



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
PRÓ - REITORIA DE PESQUISA E PÓS - GRADUAÇÃO
MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS**

**VULNERABILIDADE DE RESERVATÓRIOS EM RIOS DE
ALTA VARIABILIDADE EM UM CENÁRIO DE MUDANÇAS
CLIMÁTICAS**

ANDRÉA PEREIRA CYSNE

FORTALEZA – CE

2007

ANDRÉA PEREIRA CYSNE

**VULNERABILIDADE DE RESERVATÓRIOS EM RIOS DE
ALTA VARIABILIDADE EM UM CENÁRIO DE MUDANÇAS
CLIMÁTICAS**

Dissertação à Coordenação do Curso de Mestrado
em Recursos Hídricos da Universidade Federal do
Ceará, como parte dos requisitos para obtenção
do título de mestre.

Orientadora: Prof.^a **Ticiane M. de Carvalho Studart - Doutora**

Fortaleza, 27 de julho de 2007.

Esta dissertação foi submetida como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos, outorgado pela Universidade Federal do Ceará, e encontra-se à disposição dos interessados na Biblioteca Central da referida Instituição.

A citação de qualquer trecho desta dissertação é permitida, desde que seja feita de acordo com as normas da ética científica.

Andréa Pereira Cysne

Dissertação aprovada em 27 de julho de 2007.

Examinadores:

Prof.^a Dr.^a Ticiane M. de Carvalho Studart (orientadora)
Universidade Federal do Ceará

Prof. Dr. Antônio Clécio Fontelles Thomaz
Universidade Estadual do Ceará

Prof. Dr. Raimundo Oliveira de Souza
Universidade Federal do Ceará

“Quando houver ameaça de danos sérios ou irreversíveis, a ausência de absoluta certeza científica não deve ser utilizada como razão para postergar medidas eficazes e economicamente viáveis para prevenir a degradação ambiental”.

Declaração do Rio de Janeiro – *Princípio da Precaução*

Dedico, especialmente, aos meus pais, Frederico e Velêda, e ao meu irmão Frederico Filho, pelo amor, carinho e incentivo que me ofereceram durante toda a vida.

Quero também dedicar aos meus familiares, em especial, a minha avó, Ivany Sepulveda Pereira, que sempre vibraram com as minhas conquistas.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço Deus, que me concedeu saúde, tranquilidade e determinação para conquistar esse objetivo. Obrigada por sempre estar presente na minha vida.

Sou grata, principalmente aos meus pais, pela educação que me proporcionaram e pelos exemplos de perseverança, honestidade, compreensão e amor. Muito obrigado por sempre acreditarem no meu potencial.

Ao Daniel, pelo apoio e incentivo, mesmo distante em alguns momentos do mestrado. Obrigada pelo carinho, amor e compreensão.

Especialmente à professora doutora Ticiane M. de Carvalho Studart, pelo carinho e amizade com que me orientou, transmitindo um pouco do seu vasto conhecimento; e também pelas palavras de estímulo e pelos conselhos sempre pertinentes.

Ao professor doutor José Nilson B. Campos, pela sua presteza em transmitir seus conhecimentos.

Ao professor doutor Raimundo de Oliveira Souza, pela suas palavras de incentivo, além da disponibilidade e auxílio nos momentos cruciais no decorrer do mestrado.

Aos professores doutores Antônio Clécio Fontelles Thomaz, Raimundo de Oliveira Souza, pela colaboração e disposição em participar desta banca examinadora.

À coordenação do Curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, na pessoa do professor doutor Marco Aurélio Holanda de Castro.

Aos queridos amigos: Vanessa Ueta, Alina de Moraes, Orleani Ramos, Carlos Roberto M. Leal Júnior, Fernando Fernandes, Ernani Cavalcante, Renata Luna,

Inês Texeira, Carolina Correia e Silvia Helena pela amizade, disponibilidade e carinho durante esse período.

Às amigas que não fazem parte do mestrado, mas que sempre estiveram presentes: Daniely Feitosa - Camila Moura, Marcela Melo, Mariana Farias e Roberta Tenório (*Panela*) - Aline Moura, Manuela Nogueira e Gabriela Romero.

A todos os funcionários do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, em especial a Edjane Lima, que contribuíram para a realização deste trabalho.

À Fundação CAPES, pela bolsa concedida, a qual possibilitou a efetivação desta pesquisa.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
2.1	Mudanças climáticas.....	24
2.2	Simulação de Monte Carlo.....	35
3	METODOLOGIA	39
3.1	Operação simulada do reservatório	39
3.2	O comportamento da vazão regularizada.....	42
3.3	O programa utilizado - SIMRES	44
3.3.1	Fragmentação dos deflúvios	45
3.4	Geração das séries sintéticas	47
3.5	Dados utilizados.....	48
3.5.1	Vazões afluentes ao açude Caxitoré.....	48
3.5.2	Precipitação	49
3.5.3	Evaporação.....	50
3.5.4	Evaporação líquida	51
3.6	Cenários de mudanças climáticas avaliadas.....	51
4	RESULTADOS.....	54
4.1	Cenário a	54
4.1.1	A influência da capacidade do reservatório.....	58
4.2	Cenário <i>b</i>	59
4.3	Cenário <i>c</i>	64
5	CONCLUSÕES.....	80
	ANEXOS	83

GLOSSÁRIO	87
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	89

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: O efeito estufa. (Meira, 2002)	19
Figura 2.1 - Concentração do dióxido carbônico na atmosfera de Mauna Loa, Hawaii. (Fonte: http://www.mlo.noaa.gov/programs/coop/scripps/img/img_scripps_co2_record.gif).....	25
Figura 2.2 - Concentrações atmosféricas do dióxido de carbono, metano e óxido nitroso ao longo dos últimos 10.000 anos (painéis grandes) e desde 1750 (painéis inseridos) (Fonte: IPCC 2007). 26	
Figura 2.3 - Comparação das mudanças observadas de escala continental e global na temperatura da superfície, com resultados simulados por modelos climáticos, usando forçamentos naturais e antrópicos (Fonte: IPCC, 2007).	27
Figura 2.4 - Mudanças relativas nas precipitações para o intervalo de 2090 a 2099, em relação ao período de 1980 a 1999. A esquerda é o cenário de dezembro a fevereiro e à direita de junho a agosto (Fonte: IPCC, 2007).	28
Figura 2.5 - Representação do Método de Monte Carlo para a obtenção das séries de vazões. (Adaptado de KELMAN, 1987).	37
Figura 3.1 - Exemplo do comportamento da vazão regularizada para um horizonte de simulação. Fonte: Studart (2000).	42
Figura 3.2 - Vazões médias mensais do rio Caxitoré.	49
Figura 3.3 - Precipitação média mensal na estação climatológica de Sobral.	50
Figura 3.4 - Evaporação média mensal na estação climatológica de Sobral.	51
Figura 4.1 - Comportamento da vazão regularizada, em termos de f_M , com CV variando entre 0,6 e 1,6 para $G=90\%$ e $f_K=1,0$	57
Figura 4.2 - Efeito do coeficiente de variação dos deflúvios (CV) na vazão regularizada de equilíbrio (f_M^*).	57

Figura 4.3 - Efeito da capacidade do reservatório (em termos de f_K) na vazão regularizada pelo reservatório (em termo de f_M) considerando $f_K=1,0, 1,5, 2,0$ e $2,5$, $G=90\%$ e coeficiente de variação dos influxos igual a: a) $CV=0,6$ e b) $CV=1,2$	60
Figura 4.4 - Comportamento da vazão de equilíbrio relativamente ao acréscimo da lâmina líquida (E_L), considerando o <i>Cenário b1</i> , para $f_K=1,0, 1,5, 2,0$ e $2,5$, $G=90\%$ e $CV=1,2$	63
Figura 4.5 - Comportamento da vazão de equilíbrio relativamente a diminuição da lâmina líquida (E_L), considerando o <i>Cenário b2</i> , para $f_K=1,0, 1,5, 2,0$ e $2,5$, $G=90\%$ e $CV=1,2$	64
Figura 4.6 - Influência do fator de capacidade (f_K) nas perdas da vazão regularizada no estado de equilíbrio para o <i>Cenário c1</i> , considerando $G=90\%$ e $CV=0,6$ a $1,6$	67
Figura 4.6 - Perdas na vazão regularizada no equilíbrio (Q^*) para $G=90\%$, $f_K=1,0$ e $CV=0,6$ a $1,6$	70
Figura 4.7 - Perdas na vazão regularizada no equilíbrio (Q^*) para $G=90\%$, $f_K=1,5$ e $CV=0,6$ a $1,6$	70
Figura 4.8 - Perdas na vazão regularizada no equilíbrio (Q^*) para $G=90\%$, $f_K=2,0$ e $CV=0,6$ a $1,6$	71
Figura 4.9 - Perdas na vazão regularizada no equilíbrio (Q^*) para $G=90\%$, $f_K=2,5$ e $CV=0,6$ a $1,6$	71
Figura 4.10 - Ganhos na vazão regularizada no equilíbrio (Q^*) para $G=90\%$, $f_K=1,0$ e $CV=0,6$ a $1,6$	77
Figura 4.11 - Ganhos na vazão regularizada no equilíbrio (Q^*) para $G=90\%$, $f_K=1,5$ e $CV=0,6$ a $1,6$	77
Figura 4.12 - Ganhos na vazão regularizada no equilíbrio (Q^*) para $G=90\%$, $f_K=2,0$ e $CV=0,6$ a $1,6$	78
Figura 4.13 - Ganhos na vazão regularizada no equilíbrio (Q^*) para $G=90\%$, $f_K=2,5$ e $CV=0,6$ a $1,6$	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Relações cota x volume acumulado do açude Caxitoré.	48
Tabela 3.2 - Precipitação mensal média na estação climatológica de Pentecoste.	50
Tabela 3.3 - Evaporação média na estação de Sobral	50
Tabela 3.4 - Evaporação líquida sobre o lago do açude Caxitoré.	53
Tabela 3.5 - Lâminas de evaporação líquida sobre o lago do açude Caxitoré, considerando o Cenário a.	53
Tabela 3.6 - Lâminas de evaporação líquida sobre o lago do açude Caxitoré, considerando o Cenário b.	53
Tabela 4.1 - Valores médios da vazão regularizada (hm^3/ano), para $f_K=1,0$, $G=90\%$, $V_0=\text{cheio}$ e o coeficiente de variação dos deflúvios naturais (CV) variando de 0,6 a 1,6.	56
Tabela 4.2 - Valores médios da vazão regularizada (em fator adimensional de capacidade), para $f_K=1,0$, $G=90\%$, $V_0=\text{cheio}$ e o coeficiente de variação dos deflúvios naturais (CV) variando de 0,6 a 1,6.	56
Tabela 4.3 - Vazão regularizada (f_M), considerando $G=90\%$, $CV=0,6$ e $1,2$ e $f_K=1,0$ a $2,5$	59
Tabela 4.4 - Valores de E_L para aumentos percentuais na lâmina variando entre 10 e 100%.	61
Tabela 4.5 - Valores de E_L para diminuições percentuais na lâmina variando entre 10 e 90%.	61
Tabela 4.6 - Vazão de equilíbrio (Q^*), considerando o aumento nas lâminas - Cenário <i>b1</i> - $CV=1,2$ e $G=90\%$	62
Tabela 4.7 - Vazão de equilíbrio (Q^*), considerando a diminuição nas lâminas - Cenário <i>b2</i> - $CV=1,2$ e $G=90\%$	64
Tabela 4.8 - Vazão regularizada no estado de equilíbrio (Q^*) para o Cenário <i>c1</i> , $f_K=1,0$ e $G=90\%$	65

Tabela 4.9 - Vazão regularizada no estado de equilíbrio (Q^*) para o Cenário c1, $f_K=1,5$ e $G=90\%$.	66
Tabela 4.10 - Vazão regularizada no estado de equilíbrio (Q^*) para o Cenário c1, $f_K=2,0$ e $G=90\%$.	66
Tabela 4.11 - Vazão regularizada no estado de equilíbrio (Q^*) para o Cenário c1, $f_K=2,5$ e $G=90\%$.	67
Tabela 4.12 - Perdas na vazão regularizada no estado de equilíbrio (Q^*) para o Cenário c1, $f_K=1,0$, $G=90\%$ e $CV=0,6$ a $1,6$.	68
Tabela 4.13 - Perdas na vazão regularizada no estado de equilíbrio (Q^*) para o Cenário c1, $f_K=1,5$, $G=90\%$ e $CV=0,6$ a $1,6$.	68
Tabela 4.14 - Perdas na vazão regularizada no estado de equilíbrio (Q^*) para o Cenário c1, $f_K=2,0$, $G=90\%$ e $CV=0,6$ a $1,6$.	69
Tabela 4.15 - Perdas na vazão regularizada no estado de equilíbrio (Q^*) para o Cenário c1, $f_K=2,5$, $G=90\%$ e $CV=0,6$ a $1,6$.	69
Tabela 4.16 - Vazão regularizada no estado de equilíbrio (Q^*) para o Cenário c2, $f_K=1,0$ e $G=90\%$.	73
Tabela 4.17 - Vazão regularizada no estado de equilíbrio (Q^*) para o Cenário c2, $f_K=1,5$ e $G=90\%$.	73
Tabela 4.18 - Vazão regularizada no estado de equilíbrio (Q^*) para o Cenário c2, $f_K=2,0$ e $G=90\%$.	74
Tabela 4.19 - Vazão regularizada no estado de equilíbrio (Q^*) para o Cenário c2, $f_K=2,5$ e $G=90\%$.	74
Tabela 4.20 - Perdas na vazão regularizada no estado de equilíbrio (Q^*) para o Cenário c2, $f_K=1,0$, $G=90\%$ e $CV=0,6$ a $1,6$.	75
Tabela 4.21 - Perdas na vazão regularizada no estado de equilíbrio (Q^*) para o Cenário c2, $f_K=1,5$, $G=90\%$ e $CV=0,6$ a $1,6$.	75
Tabela 4.22 - Perdas na vazão regularizada no estado de equilíbrio (Q^*) para o Cenário c2, $f_K=2,0$, $G=90\%$ e $CV=0,6$ a $1,6$.	76

Tabela 4.23 - Perdas na vazão regularizada no estado de equilíbrio (Q^*) para o Cenário $c2$, $f_K=2,5$, $G=90\%$ e $CV=0,6$ a $1,6$	76
---	----

Tabela 4.24 - Relação de reservatórios do Nordeste semi-árido e do coeficiente de variação das vazões afluentes anuais aos mesmos.	79
--	----

LISTA DE SÍMBOLOS

CV - Coeficiente de variação dos deflúvios

f_K - Fator adimensional de capacidade

f_M - Fator adimensional de retirada

f_M^* - Vazão adimensional de equilíbrio

H - Horizonte de simulação

G - Nível de garantia

K - Capacidade do reservatório

M - Volume anual regularizado com G% de garantia anual

Q^* - Vazão de equilíbrio

α - Fator de forma do reservatório

σ - Desvio-padrão

μ - Volume afluente médio anual

RESUMO

Fala-se hoje muito sobre as possíveis mudanças climáticas como resultado das emissões de gases na atmosfera. Embora não seja de comum acordo, grande parte da comunidade científica acredita que acontecerá uma elevação na temperatura média global, o qual pode provocar, por exemplo, um aumento médio nos níveis dos oceanos. Associada a isto, há também um consenso de que haverá significativas transformações no regime pluvial e de evaporação em várias partes do planeta. Entretanto, a quantificação dessas mudanças, em locais específicos, ainda necessitam de mais estudos, os quais permitirão avaliações mais conclusivas a respeito do tema. Sendo assim, o presente trabalho procurou jogar um pouco de luz neste tema e, considerando alguns cenários de alteração nos padrões de precipitação e evaporação (considerando a evaporação líquida = $E-P$), avaliou os impactos destas mudanças climáticas na vazão regularizada de reservatórios no Nordeste semi-árido, cujos rios apresentam altos coeficiente de variação dos deflúvios anuais. Observou-se que em rios menos variáveis – CV iguais a 0,6 e 0,8 – é necessário que a lâmina líquida (E_L) aumente 60% para que o reservatório perca cerca de 10% de sua vazão regularizada. Já para rios de maior variabilidade - CV iguais a 1,4 e 1,6 – a lâmina líquida precisaria de um aumento de apenas 30%, para que o reservatório fosse objeto desta mesma redução. Concluiu-se, portanto, que como a maioria dos reservatórios do Nordeste semi-árido localiza-se em rios que apresentam coeficientes de variação dos deflúvios anuais em torno de 1,2 a 1,6, uma atenção maior deverá ser dada aos mesmos, uma vez que se mostraram bastante sensíveis as variações climáticas.

ABSTRACT

It is much talked nowadays about the possible climatic changes as a result of the gas emission on the atmosphere. Although it is not a common agreement, a great part of the scientific community believe that an elevation of the measured global temperature will occur, which can provoke, for example, a medium increase on the ocean levels. Associated to this, there is also a consensus that significant transformations will happen on the pluvial and evaporation regimen around the world. However, the quantification of these changes, on specific locations, is still needed more studies, which can allow more conclusive evaluations about the theme. With that been said, this study tried to put some light on this theme, and considering some scenarios of alteration on the precipitation patterns and evaporation (considering liquid evaporation = $E-P$) it was evaluated the impact of these climatic changes in reservoirs yield at Northeast Semi-Arid of Brazil. whose rivers present high coefficient of variation of the annual emanations. It was observed that in rivers less variable – CV equal to 0,6 and 0,8 – it is necessary that the net evaporation EL increase 60% so that the reservoir can lose about 10% of its regularized outflow. But for rivers with high variability – CV equal to 1,4 and 1,6 – the net evaporation – would need a increase of just 30% so that the reservoir could be the object of the same reduction. It was concluded that, as most of the half-barren northeast's reservoirs are located on rivers that present variation coefficients of the annual emanations in lathe of 1,2 to 1,6 , a greater attention should be given to these, since it showed sensible enough to the climatic variations.

1 INTRODUÇÃO

Ao longo dos últimos anos, os problemas ambientais assumiram nova dimensão. Quando começou a se pensar em meio ambiente, a preocupação dizia respeito às espécies ameaçadas de extinção. Atualmente, o que preocupa os mais diversos setores da sociedade e da comunidade científica é a percepção de que o homem, se continuar utilizando os recursos naturais de maneira insensata, será objeto de sérias conseqüências.

As questões ambientais passaram a ser regulamentadas desde 1972, quando a ONU (Organização das Nações Unidas) realizou a Primeira Conferência sobre o Meio Ambiente, em Estocolmo, onde se tratou da relação homem–poluição e suas conseqüências para o meio ambiente. Várias convenções foram realizadas, a partir de então, com um enfoque mais voltado para os grandes temas globais, dentre estas, tem destaque *The Changing Atmosphere: Implications for Global Security* (Conferência Mundial sobre Mudanças Atmosféricas), realizada em 1988. Este evento se tornou um marco, pelo fato de que induziu a criação do Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudança Climática), composto por cerca de 300 cientistas de 20 e tantos países.

As mudanças climáticas estão, de fato, no rol das principais preocupações dessas últimas décadas. Segundo Houghton (2005), elas são conseqüências dos impactos da atividade antrópica no clima, sendo de particular importância, a queima de combustíveis fósseis (como carvão vegetal, óleo e gases) e o desmatamento em larga escala.

O efeito estufa (Figura 1.1) - fenômeno natural necessário à vida na terra - é o grande vilão da atualidade, em função do aumento significativo das concentrações de gases estufa (GEE) na atmosfera, como o dióxido de carbono (CO₂), o metano (CH₄), o ozônio (O₃) e o óxido nitroso (N₂O).



Figura 1.1: O efeito estufa. (Meira, 2002)

De acordo com previsões feitas pelo IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), pode ocorrer uma elevação de 1,1 a 6,4 °C na temperatura média global entre os anos de 1990 a 2100. Apesar de se saber, em escala global, as possíveis consequências das alterações climáticas - secas e enchentes, elevação dos níveis dos mares, mudança do padrão das precipitações - existe grande dificuldade em quantificar em escala local estes impactos.

O semi-árido nordestino está inserido em uma região entre as mais vulneráveis do mundo às adversidades climáticas. As crises no armazenamento de água nos reservatórios e as frequentes secas comprovam esse fato. Sendo assim, a investigação das prováveis consequências das alterações do clima nos estoques de água nessa região se torna extremamente importante.

Região que apresenta chuva concentrada em poucos meses, a água é armazenada na estação chuvosa e utilizada no período de estiagem. As vazões afluentes no período úmido são convertidas em *evaporação* (perdas irreversíveis), *sangria*, sobre a qual o reservatório não exerce controle, e por meio da *vazão regularizada*, que consiste na água controlada pelo açude, e que se destina aos mais variados usos.

No presente trabalho, pretende-se, pois, avaliar a influência da mudança dos padrões da precipitação e da evaporação (considerando a evaporação líquida = $E-P$) na vazão regularizada de reservatórios no semi-árido.

Para determinação das vazões regularizadas, utilizou-se o Método de Monte Carlo, que consiste na geração de séries de vazões sintéticas seguida pela operação simulada do reservatório, obedecendo a regras pré-determinadas.

Nas simulações, utilizaram-se os dados da série histórica de vazões naturais de um rio típico da região e a curva cota x volume do açude Caxitoré. Apesar de se haver empregado os dados de um reservatório específico, os resultados não se restringem a ele, vez que se adotaram diferentes valores da capacidade e influxos com diferentes coeficientes de variação dos deflúvios.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No contexto mundial, as questões ambientais começaram a ser regulamentadas em 1972, quando a ONU (Organização das Nações Unidas) realizou a Primeira Conferência sobre o Meio Ambiente, em Estocolmo. Nessa reunião, tratou-se da relação homem – poluição e suas conseqüências para o meio ambiente. Naquela ocasião, foi declarada a necessidade de os países desenvolvidos e em desenvolvimento exercerem um controle mais efetivo nas questões pertinentes à poluição ambiental.

Em 1983 foi criada a Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento (CMMAD), também conhecida como a Comissão Brundtland, que teve como objetivo realizar audiências mundiais e produzir um relatório com suas conclusões, abordando o meio ambiente e o desenvolvimento (PNUMA, 2004). A Comissão realizou reuniões públicas em regiões desenvolvidas e em desenvolvimento, permitindo que os diferentes grupos expressassem suas opiniões sobre assuntos importantes, tais como transferências de tecnologias, água, energia, agricultura e desenvolvimento sustentável em geral. O relatório final da Comissão, intitulado “*Nosso Futuro Comum*” (*Our Common Future*), mais conhecido como Relatório de Brundtland, foi publicado em 1987. Esse documento aborda, principalmente, a necessidade de se estabelecer um processo de desenvolvimento sustentável, no plano global, possibilitando criar condicionantes para o uso dos recursos naturais, sendo mantido um padrão de sustentabilidade para os principais ecossistemas da Terra.

O Relatório propõe ainda algumas medidas de caráter sócio-ambiental, para o alcance de um cenário sustentável, como a limitação das populações, garantias dos recursos básicos, como água, alimento e energia, de longo prazo, além da preservação da biodiversidade e dos ecossistemas. Sugere, também, dentre outras medidas, a criação de estratégias pelas organizações, como órgãos e instituições internacionais de financiamento, para um desenvolvimento sustentável.

A importância e repercussão do Relatório de Brundtland no mundo científico e acadêmico foram avaliadas Schubert e Láng (2005), através de uma pesquisa em 2.434 artigos oriundos de 79 países. Os autores concluíram que o Documento, além de ter grande repercussão nos programas políticos, está presente em grande quantidade de literatura científica e escolar, e que é provável o conceito de sustentabilidade ficar em evidência em virtude das consequências sociais ali referidas.

Em 1988, realizou-se em Toronto, a Conferência Mundial sobre Mudanças Atmosféricas (*The Changing Atmosphere: Implications for Global Security*). Esta foi um marco pelo fato de que induziu a criação do Painel Intergovernamental sobre Mudança Climática (*Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC*). O IPCC, até os dias atuais, é composto por três grupos: o primeiro estuda os aspectos científicos do sistema e da mudança climáticos. O segundo avalia os impactos, a adaptação e a vulnerabilidade da humanidade e dos sistemas naturais às mudanças climáticas, analisam suas consequências e também as opções para a adaptação necessária a essas consequências. O último analisa as possibilidades para limitar a emissão de GEE (gases do efeito estufa), de mitigação da mudança climática e as consequências dessas medidas do ponto de vista socioeconômico.

O primeiro relatório de avaliação do IPCC, publicado em 1990, afirma que a mudança climática representaria, de fato, uma ameaça à humanidade. O segundo relatório, publicado em 1995, sugere que o balanço das evidências indica nítida influência do homem sobre o clima, oriundo das emissões GEE. Já, o terceiro relatório (2001) assinala que há novas e mais fortes evidências de que a maior causa do aquecimento global observado nos últimos cinquenta anos pode ser atribuído a atividades humanas. Entre os vários princípios que norteiam a Convenção da ONU sobre a Mudança do Clima, destaca-se o *princípio da precaução*, que preconiza que “a falta de plena certeza científica não deve ser usada como razão para postergar medidas...” (PEREIRA e MAY, 2003).

Vinte anos após a Conferência de Estocolmo, a ONU promoveu a *Segunda Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento* (CNUMAD), também conhecida como *Cúpula da Terra* ou *Rio - 92*, realizada em 1992, no Rio de Janeiro. A Rio-92 reuniu delegações de cerca de 160 países, com a finalidade de se estabelecer metas para uma condição ambiental mais saudável no futuro. Dentre outros objetivos, a Conferência tentou chamar a atenção das nações para os problemas ambientais e globais, como mudança climática, destruição da camada de ozônio, poluição, desmatamento, desertificação e degradação do solo, bem como a perda da diversidade biológica. Enfatizou ainda a idéia de, que alguns países deveriam adotar políticas e medidas mitigatórias para fazer com que os níveis de emissão antrópica do dióxido de carbono retornassem aos patamares propostos em 1990. Um dos principais resultados do evento foi a Agenda 21, que visava a tornar possível repensar o planejamento. Com ela, buscaram-se as bases de um plano de ação e de um planejamento participativo na contextura global, nacional e local, de forma gradual e negociada, tendo como meta um novo paradigma econômico e civilizatório.

Após 1992, houve diversos outros encontros internacionais, entre os quais o realizado em Kyoto. O Protocolo de Kyoto, resultado do encontro, obriga os países industrializados que assinaram o acordo, a reduzirem entre 8 e 10 % a quantidade de emissões dos gases estufa, no período entre 2008 e 2012 (Pereira e May, 2003). As reduções nas emissões deverão acontecer em vários setores da economia.

Para que o Protocolo entre em vigor, é necessário que pelo menos 55 países, que representem ao menos 55% das emissões de GEE, aprovem o acordo (Rocha, 2003). Em 2003, cerca de 102 países, que representavam juntos 43,9% das emissões, tinham aprovado ou estavam em fase de aprovação.

No Brasil, o Protocolo foi aprovado no dia 19 de junho de 2002, e sancionado pelo presidente da República, Fernando Henrique Cardoso, em 23 de julho do mesmo ano.

2.1 Mudanças climáticas

Os gases estufa promovem a retenção da radiação infravermelha na atmosfera, favorecendo, assim, o aquecimento da superfície da terra e a camada inferior da atmosfera. De acordo com Goudie e Heather (1997), os gases do efeito estufa - vapor d'água, dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), ozônio (O_3) e óxido nitroso (N_2O) - estão presentes naturalmente na atmosfera e são de fundamental importância para manter a temperatura da terra habitável. Leggett (1992) comenta que, se não houvesse a presença de CO_2 na atmosfera, a temperatura na superfície terrestre seria cerca de 33°C abaixo do que é atualmente.

Estudos apontam, no entanto, que a partir da Revolução Industrial, as emissões de gases estufa aumentaram consideravelmente, em virtude do intensivo consumo dos combustíveis fósseis e das queimadas nas florestas. Segundo Goudie e Heather (1997), essa concentração passou de 270 ppmv (partes por milhão por unidade de volume), no período pré-industrial, e excedeu 350 ppmv em 1997.

A preocupação com a sua produção excessiva surgiu com arrimo de estudos vinculados aos processos de circulação atmosférica, e em razão da mudança de comportamento da radiação térmica, que se propaga, chegando ou saindo, em forma de reflexão, da superfície do Planeta. Estudos mostram que, com a presença mais intensa de concentrações de gases, como dióxido de carbono e metano, há um aprisionamento da radiação refletida em direção à atmosfera, fazendo com que esta camada mais próxima da superfície da Terra se torne mais quente, o que caracteriza o aumento anômalo de temperatura nesta área.

Um estudo pioneiro na determinação das mudanças climáticas foi levado a termo por Charles D. Keeling, o qual mediu com alta precisão as concentrações de dióxido de carbônico na atmosfera, em Mauna Loa, Hawaii. As concentrações deste gás na atmosfera para o período de 1958 a 2005 podem ser

observadas no gráfico conhecido mundialmente como “a curva de Keeling” (Figura 2.1). Um padrão serrilhado é identificado ali e corresponde aos picos de CO₂ atingidos no inverno e no verão.

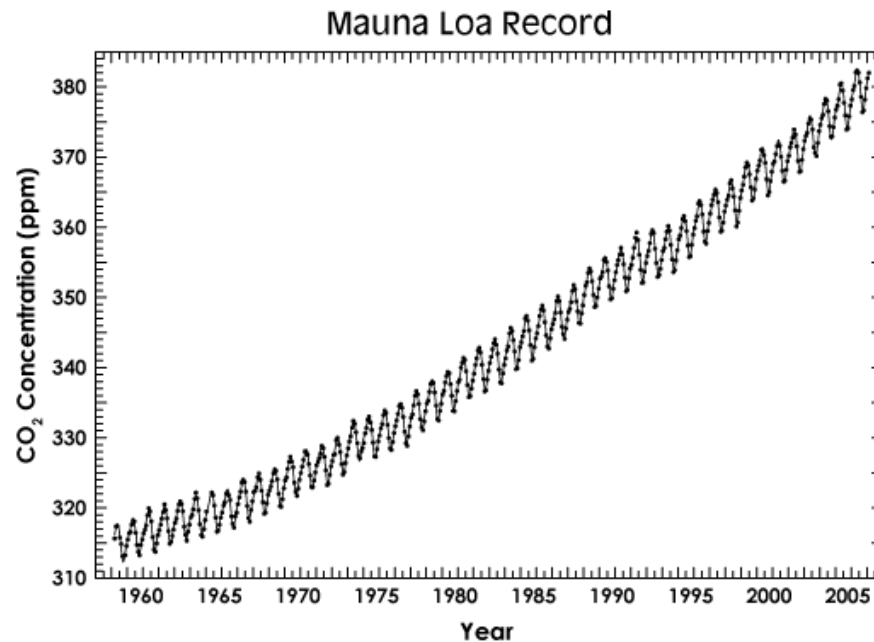


Figura 2.1 - Concentração do dióxido carbônico na atmosfera de Mauna Loa, Hawaii. (Fonte: http://www.mlo.noaa.gov/programs/coop/scripps/img/img_scripps_co2_record.gif).

Segundo o IPCC, no seu *Quarto Relatório de Avaliação*, publicado em 2007, as concentrações globais do dióxido de carbono, metano e óxido nitroso aumentaram significativamente em decorrência das atividades humanas desde 1750 e, atualmente, ultrapassam, em muito, os valores pré-industriais determinados. O aumento de CO₂ é consequência, principalmente, do uso de combustíveis fósseis e da mudança no uso da Terra. Já o metano e o óxido nitroso decorrem, principalmente, da agricultura (IPCC, 2007). Na Figura 2.2, observa-se a evolução das concentrações desses gases. E, ao se comparar, especificadamente, o dióxido de carbono com as sugeridas por Keeling, percebe-se grande tendência de aumento na emissão desse gás.

O *Quarto Relatório de Avaliação do Grupo de Trabalho I* do IPCC assinala ainda, que é provável ter havido um aquecimento antrópico significativo

ao longo dos últimos 50 anos, considerando a média de todos os continentes, exceto a Antártica.

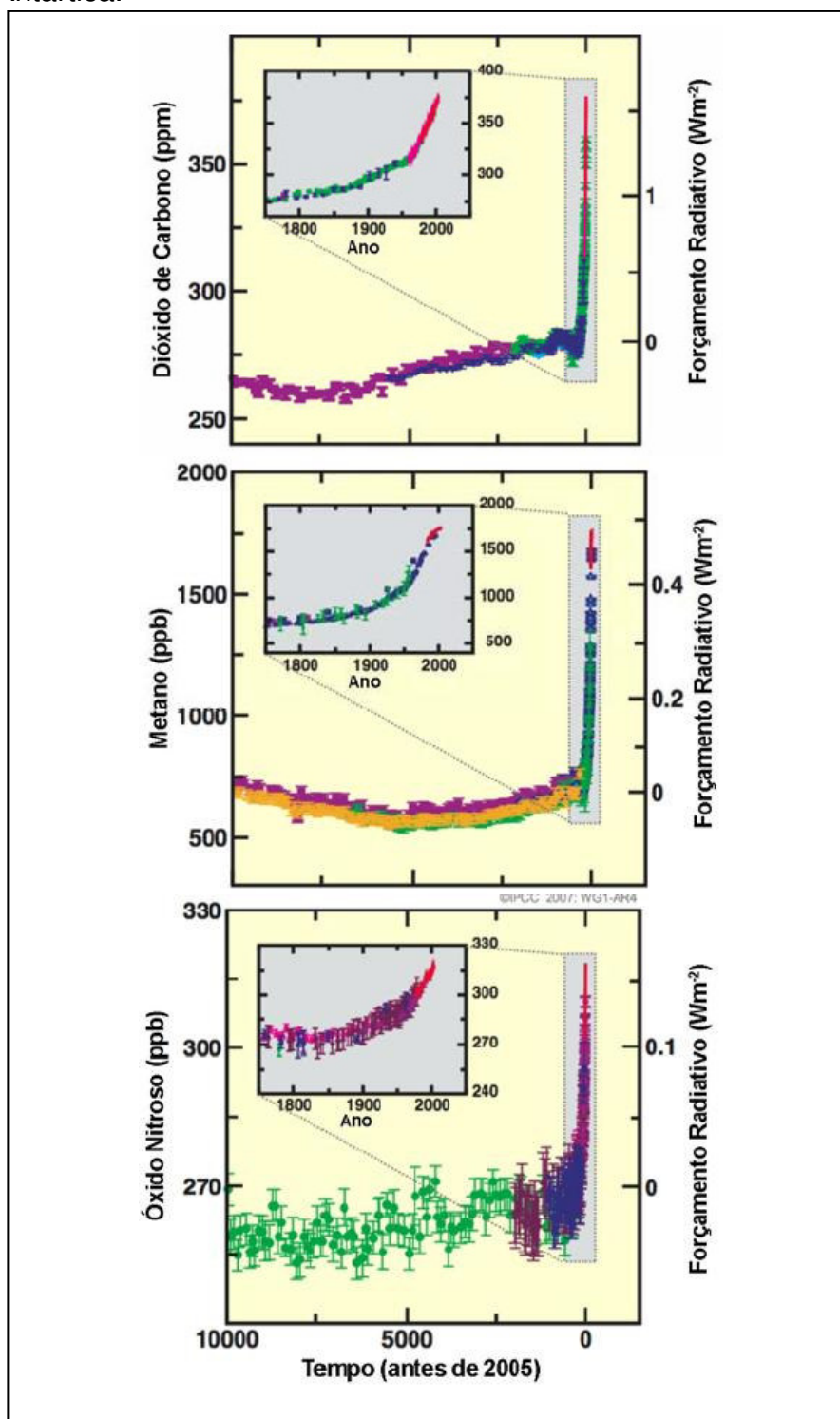


Figura 2.2 - Concentrações atmosféricas do dióxido de carbono, metano e óxido nitroso ao longo dos últimos 10.000 anos (painéis grandes) e desde 1750 (painéis inseridos) (Fonte: IPCC 2007).

Na Figura 2.3, observa-se a comparação das mudanças observadas numa escala continental e global. As médias das temperaturas foram observadas no período de 1906 a 2005, sendo as linhas tracejadas quando a cobertura espacial era menor do que 50%. As zonas azuis indicam a faixa de 5 a 95% das simulações dos modelos climáticos, considerando apenas os forçamentos naturais, e a zona vermelha mostra a mesma faixa, porém levando em conta os forçamentos naturais e antrópicos.

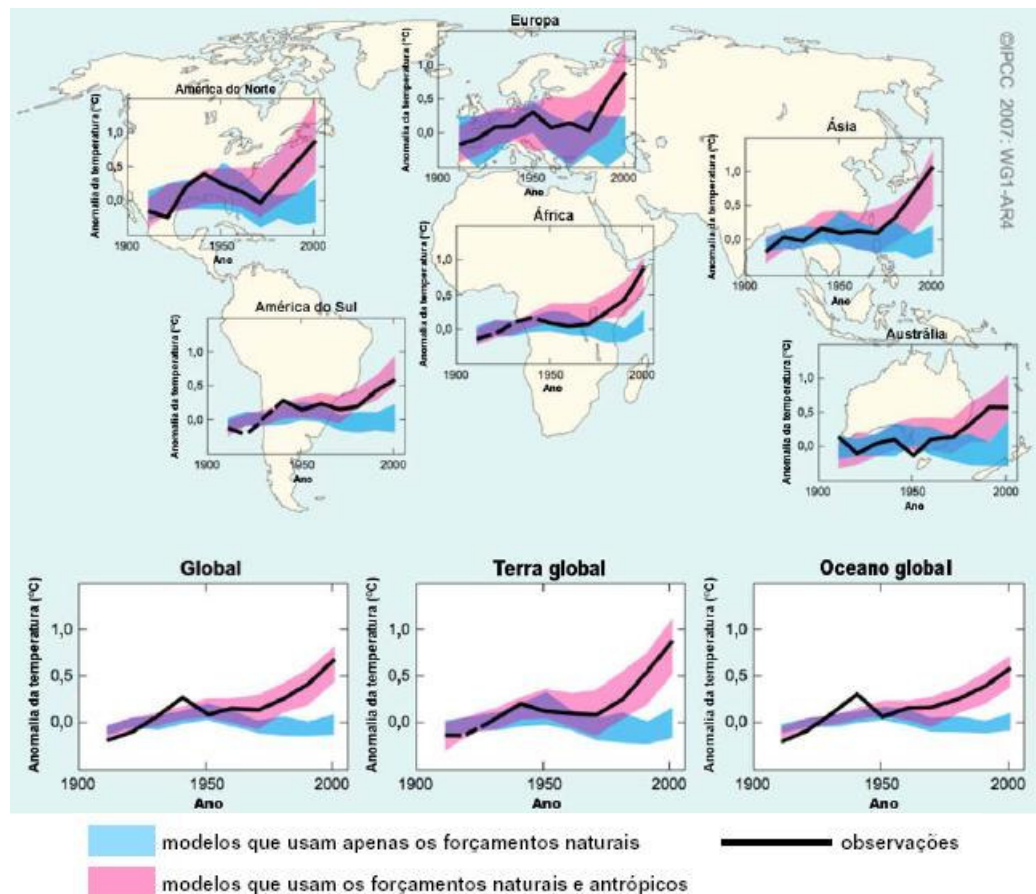


Figura 2.3 - Comparação das mudanças observadas de escala continental e global na temperatura da superfície, com resultados simulados por modelos climáticos, usando forçamentos naturais e antrópicos (Fonte: IPCC, 2007).

Segundo o mesmo texto, são muito prováveis os aumentos da quantidade de precipitação nas altas latitudes, enquanto é plausível a redução na maior parte das regiões subtropicais (em cerca de até 20% em 2100). Na Figura 2.4, verificam-se as mudanças nas precipitações para o período de 2090 a 2099, em relação ao período de 1980 a 1999. Os valores são as médias de vários

modelos, para um cenário determinado pelo *Relatório Especial sobre Cenários de Emissões* (RECE) do IPCC, denominado A1B, o qual é caracterizado principalmente pelo equilíbrio nas fontes de energia, utilizando combustíveis fósseis e fontes energéticas não fósseis.

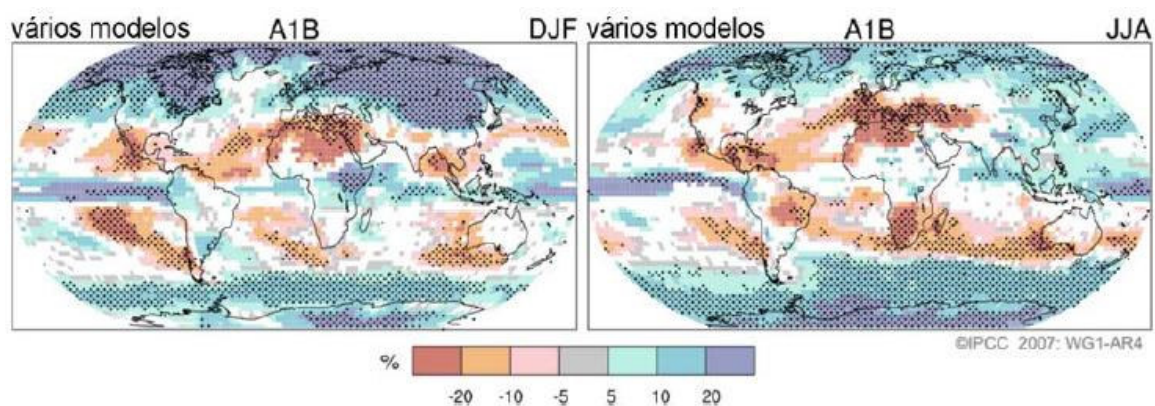


Figura 2.4 - Mudanças relativas nas precipitações para o intervalo de 2090 a 2099, em relação ao período de 1980 a 1999. A esquerda é o cenário de dezembro a fevereiro e à direita de junho a agosto (Fonte: IPCC, 2007).

De acordo com previsões feitas nesse Relatório, pode ocorrer uma elevação de 1,1 a 6,4 °C na temperatura média global entre 1990 e 2100. Apesar de se saber, em escala global, as possíveis conseqüências das alterações climáticas - secas e enchentes, elevação dos níveis dos mares, mudança do padrão das precipitações - existe grande dificuldade em quantificar, em escala local, estes impactos.

As variações na temperatura são facilmente mensuradas, entretanto as conseqüências destas na umidade, precipitação, evaporação e circulação atmosférica, entre outras, ainda são difíceis de prever. Alguns estudos são desenvolvidos nesta linha.

Hobbs (1997) utilizou métodos estocásticos para analisar as mudanças climáticas e as incertezas dos recursos hídricos. O autor apresentou as vantagens de estudar a Teoria Bayesiana na análise das incertezas, envolvendo as mudanças climáticas, enfatizando o estudo de risco nos recursos hídricos. Ele concluiu que, ao se comparar paradigmas alternativos na análise de incertezas -

como o modelo *fuzzy* - a Teoria Bayesiana é mais prática no ponto de vista teórico e relativamente mais fácil de entender.

Westmacott e Burn (1997) estudaram os efeitos das mudanças climáticas no regime hidrológico na bacia hidrográfica do rio Churchill-Nelson, no Canadá, utilizando um teste de tendência e um procedimento de regionalização. Quantificou-se a gravidade dos impactos das mudanças climáticas na bacia e utilizou-se do aumento da consciência a cerca das conseqüências futuras no planejamento do sistema de recursos hídricos e na estratégia a gestão. Os autores observaram que a magnitude dos eventos hidrológicos diminui com o tempo, enquanto o evento de escoamento oriundo do degelo ocorre mais cedo. A única exceção para esse comportamento ocorre nos valores de escoamento médios mensais na primavera, os quais exibiram uma tendência de crescimento causado pelo potencial degelo desse mesmo período.

Bouraoui et al. (1998) usaram o modelo ANSWERS (*Areal Non point Source Watershed Environmental Response Simulation*) - que simula a infiltração, o escoamento superficial e a evapotranspiração em uma bacia hidrográfica - acoplado a uma estrutura SIG, para avaliar efeitos esperados de mudanças climáticas e do uso do solo no balanço hídrico, especificamente na drenagem nas zonas de raízes das culturas. Os autores mostraram que, ao se dobrarem as concentrações de CO₂ na atmosfera, isto, provavelmente resultará em um impacto negativo sobre as águas subterrâneas, pela redução das recargas e crescimento de algumas necessidades do processo de irrigação.

Hulme et al. (1999) apresentaram um conjunto de cenários utilizados em estudos para pesquisar os impactos das mudanças climáticas em diversos sistemas, incluindo os recursos hídricos. Esses cenários foram obtidos em experimentos realizados nos quatro anos que antecederam a publicação do artigo deles pelo Hadley Centre, utilizando para tal sucessivas versões e modelos climáticos globais. Os cenários foram propostos para três períodos futuros, com origem no ano de 1990. Assim, foram realizadas simulações para os anos de 2020, 2050 e 2080. Os autores, entretando, não apresentaram resultados

conclusivos a respeito da pesquisa. Segundo eles, as principais dificuldades são as limitações para a determinação dos cenários, e, principalmente, as fontes de incertezas presentes nas simulações.

Xu (1999) aplicou um modelo de balanço hídrico para antecipar os impactos das mudanças climáticas, incorporando, mês a mês, as variações sazonais do clima, estudando, assim, parâmetros relacionados com o degelo, flutuações do escoamento subterrâneo e características da umidade do solo. Em virtude das previsões do efeito das mudanças climáticas, o autor constatou certa dificuldade na calibração do processo, onde os dados dos sistemas de mudança não estavam disponíveis na época, prejudicando, assim, a validação do modelo.

Mimikou et al. (2000) avaliaram os impactos das mudanças climáticas no escoamento superficial dos recursos hídricos e na qualidade de água. Foram considerados dois cenários de mudanças climáticas com base no Modelo de Circulação Global (*General Circulation Model - GCM*), sendo um transiente (HadCM2) e outro no equilíbrio (UKHI). Foi aplicado um modelo hidrológico em uma região central da Grécia e simulados os efeitos dos cenários no escoamento médio mensal. Aplicou-se um modelo de desenvolvimento nos rios para simular a qualidade da água abaixo de um ponto de lançamento sob condições de mudanças de corrente e câmbios climáticas. Os cenários indicaram aumento de temperatura e queda na precipitação. Essas mudanças resultam de expressiva mudança no escoamento médio mensal e significativa redução na qualidade da água, causada pela redução do escoamento médio mensal.

Guo et al. (2002) desenvolveram estudo com base no modelo de balanço mensal em uma macro-escala para prever os impactos das mudanças climáticas na China. Utilizaram técnicas de SIG (Sistema de Informação Geográfica) como ferramenta para a análise topográfica das redes de rio, do uso da terra e das características de vegetação e solo. Os modelos dos parâmetros foram relacionados por métodos de regressão e otimização. Estimaram os parâmetros do modelo e desenvolveram um esquema de parametrização para cada ponto da malha. Os resultados indicaram que o escoamento é mais sensível

às variações de precipitação do que ao aumento de temperatura. E mostram, ainda, que as mudanças climáticas poderão representar grandes desafios nas práticas da gestão dos recursos hídricos, em decorrência das incertezas no processo.

Werritty (2002) realizou ensaio com base em dados hidrológicos produzidos na Escócia, com a intenção de auxiliar os gestores diante das incertezas ambientais. Apresentou um trabalho abordando duas estratégias. Na primeira, o autor exibiu uma análise de tendência de precipitação e escoamento entre os anos de 1960 e 1970, observados em termo de variabilidade de longa duração, com esteio nos dados registrados. Na segunda estratégia, ele se baseou no cenário de mudanças climáticas, que relaciona a precipitação e a temperatura para alimentar o modelo chuva-deflúvio. Em termos de planejamento de recursos hídricos Werritty concluiu que essas mudanças devem ser consideradas em primeira ordem de aproximação, porquanto eles não levam em consideração as variabilidades climáticas naturais, e este fato pode produzir valores absolutos diferentes de outros cenários que forem utilizados.

Yu et al. (2002) estudaram os impactos das mudanças climáticas nos recursos hídricos da região sul de Taiwan. Utilizaram um teste estatístico não paramétrico para diagnosticar as tendências históricas de variáveis meteorológicas, como a temperatura média diária, a umidade relativa e algumas probabilidades de precipitação média diária. Foi utilizado o modelo chuva-deflúvio para originar o escoamento sob futuras condições climáticas, aplicando as tendências das variáveis meteorológicas. Os resultados analíticos indicaram que as probabilidades de ocorrência de precipitação diária influenciam a produção de chuva, de modo que a geração de escoamento para futuras condições cresça durante as estações úmidas e diminua no decurso das estações secas.

Estudo apresentado pelos pesquisadores Ragab e Prudhomme (2002) abordou regiões áridas e semi-áridas em um contexto de mudanças climáticas e gestão dos recursos hídricos. Os autores simularam o clima global de acordo com as concentrações de emissões de gases estufas, e assumiram o cenário de

emissão proposto pelo IPCC (*Intergovernmental Painel Change Climate*) em 1995. Diversos países fizeram parte do estudo, dentre eles, nações do Oriente Médio, África e Austrália. Os resultados, analisados para um horizonte de tempo de 2050, mostraram que para a estação seca (abril a setembro), no ano de 2050, o norte da África, parte do Egito e Oriente Médio terão reduzida a precipitação média anual entre 20 e 25% em relação à ocorrida em 2002. Essa redução é acompanhada por um aumento na temperatura média anual entre 2,0 e 2,75°C. No mesmo período, essa temperatura nas áreas costeiras do Mar Mediterrâneo crescerá cerca de 1,5°C, e a precipitação, no período do inverno, diminuirá entre 10 a 15%, porém, no Saara, ela poderá aumentar cerca de 25%. Ao sul da Austrália, observou-se crescimento na temperatura média anual de 1,0 a 1,5°C e redução na precipitação média anual de 20 a 25%, e, ao norte do país um aumento de 2,5 a 2,75°C na temperatura e redução entre 5 e 10% na precipitação.

Percebe-se que estudos como este, aplicados em uma escala global, permitem que sejam avaliados os impactos causados por mudanças climáticas em larga escala, mostrando, ainda, a relevância do tema em foco.

Os impactos das mudanças climáticas nas disponibilidades hídricas no Nordeste brasileiro foram avaliados por Campos et al. (2003), na bacia hidrográfica do açude Várzea do Boi, no Ceará. Duas metodologias foram utilizadas para estimar as disponibilidades hídricas do reservatório. Na primeira, a vazão regularizada foi estimada por intermédio da solução do balanço hídrico do reservatório, utilizando o método de Monte Carlo. Na segunda, a vazão regularizada é estimada para um reservatório infinito, segundo a formulação de Campos e Ibiapina (1997). Os impactos avaliados pelos autores seguiram dois padrões. O Padrão I considerou que a precipitação e evaporação cresceram a uma mesma taxa, enquanto o Padrão II considerou que, além do crescimento a uma mesma taxa da precipitação e evaporação, o coeficiente de escoamento superficial cresceria de acordo com uma regra polinomial. O estudo concluiu que, considerando o Padrão I, existe tendência de redução, tanto nas vazões regularizadas, quanto na eficiência do açude, porém, ao considerar o reservatório

infinito, existe uma tendência de aumento na vazão regularizada e diminuição na sua eficiência. Para o Padrão II, há tendência de crescimento nas vazões regularizadas, tanto para a topologia atual da bacia hidrográfica do açude quanto para a consideração do reservatório infinito, porém observaram que existiu uma diminuição na eficiência do reservatório.

Matondo et al. (2004) avaliaram os impactos das mudanças climáticas, na hidrologia e nos recursos hídricos do Reino da Suazilândia, localizado numa região entre a África do Sul e Moçambique. Utilizaram os resultados do Modelo de Circulação Global (MCG) - precipitação, evapotranspiração potencial, temperatura do ar etc. - como entrada para do modelo chuva-deflúvio. Os resultados apontaram que o impacto das mudanças climáticas afetará quase todos os setores das atividades humanas, notadamente, causado por sérias mudanças nas condições hidrológicas e nos recursos hídricos. Os autores não apresentaram, entretanto, resultados conclusivos a respeito dessa avaliação.

Fowler et al. (2005) aplicaram um modelo estocástico de precipitação para a geração de cenários de mudanças climáticas na região de Yorkshire, no Reino Unido. Apresentaram novas técnicas que permitiram a reprodução de séries históricas de precipitação, combinando a simulação de Monte Carlo e técnicas de amostragem, para preservar as séries históricas de correlação cruzada entre as duas sub-regiões do UK. Os cenários de mudanças climáticas demonstraram forte influência nos modelos de comportamento dos ventos e nas propriedades das precipitações. Ainda constataram que essa metodologia de simular potenciais mudanças na circulação atmosférica pode se transformar em poderosa ferramenta para avaliar, no futuro, o sistema da gestão de recursos hídricos e outras aplicações sob os impactos hidrológicos.

Fiorillo et al. (2007) desenvolveram estudo de análise de previsão em recursos hídricos mediante séries de descargas na primavera no rio Serino, na Itália. Os autores usaram dados de correlação com base em séries hidrológicas para estabelecer relação entre as descargas na primavera e as precipitações. Consideraram o clima do Mar Mediterrâneo, pois este causa rápido crescimento

na evapotranspiração e redução nas precipitações no período da primavera-verão. No estudo, investigaram os efeitos das mudanças climáticas nos eventos hidrológicos extremos e na frequência das secas. Os resultados apontaram que há grande sensibilidade da região para as de mudanças climáticas.

Krol e Bronstert (2007) aplicaram um modelo integrado regionalizado de impactos de mudanças climáticas na região semi-árida do Brasil para estudar a vulnerabilidade destes recursos naturais sob a ação dessas mudanças. O modelo apresentado é descrito sob o ponto de vista dinâmico das relações entre as forças climáticas, a disponibilidade de água, a agricultura e os processos sociais selecionados. Desenvolveram o modelo para simular o sistema complexo homem/meio ambiente no Nordeste brasileiro, levando em consideração os aspectos quantitativos, e procuraram estudar a sensibilidade dos recursos naturais regionais e dos aspectos sócio econômicos sob a ação de uma mudança climática. Os resultados permitiram concluir que as mudanças climáticas possuem enorme potencial de impacto na região, mostrando, ainda, que o escoamento em rios, a água de reservatórios e a produção agrícola podem ser seriamente afetados, comprometendo continuamente o desenvolvimento da região.

Jiang et al. (2007) realizaram um estudo por meio da simulação de seis modelos hidrológicos na bacia de Dongjiang, localizada ao sul da China, para verificar o impacto das mudanças climáticas. Foram comparadas e quantificadas as diferenças dos modelos, verificando a importância destes para a gestão dos recursos hídricos de uma região, de parte de um continente, ou mesmo de um continente como um todo. Basicamente, o estudo investigou os impactos das mudanças climáticas, induzidas pelo homem, na disponibilidade de água na bacia de Dongjiang. Utilizaram-se dados registrados de 29 anos de escoamento mensal e do clima da bacia em estudo. As análises revelaram que os seis modelos têm similar capacidade de reproduzir os componentes históricos do balanço hídrico, e ainda revelam que a maior diferença nos modelos ocorre quando estes são utilizados para avaliar impactos hidrológicos das mudanças climáticas. Finalmente, o estudo mostra que pode haver significantes implicações na investigação de

estratégias para abastecimento de água e controle de enchentes, em razão das mudanças climáticas.

2.2 Simulação de Monte Carlo

De acordo com o dicionário Aurélio, *simulação* é “uma experiência ou ensaio realizado com o auxílio de modelos”. Na Engenharia, os modelos matemáticos de simulação, ou simplesmente modelos de simulação, podem ser classificados em: estocásticos ou determinísticos. Segundo Bressan (2002), os modelos de simulações estocásticos possuem pelo menos uma variável aleatória de entrada no sistema, enquanto os determinísticos não fazem o uso das variáveis.

Consoante Yevjevich (1972), em sua maioria, os fenômenos hidrológicos ocorrentes na natureza – precipitação, evaporação, escoamento, transporte de sedimento etc. – são estocásticos, ou seja, controlados por leis de probabilidade. Acentua, ainda, que não existem processos hidrológicos puramente determinísticos e sim uma combinação de processos determinísticos e estocásticos, ou predominantemente estocásticos.

Os métodos utilizados para o dimensionamento de reservatórios são classificados, de acordo com Yevjevich (1967), como: empíricos, analíticos e experimentais, sendo classificado como método empírico, a simulação de operação de reservatório utilizando apenas uma série de observação. Já o método analítico admite que os deflúvios seguem uma distribuição de probabilidade (gama, log-normal etc.) e calculam analiticamente o desempenho do reservatório. A limitação do método consiste na impossibilidade de tratar regras de operação complexas. Nos métodos experimentais, admite-se que os deflúvios naturais seguem uma lei de probabilidade (gama, log-normal etc.), e daí são criadas inúmeras séries de vazões e executada a operação simulada do reservatório. De acordo com Andrade (1998), o método de Monte Carlo é um processo de simular modelos estatísticos, de forma a lidar experimentalmente com variáveis descritas por funções probabilísticas.

A Figura 2.5 representa, de maneira sucinta, a metodologia utilizada. Observando-a, suponha-se que se pretenda utilizar uma série histórica de n anos para operar o aproveitamento hídrico de um reservatório. Essa série será usada como dado de entrada em um modelo de simulação para produzir, como saída, uma grandeza relevante para o dimensionamento. Como a série histórica é somente uma das possíveis realizações de um processo estocástico, imagina-se que a natureza “sorteou” a série histórica segundo algum conjunto de leis probabilísticas (KELMAN, 1987).

Consoante o mesmo autor, novo sorteio resulta uma nova série, diferente da histórica, porém igualmente provável. É importante perceber que cada sorteio está associado a uma série de vazões, denominadas de série sintética. Como essas serão todas distintas entre si, não há garantia de que os resultados provenientes dessas simulações sejam iguais, como seria se apenas a série histórica estivesse disponível.

Por meio desse método, Freitas (2003) acentua que é possível originar inúmeras séries sintéticas com características estatísticas, como média e desvio-padrão iguais ao da série observada. Percebe-se que o método é importante ferramenta para os planejadores, pois com ele é possível simular os reservatórios com séries mais extensas do que as observadas.

O método de Monte Carlo permite executar várias regras de operações, diversas vazões afluentes e muitas capacidades, entre outros, tendo como limite simplesmente a capacidade computacional.

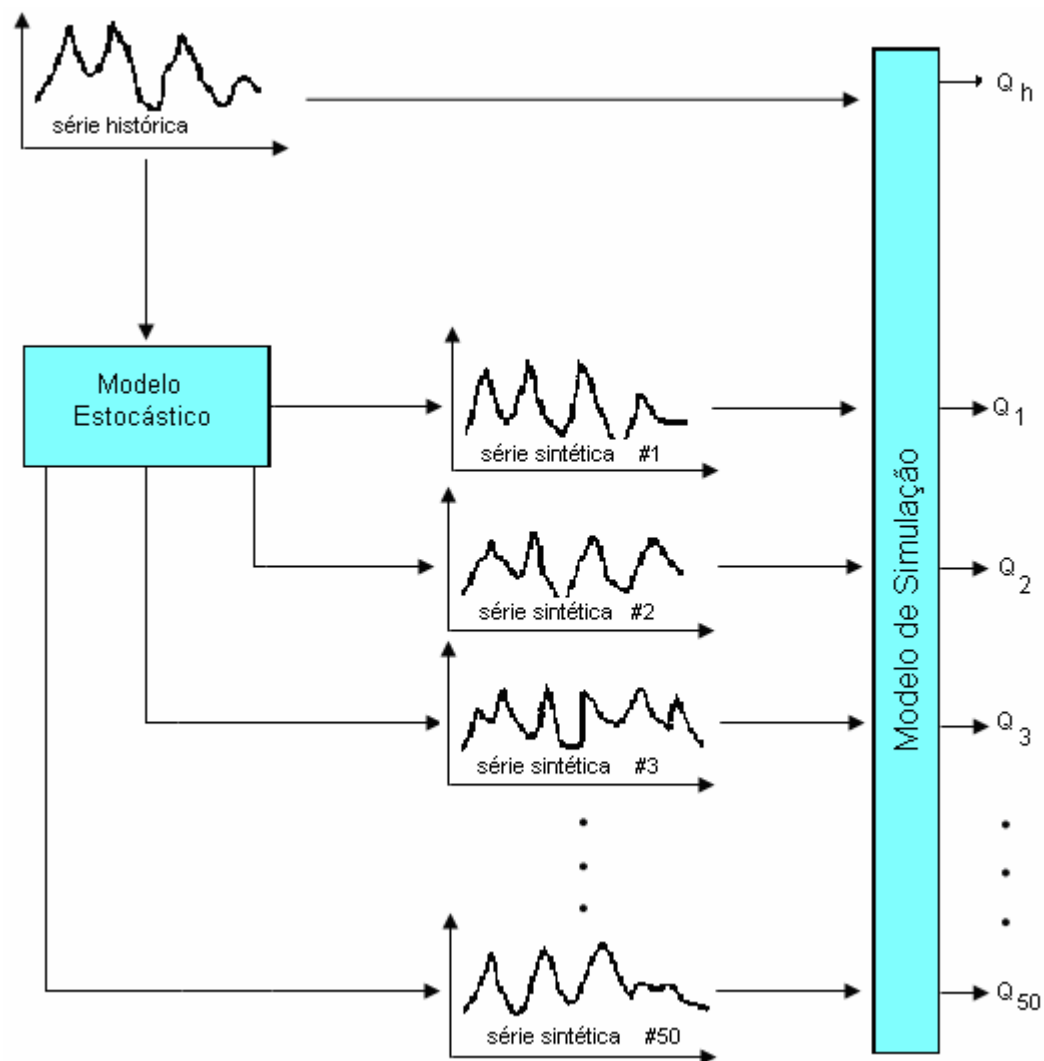


Figura 2.5 - Representação do Método de Monte Carlo para a obtenção das séries de vazões. (Adaptado de KELMAN, 1987).

Informa Sobol (1994) que o Método de Monte Carlo surgiu em 1949, com a publicação do artigo *The Monte Carlo Method* por Metropolis e Ulam, e assinala que o método é uma ferramenta na geração sintética de variáveis aleatórias de distribuições de probabilidade.

O Método de Monte Carlo, em se tratando do armazenamento dos reservatórios, possui grandes vantagens, quando comparado a métodos como o de Rippl, Teoria de Moran e do Range, em decorrência da sua grande versatilidade. Segundo Vose (1996), as principais vantagens da Simulação de Monte Carlo sobre os demais métodos são:

- as distribuições de probabilidades das variáveis não precisam ser aproximadas;
- correlações e outras interdependências podem ser modeladas;
- o nível de Matemática envolvido na simulação não é muito alto;
- existem *softwares* comercialmente disponíveis;
- níveis mais elevados de precisão podem ser obtidos pelo aumento do número de interações;
- cálculos matemáticos complexos podem ser incluídos sem muita dificuldade;
- o Método de Monte Carlo é amplamente reconhecido como técnica válida, de modo que os resultados de sua utilização podem ser facilmente aceitos;
- mudanças no modelo estocástico podem ser feitas rapidamente.

3 METODOLOGIA

A metodologia adotada no presente trabalho procurou avaliar os impactos das mudanças climáticas na vazão regularizada por um reservatório sob três diferentes cenários:

- *Cenário a* - analisou-se a influência dos coeficientes de variação dos deflúvios - CV variando entre 0,6 e 1,6 - na vazão regularizada;
- *Cenário b* - avaliou-se o impacto de possível mudança climática, na lâmina líquida (E_L) do reservatório, mantendo o coeficiente de variação dos deflúvios original do rio em estudo ($CV=1,2$),
- *Cenário c* – acoplaram-se os dois cenários anteriores, ou seja, avaliou-se o impacto das mudanças, variando o CV ($CV=0,6, 0,8, 1,0, 1,2, 1,4$ e $1,6$) e alterando a lâmina.

Com o intuito de analisar a variabilidade das vazões regularizadas pelo reservatório, sob os diferentes cenários, fez-se uso da simulação de Monte Carlo.

3.1 Operação simulada do reservatório

Utilizando a série sintética ou histórica das vazões afluentes ao reservatório, é possível simular quanto um reservatório regularizará, mediante a solução da equação do seu balanço hídrico. As vazões podem ser simuladas por meio de métodos experimentais e empíricos, respectivamente.

Diversas seqüências de vazões são geradas, na simulação estocástica, com a mesma média e o mesmo desvio-padrão da série histórica. E, com esteio nos resultados, pode-se estimar a vazão regularizada, baseada em uma análise probabilística do seu comportamento. Ainda é possível, na simulação estocástica, gerar-se apenas uma série sintética de vazões, longa o suficiente para o horizonte de simulação ser igual ao da série gerada, simulando, assim, o armazenamento dos reservatórios em seu estado de equilíbrio.

Neste experimento, as vazões regularizadas foram calculadas mediante a simulação estocástica, considerando o reservatório em seu estado de equilíbrio, para não haver interferência das condições iniciais.

Algumas premissas básicas são necessárias na operação simulada do reservatório e determinação de seu comportamento:

- I. a unidade de tempo é um mês;
- II. a retirada do reservatório é constante ao longo dos anos e no correr dos meses; e
- III. a contribuição líquida sobre o lago - precipitação menos evaporação - é admitida constante no curso dos anos, mas variável no decorrer dos meses.

A equação do balanço hídrico consiste em considerar as entradas iguais às saídas do reservatório.

$$dV/dt = E - S \quad (3.1)$$

onde:

dV/dt é a variação do volume ao longo do tempo;

E é o resultado de todas as entradas no sistema; e

S é o resultado de todas as saídas.

As entradas no sistema são caracterizadas pelas vazões afluentes e pelas precipitações sobre os espelhos d'água, sendo as saídas do sistema compostas por evaporações, retiradas para atender a demanda e o volume sangrado. A equação do balanço hídrico, onde se conferem as entradas e saídas do sistema, desenvolvida por Campos (1987), é descrita da seguinte forma::

$$V_{i+1} = V_i + (P_i - E_i) \times \left(\frac{A_{i+1} + A_i}{2} \right) + I_i - M_i - S_i \quad (3.2)$$

onde:

V_{i+1} e V_i representam os volumes de água estocados no reservatório no início dos meses $i+1$ e i , respectivamente;

P_i precipitação média sobre o espelho de água do açude durante o mês i ;

E_i é a lâmina média evaporada da superfície do lago durante o mês i ;

A_{i+1} e A_i representam as áreas do lago do reservatório no início dos meses $i+1$ e i , respectivamente;

I_i são os volumes afluentes ao reservatório durante o mês i ;

M_i é a retirada do reservatório durante o mês i ; e

S_i volume sangrado do reservatório.

O reservatório foi simulado, considerando um volume inicial V_0 , garantia G , horizonte de tempo H anos, onde H é a extensão da série de vazões. Primeiramente é estabelecida uma retirada mínima dentre $K/2$ e $\mu/2$. Ao término de cada ano, analisa-se se o volume anual armazenado atenderá a demanda; se não, considera-se que naquele ano houve falha.

As regras de operação dos reservatórios podem ser definidas pelas equações de 3.3 a 3.5.

$$V_{i+1} = 0, \text{ quando } \left(V_i + (P_i - E_i) x \left(\frac{A_{i+1} + A_i}{2} \right) - M_i + I_i \right) \leq 0 \quad (3.3)$$

$$V_{i+1} = \left(V_i + (P_i - E_i) x \left(\frac{A_{i+1} + A_i}{2} \right) + I_i \right), \text{ quando}$$

$$0 < \left(V_i + (P_i - E_i) x \left(\frac{A_{i+1} + A_i}{2} \right) - M_i + I_i \right) < K \quad (3.4)$$

$$V_{i+1} = K, \text{ quando } \left(V_i + (P_i - E_i) \times \left(\frac{A_{i+1} + A_i}{2} \right) - M_i + I_i \right) \geq K \quad (3.5)$$

Ao final de cada ano, é verificado se a retirada estipulada $M = (\min (K/2, \mu/2))$ satisfaz a freqüência de falhas pretendida. Se a retirada for maior do que a assumida inicialmente, então, se diminui a retirada; no caso contrário, aumenta-se a retirada. Nos dois casos, o reservatório é simulado novamente. Este procedimento é repetido até que se atinja o percentual de falhas pretendido.

3.2 O comportamento da vazão regularizada

Ao estudar o comportamento da vazão regularizada, Studart (2000) observou que, embora variando os volumes iniciais V_0 , conservando os demais parâmetros constantes e aumentando gradativamente os horizontes de simulação, com o passar do tempo, os valores de vazão regularizada convergirão, atingindo, assim, uma condição de equilíbrio, estado no qual a vazão regularizada independe do volume inicial V_0 adotado (Figura 3.1).

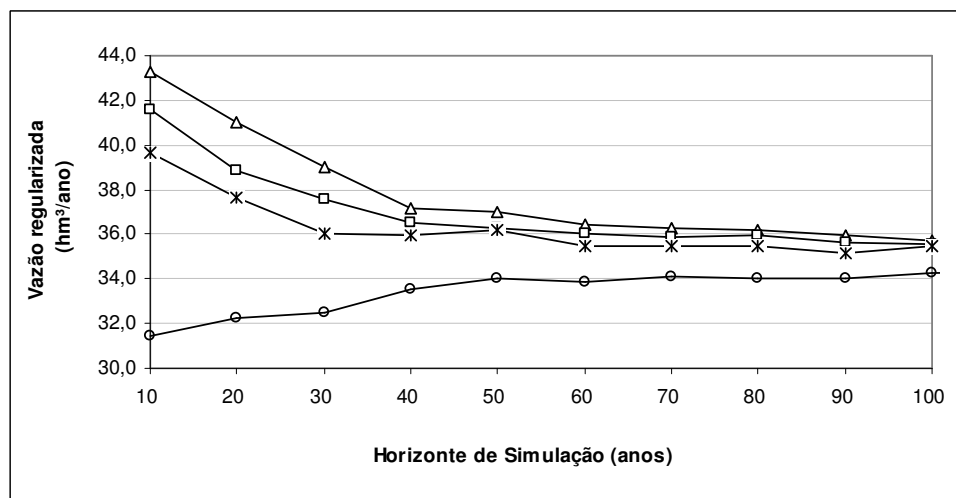


Figura 3.1 - Exemplo do comportamento da vazão regularizada para um horizonte de simulação. Fonte: Studart (2000).

Dessa maneira, o armazenamento de um reservatório é analisado por meio de dois estados distintos:

- estado transiente: $Q_r = f(\mu, \sigma, V_0, H, K, G, E_L, \alpha)$ e
- estado de equilíbrio: $Q_r = f(\mu, \sigma, K, G, E_L, \alpha)$

onde

Q_r vazão a ser regularizada pelo reservatório em questão;

μ média dos deflúvios anuais afluentes ao reservatório;

σ desvio-padrão dos deflúvios anuais afluentes ao reservatório;

V_0 volume inicial assumido para o reservatório;

H horizonte de planejamento (em anos);

K capacidade do reservatório;

G garantia (em %);

E_L evaporação líquida no reservatório; e

α fator de forma do reservatório.

O coeficiente de variação das séries dos deflúvios afluentes ao reservatório é dado por:

$$CV = \sigma / \mu \quad (3.6)$$

Forma agrupados alguns parâmetros, utilizando-se os fatores adimensionais de capacidade (f_K) e de retirada (f_M), definidos por Campos (1987):

$$f_K = K / \mu \quad (3.7)$$

$$f_M = M / K \quad (3.8)$$

Obtendo-se, assim:

- estado transiente: $f_M = f(CV, V_0, H, f_K, G, E_L, \alpha)$
- estado de equilíbrio: $f_M = f(CV, G, f_K, E_L, \alpha)$

Ao observar a vazão regularizada (f_M) no estado transiente, nota-se que a mesma é função de sete parâmetros, dentre os quais o volume inicial V_0 e o horizonte de tempo H . Porém no estado de equilíbrio, esses parâmetros não irão influenciar essa vazão.

Para o estudo considerou-se: volume inicial cheio (V_0 =cheio), o nível de garantia das vazões regularizadas igual a 90%, com o objetivo de atender o Decreto Estadual n° 23.067/94, o qual estipula que o valor outorgável das vazões regularizadas, no estado do Ceará, deve ter garantia de 90%, e $\alpha = 14.259$ (característico da curva cota x volume do Açude Caxitoré). Entretanto, os parâmetros CV , f_K e E_L sofreram alterações, e serão analisados ao longo do estudo.

3.3 O programa utilizado - SIMRES

Inicialmente, foram geradas séries de vazão de 5.000 anos, para obtenção das vazões regularizadas do reservatório, com a utilização do programa SIMRES, desenvolvido pelo Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará (Campos et al., 2000), que simula o comportamento de um reservatório pelo Método de Monte Carlo. Esta metodologia utiliza uma distribuição de probabilidade teórica para a representação dos valores, no caso, as vazões anuais, serialmente independentes. A distribuição *Gamma II* é comumente usada para a representação das vazões anuais na região. Na perspectiva de Yevjevich (1972), as distribuições *Gamma III* e *Lognormal* de três parâmetros não possuem vantagens significativas, quando comparadas com as distribuições de dois parâmetros, motivo pelo qual foi escolhida a função *Gamma II*.

O programa utiliza dois arquivos de entrada:

- arquivo dos dados gerais, denominado de TAPE2.DAT, no qual são informados ao programa os dados gerais do reservatório e os procedimentos da simulação; e
- arquivo dos deflúvios mensais afluentes ao reservatório, no qual o arquivo se apresenta no formato denominado TAPE3.DAT.

Na simulação do reservatório, utilizou-se o TAPE3.DAT das séries sintéticas de 5.000 anos, com o objetivo de analisar o comportamento da vazão no estado de equilíbrio, dando um caráter geral ao adotarem-se coeficientes de variação dos influxos entre 0,6 e 1,6.

Os dados gerais do reservatório assumidos para a simulação foram:

- garantia – 90%,
- horizonte de simulação – 5.000 anos;
- capacidade do reservatório – utilizou-se $f_K = 1,0; 1,5; 2,0$ e $2,5$;
- volume inicial – considerou-se o reservatório inicialmente cheio, isto é, $V_0 = K$;
- evaporação líquida – adotaram-se as evaporações líquidas discriminadas nos itens 3.6.4 e 3.7 deste estudo;
- curva cota x volume – foi utilizada a curva cota x volume do açude Caxitoré; e
- coeficiente de variação – $CV = 0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,4$ e $1,6$.

3.3.1 Fragmentação dos deflúvios

Como são anuais as séries das vazões sintéticas geradas na simulação, houve a necessidade de fragmentá-las em vazões mensais.

Para isso, utilizou-se o Método dos Fragmentos proposto por Svanidze (1980), o qual produz vazões mensais através da desagregação de vazões anuais, que foram inicialmente geradas por uma distribuição apropriada, no caso

em questão, a distribuição *Gamma II*. Araújo (1991) estudou a influência da desagregação em cerca de 20 reservatórios do Estado do Ceará e constataram que o método dos fragmentos, proposto por Svanidze, produz bons resultados para os rios intermitentes do semi-árido.

Ao se utilizar essa metodologia, que supõe a existência de uma série histórica de vazões mensais, pretende-se aumentar as informações fluviométricas do posto, fornecendo informações à operação de sistemas de recursos hídricos. Um fragmento é determinado para cada mês e para cada ano da série histórica

$$f_{i,j} = \frac{Q_{i,j}}{\sum_{j=1}^{12} Q_{i,j}} \quad (3.9)$$

onde: $Q_{i,j}$ é a vazão no mês j do ano i .

Com os fragmentos calculados, as vazões médias da série anual são postas em ordem crescente e gerados tantos intervalos de classe quanto o número de anos da série histórica. Como cada mês tem o seu fragmento e durante o ano existem doze fragmentos, cada intervalo de classe contemplará doze fragmentos.

Na obtenção da série sintética de vazões mensais (com determinado número de anos) associa-se cada valor anual de vazão da série antecipadamente produzida ao intervalo de classe correspondente, sendo desagregado pelo respectivo fragmento. Dessa forma, as vazões mensais sintéticas são estimadas por meio da seguinte expressão:

$$Q_{i,j} = f_j^k Q_i^k \quad (3.10)$$

onde:

$Q_{i,j}$ é a vazão mensal sintética para o mês j do ano i ;

f_j^k é o fragmento de desagregação no mês j associado ao intervalo de classe k ; e

Q_i^k é a vazão anual gerada pelo modelo anual, pertencente à classe k .

É simples verificar que a soma dos fragmentos, para determinado ano i , é igual à unidade, ou seja:

$$\sum f_{i,j} = 1 \quad (3.11)$$

No estudo, foram gerados 50 valores de vazões anuais, para cada CV (CV=0,6 a 1,6), fragmentados de acordo com a série histórica do rio Caxitoré.

3.4 Geração das séries sintéticas

Conforme Campos (1996), os rios intermitentes do Nordeste brasileiro apresentam como característica marcante uma longa estação de vazões nulas após a curta estação úmida. Essas características fazem com que os deflúvios anuais sejam serialmente independentes, e que as séries de vazões anuais possam ser obtidas a partir da geração de números aleatórios, seguindo uma função densidade de probabilidade.

No presente estudo, foram geradas seis séries de 5.000 valores de vazões anuais afluentes, seguindo uma distribuição *Gama II*, cuja equação é:

$$P(x) = (\beta^\alpha x^{\alpha-1} e^{-\beta x}) / \Gamma(\alpha) \quad (3.12)$$

onde, $\Gamma(\alpha)$ é a Função *Gamma* e α e β , os parâmetros da distribuição, calculados pelo método dos momentos com base nas equações 3.10 e 3.11:

$$\mu = \alpha/\beta \quad (3.13)$$

$$\sigma^2 = \alpha/\beta^2 \quad (3.14)$$

No estudo, variou-se o coeficiente de variação dos deflúvios anuais - o CV variou de 0,6 a 1,6 - e conservou-se a média da série histórica ($\mu=126,3$ hm³/ano).

3.5 Dados utilizados

Foram empregados os indicadores morfométricos do açude Caxitoré, no Ceará. Os resultados, no entanto, não se restringem somente a este reservatório, uma vez que se alteraram diversas de suas características, como capacidade, evaporação, precipitação e coeficiente de variação dos deflúvios anuais, conservando-se a média dos deflúvios anuais. De fato o único dado que se conservou foi a curva cota vs volume do açude em foco (Tabela 3.1).

Tabela 3.1 - Relações cota x volume acumulado do açude Caxitoré.

Cotas (m)	Volume (hm ³)
50	0
55	10,0
60	25,0
65	65,0
70	140,0
75	240,0
80	385,0

Fonte: Ceará (1996).

3.5.1 Vazões afluentes ao açude Caxitoré

O rio Caxitoré possui regime fluvial intermitente, assim como os rios característicos da região, sendo seu escoamento predominante entre os meses de fevereiro e maio e com grande variabilidade interanual (Figura 3.2). Para o estudo, é importante conhecer as características hidrológicas do rio, definidas pelos seguintes parâmetros:

- volume afluente médio anual (μ): 126,3 hm³/ ano;
- desvio-padrão dos deflúvios anuais (σ): 151,4 hm³/ ano; e
- coeficiente de variação dos deflúvios anuais (CV): 1,2.

Os indicadores de vazão foram obtidos dos dados do Plano Estadual de Recursos Hídricos - PERH (1992) e encontram-se na Tabela A1 do Anexo. Novamente, há que se ressaltar o fato de que os resultados não se restringem a este rio, uma vez que parâmetros de seu regime hidrológico, como o coeficiente de variação dos deflúvios anuais, vão ser alterado para simular os cenários.

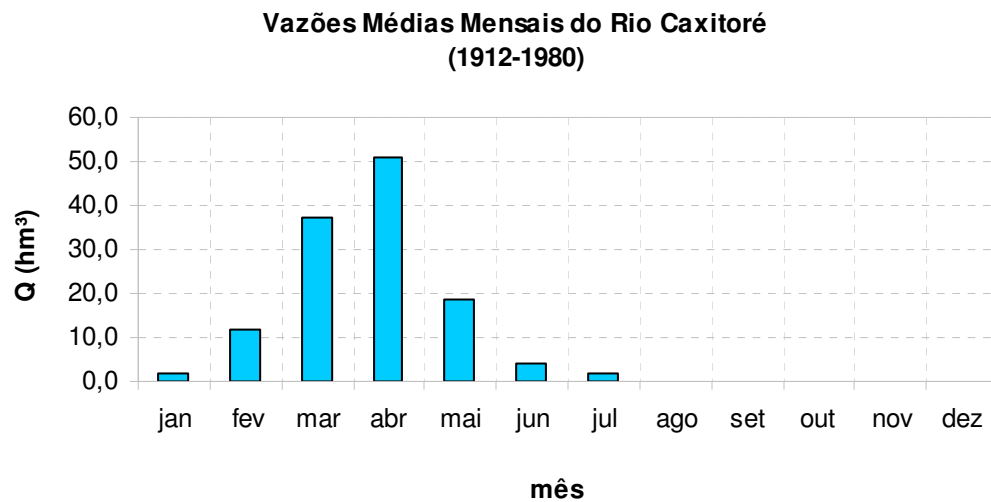


Figura 3.2 - Vazões médias mensais do rio Caxitoré.

3.5.2 Precipitação

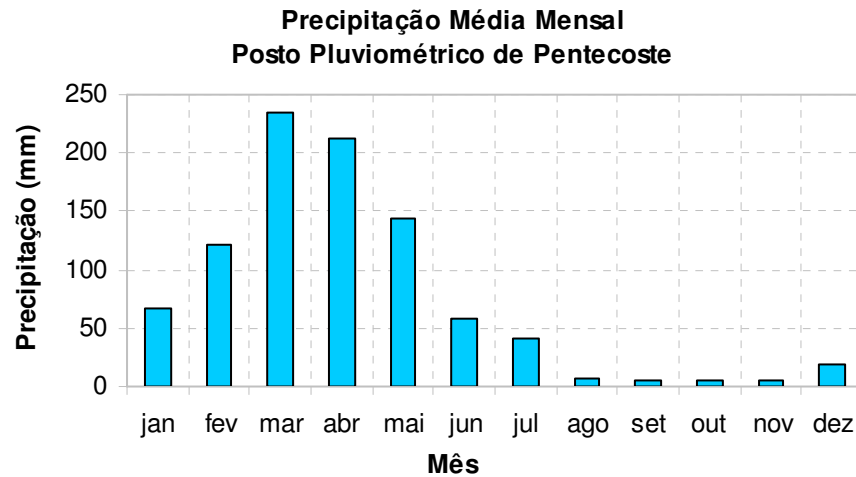
A precipitação média anual na região é de cerca de 918 mm, concentrando-se nos meses de estação chuvosa ocorrente na região - março, abril, maio – nos quais se observam 64% do total precipitado no ano.

Em virtude da grande variabilidade espacial na precipitação anual, procurou-se utilizar os dados do posto pluviométrico que melhor representassem o regime de chuvas local. O posto pluviométrico de Pentecoste foi considerado como característico das precipitações na bacia do açude Caxitoré, em decorrência da proximidade da barragem. A distribuição das precipitações mensais neste posto são as mostradas na Tabela 3.2 e na Figura 3.3.

Tabela 3.2 - Precipitação mensal média na estação climatológica de Pentecoste.

Estação	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total (mm)
Pentecoste	66,8	121,4	235,1	212,8	143,5	58,1	40,40	6,1	4,6	5,2	5,5	18,5	918,0

Fonte: Ceará (1996).

**Figura 3.3** - Precipitação média mensal na estação climatológica de Sobral.

3.5.3 Evaporação

Considerou-se o posto de Sobral como característico da evaporação na bacia em estudo. A evaporação anual média observada foi de 1.840 mm distribuída ao longo dos meses, segundo a Tabela 3.3 e Figura 3.4. Os dados de evaporação foram retirados das estações do INEMET (Instituto Nacional de Meteorologia).

Os valores de evaporação constituem medições referentes ao tubo de Pichê, não havendo, portanto, necessidade de utilizar o coeficiente de redução de evaporação K_a proposto por Molle e Cadier (1989), pois este reduz os valores de evaporação medidos pelo Tanque Classe A.

Tabela 3.3 - Evaporação média na estação de Sobral

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
E_i (mm)	158,0	105,0	75,0	71,0	78,0	108,0	154,0	199,0	215,0	247,0	220,0	210,0	1.840

Fonte: INEMET (1992).

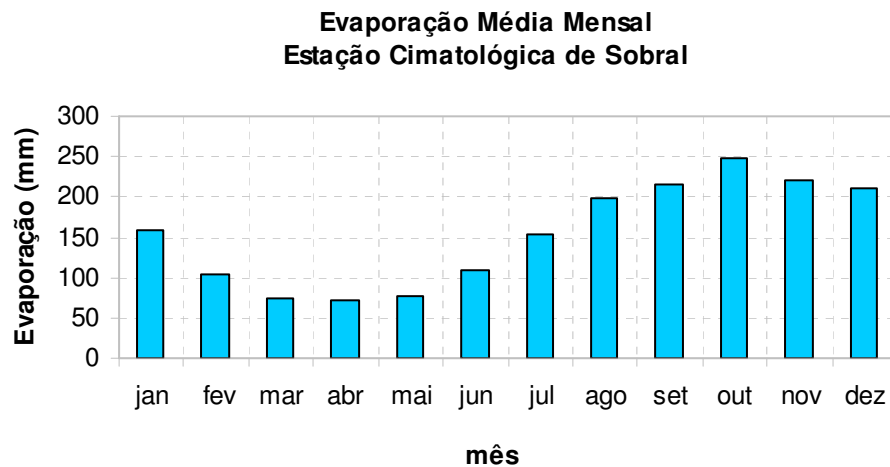


Figura 3.4 - Evaporação média mensal na estação climatológica de Sobral.

3.5.4 Evaporação líquida

O dado de evaporação líquida no lago utilizado na simulação da vazão regularizada é uma síntese das tabelas de precipitação e evaporação. A evaporação líquida, nada mais é do que o balanço entre a evaporação e a precipitação (Tabela 3.4).

3.6 Cenários de mudanças climáticas avaliadas

Analizou-se a influência de duas alterações climáticas em rios do semi-árido - a variabilidade interanual das vazões (e todos os outros parâmetros permaneceram constantes) e alteração na lâmina líquida, sob dois subcenários de variabilidade das vazões, conforme explicitado a seguir.

Cenário a - avaliou-se a influência do coeficiente de variação dos influxos (CV), considerando o estado atual do reservatório e sua lâmina líquida original, ou seja, $E_L = 0,92\text{m}$.

Cenário b - fixou-se o coeficiente de variação original do rio em estudo, isto é, $CV = 1,2$, e avaliou-se a mudança em E_L sob dois subcenários:

- **cenário b1** - a evaporação cresce em uma taxa maior do que a precipitação e os novos valores de E_L variam entre 10 e 100%; e

- **cenário b2** - a evaporação cresce a uma taxa menor do que a precipitação e os novos valores assumidos para E_L variam entre 10 e 90%.

Cenário c – variaram-se os coeficientes de variação dos influxos - CV variando entre 0,6 e 1,6 - e analisou-se a variação sob dois diferentes subcenários:

- **cenário c1** - a evaporação cresce a uma taxa maior do que a precipitação e os novos valores de E_L variam entre 10 e 100%; e
- **cenário c2** - a evaporação cresce a uma taxa menor do que a precipitação e os novos valores assumidos para E_L variam entre 10 e 90%.

As novas lâminas líquidas (E_L) utilizadas na simulação do reservatório para os subcenários *b1* e *c1*, podem ser observadas na Tabela 3.5, e, para os subcenários *b2* e *c2*, na Tabela 3.6.

O reservatório não foi simulado para um decréscimo na lâmina de 100%, pois o balanço entre evaporação e precipitação, de sua lâmina líquida, resultou em zero, tornando a simulação inviável.

Tabela 3.4 - Evaporação líquida sobre o lago do açude Caxitoré.

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
Ei (mm)	158,0	105,0	75,0	71,0	78,0	108,0	154,0	199,0	215,0	247,0	220,0	210,0	1.840
Pi (mm)	66,8	121,4	235,1	212,8	143,5	58,1	40,40	6,1	4,6	5,2	5,5	18,5	918,0
Ei-Pi (mm)	91,2	-16,4	-160,1	-141,8	-65,5	49,9	113,6	192,9	210,4	241,8	214,5	191,5	922,0
$ei = \frac{(Ei-Pi)}{\Sigma (Ei-Pi)}$	0,10	-0,02	-0,17	-0,15	-0,07	0,05	0,12	0,21	0,23	0,26	0,23	0,21	1,00

Tabela 3.5 - Lâminas de evaporação líquida sobre o lago do açude Caxitoré, considerando o *Cenário a*.

Aumento na lâmina	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
Relação Ei-Pi (mm)	1,01	1,11	1,20	1,29	1,38	1,47	1,57	1,66	1,75	1,84

Tabela 3.6 - Lâminas de evaporação líquida sobre o lago do açude Caxitoré, considerando o *Cenário b*.

Diminuição na lâmina	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
Relação Ei-Pi (mm)	0,83	0,74	0,65	0,55	0,46	0,37	0,28	0,18	0,09	0,0

4 RESULTADOS

A gestão das águas no semi-árido do Nordeste é baseada, fundamentalmente, na gestão de reservatórios superficiais. A construção destes é condição essencial à obtenção do fornecimento de água confiável. Sendo assim, é de fundamental importância, que se analisem os impactos das mudanças climáticas nas vazões regularizadas em reservatórios da Região.

Para o **Cenário a**, foram geradas, com a utilização do SIMRES, seis séries de 5.000 anos de vazões mensais. Para cada série, gerada com um determinado CV, formaram-se 50 séries de 10 anos, 50 séries de 20 anos, 50 séries de 30 anos, e assim sucessivamente, até alcançar as 50 séries de 100 anos, com a finalidade de analisar o comportamento da vazão regularizada para os diversos horizontes de tempo.

Para os **cenários b e c**, para operação simulada do reservatório utilizou-se as séries sintéticas de 5.000 anos geradas pelo SIMRES, com o intuito de avaliar o comportamento da vazão regularizada no estado de equilíbrio. Procurou-se conferir um caráter geral às simulações, ao adotar coeficientes de variação dos influxos entre 0,6 e 1,6.

4.1 Cenário a

A variabilidade das vazões anuais de um rio afeta imensamente a capacidade de regularização do reservatório. Para o **Cenário a**, analisou-se a influência dos coeficientes de variação dos influxos no comportamento das vazões regularizadas, mantendo a precipitação e a evaporação originais do lago. Efetuou-se a operação simulada do reservatório, com o intuito de avaliar como o processo de armazenamento é influenciado por essa variabilidade, considerando seis cenários de vazões afluentes - CV variando entre 0,6 e 1,6 - nível de garantia de 90% e horizontes de simulação variando de 10 a 100 anos. Os resultados obtidos para o $f_K=1,0$ encontram-se nas tabelas 4.1 e 4.2 e Figura 4.1.

Observa-se que, não alterando os demais parâmetros, o processo de armazenamento é altamente influenciado pelo coeficiente de variação dos deflúvios.

Observa-se, ainda na Tabela 4.2 que, se o reservatório estivesse localizado em regiões com baixa variabilidade nos influxos das vazões, por exemplo, com $CV=0,8$ e para um horizonte de 50 anos, ele regularizaria 49% da vazão média afluente anual ($f_M=0,49$). Por outro lado, para um $CV=1,2$ (original do rio em estudo), essa regularização se reduziria a 34% da vazão média anual (μ). Nota-se, com efeito, que rios com alta variabilidade regularizam menos água do que os de baixa variabilidade.

Percebe-se também que, para $CV=1,6$ – rios com alta variabilidade nos influxos – no horizonte de 10 anos, estado transiente, o reservatório regularizaria 0,31 da vazão média anual ($f_M=0,31$), e para 100 anos o reservatório regularizaria 0,23 de μ . Nota-se que essas vazões, à medida que se aumenta o horizonte de simulação, aproximam-se da vazão no estado de equilíbrio (f_M^*), observando-se o mesmo comportamento para os outros CVs. Assim, para evitar a influência do estado transiente do reservatório, analisar-se-ão as vazões apenas no estado de equilíbrio.

Na Figura 4.1, que compara a vazão regularizada, em termos de f_M , para $CV= 0,6, 0,8, 1,0, 1,2, 1,4$ e $1,6$, observa-se que, quando os influxos são menos variáveis ($CV=0,6, 0,8$ e $1,0$), os reservatórios regularizam maiores valores de vazão do que aqueles que têm influxos mais variável ($CV=1,2, 1,4$ e $1,6$).

Tabela 4.1 - Valores médios da vazão regularizada (hm^3/ano), para $f_K=1,0$, $G=90\%$, $V_0=\text{cheio}$ e o coeficiente de variação dos deflúvios naturais (CV) variando de 0,6 a 1,6.

H (ano)	Q (hm^3/ano)					
	CV = 0,6	CV = 0,8	CV = 1,0	CV = 1,2	CV = 1,4	CV = 1,6
10	76,74	68,09	58,68	50,67	44,42	39,15
20	73,16	64,42	54,14	46,20	41,30	35,58
30	73,49	63,79	52,81	43,96	37,68	31,21
40	72,50	62,27	51,35	43,35	36,73	29,95
50	71,39	61,42	49,18	43,29	34,38	29,41
60	71,24	61,23	49,61	42,46	34,84	28,55
70	71,15	61,64	48,68	42,28	35,31	28,43
80	71,26	61,07	49,16	42,09	35,05	28,25
90	70,27	60,56	49,67	41,84	35,25	28,94
100	70,63	60,21	48,95	41,61	34,67	28,97
Q*	70,00	60,00	48,00	40,40	34,10	27,40

Tabela 4.2 - Valores médios da vazão regularizada (em fator adimensional de capacidade), para $f_K=1,0$, $G=90\%$, $V_0=\text{cheio}$ e o coeficiente de variação dos deflúvios naturais (CV) variando de 0,6 a 1,6.

H (ano)	f_M					
	CV = 0,6	CV = 0,8	CV = 1,0	CV = 1,2	CV = 1,4	CV = 1,6
10	0,61	0,54	0,46	0,40	0,35	0,31
20	0,58	0,51	0,43	0,37	0,33	0,28
30	0,58	0,51	0,42	0,35	0,30	0,25
40	0,57	0,49	0,41	0,34	0,29	0,24
50	0,57	0,49	0,39	0,34	0,27	0,23
60	0,56	0,48	0,39	0,34	0,28	0,23
70	0,56	0,49	0,39	0,33	0,28	0,23
80	0,56	0,48	0,39	0,33	0,28	0,22
90	0,56	0,48	0,39	0,33	0,28	0,23
100	0,56	0,48	0,39	0,33	0,27	0,23
f_M^*	0,55	0,48	0,38	0,32	0,27	0,22

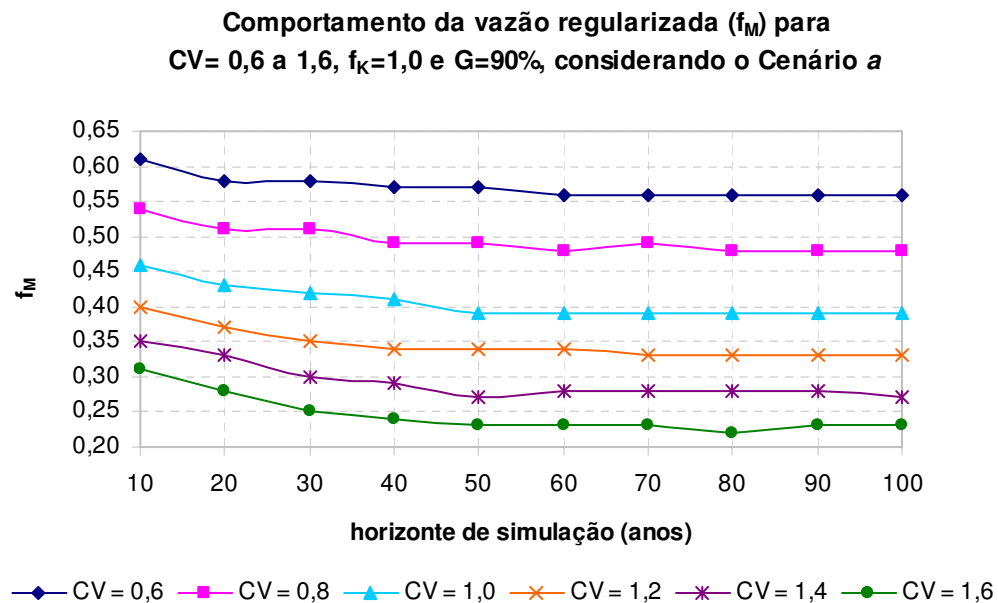


Figura 4.1 - Comportamento da vazão regularizada, em termos de f_M , com CV variando entre 0,6 e 1,6 para $G=90\%$ e $f_K=1,0$.

Ao analisar a vazão adimensional de equilíbrio (f_M^*) para os CVs estudados, têm-se que, para um $CV=0,6$, o reservatório regulariza 55% da vazão média afluente (μ); para o $CV=0,8$, este valor é de 48% de μ ; para $CV=1,0$, esse valor cai para 38%; e assim continua até esse valor chegar a apenas 22% de μ para o $CV=1,6$ (Figura 4.2).

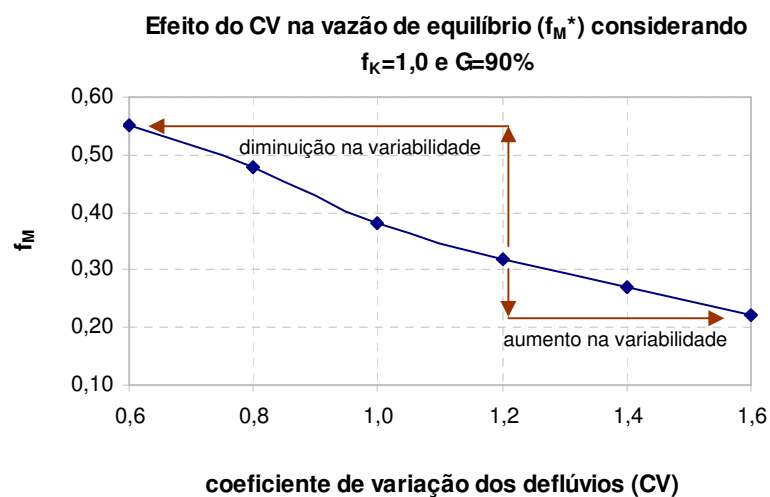


Figura 4.2 - Efeito do coeficiente de variação dos deflúvios (CV) na vazão regularizada de equilíbrio (f_M^*).

Ainda analisando a figura, observa-se que o reservatório também mostra sensibilidade à variação climática. Se o reservatório vier a receber um aumento na variabilidade, ele tenderá a aumentar a variabilidade dos deflúvios, e com isso, diminuir a vazão regularizada. Caso, no entanto, venha a ocorrer uma diminuição na variabilidade, ocasionando uma redução na variabilidade dos deflúvios, a vazão regularizada tenderá a aumentar.

4.1.1 A influência da capacidade do reservatório

É relevante abordar a capacidade de acumulação do reservatório, pois esta, também influencia, significativamente, a vazão regularizada pelo reservatório. A influência no armazenamento foi avaliada para quatro capacidades - $f_K = 1,0, 1,5, 2,0$ e $f_K = 2,5$ - considerando uma garantia de 90% e o horizonte de tempo variando entre 10 e 100 anos. Analisou-se o efeito da capacidade para dois cenários de variabilidade dos influxos - $CV = 0,6$ e $CV = 1,2$ (típico dos rios do Ceará).

Analisou-se a influência da capacidade, adotando-se como referência a vazão adimensional de equilíbrio (f_M^*). Ao simular o reservatório para um rio com baixa variabilidade nos seus influxos ($CV = 0,6$) para o $f_K = 1,0$, o resultado da sua vazão regularizada é 55% da vazão média afluente (μ). Ao se dobrar, porém, essa capacidade, para $f_K = 2,0$, o reservatório passa a regularizar 71% da vazão média afluente (μ), sendo assim, objeto de um acréscimo de 29% na vazão regularizada. O mesmo comportamento é observado para os rios com variação nos influxos de 1,2, onde o reservatório regulariza 32% de μ para $f_K = 1,0$ e passa a regularizar 46% de μ para o $f_K = 2,0$, aumentando 44% da vazão regularizada (Tabela 4.3).

Tabela 4.3 - Vazão regularizada (f_M), considerando $G=90\%$, $CV=0,6$ e $1,2$ e $f_K=1,0$ a $2,5$.

H	CV=0,6				CV=1,2			
	$f_K = 1,0$	$f_K = 1,5$	$f_K = 2,0$	$f_K = 2,5$	$f_K = 1,0$	$f_K = 1,5$	$f_K = 2,0$	$f_K = 2,5$
10	0,61	0,76	0,87	0,94	0,40	0,53	0,63	0,71
20	0,58	0,71	0,79	0,84	0,37	0,47	0,53	0,59
30	0,58	0,70	0,77	0,81	0,35	0,45	0,50	0,56
40	0,57	0,69	0,76	0,80	0,34	0,43	0,50	0,55
50	0,57	0,67	0,74	0,78	0,34	0,42	0,50	0,55
60	0,56	0,67	0,73	0,77	0,34	0,41	0,49	0,54
70	0,56	0,67	0,73	0,76	0,33	0,41	0,49	0,54
80	0,56	0,67	0,73	0,76	0,33	0,41	0,48	0,53
90	0,56	0,66	0,72	0,76	0,33	0,41	0,48	0,53
100	0,56	0,66	0,72	0,75	0,33	0,41	0,48	0,53
f_M^*	0,55	0,65	0,71	0,74	0,32	0,40	0,46	0,50

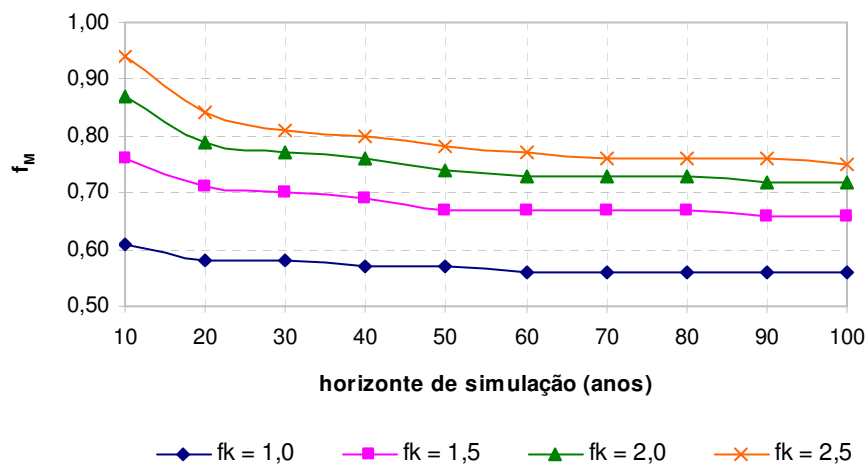
A influência da capacidade do reservatório, analisado em termos de f_K , pode ser observada na Figura 4.3. Nota-se que, à medida que se aumenta a capacidade, há uma elevação nas vazões regularizadas pelo reservatório, tanto para $CV=0,6$ quanto para $1,2$.

4.2 Cenário b

Para o **Cenário b**, estudou-se o comportamento do coeficiente de variação dos influxos, original do rio em estudo - $CV=1,2$ – ao variar as lâminas líquidas (E_L) do balanço entre a evaporação e precipitação.

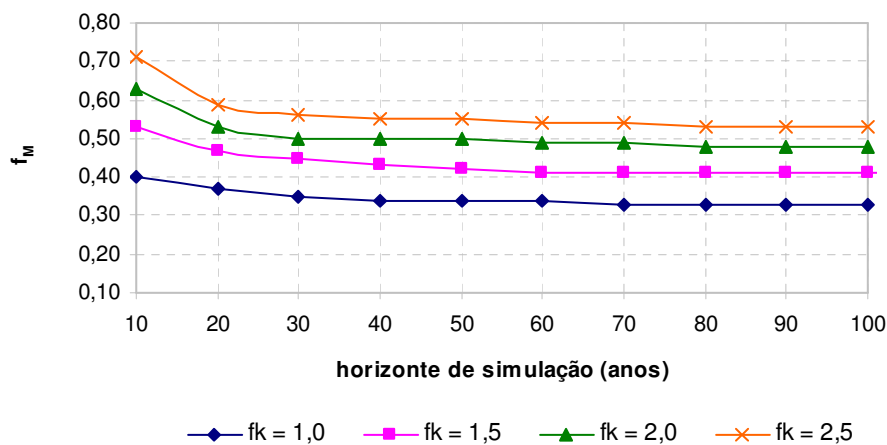
Para o **Cenário b1**, considerou-se que, em razão das mudanças climáticas, a evaporação crescerá a uma taxa maior do que a precipitação, havendo, com isso, um aumento na lâmina líquida. Na operação simulada do reservatório, aplicaram-se, à lâmina original, aumentos percentuais, variando entre 10 e 100%. Na Tabela 4.4, observam-se os respectivos valores das lâminas, em metros, para esses percentuais.

Influência do fator de capacidade f_K na vazão regularizada (f_M) para $CV=0,6$, $f_K=1,0$ a $2,5$ e $G=90\%$, considerando o Cenário a



a)

Influência do fator de capacidade f_K na vazão regularizada (f_M) para $CV=1,2$, $f_K=1,0$ a $2,5$ e $G=90\%$, considerando o Cenário a



b)

Figura 4.3 - Efeito da capacidade do reservatório (em termos de f_K) na vazão regularizada pelo reservatório (em termo de f_M) considerando $f_K=1,0$, $1,5$, $2,0$ e $2,5$, $G=90\%$ e coeficiente de variação dos influxos igual a: a) $CV=0,6$ e b) $CV=1,2$.

Tabela 4.4 - Valores de E_L para aumentos percentuais na lâmina variando entre 10 e 100%.

Aumento na lâmina (%)	Lâmina (m)
Original	0,92
10%	1,01
20%	1,11
30%	1,20
40%	1,29
50%	1,38
60%	1,47
70%	1,57
80%	1,66
90%	1,75
100%	1,84

Para o **Cenário b2**, entretanto, considerou-se uma diminuição na lâmina líquida (E_L), provocada por suposto aumento da precipitação relativamente à evaporação, ou seja, a precipitação cresce a uma taxa maior do que a evaporação. A diminuição dos percentuais e suas respectivas lâminas líquidas podem ser observadas na Tabela 4.5, onde os sinais negativos apenas ilustram a diminuição dessas lâminas.

Como já foi abordado, optou-se por analisar as vazões regularizadas em seu estado de equilíbrio, por não receberem influência, nesse período, dos volumes iniciais.

Tabela 4.5 - Valores de E_L para diminuições percentuais na lâmina variando entre 10 e 90%.

Diminuição na lâmina (%)	Lâmina (m)
Original	0,92
-10%	0,83
-20%	0,74
-30%	0,65
-40%	0,55
-50%	0,46
-60%	0,37
-70%	0,28
-80%	0,18
-90%	0,09

A Tabela 4.6 mostra os resultados da operação simulada do reservatório, para a vazão no estado de equilíbrio (Q^*), onde se considerou um aumento - **Cenário b1** - de 10 a 100% em E_L , fator de capacidade (f_K) variando entre 1,0 e 2,5 e nível de garantia igual a 90%. Observa-se, na mesma tabela, que, ao comparar a vazão adimensional de equilíbrio para o cenário atual ($Q^*=40,4\text{hm}^3/\text{ano}$) e $f_K=1,0$, com a vazão de equilíbrio para um aumento de 50% em E_L ($Q^*=35,6\text{hm}^3/\text{ano}$), percebe-se que há perda de cerca de 14% na vazão regularizada pelo reservatório. E, para um aumento na lâmina de 100%, essa perda passa para 31%.

Nota-se também que essas perdas são praticamente constantes com o fator de capacidade, alterando entre 14 e 16% em relação à vazão de equilíbrio (Q^*) no cenário atual ($CV=1,2$), para um aumento de 50% na lâmina e f_K variando entre 1,0 e 2,0. Para o aumento de 100% na lâmina, a perda assume valores entre 31 e 34% em relação ao cenário atual.

Ao analisar a Figura 4.4, percebe-se que a vazão tende a diminuir à medida que se aumenta a lâmina líquida (E_L). E, ainda, se observa, que esse comportamento é o mesmo para todas as capacidades simuladas - $f_K= 1,0, 1,5, 2,0$ e $2,5$ - diferenciando apenas na proporção delas.

Tabela 4.6 - Vazão de equilíbrio (Q^*), considerando o aumento nas lâminas - *Cenário b1* - $CV=1,2$ e $G=90\%$.

Aumento na lâmina	$f_K = 1,0$	$f_K = 1,5$	$f_K = 2,0$	$f_K = 2,5$
Cenário Atual	40,4	50,0	57,9	63,7
10	39,5	48,7	56,4	62,0
20	38,5	47,4	54,7	59,9
30	37,5	46,2	53,2	58,4
40	36,6	45,0	51,6	56,6
50	35,6	43,9	50,3	55,0
60	34,7	42,6	48,9	53,4
70	33,9	41,3	47,4	51,7
80	32,7	40,1	46,1	50,2
90	31,7	39,1	44,8	48,7
100	30,8	38,1	43,3	47,3

Na Tabela 4.7 os resultados observados mostraram que, para uma diminuição - **Cenário b2** - de 50% na lâmina, quando a vazão de equilíbrio é 45,5hm³/ano, há um ganho de cerca de 13% na vazão regularizada pelo reservatório em relação ao cenário atual, permanecendo quase constante com o fator de capacidade (f_K). Quando, porém, se aplica um aumento de 100% na lâmina, esse ganho varia entre 23 e 25% para $f_K=1,0$, 1,5, 2,0 e 2,5.

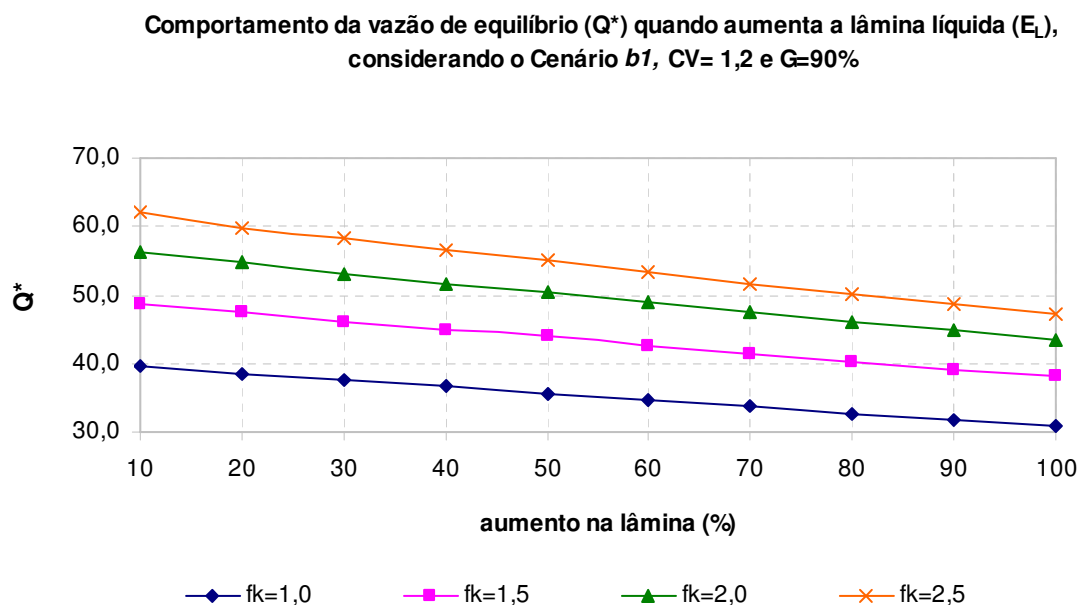


Figura 4.4 - Comportamento da vazão de equilíbrio relativamente ao acréscimo da lâmina líquida (E_L), considerando o *Cenário b1*, para $f_K=1,0$, 1,5, 2,0 e 2,5, G=90% e CV=1,2

Como era de se esperar, para o **Cenário b2**, ao diminuir a lâmina líquida evaporada do reservatório, a vazão de equilíbrio (Q^*) tende a aumentar, à proporção que se diminui a lâmina. Atinge maior ganho, quando a lâmina é reduzida em 90% da lâmina líquida para o cenário atual (Figura 4.6).

Tabela 4.7 - Vazão de equilíbrio (Q^*), considerando a diminuição nas lâminas - *Cenário b2* - $CV=1,2$ e $G=90\%$.

Diminuição na lâmina	$f_K = 1,0$	$f_K = 1,5$	$f_K = 2,0$	$f_K = 2,5$
Cenário Atual	40,4	50,0	57,9	63,7
-10	41,4	51,3	59,4	65,4
-20	42,4	52,7	60,8	67,1
-30	43,4	54,0	62,3	68,8
-40	44,5	55,4	64,0	70,6
-50	45,5	56,7	65,5	72,3
-60	46,5	58,2	67,0	73,9
-70	47,5	59,5	68,6	75,7
-80	48,7	61,0	70,3	77,6
-90	49,8	62,2	71,9	79,4

Comportamento da vazão de equilíbrio (Q^*) ao diminuir a lâmina líquida (E_L), considerando o *Cenário b2*, $CV=1,2$ e $G=90\%$

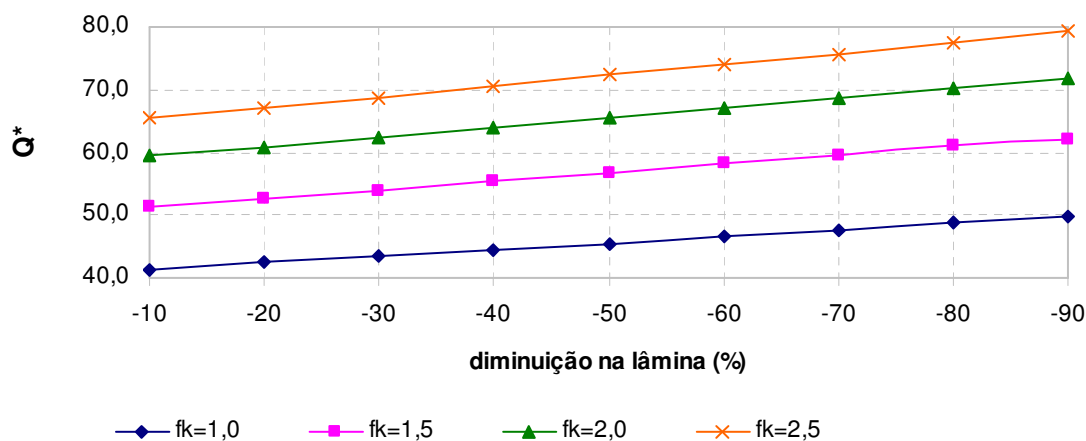


Figura 4.5 - Comportamento da vazão de equilíbrio relativamente a diminuição da lâmina líquida (E_L), considerando o *Cenário b2*, para $f_K=1,0$, 1,5, 2,0 e 2,5, $G=90\%$ e $CV=1,2$.

4.3 Cenário c

Para o **Cenário c**, a proposta foi avaliar os impactos das variações na lâmina líquida (E_L), para diferentes coeficientes de variação dos influxos (CV), sendo analisado o impacto das mudanças dessas lâminas para o CV variando entre 0,6 e 1,6, nas vazões regularizadas no estado de equilíbrio (Q^*). Dividiu-se o Cenário c em dois subcenários, sendo denominado de **Cenário c1**, quando

simulado o reservatório para um aumento na lâmina, e **Cenário c2**, quando simulado para uma diminuição na lâmina.

Os resultados, nas tabelas 4.8 a 4.11, mostram os valores das vazões regularizadas no estado de equilíbrio (Q^*) para um nível de garantia de 90%, $CV=0,6, 0,8, 1,0, 1,2, 1,4$ e $1,6$, considerando os fatores de capacidade $f_K=1,0, 1,5, 2,0$ e $2,5$, e aumentos na lâmina líquida variando entre 10 e 100%. Observa-se que, sob a hipótese do **Cenário c1**, existe tendência de decréscimo da disponibilidade hídrica e da eficiência do reservatório. Por exemplo, se a lâmina líquida (E_L), para um $CV=0,6$ e $f_K=1,0$, aumentar 50%, a vazão regularizada cairá de 70,0 hm^3/ano para 64,4 hm^3/ano (aproximadamente 8,7%). No caso de um rio de alta variabilidade, com $CV=1,6$, por exemplo, para mesma redução na lâmina, a vazão diminui de 27,4 hm^3/ano para 22,8 hm^3/ano , reduzindo cerca de 20% na vazão regularizada.

Desempenho semelhante também pode ser observado, nas tabelas 4.9 a 4.11, para $f_K=1,5, 2,0$ e $2,5$. Percebe-se, contudo, que, mesmo variando o f_K , essas perdas, na vazão regularizada, permanecem praticamente constantes, para um aumento de 50% na lâmina. A influência do fator de capacidade (f_K) do reservatório nas perdas da vazão regularizada no estado de equilíbrio (Q^*) pode ser observada na Figura 4.6.

Tabela 4.8 - Vazão regularizada no estado de equilíbrio (Q^*) para o *Cenário c1*, $f_K=1,0$ e $G=90\%$.

Aumento na lâmina (%)	CV = 0,6	CV = 0,8	CV = 1,0	CV = 1,2	CV = 1,4	CV = 1,6
	$Q^*(\text{hm}^3/\text{ano})$					
Cenário atual	70,0	60,0	48,0	40,4	34,1	27,4
10	68,9	58,8	46,9	39,5	33,0	26,5
20	67,7	57,5	45,8	38,5	32,1	25,6
30	66,5	56,5	44,9	37,5	31,2	24,7
40	65,4	55,4	44,0	36,6	30,3	23,8
50	64,4	54,2	43,0	35,6	29,3	22,8
60	63,4	53,2	42,0	34,7	28,4	21,9
70	62,1	51,9	40,9	33,9	27,5	21,0
80	61,1	50,9	39,8	32,7	26,6	20,1
90	60,1	49,9	38,7	31,7	25,7	19,2
100	59,2	48,7	37,7	30,8	24,8	18,4

Tabela 4.9 - Vazão regularizada no estado de equilíbrio (Q^*) para o *Cenário c1*, $f_K=1,5$ e $G=90\%$.

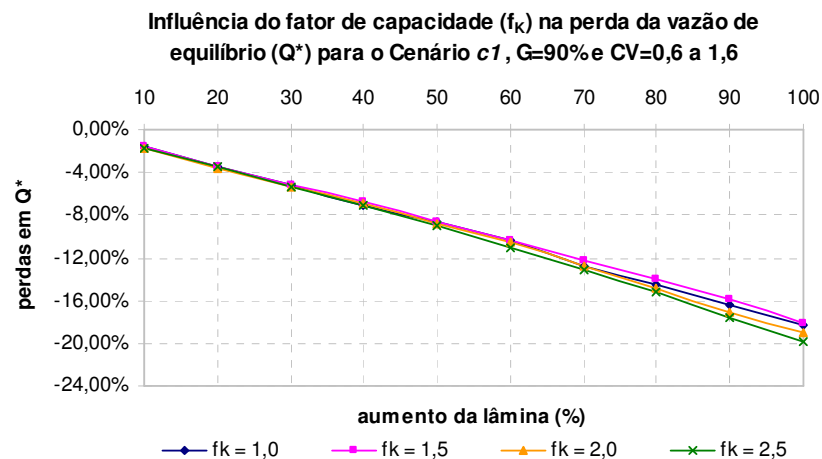
Aumento na lâmina (%)	CV = 0,6	CV = 0,8	CV = 1,0	CV = 1,2	CV = 1,4	CV = 1,6
	$Q^*(\text{hm}^3/\text{ano})$					
Cenário atual	82,1	71,2	59,2	50,0	42,3	35,9
10	80,8	70,0	57,8	48,7	41,1	34,7
20	79,3	68,6	56,3	47,4	39,7	33,4
30	78,1	67,5	55,2	46,2	38,6	32,2
40	76,9	66,3	54,0	45,0	37,4	31,1
50	75,6	65,1	52,7	43,9	36,3	30,0
60	74,4	63,9	51,6	42,6	35,3	29,0
70	73,1	62,6	50,2	41,3	34,1	27,8
80	72,0	61,3	49,0	40,1	32,9	26,7
90	70,8	60,1	47,7	39,1	31,8	25,8
100	69,5	58,9	46,6	38,1	30,7	24,8

Tabela 4.10 - Vazão regularizada no estado de equilíbrio (Q^*) para o *Cenário c1*, $f_K=2,0$ e $G=90\%$.

Aumento na lâmina (%)	CV = 0,6	CV = 0,8	CV = 1,0	CV = 1,2	CV = 1,4	CV = 1,6
	$Q^*(\text{hm}^3/\text{ano})$					
Cenário atual	89,3	79,8	67,6	57,9	49,5	42,3
10	87,8	78,4	66,2	56,4	48,1	40,9
20	86,2	76,8	64,6	54,7	46,5	39,3
30	84,8	75,4	63,1	53,2	45,0	38,0
40	83,5	74,0	61,5	51,6	43,6	36,5
50	82,1	72,5	60,0	50,3	42,2	35,1
60	80,8	71,1	58,6	48,9	40,9	33,9
70	79,2	69,4	57,0	47,4	39,4	32,6
80	77,7	68,1	55,6	46,1	38,1	31,3
90	76,3	66,7	54,2	44,8	36,8	30,0
100	75,1	65,4	52,8	43,3	35,5	28,8

Tabela 4.11 - Vazão regularizada no estado de equilíbrio (Q^*) para o *Cenário c1*, $f_K=2,5$ e $G=90\%$.

Aumento na lâmina (%)	CV = 0,6	CV = 0,8	CV = 1,0	CV = 1,2	CV = 1,4	CV = 1,6
	$Q^*(\text{hm}^3/\text{ano})$					
Cenário atual	93,0	85,0	73,4	63,7	54,8	47,1
10	91,4	83,4	71,8	62,0	53,1	45,4
20	89,9	81,6	70,0	59,9	51,2	43,5
30	88,3	80,0	68,3	58,4	49,6	42,1
40	86,8	78,3	66,8	56,6	47,9	40,6
50	85,3	76,9	65,2	55,0	46,4	39,3
60	83,8	75,4	63,5	53,4	44,9	37,8
70	82,2	73,5	61,8	51,7	43,2	36,2
80	80,7	71,9	60,2	50,2	41,8	34,8
90	79,1	70,5	58,9	48,7	40,4	33,4
100	77,6	68,9	57,1	47,3	39,1	31,8

**Figura 4.6** - Influência do fator de capacidade (f_K) nas perdas da vazão regularizada no estado de equilíbrio para o *Cenário c1*, considerando $G=90\%$ e $CV=0,6$ a $1,6$.

Observa-se para o **Cenário c1**, nos hachurados da Tabela 4.12, - para $f_K=1,0$ - que, em rios menos variáveis - CV igual a $0,6$ - é necessário que a lâmina líquida (E_L) aumente 60% para que o reservatório perca cerca de 10% de sua vazão regularizada. Para rios de alta variabilidade - CV igual a $1,6$ - E_L só precisaria ser alvo de um aumento de 30% para que o reservatório passasse esta mesma redução na vazão. Esse comportamento de “escadinha” também é observado para as outras capacidades ($f_K=1,5$, $2,0$ e $2,5$).

Tabela 4.12 - Perdas na vazão regularizada no estado de equilíbrio (Q^*) para o *Cenário c1*, $f_K=1,0$, $G=90\%$ e $CV=0,6$ a $1,6$.

Aumento na lâmina (%)	CV = 0,6	CV = 0,8	CV = 1,0	CV = 1,2	CV = 1,4	CV = 1,6
Perdas em Q^* (%)						
10	-1,6	-2,0	-2,3	-2,3	-3,3	-3,4
20	-3,4	-4,3	-4,8	-4,9	-6,2	-7,0
30	-5,3	-6,2	-6,9	-7,7	-9,3	-10,9
40	-7,0	-8,3	-9,1	-10,4	-12,5	-15,1
50	-8,7	-10,7	-11,6	-13,5	-16,4	-20,2
60	-10,4	-12,8	-14,3	-16,4	-20,1	-25,1
70	-12,7	-15,6	-17,4	-19,2	-24,0	-30,5
80	-14,6	-17,9	-20,6	-23,5	-28,2	-36,3
90	-16,5	-20,2	-24,0	-27,4	-32,7	-42,7
100	-18,2	-23,2	-27,3	-31,2	-37,5	-48,9

Tabela 4.13 - Perdas na vazão regularizada no estado de equilíbrio (Q^*) para o *Cenário c1*, $f_K=1,5$, $G=90\%$ e $CV=0,6$ a $1,6$.

Aumento na lâmina (%)	CV = 0,6	CV = 0,8	CV = 1,0	CV = 1,2	CV = 1,4	CV = 1,6
Perdas em Q^* (%)						
10	-1,6	-1,7	-2,4	-2,7	-2,9	-3,5
20	-3,5	-3,8	-5,2	-5,5	-6,5	-7,5
30	-5,1	-5,5	-7,2	-8,2	-9,6	-11,5
40	-6,8	-7,4	-9,6	-11,1	-13,1	-15,4
50	-8,6	-9,4	-12,3	-13,9	-16,5	-19,7
60	-10,3	-11,4	-14,7	-17,4	-19,8	-23,8
70	-12,3	-13,7	-17,9	-21,1	-24,0	-29,1
80	-14,0	-16,2	-20,8	-24,7	-28,6	-34,5
90	-16,0	-18,5	-24,1	-27,9	-33,0	-39,1
100	-18,1	-20,9	-27,0	-31,2	-37,8	-44,8

Tabela 4.14 - Perdas na vazão regularizada no estado de equilíbrio (Q^*) para o *Cenário c1*, $f_K=2,0$, $G=90\%$ e $CV=0,6$ a $1,6$.

Aumento na lâmina (%)	CV = 0,6	CV = 0,8	CV = 1,0	CV = 1,2	CV = 1,4	CV = 1,6
Perdas em Q^* (%)						
10	-1,7	-1,8	-2,1	-2,7	-2,9	-3,4
20	-3,6	-3,9	-4,6	-5,9	-6,5	-7,6
30	-5,3	-5,8	-7,1	-8,8	-10,0	-11,3
40	-6,9	-7,8	-9,9	-12,2	-13,5	-15,9
50	-8,8	-10,1	-12,7	-15,1	-17,3	-20,5
60	-10,5	-12,2	-15,4	-18,4	-21,0	-24,8
70	-12,8	-15,0	-18,6	-22,2	-25,6	-29,8
80	-14,9	-17,2	-21,6	-25,6	-29,9	-35,1
90	-17,0	-19,6	-24,7	-29,2	-34,5	-41,0
100	-18,9	-22,0	-28,0	-33,7	-39,4	-46,9

Tabela 4.15 - Perdas na vazão regularizada no estado de equilíbrio (Q^*) para o *Cenário c1*, $f_K=2,5$, $G=90\%$ e $CV=0,6$ a $1,6$.

Aumento na lâmina (%)	CV = 0,6	CV = 0,8	CV = 1,0	CV = 1,2	CV = 1,4	CV = 1,6
Perdas em Q^* (%)						
10	-1,8	-1,9	-2,2	-2,7	-3,2	-3,7
20	-3,4	-4,2	-4,9	-6,3	-7,0	-8,3
30	-5,3	-6,3	-7,5	-9,1	-10,5	-11,9
40	-7,1	-8,6	-9,9	-12,5	-14,4	-16,0
50	-9,0	-10,5	-12,6	-15,8	-18,1	-19,8
60	-11,0	-12,7	-15,6	-19,3	-22,0	-24,6
70	-13,1	-15,6	-18,8	-23,2	-26,9	-30,1
80	-15,2	-18,2	-21,9	-26,9	-31,1	-35,3
90	-17,6	-20,6	-24,6	-30,8	-35,6	-41,0
100	-19,8	-23,4	-28,5	-34,7	-40,2	-48,1

Percebe-se, também, que, no **Cenário c1** (evaporação crescendo a uma taxa mais rápida que a precipitação), as perdas na vazão regularizada aumentam, principalmente na medida em que o CV aumenta. Se o balanço entre evaporação e a precipitação, traduzida pela lâmina líquida E_L , for afetado pela variabilidade climática, conforme previsão, haverá diminuição da quantidade de água ofertada pelos reservatórios da região. Os resultados para $f_K = 1,0, 1,5, 2,0$ e $2,5$ podem ser observados nas tabelas 4.12 a 4.15 e nas figuras 4.7 a 4.10.

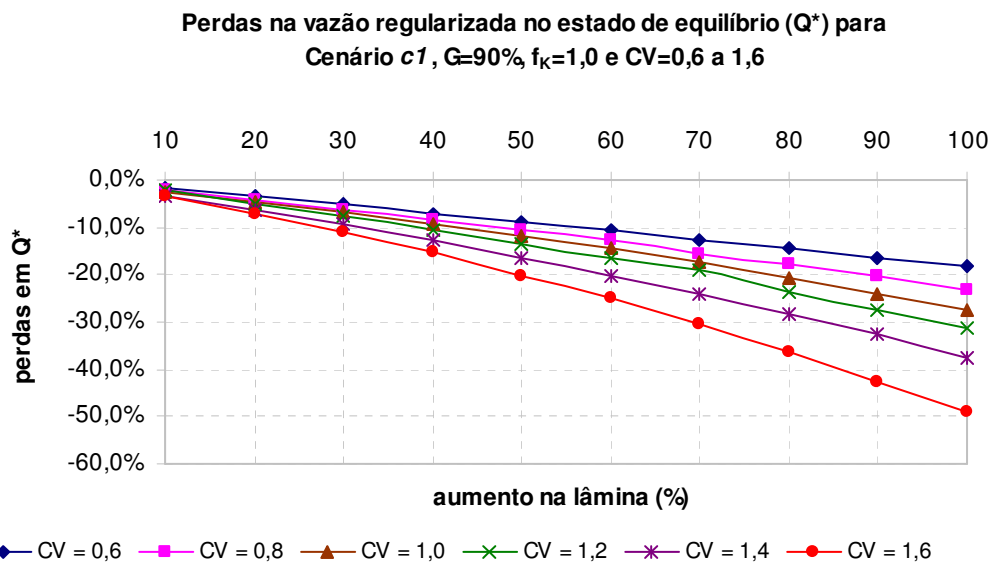


Figura 4.6 - Perdas na vazão regularizada no equilíbrio (Q^*) para $G=90\%$, $f_K=1,0$ e $CV=0,6$ a $1,6$.

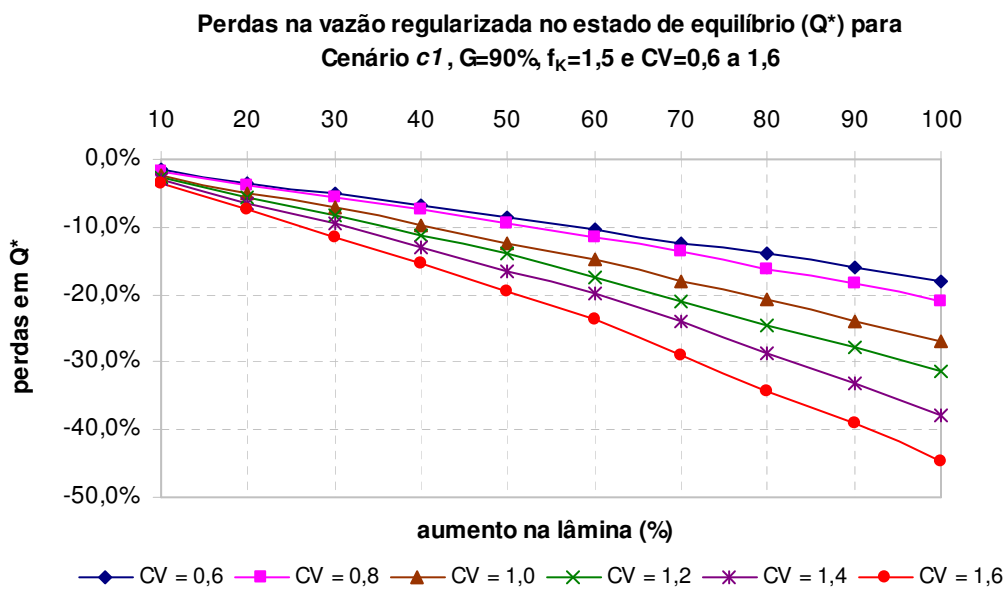


Figura 4.7 - Perdas na vazão regularizada no equilíbrio (Q^*) para $G=90\%$, $f_K=1,5$ e $CV=0,6$ a $1,6$.

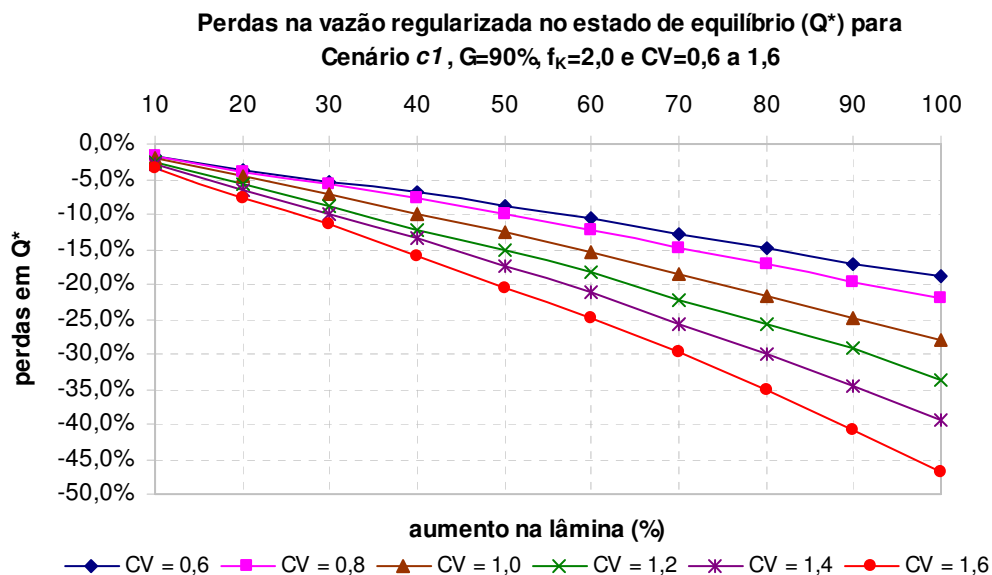


Figura 4.8 - Perdas na vazão regularizada no equilíbrio (Q^*) para $G=90\%$, $f_K=2,0$ e $CV=0,6$ a $1,6$.

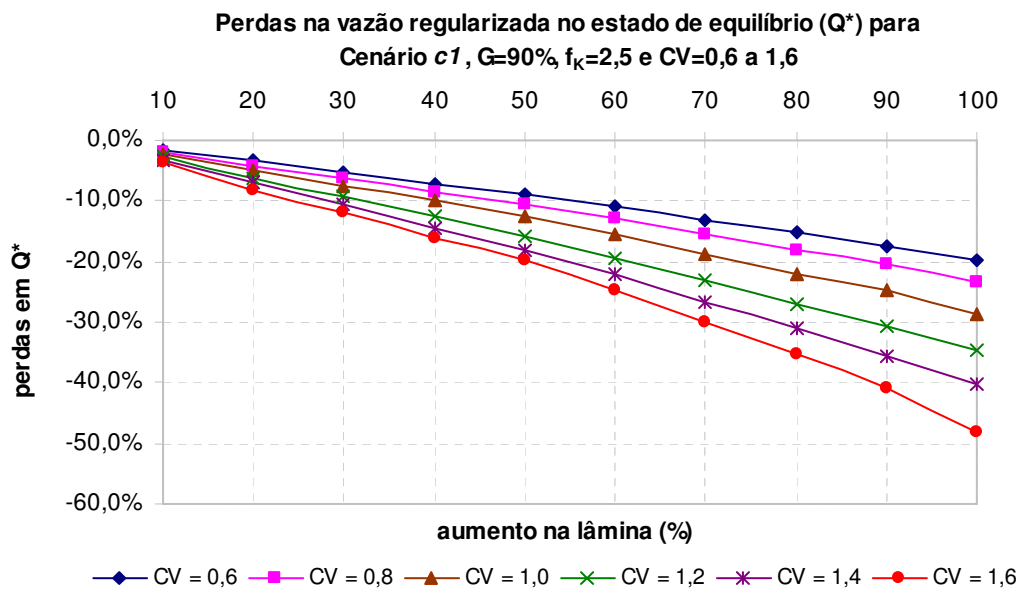


Figura 4.9 - Perdas na vazão regularizada no equilíbrio (Q^*) para $G=90\%$, $f_K=2,5$ e $CV=0,6$ a $1,6$.

As figuras 4.5 a 4.9 mostram ainda que, caso aconteça, em decorrência das mudanças climáticas, um aumento de 10% na lâmina, as perdas são muito pequenas, para todos os CVs. Elas tendem, no entanto, a aumentar gradativamente, à medida que se eleva a lâmina líquida (E_L).

O sinal *negativo* significa que Q^* (vazão de equilíbrio adotada para os dois cenários individuais) é inferior a Q^*_A (vazão de equilíbrio para o cenário atual), ou seja, houve perda em termos de vazão regularizada. Por outro lado, os sinais positivos indicam um ganho do reservatório em termos de vazão regularizada.

Para o **Cenário c2** (evaporação crescendo a uma taxa menor do que a precipitação), observou-se que a vazão regularizada aumentou com a diminuição da lâmina, comportamento contrário ao observado no **Cenário c1**.

Observa-se que, para o **Cenário c2**, existe uma tendência, contrária ao **Cenário c1**, de aumento da eficiência e da disponibilidade hídrica do reservatório. Ao analisar uma diminuição da lâmina de 60%, para $CV=0,8$ e $f_K=1,0$, percebe-se que a vazão regularizada no estado de equilíbrio (Q^*) será aumentada em 60 hm^3 /ano para 66,8 hm^3 /ano (cerca de 13%). E para um $CV=1,4$, para o mesmo f_K , a vazão regularizada aumentaria cerca de 18%, passando de 34,1 hm^3 /ano (cenário atual) para 40,1 hm^3 /ano. A tendência para as outras capacidades é semelhante (tabelas 4.16 a 4.19).

Nos hachurados da Tabela 4.20 ($f_K=1,0$), um comportamento semelhante ao analisado no **Cenário c1** foi observado no **Cenário c2**. Em rios de menor variabilidade – CVs entre 0,6 e 0,8 – seria necessário diminuir cerca de 60% da lâmina líquida para obter-se um ganho de cerca de 10% na vazão regularizada; em rios de maior variabilidade basta um decréscimo de 30% na lâmina líquida do reservatório para que ele obtenha ganhos em torno de 10% de sua vazão regularizada. Os resultados para $f_K = 1,5, 2,0$ e $2,5$ podem ser observados nas tabelas 4.21 a 4.23.

Tabela 4.16 - Vazão regularizada no estado de equilíbrio (Q^*) para o *Cenário c2*, $f_K=1,0$ e $G=90\%$.

Diminuição na lâmina (%)	CV = 0,6	CV = 0,8	CV = 1,0	CV = 1,2	CV = 1,4	CV = 1,6
	$Q^*(\text{hm}^3/\text{ano})$					
Cenário atual	70,0	60,0	48,0	40,4	34,1	27,4
-10	71,1	61,1	49,1	41,4	35,0	28,3
-20	72,2	62,2	50,1	42,4	35,9	29,3
-30	73,4	63,4	51,1	43,4	36,8	30,2
-40	74,7	64,6	52,2	44,5	37,9	31,4
-50	75,7	65,8	53,2	45,5	39,0	32,5
-60	76,9	66,8	54,4	46,5	40,1	33,4
-70	78,0	68,0	55,5	47,5	41,1	34,4
-80	79,3	69,2	56,8	48,7	42,3	35,5
-90	80,5	70,2	57,8	49,8	43,4	36,6

Tabela 4.17 - Vazão regularizada no estado de equilíbrio (Q^*) para o *Cenário c2*, $f_K=1,5$ e $G=90\%$.

Diminuição na lâmina (%)	CV = 0,6	CV = 0,8	CV = 1,0	CV = 1,2	CV = 1,4	CV = 1,6
	$Q^*(\text{hm}^3/\text{ano})$					
Cenário atual	82,1	71,2	59,2	50,0	42,3	35,9
-10	83,4	72,5	60,5	51,3	43,6	37,1
-20	84,7	73,9	62,0	52,7	44,8	38,4
-30	86,1	75,3	63,3	54,0	46,1	39,6
-40	87,6	76,7	64,8	55,4	47,5	41,0
-50	89,0	77,9	66,3	56,7	48,8	42,2
-60	90,4	79,3	67,7	58,2	50,1	43,6
-70	91,9	80,7	69,1	59,5	51,5	44,9
-80	93,5	82,3	70,7	61,0	53,1	46,4
-90	94,9	83,7	72,2	62,2	54,4	47,6

Tabela 4.18 - Vazão regularizada no estado de equilíbrio (Q^*) para o *Cenário c2*, $f_K=2,0$ e $G=90\%$.

Diminuição na lâmina (%)	CV = 0,6	CV = 0,8	CV = 1,0	CV = 1,2	CV = 1,4	CV = 1,6
$Q^*(\text{hm}^3/\text{ano})$						
Cenário atual	89,3	79,8	67,6	57,9	49,5	42,3
-10	90,8	81,3	69,1	59,4	50,9	43,7
-20	92,3	82,7	70,6	60,8	52,3	45,1
-30	93,8	84,2	72,0	62,3	53,7	46,6
-40	95,3	85,8	73,7	64,0	55,3	48,2
-50	96,7	87,3	75,3	65,5	56,8	49,7
-60	98,1	88,8	76,7	67,0	58,3	51,2
-70	99,7	90,3	78,4	68,6	59,9	52,7
-80	101,3	92,1	80,2	70,3	61,7	54,4
-90	102,8	93,7	81,8	71,9	63,3	56,0

Tabela 4.19 - Vazão regularizada no estado de equilíbrio (Q^*) para o *Cenário c2*, $f_K=2,5$ e $G=90\%$.

Diminuição na lâmina (%)	CV = 0,6	CV = 0,8	CV = 1,0	CV = 1,2	CV = 1,4	CV = 1,6
$Q^*(\text{hm}^3/\text{ano})$						
Cenário atual	93,0	85,0	73,4	63,7	54,8	47,1
-10	94,5	86,5	75,1	65,4	56,6	48,7
-20	96,2	88,2	76,8	67,1	58,2	50,4
-30	97,8	89,8	78,5	68,8	59,8	52,0
-40	99,5	91,7	80,4	70,6	61,5	53,9
-50	101,1	93,3	82,1	72,3	63,1	55,7
-60	102,8	95,0	83,8	73,9	64,8	57,4
-70	104,4	96,7	85,5	75,7	66,5	59,2
-80	106,3	98,6	87,5	77,6	68,5	61,1
-90	108,0	100,1	89,4	79,4	70,3	62,9

Percebe-se também que, para o **Cenário c2**, nos rios com alta variabilidade - CVs mais altos - o ganho em vazão regularizada pelo reservatório seria maior, isto é, haveria um aumento na disponibilidade de água ofertada pelos reservatórios da região. Os ganhos em vazão regularizada e o comportamento

destas podem ser observados nas tabelas 4.20 a 4.23 e nas figuras 4.10 a 4.13, para f_K variando entre 1,0 e 2,5.

Tabela 4.20 - Ganhos na vazão regularizada no estado de equilíbrio (Q^*) para o *Cenário c2*, $f_K=1,0$, $G=90\%$ e $CV=0,6$ a $1,6$.

Diminuição na lâmina (%)	CV = 0,6	CV = 0,8	CV = 1,0	CV = 1,2	CV = 1,4	CV = 1,6
Ganhos em Q^* (%)						
-10	1,6%	1,8%	2,3%	2,5%	2,6%	3,3%
-20	3,1%	3,7%	4,4%	5,0%	5,3%	6,9%
-30	4,9%	5,7%	6,5%	7,4%	7,9%	10,2%
-40	6,7%	7,7%	8,8%	10,1%	11,1%	14,6%
-50	8,1%	9,7%	10,8%	12,6%	14,4%	18,6%
-60	9,9%	11,3%	13,3%	15,1%	17,6%	21,9%
-70	11,4%	13,3%	15,6%	17,6%	20,5%	25,5%
-80	13,3%	15,3%	18,3%	20,5%	24,0%	29,6%
-90	15,0%	17,0%	20,4%	23,3%	27,3%	33,6%

Tabela 4.21 - Ganhos na vazão regularizada no estado de equilíbrio (Q^*) para o *Cenário c2*, $f_K=1,5$, $G=90\%$ e $CV=0,6$ a $1,6$.

Diminuição na lâmina (%)	CV = 0,6	CV = 0,8	CV = 1,0	CV = 1,2	CV = 1,4	CV = 1,6
Ganhos em Q^* (%)						
-10	1,6%	1,8%	2,2%	2,6%	3,1%	3,3%
-20	3,2%	3,8%	4,7%	5,4%	5,9%	7,0%
-30	4,9%	5,8%	6,9%	8,0%	9,0%	10,3%
-40	6,7%	7,7%	9,5%	10,8%	12,3%	14,2%
-50	8,4%	9,4%	12,0%	13,4%	15,4%	17,5%
-60	10,1%	11,4%	14,4%	16,4%	18,4%	21,4%
-70	11,9%	13,3%	16,7%	19,0%	21,7%	25,1%
-80	13,9%	15,6%	19,4%	22,0%	25,5%	29,2%
-90	15,6%	17,6%	22,0%	24,4%	28,6%	32,6%

Tabela 4.22 - Ganhos na vazão regularizada no estado de equilíbrio (Q^*) para o *Cenário c2*, $f_K=2,0$, $G=90\%$ e $CV=0,6$ a $1,6$.

Diminuição na lâmina (%)	CV = 0,6	CV = 0,8	CV = 1,0	CV = 1,2	CV = 1,4	CV = 1,6
Ganhos em Q^* (%)						
-10	1,7%	1,9%	2,2%	2,6%	2,8%	3,3%
-20	3,4%	3,6%	4,4%	5,0%	5,7%	6,6%
-30	5,0%	5,5%	6,5%	7,6%	8,5%	10,2%
-40	6,7%	7,5%	9,0%	10,5%	11,7%	13,9%
-50	8,3%	9,4%	11,4%	13,1%	14,7%	17,5%
-60	9,9%	11,3%	13,5%	15,7%	17,8%	21,0%
-70	11,6%	13,2%	16,0%	18,5%	21,0%	24,6%
-80	13,4%	15,4%	18,6%	21,4%	24,6%	28,6%
-90	15,1%	17,4%	21,0%	24,2%	27,9%	32,4%

Tabela 4.23 - Ganhos na vazão regularizada no estado de equilíbrio (Q^*) para o *Cenário c2*, $f_K=2,5$, $G=90\%$ e $CV=0,6$ a $1,6$.

Diminuição na lâmina (%)	CV = 0,6	CV = 0,8	CV = 1,0	CV = 1,2	CV = 1,4	CV = 1,6
Ganhos em Q^* (%)						
-10	1,6%	1,8%	2,3%	2,7%	3,3%	3,4%
-20	3,4%	3,8%	4,6%	5,3%	6,2%	7,0%
-30	5,2%	5,6%	6,9%	8,0%	9,1%	10,4%
-40	7,0%	7,9%	9,5%	10,8%	12,2%	14,4%
-50	8,7%	9,8%	11,9%	13,5%	15,1%	18,3%
-60	10,5%	11,8%	14,2%	16,0%	18,2%	21,9%
-70	12,3%	13,8%	16,5%	18,8%	21,4%	25,7%
-80	14,3%	16,0%	19,2%	21,8%	25,0%	29,7%
-90	16,1%	17,8%	21,8%	24,6%	28,3%	33,5%

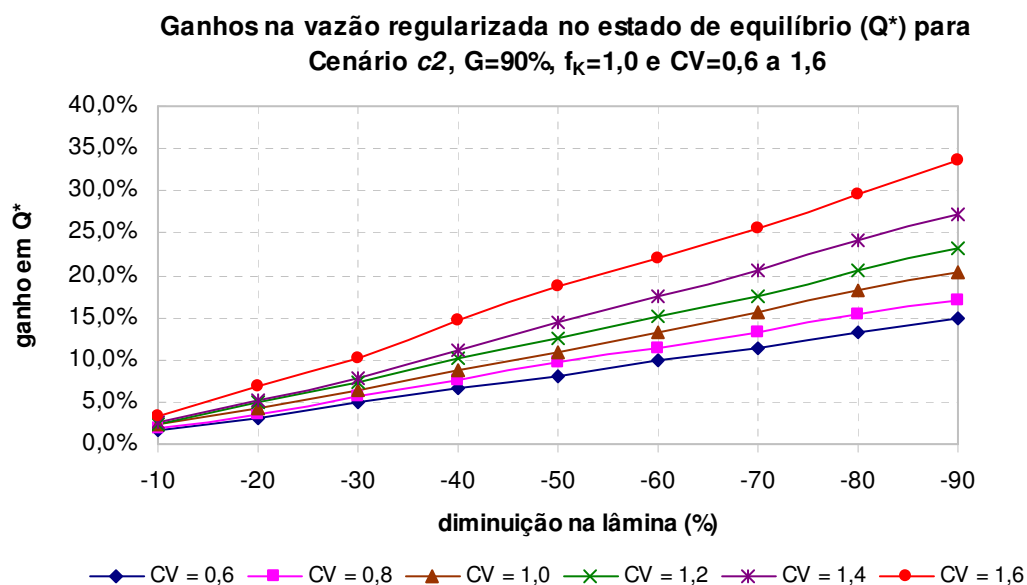


Figura 4.10 - Ganhos na vazão regularizada no equilíbrio (Q^*) para $G=90\%$, $f_K=1,0$ e $CV=0,6$ a $1,6$.

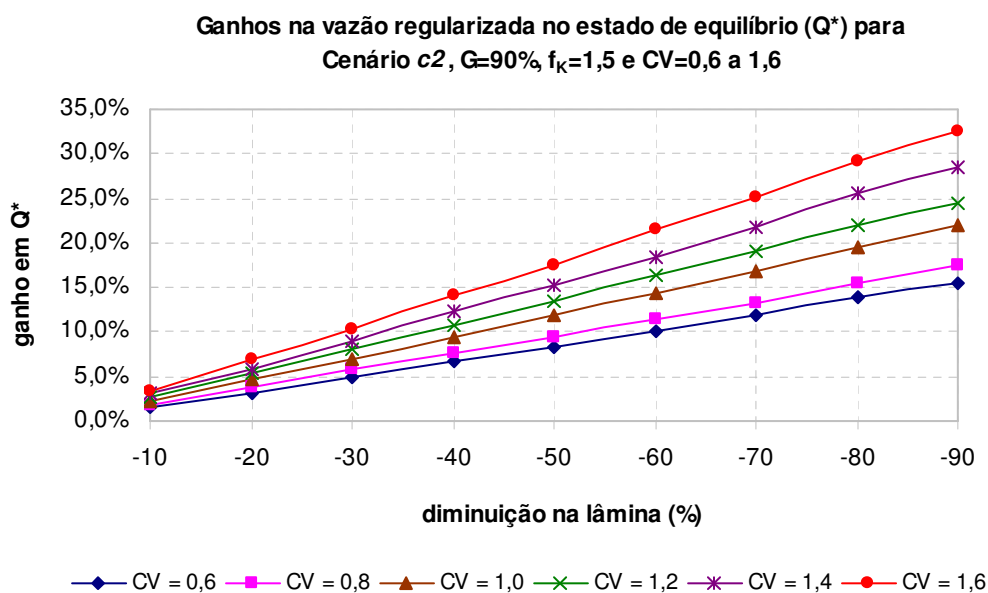


Figura 4.11 - Ganhos na vazão regularizada no equilíbrio (Q^*) para $G=90\%$, $f_K=1,5$ e $CV=0,6$ a $1,6$.

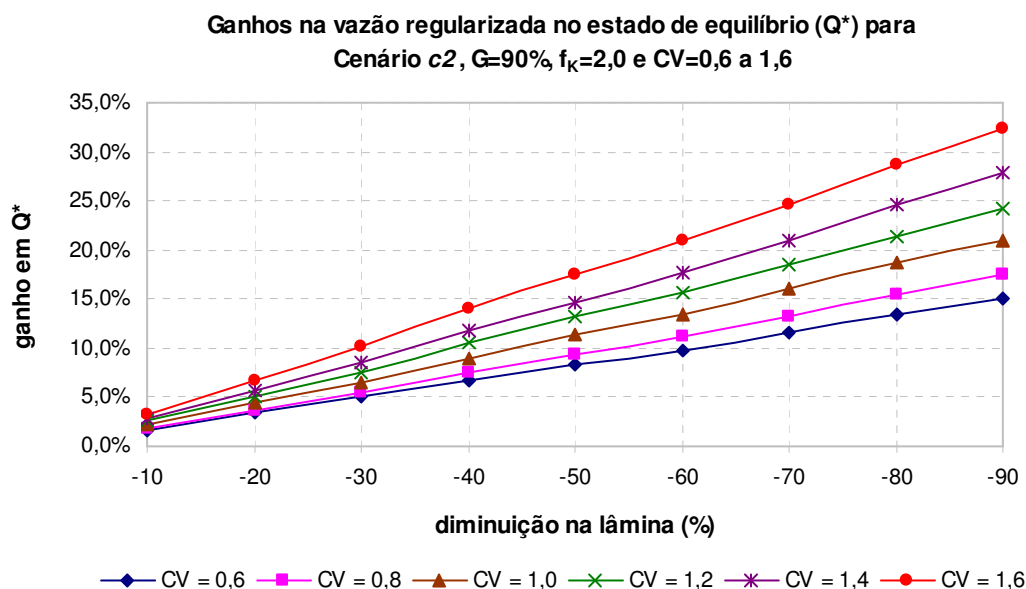


Figura 4.12 - Ganhos na vazão regularizada no equilíbrio (Q^*) para $G=90\%$, $f_K=2,0$ e $CV=0,6$ a $1,6$.

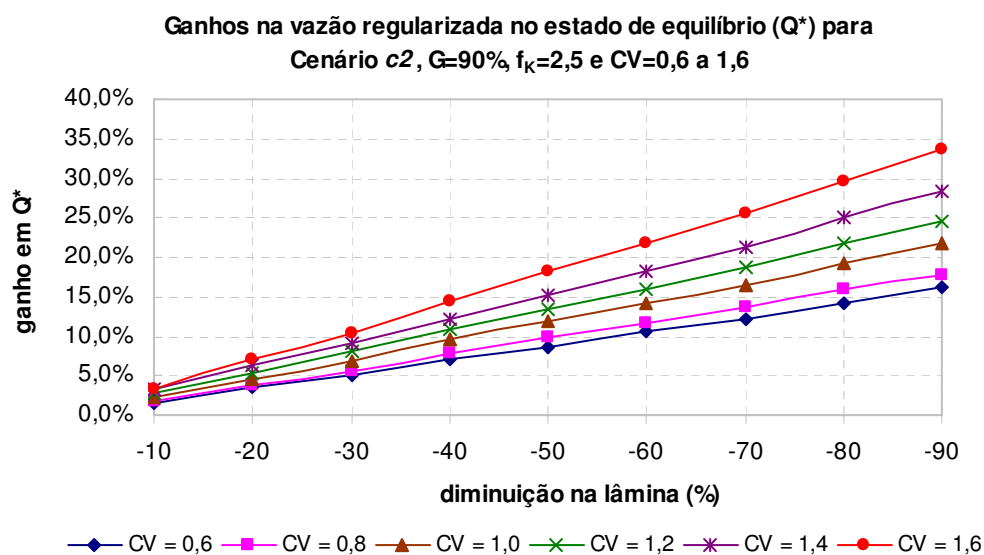


Figura 4.13 - Ganhos na vazão regularizada no equilíbrio (Q^*) para $G=90\%$, $f_K=2,5$ e $CV=0,6$ a $1,6$.

Conforme observado nas figuras de 4.6 a 4.13, os reservatórios situados em rios de maior variabilidade ($CV=1,4$ e $1,6$) são mais vulneráveis às variações climáticas do que os demais. Tais CVs são típicos do Nordeste semi-árido, conforme observado na Tabela 4.23, a qual apresenta, a título de exemplo,

os coeficientes de variação de 42 reservatórios da região, onde cerca de 95% deles possuem CVs superiores a 1,0.

Tabela 4.24 - Relação de reservatórios do Nordeste semi-árido e do coeficiente de variação das vazões afluentes anuais aos mesmos.

Reservatório	CV	Reservatório	CV	Reservatório	CV
Goiata	0,6	Quixeramobim	1,3	Canoas	1,5
Santo Antônio de Russas	1,0	Tomas Osterne	1,3	Poço da Pedra	1,6
Lima Campos	1,1	Riacho dos Tanques	1,4	São José II	1,6
Trapiá II	1,2	Manoel Albino	1,4	Cipoda	1,6
Rosário	1,2	Boa Viagem	1,4	Pedras Brancas	1,6
Aurora	1,2	Orós	1,4	Trici	1,6
Cachoeira	1,3	Castanhão	1,4	Favelas	1,6
Ingazeiro	1,3	Quixeramobim	1,3	Jucá	1,6
Fogareiro	1,3	Bastiões	1,5	Puiu	1,6
Monsenhor Tabosa	1,3	Farias Brito	1,5	Varzea do Boi	1,6
Prazeres	1,3	Munquem	1,5	Arneiroz	1,7
Trussu	1,3	Pombas	1,5	Canafístula	1,9
Riacho dos Carneiros	1,3	Broco	1,5	Ema	1,9
Castelo	1,3	Rivaldo de Carvalho	1,5	Joquim Távora	1,9

5 CONCLUSÕES

O estudo dos impactos das mudanças climáticas nas vazões regularizadas foi o principal objetivo deste estudo. Para a realização deste trabalho, foram utilizados dados de vazão e a curva cota x volume do açude Caxitoré. A validade do estudo, no entanto, não se resume apenas a esse reservatório, uma vez que se procurou o caráter geral, ao adotar-se diferentes coeficientes de variação, conservando a média e a distribuição de probabilidade e diferentes capacidades para o reservatório.

Quanto ao comportamento da vazão regularizada sob os diferentes cenários de mudanças climáticas avaliados, as principais conclusões desta pesquisa são as que seguem:

1. considerando o **Cenário a**, a vazão regularizada pelo reservatório mostrou-se altamente influenciada pelo coeficiente de variação dos influxos (CV). Analisando a vazão adimensional no estado de equilíbrio, percebe-se que, para um $CV=0,6$ a vazão regularizada é 0,55 da vazão média afluyente anual (μ), para um $CV=1,2$ essa vazão reduz para 0,32 de μ , e decresce até 0,22 de μ para $CV=1,6$. Verifica-se que os reservatórios com influxos menos variáveis regularizam maiores valores de vazão do que aqueles cujos influxos são mais variáveis;
2. ao analisar um possível impacto da mudança climática, considerando o **Cenário b1** (evaporação crescendo a uma taxa maior que a precipitação), observou-se que há tendência de redução na vazão regularizada pelo reservatório, na medida em que se aumenta a lâmina líquida (E_L). Ao comparar a vazão adimensional de equilíbrio para o cenário atual ($Q^*=40,4\text{hm}^3/\text{ano}$) e $f_K=1,0$, com a vazão de equilíbrio para um aumento entre 10% e 100%, verificou-se que as perdas variam de 2 a 31%, respectivamente. Verifica-se, pois, uma tendência de decréscimo da disponibilidade hídrica e da eficiência do reservatório;

3. para a evaporação crescendo a uma taxa menor do que a precipitação - **Cenário b2** - verificou-se um comportamento contrário ao **Cenário b1**, no qual uma diminuição da lâmina de 10% e 90% ocasionou um possível ganho na vazão de equilíbrio (Q^*) de 2%, e 23% respectivamente, mostrando, assim, que para esse cenário, existe aumento na eficiência hídrica do reservatório;
4. independentemente do cenário adotado, verificou-se acréscimo da ordem de 50% no valor de f_M , ao duplicar-se a capacidade do reservatório de $f_K=1,0$ para $f_K=2,0$. Observou-se que maiores valores de f_K resultam em maior variabilidade nas séries de vazões regularizadas;
5. observou-se que em rios menos variáveis – CV igual a 0,6 – no **Cenário c1**, é necessário que a lâmina líquida (E_L) aumente 60% para que o reservatório perca cerca de 10% de sua vazão regularizada. Para rios de alta variabilidade - CV igual a 1,6 – E_L , só precisaria receber um aumento de 30% para que o reservatório passasse por esta mesma redução na vazão. Verificou-se que há um comportamento gradual, pois, à medida que se eleva o CV, a porcentagem de lâmina para perder cerca de 10% da vazão regularizada no estado de equilíbrio diminui, ocorrendo, assim, um decréscimo na eficiência do reservatório; e
6. o mesmo comportamento foi observado no **Cenário c2**. Em rios de menor variabilidade – CV=0,6 – seria necessário diminuir cerca de 60% da lâmina líquida para obter-se um ganho de cerca de 10% na vazão regularizada; em rios de maior variabilidade, basta um decréscimo de 30% na lâmina líquida do reservatório para que ele obtenha ganhos cerca de 10% de sua vazão regularizada. Uma tendência semelhante de “escadinha” na diminuição da lâmina é observada para esse cenário, sendo que, em vez de reduzir a eficiência do nele, haverá aumento.

Conclui-se, portanto, que os rios com coeficientes de variação dos deflúvios elevados – CV variando entre 1,2 e 1,6 – são altamente sensíveis às mudanças climáticas, sejam elas favoráveis - a evaporação crescendo a uma taxa menor do que a precipitação - ou não - evaporação crescendo a uma taxa maior

do que a precipitação. E, uma vez que a maioria dos reservatórios do Nordeste semi-árido localiza-se em rios altamente variáveis, com coeficientes de variação dos deflúvios anuais em torno de 1,2 a 1,6, e praticamente a disponibilidade hídrica da região depende de reservatórios superficiais, cuidados maiores se deverá ter com estes reservatórios perante as variabilidades climáticas, uma vez que eles, como mostrado no presente estudo, são bastante vulneráveis a essas variações.

ANEXOS

Tabela A1 - Vazões históricas mensais do rio Caxitoré.

Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1912	36,5	98,9	179,9	96,7	78,1	6,0	3,2	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0
1913	0,0	28,1	18,4	48,6	5,8	3,2	1,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1914	0,0	0,0	0,1	0,3	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1915	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1916	0,0	0,1	65,1	25,3	7,7	1,5	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1917	18,0	100,9	86,2	35,5	73,7	6,2	2,8	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0
1918	0,0	0,1	51,7	21,5	2,1	1,7	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1919	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1920	0,0	0,0	124,0	50,4	5,8	4,6	1,8	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
1921	0,0	23,9	138,4	63,8	71,8	5,6	2,4	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0
1922	0,0	0,0	0,0	59,5	13,7	1,8	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1923	0,0	0,0	17,2	26,8	2,2	1,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1924	17,9	24,1	86,8	195,3	71,7	6,3	3,3	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0
1925	0,0	0,0	20,9	36,8	28,4	1,5	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1926	0,0	13,2	98,2	127,3	6,3	3,2	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1927	0,1	20,0	54,3	104,7	28,5	10,6	5,4	1,8	0,0	0,0	0,0	0,0
1928	0,0	0,0	0,1	4,5	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1929	0,0	20,6	39,6	78,7	5,0	2,5	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1930	0,0	9,0	2,9	1,7	1,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1931	0,0	33,6	14,4	8,4	2,1	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1932	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1933	0,1	0,2	28,3	80,8	3,4	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1934	0,0	28,9	63,4	13,1	14,3	3,7	1,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1935	0,0	7,0	14,1	119,7	12,8	5,3	3,1	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0
1936	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1937	0,0	0,0	0,0	32,4	1,4	1,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1938	0,0	0,0	44,3	57,0	3,6	1,5	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1939	0,0	35,9	99,1	4,3	2,7	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1940	0,0	0,1	0,2	51,5	18,8	2,2	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabela A1 - Vazões históricas mensais do rio Caxitoré - (cont.)

Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1941	0,0	0,1	62,8	25,6	4,6	1,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1942	0,0	0,0	23,4	29,6	3,6	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1943	0,0	12,4	1,0	17,3	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1944	0,0	0,0	61,5	64,1	8,1	5,0	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1945	0,1	84,8	104,5	22,3	49,8	11,1	5,1	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0
1946	0,1	0,0	0,1	20,3	1,8	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1947	0,0	6,8	51,7	4,6	9,3	2,3	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1948	0,0	0,0	0,2	0,8	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1949	0,0	0,0	36,7	73,7	96,9	11,7	5,2	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0
1950	0,0	0,0	27,7	53,3	6,0	2,8	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1951	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
1952	0,0	0,0	0,0	8,9	10,9	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1953	0,0	0,0	0,3	27,6	2,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1954	0,0	13,0	1,1	1,1	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1955	0,0	0,0	3,3	84,9	40,2	5,6	1,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1956	0,0	0,0	25,3	82,3	5,9	1,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1957	0,0	0,0	101,6	152,3	19,2	8,5	2,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1958	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1959	0,0	34,3	79,9	7,8	36,1	7,5	2,6	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
1960	0,0	0,0	63,8	50,2	7,3	3,6	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1961	0,0	88,0	163,9	264,1	19,8	9,8	3,7	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0
1962	0,0	2,8	11,6	19,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1963	0,0	0,6	111,6	62,7	8,2	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	1,8	0,0
1964	0,1	40,1	45,7	129,9	20,9	11,9	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0
1965	0,8	0,0	0,0	96,2	78,5	32,4	27,6	2,6	0,0	0,0	0,0	0,0
1966	0,0	1,5	0,0	0,4	2,3	2,4	0,0	3,2	3,2	0,0	5,5	0,0
1967	4,1	3,6	32,5	42,2	83,7	3,3	1,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1968	0,0	1,9	4,1	42,6	64,8	0,0	1,9	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0
1969	0,0	0,0	0,0	33,4	3,0	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabela A1 - Vazões históricas mensais do rio Caxitoré - (cont.)

Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1970	0,0	0,0	0,1	14,2	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1971	0,0	0,0	0,3	26,8	4,2	2,3	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1972	0,0	0,0	0,1	8,1	16,2	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1973	0,1	0,1	58,4	57,1	20,6	11,5	6,0	1,3	0,0	0,0	0,0	0,0
1974	46,4	56,8	147,4	477,1	145,9	19,0	8,5	1,6	0,0	0,0	0,0	0,0
1975	0,0	0,1	30,1	3,0	14,8	3,9	1,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1976	0,0	0,1	0,8	1,3	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1977	0,0	0,2	27,1	29,4	5,0	3,7	1,8	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0
1978	0,0	0,1	2,9	0,6	3,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1979	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1980	0,0	0,0	48,6	2,1	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1981	0,0	0,0	34,5	32,1	1,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1982	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1983	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1984	0,0	0,0	56,7	81,7	21,9	8,1	3,1	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0
1985	6,3	129,5	73,8	218,5	37,8	11,2	5,4	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0
1986	0,0	6,3	109,1	101,8	50,3	47,0	2,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1987	0,0	0,0	27,4	21,8	3,3	3,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1988	7,1	9,4	52,3	93,4	6,5	5,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1989	0,0	2,8	5,1	84,5	81,4	12,5	16,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1990	0,0	0,0	1,5	2,2	5,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

GLOSSÁRIO

Com a finalidade de promover melhor entendimento do trabalho, apresenta-se uma simbologia, seguida de conceituação, de alguns termos e parâmetros citados ao longo do texto.

- Capacidade do Reservatório (K) - representa o volume total acumulado no reservatório quando o nível da água se encontra na cota da soleira do sangradouro.
- Coeficiente de Variação dos Deflúvios (CV) – é a razão entre o desvio-padrão (σ) e a média (μ) da série de vazões naturais afluentes ao reservatório.
- Fator adimensional de capacidade (f_K) - representa a razão entre a capacidade do reservatório (K) e o volume médio afluente anual (μ).
- Fator adimensional de retirada em estado de equilíbrio ou vazão adimensional de equilíbrio (f_M^*) – é a vazão regularizada pelo reservatório (em fração do volume afluente médio anual (μ)), quando o processo de armazenamento se encontra em seu estado de equilíbrio, segundo um determinado cenário de, f_K , CV e G.
- Fator de forma do reservatório (α) - a forma da bacia hidráulica do lago pode ser representada pela equação $Z(h) = \alpha h^3$; onde $Z(h)$ denota o volume da reserva quando a superfície do lago se encontra na altura h ; onde h é medido em relação ao ponto mais profundo do açude.
- Horizonte de Simulação (H) – é o horizonte de tempo (em anos) utilizado para simular o reservatório.
- Nível de garantia (G) - representa a probabilidade de o reservatório fornecer, sem restrições, em um ano qualquer, a vazão regularizada Q.

- Volume afluyente médio anual (μ) - volume médio (em hm^3) que anualmente escoia para o reservatório.
- Vazão de Equilíbrio (Q^*) – é a vazão regularizada (em hm^3/ano) pelo reservatório, quando o processo de armazenamento se encontra em seu estado de equilíbrio, segundo um determinado cenário de f_K , CV e G.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, E. L. (2000) **Introdução à Pesquisa Operacional**: métodos e modelos para análise de decisão, Rio de Janeiro, 2000.

ARAÚJO, J.K. (1991). **Método dos Fragmentos Aplicado a Rios Intermitentes**: Avaliação dos Erros Introduzidos no Cálculo da Disponibilidade de Reservatórios. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Fortaleza, 1991.

BRESSAN, G., (2002) **Modelagem e Simulação de Sistemas Computacionais**. Notas de Aula. Universidade de São Paulo. (2002) disponível em: <http://poliparatodos.larc.usp.br/módulos/26/index.htm>. Acesso em: 08/07/2007.

BOURAOUI, F., VACHAUD G., CHEN T. (1998). Prediction of the Effect of Climatic Changes and Land Use Management on Water Resources. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 23, p. 379-384.

CAMPOS, J.N.B. (1987). **A Procedure for Reservoir Sizing on Intermittent Rivers Under High Evaporation Rate**. Tese de Pós-Doutorado (PhD). Colorado State University, Fort Collins, 1987.

CAMPOS, J.N.B. (1996). **Dimensionamento de Reservatórios**: O Método do Diagrama Triangular de Regularização, Edições Fortaleza, UFC, 1996.

CAMPOS, J.N.B. e IBIAPINA, N. (1997). Uma Equação para a Máxima Capacidade de Regularização em um Reservatório. In: XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos - **Anais** - vol. 2 p. 175-180, Vitória, 1997.

CAMPOS, J.N.B, STUDART, T.M.C., MARTINZ, D.G. e COÊLHO, L. (2000). **SIMRES**: Laboratório Computacional de Reservatórios
<http://www.deha.ufc.br/nilson/simres>.

CAMPOS, J.N.B, STUDART, T.M.C., CHAGAS, P. F. (2003). Reservoir Yield Vulnerability under Global Change In GAISER, T., KROL, M., FRISCHKORN, H., ARAÚJO, J. C., **Global Change and Regional Impacts**: Water Availability and

Vulnerability of Ecosystems and Society in the Semiarid Northeast of Brazil. Berlin, 2003.

CEARÁ (1992). **Plano Estadual de Recursos Hídricos**. Secretaria de Recursos Hídricos do Estado do Ceará (SRH), Fortaleza, 1992.

CEARÁ (1996). **Plano Diretor da Bacia do Curu**. Volume I, Tomo 2. COGERH/Secretaria de Recursos Hídricos do Estado do Ceará (SRH), Fortaleza, 1996.

FREITAS, M. A. S. (2003) Análise de risco e incerteza na gestão hidroambiental. IN: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, **Anais**, ABRH, Porto Alegre, 2003.

FIORILLO, F., ESPOSITO, L., GUADAGNO, F. M. (2007). Analyses and forecast of water resources in na ultra-centenarian spring discharge series from Serino (Southern Italy). **Journal of Hydrology**, v. 336, p. 125-138.

FOWLER, H. J., KILSBY, C. G., O'CONNELL, P. E., BURTON, A. (2005). **A weather-type conditioned multi-site stochastic rainfall model for the generation of scenarios of climatic variability and change**. Journal of Hydrology, v. 308, p. 50-66.

GOUDIE, A. e HEATHER, V. (1997). **The Earth Transformed**: an introduction to human impacts on the environment. UK, Oxford, 1997.

GUO, S., WANG, J., XIONG, L., YING, A., LI, D. (2002). A macro-scale and semi-distributed monthly water balance model to predict climate change impacts in China. **Journal of Hydrology**, v. 268, p. 1-15.

HOBBS, B. F. (1997). Bayesian Methods for Analysing Climate Change and WaterResource Uncertainties. **Journal of Environmental Management**, v 49, p. 53-72.

HOUGHTON, J. (2005). Global warming. **Institute of Physics Publishing**, v. 68, p. 1343-1403.

HULME, M., MITCHELL, J., INGRAM, W., LOWE, J., JOHNS, T., NEW, M., VINER, D. (1999). Climate change scenarios for global impacts studies. **Global Environmental Change**, v. 9, p. S3-S19.

INEMET (1992). **Normais Climatológicas (1961–1990)**. Secretaria Nacional de Irrigação, Ministério da Agricultura e Reforma Agrária, Distrito Federal, 1992.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. **Climate Change 2007: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. ALLEY, R., BERNTSEN, T., BINDOFF, N. L., CHEN, Z., et al. (Ed.). Disponível em: <http://www.ipcc.ch/SPM2feb07>. Acesso em: 20/06/2007.

JIANG, T., CHEN, Y. D., XU, C.Y, CHEN, X., CHEN, X., SINGH, V. P. (2007). Comparison of hydrological impacts of climate change simulated by six hydrological models in the Dongjiang Basin, South China. **Journal of Hydrology**, v. 336, p. 316-333.

KELMAN, J. (1987). In: BARTH, F.T. et al. (Org.). **Modelos para Gerenciamento de Recursos Hídricos**. São Paulo: Editora Nobel/ABRH, 1987.

KROL, M. A., BRONSTERT, A. (2007). Regional integrated modelling of climate change impacts on natural resources and resource usage in semi-arid Northeast Brazil. **Environmental Modelling & Software**, v. 22, p. 259-268.

LEGGETT, J., (Org.) (1992) In: **Aquecimento Global: o relatório do Greenpeace**. Rio de Janeiro: Fundação Getulio Vargas, 1992.

MATONDO, J. I., PETER, G., MSIBI, K. M. (2004). Evaluation of the impact of climate change on hydrology and water resources in Swaziland: Part I. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 29, p. 1181-1191.

Mauna Loa. (2007) **Figura 2.1** - disponível em: http://www.mlo.noaa.gov/programs/coop/scripps/img/img_scripps_co2_record.gif.

MEIRA, R. (2002) **Figura 1.1** - disponível em: <http://www.rudzerhost.com/ambiente/estufa.htm>. Acesso em: 13/07/2007.

MIMIKOU, M. A., BALTAS, E., VARANOU, E., PANTAZIS, K. (2000). Regional impacts of climate change on water resources quantity and quality indicators. **Journal of Hydrology**, v. 234, p. 95–109.

PEREIRA, A., S.; MAY, P., H. (2003). Economia do aquecimento global. In: MAY, P.H.; LUSTOSA, M. C.; VINHA, V. de. **Economia do meio ambiente: teoria e prática**. Rio de Janeiro: Campus, 2003. p. 219-244.

PNUMA – Programa das Nações Unidas para Meio Ambiente, IBAMA- Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais, Renováveis e UMA - Universidade Livre da Mata Atlântica. (2004) **Capítulo 1. Integração entre o meio ambiente e o desenvolvimento**. In: Perspectivas do Meio Ambiente Mundial - 2002 GEO-3. Disponível em: <http://www.uff.br/cienciaambiental/biblioteca.htm>. Acesso em: 14/07/2007.

RAGAB R.; PRUDHOMME, C. (2002). Climate Change and Water Resources Management in Arid and Semi-arid Regions: Prospective and Challenges for the 21st Century. **Biosystems Engineering**, v. 81, p. 3-34.

ROCHA, M.,T. (2003). **Aquecimento Global e o Mercado de Carbono: Uma aplicação do Modelo Cert**. Tese Doutorado. Escola Superior de Agricultura, Universidade de São Paulo, São Paulo: 2003.

SCHUBERT, A. e LÁNG, I. (2005). “The literature aftermath of the brundtland report ‘our common future: a scientometric study based on citations in science and social science journals”. **Environment, Development and Sustainability**, v. 7, p. 1-8.

SOBOL, I.M. (1994). **A Primer for the Monte Carlo Method**. CRC Florida, Press, 1994.

STUDART, T.M.C. (2000). **Análise de Incertezas na Determinação de Vazões Regularizadas em Climas Semi-áridos**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza: 2000.

SVANIDZE, G. G. (1980). **Mathematical Modeling of Hydrology Series**. Fort Collins, Colorado, Water Resources Publications, 1980.

VOSE, D. (1996). **Quantitative Risk Analysis**: A Guide to Monte Carlo Simulation Modelling. John Wiley & Sons, England, 1996.

WERRITTY, A. (2002). "Living with uncertainty: climate change, river flows and water resource management in Scotland". **The Science of the Total Environment**, v. 294, p. 29–40.

WESTMACOTT, J. R. e BURN, D. H. (1997). "Climate change effects on the hydrologic regime within the Churchill-Nelson River Basin". **Journal of Hydrology**, v. 202, p. 263-279.

XU, C. Y. (1999). "Operational testing of a water balance model for predicting climate change impacts". **Agricultural and Forest Meteorology**, v.98-99, p. 295-304.

YEVJEVICH, V. (1967). **Stochastic Process in Hydrology**. Fort Collins, Colorado: Water Resources Publications, 1967.

YEVJEVICH, V. (1972). **Probability and Statistics in Hydrology**. Fort Collins, Colorado: Water Resources Publications, 1972.

YU, P. S., YANG, T. C., WU, C. K. (2002). "Impact of climate change on water resources in southern Taiwan". **Journal of Hydrology**, v. 260, p. 161-175.