

**UNIVERSIDADE DO EXTREMO SUL CATARINENSE - UNESC
UNIDADE ACADÊMICA DE HUMANIDADES CIÊNCIAS E
EDUCAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS
AMBIENTAIS
MESTRADO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS**

JULIANO POSSAMAI DELLA

**SIMULAÇÕES HIDROLÓGICAS PARA APOIO A GESTÃO DE
OPERAÇÃO DA BARRAGEM DO RIO SÃO BENTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Álvaro José Back.

**CRICIÚMA
2014**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

D357s Della, Juliano Possamai.

Simulações hidrológicas para apoio a gestão de
operação da Barragem do Rio São Bento / Juliano Possamai
Della ; orientador: Álvaro José Back. – Criciúma, SC : Ed.
do Autor, 2014.

112 p : il. ; 21 cm.

Dissertação (Mestrado) - Universidade do Extremo Sul
Catarinense, Programa de Pós-Graduação em Ciências
Ambientais, Criciúma, SC, 2014

1. Recursos hídricos - Administração. 2. Reservatórios.
3. Represas. 4. Abastecimento de água. 5. São Bento, Rio,
Barragem (SC). I. Título.

CDD. 22^a ed. 333.91

Bibliotecária Rosângela Westrupp – CRB 14º/364
Biblioteca Central Prof. Eurico Back - UNESC

JULIANO POSSAMAI DELLA

**SIMULAÇÕES HIDROLÓGICAS PARA APOIO A GESTÃO DE
OPERAÇÃO DA BARRAGEM DO RIO SÃO BENTO**

Esta dissertação foi julgada e aprovada para obtenção do Grau de Mestre em Ciências Ambientais. na área de Hidrologia no Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da Universidade do Extremo Sul Catarinense.

Criciúma, 02 de Fevereiro de 2014.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Álvaro Jose Back - Doutor - (Unesc) - Orientador

Prof. Carlyle Torres Bezerra de Menezes -Doutor - (Unesc)

Prof. Tadeu de Souza Oliveira - Doutor - (Sociesc)

A família incontestavelmente é a base para todo o caminho do sucesso, dedico a minha esposa Giselle e aos filhos Helena e Arthur pelo amor, paciência, apoio e compreensão.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, a DEUS e a família, por dar apoio de chegar até este momento tão importante, caso contrario tudo isto não estaria acontecendo.

A minha esposa e companheira Giselle, aos filhos Helena e Arthur pela paciência, incentivo e compreensão, as minhas ausências dedicadas ao desenvolvimento desta pesquisa.

Aos meus pais, Otavio e Marlene, pelo exemplo de ética, amizade e respeito. A minha irmã Franciela pela amizade fraternal.

Aos meus sogros Edemir e Verginia pelo apoio, incentivo ao sucesso desta etapa.

Ao orientador e amigo Dr. Álvaro Jose Back, por ter compartilhado seu vasto e precioso conhecimento e paciência pelos incessantes questionamentos que lhe eram feitos e sempre respondidos com sabedoria e bom humor.

A empresa Companhia Catarinense de Águas e Saneamento – CASAN por ceder a unidade de estudo bem como apoio para a realização do mesmo através da disponibilidade dos documentos para o desenvolvimento de um trabalho de sucesso.

Aos colegas do PPGCA que enriqueciam os encontros com descontração, debates e observações das diversas áreas do conhecimento.

Aos meus verdadeiros amigos.

A todos aqueles que contribuíram de alguma maneira para a realização deste trabalho, meus sinceros e profundo agradecimentos.

“Dê-me uma alavanca longa
o suficiente e um suporte forte o
suficiente que eu poderei sozinho
movimentar do mundo.”

Arquimedes

RESUMO

A região Sul de Santa Catarina apresenta boa parte dos recursos hídricos comprometidos pela poluição devido à mineração do carvão. A escassez de água de boa qualidade aliada à grande demanda leva a conflitos pelo uso da água. A barragem do rio São Bento foi construída com objetivo de solucionar os problemas de abastecimento de água e também atender a demanda de parte da área irrigada e auxiliar no controle de cheias. Esses diferentes usos de água são conflitantes e há necessidade de ter critérios de operação da barragem e gestão dos recursos hídricos. Após quase dez anos de operação, a aparente abundância da água aumenta a pressão para aumento da oferta para a mesma. Assim este trabalho teve como objetivo realizar simulações hidrológicas com a finalidade de avaliar a capacidade de atendimento das demandas de irrigação e abastecimento em vários cenários de uso da água. Foram considerados 240 cenários pela combinação dos usos de água para irrigação (variando de 6000 a 10000 ha), abastecimento (300000 a 1000000 habitantes) e vazão ecológica (100 a 600 L.s⁻¹). Na simulação do reservatório foram considerados as situações de reservatório Cheio, Normal, Alerta, Crítico e Falha, estabelecendo o período de retorno de cada situação. Os resultados obtidos mostram que a modelagem matemática permitiu simular longas séries de dados de chuva mantendo as características da série observada. Nas simulações observadas constatou-se que o reservatório da barragem do rio São Bento tem possibilidade de atender demandas superiores às atuais, e que a adoção de critérios de operação diferenciada pode determinar o melhor uso dos recursos hídricos.

Palavras-chave: Precipitação. Reservatório. Hidrologia. Cadeia de Markov.

ABSTRACT

The southern region of Santa Catarina has a good portion of the watershed compromised by pollution due to coal mining. The scarcity of good quality water coupled with high demand leads to conflicts over water use. The dam of the São Bento was built in order to resolve the problems of water supply and also meet the demand of the irrigated area and assist in flood control. These different uses of water are conflicting and there need to be criteria for dam operation and management of water resources. After almost ten years of operation, the apparent abundance of water increases the pressure to increase the supply of water. Thus this work aimed to propose criteria for the operation of the dam the São Bento river by simulation of the operation of the reservoir under various scenarios of water use. 240 scenarios by combining the use of water for irrigation (ranging 6000 a 10000 ha), supply (from 300000 to 1000000 in habitants) and in stream flow (100 to 600 L.s⁻¹) were considered. In reservoir simulation were considered the situations of reservoir Full, Normal, Warning, Critical, and failed, setting the return period of each situation. The results show that the mathematical model allowed simulating long time series of rainfall data while maintaining the characteristics of the observed series. Observed in the simulations it was found that the reservoir of the dam the São Bento river has the potential to meet the higher current demands, and that the adoption of different criteria for operation can determine the best use of water resources.

Keywords : Rainfall. Reservoir. Hydrology. Markov Chain.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Pluviômetro e pluviógrafo.....	31
Figura 2 - Comportamento típico do hidrograma.....	32
Figura 3- Esquema de um modelo geral.....	37
Figura 4 – Fluxograma do processo integrado do ciclo hidrológico.	43
Figura 5 - Localização barragem do rio São Bento.....	48
Figura 6 - Reservatório da barragem do rio São Bento.....	49
Figura 7 - Barragem principal.....	50
Figura 8 – Localização encontro rio São Bento com rio Serrinha.....	51
Figura 9 - Dique principal.....	52
Figura 10 - Dique secundário.....	53
Figura 11 - Representação da bacia hidrográfica do rio São Bento.	55
Figura 12 - Fluxograma da metodologia utilizada na pesquisa.....	63
Figura 13 - Formulário do controle hidráulico do reservatório.....	66
Figura 14 - Curva Cota-Volume do reservatório.....	66
Figura 15 - Curva Cota-Vazão dos descarregadores.....	67
Figura 16 - Curva Cota-Vazão válvula dispersora.	67
Figura 17 - Curva Cota-Vazão vertedouro.....	68
Figura 18 - Variação sazonal dos parâmetros da cadeia de Markov da série observada (obs.) e simulada (sim.).....	83
Figura 19- Totais mensais de precipitação da série observada e simuladas com a distribuição exponencial e distribuição gama.....	85
Figura 20 - Dias de chuva mensal da série observada e simuladas com a cadeia de Markov.	85
Figura 21 - Frequência de precipitação total anual simuladas com as distribuições exponencial e gama.....	86
Figura 22 - Precipitação total anual da série simulada com a distribuição gama.	86
Figura 23–Variação do volume do reservatório observado e simulado no período de 2004 a 2005.....	87
Figura 24 - Variação do volume do reservatório observado e simulado no período de 2006 a 2007.....	88
Figura 25 - Variação do volume do reservatório observado e simulado no período de 2008 a 2009.....	88
Figura 26 - Variação do volume do reservatório observado e simulado no período de 2010 a 2011.....	88
Figura 27 - Variação do volume do reservatório observado e simulado no período de 2012.....	89
Figura 28 – Percentual das situações encontradas.....	90
Figura 29 - Demonstrativo das condições do reservatório.	91

Figura 30- Período de retorno para a condição de Alerta com vazão ecológica de 100 L.s^{-1} em função da demanda para abastecimento da população (habitantes) e da área irrigada com rizicultura (ha).....	92
Figura 31 - Período de retorno para a condição de Crítica com vazão ecológica de 100 L.s^{-1} em função da demanda para abastecimento da população (habitantes) e da área irrigada com rizicultura (ha).....	93
Figura 32 - Período de retorno para a condição de Alerta com vazão ecológica de 200 L.s^{-1} em função da demanda para abastecimento da população (habitantes) e da área irrigada com rizicultura (ha).....	95
Figura 33 - Período de retorno para a condição de Crítica com vazão ecológica de 200 L.s^{-1} em função da demanda para abastecimento da população (habitantes) e da área irrigada com rizicultura (ha).....	95
Figura 34 - Período de retorno para a condição de Falha com vazão ecológica de 200 L.s^{-1} em função da demanda para abastecimento da população (habitantes) e da área irrigada com rizicultura (ha).....	96
Figura 35 - Período de retorno para a condição de Alerta com vazão ecológica de 300 L.s^{-1} em função da demanda para abastecimento da população (habitantes) e da área irrigada com rizicultura (ha).....	96
Figura 36 - Período de retorno para a condição de Crítica com vazão ecológica de 300 L.s^{-1} em função da demanda para abastecimento da população (habitantes) e da área irrigada com rizicultura (ha).....	96
Figura 37 - Período de retorno para a condição de Falha com vazão ecológica de 300 L.s^{-1} em função da demanda para abastecimento da população (habitantes) e da área irrigada com rizicultura (ha).....	97
Figura 38 - Período de retorno para a condição de Alerta com vazão ecológica de 400 L.s^{-1} em função da demanda para abastecimento da população (habitantes) e da área irrigada com rizicultura (ha).....	97
Figura 39 - Período de retorno para a condição de Crítica com vazão ecológica de 400 L.s^{-1} em função da demanda para abastecimento da população (habitantes) e da área irrigada com rizicultura (ha).....	97
Figura 40 - Período de retorno para a condição de Falha com vazão ecológica de 400 L.s^{-1} em função da demanda para abastecimento da população (habitantes) e da área irrigada com rizicultura (ha).....	98
Figura 41 - Período de retorno para a condição de Alerta com vazão ecológica de 500 L.s^{-1} em função da demanda para abastecimento da população (habitantes) e da área irrigada com rizicultura (ha).....	98
Figura 42 - Período de retorno para a condição de Crítica com vazão ecológica de 500 L.s^{-1} em função da demanda para abastecimento da população (habitantes) e da área irrigada com rizicultura (ha).....	98
Figura 43 - Período de retorno para a condição de Falha com vazão ecológica de 500 L.s^{-1} em função da demanda para abastecimento da população (habitantes) e da área irrigada com rizicultura (ha).....	99

Figura 44 - Período de retorno para a condição de Alerta com vazão ecológica de 600 L.s^{-1} em função da demanda para abastecimento da população (habitantes) e da área irrigada com rizicultura (ha).	99
Figura 45 - Período de retorno para a condição de Crítica com vazão ecológica de 600 L.s^{-1} em função da demanda para abastecimento da população (habitantes) e da área irrigada com rizicultura (ha).	99
Figura 46 - Período de retorno para a condição de Falha com vazão ecológica de 600 L.s^{-1} em função da demanda para abastecimento da população (habitantes) e da área irrigada com rizicultura (ha).	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Identificação de solos NRCS.....	36
Tabela 2 - Cronologia dos principais eventos.....	50
Tabela 3 - Dados da estação Urussanga valores médios mensais - 1942 a 1992.....	56
Tabela 4 - Consumo médio de água no mundo.....	57
Tabela 5 - Demandas progressivas para diversos horizontes de projeto.....	58
Tabela 6 - Demandas de irrigação consideradas pelo projeto.....	59
Tabela 7 - Área Irrigada.....	60
Tabela 8 - Condições de demanda para cada cenário de simulação de operação da barragem do rio São Bento.....	75
Tabela 9 - Índices pluviométricos estação Serrinha.....	79
Tabela 10 - Número de dias de chuva registrado na Estação Serrinha.....	80
Tabela 11 - Estatística descritiva das chuvas diárias registrada na estação Serrinha.....	81
Tabela 12 - Parâmetros da Cadeia de Markov da série observada.....	82
Tabela 13 - Parâmetros da cadeia de Markov da série simulada.....	82
Tabela 14 - Estatísticas descritivas da série simulada com distribuição Exponencial.....	84
Tabela 15 - Estatísticas descritivas da série simulada com a distribuição Gama.....	84

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência nacional de águas
BRSB	Barragem do rio São Bento
CCR	Concreto compactado a rolo
CEHPAR Souza	Centro de hidráulica e hidrologia Prof. Parigot de Souza
EIA	Estudo de impacto ambiental
EPAGRI Santa Catarina	Empresa de pesquisa agropecuária e extensão rural de Santa Catarina
ETP	Evapotranspiração potencial
FATMA	Fundação do meio ambiente
H	Horizontal
HUI	Hidrograma unitário instantâneo
km ²	Quilômetro quadrado
LAI	Licença ambiental instalação
LAO	Licença ambiental de operação
LAO	Licença ambiental de operação
LAP	Licença ambiental prévia
m	Metro
mm	Milímetro
NCRS	Natural resources conservation service
P	Precipitação
RIMA	Relatório de impacto ambiental
SCS	Service soil conservation
SMS	Short Message Service
t	Tempo
tc	Tempo de concentração
tm	Tempo ascensão
tp	Tempo de pico
URA	Umidade relativa do ar
V	Vertical

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	25
2	OBJETIVOS.....	28
2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	28
3	REFERENCIAL TEÓRICO.....	29
3.1	ÁGUA	29
3.1.1	Água no contexto social, ambiental e político.....	30
3.2	PRECIPITAÇÃO	30
3.3	ESCOAMENTO SUPERFICIAL	32
3.4	MÉTODO SOIL CONSERVATION SERVICE (SCS).....	33
3.5	MODELOS HIDROLÓGICOS.....	36
3.5.1	Generalidades.....	36
3.5.2	Classificação.....	39
3.5.3	Modelos de precipitação-vazão.....	42
3.5.4	Cadeia de Markov	44
4	LOCALIZAÇÃO E DESCRIÇÃO DA ÁREA	47
4.1	BARRAGEM PRINCIPAL.....	50
4.2	DIQUE PRINCIPAL.....	52
4.3	DIQUE SECUNDÁRIO.....	53
4.4	GEOMORFOLOGIA	54
4.5	BACIA HIDROGRÁFICA	54
4.6	CLIMATOLOGIA	56
4.7	DEMANDAS CONSIDERADAS EM PROJETO	57
4.8	DEMANDA DE ABASTECIMENTO URBANO.....	57
4.9	IRRIGAÇÃO DE ÁREAS CULTIVADAS.....	58
4.10	VAZÃO MÍNIMA DE JUSANTE.....	60
5	MATERIAIS E MÉTODOS.....	62
5.1	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	62
5.1.1	Dados do local de estudo	63
5.1.2	Dados meteorológicos	64
5.1.3	Dados de chuva estação Serrinha.....	69
5.1.4	Coeficiente de escoamento	70
5.1.5	Estimativa da vazão a partir da chuva do Serrinha	71
5.1.6	Geração de séries de chuva	71
5.1.7	Geração das vazões	74
5.1.8	Simulação do reservatório	74
5.1.9	Situações do reservatório em função do volume armazenado	77
6	Resultados e discussões	78
6.1	ANÁLISE DOS DADOS DE PRECIPITAÇÃO	78
6.2	PARÂMETROS DA CADEIA DE MARKOV	82

6.3	SÉRIE DE CHUVA SIMULADA.....	83
6.4	AJUSTE DO MODELO CHUVA-VAZÃO.....	87
7	CONCLUSÕES.....	101
8	RECOMENDAÇÕES.....	102
	REFERÊNCIAS.....	103

1 INTRODUÇÃO

O crescente aumento demográfico combinado com a degradação dos recursos hídricos vem promovendo a escassez de água preocupando toda a população mundial, sem distinção de classe social, raça, cor, etc., sendo que as águas doces superficiais mais facilmente obtêíveis, não passam de 0,03% do total dos recursos hídricos da Terra (CARRERA-FERNANDEZ, 2002, p.22).

As mudanças climáticas juntamente com a variabilidade da mesma tornam a disponibilidade da água em muitas regiões do mundo, um recurso ameaçado, comprometendo não só o abastecimento doméstico, industrial, irrigação e geração hidroelétrica, mas também a segurança e qualidade dos ambientes naturais e urbanos, através de secas e aumento das inundações, como também a diminuição da qualidade da água assim como a diversidade dos ecossistemas (WAGENER & FRANKS, 2005).

A escassez generalizada, a destruição gradual e o agravamento da poluição dos recursos hídricos em muitas regiões do mundo, ao lado da implantação progressiva de atividades incompatíveis, exigem o planejamento e manejo integrados desses recursos (CNUMAD, 1992, Cap. 18.3).

Com as demandas de água aumentando, especialmente no final do século 20, os inúmeros impactos quantitativos e qualitativos, promoveram e estimularam novas soluções para o gerenciamento de recursos hídricos, a nível local, regional, nacional e internacional (TUNDISI, 2003, p.32).

A escassez hídrica no Brasil surge da combinação do crescimento exagerado de demanda localizada e degradação das águas. (Chaves, 2000, p.29).

O panorama de escassez anunciada para os recursos hídricos, por meio da conservação dos atuais níveis de consumo, exige mudanças, necessitando de uma alteração mundial sobre o uso desse recurso natural, necessitando reafirmar a sua valorização para a sobrevivência humana e acesso a todos (ZIGLIO, 2008).

Conforme Bravo (2006, p.1) a construção e operação de reservatórios possuem como função primordial o desenvolvimento de reservas em épocas de excesso hídrico, para uso posterior em períodos de escassez. Entretanto, diversos fatores cooperaram para realização da análise da operação de reservatórios com múltiplos usos se tornar um processo de difícil solução, sendo esses fatores as características estocásticas do processo hidrológico, a quantificação e definição dos

objetivos, a necessidade de um processo sequencial de decisões bem como a complexidade do resultante de otimização, pois não segue uma linearidade.

A poluição dos recursos hídricos pelas atividades de mineração do carvão, aliada a crescente demanda de água para abastecimento e uso industrial bem como agricultura, contribui para a escassez de disponibilidade de água na região carbonífera catarinense. Gerando, conflito de interesses pela utilização da agua, principalmente nos períodos de estiagem. Devido às condições topográficas favoráveis, a barragem do rio São Bento se constituiu em uma obra de fundamental importância para o abastecimento, humano, industrial e agrícola da região, (CASAN-OAS, 2001, p.6).

Casan-MOR (2003), o armazenamento de água no reservatório permitira atender uma demanda de projeto até o ano de 2027 uma população de 730.000 e resolver interesse conflitantes com a irrigação. Possuindo benefícios de ordem social com a garantia de abastecimento a população urbana, garantindo o desenvolvimento da região.

De acordo com a Política Nacional de Recursos Hídricos, através da Lei nº 9.433/97, a gestão de recursos hídricos deve sempre proporcionar a estruturação do uso múltiplo das águas e da gestão descentralizada, propiciando que os diferentes setores usuários de recursos hídricos possam a obter equidade de direito de acesso à água.

A barragem do rio São Bento deverá atender a múltiplos usos fazendo-se necessárias considerações e alertas a fim de evitar ou mesmo minimizar os conflitos gerados pelo uso da água que será armazenada no reservatório (Casan-OAS, 2001). As definições de múltiplo uso devem atender demandas referentes a abastecimento d'água, irrigação de áreas agrícolas e manter a vazão ecológica a jusante (CASAN-MAGNA, 1993, p.58).

A concepção de valores dos volumes a serem reservados para aproveitamento hídrico deve levar em consideração, além dos aspectos hidrológicos, o amortecimento do custo aguardado do sistema alternativo do abastecimento e os benefícios socioeconômicos (CASAN-MOR, 2003).

Atendendo a política básica de operação do reservatório foram desenvolvidos valores de referência entre níveis e vazão, levando em consideração a caracterização do estado hidráulico através do nível de montante e vazão afluente e o total de descargas através de vertedouro e descarregadores de fundo. Esses critérios delimitam as atuações e responsabilidades a serem cumpridas a fim de manter a funcionalidade do sistema, garantindo a segurança do aproveitamento e

compatibilizando com o grau de severidade da situação com a estrutura (CASAN-MOR, 2003). Esses valores de referência servem de orientação para definir os intervalos de leitura do controle hidráulico, mas não como critério de gestão de recursos hídrico do reservatório.

A barragem do rio São Bento foi projetada para atender três finalidades principais abastecimento, irrigação e controle de cheias. No entanto, estes usos são conflitantes e por isso há necessidade de estabelecer critérios de operação da barragem, de forma a atender de modo racional as diferentes demandas. Na política básica de operação da barragem foram criadas situações de normal, atenção e emergência tanto para períodos de cheias quanto para períodos de estiagem, porém não estabelece formas de distribuição e quantidades para cada segmento a ser atendido.

Nos quase dez anos de operação da barragem, em vários momentos ocorreram vertimentos evidenciando excessos água. Essa aparente abundância de água pode sugerir aumentar a oferta de água, tanto para consumo humano como para a irrigação. Assim, é de grande importância estudos que possam demonstrar os riscos de falha no atendimento dessas demandas em função dos usos destinados.

Por outro lado ainda existem questionamento sobre o gerenciamento dos recursos hídricos da barragem. No período de operação da barragem ocorreram algumas estiagens de curta duração, mas suficiente para haver a pressão pela oferta da água, principalmente por parte dos rizicultores. Quando da ocorrência da maior estiagem, verificada em dezembro de 2012, o nível mínimo da barragem atingiu praticamente o volume correspondente a 55,36% da capacidade máxima do reservatório. Nesta ocasião a população visualizando a diminuição da área alagada ficou apreensiva quanto à possibilidade de falta de água. Nestas situações o gestor da barragem frequentemente é cobrado a dar explicações. Dessa forma, para um bom gerenciamento é necessário manter um banco de informações sobre os riscos envolvidos no processo bem como ter bem definido critérios para a operação da barragem.

2 OBJETIVOS

Contribuir para o gerenciamento racional dos recursos hídricos mediante o estabelecimento de critérios para operação da barragem do rio São Bento de forma a atender os usos múltiplos da água.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Diante do objetivo proposto, seguem-se as seguintes atividades que servirão de auxílio ao estudo:

- Elaborar e ajustar um modelo matemático para simulação de série de chuva e vazão afluente;
- Simular o volume do reservatório em função dos diferentes cenários de uso da água estabelecendo os riscos de atendimentos aos diferentes usos da água da barragem do rio São Bento.
- Propor critérios de operação da barragem do rio São Bento com base nos riscos de falhas no atendimento das diversas demandas.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 ÁGUA

Embora o volume de água permaneça constante a mais de 500 mil anos no planeta, a água de qualidade para abastecimento humano está se tornando cada vez mais escassa a nível mundial devido às ações antrópicas. Modificando a visão cultural de que a água é um bem natural infinito, fazendo com que a mesma passa-se a ser vista como um bem econômico (GOMES et al., 2008).

Conforme o mesmo autor 70% da superfície terrestre é coberta por água correspondendo aproximadamente a 1,386 km³ e sendo que a fração considerada doce que poderia ser usada pelo homem de forma economicamente viável sem grandes impactos corresponde a aproximadamente 1%.

Por se tratar de um recurso natural com valor econômico estratégico e social fundamental a sobrevivência e bem-estar da população e a manutenção do meio ambiente Telles e Costa (2007, p.1) definem água como uma substância essencial para a vida disposta na natureza, onde constitui parte importante de todas as matérias do ambiente natural ou antrópico.

Segundo Barros (2011), o Brasil dispõe de 12% da água doce existente no planeta, e cerca de 89% destes estão concentrados em regiões onde possuem 14,5% da população (Norte e Centro-Oeste), já para as regiões Nordeste, Sul e Sudeste que concentra 85,5% da população estão disponíveis apenas 11% do potencial hídrico do país, visto isto percebe-se uma heterogeneidade da distribuição deste recurso.

O acesso à água faz com que a população se desloque a grandes distâncias, em razão do tempo despendido a outras atividades consideradas de grande importância (RAZZOLINI, 2008).

Em virtude de sua importância o sistema de abastecimento de água potável deve possuir grande interação com os órgãos distribuidores juntamente com a população atendida, fornecendo quantidade e qualidade para suprir suas necessidades.

O uso da água através das atividades antrópicas geram muitas consequências aos corpos d'água, podendo ser usados através da derivação de águas como abastecimento urbano, industrial, irrigação etc., (BORSOI, TORRES, 1997).

3.1.1 Água no contexto social, ambiental e político.

A água no contexto mundial é de extrema necessidade e de importância vital, principalmente com a crescente crise de abastecimento e degradação decorrentes no ecossistema de água doce (COSTA et al., 2012).

Segundo Setti et al. (2000), na sua abundância a água pode ser considerada e tratada como bem livre não possuindo valor econômico, porém com a crescente demanda os conflitos são inevitáveis, sendo causada através da escassez quantitativa e qualitativa, precisando ser gerida. O gerenciamento dos recursos hídricos requerem informações sobre as diversas demandas e disponibilidades sazonais. Na definição da distribuição entre os diferentes uso é importante levar em consideração as questões ambientais e sociais, necessitando a participação e comprometimento dos diversos setores públicos e privados e representantes da sociedade.

3.2 PRECIPITAÇÃO

As águas provenientes do vapor de água na atmosfera depositada na superfície terrestre sob qualquer forma é definida como precipitação. Esta precipitação pode ser dar em forma de chuva, granizo, neblina, neve, sendo que para as condições climáticas do Brasil somente as chuvas tem importância em relação ao volume de água gerado. A precipitação em sua configuração mais comum é a chuva, ocorrendo através de fenômenos de aglutinação e crescimento das micro gotículas nas nuvens, até que as gotas consigam atingir determinado tamanho e peso suficientes para que a força da gravidade supere a turbulência normal ou movimentos ascendentes do meio atmosférico (TUCCI, 2002).

A formação das precipitações em forma de chuva esta ligada a uma elevação das massas de ar podendo ocorrer por convecção térmica, relevo ou ação frontal de massas (PINTO et al., 2000). Assim os três tipos fundamentais de chuva são classificados como:

- a) Frontais ou ciclônicas: Ocorrem ao longo da linha de descontinuidade, separando uma massa de ar quente com uma de ar frio, duas massas de ar com propriedades diferentes. Possui menor intensidade, maior duração e atinge grandes áreas. (TUCCI, 2002), (MACHADO, 2005).

- b) Orográficas: Decorrem do resfriamento das massas de ar úmido quando possuem seu trajeto desviado por elementos do relevo (montanha), forçando as nuvens a atingir altitude. Possui longa duração de intensidade variável com distribuição localizada.
- c) Convectivas: Ocorre pelo processo de convecção livre, através do aquecimento do ar úmido próximo da superfície terrestre, produzindo um deslocamento vertical da massa de ar a grandes altitudes. Possui curta duração de alta intensidade, com distribuição localizada, com grande variabilidade espacial.

Os principais aparelhos para obtenção das informações qualitativas referentes à precipitação de intensidade e duração são avaliados através das coletas em campo através de pluviômetro, pluviógrafo (Figura 1) e redes telemétricas.

Figura 1 - Pluviômetro e pluviógrafo.



Fonte: Autor, 2012.

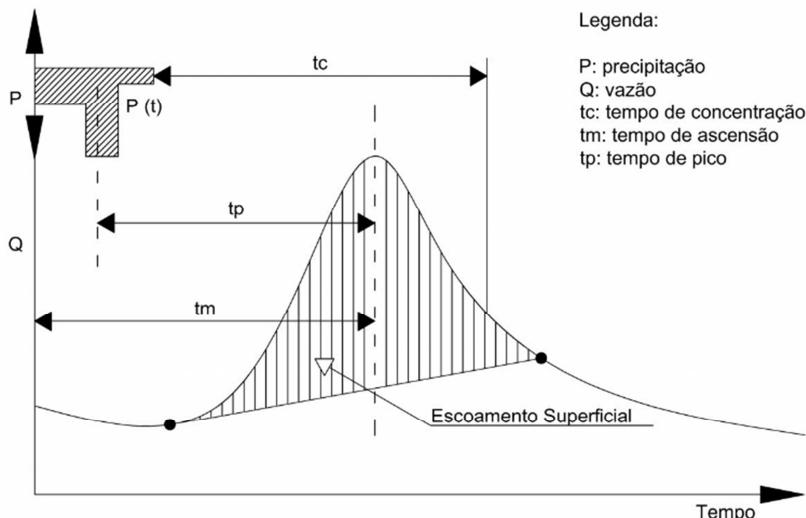
3.3 ESCOAMENTO SUPERFICIAL

O ciclo hidrológico possui dentre suas fases como a de maior significância para obras de engenharia o escoamento superficial, no qual satisfaz ao segmento pertinente ao deslocamento de água sobre a superfície do solo (PRUSKI et al., 2003).

Ainda segundo o mesmo autor a forma que se compõe o hidrograma depende de alguns fatores sendo os mais importantes:

- Relevo;
- Cobertura da bacia;
- Modificações da bacia;
- Distribuição, duração e intensidade da precipitação;
- Solo.

Figura 2 - Comportamento típico do hidrograma.



Fonte: Adaptado de Tucci, 2002.

O hidrograma unitário instantâneo (HUI) de uma bacia é a resposta de um comportamento linear a um impulso unitário instantâneo (TUCCI, 2002).

Conforme Back (2006), o escoamento superficial de uma bacia é regido pelas características morfométricas da mesma porem o conhecimento das características físicas da bacia hidrográfica assim

como a sua rede de drenagem possuem aplicação nos estudos de hidrogeologia, especialmente nas diversas metodologias aplicadas na estimativa de vazões.

O escoamento superficial é o segmento do ciclo hidrológico que estuda o deslocamento das águas na superfície da Terra (PINTO et al., 2000, p.36), onde ocorre o estudo a partir da menor porção de chuva sobre um solo saturado de umidade ou impermeável.

Também conhecida como precipitação efetiva ou excesso de chuva o escoamento superficial é um dos fatores determinantes para obtenção da vazão máxima a partir de dados de chuva.

Conforme Machado (2005), o surgimento do escoamento superficial se da quando a precipitação ultrapasse as perdas por interceptação, evaporação e ainda a intensidade da precipitação seja superior à capacidade de infiltração, o mesmo se caracteriza pelo movimento sobre a superfície do solo saturado dos pontos mais altos para os mais baixos por ação da gravidade.

Quando a intensidade de precipitação supera a velocidade de infiltração da água no solo é definido este processo por escoamento superficial, tão logo a velocidade de infiltração no solo se torna superada pela água, dar-se inicio ao preenchimento das deformações existentes na superfície do mesmo, e posteriormente o escoamento superficial (LINSLEY et al., 1975; MOHAMOUD et al., 1990).

A determinação do escoamento superficial ou precipitação efetiva depende de um grande número de variáveis envolvidas no processo, determinado grande dificuldade na sua estimativa. Os métodos utilizados para estimativa da chuva efetiva podem ser classificados como: físicos, conceituais e empíricos (PAIVA; PAIVA, 2003).

3.4 MÉTODO SOIL CONSERVATION SERVICE (SCS)

Uma das técnicas mais difundidas para estimar o escoamento superficial é o CN (Número de curva) desenvolvido pelo Soil Conservation Service (SCS-USDA), que nos dias atuais passou ser denominado por Natural Resources Conservation Service (NRCS-USDA). A utilização do método é empírica e fundamentada em um conjunto de relações entre precipitação, condições de superfície do solo e escoamento (GROVE; HARBOR; ENGEL, 1998).

Segundo Arndt (2009), o método SCS ou CN trata-se de um modelo matemático no qual se consegue determinar a chuva excedente, em bacias de diversos tipos de ocupação. Tassiet al. (2006) comenta que como principal parâmetro do método tem-se o Número de Curva de

escoamento superficial (CN), no qual se consideramos tipos de solo, o uso e a ocupação do solo na bacia, relacionando-o com características físicas do solo bem como a umidade do solo.

O método do número da curva de escoamento superficial permite conhecer a precipitação efetiva resultante de uma determinada chuva para uma área de drenagem conhecida. O parâmetro CN, pode ser estimado em função do tipo de solo, das atividades desenvolvidas (condições de uso e ocupação do solo) e umidade antecedente, com o uso de tabelas e manuais. O método prevê três condições de umidade antecedente do solo e função da chuva ocorrida nos dias anteriores (Condições de Umidade Antecedente do Solo I, II e III), e corrige os valores do parâmetro CN para estas condições (TASSI et al., 2006). Esse parâmetro pode variar entre 0 e 100.

Tassiet al. (2006), afirma que o método SCS possui grande utilização também para determinação de volume de armazenamento de reservatório de detenção, utilizados para controle de cheias urbanas, onde a mesma autora utilizou em trabalho realizado em 2002 valores de CNs com variação de 62 a 80 para dimensionamento de reservatório e conseguiu visualizar grandes diferenças nos volumes de armazenamento (40%) e vazões de projeto (70%).

A equação de escoamento NRCS (1997) estima o escoamento das águas de chuvas totais, isto é a relação exclui o tempo como uma variável, à intensidade da chuva é ignorada.

As perdas iniciais, representadas por I_a na equação (1), são bastante variáveis, mas geralmente podem ser relacionadas com o tipo de solo e a cobertura vegetal (TASSI et al. 2006).

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} \rightarrow P > I_a \quad (1)$$

$$Q = 0 \rightarrow P \leq I_a \quad (2)$$

Onde: Q = Escoamento Superficial (mm),

P = Precipitação máxima em determinado período (mm)

I_a = Perda inicial (mm),

S = Retenção de potencial máximo do solo (mm),

NRCS (1997) estabelece uma relação para estimar “ I_a ” conforme equação (2) assumindo como sendo uma função da retenção potencial

máxima “S”, portanto foi expressa empiricamente a relação entre “I_a” e “S” como:

$$Ia = 0,2.S \quad (3)$$

Portanto a equação precipitação-escoamento é obtida substituindo a equação (3), na equação (1) obtendo-se:

$$Q = \frac{(P - 0,2.S)^2}{P + 0,8.S} \rightarrow P > Ia \quad (4)$$

Caso se obtenha uma relação diferente do I_a = 0,2.S, deverá ser utilizado um novo conjunto de Número de Curva (NRCS, 1997).

O valor de “S” depende do tipo de ocupação do solo e o mesmo é determinado por tabelas específicas.

O parâmetro de CN é uma transformação de “S”.

$$CN = \frac{1000}{10 + S} \quad (5)$$

para polegadas, caso “S” for em milímetros:

$$CN = \frac{1000}{10 + \frac{S}{25,4}} \quad (6)$$

Encontram-se tabelados os valores de CN através da combinação do tipo, condições de uso e ocupação e umidade do solo no período antecedente da bacia (SARTORI, 2006).

Para os tipos de solo e condições de ocupação o método através do NCPS identifica os grupos hidrológicos de solo conforme Tabela 1 (Mockus apud SARTORI et al. 2006), (TUCCI, 2002).

Tabela 1 - Identificação de solos NRCS.

Solo	Características
A	Solos com baixo escoamento superficial e alta taxa de infiltração uniforme quando completamente molhados. Solos com moderada taxa de transmissão de água (taxa de infiltração mínima $> 7,62 \text{ mm.h}^{-1}$). Solos arenosos profundos com pouco silte e argila.
B	Solos menos permeáveis que o solo “A”, com moderada taxa de infiltração quando completamente molhados. Consiste de solos arenosos de moderadamente profundo e moderadamente bem drenado. Possui taxa de transmissão de água (taxa mínima de infiltração: $3,81\text{-}7,62 \text{ mm.h}^{-1}$).
C	Solos com potencial de escoamento superficial acima da média, baixa taxa de infiltração quando completamente molhados. Solos com baixa taxa de transmissão de água (taxa mínima de infiltração: $1,27\text{-}3,81 \text{ mm.h}^{-1}$). Solos com percentagem abundante de argila e são poucos profundos.
D	Solos com grande potencial de escoamento com taxas de infiltração muito baixas, gerando maior proporção de escoamento superficial. Abundância de solos argilosos e possuem uma taxa muito baixa de transmissão de água (taxa mínima de infiltração: $0\text{-}1,27 \text{ mm.h}^{-1}$).

Podendo CN variar entre 100 e 0.

3.5 MODELOS HIDROLÓGICOS

3.5.1 Generalidades

Os modelos possuem grande representatividade e estabelecem interação entre outros aspectos, na obtenção de causa efeito, em uma linguagem-forma sem que efetivamente seja realizada alguma ação sobre o modelo físico real. Na hidrologia os modelos podem representar um sistema, onde se busca conceber um todo ou em partes o comportamento de um processo hidrológico ou processos, em

determinado período (instante ou intervalo de tempo) (MOREIRA, 2005).

O Modelo hidrológico é uma das ferramentas que a ciência desenvolveu para melhor entender e representar o comportamento da bacia hidrográfica e prever condições diferentes das observadas. Alguns modelos proporcionam uma forma indireta de simulação, envolvendo a representação de um protótipo do sistema através do uso de equações, incluindo expressões lógicas e relações entre variáveis e parâmetros (MOREIRA, 2005, p. 6).

Tucci (1998) destaca que o modelo hidrológico constitui uma das ferramentas que a ciência desenvolveu, para melhor entender e representar o comportamento da bacia hidrográfica e prever condições diferentes das observadas. A reprodução dos processos hidrológicos por meio de modelos é a forma encontrada por profissionais da área para observar os diferentes componentes do ciclo hidrológico e as interações antrópicas. A heterogeneidade física da bacia e dos processos envoltos no sistema propicia a criação de variados modelos hidrológicos, diferenciando-os em função dos dados utilizados, discretização, prioridades de representação dos processos e objetivos alcançados. Os modelos devem ser vistos como uma ferramenta para conseguir-se alcançar um objetivo.

Figura 3- Esquema de um modelo geral.



Fonte: Adaptado de Tucci 2002.

Fazendo uma analogia Machado (2005) descreve que o mesmo ocorre no cálculo da flecha de uma viga bi-apoiada com carga distribuída, onde o valor da flecha é obtido por meio de um modelo, que leva em consideração as condições de apoio e as características do material de forma simplificada e não exatamente as reais. As simplificações realizadas não impedem que os resultados obtidos pelo modelo sejam validados, considerando que as diferenças entre a física do sistema e do modelo sejam aceitáveis para os determinados fins

propostos. O estímulo do modelo é a carga distribuída, obtendo como resposta a flecha.

Santos (2009) comenta que se permite verificar a coerência das informações disponibilizadas (dados obtidos) a partir de modelo hidrológico, em períodos geralmente muito curtos nas bacias hidrográficas e com base nesses dados possibilita-se a calibração dos modelos hidrológicos, conseguindo gerar séries sintéticas.

A modelagem é conhecida como o processo de implementação e/ou aplicação de modelos. O modelo é uma representação simples da realidade de um sistema (ou objeto) tanto estático quanto dinâmico. Existem três tipos de modelos: (1) modelo físico, (2) modelo matemático e (3) modelo analógico. O primeiro utiliza formas físicas, sendo imitativos de um segmento do mundo real (CHRISTOFOLETTI, 1999). O segundo utiliza linguagens matemáticas para representar a natureza dos sistemas, no sentido de substituição de forças, eventos por expressões contendo variáveis e/ou parâmetro. O terceiro usa a analogia das equações que regem diferentes fenômenos para modelar o sistema mais conveniente, mostrando uma maneira aproximada de compreensão com o mundo real (TUCCI, 1998). Qualquer modelo corresponde a uma aproximação da realidade. Para um bom modelo são necessárias observações do sistema, ou seja, monitoramento.

Os modelos hidrológicos são técnicas utilizadas para representar os processos com intuito de encontrar soluções futuras para as condições onde o meio está inserido procurando reduzir seus impactos (TUCCI, 1998).

O conceito de modelo segundo Haggett e Chorley (1975) apud CHRISTOFOLETTI (1999) é a concepção de forma simples do caso real que possui de forma genérica algumas características ou relações importantes que possibilite a reconstrução da realidade. Os modelos são aproximações altamente individuais, pois não incluem todas as observações ou medidas associadas, porém são de grande valia por elucidar detalhes acidentais e por permitirem o aparecimento dos aspectos da realidade.

Conforme Tucci (1998), o modelo representa o comportamento do sistema, usualmente classificados em: físicos, analógicos, matemáticos, entretanto um sistema nem sempre é representado pelo modelo de mesma característica devido às simplificações adotadas no modelo.

Deve-se, ter em mente que nenhum modelo é capaz de apresentar precisamente os processos naturais devido, a complexidade destes processos, a falta de conhecimento dos parâmetros requeridos, as

simplificações e generalizações que são introduzidas. A resposta do modelo é altamente dependente de acerto das simplificações e da exatidão dos parâmetros de entrada (WENDLANDER, 2012).

O modelo físico representa o sistema em escala reduzida, caracterizado por um protótipo (modelo reduzido), requerendo informações fidedignas da situação, esta prática necessita de tempo e recurso para implementação. Os modelos analógicos se caracterizam por sua comparação a outros sistemas já os modelos matemáticos se distinguem por sua versatilidade possuindo fácil modificação de sua lógica, alcançando vários resultados em situações de um mesmo sistema em curto espaço de tempo (TUCCI, 1998).

Determinados modelos hidrológicos são denominados chuva-vazão, pois muitas vezes são aplicados com o objetivo de a partir de uma precipitação conhecida, simular a resposta da bacia em termos de vazão para uma determinada seção fluvial de interesse (MOREIRA, 2005, p.7).

3.5.2 Classificação

Conforme Dooge (1973) apud TUCCI (1998) um sistema é um procedimento tanto real quanto abstrato, que em certo tempo de referência possui relação através da entrada de uma informação, causa ou estímulo de energia com a saída das mesmas.

Com passar dos anos um considerável número de pesquisas tem levado ao desenvolvimento de alguns modelos matemáticos, dentre os quais apresentam algumas características que os diferem. Serão apresentadas algumas das principais classificações dos modelos hidrológicos e suas descrições:

Algumas discussões referentes às classificações dos modelos foram tratadas por Tucci (1998) sendo apresentados de forma sucinta:

- a) Estocástico: é quando o resultado se apresenta na forma de variável aleatória. Os modelos estocásticos são expressões envolvendo variáveis, parâmetros e constantes matemáticas, em comum com um ou mais elementos aleatórios que resultaram de flutuações imprevistas dos dados de experimentos ou de observação. Possuindo como bases para a simulação três caminhamentos, a

simulação de Markov, Monte Carlo e modelo de otimização (CHRISTOFOLLETTI, 1999). Quando a relação de entrada e saída for definido por uma lei de probabilidade o sistema é definido como estocástico (MING, 2007).

- b) Determinístico: quando as variáveis de natureza aleatória envolvidas no processo são ignoradas fazendo com que o modelo siga uma lei definida pelo princípio da casualidade. (MING, 2007). Conforme Chistofoletti (1999), os modelos determinísticos possuem base em noções matemáticas clássicas de relações previsíveis das variáveis dependentes e independentes consistindo em afirmações específicas, a partir de consequências únicas deduzidas pela argumentação matemática.
- Para Cunha (2004) o modelo determinístico sempre produzirá um mesmo valor de saída para um determinado valor de entrada, considerando o mesmo estado inicial do sistema, apesar de que as variáveis de entrada sejam aleatórias. Os conceitos de probabilidade das variáveis para o modelo determinístico são negligenciados.

Conforme Dogge (1973) apud TUCCI (1998) o que diferencia o sistema determinístico para o estocástico é que para uma mesma entrada o sistema produz sempre a mesma saída (determinístico), já para o estocástico o relacionamento entre a entrada e a saída é estatístico. Acrescentando que para esta definição é necessário que as condições iniciais também devam ser exatamente as mesmas.

Segundo Tucci (1998) os modelos ainda podem ser classificados em:

- a) Conceitual: quando é levado em consideração os processos físicos na elaboração das funções do modelo estudado, o mesmo é definido por modelo conceitual, possuindo uma subdivisão em semiconceitual onde relaciona-se as propriedades físicas do processo, sustentado por um empirismo razoável na acepção dos parâmetros, e fisicamente fundamentado onde se possui um aprofundamento

- da física do sistema (CUNHA, 2004), (TUCCI, 1998).
- b) Empírico: Nos modelos empíricos são realizados ajustes nos valores calculados em relação aos observados, sem que ocorra nenhum envolvimento com o processo físico do comportamento também conhecido como “caixa-preta” (TUCCI, 1998).
 - c) Concentrado: Quando os parâmetros e variáveis não levam em conta a variabilidade espacial, mas variam em função do tempo, o modelo é definido como concentrado. Nesta situação os dados de entrada e saída possuem representatividade em toda a sub-bacia modelada.
 - d) Distribuído: para o modelo distribuído as variáveis e parâmetros do modelo dependem do espaço e/ou tempo, possuindo capacidade de representar a variabilidade espacial das propriedades físicas da bacia, esses modelos aplicam a lei da conservação de massa em escala local.
 - e) Linearidade: Para um sistema ser considerado linear o mesmo deve ser validado através do princípio da superposição. Um exemplo do princípio da superposição é caracterizado sendo y_1 , uma entrada do sistema produzindo x_1 , saída do sistema, da mesma forma y_2 , resulta em x_2 no mesmo sistema. A superposição é validada quando x_1+x_2 é o resultado da entrada y_1+y_2 do mesmo sistema. Conforme Cunha (2004) considerando a teoria estatística, um modelo é linear, se uma variável de saída y , encontra-se associada a variável de entrada x , através de uma equação do tipo $y=a+b.x$.
 - f) Contínuo: Um sistema é dito contínuo quando os fenômenos são contínuos no tempo, apresentando estrutura mais detalhada consequentemente maior exatidão na simulação das fases do ciclo hidrológico (TUCCI, 1998).

- g) Discreto: Um modelo é definido como discreto quando as mudanças de estado são representadas em intervalos discretos, períodos isolados da série. Sistemas hidrológicos por sua vez são contínuos mais representados por modelos discretos em sua maioria. Normalmente quanto menor o intervalo de tempo maior a precisão dos resultados, desempenhando maior custo para geração dos resultados (TUCCI, 1998).

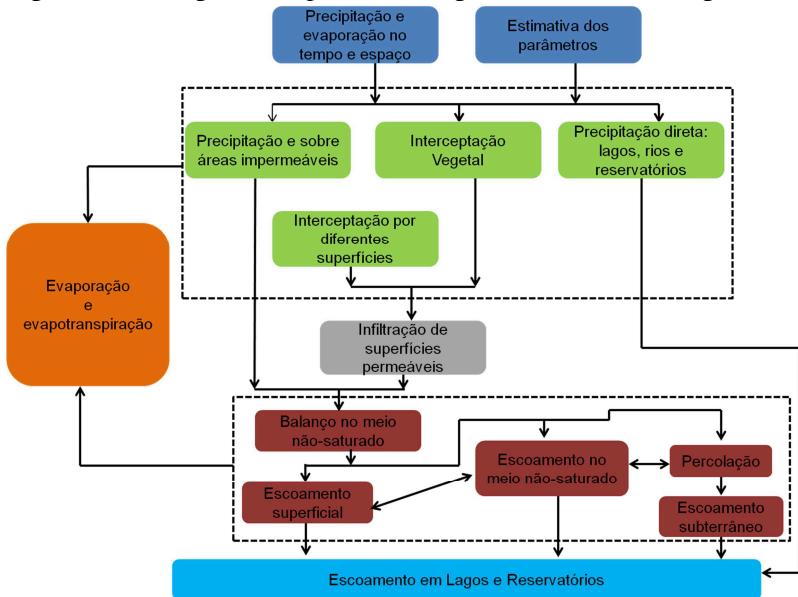
3.5.3 Modelos de precipitação-vazão

Os modelos de simulação hidrológica tornaram-se parte fundamental em sua quase totalidade dos aspectos de hidrologia (PACCA, 2008).

O modelo precipitação-vazão diante da definição de Machado (2005) refere-se a uma extensão da definição geral de modelos, sendo uma ferramenta que através de uma forma simplificada do processo do ciclo hidrológico, avalia a resposta em termos de vazão, de uma respectiva bacia hidrográfica em função da precipitação. Os modelos precipitação-vazão são capazes de descrever em função da precipitação as perdas por evaporação, interceptação, infiltração e percolação da água subterrânea, e o cálculo do escoamento superficial e escoamento de base.

A parte do ciclo hidrológico entre precipitação e a vazão é representada pelos modelos precipitação-vazão, onde descreve a distribuição espacial da precipitação, as perdas por interceptação, evaporação, depressão do solo, o fluxo através do solo pela infiltração, percolação e água subterrânea, escoamento superficial, subsuperficial (Figura 4).

Figura 4 – Fluxograma do processo integrado do ciclo hidrológico.



Fonte: Adaptado TUCCI, 1998.

Diante do elevado grau de complexidade dos processos físicos que a natureza se encontra, algumas propostas são realizadas para simplificar a reprodução desses processos em um modelo hidrológico, visto que se consiga chegar o mais próximo possível do comportamento da natureza possível (PACCA, 2008).

A modelagem matemática pode ser empregada para modelar indiretamente a vazão por meio de modelos de transformação de chuva, em vazão. O método indireto pode ser vantajoso, nas regiões em que se disponha de um registro pluviométrico de melhor qualidade, do que o fluviométrico, o que é frequente acontecer (UGGIONE, 2005, p.12).

Conforme Tucci (2008), a estruturação atual para modelagem hidrológica precipitação-vazão baseia-se em alguns elementos como:

- a) Discretização da bacia hidrográfica (concentrado, distribuído por sub-bacias, distribuído por módulos);

- b) Variáveis de entrada (precipitação, evapotranspiração);
- c) Estrutura básica da integração dos processos (bacia, canal);
- d) Aquisição dos dados físicos das bacias;
- e) Determinação dos parâmetros.

Segundo Fernandes (2009), os modelos chuva-vazão possuem na maioria de seus eventos uma maior abundância nos dados referentes à chuva e melhor distribuição espacial, ainda assim são menos sujeitos a erros amostrais e a interferências antrópicas, permitindo simular cenários muito próximos das condições naturais do local de estudo.

Segundo Nishijima (2004), os modelos de base física e matemática estão em desenvolvimento para simulação de precipitação pluvial, sendo que a complexidade para o processo de formação da precipitação pluvial busca a limitar o uso dos modelos de base física. Os modelos com base matemática analisam a precipitação pluvial como um processo aleatório, e simulam as sequências de chuvas considerando as características estatísticas da série histórica, resultando em modelos estocásticos.

3.5.4 Cadeia de Markov

O método de Markov é bastante difundido, por ser considerado mais simples (UGGIONI, 2005), porém é um tipo especial de processo estocástico que considera que as distribuições de probabilidade para os caminhos futuros do processo, dependem somente do estado presente, não levando em consideração como o processo chegou ao estado atual (SILVA, JÚNIOR, 2011).

Na maioria dos estudos se utiliza a cadeia de Markov de primeira ou de segunda ordem. Todavia, o uso de cadeias de Markov de ordem superior a dois é de grande importância, pois, em certas regiões, a ocorrência de chuva em um dia pode ser condicionalmente dependente da seqüência de dias secos e chuvosos em vários dias anteriores. Isto pode acontecer, por exemplo, em regiões onde, em certas épocas, é frequente a ocorrência de vários dias consecutivos de chuva ou longas séries de dias secos (KELLER FILHO; ZULLO JUNIOR; LIMA, 2006, p.1342).

Modelos estocásticos que se utilizam de uma série binária discreta levam em consideração a chuva definida por dois processos aleatórios: eventos de chuva ou não (dia chuvoso ou seco), e a intensidade da precipitação ocorrida no dia chuvoso (NISHIJIMA, 2004).

Para que um processo estocástico seja reconhecido como markoviano a probabilidade do processo deve estar em um dado estado, num instante qualquer no futuro, dependendo da sequência completa de estados até o momento presente a mesma quando dependendo apenas do estado presente (LEITE, 2008).

Uma cadeia de Markov é uma sequencia X_1, X_2, X_3, \dots de variáveis aleatórias, sendo que os valores que ela poderão admitir é designado de espaço de estados, onde, X_n significa o estado do processo no tempo “n”. Quando a distribuição de probabilidade está condicionada de X_n nos estados passados então a função é apenas de X_n , portanto:

$$\Pr(X_{n+1} = x | X_0, X_1, X_2, \dots, X_n) = \Pr(X_{n+1} = x | X_n) \quad (7)$$

Onde x é algum estado do processo.

As cadeias de Markov podem ser homogêneas ou não. No primeiro caso os parâmetros são constantes no tempo e, no segundo, os mesmos são variáveis. Adotando-se a abordagem sazonal e considerando-se o processo estacionário dentro de cada estação, pode-se adotar uma cadeia de Markov homogênea. No caso contrário, considerando-se o processo não estacionário, adota-se uma cadeia de Markov não homogênea e, neste caso, os parâmetros são variáveis no tempo (UGGIONI, 2005, p.13).

Gabriel & Neumann (1962), utilizaram modelagem matemática para desenvolver a ocorrência de dias secos e chuvosos em sequência, utilizando dados de Israel, demonstrando que possui grande persistência entre dias chuvosos consecutivos, e conseguiram um ajuste teórico de boa aceitação usando o modelo com base na cadeia de Markov de primeira ordem. A cadeia de Markov possui como princípio fundamental, de que a probabilidade de um determinado evento dia se encontrar num estado particular, depende exclusivamente do estado dos

dias do anterior, possuindo como o grau da cadeia o número de dias precedentes considerados.

Conforme Santos (2006) o processo descriminado como cadeia de Markov é descrito na sequência e a equação (8) é chamada de matriz de transição.

$$T = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} \\ t_{21} & t_{22} & t_{23} \\ t_{31} & t_{32} & t_{33} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Sendo t_{ij} a probabilidade de mudança do estado j para o estado i em uma unidade de tempo.

A distribuição inicial entre os estados pode ser descrita na matriz:

$$P_0 = \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{bmatrix} \quad (9)$$

A matriz P_0 caracteriza a distribuição inicial entre os três estados e é chamada vetor de estado. Após uma unidade de tempo o P_0 estará dividido entre os três estados da seguinte forma:

$$P_1 = \begin{bmatrix} t_{11}p_1 + t_{12}p_2 + t_{13}p_3 \\ t_{21}p_1 + t_{22}p_2 + t_{23}p_3 \\ t_{31}p_1 + t_{32}p_2 + t_{33}p_3 \end{bmatrix} \quad (10)$$

A matriz de estado ocorrido uma unidade de tempo é dada pelo produto de matrizes:

$$P_1 = T \cdot P_0 \quad (11)$$

Ugione (2005) utilizou para modelagem de ocorrência de precipitação através da cadeia de Markov de dois estados, empregando grau de primeira ordem em que a probabilidade de um dia ser seco ou chuvoso depende somente da condição do dia anterior e levando em conta a estacionariedade com ajuste para períodos mensais. Dessa forma foi determinada a matriz de probabilidade de transição.

4 LOCALIZAÇÃO E DESCRIÇÃO DA ÁREA

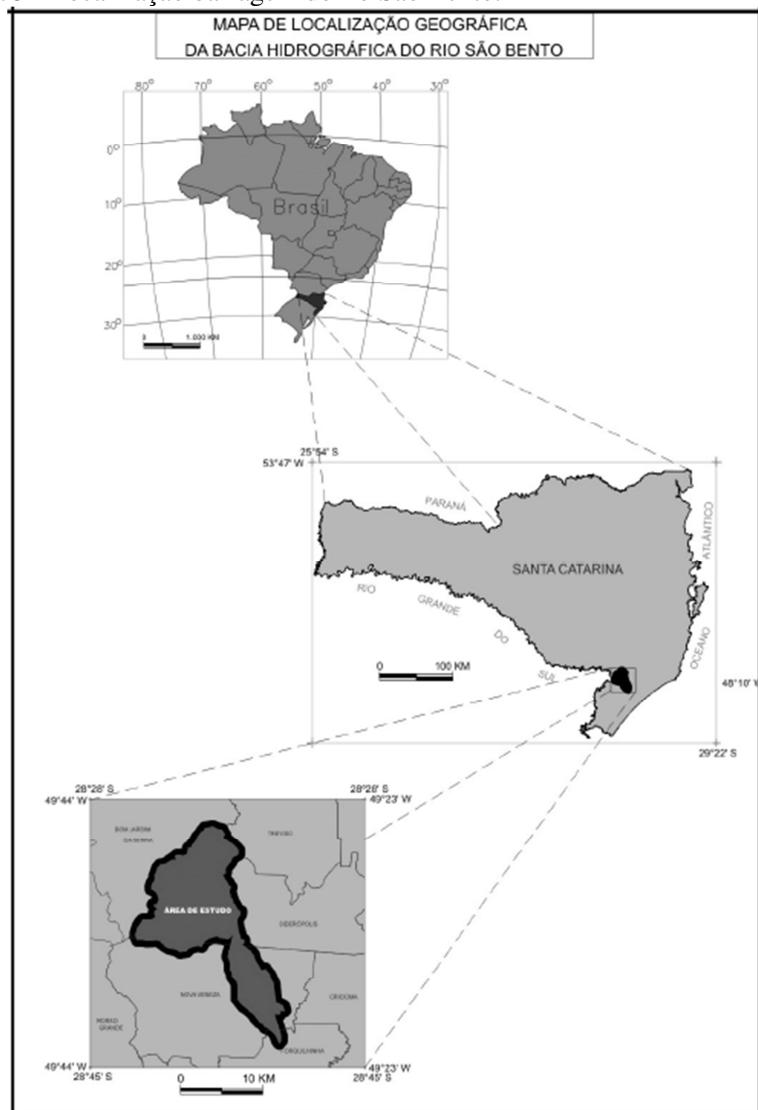
A Companhia Catarinense de Água e Saneamento visando solucionar dificuldades causadas por escassez de água agravadas em ocorrência de estiagens na região carbonífera construiu uma barragem com atributo primordial o abastecimento humano, industrial e agrícola.

Têm-se como benefícios secundários do aproveitamento, a lamação de cheias no reservatório, resguardando inundações a jusante, proteção das florestas integrantes das escarpas da Serra Geral e a criação de um lago artificial. (COSTA, 2008).

A barragem do rio São Bento é considerada como aproveitamento múltiplo de uso garantindo uma vazão regularizada para as demandas de abastecimento urbano, irrigação de área de cultivo a jusante (rizicultura) e manutenção da vazão ecológica a jusante.

A barragem do rio São Bento, localizada no estado brasileiro de Santa Catarina no município de Siderópolis, está inserida na bacia hidrográfica do rio São Bento sendo definida como uma sub-bacia da bacia hidrográfica do rio Araranguá (Figura 5).

Figura 5 - Localização barragem do rio São Bento.



Fonte: Schwalm (2008).

O reservatório possui uma área de inundação no nível máximo normal de 4,50 km² e uma área de drenagem a montante de 112,12 km². Na Figura 6 está identificada a área alagada do reservatório.

Figura 6 - Reservatório da barragem do rio São Bento.



Fonte: Casan, 2006.

O enchimento do reservatório iniciou-se em janeiro de 2003, ocorrendo a adução para abastecimento em abril de 2003 sendo contemplado o volume total em maio de 2004, ocasionando o primeiro vertimento.

Um histórico dos principais eventos desde o projeto inicial da barragem do rio São Bento até sua inauguração encontra-se na Tabela 2.

As características apresentadas foram obtidas no projeto executivo do empreendimento, cedidos pela Casan.

A composição das estruturas do empreendimento se caracteriza em três obras distintas. A barragem principal, caracterizada como mista de concreto compactado a rolo (CCR) do tipo gravidade no centro e nas ombreiras de enrocamento com espaldares em cascalho compactado com núcleo impermeável de argila (Figura 7). As obras complementares são duas barragens do tipo zoneado com núcleo em argila compactada e espaldares em cascalho.

Tabela 2 - Cronologia dos principais eventos.

Datas	Descrição do evento
Outubro de 1982	Relatório técnico preliminar de recursos hídricos
26 Maio de 1983	Reunião AMREC analisando problema da água
1986	Definição de Barragem solução mais viável
Março de 1989	Projeto básico de engenharia e detalhamento–Sudesul-Magna
1990	Início do EIA-RIMA
30 Abril de 1999	Concessão da LAP
2000	Primeiro repasse de verbas federais
26 de Março de 2001	Concessão da LAI e início das obras
Abril de 2003	Conclusão das obras físicas
10 de Maio de 2004	Primeiro vertimento
29 de junho de 2005	Concessão da licença ambiental de operação
26 de Junho 2006	Inauguração da barragem do rio São Bento

Fonte: Adaptado Casan, 2001 p.12.

Figura 7 - Barragem principal.



Fonte: Casan, 2006.

4.1 BARRAGEM PRINCIPAL

O eixo da barragem principal localiza-se logo após o encontro do rio São Bento, que possui contribuição de 60% do total da bacia montante com o rio Serrinha (Figura 8) (CASAN, 2004).

Figura 8 – Localização encontro rio São Bento com rio Serrinha.



Fonte: Google Earth, 2013.

A barragem principal possui um comprimento total de 476 m de crista sendo 240 m da barragem de concreto compactado a rolo e 236 m da barragem de enrocamento dos quais 128 m pertencem à margem esquerda e 108 m da margem direita e apresenta elevação máxima sobre a fundação de 49 m e de 38 m sobre o leito do rio.

A cota de coroamento da barragem de concreto está na elevação de 157,50 m, já as ombreiras estão na elevação 160,00 m.

Sua fundação ocorreu sobre rocha basáltica fraturada ou não conforme trecho de assentamento, ocorrendo necessidade de tratamento por injeções de consolidação e cortinas de concreto a montante.

No centro da barragem de concreto possui um vertedouro do aproveitamento de 105 m de comprimento, tipo soleira livre, sem controle, conformado em perfil *Creager*, possui degraus de dissipação a¹ jusante do barramento (CASAN, 2004).

As barragens de encontro aqui denominadas de ombreiras possuem inclinação dos taludes de 1:1,5 a montante e 1:1,6 a jusante este com bermas.

¹ As cotas se referem à altitude em relação ao nível do mar, porém como no manual de operação na barragem do rio São Bento se denomina cota, optou-se por usar a denominação cota ao invés de altitude.

4.2 DIQUE PRINCIPAL

Conforme descrito anteriormente é formado por uma barragem zoneada com espaldares em cascalho com núcleo impermeável de argila compactada.

Conforme Caputo (1996), para os taludes de montante requere-se uma proteção quanto à ação das ondas usualmente *rip-rap* (empedramento) Figura 9.

Localiza-se a margem esquerda do Rio Serrinha implantado sobre um ponto de fuga e possui 258 m de comprimento de crista com 4 m de largura sendo sua altura máxima sobre a fundação é de 25 m e cota de coroamento 160,00 m possui inclinação do talude de 1:1,7 a montante e 1:1,6 a jusante este complementado por bermas (CASAN, 2004).

Figura 9 - Dique principal.



Fonte: Della, 2011.

Sua localização está sobre solo coluvionar, então a fundação ocorreu em partes menos espessas sobre rocha e nas partes mais profundas (ombreiras) ao encontro da rocha houve a necessidade de remoção do material coluvionar e projetou-se trincheiras de vedação *cut-off* para assentamento da argila sobre a rocha diminuindo a infiltração ainda para o centro e ombreiras foi necessário a realização de cortinas de injeção de impermeabilização (CASAN, 2004).

O barramento é monitorado por instrumentação de medidor de recalque magnético, piezômetro pneumático, piezômetro Casagrande e marco superficial.

4.3 DIQUE SECUNDÁRIO

Localizado a margem esquerda do rio São Bento sobre um ponto de fuga, compreendido entre a barragem principal e o dique principal. Possui características semelhantes ao dique principal, sendo do tipo zoneado com núcleo de argila compactada e espaldares em cascalho Figura 10.

A crista do dique secundário possui extensão de 250 m com 4 m de largura, sua altura sobre a fundação é de 20 m. Assentada sobre solo coluvionar houve a necessidade de *cut-off* e cortina para impermeabilização.

A cota de coroamento esta na elevação 160,00 m a inclinação do talude a montante é de 1:1,7 e a jusante de 1:1,6 (CASAN, 2004).

Figura 10 - Dique secundário.



Fonte: Della, 2011.

4.4 GEOMORFOLOGIA

Conforme informações obtidas no Programa de Gerenciamento de Risco (CASAN, 2004) a região encontra-se numa zona de transição entre a escarpa e a planície litorânea onde encontra-se a montante da barragem do rio São Bento é denominada pela unidade geomorfológica Serra Geral, situada no início dos contrafortes da Serra, compreendida por grandes escarpas basálticas.

Conforme Casan (2004), o desnível entre a parte mais elevada da bacia de contribuição até o barramento principal possui é de aproximadamente 1280 m, com declividades decorrentes variando entre 45% a 100% seguindo com classe do relevo escarpado e montanhoso. A jusante da Barragem Principal encontra-se a unidade Geomorfológica Colúvio-Aluvionar, caracterizada como uma planície aluvial com relevo plano a suavemente ondulado, variando a declividade entre 0 a 8%.

As características principais sob a visão da geomorfologia da região em estudo são:

- a) Escarpas íngremes, relativamente jovem;
- b) Afloramento de *sill* de diabásio nos eixos dos barramentos;
- c) Deposição de solos aluviais com a predominância de seixos rolados com variados diâmetros;
- d) Formação de solos residuais e mantos coluviais junto às encostas das elevações, devido à grande declividade e ações intempéricas.

4.5 BACIA HIDROGRÁFICA

Para determinação dos valores iniciais de estudo de concepção da barragem foi necessário estabelecer valores hidrológicos de contribuição do reservatório, dentre isso a determinação da área de contribuição e acumulação.

A bacia hidrográfica é toda a área onde a precipitação é coletada e conduzida para o sistema de drenagem natural.

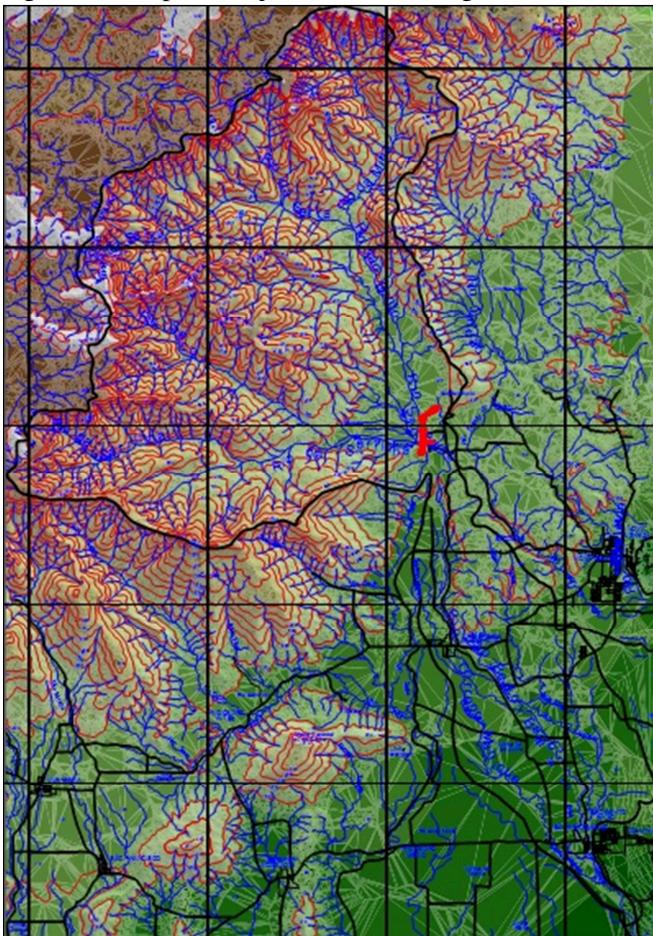
A formação de uma bacia se dá por divisores topográficos, conduzindo a água, sempre das áreas mais altas para as áreas mais baixas.

Outro fator importante para a bacia hidrográfica é o tempo de concentração, definido como sendo o tempo necessário para a água que cai no ponto mais remoto, leva para escoar até a secção de saída. A

rugosidade e a declividade do terreno contribuinte da bacia hidrográfica também podem alterar o tempo de concentração.

Já para a Bacia Hidrográfica do rio São Bento sua forma é arredondada tipo leque a montante da barragem principal e estendida com forma retangular à jusante (Figura 11). A vazão média é da ordem de $3,12 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, possuindo como máxima mensal de $23,15 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ e mínima de $0,83 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ (CASAN, 2004).

Figura 11 - Representação da bacia hidrográfica do rio São Bento.



Fonte: Casan, 2004, p.4.

4.6 CLIMATOLOGIA

As classificações climáticas possui relevante importância nas definições dos climas em diferentes regiões, pois consideram vários elementos climáticos ao mesmo tempo, fazendo com que ocorra uma facilidade no compartilhamento de informações e análises posteriores para diferentes objetivos (ROLIM et al., 2007).

Conforme Vianello (1991) clima é um conjunto de fenômenos meteorológicos, onde se caracterizam o estado médio da atmosfera em um determinado ponto da superfície terrestre, sabidamente refere-se à média de precipitação pluvial, temperatura do ar, velocidade do vento de demais variáveis meteorológicas em um período de observação de grande duração.

A classificação climática de Köppen (1948) fundamenta-se na distribuição sazonal da precipitação e nas características térmicas.

Conforme Casan (2004), o clima onde esta localizada a bacia hidrográfica em estudo possui pelo sistema de classificação de Köppen como Cfa (clima subtropical úmido), temperado moderado chuvoso, com distribuição da precipitação nas estações do ano em 36% da concentração de precipitação no verão, seguido do outono e primavera e com 23,5% e por último com apenas 17% da concentração do total precipitado o inverno. Back, Uggioni e Vieira (2011) afirmam que a precipitação total anual na região Sul de Santa Catarina, varia de 1220 a 1660 mm, com o total anual de dias de chuva entre 98 e 150 dias.

A estação climatológica de Urussanga (Tabela 3) contribuiu com as informações de temperatura (19,38°C), umidade relativa do ar (URA) (80,5%) e evapotranspiração potencial (ETP) (73,6mm) com valores médios para os estudos referentes (CASAN, 2004).

Tabela 3 - Dados da estação Urussanga valores médios mensais - 1942 a 1992.

Variável	Meses do Ano												Média Anual
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	
Temperatura do ar (°C)	24	24	23	20	17	15	15	16	17	19	21	23	19,38
URA (%)	79	83	82	82	83	84	81	80	80	78	77	76	80,5
ETP (mm)	122	115	91	62	48	37	35	43	55	73	90	112	73,6

Fonte: Casan, 2004.

4.7 DEMANDAS CONSIDERADAS EM PROJETO

Por se caracterizar como uma obra de múltiplos usos, a barragem do rio São Bento possui como finalidade proporcionar uma vazão regularizada atendendo com segurança as demandas de abastecimento urbano, irrigação de áreas cultivadas a jusante (arroz) e manutenção da vazão ecológica.

4.8 DEMANDA DE ABASTECIMENTO URBANO

O consumo de água possui ligação direta com a condição econômica da população, sendo observados alguns níveis de variação ligados ao descaso por possuir baixo valor monetário e ao desperdício considerando a falta de consciência, demonstrado na Tabela 4 (TELLES; COSTA, 2007).

Tabela 4 - Consumo médio de água no mundo.

Grupo de renda	Utilização anual – m ³ .hab ⁻¹ .
Baixa	386
Média	453
Alta	1.167

Fonte: Relatório do banco mundial (1992), apud UNIÁGUA, 2012.

Segundo Casan (2004), as demandas relativas referentes ao abastecimento d'água estimadas no projeto básico da barragem do rio São Bento para as localidades beneficiadas pela implantação da mesma, foram baseadas na análise do sistema de abastecimento existente anteriormente a implantação como também a projeção do crescimento populacional e estimativa de demandas futuras.

Os resultados do estudo de projeção e as projeções progressivas de projeto estão apresentados Tabela 5.

Tabela 5 - Demandas progressivas para diversos horizontes de projeto.

Ano	Alcance (anos)	População total (hab.)	Taxa de crescimento (%)	População urbana (%)	População urbana (hab.)	Índice de atendimento (%)	População atendida (hab.)	$Q_{\text{máx. diária}} (\text{L.s}^{-1})$	$Q_{\text{média}} (\text{L.s}^{-1})$
1997	0	288.248	3,16	80,08	230.830	90,0	207.747	577	481
2007	10	393.440	3,16	82,06	322.874	91,2	294.461	818	682
2017	20	537.022	3,16	84,05	451.358	92,4	417.054	1.158	965
2027	30	733.003	3,16	86,03	630.618	93,6	590.258	1.640	1.366
2037	40	1.000.504	3,16	88,02	880.605	94,8	834.813	2.319	1.932
2047	50	1.365.628	3,16	90,00	1.229.065	96,0	1.179.902	3.278	2.731

Fonte: Casan, 2004.

Considerando as demandas para as localidades de Criciúma, Forquilhinha, Rio Maina, Siderópolis, Treviso, Nova Veneza, São Bento Baixo, Morro da Fumaça, Içara e Maracajá, ficando estabelecida a demanda de projeto referente ao ano de 2027, com vazão máxima diária de 1.640 L.s^{-1} e vazão média de 1.366 L.s^{-1} .

Conforme Casan (2003) a adutora possui um diâmetro de 1.000 mm possibilitando uma vazão de dimensionamento da ordem de $1,6 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$.

4.9 IRRIGAÇÃO DE ÁREAS CULTIVADAS

Conforme Rosso (2007) ocorriam na região do litoral sul catarinense conflitos pelo uso dos recursos hídricos dentre a prática da rizicultura e o abastecimento urbano possuindo aumento dessas ocorrências pelo fato do agravamento das estiagens.

Nos dias atuais o cultivo do arroz possui maior parte de sua irrigação por sistemas de captação e de condução de água administrados por associações formais de agricultores, mantendo a tradição do manejo da irrigação e distribuição empiricamente, sem a preocupação de medições e controle da qualidade da água utilizada na irrigação (JUST, 2010).

No estado de Santa Catarina, o cultivo de arroz no sistema pré-germinado é utilizado em sua totalidade (100%), conseguindo uma produtividade de aproximadamente de 7000 kg.ha^{-1} , em uma área de 126000 ha, colocando o estado na segunda colocação em produção de

arroz irrigado, totalizando aproximadamente 800 mil toneladas anuais (FREITAS et al., 2004).

Conforme Back e Rosso (2006) através de experimentos realizados, para avaliação da necessidade de água para o cultivo do arroz pré-germinado através da irrigação nas condições climáticas do sul de Santa Catarina, mostram que as requisições variam conforme os estádios da cultura. A vazão necessária na fase de preparação do solo é de maior volume, com variação de 1,005 a 1,158 L.s⁻¹.ha⁻¹, já para os solos onde não ocorra perda por percolação, a vazão média é de 0,472 L.s⁻¹.ha⁻¹ na fase vegetativa, 0,263 L.s⁻¹.ha⁻¹ na fase reprodutiva e 0,177 L.s⁻¹.ha⁻¹ na fase de maturação (JUST, 2010).

Fase vegetativa: Caracterizada pelo crescimento das folhas, colmos e raízes, em número e tamanho.

Fase reprodutiva: Inicia-se com a diferenciação dos órgãos reprodutivos, indo até a floração.

Fase de maturação: Inicia-se com a floração, indo até a completa maturação (ROSSO, 2007).

Para as demandas relativas para avaliação das áreas de irrigação foi considerado uma barragem de nível a 6,5 km a jusante do local onde será instalado o barramento principal contando com área de drenagem de 121,36 km², dispondo de aproximadamente 2000 ha para o cultivo de arroz (CASAN, 2004).

A responsabilidade de atendimento da barragem do rio São Bento aos agricultores será apenas pela complementação em períodos de estiagem, sabendo que existe uma pequena bacia de contribuição que contribui com uma área de 9,24 km² estabelecida entre o barramento principal e a barragem dos agricultores (CASAN, 2004).

Através da Tabela 6 poderão ser visualizadas as demandas na qual foram consideradas no projeto para a irrigação das áreas de cultivo a jusante do barramento, levando em consideração área irrigada a época dos estudos e previsão de aumento da mesma.

Tabela 6 - Demandas de irrigação consideradas pelo projeto.

Área cultivada ha	Demandas durante os meses do ano (L.s ⁻¹)							média L.s ⁻¹
	Jan	Fev	Mar	Set	Out	Nov	Dez	
2.000	1.000	800	100	200	2.000	1.600	1.400	1.110
2.500	1.250	1.000	130	250	2.500	2.000	1.750	1.270

Fonte: Casan, 2003

A demanda média apenas considerou os sete meses onde a mesma foi solicitada, com demanda média unitária de $0,51 \text{ L.s}^{-1}.\text{ha}^{-1}$.

Conforme a Tabela 6 serão consideradas para irrigação de áreas cultivadas pelo projeto a vazão de 1.110 L.s^{-1} para área de 2.000 ha (atual) e 1.270 L.s^{-1} para área de 2.500 ha.

Atualmente segundo informações obtidas da Epagri - Nova Veneza a área total irrigada com água proveniente do reservatório da barragem do rio São Bento está com 6300 ha distribuídos conforme Tabela 7.

Tabela 7 - Área Irrigada.

Associação de Irrigação	Área (ha)	Nº Irrigantes
Núcleo Gava (Adinga)	300	32
Santo Isidoro (Adisi)	2850	263
São Miguel	2600	220
14 de julho São Bento Alto e Baixo	550	40
Total	6300	555

Fonte: Autor, 2013.

4.10 VAZÃO MÍNIMA DE JUSANTE

Através do órgão ambiental (FATMA) de Santa Catarina a mínima vazão após o barramento não poderá ser inferior a 50% da vazão mínima com 7 dias de permanência e 10 anos de tempo de retorno ($Q_{7,10}$), (CASAN, 2004).

A vazão mínima em um corpo d'água se faz necessária para manter a manutenção dos ecossistemas aquáticos e prevenir a degradação ambiental CNRH, (2011), também denominada de vazão ecológica ou sanitária para Casan (2004), é necessária sua manutenção aquática, dessedentação de animais e preservação de espécies que são incorporadas neste meio a jusante do aproveitamento.

Em caso de onde as séries históricas encontram-se indisponíveis ou mesmo não possuam extensão suficiente para análise estatística, utiliza-se índices regionais para aquisição da vazão mínima ($Q_{7,10}$) (CASAN, 2003), seguindo esse critério ficou estabelecido que $Q_{7,10} = 1,7471 \text{ L.s}^{-1}.\text{km}^2$ obtidos através de estudos realizados pelo CEHPAR, como a área de contribuição da bacia a montante é de $112,12 \text{ km}^2$ (valor de projeto), a vazão mínima ($Q_{7,10}$) = $195,5 \text{ L.s}^{-1}$ e segundo Ming

(2007), obteve-se a LAO do órgão ambiental com ressalva de que a vazão mínima a jusante será equivalente a 100 L.s^{-1} .

5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

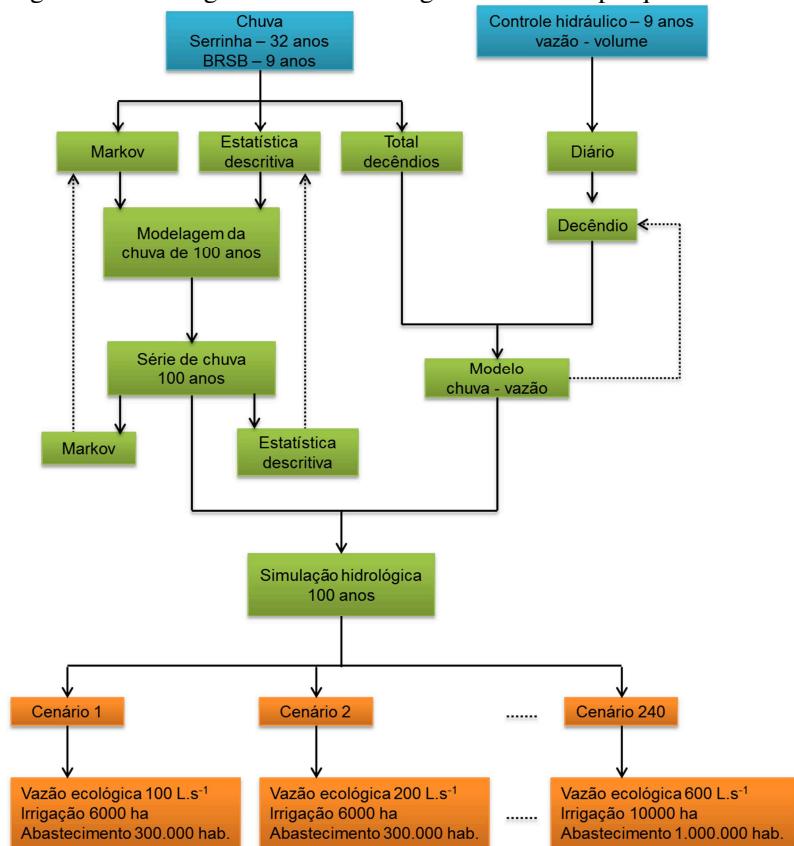
O estudo realizado baseou-se na coleta e disposição cronológica dos dados, permitindo uma análise posterior das condições hidráulicas do reservatório (volumes) da barragem do rio São Bento e sua semelhança aos processos hidrológicos da referida bacia, permitindo a simulação do balanço hídrico do reservatório mediante diferentes cenários de uso da água. O balanço hídrico realizou-se em período decendial. No modelo de balanço hídrico foi considerada como entrada de água a vazão afluente bem como a precipitação direta na área de drenagem da bacia do reservatório. As saídas de água foram dadas pela vazão ecológica, evaporação, demanda de água para consumo humano, demanda de água para irrigação. No manejo da barragem considerou-se ainda critérios de cota máxima normal para reserva, permanecendo um volume de espera para controle de cheias.

Para possibilitar uma avaliação qualitativa e quantitativa do desempenho do estudo, foram realizadas análises comparativas entre as abordagens proposta nesta pesquisa em relação aos dados observados, que foi utilizado como referência neste trabalho para fins de caracterização do desempenho do modelo desenvolvido.

A metodologia consistiu na coleta e organização cronológica destes dados, de modo a permitir a posterior análise do comportamento hidráulico do reservatório da barragem do rio São Bento e sua relação com os processos hidrológicos atuantes na respectiva bacia.

Para uma melhor visualização do procedimento metodológico encontra-se na Figura 12 a descrição da sequência adotada para obtenção dos resultados como sendo a etapa inicial de coleta de dados nos correspondentes módulos azuis, posteriormente ocorreu a etapa de transformações e manipulações dos dados e simulações com retorno dos dados simulados para comparação com os dados observados demonstrado nos módulos verdes e na ultima etapa a criação dos cenários futuros para os diversos atendimento de abastecimento nos módulos laranjas.

Figura 12 - Fluxograma da metodologia utilizada na pesquisa.



Fonte: Autor, 2013.

5.1.1 Dados do local de estudo

A bacia de estudo possui área de drenagem de 112,12 km², constituída por seus afluentes de maior significância o rio Serrinha e rio São Bento, contribuindo 40% e 60% respectivamente.

O barramento principal possui como cota normal de operação 157,50 m, sendo este volume determinado pela crista do vertedor proporcionando um volume total de 58,5 hm³.

A adução da água para os devidos fins é realizada através da “torre de tomada d’água” localizada verticalmente ao barramento de montante possuindo cinco aberturas para a captação distribuídas ao

longo da altura no qual possui aproximadamente 36 m, a composição da mesma se realiza da seguinte forma:

- 1^a comporta cota mínima da soleira de 152,50 m;
- 2^a comporta cota mínima da soleira de 147,50 m;
- 3^a comporta cota mínima da soleira de 142,50 m;
- 4^a comporta cota mínima da soleira de 137,50 m;
- 5^a comporta cota mínima da soleira de 132,50 m.

Conforme Casan (2003) a cota 132,50 m corresponde ao mínimo nível operativo considerado no projeto possuindo um volume total de 1,40 hm³ considerado este como “volume morto”.

5.1.2 Dados meteorológicos

A barragem do rio São Bento está equipada com uma estação meteorológica de superfície automática e convencional. Os dados automáticos obtidos são gerados em períodos horários e transmitidos via telefone celular por *SMS* (Short Message Service) à central de processamento dos dados atualmente geridos pela Fundação de Apoio ao Desenvolvimento Rural Sustentável do Estado de Santa Catarina (Fundagro) e posteriormente disponibilizados para a CASAN de modo *on-line*.

As informações meteorológicas convencionais são obtidas diariamente através de procedimento executado por meio dos operadores da barragem do rio São Bento as 09:00 horas com dados de precipitação, evaporação, temperatura mínima e máxima e velocidade do vento.

A utilização dos dados meteorológicos para ajuste do modelo a ser utilizado no estudo originou-se da estação meteorológica implantada na barragem do rio São Bento com informações obtidas com início em 2004 na qual disponibiliza as seguintes informações:

- a. pluviometria;
- b. pressão atmosférica;
- c. evaporação através de tanque classe A;
- d. direção e velocidade do vento;
- e. radiação solar;
- f. temperatura do ar;
- g. nível do reservatório;
- h. umidade do ar.

Também foram utilizadas informações obtidas na Estação Pluviométrica da Serrinha, pertencente à Agência Nacional de Águas (ANA, 2009), com os seguintes dados:

Código: 84800000

Nome da estação: SERRINHA - JUS 200 M – CASAN

Código do rio: 84411050

Curso d'água: rio São Bento SC

RH: 12

Entidade: ANA

Latitude: 28° 36' 44"

Longitude: 49° 33' 04"

Esta estação possui série de dados diários a partir de 1986, sendo, portanto maior que a série de dados da barragem do rio São Bento, e por isso foi utilizada no ajuste dos parâmetros do modelo de geração de dados de precipitação.

A obtenção dos dados hidráulicos ocorreu através do sistema convencional de leituras, realizado pelos operadores da barragem do rio São Bento. Conforme o manual de operação da barragem, os intervalos de leitura podem ser de 8, 6, 4 ou 1 hora, variando conforme a situação hidráulica do reservatório.

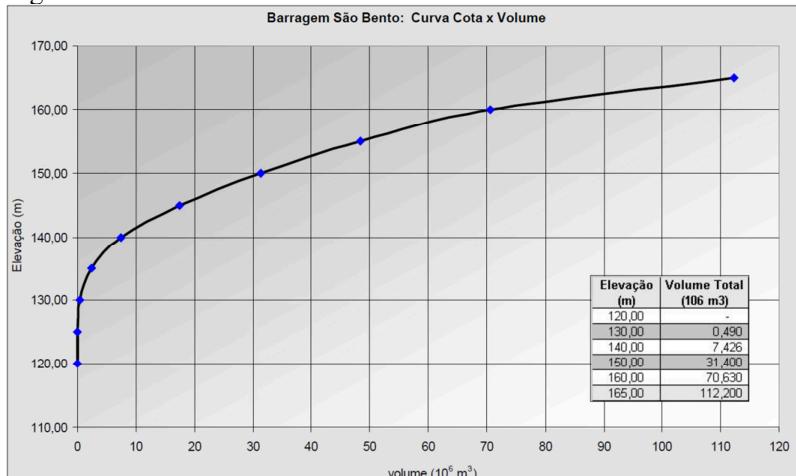
No formulário do controle hidráulico do reservatório da barragem do rio São Bento foram obtidos os dados para a determinação do balanço hídrico do reservatório, através dos dados da vazão afluente proporcionada através dos rios São Bento e Serrinha e defluente através dos descarregadores de fundo, dispersora, adução para abastecimento e vertedouro.

Alguns procedimentos são adotados para o registro do controle hidráulico do reservatório que ocorrem através do formulário conforme Figura 13, possuindo como dado inicial o nível do reservatório sendo esse obtido através de leitura convencional da régua instalado a montante do reservatório no próprio barramento conforme intervalo de tempo já descrito. A partir do valor registrado da régua obtém-se os volumes do reservatório por meio da curva cota-volume definidas (Figura 14) no Manual de Operação do Reservatório (MOR), determinando em seguida às vazões acumuladas ou desacumuladas, e através das vazões defluentes determinadas através da curva cota-vazão dos descarregadores de 400 mm, 800 mm e 1000 mm (Figura 15), válvula dispersora (Figura 16), vertedouro (Figura 17) e leitura do macro medidor da adutora. A vazão afluente é obtida por meio do balanço hídrico do reservatório.

Figura 13 - Formulário do controle hidráulico do reservatório

Fonte: Autor, 2013.

Figura 14 - Curva Cota-Volume do reservatório.



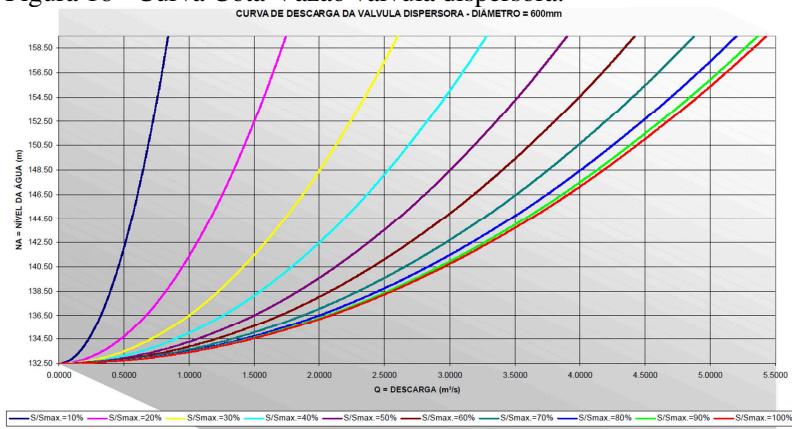
Fonte: Casan, 2003

Figura 15 - Curva Cota-Vazão dos descarregadores.



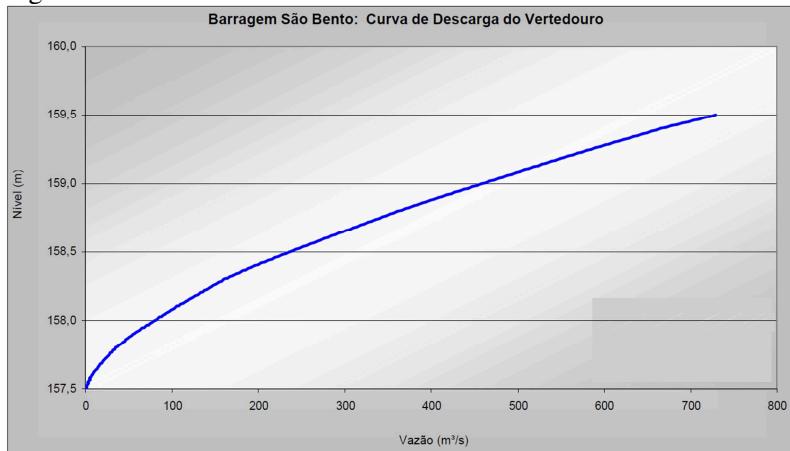
Fonte: Casan, 2003.

Figura 16 - Curva Cota-Vazão válvula dispersora.



Fonte: Casan, 2003.

Figura 17 - Curva Cota-Vazão vertedouro.



Fonte: Casan, 2003.

No controle hidráulico (Figura 13) são consideradas as seguintes variáveis:

V_I = Volume Inicial (hm^3);

V_F = Volume Final (hm^3);

T = Período (h);

V_{ACP} = Volume acumulado no período T (hm^3);

Q_{AC} = Vazão acumulada ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$);

Q_{AD} = Vazão adutora ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$);

Q_{VD} = Vazão da válvula dispersora ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$);

Q_{D400} = Vazão descarregador de fundo de 400 mm ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$);

Q_{D800} = Vazão descarregador de fundo de 800 mm ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$);

Q_{D1000} = Vazão descarregador de fundo de 1000 mm ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$);

Q_{VERT} = Vazão do vertedouro ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$);

Q_{DEF} = Vazão defluente ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$);

Q_{AFL} = Vazão afluente ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$);

Através das variáveis demonstradas se consegue obter as vazões defluentes e afluentes como a seguir:

O volume acumulado no período é dado por:

$$V_{ACP} = V_F - V_I \quad (12)$$

A vazão acumulada é calculada por:

$$Q_{AC} = (V_{ACP} \cdot T^{-1}) \cdot 10^6 \cdot 360 \quad (13)$$

A vazão defluente total é dada por:

$$Q_{DEF} = Q_{AD} + Q_{VD} + Q_{D400} + Q_{D800} + Q_{D1000} + Q_{VERT} \quad (14)$$

A vazão afluente é estimada por:

$$Q_{AFL} = Q_{AC} - Q_{DEF} \quad (15)$$

Em razão das obtenções disponíveis no formulário do controle hidráulico da barragem do rio São Bento estarem distribuídos em intervalos variados de 1 a 8 horas, na primeira etapa da análise dos dados, estes valores foram agrupados para intervalos diários. Para esta etapa foi elaborada uma rotina em linguagem Delphi.

Os valores de vazões foram transformados em volumes com unidades em hectômetros cúbicos (hm^3), tendo como base o horário das 09:00 horas, para coincidir com as leituras dos dados da estação meteorológica. Nos dias em que as leituras do formulário do controle hidráulico do reservatório não foram realizadas as 09:00 h, foi realizado a interpolação linear entre as leitura anterior e posterior.

Na segunda etapa da análise dos dados os valores diários na forma de volumes tanto afluente quanto defluente, foram agrupados em intervalos correspondentes aos decêndios do ano (1 a 36). Assim cada mês é composto por três decêndios, sendo o primeiro decêndio o período compreendido entre os dias 1 e 10, o segundo decêndio o período compreendido entre os dias 11 e 20 e o terceiro decêndio o período do dia 21 ao último dia do mês, podendo neste caso ter 8, 9, 10 ou 11 dias.

5.1.3 Dados de chuva estação Serrinha

A obtenção dos dados da estação Serrinha possui um período de observação a partir do ano de 1986, dados esses conseguidos através da rede de estações pluviométricas da ANA (ANA, 2009), dispostos em períodos diários e em seguida agrupados em períodos mensais (decêndios), para que ocorra a equivalência dos períodos para análise posterior.

5.1.4 Coeficiente de escoamento

Conforme Gontijo (2007), a diversidade dos modelos hidrológicos é proporcionada através da heterogeneidade física das bacias e dos processos envolvidos, que se diferenciam em função dos dados utilizados, da discretização temporal, das prioridades de representação dos processos e dos objetivos a serem alcançados.

Um modelo mais simples para estimar a vazão a partir da chuva consiste em multiplicar o volume da precipitação por um coeficiente empírico, conforme:

$$Q = P \times C \quad (16)$$

Em que: Q é a vazão;

P é a precipitação;

C é um coeficiente empírico.

Embora o modelo seja muito simplificado, os dados do monitoramento hidráulico não foram suficientes para ajustes de outros modelos chuva-vazão. Considerando que com os dados existentes de precipitação e vazão afluente na barragem, pode-se ajustar o coeficiente para o período do monitoramento por meio da relação:

$$C = \frac{Q}{P} \quad (17)$$

Segundo Tucci (2000), os coeficientes variam em uma mesma bacia, conforme o ano e o evento associado em função da intensidade, distribuição temporal e espacial da precipitação, condições de umidade do solo e retenções, possuindo uma avaliação de valores médios que permite analisar cenários médios com relação ao balanço hídrico da bacia e interferências.

Para ajustar o modelo de chuva vazão foram utilizados os registros de dados dos oito anos de operação da barragem do rio São Bento e também os dados de vazão da estação Serrinha (ANA, 2009), localizada a jusante da barragem. Com os dados diários de chuva agrupados em decênios e posteriormente transformada em vazão, juntamente com os dados de vazão do reservatório foi ajustado o parâmetro C para a bacia.

5.1.5 Estimativa da vazão a partir da chuva do Serrinha

Para a determinação da vazão afluente contribuinte para o reservatório utilizou-se dos índices pluviométricos obtidos a partir dos dados da ANA em um período a partir de 1986 no qual a altura de precipitação diária foi agrupada em períodos decêndios.

Agruparam-se também as informações em períodos decêndios das vazões afluentes disponibilizadas através do formulário do controle hidráulico do reservatório. Os volumes pluviométricos foram obtidos através da multiplicação da área da bacia de drenagem pela altura pluviométrica, também no mesmo período de tempo sendo que 1 mm de precipitação equivale à vazão de $0,001 \text{ hm}^3.\text{km}^{-2}$.

O coeficiente de escoamento “C” obteve-se através da relação do volume proporcionado da vazão afluente pelo volume de chuva ocorrido na bacia de drenagem.

5.1.6 Geração de séries de chuva

Para a determinação das vazões afluentes foi gerado uma série de dados de precipitação com 100 anos de duração, e posteriormente com esses dados de precipitação foram determinados às vazões afluentes.

Para a modelagem da ocorrência de precipitação, foi considerado a cadeia de Markov de dois estados, em que o dia é considerado seco ou chuvoso. O critério adotado para dia ser seco foi de chuva inferior a 1,0 mm. Neste trabalho foi utilizado a cadeia de primeira ordem, em que a probabilidade de um dia ser seco (ou chuvoso) depende somente da condição do dia anterior (NICKS e HARP, 1980).

A utilização cadeia de Markov apresenta boa tendência de agrupamento seqüencial dos dias chuvosos e secos, no qual apresenta entre si, uma dependência estocástica conhecida por “persistência” conforme VIANA et al. (2000).

Para levar em conta a estacionariedade, os parâmetros do modelo foram ajustados por períodos mensais. Dessa forma foram determinadas as matrizes de probabilidades de transição conforme:

$$P_{00i} = \frac{N_{00i}}{N_{00i} + N_{01i}} \quad (18)$$

$$P_{10i} = \frac{N_{10i}}{N_{10i} + N_{11i}} \quad (19)$$

$$P_{01i} = 1 - P_{00i} \quad (20)$$

$$P_{11i} = 1 - P_{10i} \quad (21)$$

em que:

P_{00} = Probabilidade de um dia ser seco, dado que o anterior também foi seco;

P_{10} = Probabilidade de um dia ser seco, dado que o anterior foi chuvoso;

P_{01} = Probabilidade de um dia ser chuvoso, dado que o anterior foi seco;

P_{11} = Probabilidade de um dia ser chuvoso, dado que o anterior foi chuvoso;

N_{10} = freqüência observada da seqüência de dia chuvoso seguido por dia seco;

N_{11} = freqüência observada de seqüência de dois dias chuvosos;

N_{00} = freqüência observada da seqüência de dois dias secos;

N_{01} = freqüência observada de um dia seco seguido por dia chuvoso;

i = mês (1 a 12).

Para a simulação da quantidade de chuva nos dias chuvosos foram utilizados dois modelos, um baseado na distribuição exponencial e outro baseado na distribuição gama.

A distribuição exponencial tem como função cumulativa de probabilidade:

$$F(X) = P[X \leq x] = \int_{x=0}^x \alpha e^{-\alpha x} = 1 - e^{-\alpha x} \quad (22)$$

O parâmetro α dado distribuição exponencial foi estimado pelo método dos momentos como:

$$\alpha = \frac{1}{x} \quad (23)$$

em que: \bar{X} é a média observada de precipitação dos dias com chuva.

A precipitação X com uma probabilidade $P(X \leq x)$ pode ser estimada por:

$$X = -\frac{\ln(1 - P(X \leq x))}{\alpha} \quad (24)$$

A distribuição Gama tem como função cumulativa de probabilidade:

$$F(x) = P(X \leq x) = \frac{1}{\Gamma(\gamma)\beta^\gamma} \int_0^x X^{\gamma-1} e^{-\frac{x}{\beta}} dx \quad (25)$$

em que:

β e γ são os parâmetros da distribuição
 $\Gamma(\gamma)$ é a função gama.

Os parâmetros da distribuição gama foram estimados com base no método dos momentos por:

$$\beta = \frac{s^2}{\bar{x}} \quad (26)$$

$$\gamma = \frac{\bar{x}}{s^2} \quad (27)$$

Em que:

\bar{X} é a média observada de precipitação dos dias com chuva;
 s^2 é a variância dos dados observados.

Dessa forma foi elaborado um programa para a simulação das séries de cem anos de dados de precipitação com base na seguinte estrutura:

- 1) Gerar um número aleatório U ;
- 2) Verificar se U for maior que a probabilidade de um dia do mês de janeiro ser seco (P_0) então o dia anterior foi considerado chuvoso caso contrário o dia foi considerado seco;
- 3) para o dia $d + 1$ gerar um número aleatório U ;

- 4) Verificar se $U \leq P10$ ou $P00$ então o dia era seco (chuva = 0 mm), retornando ao item 3, caso contrario era chuvosos e segue para o item 5;
- 5) Gera um número aleatório U e com este número foi determinado pela distribuição exponencial e pela distribuição gama o valor esperado de chuva para o dia em questão, e retorna para o item 3;

O ajuste do modelo de Markov foi realizado com base na série de dados de precipitação da estação Serrinha, com dados de 1986 a 2012.

Para verificar a qualidade dos dados simulados foram calculadas as estatísticas descritivas e a matrizes de probabilidade de transição e também para as séries de precipitação simuladas.

5.1.7 Geração das vazões

Com base na série de dados de precipitação da estação Serrinha, foram determinadas as vazões obtidas por escoamento usando o coeficiente C , com o parâmetro obtido no ajuste descrito no item 5.1.4. As alturas pluviométricas foram transformadas em volumes afluentes diretamente através da área da bacia. Os volumes diários foram calculados para transformação de volumes mensais em hectômetros cúbicos para toda a série de dados e posteriormente transformada em decêndios para manter o mesmo período de informações.

5.1.8 Simulação do reservatório

A simulação do reservatório foi realizada com base no balanço hídrico dado por:

$$S_t = S_{t-1} + P + Q_a - E - Q_{eco} - Q_{rr} - Q_{cons} \quad (28)$$

Em que: S_t = armazenamento no mês t (m^3);

S_{t-1} = armazenamento no mês anterior (m^3)

P = precipitação direta no lago (m^3);

Q_a = vazão afluente (m^3);

Q_{eco} = vazão ecológica (m^3);

Q_{irr} = vazão para irrigação (m^3);

Q_{cons} = vazão para consumo humano (m^3);

E = evaporação (m^3).

A simulação consistiu em realizada com base em diferentes cenários para consumo humano (mil habitantes), irrigação (ha) e vazão ecológica ($L.s^{-1}$), conforme descrito na Tabela 8.

Para consumo humano ficou considerado o valor de 200 $L.hab^{-1}.dia^{-1}$

Para a área de irrigação considerou-se as faixas de 6000, 7000, 8000 9000 e 10000 ha. O consumo de água para irrigação foi considerado de $6000 m^3.ha^{-1}$, distribuídos nos meses de setembro à janeiro nos percentuais de 25%, 30%, 20%, 15% e 10%, respectivamente conforme Epagri.

Tabela 8 - Condições de demanda para cada cenário de simulação de operação da barragem do rio São Bento.

Cenários	Consumo	Cenários	Consumo	Cenários	Consumo
	Irrigação		Vazão ecológica		Irrigação
1	300000-6000-100	81	800000-7000-300	161	500000-9000-500
2	300000-6000-200	82	800000-7000-400	162	500000-9000-600
3	300000-6000-300	83	800000-7000-500	163	600000-9000-100
4	300000-6000-400	84	800000-7000-600	164	600000-9000-200
5	300000-6000-500	85	900000-7000-100	165	600000-9000-300
6	300000-6000-600	86	900000-7000-200	166	600000-9000-400
7	400000-6000-100	87	900000-7000-300	167	600000-9000-500
8	400000-6000-200	88	900000-7000-400	168	600000-9000-600
9	400000-6000-300	89	900000-7000-500	169	700000-9000-100
10	400000-6000-400	90	900000-7000-600	170	700000-9000-200
11	400000-6000-500	91	1000000-7000-100	171	700000-9000-300
12	400000-6000-600	92	1000000-7000-200	172	700000-9000-400
13	500000-6000-100	93	1000000-7000-300	173	700000-9000-500
14	500000-6000-200	94	1000000-7000-400	174	700000-9000-600
15	500000-6000-300	95	1000000-7000-500	175	800000-9000-100
16	500000-6000-400	96	1000000-7000-600	176	800000-9000-200
17	500000-6000-500	97	300000-8000-100	177	800000-9000-300
18	500000-6000-600	98	300000-8000-200	178	800000-9000-400
19	600000-6000-100	99	300000-8000-300	179	800000-9000-500
20	600000-6000-200	100	300000-8000-400	180	800000-9000-600
21	600000-6000-300	101	300000-8000-500	181	900000-9000-100
22	600000-6000-400	102	300000-8000-600	182	900000-9000-200
23	600000-6000-500	103	400000-8000-100	183	900000-9000-300
24	600000-6000-600	104	400000-8000-200	184	900000-9000-400
25	700000-6000-100	105	400000-8000-300	185	900000-9000-500
26	700000-6000-200	106	400000-8000-400	186	900000-9000-600
27	700000-6000-300	107	400000-8000-500	187	1000000-9000-100
28	700000-6000-400	108	400000-8000-600	188	1000000-9000-200
29	700000-6000-500	109	500000-8000-100	189	1000000-9000-300
30	700000-6000-600	110	500000-8000-200	190	1000000-9000-400
31	800000-6000-100	111	500000-8000-300	191	1000000-9000-500
32	800000-6000-200	112	500000-8000-400	192	1000000-9000-600
33	800000-6000-300	113	500000-8000-500	193	300000-10000-100

34	800000-6000-400	114	500000-8000-600	194	300000-10000-200
35	800000-6000-500	115	600000-8000-100	195	300000-10000-300
36	800000-6000-600	116	600000-8000-200	196	300000-10000-400
37	900000-6000-100	117	600000-8000-300	197	300000-10000-500
38	900000-6000-200	118	600000-8000-400	198	300000-10000-600
39	900000-6000-300	119	600000-8000-500	199	400000-10000-100
40	900000-6000-400	120	600000-8000-600	200	400000-10000-200
41	900000-6000-500	121	700000-8000-100	201	400000-10000-300
42	900000-6000-600	122	700000-8000-200	202	400000-10000-400
43	1000000-6000-100	123	700000-8000-300	203	400000-10000-500
44	1000000-6000-200	124	700000-8000-400	204	400000-10000-600
45	1000000-6000-300	125	700000-8000-500	205	500000-10000-100
46	1000000-6000-400	126	700000-8000-600	206	500000-10000-200
47	1000000-6000-500	127	800000-8000-100	207	500000-10000-300
48	1000000-6000-600	128	800000-8000-200	208	500000-10000-400
49	300000-7000-100	129	800000-8000-300	209	500000-10000-500
50	300000-7000-200	130	800000-8000-400	210	500000-10000-600
51	300000-7000-300	131	800000-8000-500	211	600000-10000-100
52	300000-7000-400	132	800000-8000-600	212	600000-10000-200
53	300000-7000-500	133	900000-8000-100	213	600000-10000-300
54	300000-7000-600	134	900000-8000-200	214	600000-10000-400
55	400000-7000-100	135	900000-8000-300	215	600000-10000-500
56	400000-7000-200	136	900000-8000-400	216	600000-10000-600
57	400000-7000-300	137	900000-8000-500	217	700000-10000-100
58	400000-7000-400	138	900000-8000-600	218	700000-10000-200
59	400000-7000-500	139	1000000-8000-100	219	700000-10000-300
60	400000-7000-600	140	1000000-8000-200	220	700000-10000-400
61	500000-7000-100	141	1000000-8000-300	221	700000-10000-500
62	500000-7000-200	142	1000000-8000-400	222	700000-10000-600
63	500000-7000-300	143	1000000-8000-500	223	800000-10000-100
64	500000-7000-400	144	1000000-8000-600	224	800000-10000-200
65	500000-7000-500	145	300000-9000-100	225	800000-10000-300
66	500000-7000-600	146	300000-9000-200	226	800000-10000-400
67	600000-7000-100	147	300000-9000-300	227	800000-10000-500
68	600000-7000-200	148	300000-9000-400	228	800000-10000-600
69	600000-7000-300	149	300000-9000-500	229	900000-10000-100
70	600000-7000-400	150	300000-9000-600	230	900000-10000-200
71	600000-7000-500	151	400000-9000-100	231	900000-10000-300
72	600000-7000-600	152	400000-9000-200	232	900000-10000-400
73	700000-7000-100	153	400000-9000-300	233	900000-10000-500
74	700000-7000-200	154	400000-9000-400	234	900000-10000-600
75	700000-7000-300	155	400000-9000-500	235	1000000-10000-100
76	700000-7000-400	156	400000-9000-600	236	1000000-10000-200
77	700000-7000-500	157	500000-9000-100	237	1000000-10000-300
78	700000-7000-600	158	500000-9000-200	238	1000000-10000-400
79	800000-7000-100	159	500000-9000-300	239	1000000-10000-500
80	800000-7000-200	160	500000-9000-400	240	1000000-10000-600

Fonte: Autor, 2013.

Para o balanço hídrico considerou-se para cada cenário anotando-se a frequência e falhas no atendimento das demandas acima.

5.1.9 Situações do reservatório em função do volume armazenado

Foram criadas classes de situações do reservatório em Cheio, Normal, Alerta, Crítico e Falha, para definir critérios de operação e avaliação da situação de funcionamento da barragem nos diferentes cenários simulados.

As situações foram definidas como:

Cheio: para volumes acima de 58,50 hm³ (cota 157,50 m) onde ocorre o vertimento dos volumes excedidos pelo reservatório;

Normal: para volumes entre 29,00 hm³ (cota 149,30 m) e 58,50 hm³ (cota 157,50 m);

Alerta: para os volumes compreendidos entre 14,50 hm³ (cota 143,64 m) e 29,00 hm³ (cota 149,30 m);

Crítico: para os volumes compreendidos entre 1,4 hm³ (cota 132,50 m) localização da ultima comporta de abastecimento da adutora e 14,50 hm³ (cota 143,64 m).

Falha: para volumes inferiores a 1,4 hm³, nível este compreendido na soleira da última comporta.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 ANÁLISE DOS DADOS DE PRECIPITAÇÃO

Na Tabela 9 constam os totais mensais e anuais de precipitação registrada na estação Serrinha, no período de 1986 a 2013. Verificando que no mês de janeiro de 2011 apresentou a maior altura pluviométrica registrada com valor de 668,9 mm também observa-se no mês de janeiro é onde em média ocorre a maior incidência de volumes pluviométricos de 287,5 mm, onde inversamente, tem-se no mês de junho o menor índice pluviométrico mensal registrado de 86,5 mm. Observa-se que alguns períodos não possuem registros, onde foram descartados os meses sem leituras para o referido estudo.

Para o período de menor índice pluviométrico onde ocorreu estiagem na região atendida pelo reservatório da barragem do rio São Bento desde sua operação, nota-se o ano de 2012 com 1615,5 mm sendo observado que ainda assim não foi o menor índice registrado na estação Serrinha que ocorreu no ano de 2003 com 1307,2 mm.

Tabela 9 - Índices pluviométricos estação Serrinha.

	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Maio	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez	Anual
1986	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	262,8	-
1987	338,2	329,9	157,6	164,4	258,3	111,1	212,1	192,3	137,4	252,6	170,5	-	-
1988	338,6	69,4	162,0	107,5	65,2	76,9	27,2	14,5	188,7	169,3	24,2	196,1	1439,6
1989	357,7	204,2	189,9	134,4	121,8	49,1	48,2	71,7	201,8	82,0	65,9	119,0	1645,7
1990	-	116,8	55,5	162,6	-	-	41,9	60,4	116,4	-	-	-	-
1991	68,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	251,0	231,4	-
1992	159,4	146,5	165,8	61,9	-	-	-	-	118,8	9,4	66,3	16,2	-
1993	301,1	225,8	201,3	113,4	-	0,0	-	23,5	318,0	110,0	88,5	274,0	-
1994	-	-	25,7	501,0	117,2	127,7	12,8	40,1	134,3	12,3	73,7	-	-
1995	191,0	-	-	0,0	35,2	110,1	153,7	30,6	275,2	97,6	191,3	165,4	-
1996	388,1	259,3	256,0	99,2	81,0	137,2	59,0	158,0	289,1	188,4	174,7	-	-
1997	421,8	459,1	73,2	103,1	37,0	59,4	184,4	242,9	182,9	359,2	320,7	116,7	2560,4
1998	-	-	232,1	-	73,6	-	-	124,5	-	-	140,5	140,1	-
1999	220,5	-	188,3	87,5	-	68,5	173,1	45,9	58,4	-	-	-	-
2000	324,7	407,7	196,9	71,2	55,1	82,7	54,6	46,1	202,9	209,7	168,7	203,5	2023,8
2001	279,5	587,5	172,0	138,2	132,3	50,5	164,8	35,4	263,9	174,6	220,8	181,1	2400,6
2002	161,3	199,1	260,9	122,0	122,1	173,4	71,7	82,1	86,1	240,7	223,7	179,7	1922,8
2003	54,8	158,6	169,5	164,9	28,9	93,4	57,5	26,0	104,5	177,4	122,7	149,0	1307,2
2004	224,5	155,6	202,3	193,2	232,5	126,0	82,0	18,4	241,0	111,3	194,1	225,8	2006,7
2005	134,3	202,4	226,1	103,8	162,1	65,0	65,6	312,2	195,1	338,5	172,4	201,4	2178,9
2006	322,9	213,5	301,9	93,1	101,9	72,2	96,8	104,7	39,9	145,2	561,4	140,9	2194,4
2007	221,7	201,1	360,8	122,5	231,3	26,5	164,0	111,7	194,1	142,6	199,2	196,4	2171,9
2008	255,1	193,3	262,9	132,7	218,2	95,4	19,8	62,1	200,5	317,5	467,1	276,4	2501,0
2009	508,7	305,9	276,1	81,6	40,1	47,6	66,4	206,0	468,5	116,1	246,5	304,9	2668,4
2010	376,7	181,7	369,4	149,3	395,2	95,8	146,7	87,3	123,0	148,6	320,1	128,1	2521,9
2011	668,9	361,4	212,6	54,9	138,0	136,6	288,7	351,6	174,1	102,5	66,9	216,7	2772,9
2012	417,9	175,2	76,2	40,6	38,7	108,4	129,4	91,2	168,1	159,7	59,3	150,8	1615,5
2013	163,2	362,4	192,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Média	287,5	250,7	206,7	105,3	146,2	86,5	110,7	104,7	182,9	172,1	188,7	180,4	2120,7

Fonte: Autor, 2013.

Observa-se que para a região de abrangência atendida pela estação Serrinha possui-se uma disponibilidade de precipitação anual entre os períodos analisados de 1307,2 a 2772,9 mm. Dentre o período de funcionamento do reservatório o máximo evento de precipitação constatou-se no ano de 2011 com 2772,9 mm de altura pluviométrica. Os valores pluviométricos anteriormente apresentados subsidiaram as informações para encontrar as vazões afluentes do reservatório.

A Tabela 10 demonstra a quantidade de dias que ocorreram chuvas registradas na estação Serrinha sabendo que considerado dia chuvoso aquele com altura de precipitação maior que 1,0 mm, verificando-se que o ano de maior ocorrência de dias chuvosos ocorreu em 2011 com 165 dias e destacando também o mês de janeiro como o de mais dias chuvosos.

Observa-se que para a região de abrangência atendida pela estação Serrinha possui-se uma disponibilidade de precipitação anual entre os períodos analisados de 1307,2 a 2772,9 mm. Dentre o período de funcionamento do reservatório o máximo evento de precipitação constatou-se no ano de 2011 com 2772,9 mm de altura pluviométrica. Os valores pluviométricos anteriormente apresentados subsidiaram as informações para encontrar as vazões afluentes do reservatório.

A Tabela 10 demonstra a quantidade de dias que ocorreram chuvas registradas na estação Serrinha. Considerado dia chuvoso aquele com altura de precipitação maior que 1,0 mm, verificando-se que o ano de maior ocorrência de dias chuvosos ocorreu em 2011 com 165 dias e destacando também o mês de janeiro como o de mais dias chuvosos.

Os meses compreendidos entre maio e agosto apresentam os menores índices pluviométricos registrados, sendo representado pela transição de estação de outono para o inverno período de poucas chuvas na região, que variam em uma média de 7,6 a 8,2 dias de chuva nos meses entre maio a agosto.

Tabela 10 - Número de dias de chuva registrado na Estação Serrinha.

	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Maio	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez	Anual
1986	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	19	-
1987	17	20	7	9	9	7	12	15	10	15	6	-	-
1988	17	6	8	8	6	8	3	3	13	6	1	9	88
1989	17	11	9	8	8	6	3	5	13	8	5	8	101
1990	-	11	10	16	-	-	5	4	15	-	-	-	-
1991	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14	11	-
1992	9	14	11	4	-	-	-	-	11	3	6	5	-
1993	24	18	14	12	-	0	-	2	9	5	3	21	-
1994	-	-	-	2	13	6	6	1	2	6	4	4	-
1995	15	-	-	0	3	9	11	4	10	12	13	6	-
1996	20	17	20	7	5	9	6	8	13	9	10	-	-
1997	17	17	7	5	6	3	7	12	12	19	20	13	138
1998	-	-	19	-	6	-	-	20	-	-	11	7	-
1999	23	-	12	10	-	7	17	5	9	-	-	-	-
2000	12	13	15	4	10	11	7	6	9	14	11	14	126
2001	15	19	18	12	8	7	6	6	15	8	12	9	135
2002	13	11	12	10	10	9	8	10	8	12	13	16	132
2003	7	13	14	9	2	10	8	4	10	10	8	10	105
2004	12	12	13	12	7	9	4	13	9	13	16	127	-
2005	11	16	13	10	8	7	6	10	16	21	13	16	147
2006	17	18	8	6	7	6	8	7	6	12	17	10	122
2007	14	18	18	11	12	6	9	9	11	13	10	11	142
2008	20	13	16	12	6	10	6	13	12	18	17	17	160
2009	16	12	13	9	10	8	8	12	18	16	14	15	151
2010	18	15	15	14	17	11	11	7	10	14	13	15	160
2011	24	21	15	9	9	11	15	18	10	11	8	14	165
2012	16	16	6	9	5	10	9	8	9	10	7	12	117
2013	10	19	16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Média	15,5	15	12,9	8,7	8	7,6	8,2	8	11	10,5	10,4	12,1	132,2

Fonte: Autor, 2013.

Verificou-se que o mês de maior probabilidade do dia ser considerado seco com 74,86% (Tabela 11), possuindo também para esse mês um número de falhas de 170 ocorrências de falhas nos registros da estação já para o mês de fevereiro encontrou-se a menor probabilidade do dia ser considerado seco, (46,90%) e um número de falhas no registro de 343 ocorrências.

Conforme Kite (1977), para valores de assimetria inferiores a três indicam que as médias estão normalmente distribuídas, podendo utilizar-se da distribuição normal para as estimativas das probabilidades de ocorrência de valores mensais de chuva. Podendo ser ressaltado que os dados de assimetria analisados encontram-se quase que totalmente dentro da faixa descrito por Kite (1977), e Back (2001), já para os valores de curtose foram encontrados valores bem superiores a três.

Destaca-se que para as séries observadas encontraram-se diversas falhas nos registros sendo que em parte as diferenças proporcionadas entre as séries (observada e analisada) se devem a essas falhas e, por conseguinte se refletirá nas estimativas dos parâmetros do modelo.

Tabela 11 - Estatística descritiva das chuvas diárias registrada na estação Serrinha.

Mês	Probabilidade	Média	Desvio	Variância	Assimetria	Curtose	Maior	Menor	N	Nfalhas
1	0,5046	18,24	24,85	617,52	3,82	24,23	238,9	1,0	765	379
2	0,4690	16,58	19,80	392,05	2,67	12,55	153,4	1,0	646	343
3	0,5847	15,98	18,82	354,09	2,84	14,60	151,4	1,0	744	309
4	0,7158	12,02	13,39	179,20	2,66	14,46	106,5	1,0	732	208
5	0,7486	17,95	22,64	512,70	2,39	9,24	134,6	1,0	692	174
6	0,7463	11,11	10,74	115,45	1,74	6,23	55,4	1,0	670	170
7	0,7352	13,17	12,84	164,75	2,24	9,83	86,2	1,0	725	192
8	0,7405	12,86	15,36	236,05	2,19	7,81	84,0	1,0	763	198
9	0,6262	16,20	19,37	375,16	3,48	24,81	187,0	1,0	749	280
10	0,6287	14,95	16,43	269,79	2,70	13,30	111,6	1,0	719	267
11	0,6542	18,10	18,74	351,27	2,43	10,36	123,6	1,0	720	249
12	0,6060	15,39	18,41	339,04	2,56	11,50	129,7	1,0	769	303

Fonte: Autor, 2013.

A Tabela 12 apresenta as matrizes de transição do modelo da cadeia de Markov da série observada na estação Serrinha, com, as freqüências de ocorrências de dia seco seguido por dia seco (N00), dia chuvoso seguido de dia seco (N10), dia seco seguido de dia chuvoso (N01), dia chuvoso seguido de dia chuvoso (N11), dias com falhas na observação (N7) e de dias com probabilidade serem secos (P0). Diante das informações verifica-se que uma probabilidade de 17,55% para o mês de agosto de ocorrência de o dia seco ser seguido por dia chuvoso à mesma observação é válida para o período de maio a agosto onde se encontra os menores valores de probabilidades encontradas.

Tabela 12 - Parâmetros da Cadeia de Markov da série observada.

Mês	N00	N10	N01	N11	N7	TOTAL	P0	P00	P01	P10	P11
1	242	143	146	232	105	763	0,5046	0,6237	0,3763	0,3813	0,6187
2	193	109	103	239	147	644	0,4689	0,6520	0,3480	0,3132	0,6868
3	305	130	128	180	125	743	0,5855	0,7044	0,2956	0,4194	0,5806
4	408	113	116	92	111	729	0,7147	0,7786	0,2214	0,5512	0,4488
5	423	94	91	82	178	690	0,7493	0,8230	0,1770	0,5341	0,4659
6	401	97	93	77	172	668	0,7455	0,8117	0,1883	0,5575	0,4425
7	439	92	96	95	146	722	0,7355	0,8206	0,1794	0,4920	0,5080
8	465	100	99	98	106	762	0,7415	0,8245	0,1755	0,5051	0,4949
9	359	110	112	172	92	753	0,6228	0,7622	0,2378	0,3901	0,6099
10	324	127	124	142	151	717	0,6290	0,7232	0,2768	0,4721	0,5279
11	364	107	105	144	120	720	0,6542	0,7761	0,2239	0,4263	0,5737
12	325	141	146	153	103	765	0,6092	0,6900	0,3100	0,4796	0,5204

Fonte: Autor, 2013.

6.2 PARÂMETROS DA CADEIA DE MARKOV

Na Tabela 13 constam os parâmetros da cadeia de Markov para a série simulada. Constatou-se que as séries observadas e simuladas Figura 18 apresentaram valores das probabilidades de transição praticamente iguais, indicando dessa forma que o modelo ajustado irá simular séries de chuva com sequências de dias secos e chuvosos semelhantes ao período observado.

Mesmo com o efeito da sazonalidade o comportamento apresentou resultados satisfatórios demonstrando pequena distorção para o dia com chuva seguido de dia seco (P10) na série observada e simulada nos meses de março e maio. Essas diferenças podem em parte ser atribuídas às falhas nas observações da série observada.

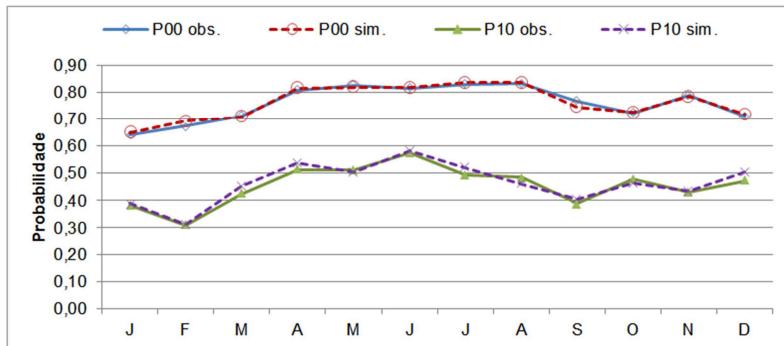
Ugione (2005) analisando dados de várias estações pluviométricas do Sul de Santa Catarina também concluiu que o modelo de Markov de primeira ordem de dois estados a simulação das sequência de dias secos e chuvosos entre as séries observadas e simuladas mantém a mesma características.

Tabela 13 - Parâmetros da cadeia de Markov da série simulada.

Mês	N00	N10	N01	N11	N7	TOTAL	P0	P00	P01	P10	P11
1	927	590	603	980	0	3100	0,4894	0,6059	0,3941	0,3758	0,6242
2	874	450	459	1042	0	2825	0,4687	0,6557	0,3443	0,3016	0,6984
3	1265	521	507	807	0	3100	0,5761	0,7139	0,2861	0,3923	0,6077
4	1625	490	471	414	0	3000	0,7050	0,7753	0,2247	0,5420	0,4580
5	1934	429	417	320	0	3100	0,7623	0,8226	0,1774	0,5728	0,4272
6	1875	392	401	332	0	3000	0,7557	0,8238	0,1762	0,5414	0,4586
7	1888	406	405	401	0	3100	0,7400	0,8234	0,1766	0,5031	0,4969
8	1852	413	418	417	0	3100	0,7306	0,8159	0,1841	0,4976	0,5024
9	1438	427	436	704	0	3005	0,6206	0,7673	0,2327	0,3775	0,6225
10	1363	555	548	634	0	3100	0,6187	0,7132	0,2868	0,4668	0,5332
11	1501	447	454	598	0	3000	0,6493	0,7678	0,2322	0,4278	0,5722
12	1261	587	589	663	0	3100	0,5961	0,6816	0,3184	0,4696	0,5304

Fonte: Autor, 2013.

Figura 18 - Variação sazonal dos parâmetros da cadeia de Markov da série observada (obs.) e simulada (sim.).



Fonte: Autor, 2013.

6.3 SÉRIE DE CHUVA SIMULADA

As estatísticas descritivas referentes à simulação das séries tanto para distribuição exponencial quanto para distribuição gama encontram-se na Tabela 14 e Tabela 15. Verifica-se que para o mês de janeiro obteve-se o menor valor percentual com 48,94 % de probabilidade de ocorrência de dias secos e para o mês de maio a maior probabilidade de dias secos com 76,23% valores estes próximos aos observados conforme apresentado na Tabela 11. Os valores estatísticos referentes a distribuição exponencial e gama estão muito próximos, demonstrando que ambas as distribuições podem ser empregadas na simulação dos valores de chuva. Considerando que a série de chuva simulada com a distribuição gama apresentou valores extremos mais próximos da série observada, está foi usada na geração dos valores de vazão afluentes.

Conforme relato de Almeida (1995), a distribuição gama se mostra adequada para expor a distribuição das quantidades de precipitação sob as mais variadas condições climáticas, já Coe e Stern (1982) modelaram as precipitações diárias utilizando distribuição gama admitindo variações de parâmetro de escala, durante o ano e parâmetro de forma constante, obtendo efeitos aceitáveis para localidades do estudo como: Nigéria, Botswana, Sri Lanka e Jordânia.

Tabela 14 - Estatísticas descritivas da série simulada com distribuição Exponencial.

Mês	Probabilidade	Média	Desvio	Variância	Assimetria	Curtose	Maior	Menor	N	Nfalhas
1	0,4894	17,92	17,81	317,05	1,88	7,11	105,4	1	3100	0
2	0,4687	16,74	16,11	259,58	1,90	7,83	118	1	2825	0
3	0,5761	15,99	15,36	236,03	1,71	6,83	107,1	1	3100	0
4	0,705	12,17	12,73	162,05	2,08	8,52	88,2	1	3000	0
5	0,7623	18,2	17,67	312,23	1,63	5,74	99,3	1	3100	0
6	0,7557	11,12	10,55	111,27	1,85	7,37	70,4	1	3000	0
7	0,74	12,81	12,41	153,97	1,81	6,90	74,4	1	3100	0
8	0,7306	12,63	12,47	155,53	2,16	9,81	95,1	1	3100	0
9	0,6217	15,76	16,42	269,45	2,50	13,80	165,1	1	3000	0
10	0,6187	14,74	15,48	239,58	2,79	16,04	145	1	3100	0
11	0,6493	18,17	18,63	347,02	2,30	11,50	150,5	1	3000	0
12	0,5961	15,6	15,43	238,17	2,08	8,92	110,3	1	3100	0

Fonte: Autor, 2013.

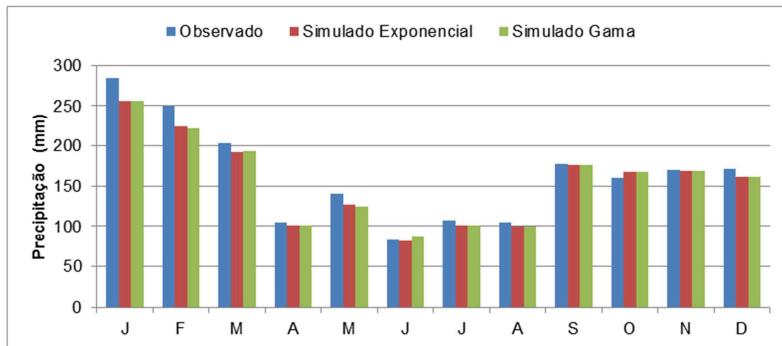
Tabela 15 - Estatísticas descritivas da série simulada com a distribuição Gama.

Mês	Probabilidade	Média	Desvio	Variância	Assimetria	Curtose	Maior	Menor	N	Nfalhas
1	0,4894	17,85	24,09	580,20	2,47	10,05	152,4	1	3100	0
2	0,4687	16,72	19,20	368,72	2,26	9,75	148,1	1	2825	0
3	0,5761	16,01	17,92	321,06	2,03	8,45	131,5	1	3100	0
4	0,7050	12,24	14,23	202,49	2,29	9,67	101,3	1	3000	0
5	0,7623	18,31	22,05	486,36	2,01	7,31	129,8	1	3100	0
6	0,7557	11,12	10,21	104,27	1,79	7,09	67,6	1	3000	0
7	0,7400	12,82	12,11	146,69	1,77	6,71	72,3	1	3100	0
8	0,7306	12,57	14,90	222,08	2,58	12,50	119,9	1	3100	0
9	0,6217	15,74	19,74	389,79	3,03	18,47	213,8	1	3000	0
10	0,6187	14,73	17,13	293,41	3,08	18,52	165,6	1	3100	0
11	0,6493	18,18	19,41	376,83	2,40	12,18	158,8	1	3000	0
12	0,5961	15,64	18,51	342,66	2,47	11,20	138,9	1	3100	0

Fonte: Autor, 2013.

Os valores das quantidades de precipitações totais mensais de precipitação observadas foram analisados com a distribuição exponencial e gama chamando neste trabalho de série simulada, e conforme a Figura 19 verifica-se que ocorre uma pequena variação entre os valores porem de valor insignificante para os estudos realizados, demonstrando bom comportamento das séries. Verifica-se também a distribuição das precipitações através da sazonalidade e com maior ocorrência das precipitações nos meses de janeiro a março.

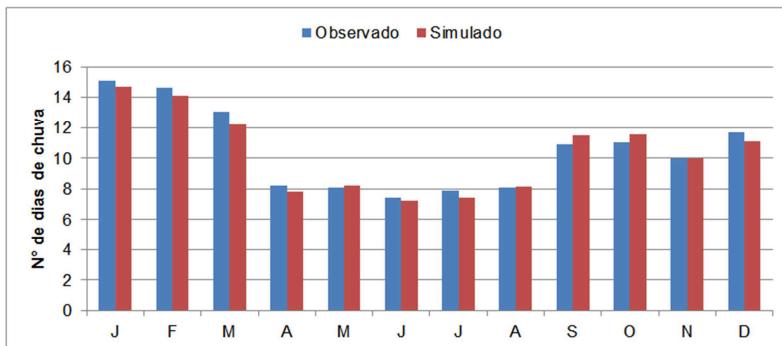
Figura 19- Totais mensais de precipitação da série observada e simuladas com a distribuição exponencial e distribuição gama.



Fonte: Autor, 2013.

O mesmo comportamento descrito anteriormente para os totais mensais referente à comparação entre os dados com os valores simulados e observados que ocorrem para os dias de chuva mensal demonstrando na Figura 20 verificando-se que os meses de abril a agosto possuem valores próximos a 8 dias de chuva no mês, valores estes inferiores aos meses subsequentes.

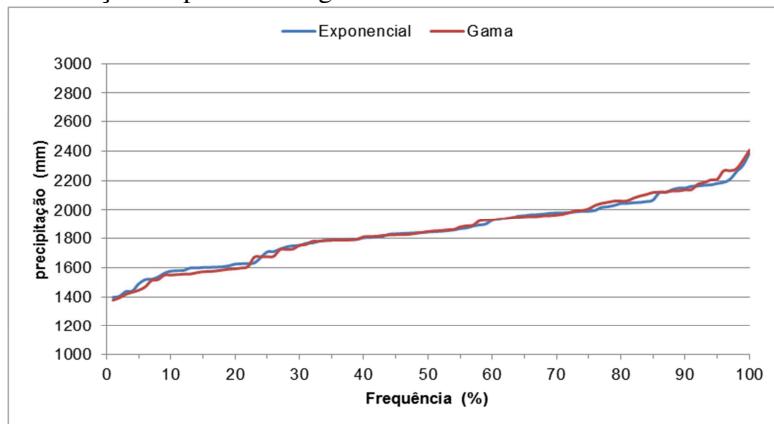
Figura 20 - Dias de chuva mensal da série observada e simuladas com a cadeia de Markov.



Fonte: Autor, 2013.

Através da Figura 21 constata-se graficamente que após a simulação para os cem anos às distribuições exponencial e gama possuem valores muito próximos.

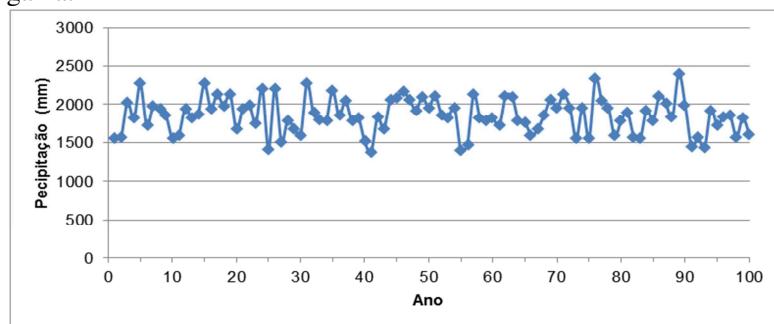
Figura 21 - Frequência de precipitação total anual simuladas com as distribuições exponencial e gama.



Fonte: Autor, 2013.

Dentro dos parâmetros de extração em cem anos no qual é objeto de estudo do trabalho os valores da Figura 22 mantiveram-se dentro dos padrões observados sendo que a máxima precipitação observada foi de 2668,4 mm e a simulada de 2405,6 mm já para a mínima observada foi de 1307,0 mm e simulado 1377,5 mm.

Figura 22 - Precipitação total anual da série simulada com a distribuição gama.



Fonte: Autor, 2013.

6.4 AJUSTE DO MODELO CHUVA-VAZÃO

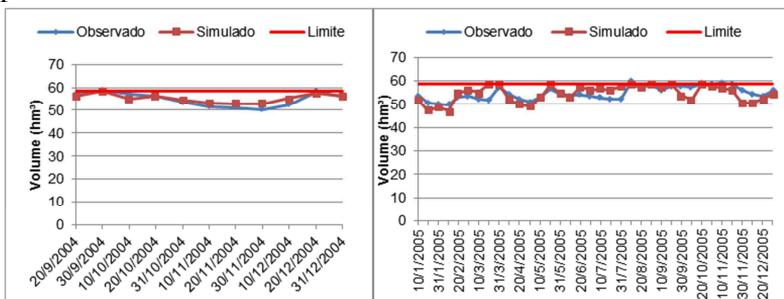
Para o ajuste do modelo de chuva vazão ser aplicado na simulação das vazões afluentes foi necessário encontrar o coeficiente *runoff* da bacia de estudo. Este ajuste foi realizado dividindo a vazão afluente pela precipitação registrada na estação meteorológica da barragem do rio São Bento. Obteve-se um coeficiente C médio de 0,76. Nas Figura 23 a Figura 27 encontram-se os resultados do volume observado e do volume simulado com o modelo ajustado.

Observa-se que de forma geral o volume simulado apresenta valores próximos com o volume observado. As diferenças observadas se devem em parte a variação na precipitação na bacia, uma vez que somente se tem a observação de um pluviômetro localizado na barragem.

Encontrou-se um resultado satisfatório através da análise dos volumes simulados com coeficiente de escoamento ajustado. Verifica-se pequena variação entre os volumes observados e simulados que pode ser devido a precipitação ocorrer de forma heterogênea na bacia e também pelo fato da observação pluviométrica somente é realizada na estação a jusante barragem.

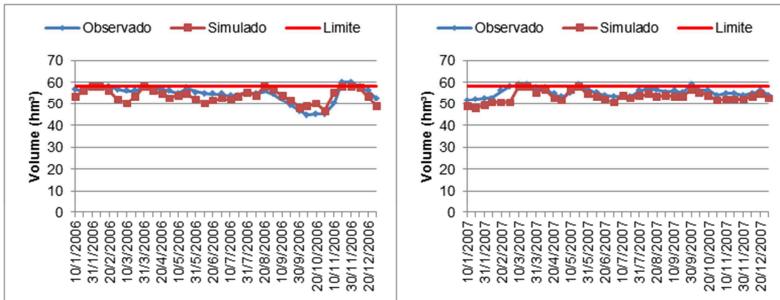
A seguir são apresentados os estudos de variação do reservatório com representação de seu máximo limite de volume onde ocorre o vertimento do volume excedido do reservatório através do vertedouro soleira livre descrito anteriormente.

Figura 23–Variação do volume do reservatório observado e simulado no período de 2004 a 2005.



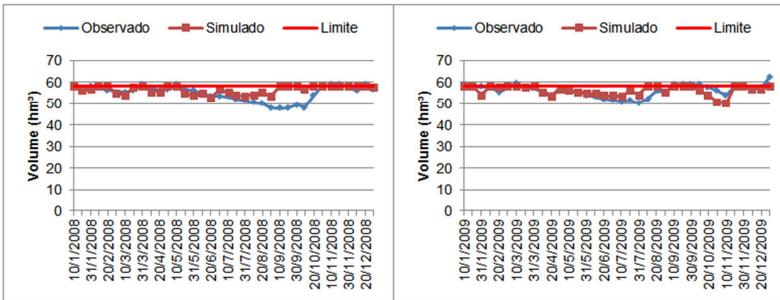
Fonte: Autor, 2013.

Figura 24 - Variação do volume do reservatório observado e simulado no período de 2006 a 2007.



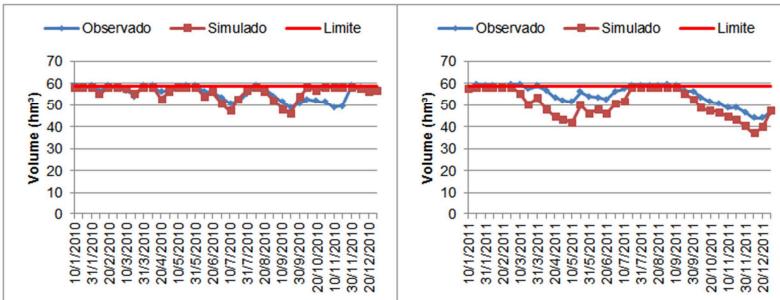
Fonte: Autor, 2013.

Figura 25 - Variação do volume do reservatório observado e simulado no período de 2008 a 2009.



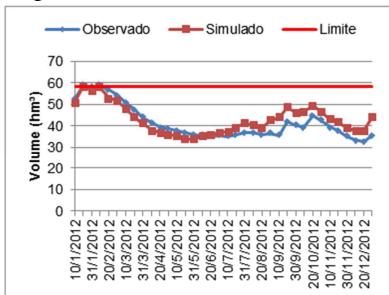
Fonte: Autor, 2013.

Figura 26 - Variação do volume do reservatório observado e simulado no período de 2010 a 2011.



Fonte: Autor, 2013.

Figura 27 - Variação do volume do reservatório observado e simulado no período de 2012.



Fonte: Autor, 2013.

O valor encontrado de $C = 0,76$ é considerado alto. Segundo Collischonn e Dornelles (2013) o coeficiente de escoamento para maioria das bacias hidrográficas brasileiras varia de 0,1 a 0,5. O valor mais alto encontrado neste estudo pode ser explicado por alguns fatores. O primeiro fator é a área da bacia, que é muito pequena em relação às bacias citadas pelo autores. Em pequenas bacias o coeficiente de escoamento tende a ser maior. Um segundo fator é a geomorfologia da bacia da barragem do rio São Bento, caracterizada pela alta declividade, solos rasos sobre rochas, que favorecem o escoamento superficial e a maiores valores de coeficiente C . Um terceiro e importante fator é o efeito orográfico sobre a precipitação. Existem vários trabalhos que mostram que nas cabeceiras dos rios e na encosta da serra a precipitação pluviométrica é significativamente superior a precipitação registrada a jusante, Uggioni (2005) e Maurici (2001) também relatam este fenômeno em que ocorre um aumento no volume da precipitação pluviométrica próximo as encostas em relação à planície litorânea.

Como o pluviômetro da barragem do rio São Bento e da estação Serrinha estão a jusante, os valores de precipitação que ocorrem na bacia tendem a ser superiores à precipitação registradas nestas estações, e por consequência obtém-se um maior valor do coeficiente C .

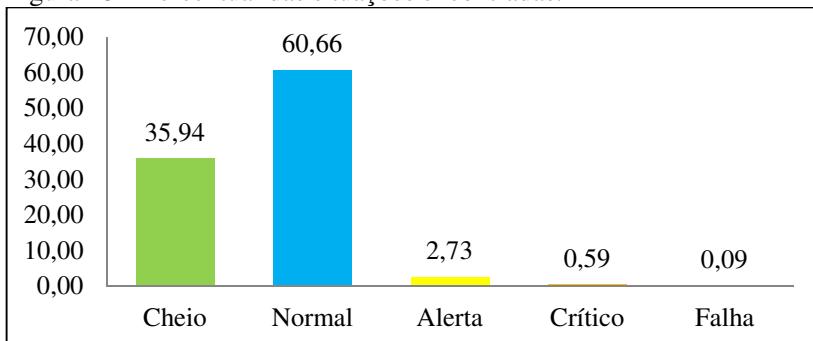
No estudo de Regionalização Hidrológica de Santa Catarina (Santa Catarina, 2006) os valores de coeficiente de escoamento C das bacias hidrográficas dos principais cursos d'água de Santa Catarina, variaram de 0,25 a 0,81. Para as bacias hidrográficas com formação geológica e clima semelhantes a bacia de contribuição da barragem do rio São Bento no estudo de Regionalização Hidrológica são citados valores de $C = 0,80$ (Rio Manoel Alves com área de 338 km²), $C = 0,79$

(rio Amola Faca com área de 303 km²), C = 0,81 (Rio Itoupava com área de 817 km²), C = 0,70 (Rio Mãe Luzia com área de 520 km²). Estes valores mostram que o parâmetro C ajustado está coerente com as características hidrológicas da área em estudo.

Conforme TUCCI (1993), para gerenciamento operacional de reservatórios e compilação de previsões de manejo o conhecimento do balanço hídrico possui importância na previsão de efeitos de modificações de reservatórios e que estas informações atualizadas sobre o balanço hídrico a respeito da bacia em intervalos breves de tempo (mês, semana e dia) são de grande valia.

Na Figura 28 consta o resumo das frequências percentuais de ocorrência dos volumes do reservatório nas diferentes condições, para os 240 cenários. Verifica-se que 35,94 % dos decêndios o reservatório está na situação Cheio, e 60,66% em nível Normal, e somente 3,41% dos decêndios a condição era de Alerta ou Crítica ou de Falha. Esses resultados mostram que de forma geral, a barragem do rio São Bento pode atender as demandas com risco de falhas de atendimento muito baixo.

Figura 28 – Percentual das situações encontradas.

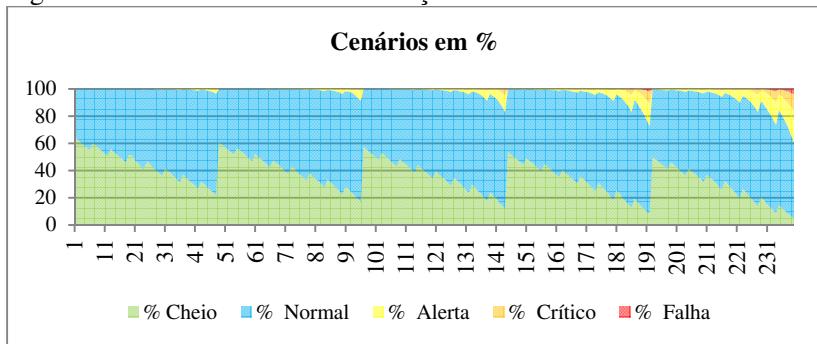


Fonte: Autor, 2013.

Na Figura 29 estão representadas as frequências das condições do reservatório para cada cenário. Verifica-se que para os cenários 1 a 40 somente ocorrem as situações “Cheio”, “Normal” e “Alerta” sendo que para este último de pouca expressão no gráfico. Nestes cenários estão incluídos as demandas para área de irrigação atual dos 6000 ha de rizicultura e abastecimento da população de 900000 habitantes, prevista para ser atingida aproximadamente no ano de 2037. Esses dados demonstram que se houver boa gestão dos recursos hídricos pode-se

atender as demandas previstas sem colocar em risco o abastecimento humano.

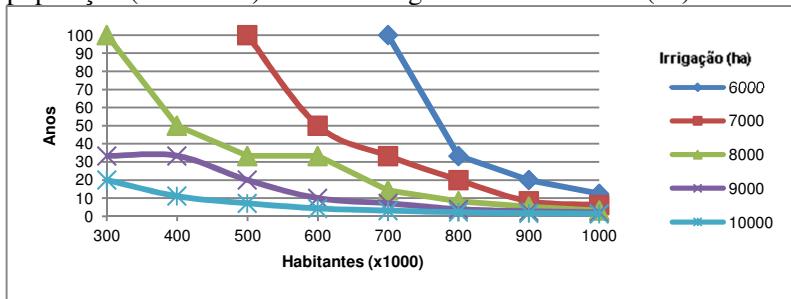
Figura 29 - Demonstrativo das condições do reservatório.



Fonte: Autor, 2013.

Na Figura 30 estão indicados os períodos de retorno para a condição Alerta em função da demanda para abastecimento da população (habitantes) e da área irrigada com rizicultura (ha). Observa-se que para a área irrigada de 6000 ha, a condição de Alerta somente irá ocorrer para a população acima de 700 mil habitantes. Para a população de 800 mil habitantes o período de retorno será de 33 anos, isto é, a condição de Alerta irá ocorrer em média uma vez a cada 33 anos. De forma semelhante, considerando a área irrigada de 7000 ha, a condição de Alerta irá ocorrer para população acima de 500 mil habitantes com período de retorno de 50 anos, enquanto que para áreas irrigadas de 8000 ha ou mais a condição de alerta irá ocorrer para população de 300 mil habitantes. Considerando que é fundamental preservar o abastecimento humano e a vazão ecológica, e que dos usos da água a irrigação é a de menor prioridade, esta condição de Alerta nos parece um bom critério para gerenciar a distribuição de água. Até esta condição pode-se atender todas as demandas, a partir deste ponto suspender ou reduzir o volume destinado a irrigação preservando os demais usos.

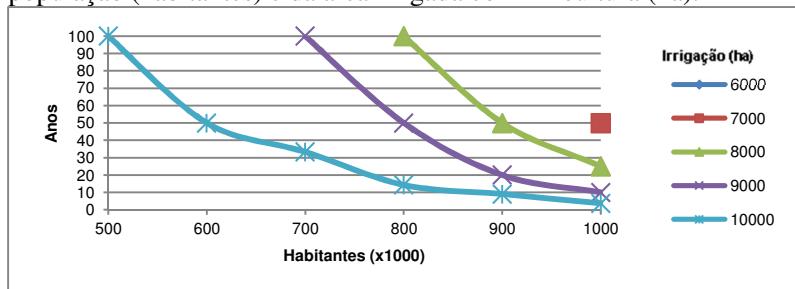
Figura 30- Período de retorno para a condição de Alerta com vazão ecológica de 100 L.s^{-1} em função da demanda para abastecimento da população (habitantes) e da área irrigada com rizicultura (ha).



Fonte: Autor, 2013.

Na Figura 31 encontram-se representados os períodos de retorno para a condição Crítica em função da demanda para abastecimento da população (habitantes) e da área irrigada com rizicultura (ha). Para área de 6000 ha está condição nunca foi observada, e para área de 7000 ha somente ocorre para a população de um milhão de habitantes, com duas ocorrências na série de 100 anos simulados, indicando assim período de retorno de 50 anos. Para área de 8000 ha a condição Crítica somente ocorre para população superior a 800 mil habitantes. Para a demanda de irrigação de 9000 ha, a condição Crítica é verificada para população acima de 700 mil habitantes enquanto que para a área irrigada de 10000 ha a situação Crítica ocorre para população acima de 500 mil habitantes. Na situação Crítica a critério de gerenciamento da barragem deveria suspender a irrigação de forma a preservar a água para o abastecimento humano.

Figura 31 - Período de retorno para a condição de Crítica com vazão ecológica de 100 L.s⁻¹ em função da demanda para abastecimento da população (habitantes) e da área irrigada com rizicultura (ha).



Fonte: Autor, 2013.

A Condição de Falha do reservatório considerando a vazão ecológica de 100 L.s⁻¹, somente foi observada no cenário com a demanda extrema para abastecimento da população de 1.000.000 de habitantes e irrigação de 10000 ha. Na série simulada com 100 anos esta condição de Falha ocorreu 6 vezes, indicando período de retorno de 16,67 anos. A Falha no reservatório indica que o volume armazenado não foi suficiente para atender toda a demanda prevista e é a condição que se quer evitar.

Esses resultados obtidos confirmam que o reservatório da barragem do rio São Bento tem potencial para atender a demanda atual e futura de água para a população bem como para a irrigação das áreas agrícolas. Nestas simulações foram criados cenários considerando a demanda atual e projetada e também cenários mais extremos para avaliar a capacidade de abastecimento da barragem do rio São Bento. Mesmo nos cenários mais críticos o risco de falha é relativamente baixo.

Os usos vazão ecológica e irrigação na prática podem ser considerados juntos por que o Gestor da barragem não tem controle sobre a captação da água para irrigação, e não há fiscalização para manter a demanda ecológica ao longo do percurso do rio São Bento. Considerando um consumo médio de 0,5 L.s⁻¹.ha⁻¹ (Rosso, 2007; Just, 2010), para irrigação verifica-se que a vazão ecológica de 100 L.s⁻¹ equivale somente a área irrigada de 200 ha.

Dos usos da água, sem dúvida a irrigação é a mais significativa em termos de volume, ocorre concentrada na primavera e verão, e tem menor prioridade. Também é importante considerar que, embora a irrigação tenha importância econômica na região, a ocorrência de falha no atendimento não tem consequências tão drásticas como os demais

usos. Assim, um período de retorno de falha de 10 anos na irrigação é perfeitamente aceitável, pois a falha no atendimento a irrigação não significa perda da colheita. A cultura do arroz pode suportar pequenos períodos de déficit hídrico sem grandes prejuízos na produção (Back e Crispim, 2003a, 2003b). Assim do ponto de vista dos rizicultores é preferível atender uma área maior durante a maior parte do tempo, mesmo que com maior risco de falhas do que atender pequena área sem risco de falhas. No caso do abastecimento, a falha significa que por algum período do ano a população não foi toda atendida na sua demanda e isso acarreta problemas a um grande número de pessoas, com desgaste ao Gestor, e por isso deve-se adotar risco mínimo (maior período de retorno). Devido a estes fatores a gestão dos usos da água poderá adotar critérios diferenciados para a irrigação. Uma forma de considerar este critério diferenciado seria considerar a demanda total da irrigação quando a situação for Normal, reduzir em 50 % a demanda quando a situação for de Alerta e excluir a irrigação das demandas sempre que o reservatório estiver na situação Crítica.

É importante ressaltar que somente foi analisada a condição do volume de água, sem levar em consideração a qualidade da água. Sabe-se que quando o reservatório se encontra em níveis mais baixos a qualidade da água diminui, fato que pode aumentar os custos do sistema de tratamento da água.

Também é importante ressaltar que as situações Normal, Alerta, Crítico foram estabelecidas arbitrariamente, e podem ser revistas pelo Gestor da barragem. Neste estudo foi realizada uma proposta para auxiliar nos critérios de gestão da barragem, e que pode ou deve ser aperfeiçoadas com a prática.

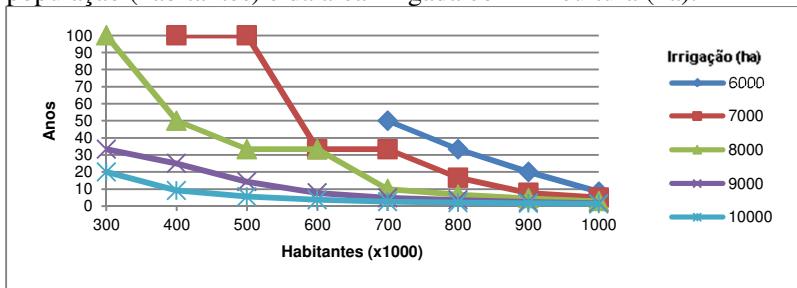
O modelo de simulação adotado considerou os usos de abastecimento, irrigação e vazão ecológica. Pode-se incluir outros usos como o Amortecimento de cheias, criando um volume de espera para eventos extremos de precipitação. Neste caso o nível ou volume máximo seria mantido o mesmo, mas logo após ser atingido deveria ser rebaixado até o volume de espera adotado.

Para a condição de Alerta, Crítico e Falha do reservatório das Figura 32 a Figura 46 decorrentes das situações de vazão ecologia com 200, 300, 400, 500 e 600 L.s⁻¹, verificou-se como já esperado uma diminuição gradual dos períodos de retorno com valores mínimos para os mesmos no casos extremos. O Período de retorno da condição de Falha de abastecimento do reservatório é de 50 anos para demanda de 900000 habitantes com 10000 ha de área irrigada com vazão ecológica de 200 L.s⁻¹ (Figura 34), reduzindo para período de retorno de 25 anos

correspondente ao abastecimento de 900000 habitantes com 10000 ha de irrigação e vazão ecológica de 300 L.s^{-1} (Figura 37). Aumentando a vazão ecológica para 400 L.s^{-1} o período de retorno da Falha cai para 12,5 anos (Figura 40).

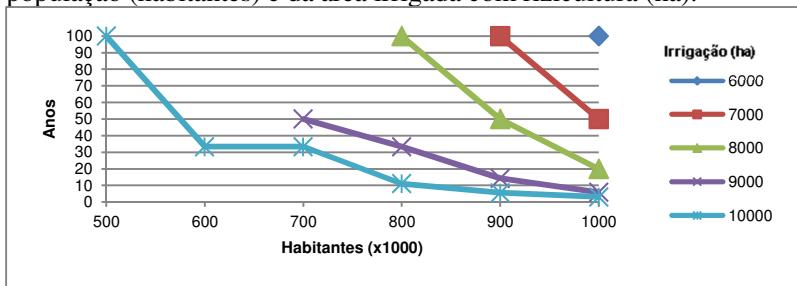
O período de retorno no caso de Falha no atendimento das demandas ocorre de forma expressiva para o atendimento de 800.000 habitantes com 10000 ha de área de irrigação com valor de 33,33 anos (Figura 43). No cenário mais crítico dentre os cenários estabelecidos neste estudo o período de retorno foi de 12,5 anos, sendo considerado de valor significativo e inaceitável para o abastecimento humano. No entanto ressalta-se que este cenário foi criado com o objetivo de verificar o funcionamento do reservatório em condição de demanda extrema.

Figura 32 - Período de retorno para a condição de Alerta com vazão ecológica de 200 L.s^{-1} em função da demanda para abastecimento da população (habitantes) e da área irrigada com rizicultura (ha).



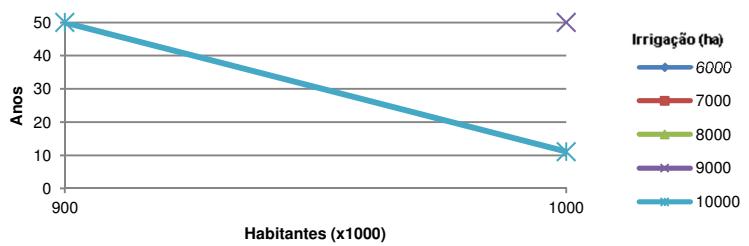
Fonte: Autor, 2013.

Figura 33 - Período de retorno para a condição de Crítica com vazão ecológica de 200 L.s^{-1} em função da demanda para abastecimento da população (habitantes) e da área irrigada com rizicultura (ha).



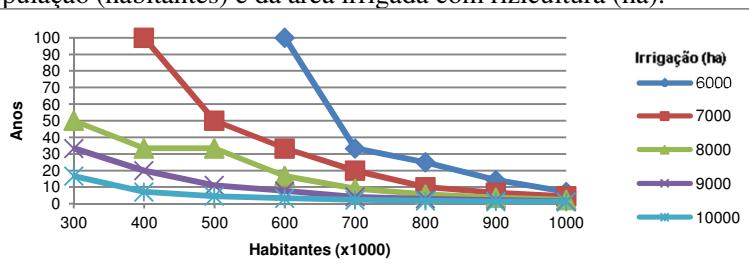
Fonte: Autor, 2013.

Figura 34 - Período de retorno para a condição de Falha com vazão ecológica de 200 L.s⁻¹ em função da demanda para abastecimento da população (habitantes) e da área irrigada com rizicultura (ha).



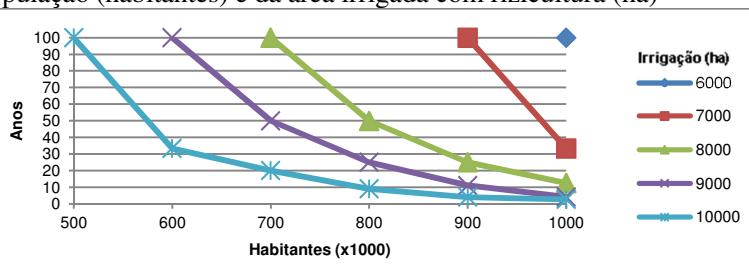
Fonte: Autor, 2013.

Figura 35 - Período de retorno para a condição de Alerta com vazão ecológica de 300 L.s⁻¹ em função da demanda para abastecimento da população (habitantes) e da área irrigada com rizicultura (ha).



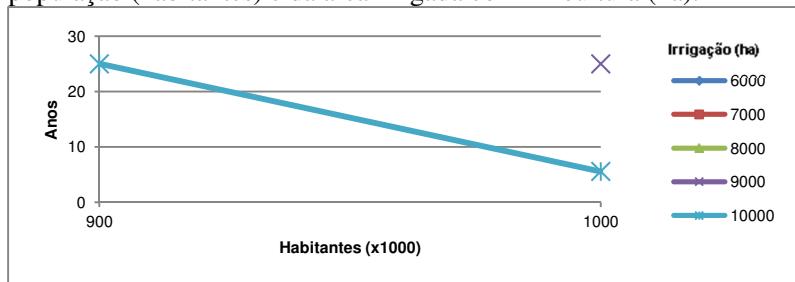
Fonte: Autor, 2013.

Figura 36 - Período de retorno para a condição de Crítica com vazão ecológica de 300 L.s⁻¹ em função da demanda para abastecimento da população (habitantes) e da área irrigada com rizicultura (ha).



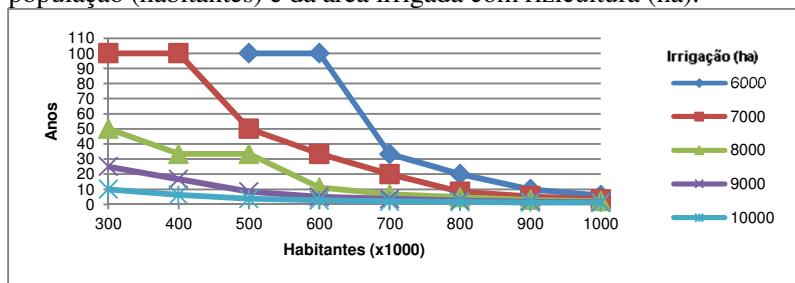
Fonte: Autor, 2013.

Figura 37 - Período de retorno para a condição de Falha com vazão ecológica de 300 L.s^{-1} em função da demanda para abastecimento da população (habitantes) e da área irrigada com rizicultura (ha).



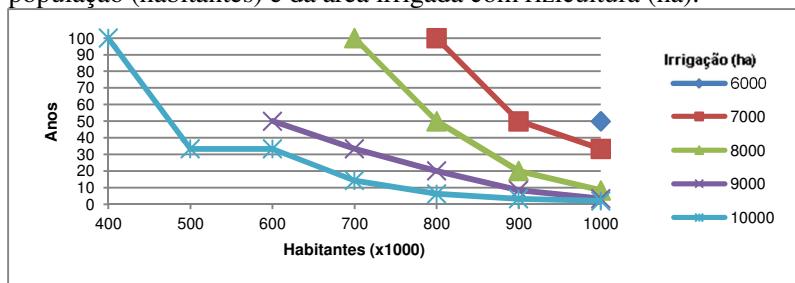
Fonte: Autor, 2013.

Figura 38 - Período de retorno para a condição de Alerta com vazão ecológica de 400 L.s^{-1} em função da demanda para abastecimento da população (habitantes) e da área irrigada com rizicultura (ha).



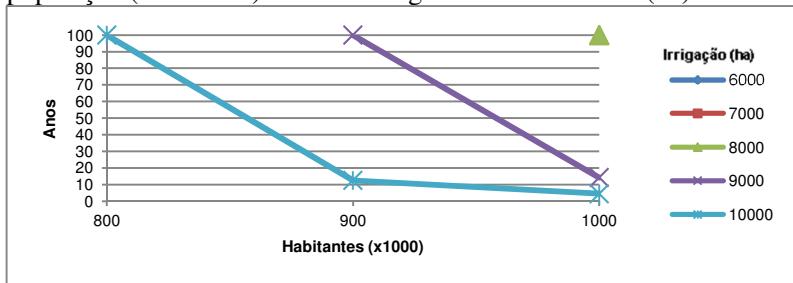
Fonte: Autor, 2013.

Figura 39 - Período de retorno para a condição de Crítica com vazão ecológica de 400 L.s^{-1} em função da demanda para abastecimento da população (habitantes) e da área irrigada com rizicultura (ha).



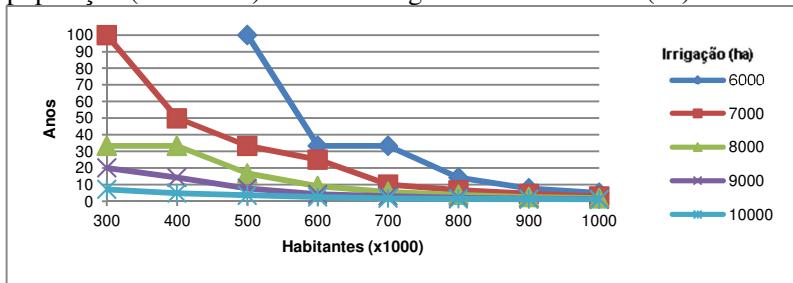
Fonte: Autor, 2013.

Figura 40 - Período de retorno para a condição de Falha com vazão ecológica de 400 L.s^{-1} em função da demanda para abastecimento da população (habitantes) e da área irrigada com rizicultura (ha).



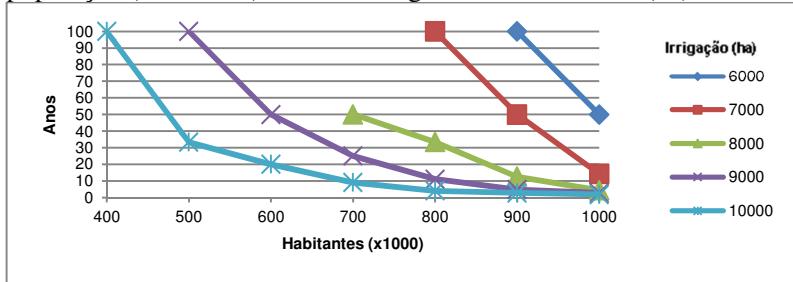
Fonte: Autor, 2013.

Figura 41 - Período de retorno para a condição de Alerta com vazão ecológica de 500 L.s^{-1} em função da demanda para abastecimento da população (habitantes) e da área irrigada com rizicultura (ha).



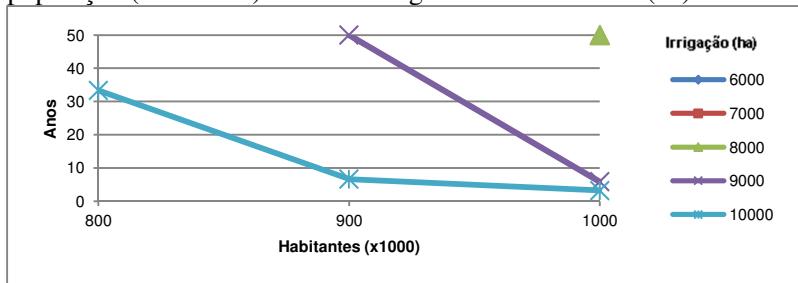
Fonte: Autor, 2013.

Figura 42 - Período de retorno para a condição de Crítica com vazão ecológica de 500 L.s^{-1} em função da demanda para abastecimento da população (habitantes) e da área irrigada com rizicultura (ha).



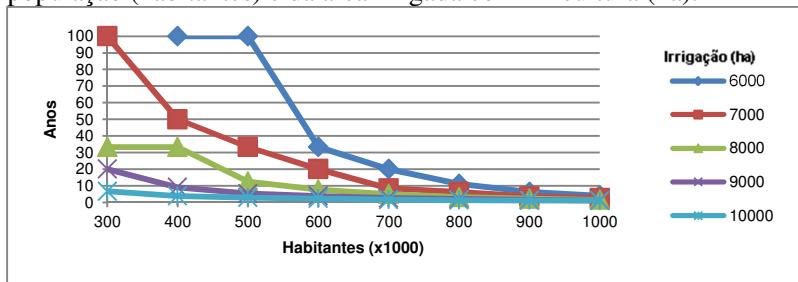
Fonte: Autor, 2013.

Figura 43 - Período de retorno para a condição de Falha com vazão ecológica de 500 L.s^{-1} em função da demanda para abastecimento da população (habitantes) e da área irrigada com rizicultura (ha).



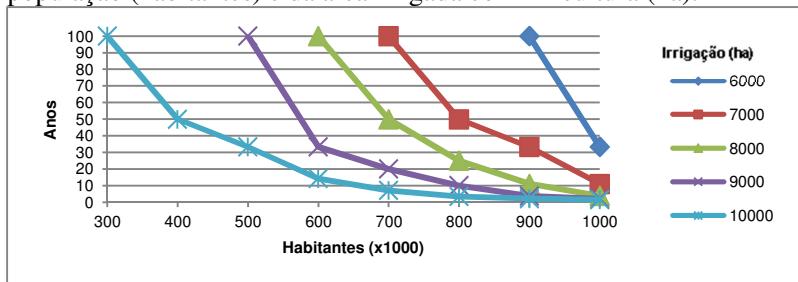
Fonte: Autor, 2013.

Figura 44 - Período de retorno para a condição de Alerta com vazão ecológica de 600 L.s^{-1} em função da demanda para abastecimento da população (habitantes) e da área irrigada com rizicultura (ha).



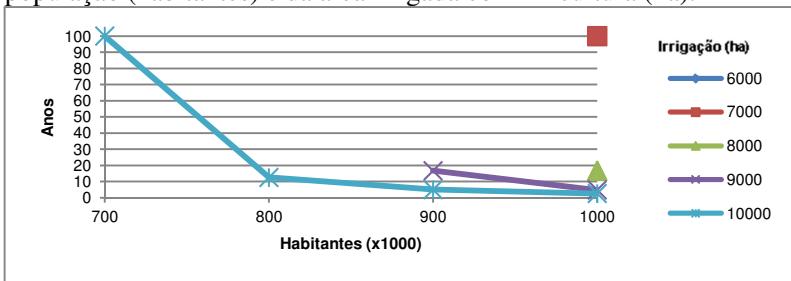
Fonte: Autor, 2013.

Figura 45 - Período de retorno para a condição de Crítica com vazão ecológica de 600 L.s^{-1} em função da demanda para abastecimento da população (habitantes) e da área irrigada com rizicultura (ha).



Fonte: Autor, 2013.

Figura 46 - Período de retorno para a condição de Falha com vazão ecológica de 600 L.s^{-1} em função da demanda para abastecimento da população (habitantes) e da área irrigada com rizicultura (ha).



Fonte: Autor, 2013.

7 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos da análise dos dados hidrológicos e do controle hidráulico da barragem bem como no estudo de simulações realizadas com diferentes cenários usados neste estudo pode-se obter as seguintes conclusões:

- 1) A modelagem matemática da precipitação por meio da cadeia de Markov de primeira ordem com dois estados simulou as sequências de dias secos e chuvosos de acordo com a série observada;
- 2) As séries de dados de precipitação simulada com distribuição exponencial e distribuição gama apresentaram as estatísticas semelhantes a série observada e podem ser usadas para obtenção de longas séries de precipitação;
- 3) O modelo para geração de série de vazões adotado embora muito simplificado permitiu simular vazões afluentes semelhantes com as vazões obtidas do controle hidráulico da barragem;
- 4) O valor coeficiente de escoamento (C) obtido pelo vazão aflente do controle hidráulico e da precipitação registrada da estação meteorológica da barragem foi de 0,76.
- 5) A simulação hidrológica é uma ferramenta importante para auxiliar no planejamento e gestão dos recursos hídricos, permitindo avaliar os riscos de falhas no atendimento das demandas sob diferentes cenários;
- 6) Nas condições de demanda atual da barragem do rio São Bento a simulação mostrou que o nível do reservatório sempre permanece dentro da situação Normal, com mais de 50% do volume armazenado;
- 7) Nas simulações realizadas a situação de falha somente ocorreu em demandas extremas, com irrigação acima de 7000 hectares e consumo para população acima de 700 mil habitantes;
- 8) O reservatório da barragem do rio São Bento mostrou que existe a possibilidade de atender demandas superiores as atuais, e que a adoção de critérios de operação diferenciados podem determinar o melhor uso dos recursos hídricos;
- 9) Um critério proposto para uso da água pode considerar atender a irrigação em toda a demanda até a situação Normal (acima de 50%) do volume. Reduzindo a demanda da irrigação pela metade quando está no estado de Alerta (de 25 a 50 % do volume) e por fim cancelar a demanda pela irrigação sempre que a situação entre na faixa Crítica (menos de 25 % do volume).

8 RECOMENDAÇÕES

Com base nas observações realizadas neste trabalho, são deixadas as seguintes recomendações:

1) Recomenda-se que o monitoramento hidrológico conteemple a colocação de vários pluviômetros distribuídos na bacia de contribuição de forma a obter a precipitação média na bacia bem como avaliar o efeito da orografia na precipitação. Como a região é de difícil acesso esses pluviômetros devem ser do tipo automático ou eletrônicos, permitindo o armazenamento dos dados diários;

2) O conhecimento da vazão afluente é de grande importância para a modelagem matemática e por isso deve ser determinada com maior precisão. Com este objetivo recomenda-se que seja feito uma estrutura para estabilizar as margens e o leito dos rios Serrinha e São Bento com intuito de instalar uma estação fluviométrica automática;

3) Com dados de precipitação e vazão afluente determinados com maior precisão recomenda-se aplicar outros modelos de chuva vazão ou reavaliar o coeficiente de escoamento e atualizar os estudos de simulação;

4) Discutir com os diversos usuários da água os critérios de operação e cenários viáveis em um horizonte de 5 anos, propondo e reavaliando os critérios de operação da barragem;

5) Embora os resultados obtidos mostrem que a barragem do rio São Bento tem potencial para atender a demanda da população urbana muito superior a atual, deve haver uma discussão a nível regional para identificar alternativas de abastecimento e preservar suas nascentes bem como a área de contribuição para futuros empreendimentos de reservarão de água.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Inventário das estações pluviométricas. Brasília: ANA – SGH, 2009. 332 p.
- ALMEIDA, R. M. B. de. **Características climatológicas do regime de chuva em Minas Gerais.** 1995. 64 f. Tese (Doutorado) - Curso de Meteorologia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 1995. Disponível em: <<http://www.dominiopublico.gov.br/download/texto/cp150988.pdf>>. Acesso em: 30 dez. 2013.
- ARNDT, M. A. **Uso e Ocupação do Solo e escoamento superficial na Bacia Hidrográfica do Rio Cascavel.** 2009. 35 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2009. Disponível em: <http://tede.unioeste.br/tede/tde_arquivos/1/TDE-2010-01-20T122507Z-390/Publico/Marcos%20Alexandre%20Arndt.pdf>. Acesso em: 23 out. 2012.
- BACK, Á. J., CRISPIM, J.E. **Efeito da estiagem na produção do arroz irrigado** In: III Congresso Brasileiro de Arroz Irrigado, 2003, Balneário Camboriú. III Congresso Brasileiro de Arroz Irrigado - XXV Reunião da cultura do Arroz Irrigado. Epagri, 2003. p.152 – 154
- _____. **Efeito da Estiagem nos componentes de produção do Arroz Irrigado** In: III Congresso Brasileiro de Arroz Irrigado, 2003, Balneário Camboriú. II Congresso Brasileiro de Arroz Irrigado - XXV Reunião da Cultura do Arroz Irrigado. Epagri, 2003. p.137 - 139
- BACK, Á.J. **Seleção de distribuição de probabilidade para chuvas diárias extremas do Estado de Santa Catarina.** Revista Brasileira de Meteorologia, v.16, p.211-222, 2001.
- _____. **Análise Morfométrica da Bacia do Rio Urussanga-SC.** Revista Brasileira de Geomorfologia. Criciúma, Ano 7, n. 2. p.107-115, 2006.
- BACK, A. J. ;UGGIONI, E.; VIEIRA, H. J. **Modelagem da precipitação de curta duração por meio do modelo de pulsos**

retangulares de bartlett-lewis modificado. Revista Brasileira de Meteorologia, Criciúma, v. 26, n. 3, p.461-472, mar. 2011.

BARROS, J. G. C. Origem, distribuição e preservação da água no planeta terra. Gtágua A Revista Das Águas, Online, v. 6, n. 11, p.1-3, 01 Fev. 2011. Disponível em: <revistadasaguas.pgr.mpf.gov.br/edicoes-da-revista/edicao-atual/materias/origem-distribuicao-e-preservacao-da-agua-no-planeta-terra>. Acesso em: 03 dez. 2012.

BORSOI, Z. M. F.; TORRES, S. D. A. A política de recursos hídricos no brasil. Revista do BNDES, Rio de Janeiro, v. 4, n. 8, dez. 1997, p. 143-166.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal. **Política Nacional de Recursos Hídricos.** Lei no 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Brasília, 1997

BRAVO, J. M. Otimização da operação de um reservatório para controle de cheias com base na previsão de vazão. 2006. 136f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental). Universidade Federal do Rio Grande do Sul/UFGRS - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Porto Alegre 2006.

CAPUTO, H. P. Mecânica dos solos e suas aplicações. Vol. 2. 6^a Ed.. Rio de Janeiro, 1996.

CARRERA-FERNANDEZ, J.; GARRIDO, R.J. Economia dos recursos hídricos. Salvador: EDUFBA, 2002. 457 p. ISBN 8523202617.

CASAN (Magna)- Companhia Catarinense de Águas e Saneamento. Projeto executivo da barragem do rio São Bento e obras complementares – Siderópolis/SC – relatório de revisão e adequação.

CASAN (MOR) - Companhia Catarinense de Águas e Saneamento. Manual de operação do reservatório: Barragem do rio São Bento. Santa Catarina, 2003, Relatório Técnico.

_____. **Programa de gerenciamento de risco da barragem São Bento.** Santa Catarina, 2004. Relatório Técnico.

dos estudos básicos – Volume 1: Memorial Descritivo. Siderópolis, 1993, 92 p.

CASAN (OAS) - Companhia Catarinense de Águas e Saneamento. **Projeto Executivo** – Volume 1 – Memorial Descritivo. Siderópolis, SC, 2001, 110 p.

CHRISTOFOLLETTI, A. **Modelagem de Sistemas Ambientais**. São Paulo: UNESP. Edgard Blucher, 1^a edição, 1999. 236 p.

CNRH – Conselho Nacional de Recursos Hídricos. **Conjunto de normas legais:** recursos hídricos: Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Recursos Hídricos e Ambiente Urbano. – 7. ed. – Brasília: MMA, 2011. 640 p.

CNUMAD. **CONFERENCIA DAS NAÇÕES UNIDAS SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO** Agenda 21 – capítulo 18. Rio de Janeiro, CNUMAD, 1992. Disponível em: <www.mma.gov.br/responsabilidade-socioambiental/agenda-21/agenda-21-global/item/670>. Acesso em: 09 agosto 2012.

COE, R.; STERN, R.D. **Fitting models to daily rainfall data**. Journal of Applied Meteorology, 21:1024-31, 1982. Disponível em: <[http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0450\(1982\)0212.0.CO;2](http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0450(1982)0212.0.CO;2)>. Acesso em: 30 dez. 2013

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia para engenharia e ciências ambientais**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), 2013. 336p.

COSTA, P. R. **Processos hidrológicos aplicados ao controle hidráulico-operacional de reservatórios de acumulação de água: o caso da barragem do rio São Bento – SC**. 2008. 135f. Dissertação (Mestrado) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Criciúma.

COSTA, A. F. S. et al. Recursos hídricos. **Caderno de Graduação - Ciências Exatas e Tecnológicas**, [S.I.], v. 1, n. 1, p. 67-73, out. 2012. ISSN 2316-3135. Disponível em: <<https://periodicos.set.edu.br/index.php/cadernoexatas/article/view/201/126>>. Acesso em: 24 Jan. 2013

CUNHA, L. K. da. **Construção de um Sistema de Análise e Simulação Hidrológica: Aplicação a Bacias Hidrográficas.** 2004. 259f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

DELLA, J P. **ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE BARRAGEM ZONEADA – ESTUDO DE CASO DA BARRAGEM DO RIO SÃO BENTO.** 2011. 102 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2011.

FERNANDES, W. dos S. **Método para a estimação de quantis de enchentes extremas com o emprego conjunto de análise bayesiana, de informações não sistemáticas e de distribuições limitadas superiormente.** 2009. 185 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009. Disponível em: <<https://www.ufmg.br/online/arquivos/anexos/Tese%20%20Wilson.pdf>>. Acesso em: 16 out. 2012.

FREITAS, J. A. et al. **Cultivo do Arroz Irrigado no Brasil: Importância econômica, agrícola e alimentar do arroz.** Brasília, 2004 (Circular técnica, dez. 2004). Disponível em: <www.cpacr.embrapa.br/publicacoes/catalogo/tipo/sistemas/arroz/cap01.htm>. Acesso em: 08 out. 2012.

GABRIEL K. R.; NEUMANN, J. A. **Markov Chain Model for Daily Rainfall Occurrences at Tel Aviv,** Quarterly Journal Royal Meteorological Society, n. 88, p. 90-95, 1962.

GOMES, A. da S. et al. **A água:** Distribuição, regulamentação e uso na agricultura, com ênfase ao arroz irrigado. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2008. 44 p. Disponível em: <ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/45267/1/documento-250.pdf>. Acesso em :03 de out de 2012.

GONTIJO, N. T. **Avaliação das relações de frequência entre precipitações e enchentes raras por meio de séries sintéticas e simulação hidrológica.** 2007. 156 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e

Recursos Hídricos, Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

GROVE, M.; HARBOR, J.; ENGEL, B. **Composite vs. distributed curve numbers: effects on estimations of storm runoff depth.** Journal of the American Water Resources Association, Middleburg, p. 1015-1023. 1 Jan. 1998.

JUST, M. C. **Avaliação quantitativa e qualitativa da água de irrigação em lavouras de arroz: o caso estudo da Associação de Irrigação e Drenagem Santo Isidoro na região Sul de Santa Catarina.** 2010. 143 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais, 2010.

KELLER FILHO, T.; ZULLO JUNIOR, J.; LIMA, P. R. S. I. de R. **Análise da transição entre dias secos e chuvosos por meio da cadeia de Markov de terceira ordem.** Pesq. Agropec. Bras., Brasília, v. 41, n. 9, p.1341-1349, 01 set. 2006. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/%0D/pab/v41n9/a01v41n9.pdf>>. Acesso em: 29 out. 2012.

KITE, G. W. 1977. **Frequency and risk analyses in Hydrology.** Water Resources Publications for Collins, 224p.

KÖPPEN, W. 1948. **Climatología:** com um estúdio de los climas de la tierra. Fundo de Cultura Económica. México. 466p.

LEITE, P. B. C. **Identificação de tipos de culturas agrícolas a partir de seqüências de imagens multitemporais utilizando modelos de markov ocultos.** 2008. 79 f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da Puc-rio, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008. Disponível em: <http://www.maxwell.lambda.ele.puc-rio.br/12960/12960_1.PDF>. Acesso em: 30 out. 12.

LINSLEY Jr., R.K.; KOHLER, M.A.; PAULHUS, J.L.H. **Hydrology for engineers.** New York: McGraw-Hill Book Co., Inc., 1975.

MACHADO, F. W. **Modelagem chuva-vazão mensal utilizando redes neurais artificiais.** 2005. 174 f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Programa de Pós-graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e

Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005. Disponível em: <http://www.ppggerha.ufpr.br/dissertacoes/files/093-Fernando_Weigert_Machado.pdf>. Acesso em: 18 out. 2012.

MAURICI, A. M. Caracterização climática do estado de Santa Catarina: uma abordagem dos principais sistemas atmosféricos que atuam durante o ano. Geosul, Florianópolis, v.16, n.31, p 69-78, jan./jun. 2001. Disponível em: <<https://150.162.1.115/index.php/geosul/article/viewFile/14052/12896>>. Acesso em: 11 jan. 2013.

MING, L. **Sistema computacional para previsões de inundações: aplicação à bacia hidrográfica do rio São Bento - SC** 2007. 223f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária-Ambiental). Universidade Federal de Santa Catarina/UFSC. Florianópolis, 2007.

MOHAMOUD, Y.M.; EWING, L.K.; BOAST, C.W. **Small plot hydrology:** I. Rainfall infiltration and depression storage determination. Transactions of the ASAE, St. Joseph, v.33, n.4, p.1121-1131. 1990.

MOREIRA, I. A. **Modelagem hidrológica chuva-vazão com dados de radar e pluviômetros.** 2005. 96 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Hidrológica, Departamento de Programa de Pós-graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005. Disponível em: <www.ppggerha.ufpr.br/dissertacoes/files/095-Itamar_Adilson_Moreira.pdf>. Acesso em: 09 out. 2012.

National Resources Conservation Service (NRCS). **Estimation of direct runoff from storm rainfall.** In: _____. Hydrology: national engineering handbooks. Washington: USDA, 1997. 79 p. part 630. Cap. 10. Disponível em: <WWW.ftw.nrcs.usda.gov>. Acesso em Out de 2012.

NICKS, A. D; HARP, J. F. **Stochastic generation of temperature and solar radiation data.** Journal of Hydrology, Volume 48, Issue 1, Pages 1-17A.D. 1980.

NISHIJIMA, T. **Modelagem markoviana da precipitação pluvial diária e simulação do rendimento esperado de soja no município de Cruz Alta (RS).** 2004. 151 f. Tese (Doutorado) - Departamento de

Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/5057>>. Acesso em: 30 out. 12.

PACCA, V. H. da M. **Análise de informações satelitais e dados convencionais da rede pluvio-fluviométrica como contribuição a modelagem hidrológica na região Amazônica: Estudo de caso: bacia do Rio Guamá – Pará.** 2008. 121 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Programas de Pós-graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Coppe, Rio de Janeiro, 2008. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/media/tese_victor_paca.pdf>. Acesso em: 16 out. 2012.

PAIVA, J. B. D. de; PAIVA, E. M. C. D. de (Org.). **Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas.** Porto Alegre: Abrh, 2003. 628 p.

PINTO, N.L. de S.; HOLTZ, A.C.T.; MARTINS, J.A. e GOMIDE, F.L.S. **Hidrologia Básica.** São Paulo: Edgard Blücher, 2000. 278 p.

PRUSKI, F.F.; BRANDÃO, V.S.; SILVA, D.D. **Escoamento superficial.** Viçosa: UFV, 2003. 88 p.

RAZZOLINI, M. T. P.; GUNTHER, W. M. R. **Impactos na saúde das deficiências de acesso a água.** Saúde & sociedade, São Paulo, v. 17, n. 1, Mar. 2008. Disponível em: <www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-12902008000100003&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 03 out. 2012.

RENNÓ, C. D. **Construção de um sistema de análise e simulação hidrológica: aplicação a bacias hidrográficas.** Tese de Doutorado do Curso da Pós-Graduação e Sensoriamento Remoto. São José dos Campos: INPE, 2003. 158p. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/~camilo/camilo_tese.pdf>. Acesso em 10 de out. 2012.

ROLIM, G. de S.; CAMARGO, M. B. P. de; LANIA, D.G.; MORAES, J. F.L. de. **Classificação climática de Köppen e de Thornthwaite e sua aplicabilidade na determinação de zonas agroclimáticas para o estado de São Paulo.** Bragantia [online]. 2007, vol.66, n.4 [cited 2012-

10-29], pp. 711-720. Disponível em:
http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0006-87052007000400022&lng=en&nrm=iso. Acessado em: 29 de out. 2012. ISSN 0006-8705. <http://dx.doi.org/10.1590/S0006-87052007000400022>.

ROSSO, J. C. Avaliação do consumo de água em lavouras de arroz irrigado no sistema pré-germinado nas condições climáticas do sul catarinense. 64 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Criciúma, 2007.

SANTA CATARINA. Estudo dos instrumentos de gestão de recursos hídricos para o estado de Santa Catarina a apoio para sua implementação. Regionalização de vazões das bacias hidrográficas estaduais do estado de Santa Catarina. Vol. 1. 2006. 143p.

SANTOS R. J. Cadeias de Markov. Departamento de Matemática-ICEx, 22 de março de 2006. Universidade Federal de Minas Gerais. Disponível em: <http://www.mat.ufmg.br/~regi/gaalt/markov.pdf>. Acesso em 30 de out. de 2012.

SANTOS, L. L. dos. Modelos hidráulicos-hidrológicos: Conceitos e aplicações conceitos e aplicações. Rbgf- Revista Brasileira de Geografia Física, Recife - PE, v. 3, n. 2, p.1-19, 09 set. 2009. Disponível em: <www.ufpe.br/rbgfe/index.php/revista/article/view/50/58>. Acesso em: 09 out. 2012.

SARTORI, A. Avaliação da classificação hidrológica do solo para a determinação do excesso de chuva do método do serviço de conservação do solo dos Estados Unidos. 2004. 189 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas (SP), 2004.

SCHWALM, H. Geoprocessamento aplicado à análise ambiental: estudo de caso da barragem do rio São Bento, Siderópolis, Santa Catarina. 2008. 84 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Criciúma.

SETTI, A.S.; LIMA, J.E.F.W.; CHAVES, A.G.M; PEREIRA, I.C. **Introdução ao Gerenciamento de Recursos Hídricos.** Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Agência Nacional de Águas (ANA). Brasília, DF, 2000. 207 p. Disponível em: http://www2.ufes.br/geotec/geotec/introducao_gerenciamento.doc. Acesso em: 10 set. 2013.

SILVA, T. C. M. da.; JÚNIOR, V. V. **Cadeias de Markov:** Conceitos e aplicações em modelos de difusão de informação. In: REUNIÃO ANUAL DA SBPC, 63, 2011, Goiânia. Anais eletrônicos. São Paulo: SBPC/UFSC, 2011. Disponível em: <<http://www.sbpcnet.org.br/livro/63ra/conpeex/pivic/trabalhos/TALLYTA-CAROLYNE-MARTINS-DA-SILVA-PIVIC.PDF>>. Acesso em 29 de out. 2012.

TASSI, R.; MELLER, A.; ALLASIA, D. G.; MIRANDA, T. C.; HOLZ, J. **Determinação do parâmetro CN para sub-bacias urbanas do arroio Dilúvio - Porto Alegre/RS.** In: I Simpósio de Recursos Hídricos do Sul-Sudeste, 2006, Curitiba. Anais do I Simpósio de Recursos Hídricos do Sul-Sudeste. Porto Alegre : ABRH.

TELLES, D. D.; COSTA, R. H. P. G. **Reúso da água:** conceitos, teorias e práticas. São Paulo: Blucher, 2007. 311 p.

TUCCI, C. E. M. (Org.). **Hidrologia: ciência e aplicação.** 3. ed. Porto Alegre: ABRH, 2002.943 p.

TUCCI, C. E. M. **Coeficiente de escoamento e vazão máxima de bacias urbanas.** Rbrh - Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, v. 5, n. 1, p.61-68, Jan/Mar 2000. Disponível em: <http://www.abrh.org.br/sgcv3/UserFiles/Sumarios/d59e1c5f69cd898ab9e9bce27bb6292d_70ec6dca6cec6b4e9e67dc36f9d48fcc.pdf>. Acesso em: 15 out. 2013

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos.** Porto Alegre: UFRGS, 1998. 669 p.

TUNDISI, J. G.. **Ciclo hidrológico e gerenciamento integrado.** Cienc. Cult. [online]. 2003, vol.55, n.4, pp. 31-33. ISSN 0009-6725. Disponível em: <cienciaecultura.bvs.br/pdf/cic/v55n4/a18v55n4.pdf>. Acesso em: 21 de agosto de 2012.

UGGIONI, A. B. **Utilização da modelagem matemática no planejamento ambiental no litoral sul de Santa Catarina.** 2005. 60 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Criciúma.

UNIÁGUA, Universidade da Água. **Água no Planeta.** Disponível em: <www.uniagua.org.br/public_html/website/default.asp?tp=3&pag=agua_planeta.htm>. Acesso em: 08 de Outubro de 2012.

VIANA, T. V. de A., ARAUJO, W. F., ANDRADE JÚNIOR, A. S., AZEVEDO, B. M., CRISÓSTOMO JÚNIOR, R. R. **Análise estocástica da ocorrência de períodos secos e chuvosos para o município Cedro-Ceará.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 11., 2000, Cedro-CE. Resumos..., 2000. p.8.

VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. **Meteorologia Básica e Aplicações.** Viçosa: UFV, 1991. 449p.

WAGENER, T. & FRANKS, S. **Regional hydrological impacts of climate change - impact assessment and decisionmaking.** In: WAGENER, T.; FRANKS, S.; GUPTA, H.V.; BGH, E.; BASTIDAS, L.; NOBRE, C. & GALVÃO, C.O., eds. *Regional hydrological impacts of climate change - impact assessment and decision-making.* Wallingford, IAHS, 2005. p.1-8.

WENDLANDER, E. **Modelos Matemáticos e Métodos Numéricos em Águas Subterrâneas - São Carlos, SP:** SBMAC, 2012, 95 p. - (Notas em Matemática Aplicada; v. 3). Disponível em: <http://www.sbmac.org.br/arquivos/notas/livro_03.pdf>. Acesso em 10 de out. 2012.

ZIGLIO, L. **Geografia Política da Água.** Ambiente & sociedade, Campinas, v. 11, n. 2, 2008. Disponível em: <www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1414-753X2008000200017&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 03 Out. 2012.