pela região e pela série de dados disponíveis (VAN LOON, 2015; SUNG; CHUNG, 2014; MISHRA; SINGH, 2010). Idealmente, o nível limite deve estar associado aos setores mais afetados pela seca, como, por exemplo, a irrigação, a indústria, o abastecimento humano de água potável, os níveis mínimos para operação dos reservatórios, a profundidade mínima da água para navegação ou até mesmo para garantir determinada vazão ecológica.

As altas taxas de evaporação, características da região de clima semiárido, fazem com que os reservatórios percam um volume de água considerável, além das perdas provocadas pela retirada das demandas associadas a diversos usos. Devido a isso, levou-se em consideração que o volume evaporado dos reservatórios estudados também deve ser incluído na determinação do nível limite.

Adicionalmente, considerou-se um fator de tempo (ft) que representa o tempo futuro, em anos, em que o volume acumulado no reservatório no tempo t é capaz de atender às demandas, considerando também as perdas por evaporação.

Sendo assim, usando o mesmo fator de tempo (ft), o nível limite ($NL(ft)$) foi obtido pela soma das retiradas para atender todas as demandas associadas ao reservatório ($Dem(ft)$) junto com o volume evaporado ($EVP(ft)$) (Equação 3).

$$NL(ft) = Dem(ft) + EVP(ft) \quad \text{Eq. 3}$$

O valor de $EVP(ft)$ foi calculado a partir da Equação 4, onde t representa o tempo em meses, E é a média histórica da evaporação mensal do lago em m/mês (Figura 7), P é a média histórica da precipitação mensal em m/mês (Figuras 6 e 11) e A é a área média mensal da bacia hidráulica do reservatório, obtida dos dados de monitoramento dos açudes.

$$EVP(ft) = \sum_{t=1}^{12ft} \{ [E(t) - P(t)] * A(t) \} \quad \text{Eq. 4}$$

Assim, se o mês e ano que está sendo analisado for janeiro de 2012, por exemplo, e o fator ft utilizado for igual a 1,5, o nível limite será a soma da demanda total anual multiplicada por 1,5 mais o acumulado do $EVP(ft)$ que ocorreu entre janeiro de 2012 a junho de 2013 (1 ano e 6 meses). No mesmo tempo de referência, se o fator for igual a 3,0, o nível limite será a soma da demanda total anual multiplicada por 3,0 mais o acumulado do $EVP(ft)$ que ocorreu entre janeiro de 2012 a janeiro de 2015 (3 anos).

Com isso, foi possível simular cenários com diferentes valores de ft buscando-se obter níveis limites diferenciados que possam servir de apoio para os gestores de recursos hídricos visualizarem as ocorrências de seca hidrológica ao longo do tempo, para diferentes níveis de segurança (Quadro 2). Isso porque não existe um único nível limite que é preferível e a seleção de um nível limite específico decorre de uma decisão subjetiva que depende de cada avaliador (FLEIG *et al.*, 2006).

Quadro 2. Fatores utilizados para o cálculo do nível limite dos reservatórios Cruzeta e ARG.

Reservatório	Fator (ft)	Reservatório	Fator (ft)
Cruzeta	1,0	ARG	2,5
	1,5		3,0
	2,0		3,5
	2,5		4,0
	3,0		4,5
	3,5		5,0

Todos os níveis limites simulados são variáveis ao longo do tempo. Isso significa que cada mês da série histórica de dados tem um nível limite diferente, que muda de acordo com a vazão evaporada no intervalo de tempo estudado e também com base no valor de ft . Outros trabalhos também têm usado limites variáveis ao longo do tempo para estudar a seca hidrológica como, por exemplo, em Van Huijgevoort *et al.* (2014), Van Loon *et al.* (2014), Sung e Chung (2014), Van Loon e Van Lanen (2012) e Stahl (2001). Neles, a variável de interesse usada para determinar o nível limite são as vazões naturais de rios permanentes, porque ela é, geralmente, a variável com maior número de medições e mais facilmente simulada (VAN LOON, 2015).

No entanto, para regiões semiáridas, em que os rios são, na maioria, intermitentes ou efêmeros, a vazão natural é zero ou próxima de zero na maior parte do ano. Usar o nível limite a partir dos dados de vazão nesses ambientes constituiria uma desvantagem desse método (SCANLON *et al.*, 2006).

Assim, optou-se por utilizar como variável hidrológica o volume mensal de armazenamento dos reservatórios ($Vol(t)$), obtido dos registros de monitoramento realizado pela SEMARH-RN, no período de 1997 a 2015 para o Açude Cruzeta e para a Barragem Armando Ribeiro Gonçalves. Dessa forma, o volume de déficit hídrico ($DH(ft)$) foi calculado através da Equação 6.

$$DH(ft) = Vol(t) - NL(ft) \quad \text{Eq. 6}$$

Sempre que $DH(ft) < 0$ registra-se uma ocorrência de seca hidrológica que termina somente quando o volume armazenado no reservatório passa a ser maior do que o nível limite considerado na análise ($DH(ft) \geq 0$).

3.2.2. Método de avaliação da seca hidrológica de Araújo e Bronstert

A metodologia apresentada por Araújo e Bronstert (2016) constitui um novo método para avaliar a seca hidrológica na região semiárida brasileira. Usando como área de estudo a Bacia do Rio Jaguaribe, os autores propuseram um método baseado no balanço hídrico em bacias hidrográficas, sintetizado por uma variável de oferta-demanda. O método não leva em consideração diretamente a precipitação, mas sim as variáveis hidrológicas relacionadas com o balanço de água nos reservatórios.

A variável de avaliação da seca hidrológica (X) é resultante do balanço hídrico entre a oferta e a demanda (Equação 7), onde t é o tempo em meses; Q_o é a vazão de oferta; Q_D é a vazão de demanda.

$$X(t) = Q_o(t) - Q_D(t) \quad \text{Eq. 7}$$

A oferta é representada pela vazão do rio-reservatório (Q_{o1}) e a vazão de oferta difusa (Q_{o2}) (Equação 8) e a demanda é relacionada à demanda concentrada (Q_{D1}) (inclui áreas urbanas, grandes indústrias e projetos de irrigação) e à demanda difusa que se refere às comunidades rurais (Q_{D2}) (Equação 9).

$$Q_o(t) = Q_{o1}(t) + Q_{o2}(t) \quad \text{Eq. 8}$$

$$Q_D(t) = Q_{D1}(t) + Q_{D2}(t) \quad \text{Eq. 9}$$

Nas principais aplicações, os autores utilizaram apenas a oferta concentrada (Q_{o1}) e a demanda concentrada (Q_{D1}), uma vez que a oferta e demanda difusa não possuem grande impacto na análise da disponibilidade de água de grandes reservatórios (ARAÚJO; BRONSTERT, 2016). A vazão do rio-reservatório (Q_{o1}) é dada conforme as Equações 10 e 11.

$$Q_{o1}(T_R, t) = Q_R(t) + \delta \cdot \left[\eta(t) \cdot \frac{V_0(t)}{N(T_R) \cdot \tau} \right] \quad \text{Eq. 10}$$

$$\tau = \frac{V_{SC}}{Q_R} \quad \text{Eq. 11}$$

Onde:

Q_R = vazão afluente ao reservatório (hm³/mês);

δ = fator *on-off*, em que é 0 se t é um mês excedente, e 1 se t é um mês de déficit;

η = eficiência do reservatório, isto é, a fração do volume no mês t que está efetivamente disponível – depende principalmente da regra de operação, da evaporação e da frequência e magnitude de transbordamento;

V_0 = volume armazenado no primeiro dia do mês t (hm³);

$N(T_R)$ = número de meses de déficit hidrológico por ano, associado ao período de retorno (T_R) de 5 anos;

τ = tempo de residência do reservatório (anos);

V_{SC} = capacidade de armazenamento do reservatório (hm³);

\bar{Q}_R = média da vazão afluente de longo prazo (hm³/ano).

Na prática, a eficiência do reservatório foi considerada fixa para toda série histórica e obtida pela aproximação Q_{90}/\bar{Q}_R . Além disso, foi considerado que um mês de déficit é aquele em que as vazões do rio associadas a um período de retorno de 5 anos são insuficientes para atender as respectivas demandas.

A vazão de demanda concentrada é dada pela Equação 12, onde f é um fator de aridez sazonal (adimensional), λ é um fator de demanda (adimensional) e Q_{90} é a vazão regularizada com 90% de garantia.

$$Q_{D1}(t) \cong f(t) \cdot [\lambda(t) \cdot Q_{90}] \quad \text{Eq. 12}$$

Durante a estação chuvosa, compreendida entre os meses de janeiro a junho, o fator de aridez (f) é sempre igual a 1,0. Na estação seca (julho a dezembro), o valor de f pode ser maior ou igual a 1,0, dependendo da precipitação no período úmido anterior (Equações 13a e 13b).

$$f(t) = 1; \quad \text{se } H_w(t) \geq \bar{H}_w \quad \text{Eq. 13a}$$

$$f(t) = 1 + \nabla U \cdot \frac{[\bar{H}_w - H_w(t)]}{\bar{H}_w}; \quad \text{se } H_w(t) < \bar{H}_w \quad \text{Eq. 13b}$$

Nas Equações 13a e 13b, H_w é a precipitação no período úmido anterior à estação seca; \bar{H}_w é a precipitação média de longo prazo da estação chuvosa e ∇U é o gradiente de uso consuntivo adimensional adotado como sendo igual a 0,8, de acordo com Van Oel *et al.* (2008).

O fator de demanda λ pode ser obtido através da aproximação Q_w/Q_{90} , onde Q_w representa todos os usos retirados do açude. Assim, tanto nos meses de janeiro a junho, quanto nos meses de julho a dezembro em que a precipitação do período úmido anterior é maior do que a média histórica, $Q_{D1} = Q_w$; caso contrário, a vazão de demanda concentrada é maior do que Q_w para compensar o baixo desempenho agrícola no primeiro semestre devido à escassez de precipitação.

Obtido os valores de Q_{O1} e de Q_{D1} , o início da seca é admitido para ocorrer sempre que $X < 0$, e termina quando ocorre um mês ou mais de excedência ($X \geq 0$), desde que os efeitos hidrológicos do evento de seca anterior tenham terminado. Para determinar esse período, os autores utilizaram o conceito de resiliência da seca hidrológica, definida como a duração dos efeitos da seca até que um período úmido ocorra e redefina o balanço hídrico. No entanto, neste trabalho, foi adotado o critério de secas mutuamente dependentes para definir a duração da seca hidrológica, explicado na Seção 3.2.4 adiante.

A Tabela 7 mostra os principais parâmetros utilizados para avaliação da seca hidrológica por meio dessa metodologia.

Tabela 7. Principais características hidrológicas utilizadas na determinação da seca para $T_R = 5$ anos.

Reservatório	V_{SC} (hm^3)	Q_{90} (hm^3/ano)	\bar{Q}_R (hm^3/ano)	Q_w (hm^3/ano)	λ	N	Meses de excesso hídrico	η	τ (anos)
Cruzeta	23,55	4,10	38,74	2,37	0,58	10	Março e Abril	0,11	0,61
ARG	2.400,00	522,55	1.851,24	289,11	0,55	10	Março e Abril	0,28	1,30

Nota: V_{SC} = capacidade de armazenamento do reservatório; Q_{90} = vazão regularizada com 90% de garantia; Q_w = usos retirados do açude; λ = fator de demanda (Equação 12); N = número de meses de déficit hidrológico por ano; η = eficiência do reservatório (Equação 10); τ = tempo de residência do reservatório (Equação 11).

Os valores da vazão regularizada (Q_{90}) e da vazão média afluente (\bar{Q}_R) foram obtidos a partir da série de vazões afluentes a cada reservatório apresentada nas Seções 3.1.1.2 e 3.1.2.2 para Cruzeta e ARG, respectivamente.

3.2.3. Características da seca hidrológica

A identificação da ocorrência de déficit hídrico por meio das duas metodologias permitiu a avaliação da seca hidrológica através das suas três principais características: duração, severidade e magnitude.

A duração da seca foi definida como o período, em meses, durante o qual a variável hidrológica utilizada para cada metodologia esteve continuamente abaixo do nível limite, ou seja, o período de déficit hídrico entre o início e o fim de um evento de seca.

Em seguida, a severidade da seca foi avaliada como a soma dos volumes de déficit (em hm³) durante o período de um evento de seca, indicando a deficiência cumulativa da seca abaixo do nível limite.

Por fim, a magnitude da seca foi calculada através da divisão da severidade pela duração, representando o valor médio do déficit hídrico ou a intensidade da seca (hm³/mês).

A caracterização da seca conforme descrito foi utilizada em outros trabalhos, como Tu *et al.* (2015), Wanders e Wada (2015), Pandey *et al.* (2008), Tallaksen *et al.* (2004), Bonacci (1993), Yevjevich (1967).

3.2.4. Secas mutuamente dependentes e secas minoritárias

Durante um período de déficit hídrico prolongado é comum que a vazão ou o nível de armazenamento do reservatório exceda o nível limite por um curto período de tempo devido, por exemplo, a alguma ocorrência pontual de chuva acima da média. Nesses casos, um evento de seca prolongada é dividido em uma sequência de secas menores que são mutuamente dependentes (FLEIG *et al.*, 2006).

Uma vez que não podem ser consideradas independentes uma das outras, faz-se necessário agrupar as secas minoritárias objetivando uma definição consistente dos eventos de seca (TALLAKSEN *et al.*, 1997). Esse agrupamento pode ser feito por meio do método introduzido por Zelenhasic e Salvai (1987), conhecido como Evento de Tempo Intermediário (*Inter-event Time Method* – Método IT), utilizado neste trabalho (Figura 14).

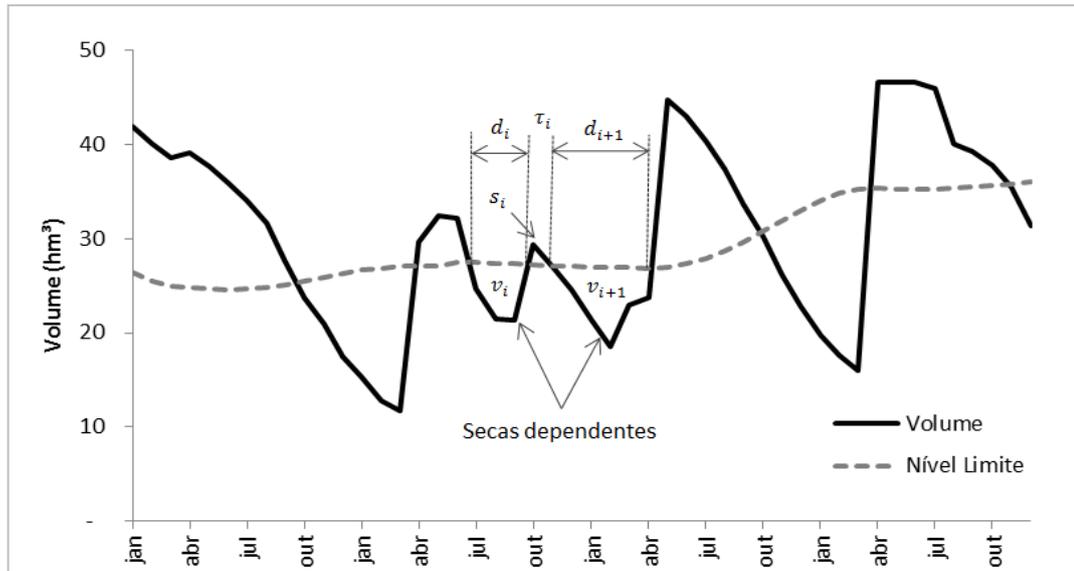


Figura 14. Representação das variáveis relacionadas ao agrupamento de secas mutuamente dependentes pelo método IT. Fonte: Elaborado pela autora.

Nele, duas secas mutuamente dependentes são agrupadas se a duração entre elas é menor do que um número predefinido de dias (t_c), isto é, se $\tau_i \leq t_c$. A duração de um evento de seca agrupado ($DS_{agrup.}$) é, portanto, definida do primeiro dia do primeiro evento de seca ao último dia do último evento de seca do agrupamento, incluindo o período de excesso (Equação 14).

$$DS_{agrup.} = d_i + d_{i+1} + \tau_i \quad \text{Eq. 14}$$

A escolha do t_c geralmente decorre de uma decisão subjetiva e varia de acordo com a área de estudo, bem como depende do intervalo de tempo dos dados disponíveis. Assim, optou-se por utilizar o t_c igual a um mês, uma vez que tanto os valores de volume do reservatório quanto os de vazão afluente estão em escala de tempo mensal.

Ao aplicar o método IT para agrupar secas dependentes, um grande número de secas minoritárias pode aparecer (TU *et al.*, 2015; FLEIG *et al.*, 2006; TALLAKSEN *et al.*, 1997). Elas são caracterizadas por ser de curta duração e com baixo volume de déficit. Um elevado número de secas minoritárias pode alterar a análise acerca da frequência de eventos de secas ao longo do tempo e, por isso, a ocorrência de secas minoritárias deve ser minorada (TALLAKSEN *et al.*, 1997). Portanto, para eliminá-las, todos os eventos de seca com duração igual ou menor que um mês foram excluídos da análise.

Após exclusão das secas minoritárias e definição da duração da seca agrupada, a caracterização da severidade da seca agrupada ($SS_{agrup.}$) foi definida como sendo igual à soma dos volumes de déficit menos o volume de excesso do evento intermediário (Equação 15).

$$SS_{agrup.} = v_i + v_{i+1} - s_i \quad \text{Eq. 15}$$

Em estudos que tratam da gestão de reservatórios, a subtração do volume de excesso a partir da soma dos volumes do déficit proporciona uma descrição mais correta dos processos de retirada e reabastecimento do reservatório (FLEIG *et al.*, 2006); método também adotado por Tu *et al.* (2015), Sung e Chung (2014), Chen *et al.* (2013), Pandey *et al.* (2008), Tallaksen *et al.* (1997).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. SECA HIDROLÓGICA ATRAVÉS DO MÉTODO DO NÍVEL LIMITE

Para cada reservatório estudado, foram simulados seis níveis limites diferentes de acordo com os fatores, que variaram de 1,0 a 3,5 para o açude Cruzeta e de 2,5 a 5,0 para a barragem ARG.

A Figura 15 mostra a relação entre esses níveis limites para cada fator analisado e a variação do volume do açude Cruzeta no período entre 1997 e 2015, e a Figura 16 apresenta essa mesma relação para a barragem ARG.

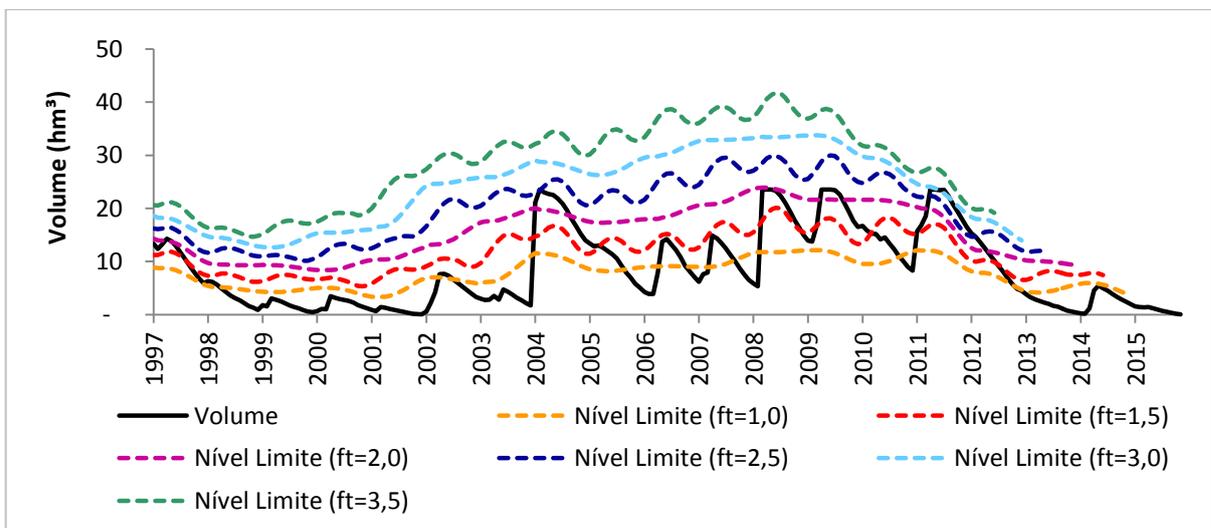


Figura 15. Níveis limites para cada fator e evolução volumétrica mensal do açude Cruzeta no período entre 1997 e 2015.

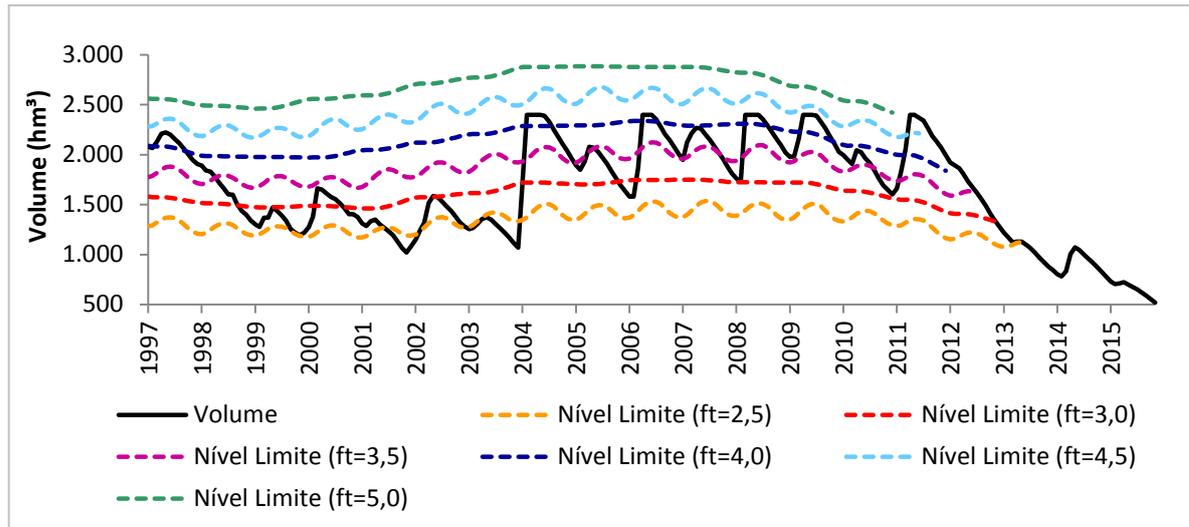


Figura 16. Níveis limites para cada fator e evolução volumétrica mensal da barragem ARG no período entre 1997 e 2015.

Uma vez que a demanda referente aos usos outorgados foi considerada fixa, a variação do nível limite se dá essencialmente pela perda por evaporação do reservatório. Isso implica que o comportamento da curva do nível limite depende da área ocupada pela bacia hidráulica e, por conseguinte, da evolução volumétrica do açude.

Pode-se perceber que a curva do nível limite referente aos fatores 1,5, 2,5, 3,5 e 4,5 apresenta uma variação temporal mais acentuada em relação às demais (Figuras 15 e 16). Isso acontece devido às características climáticas da região, que tem o período chuvoso bem definido entre os meses de janeiro a junho. Assim, o cálculo do nível limite para o primeiro semestre do ano considera sempre um número maior de períodos chuvosos em relação aos períodos secos e a curva do nível limite é sempre crescente. Já no segundo semestre do ano, o cálculo do nível limite engloba um número maior de períodos secos, fazendo com que a curva decresça.

Em relação aos fatores 1,0, 2,0, 3,0, 4,0 e 5,0, observa-se que eles são mais constantes ao longo dos anos porque consideram um número de períodos chuvosos igual ao número de períodos de estiagem. Dessa forma, o aumento do volume do reservatório no período úmido acaba sendo compensado pela diminuição do volume no período seco. A Figura 17 mostra os períodos considerados para a análise de cada fator.

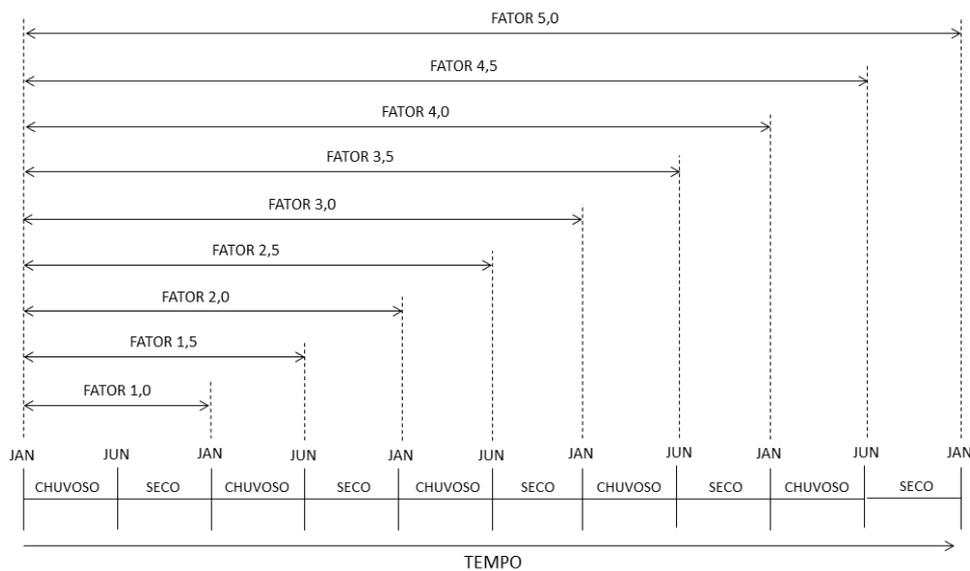


Figura 17. Ocorrência de períodos chuvosos e secos ao longo do tempo para cada fator.

Ainda pode-se observar pelas Figuras 15 e 16 que para cada fator há um determinado período de análise da ocorrência de seca hidrológica com base na curva do nível limite. À medida que o fator aumenta, esse período diminui. Essa limitação foi necessária para adequar a metodologia aos dados disponíveis de monitoramento dos reservatórios (Quadro 3).

Quadro 3. Período analisado para cada nível limite de acordo com o fator e o reservatório.

Reservatório	Fator	Início	Fim	Reservatório	Fator	Início	Fim
Cruzeta	1,0	Fev-97	Jan-15	ARG	2,5	Fev-97	Jul-13
	1,5	Fev-97	Jul-14		3,0	Fev-97	Jan-13
	2,0	Fev-97	Jan-14		3,5	Fev-97	Jul-12
	2,5	Fev-97	Jul-13		4,0	Fev-97	Jan-12
	3,0	Fev-97	Jan-13		4,5	Fev-97	Jul-11
	3,5	Fev-97	Jul-12		5,0	Fev-97	Jan-11

Os déficits hídricos por fator dos reservatórios Cruzeta e ARG são mostrados nas Figuras 18 e 19, respectivamente. Para melhor compreensão apenas os valores negativos de $DH(ft)$ são mostrados nas figuras.

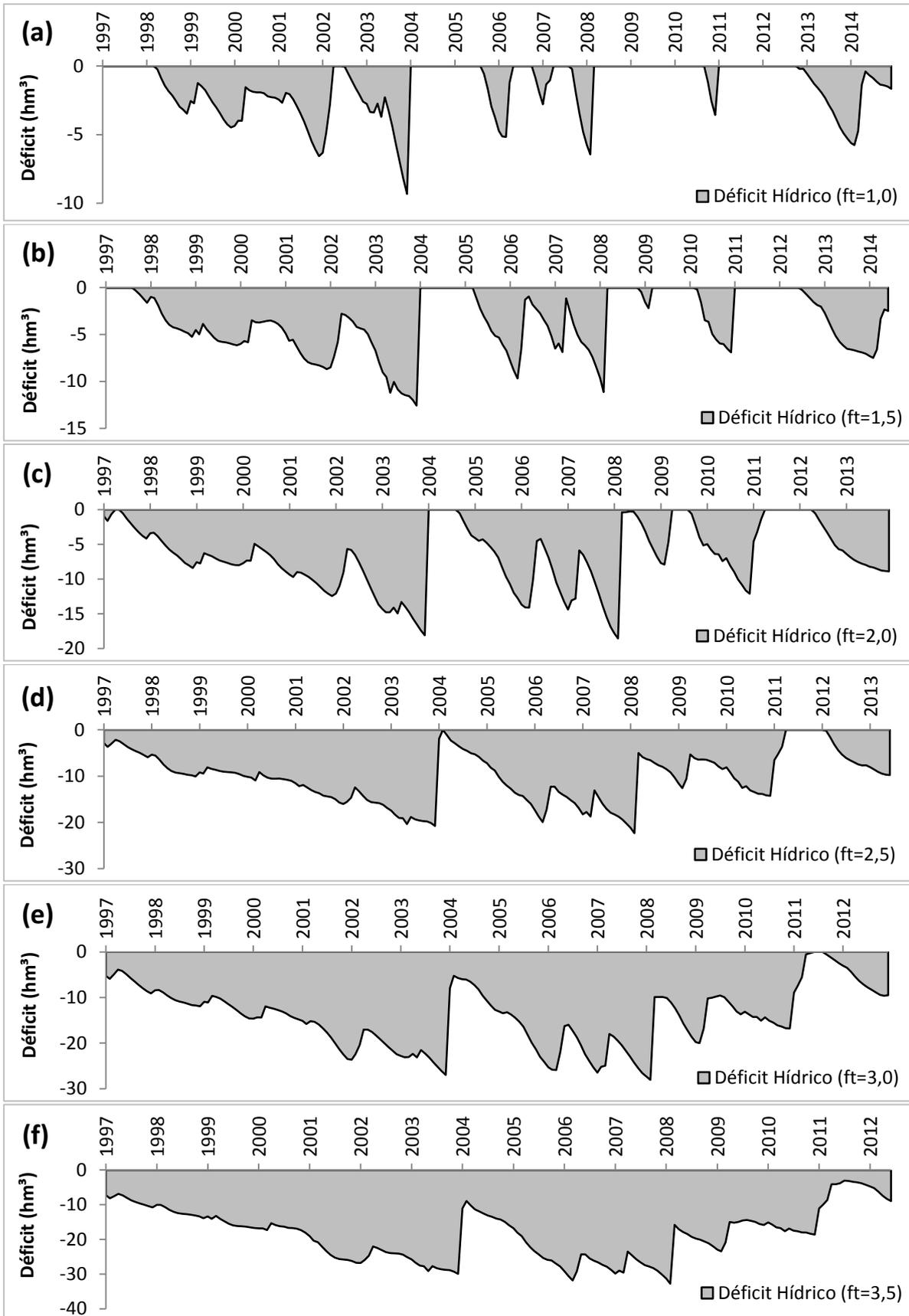


Figura 18. Volume do déficit hídrico para os fatores 1,0, 1,5, 2,0, 2,5, 3,0 e 3,5, referente ao açude Cruzeta, no período entre 1997 e 2015.

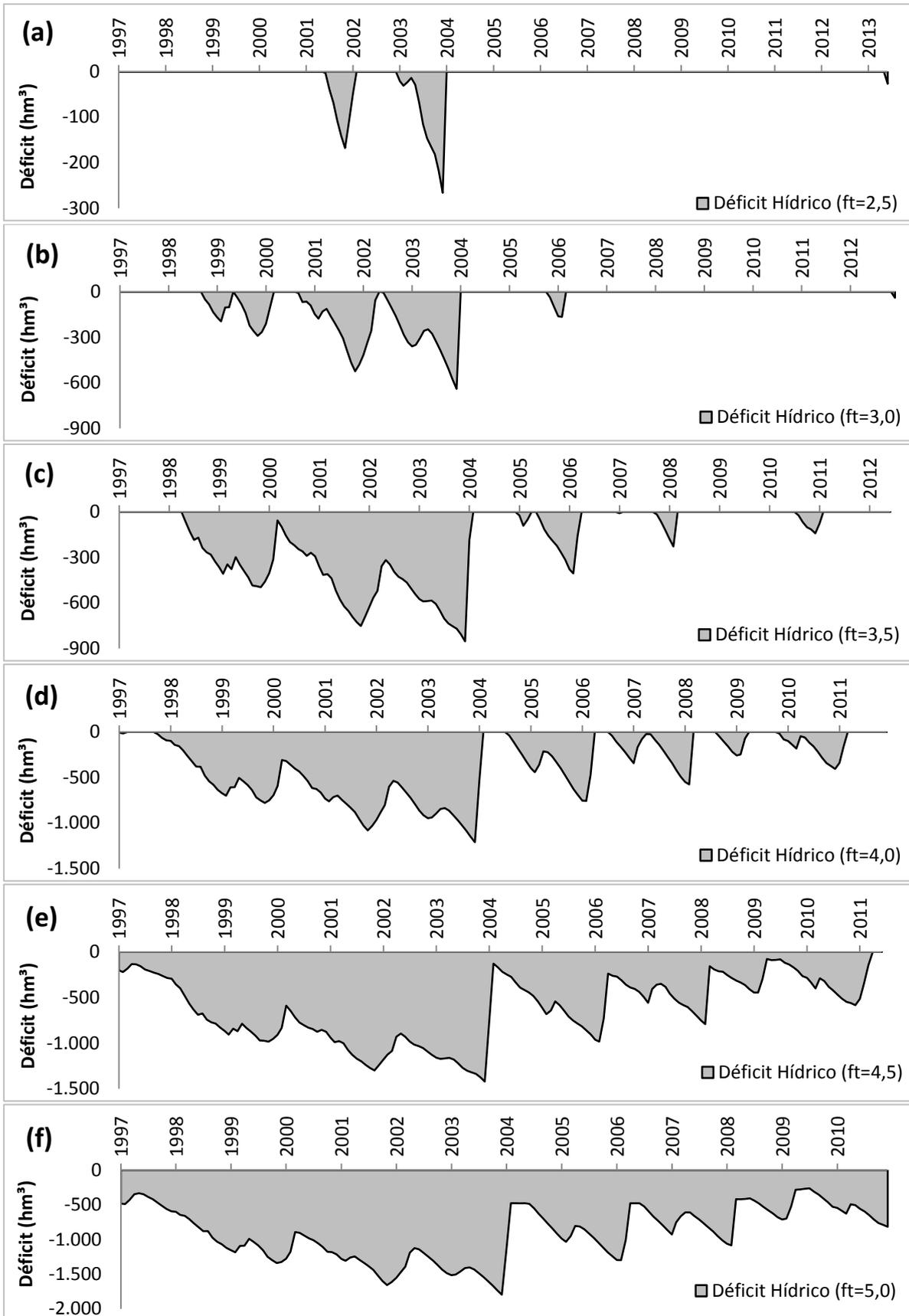


Figura 19. Volume do déficit hídrico para os fatores 2,5, 3,0, 3,5, 4,0, 4,5 e 5,0, referente à barragem ARG, no período entre 1997 e 2015.

Ao aumentar o valor do fator, os eventos de seca iniciam mais cedo e o intervalo entre eles diminui até que o açude fique em seca hidrológica durante toda série histórica. Assim, ao usar um nível de garantia igual ou superior a três anos no açude Cruzeta e igual ou superior a cinco anos no ARG, o volume do reservatório não seria suficiente para atender às demandas, considerando também o volume que é perdido por evaporação.

Dessa forma, tanto no açude Cruzeta quanto no ARG, os limites máximos representaram o fator em que os reservatórios estariam em seca hidrológica permanentemente durante o período de análise.

Considerando o déficit hídrico referente ao fator 1,0 para o açude Cruzeta (Figura 18a), observa-se que o primeiro evento de seca identificado se estende de 1998 a 2002, sendo esse o evento mais longo de toda série histórica. Nota-se ainda que no final do ano de 2012 se inicia a seca atual, que já dura cerca de três anos, segundo evento mais longo nesse fator.

Nos anos de 2004, 2008, 2009 e 2011, quando o açude Cruzeta atingiu sua capacidade máxima (23,54 hm³), não foram registrados eventos de seca hidrológica, apesar de nesses períodos as perdas por evaporação serem maiores.

Para o ARG (Figura 19), cuja capacidade máxima (2.400 hm³) é expressivamente maior do que o açude Cruzeta, ao utilizar os fatores 1,0, 1,5 e 2,0 nenhuma ocorrência de seca hidrológica foi registrada, portanto, estes níveis limites foram excluídos da análise. Somente a partir do fator 2,5 são detectados eventos de déficit hídrico, nos anos 2001 e 2003, quando o volume do reservatório estava em 45% da sua capacidade máxima.

Devido à curva do nível limite para o fator 2,5 terminar em julho de 2013, não foi possível fazer a análise dos eventos de seca a partir desse período. No entanto, pela Figura 16, percebe-se que o volume da barragem a partir de 2013 era ainda menor do que em 2001 e 2003, o que leva a conclusão que de 2013 em diante também seria um período de seca hidrológica. Essa inferência é válida tanto para o fator 2,5 quanto para os demais fatores.

4.1.1. Características da seca hidrológica

As características dos eventos de seca hidrológica como duração, severidade e magnitude foram obtidas a partir dos gráficos de déficit hídrico de cada um dos fatores utilizados para cada reservatório. Os resultados mostrados nesta seção consideram o agrupamento de secas mutuamente dependentes e a exclusão de secas com duração menor do que um mês, as quais são apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8. Secas mutuamente dependentes e minoritárias identificadas em cada fator para os reservatórios Cruzeta e ARG.

Reservatório	Secas mutuamente dependentes agrupadas			Secas minoritárias excluídas		
	Fator	Início	Fim	Fator	Início	Fim
Cruzeta	2,5	Fev-97 ¹	Abr-11 ¹	-	-	-
				-	-	-
				-	-	-
ARG	3,0	Out-00 ¹	Jan-04 ¹	2,5	Jul-13	Jul-13
				3,0	Jan-13	Jan-13
				3,5	Fev-07	Fev-07

¹ Início e fim da seca após o agrupamento.

No caso do açude Cruzeta, o maior número de ocorrência de secas hidrológicas foi observado para o fator 1,0 (sete eventos) (Figura 18), e reduziu para os fatores seguintes. Isto se deu porque o aumento do fator, e conseqüentemente, da demanda requerida fez com que o reservatório ficasse mais tempo em seca, reduzindo a alternância entre períodos de déficit e de excesso hídrico.

Essa relação fica mais evidenciada quando se avalia para cada fator o número de meses em seca em relação ao número total de meses, ou seja, a frequência da seca (Figura 20a). Assim, os eventos de seca identificados no primeiro nível limite foram se tornando mais longos com o aumento do volume de perdas (Figura 20b).

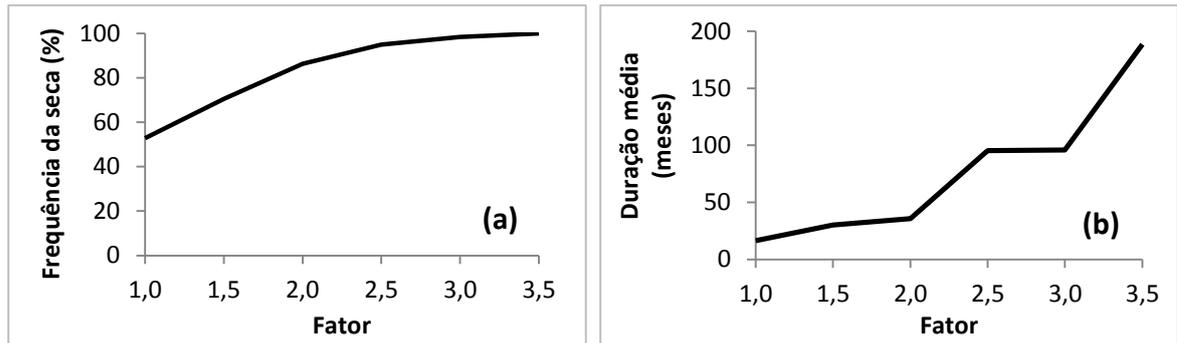


Figura 20. Frequência e duração média dos eventos de seca hidrológica por fator para o açude Cruzeta.

Na barragem ARG, o número de eventos de seca cresce com o aumento do fator, atingindo o máximo com o fator 4,0 (seis eventos) (Figura 19). Logo nos fatores seguintes (4,5 e 5,0), estes eventos se fundem fazendo com que o reservatório apresente apenas um único período de déficit hídrico que se prolonga por toda a série histórica.

Assim como no açude Cruzeta, a frequência e a duração média dos eventos de seca no ARG aumentam ao utilizar um fator de segurança maior (Figura 21). Porém, ao comparar a frequência da seca entre os dois reservatórios para os mesmos níveis limites (fatores 2,5, 3,0 e 3,5), observa-se que os meses em que são identificadas ocorrências de seca são bem mais frequentes em Cruzeta do que no ARG (95%, 98% e 100% respectivamente no caso de Cruzeta, e 10%, 32% e 50%, no caso de ARG) (Figuras 20a e 21a).

Ressalta-se ainda que no caso da barragem ARG, a duração média dos eventos de seca é praticamente a mesma do fator 2,5 ao 4,0 (Figura 21b), indicando que o reservatório suportaria as retiradas em até quatro vezes a sua demanda sem que ficasse totalmente em seca hidrológica.

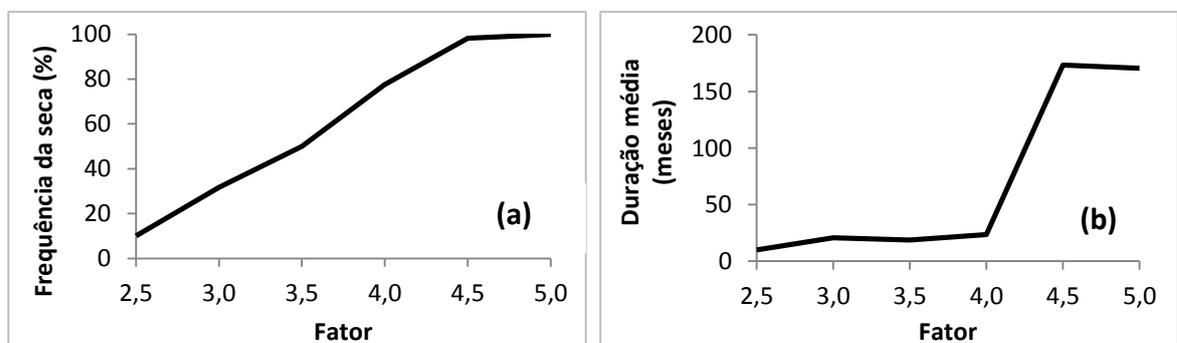


Figura 21. Frequência e duração média dos eventos de seca hidrológica por fator para a barragem ARG.

Nos dois reservatórios, o aumento do nível limite proporciona ainda o aumento da severidade e da magnitude média dos eventos de seca, uma vez que as secas se tornam mais frequentes e com maiores volumes de déficit (Figura 22).

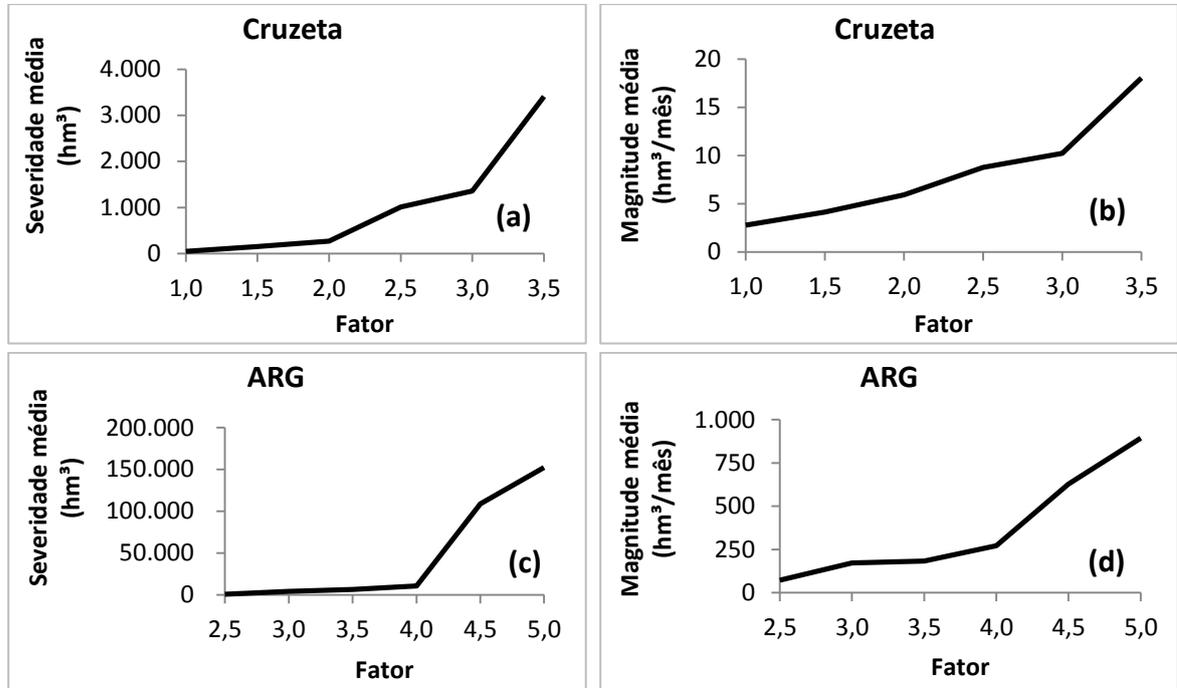


Figura 22. Severidade e magnitude média dos eventos de seca por fator para os reservatórios (a) e (b) Cruzeta e (c) e (d) ARG.

Observa-se que, apesar de o volume de déficit ser numericamente maior no ARG, a relação entre as retiradas e o volume máximo do reservatório faz com que o açude Cruzeta tenha maior susceptibilidade a eventos de seca mais severos. Esse resultado pode ser verificado na Figura 23, onde são mostradas as médias das perdas por evaporação e por demanda dos reservatórios, para cada fator, em relação ao seu volume quando este estava completamente cheio.

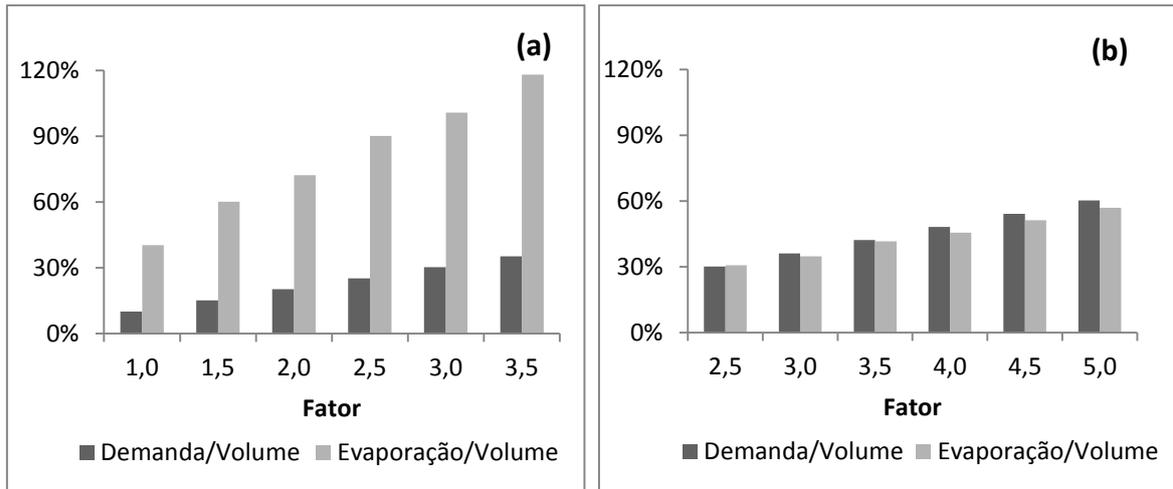


Figura 23. Relação entre as perdas por evaporação e por demanda pelo volume máximo dos reservatórios (a) Cruzeta e (b) ARG, de acordo com os fatores.

Verifica-se que o percentual de perdas por evaporação é sempre maior do que as perdas por demanda no açude Cruzeta (Figura 23a), independente do nível limite analisado. Somando essas duas retiradas, percebe-se que mesmo com o reservatório cheio, elas juntas já ultrapassam 90% do volume do reservatório no fator 2,0.

Na barragem ARG ocorre o contrário: as retiradas para atender os usos outorgados são frequentemente maiores do que as perdas por evaporação (Figura 23b). E quando somadas, só ultrapassam o volume máximo do reservatório quando é utilizado o nível de garantia de 4,5 anos.

Para os níveis limites em comum aos dois reservatórios (fatores 2,5, 3,0 e 3,5), verifica-se que a barragem ARG apresenta um percentual de perdas em relação ao volume abaixo de 85%, considerando a soma das perdas por demanda e por evaporação. Enquanto em Cruzeta, o percentual de retiradas excede 100% da capacidade máxima do reservatório nesses níveis limites.

Portanto, pode-se afirmar que mesmo que a demanda associada ao reservatório ARG seja bem maior percentualmente em relação ao açude Cruzeta (de menor porte), as menores perdas por evaporação associada ao ARG fez com que este reservatório, com elevada capacidade de acumulação, fosse mais eficiente, ou seja, com maior capacidade de suporte aos eventos de seca.

4.1.2. Relação entre os níveis limites e a gestão de reservatórios

A simulação de diferentes níveis limites no estudo da seca hidrológica possibilitou a visualização da ocorrência e das características da seca em função do aumento das demandas retiradas do reservatório.

Assim, foi possível perceber que em Cruzeta – reservatório de menor capacidade de acumulação – as demandas por um ano já provocaram secas hidrológicas em mais de 50% do tempo no período entre 1997 e 2015. Enquanto em ARG, as secas são observadas apenas quando o volume de perdas para o nível limite de dois anos e meio é contabilizado.

Na prática da gestão dos reservatórios da bacia, independente da sua capacidade, quando o nível de armazenamento está abaixo do esperado para determinado período, ocorre a suspensão do atendimento para os usos não prioritários para garantir que o abastecimento humano e a dessedentação animal sejam atendidos por pelo menos mais dois anos. Essa suspensão é feita com base em uma simulação que considera afluência zero no período chuvoso seguinte.

Utilizando a metodologia do nível limite também para dois anos ($ft = 2,0$), observa-se que ela é mais restritiva e fornece um indicador com maior nível de segurança em comparação à prática da gestão dos reservatórios, uma vez que ela considera o atendimento das demandas prioritárias e ainda das não prioritárias.

Por ser mais restritivo, o fator 2,0 provoca déficits próximos ou acima da capacidade máxima dos pequenos reservatórios, como aconteceu no açude Cruzeta. Já no caso do ARG, com um nível de garantia de dois anos, o açude consegue suportar bem as retiradas sem que haja períodos de déficit.

Assim, a metodologia de avaliação da seca hidrológica através de diferentes níveis limites apresentada neste trabalho poderia auxiliar os gestores de recursos hídricos no melhor controle da demanda hídrica, em função do porte dos reservatórios e da ocorrência de seca ao longo do tempo. Além disso, esta metodologia permite o estudo de eventos ocorridos no passado para diagnosticar e fazer um planejamento dos usos dos reservatórios no futuro de forma a minorar a ocorrência de seca.

4.2. SECA HIDROLÓGICA ATRAVÉS DO MÉTODO DE ARAÚJO E BRONSTERT (2016)

A avaliação da seca hidrológica pelo método de Araújo e Bronstert (2016) foi baseada no balanço hídrico entre oferta e demanda, assim como no método do Nível Limite.

A oferta é representada pela vazão do rio-reservatório (Q_{01}) que varia principalmente em função da vazão afluente ao reservatório e de uma porcentagem do volume acumulado nele. A demanda é igual aos usos outorgados, acrescida ou não do fator de aridez.

Pela indisponibilidade de dados mais recentes de vazão dos dois reservatórios, a avaliação da seca através desse método foi feita de 1997 a 2009. As Figuras 24 e 25 apresentam os valores negativos da variável X , ou seja, os valores de déficit hídrico mensal para Cruzeta e ARG, respectivamente.

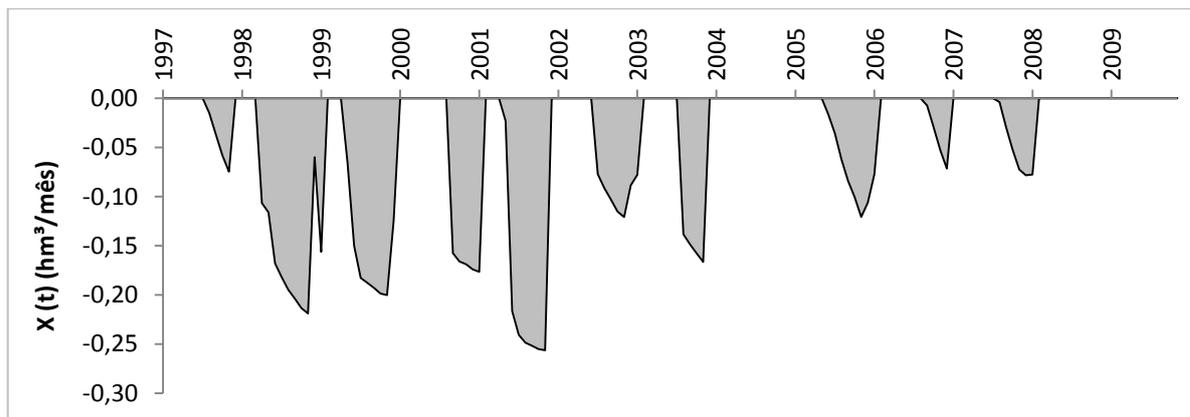


Figura 24. Déficit hídrico dado pela variável de seca hidrológica X , referente ao açude Cruzeta, no período entre 1997 e 2009.

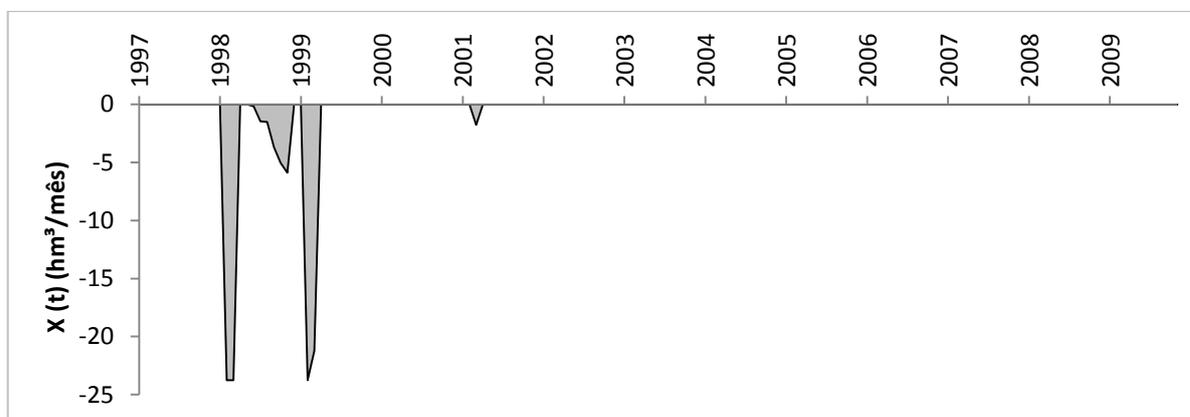


Figura 25. Déficit hídrico dado pela variável de seca hidrológica X , referente à barragem ARG, no período entre 1997 e 2009.

Observa-se que em Cruzeta (Figura 24) ocorreram dez eventos de seca hidrológica em 12 anos, ou seja, praticamente todos os anos são secos, de acordo com esta metodologia. Apenas nos anos de 2004 e 2009, períodos em que o reservatório atingiu sua capacidade máxima, não foram observados registros de seca hidrológica.

Não houve casos de secas mutuamente dependentes e de secas minoritárias no açude Cruzeta. Sendo assim, o evento de seca mais longo se estendeu entre maio de 1998 a fevereiro de 1999 (10 meses) e a seca mais severa ocorreu no final de 2001, quando o reservatório atingiu seu nível mais baixo (Figura 24).

No caso de ARG, verifica-se a ocorrência de quatro eventos de seca no mesmo período de análise, sendo um deles com duração de apenas um mês (abril de 2001), o qual foi desconsiderado.

Mesmo no período chuvoso (março e abril), foram registrados dois eventos de seca hidrológica na barragem ARG em 1998 e 1999, uma vez que as vazões do rio-reservatório não foram suficientes para atender as demandas (Figura 25). Por ser normalmente meses de excesso hídrico, o volume armazenado no reservatório não é contabilizado no cálculo da vazão ofertada e, por isso há ocorrência de déficit. À exceção desses dois casos, tanto no açude Cruzeta quanto na barragem ARG, as secas hidrológicas são observadas no segundo semestre do ano, quando as vazões e os níveis de armazenamento do reservatório são baixos.

4.2.1. Características da seca hidrológica

Os déficits hídricos mostrados nas Figuras 24 e 25 podem ser quantificados pela sua duração, severidade e magnitude, conforme mostrado na Tabela 9.

Tabela 9. Duração, severidade e magnitude mínima, máxima e média dos eventos de seca hidrológica para Cruzeta e ARG, no período entre 1997 e 2009.

Reservatório	Duração (meses)			Severidade (hm ³)			Magnitude (hm ³ /mês)		
	Mínima	Máxima	Média	Mínima	Máxima	Média	Mínima	Máxima	Média
Cruzeta	4	10	6	0,16	1,62	0,78	0,04	0,21	0,12
ARG	2	6	3	17,76	47,52	36,75	2,90	23,37	16,13

No caso de Cruzeta, verificou-se que o evento de duração máxima, que começou em maio de 1998, também apresentou a maior severidade entre todos os

eventos (1,62 hm³). Houve três ocorrências de seca com duração mínima de 4 meses: de setembro a dezembro de 1997, de setembro a dezembro de 2003 e de outubro de 2006 a janeiro de 2007, sendo esse último o de menor severidade (0,16 hm³) e menor magnitude (0,04 hm³/mês).

Observa-se também que a duração média de seis meses corrobora a ideia de que quase todo o segundo semestre do ano é marcado por um evento de seca hidrológica (Tabela 9 e Figura 24).

Em ARG, as secas são caracterizadas de maneira diferente. A seca hidrológica mais longa (julho a dezembro de 1998) apresentou a menor severidade (17,76 hm³) e, conseqüentemente, a menor magnitude (2,90 hm³/mês). A seca mais severa foi também a mais intensa e ocorreu entre março e abril de 1998.

Na média, a severidade e magnitude das secas em ARG são expressivamente maiores do que em Cruzeta, uma vez que o reservatório ARG tem um porte quase 100 vezes maior, resultando em déficits numericamente elevados.

4.3. ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA SECA HIDROLÓGICA

A determinação da seca hidrológica por meio das metodologias apresentadas neste trabalho é baseada na diferença entre oferta e demanda em um dado período de tempo. Porém, estas variáveis são vistas de formas diferentes em cada metodologia.

Pelo Método do Nível Limite, a oferta é dada em função da variação mensal do volume armazenado no reservatório e a demanda, por sua vez, considera os usos outorgados e a perda por evaporação para o período mínimo de um ano. No Método de Araújo e Bronstert (2016), a vazão mensal do rio-reservatório, que depende principalmente da vazão afluente e de uma porcentagem do volume acumulado, representa a variável de oferta. A demanda corresponde aos usos outorgados, em base de tempo mensal, multiplicada pelo fator de aridez em alguns meses.

Dessa forma, os períodos de seca identificados em cada reservatório diferem em cada metodologia. Para exemplificar essas diferenças considerando inicialmente o açude Cruzeta, os períodos de déficit hídrico para o nível limite equivalente ao

fator 1,0 foram comparados com os períodos de déficit identificados por meio do método de Araújo e Bronstert (2016) (Figura 26).

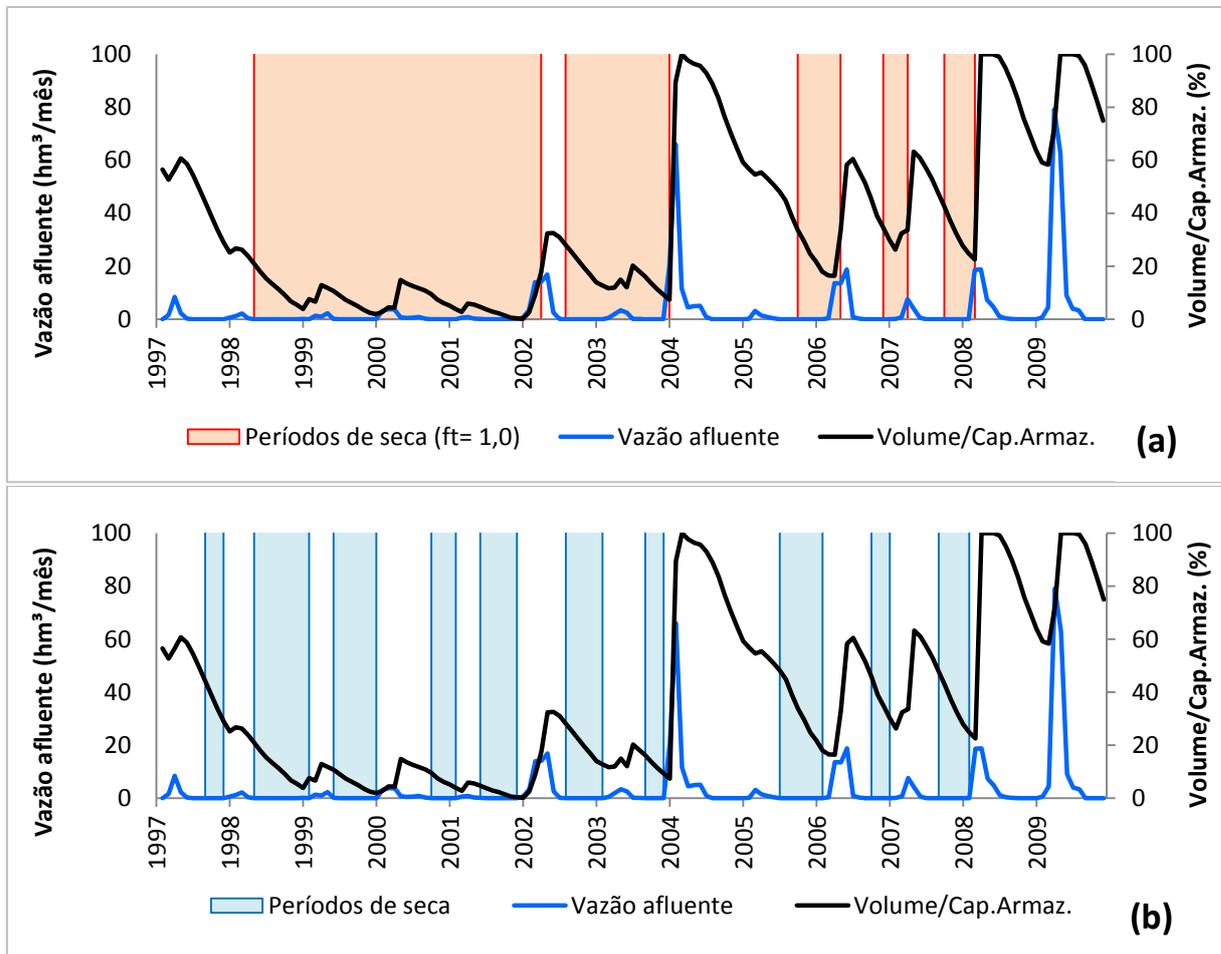


Figura 26. Períodos de seca identificados pelo Método do Nível Limite (a) e através do Método de Araújo e Bronstert (2016) (b), para o açude Cruzeta entre 1997 e 2009, em função da vazão afluente e da taxa do volume pela capacidade de armazenamento.

Pelo Método do Nível Limite, a seca hidrológica é determinada quando o volume do reservatório está abaixo da demanda necessária para um período determinado de anos, de acordo com o fator. Assim, ela é mais contínua, pois enquanto o volume estiver abaixo desse nível, há ocorrência de seca.

Com o método de Araújo e Bronstert (2016), a identificação da seca é mais fragmentada: uma entrada de vazão pontual no período chuvoso já faz com que o açude saia da seca hidrológica mesmo que o volume do reservatório esteja baixo. Isso acontece, por exemplo, nos eventos de seca entre maio de 1998 a abril de 2002 e de agosto de 2002 a janeiro de 2004, quando o nível do reservatório estava próximo a 20% da capacidade máxima.

Além disso, nem todo o volume acumulado é considerado na oferta hídrica devido à variável relacionada à eficiência do reservatório. Isso faz com que algumas secas comecem mais cedo em comparação aos períodos de seca identificados pelo Método do Nível Limite, como é o caso dos eventos iniciados no segundo semestre dos anos de 2005, 2006 e 2007.

No caso da barragem ARG, utilizando o nível limite referente ao fator 1,0, nenhum evento de déficit hídrico foi observado no período entre 1997 e 2009. Dessa forma, a comparação dos períodos de seca hidrológica entre as duas metodologias só foi possível a partir do nível limite para o fator 2,5, quando os primeiros eventos foram identificados (Figura 27).

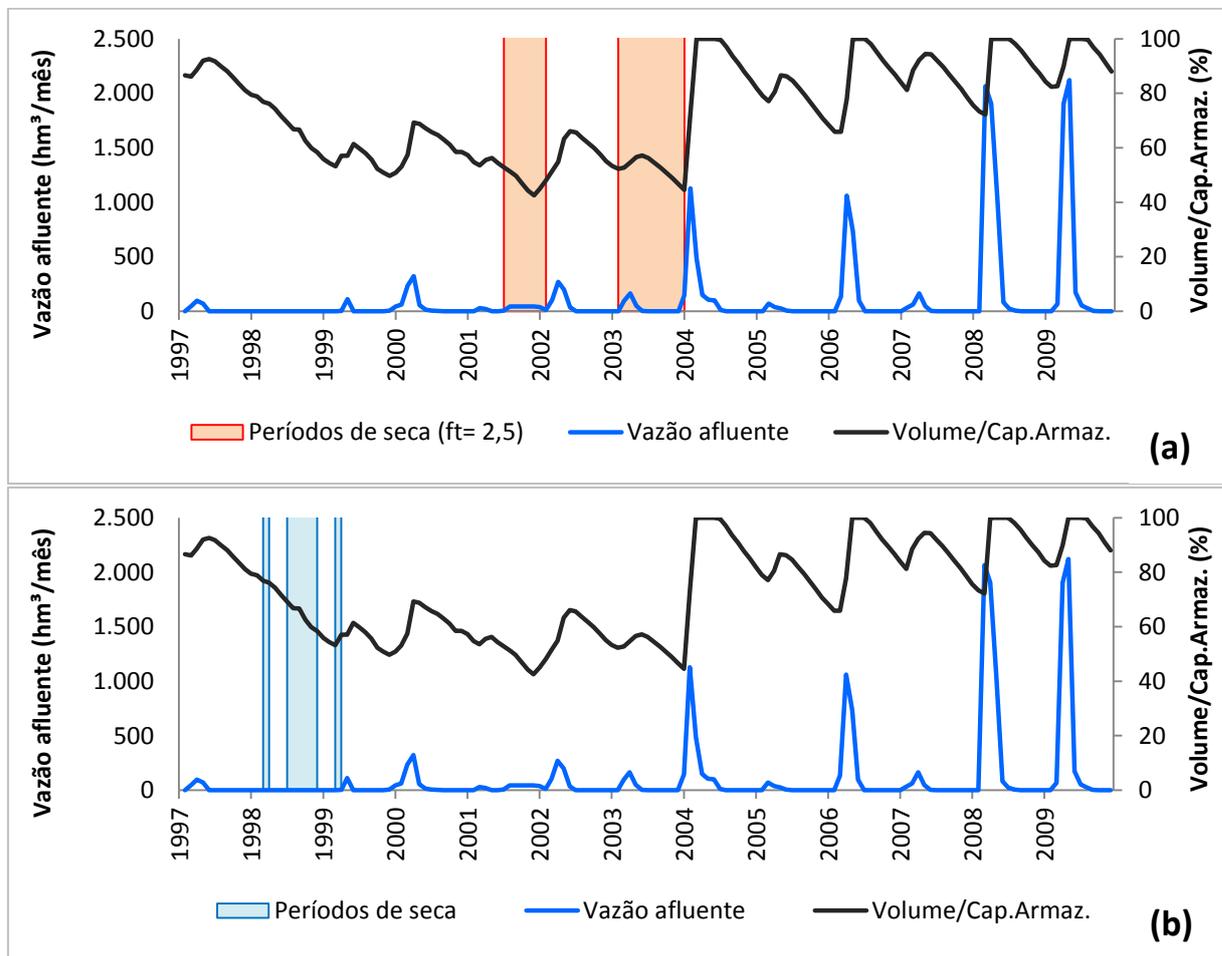


Figura 27. Períodos de seca identificados pelo Método do Nível Limite (a) e através do Método de Araújo e Bronstert (2016) (b), para a barragem ARG entre 1997 e 2009, em função da vazão afluente e da taxa do volume pela capacidade de armazenamento.

Comparando os resultados das duas metodologias para o ARG, observa-se uma diferença significativa entre os períodos de seca identificados, uma vez que eles ocorrem em momentos diferentes. Quando se utiliza o Método do Nível Limite

para o fator 2,5, as secas são observadas entre julho de 2001 e fevereiro de 2002 e entre abril de 2003 e fevereiro de 2004, períodos nos quais o volume do reservatório atingiu os níveis mais baixos da série histórica (cerca de 45% da capacidade de armazenamento máxima). No entanto, considerando o método de Araújo e Bronstert (2016), esses períodos não apresentam déficit, uma vez que foram meses em que a vazão ofertada foi, em média, 4,6 vezes maior do que a demanda.

Já nos meses de março e abril dos anos 1998 e 1999 são registrados dois eventos de seca, quando se utiliza o método de Araújo e Bronstert (2016). Estas secas ocorrem em meses considerados normalmente de excesso hídrico, quando o método não considera nenhuma contribuição do volume armazenado no reservatório para a oferta de água e a vazão ofertada é computada como sendo igual a vazão afluente. Assim, mesmo que o reservatório esteja relativamente cheio, como era o caso dos períodos em análise, em que o volume acumulado na ARG estava próximo a 75% e 55% da sua capacidade máxima nos anos 1998 e 1999, respectivamente, é computado um período de seca neste método.

A seca que ocorreu entre julho e dezembro de 1998 difere das demais porque foi causada principalmente por demandas superiores a 1,5 vezes os usos outorgados. Como o período úmido do ano de 1998 teve precipitação abaixo da média, o valor de Q_{D1} no período seco precisou ser maior para compensar o baixo desempenho agrícola no primeiro semestre devido à escassez de precipitação. Ainda que o cálculo da vazão ofertada considere uma parte do volume armazenado nesse período, ela não foi suficiente para suprir as demandas, ocasionando um evento de seca.

Em relação à severidade e à magnitude da seca hidrológica, também foram observadas diferenças entre os resultados dos métodos utilizados neste trabalho, tanto para o açude Cruzeta quanto para a barragem ARG (Tabela 10).

Tabela 10. Severidade e magnitude média dos reservatórios Cruzeta e ARG pelo Método do Nível Limite e pelo Método de Araújo e Bronstert (2016).

	Açude Cruzeta		Barragem ARG	
	Severidade média (hm ³)	Magnitude média (hm ³ /mês)	Severidade média (hm ³)	Magnitude média (hm ³ /mês)
Método do Nível Limite	46,92 ¹	2,78 ¹	981,81 ²	71,9 ²
Método de Araújo e Bronstert (2016)	0,78	0,12	36,75	16,13

¹ Resultado para o nível limite equivalente ao fator 1,0. ² Resultado para o nível limite equivalente a fator 2,5.

Pelo Método do Nível Limite, as secas são, em média, mais severas e mais intensas em comparação ao método de Araújo e Bronstert (2016) para os dois reservatórios.

Nos dois métodos, a variável de oferta é dada em base de tempo mensal. Porém, diferente do método de Araújo e Bronstert (2016) que usa a demanda mensal para o cálculo da seca, o Método do Nível Limite utiliza o nível de garantia de atendimento das demandas por um período mínimo de um ano, fazendo com que o volume de déficit seja maior quando há ocorrência de seca.

De maneira geral, a seca hidrológica pode ser avaliada de maneiras diferentes e não há um único modo de determiná-la que seja preferível. Enquanto o Método do Nível Limite permite apenas o estudo de eventos de seca já ocorridos no passado, o método de Araújo e Bronstert (2016) possibilita a avaliação das condições atuais para antever o início de uma seca. Assim, as duas metodologias apresentadas neste trabalho podem ser utilizadas simultaneamente pelos gestores de recursos hídricos, proporcionando uma visão mais ampla dos eventos de seca ocorridos na bacia.

5. CONCLUSÕES

A metodologia desenvolvida neste trabalho é uma maneira simples de avaliar a seca hidrológica que utiliza diretamente a variável de demanda, empregando diferentes níveis de garantia para o atendimento destas. Através desses níveis limites é possível simular a ocorrência de eventos de seca ao longo do tempo e ter um melhor controle da demanda hídrica em função do porte do reservatório e de sua importância para a bacia hidrográfica. Além disso, esta metodologia permite o

estudo de eventos ocorridos no passado para diagnosticar e fazer um planejamento dos usos dos reservatórios no futuro de forma a minorar a ocorrência de seca.

Em relação à metodologia de Araújo e Bronstert (2016), verifica-se que ela possibilita a avaliação das condições atuais para prever o início de uma seca hidrológica, tomando como base o atendimento das demandas hídricas.

Nessa perspectiva, sugere-se que as duas metodologias apresentadas neste trabalho possam ser igualmente utilizadas pelos gestores de recursos hídricos, a fim de possibilitar uma análise mais abrangente dos eventos de seca ocorridos na bacia.

A comparação entre os reservatórios de características distintas demonstrou que aquele com maior capacidade de acumulação foi mais eficiente e tem maior capacidade de suporte aos eventos de seca do que o reservatório menor, uma vez que no primeiro as perdas por evaporação são percentualmente menores.

REFERÊNCIAS

- ALLEY, W. M. The Palmer Drought Severity Index: Limitations and Assumptions. **Journal of Climate and Applied Meteorology**, v.23, (Jul) p.1100-1109, 1984.
- ALLEY, W. M. The Palmer Drought Severity Index as a Measure of Hydrologic Drought. **Water Resources Bulletin** v.21, no. 1 (Feb), p.105-114, 1985.
- AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY. Meteorological drought — Policy statement. **Bull. Amer. Meteor. Soc.**, v. 78, p. 847–849. 1997.
- ANA – Agência Nacional de Águas. **Outorgas emitidas pela ANA**. Disponível em: <<http://www2.ana.gov.br/Paginas/institucional/SobreaAna/uorgs/sof/geout.aspx>>. Acesso em: 01 Fev. 2016.
- _____. **Plano de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Piranhas-Açu**. Resumo Executivo / Agência Nacional de Águas - Brasília: 2015.
- _____. **Elaboração do Plano de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Piranhas-Açu**. Relatório Parcial. RP-03-Diagnóstico da Bacia do Rio Piranhas-Açu, 2013.
- ARAÚJO, C. A. B. de. **Avaliação do perímetro irrigado Cruzeta (RN), através do uso intensivo de água para irrigação**. 2007. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2007.
- ARAÚJO, J. M. S. **Identificação de áreas com precipitação pluvial homogênea no Estado do Rio Grande do Norte**. 2013. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária). Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.
- ARAÚJO J. C.; BRONSTERT, A. A method to assess hydrological drought in semi-arid environments and its application to the Jaguaribe River basin, Brazil. **Water International**. v. 41, n. 2, p. 213 – 230, 2016.
- BARUA, S.; Ng, A. W. M.; PERERA, B. J. C. Comparative Evaluation of Drought Indexes: Case Study on the Yarra River Catchment in Australia. **J. Water Resour. Plann. Manage.**, v.137, n. 2, p. 215–226, 2011.
- BLAIN, G. C.; BRUNINI, O. Análise comparativa dos Índices de Seca de Palmer, Palmer adaptado e Índice Padronizado de Precipitação no Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.22, n.1, p.105-111, 2007.
- BONACCI, O. Hydrological identification of drought. **Hydrol. Process.**, v. 7, p. 249–262. doi: 10.1002/hyp.3360070303, 1993.
- BRASIL. **Elaboração de diagnóstico e plano de desenvolvimento do Perímetro Irrigado Cruzeta**. Diagnóstico geral e viabilidade financeira. Vol 1. – Brasília: Ministério da Integração Nacional, 2007.
- CAMPOS, J. N. B.; STUDART, T. M. C. **Secas no Nordeste do Brasil: Origens, Causas e Soluções**. In: IV Diálogo Interamericano de Gerenciamento de Águas. ABRH, Foz do Iguaçu, 2001.

CHEN, Y. D.; ZHANG, Q.; XIAO, M.; SINGH, V. P. Evaluation of risk of hydrological drought by the trivariate Plackett copula in the East River basin (China). **Nat Hazards**. v. 68, p. 529 – 547, 2013.

COSTA, I. A. S. **Dinâmica de populações de cianobactérias em um reservatório eutrofizado no semiárido nordestino brasileiro**. 2003. 232 p. Tese (Doutorado em Ecologia e Recursos Naturais) - São Carlos: UFSCar, 2003.

DAI, A. Drought under global warming: a review, **Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change**, v. 2, p. 45 – 65, 2011.

DNOCS – Departamento Nacional de Obras Contra as Secas. **Monitoramento de Reservatórios**. Disponível em: <http://www.dnocs.gov.br/php/canais/recursos_hidricos/>. Acesso em: 28 Abr. 2015.

_____. **Açude Açú – Barragem Armando Ribeiro Gonçalves**. Disponível em: <<http://www.dnocs.gov.br/barragens/acu/acu.htm>>. Acesso em: 10 Jan. 2016.

DOESKEN, N. J.; THOMAS, B. M.; KLEIST, J. **Development of a surface water supply index for the Western United States**. Fort Collins: Colorado State University, 1991. 80 p. (Relatório Climático, n. 91-3).

DRACUP, J. A.; LEE, K. S.; PAULSON JR, E. G. On the definition of droughts. **Water Resour. Res.** v.16(2), p. 297–302, 1980.

FERNANDES, D. S.; HEINEMANN, A. B.; PAZ, R. L.; AMORIM, A. O.; CARDOSO, A. S. **Índices para a quantificação da seca**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2009. 48 p.

FLEIG, A. K.; TALLAKSEN, L. M.; HISDAL, H.; DEMUTH, S. A global evaluation of streamflow drought characteristics. **Hydrol. Earth Sys. Sci.**, Copernicus Publications, v. 10, p. 535 – 552, 2006.

FRIEDMAN, D. G. **The prediction of long-continuing drought in south and southwest Texas**. Occasional Papers in Meteorology, No. 1, The Travelers Weather Research Center, Hartford, CT, 182 p., 1957.

GAREN, D. C. Revised surface-water supply index for the western United States, **J. Water Resour. Plann. Manage.**, v. 119, p. 437 – 454, 1992.

GUTTMAN, B. J. Comparing the Palmer drought index and the standardized precipitation index. **Journal of the American Water Resources Association**. v. 34(1), p. 113 – 121, 1998.

_____; WALLIS, J. R.; HOSKING, J. R. M. Spatial comparability of the Palmer Drought Severity Index. **Water Resour. Bull.**, v. 28, p. 1111 – 1119, 1992.

HAYES, M. J.; SVOBODA, M. D.; WILHITE, D. A.; VANYARKHO, O. V. Monitoring the 1996 drought index using the standardized precipitation index. **Bulletin of the American Meteorological Society**, Boston, v. 80, n. 3, 1999.

HEDDINGHAUS, R. T.; SABOL, P. A review of the Palmer's drought severity index and where do we go from here? In **Preprints, 6^a Conference on Applied Climatology**, 17 – 22 January, Anaheim, CA; p. 242 – 246, 1991.

HEIM, R. A review of twentieth-century drought indices used in the United States. **Bull. Am. Meteorol. Soc.** v. 83, p. 1149 – 1165, 2002.

HISDAL, H.; CLAUSEN, B.; GUSTARD, A.; PETERS, E.; TALLAKSEN, L. M. **Event Definitions and Indices**, in: Hydrological Drought – Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater, ed.: TALLAKSEN, L. M. e VAN LANEN, H. A. J., Developments in Water Science, 48, Elsevier Science B.V., Amsterdam, p. 139 – 198, 2004.

JENSEN, M. E.; BURMAN, R. D.; ALLEN, R. G. **Evapotranspiration and irrigation water requirements**, ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 70. American Society of Civil Engineers, New York, 1990.

KARL, T. R. The sensitivity of the Palmer drought severity index and Palmer's Z'index to their calibration coefficients including potential evapotranspiration. **J. Clim. Appl. Meteorol.** v. 25, p. 77 – 86, 1986.

KARL, T. R.; KNIGHT, R. W. **Atlas of monthly Palmer Hydrological Drought Indices (1931–1983) for the contiguous United States**. Asheville: National Climatic Data Center, 1985. 319 p. (Historical climatology, Series 3–7).

KARL, T. R.; QUINLAN, F.; EZELL, D. S. Drought termination and amelioration: its climatological probability. **J. Climate Appl. Meteor.**, v. 26, p. 1198 – 1209, 1987.

KEYANTASH, J. A.; DRACUP, J. A. The Quantification of Drought: An Evaluation of Drought Indices. **Bull. Amer. Meteor. Soc.**, v. 83, p. 1167 – 1180, 2002.

LEBLANC, M. J.; TREGONING, P.; RAMILLIEN, G.; TWEED, S. O.; FAKES, A. Basin-scale, integrated observations of the early 21st century multiyear drought in southeast Australia, **Water Resour. Res.**, v. 45, 2009.

LOPES, J. E. G.; BRAGA JR., B. P. F.; CONEJO, J. G. L. Simulação hidrológica: Aplicações de um modelo simplificado. In: Anais do III Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, v. 2, 1981, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: 1981, p. 42 – 62.

LOPES, J. E. G., BRAGA, B. P. F.; CONEJO, J. G. L. **SMAP: a simplified hydrological model, applied modelling in catchment hydrology**. Ed. V. P. Singh: Water Resources Publications, 1982.

MELO, J. M. B. **Curvas de garantia para operação de açudes com fins múltiplos**. 2002. 75 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2002.

MISHRA, A. K.; SINGH, V. P. A review of drought concepts. **Journal of Hydrology**, v. 391, p. 202 – 216, 2010.

NARASIMHAN, B., SRINIVASAN, R. Development and evaluation of Soil Moisture Deficit Index (SMDI) and Evapotranspiration Deficit Index (ETDI) for agricultural drought monitoring. **Agricultural and Forest Meteorology**. v. 133, p. 69 – 88, 2005.

PALMER, W. C. **Meteorological Drought**. Research Paper n. 45, Weather Bureau, Washington, 58 p., 1965.

PANDEY, R. P.; MISHRA, S. K.; SINGH, R.; RAMASASTRI, K. S. Streamflow Drought Severity Analysis of Betwa River System (India). **Water Resour. Manage.** v. 22, p. 1127 – 1141, 2008.

QUIRING, S. M.; PAPAKEYIAKOU, T. N. An evaluation of agricultural drought indices for the Canadian prairies. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 118, p. 49 – 62, 2003.

RUSHTON, K. R.; WARD, C. The estimation of groundwater recharge. **Journal of Hydrology**, v. 41, p. 345 – 361, 1979.

SCANLON, B. R.; KEESE, K. E.; FLINT, A. L.; FLINT, L. E.; GAYE, C. B.; EDMUNDS, M.; SIMMERS, I. Global synthesis of groundwater recharge in semiarid and arid regions. **Hydrological Processes**. v. 20, p. 3335 – 3370, 2006.

SERHID – Secretaria de Estado dos Recursos Hídricos. **Plano Estadual de Recursos Hídricos do Rio Grande do Norte – PERH/RN**. Relatório Síntese. Rio Grande do Norte: SERHIDRO/HIDROSERVICE, 1998.

_____. **Coleção Águas Potiguares: Açudes Públicos**. Volume 1. Natal: SERHID/RN, 2006.

SEMARH - Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Rio Grande do Norte. **Ficha técnica dos reservatórios**. Programa de Monitoramento e Fiscalização, Coordenadoria de Gestão de Recursos Hídricos, 2014.

SHAFER, B. A.; DEZMAN, L. E. Development of a Surface Water Supply Index (SWSI) to assess the severity of drought conditions in snowpack runoff areas. In: **Proceedings Western Snow Conference**, Colorado State University, Fort Collins, CO, 1982, p. 164 – 175.

STAHL, K. **Hydrological Drought – a Study across Europe**. Tese de doutorado, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Freiburger Schriften zur Hydrologie n. 15, 122p, 2001.

SUNG, J. H.; CHUNG, E. S. Development of streamflow drought severity-duration-frequency curves using the threshold level method. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, v. 18, p. 3341 – 3351, 2014.

TABARI, H.; NIKBAKHT, J.; TALAEË, P. H. Hydrological Drought Assessment in Northwestern Iran Based on Streamflow Drought Index (SDI). **Water Resour. Manage**, v. 27, p. 137 – 151, 2013.

TALLAKSEN, L. M.; VAN LANEN, H. A. J. Hydrological drought - processes and estimation methods for streamflow and groundwater. **Developments in Water Sciences**, 48. Elsevier B.V., Amsterdam, 2004.

TALLAKSEN, L. M.; MADSEN, H.; CLAUSEN, B. On the definition and modelling of streamflow drought duration and deficit volume. **Hydrological Sciences Journal/Journal des Sciences Hydrologiques**, v. 42, p. 15 – 33. 1997.

- TATE, E. L.; GUSTARD, A. **Drought definition: a hydrological perspective**. In: VOGHT J. V.; SOMMA, F. Drought and drought mitigation in Europe. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, p. 23 – 48, 2000.
- THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. The water balance. **Climatology**, Centerton, v. 8, n. 1, p. 1 – 40, 1955.
- TU, X.; SINGH, V. P.; CHEN, X.; MA, M.; ZHANG, Q.; ZHAO, Y. Uncertainty and variability in bivariate modeling of hydrological droughts. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, doi: 10.1007/s00477-015-1185-3, 2015.
- VAN HUIJGEVOORT, M. H. J.; VAN LANEN, H. A. J.; TEULING, A. J.; UIJLENHOET, R. Identification of changes in hydrological drought characteristics from a multi-GCM driven ensemble constrained by observed discharge. **Journal of Hydrology**. v. 512. p. 421 – 434, 2014.
- VAN LOON, A. **Hydrological drought explained**. WIREs Water. v. 2. p. 359 – 392. doi: 10.1002/wat2.1085, 2015.
- VAN LOON, A. F.; LAAHA, G. Hydrological drought severity explained by climate and catchment characteristics. **J. Hydrol.** doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.10.059>, 2014.
- VAN LOON, A. F.; PLOUM, S. W.; PARAJKA, J.; FLEIG, A. K.; GARNIER, E.; LAAHA, G.; VAN LANEN, H. A. J. Hydrological drought typology: temperature-related drought types and associated societal impacts. **Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.**, v. 11, p. 10465 – 10514, 2014.
- VAN LOON, A. F.; VAN LANEN, H. A. J. A process-based typology of hydrological drought. **Hydrol. Earth Syst. Sci.** v. 16. p. 1915 – 1946, 2012.
- VAN OEL, P., KROL, M., HOEKSTRA, A., & DE ARAÚJO, J. C. 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(4), p. 857 – 867. doi: 10.1623/hysj.53.4.857, 2008.
- WANDERS, N.; WADA, Y. Human and climate impacts on the 21st century hydrological drought. **Journal of Hydrology**. v. 526, p. 208 – 220. doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.10.047, 2015.
- WILHITE, D. A.; GLANTZ, M. H. Understanding the drought phenomenon: The role of definitions. In: WILHITE *et al.* **Planning for drought toward a reduction of societal vulnerability**. WESTVIEW, p.11 – 14, 1987.
- WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **International Meteorological Vocabulary**. 2^a ed. WMO n.182, WMO, 784p. 1992.
- YANG, W. **Drought analysis under climate change by application of drought indices and copulas**. (Tese de Doutorado), Civil and Environmental Engineering, Portland State University, 2010.

YEVJEVICH, V. An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts, **Hydrology Papers**, 23, Colorado State University, Fort Collins, USA, 1967.

_____. Methods for determining statistical properties of droughts. In: YEVJEVICH, V.; CUNHA, L.; VLACHOS, E. **Coping with droughts** Water Resources Publications, Colorado, p. 22 – 43, 1983.

ZELENHASIC, E.; SALVAI, A. A method of streamflow drought analysis. **Water Resour. Res.** v. 23(1), p. 156 – 168, 1987.