



MAR. 2021

PROJETO GERENCIAMENTO DE RISCO, ALOCAÇÃO E OPERAÇÃO DO SISTEMA DE RECURSOS HÍDRICOS

Relatório de Cálculo das Afluências
aos Reservatórios Estratégicos do
Ceará: Definição das Vazões Oficiais

CRÉDITOS INSTITUCIONAIS

SRH - Secretaria dos Recursos Hídricos

Secretário Francisco José Coelho Teixeira

Secretário Executivo de Planejamento e Gestão Interna

Ramon Flávio Gomes Rodrigues

FUNCAP - Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico

Presidente - Tarcísio Haroldo Cavalcante Pequeno

Diretor de Inovação – Jorge Barbosa Soares

Diretor Científico - Luiz Drude

Diretora Administrativa - Paula Lenz

COGERH - Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos

Presidente - João Lúcio Farias Oliveira

Diretor de Planejamento - Elano Lamartine Leão Joca

Diretor de Operações - Roberto Bruno Moreira Rebouças

Diretor Administrativo - Denílson Marcelino Fidelis

Programa Ciência e Inovação em Políticas Públicas/Cientista Chefe Recursos Hídricos

Francisco de Assis de Souza Filho

Ciência e Inovação em Políticas Públicas
Programa Cientista-Chefe: Recursos Hídricos

Projeto

Gerenciamento de Risco, Alocação e Operação do Sistema de Recursos Hídricos

Coordenação Geral do Projeto

Francisco de Assis de Souza Filho

Coordenação Adjunta do Projeto

UFC

César Barreira

Ticiano Marinho de Carvalho Studart

Samíria Maria Oliveira da Silva

COGERH

Clara de Assis Jeronimo Sales

Elano Lamartine Leão Joca

Ubirajara Patrício

Coordenação do Relatório

Alyson Brayner Sousa Estácio

Elano Lamartine Leão Joca

Equipe Técnica de Elaboração do Relatório

Renan Vieira Rocha

Victor Costa Porto

Roberto Bruno Moreira Rebouças

Francisco Matos Nogueira Filho

Ticiano Marinho de Carvalho Studart

Francisco de Assis de Souza Filho

SUMÁRIO

Lista de Figuras.....	2
Lista de Tabelas.....	3
1. INTRODUÇÃO	4
2. ANÁLISE DE DADOS	6
2.1. Dados pluviométricos.....	6
2.1.1. Disponibilidade e consistência de dados pluviométricos.....	6
2.1.3. Análise da chuva média na bacia	7
2.2. Dados fluviométricos.....	8
2.3. Estimativas de evapotranspiração.....	9
2.4. Características fisiográficas das bacias	10
2.5. Índices hidrológicos das estações fluviométricas	12
3. MODELAGEM HIDROLÓGICA EM BACIAS COM DADOS	14
3.1. Calibração e validação de modelo hidrológico conceitual.....	14
3.2. Análise da incerteza dos parâmetros do modelo hidrológico conceitual	18
3.3. Calibração e validação de modelo de Rede Neural Artificial	21
4. MODELAGEM HIDROLÓGICA EM BACIAS SEM DADOS	23
4.1. Regionalização de parâmetros do modelo hidrológico conceitual.....	23
4.1.1. Regionalização KNN.....	23
4.1.2. Regionalização ML1.....	31
4.1.3. Regionalização ML2.....	34
4.2. Regionalização das vazões com Rede Neural Artificial (RNA)	36
4.3. Estimativa das vazões incrementais afluentes aos reservatórios	36
5. ANÁLISE DE QUALIDADE DA REGIONALIZAÇÃO	37
5.1. Identificação de faixas de ocorrência das vazões utilizando técnicas de Aprendizado de Máquina	37
5.1.1. Seleção de Variáveis.....	37
5.1.2. Técnicas de regressão	38
5.1.3. Performance dos modelos de regressão da lâmina escoada.....	41
5.1.4. Faixas de ocorrência das vazões.....	42
5.2. Análise da qualidade das afluências por aprendizado de máquina	43
5.2.1. Índice de qualidade das vazões de referência (IQRV)	47
5.3. Análise das afluências por engenharia reversa	47
6. ESTIMATIVA DE VAZÕES CONSIDERANDO A AÇÃO ANTRÓPICA.....	50
6.1. Simulação da rede de reservatórios em cascata	51
6.2. Simulação da rede de reservatórios considerando a incerteza dos parâmetros.....	56
7. SÉRIE DE VAZÕES OFICIAIS.....	57
8. REFERÊNCIAS.....	58
9. ANEXOS (Em meio digital)	59

Lista de Figuras

Figura 1. Esquema metodológico para a estimativa de afluência aos reservatórios monitorados pela COGERH ...	5
Figura 2. Comparação do Método de Thiessen com o Método do IDW para a interpolação da informação pluviométrica. Os <i>boxplots</i> representam a distribuição das médias e coeficientes de variação das precipitações anuais sobre as bacias incrementais dos açudes cearenses monitorados pela COGERH	7
Figura 3. Área de drenagem das 28 estações fluviométricas utilizadas.....	8
Figura 4. Representação esquemática do modelo SMAP com passo mensal	15
Figura 5. Distribuição de probabilidades dos parâmetros calibrados nas bacias das estações fluviométricas (parte1).....	19
Figura 6. Distribuição de probabilidades dos parâmetros calibrados nas bacias das estações fluviométricas (parte2).....	20
Figura 7. Qualidade do ajuste do conjunto de parâmetros calibrados, representada pelo boxplot dos valores de NSE	21
Figura 8. Qualidade do ajuste do conjunto de parâmetros regionalizados e calibrados, representada pelo <i>boxplot</i> dos valores de NSE para cada bacia de estação fluviométrica	26
Figura 9. Qualidade do ajuste do conjunto de parâmetros regionalizados e calibrados, representada pelo <i>boxplot</i> dos valores de NSE de maneira agregada	26
Figura 10. Modelo de rede neural para a regionalização da lâmina escoada média	40
Figura 11. Modelo de árvore de regressão para a regionalização da lâmina escoada média	41
Figura 12. Previsão da lâmina escoada média para: árvore de regressão (esquerda) e regressão robusta (direita)	42
Figura 13. Validação por meio da árvore de regressão para os métodos: KNN (esquerda) e ML1 (direita)	44
Figura 14. Validação por meio da árvore de regressão considerando a combinação dos métodos KNN e ML1 ..	44
Figura 15. Validação por meio da regressão robusta para os métodos: KNN (esquerda) e ML1 (direita)	45
Figura 16. Validação por meio da árvore de regressão e regressão robusta considerando a combinação dos métodos KNN e ML1.....	45
Figura 17. Validação para o coeficiente de escoamento por meio da árvore de regressão e regressão robusta considerando a combinação dos métodos KNN e ML1.....	46
Figura 18. Rede de reservatórios em cascata monitorados no estado do Ceará	52

Lista de Tabelas

Tabela 1. Disponibilidade de dados das estações fluviométricas usadas na calibração do modelo hidrológico.....	9
Tabela 2. Evapotranspiração potencial média calculada pela equação de Penman-Monteith para as estações meteorológicas do INMET sobre o território cearense	10
Tabela 3. Características fisiográficas das bacias das 38 estações fluviométricas avaliadas	11
Tabela 4. Índices hidrológicos das bacias das 38 estações fluviométricas avaliadas, incluindo a precipitação média anual no período correspondente aos dados de vazão (P), a evapotranspiração potencial (ETP), o índice de aridez (IA), a lâmina média escoada anual (LE), o coeficiente de variação das vazões anuais (CV) e o coeficiente de escoamento (CE)	12
Tabela 5. Períodos de validação selecionados para cada estação fluviométrica. Os períodos de calibração correspondem aos 2/3 de meses complementares com dados disponíveis.....	16
Tabela 6. Mediana dos parâmetros do SMAP calibrados como DREAM para as bacias das estações fluviométricas e qualidade de estimativa de vazões (NSE) no período de calibração e de validação	17
Tabela 7. Parâmetros estimados para as bacias incrementais dos açudes por regionalização KNN com as respectivas estações fluviométricas doadoras de parâmetros.....	27
Tabela 8: Parâmetros estimados para as bacias incrementais dos açudes por regionalização ML1.	32
Tabela 9: Parâmetros estimados para as bacias incrementais dos açudes por regionalização ML2.	34
Tabela 10. Performance dos modelos de regressão da lâmina escoada média.....	41
Tabela 11. Vazões regularizadas com 90%, 95% e 98% de garantia, para cada reservatório.....	54

1. INTRODUÇÃO

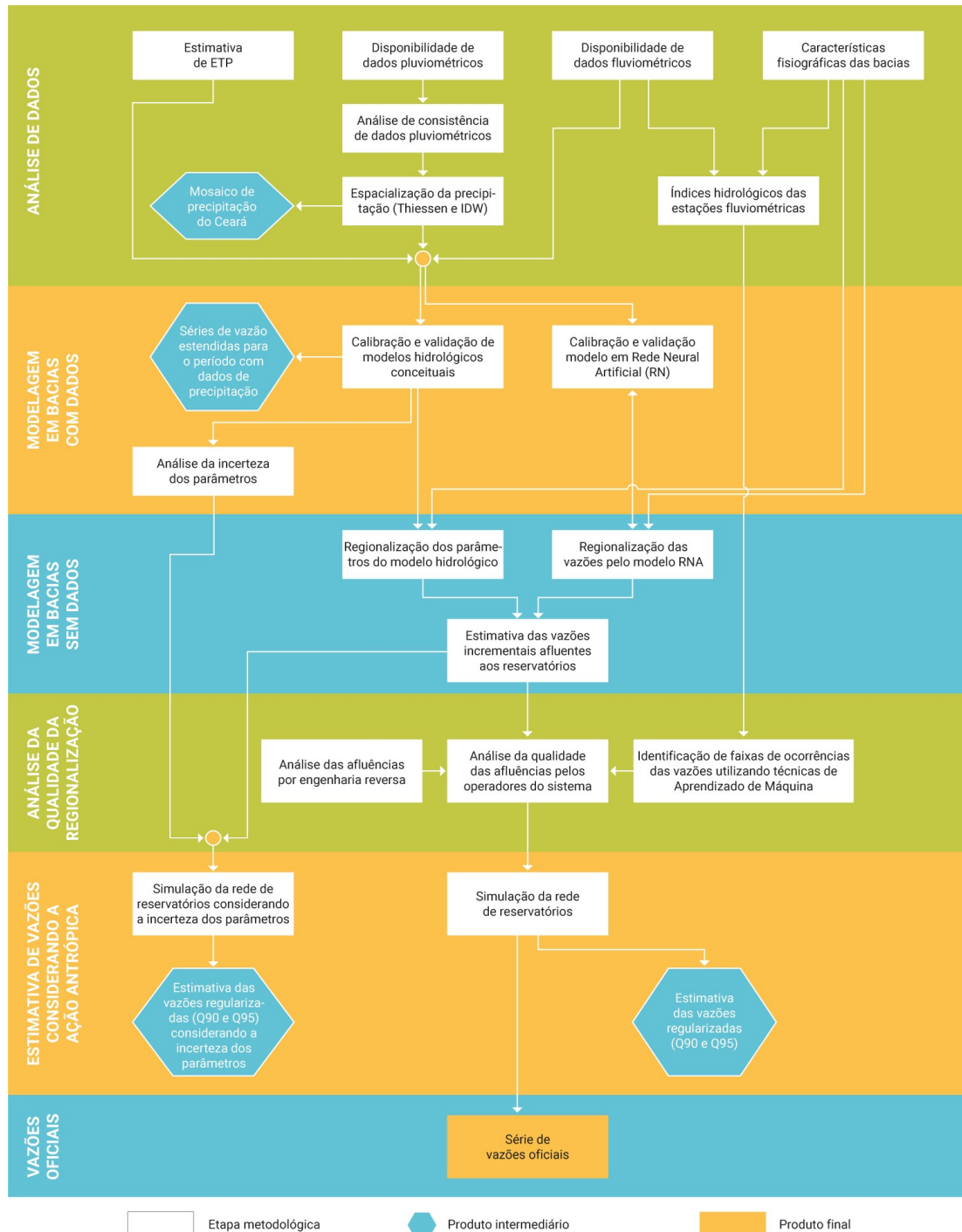
Graças a uma política de açudagem iniciada no século XX, o Ceará conta com uma densa rede de reservatórios de água superficial, que garante a maior parte da oferta hídrica do Estado. Dentre os quase 90 mil açudes no território cearense, identificados em estudo recente pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (Funceme), 155 açudes estratégicos tem seus níveis monitorados pela Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH). Conhecer as afluências a esses açudes é fundamental para um gerenciamento adequado dos recursos hídricos no estado.

Uma importante fonte de informação sobre o regime de vazões no Ceará são os registros nas estações fluviométricas, que monitoram seções fluviais distribuídas ao longo do território. No entanto, poucas estações fluviométricas possuem registros que se estendem por períodos maiores que 30 anos, enquanto muitas delas apresentam períodos intermediários sem dados. Estratégias envolvendo modelagem hidrológica permitem estender as séries de vazões e preencher as falhas na disponibilidade de dados das estações fluviométricas. Ainda assim, a maioria dos açudes do estado não possui medição direta das vazões afluentes, já que, na maioria dos casos não há estação fluviométrica em seção próxima a montante do reservatório. Uma possível solução para esta questão é adoção de uma estratégia de regionalização, que permite estender a informação modelada nas bacias das estações fluviométricas para as bacias afluentes aos açudes, a partir, por exemplo, da similaridade entre as características das bacias. Paralelamente, técnicas de aprendizado de máquina podem ser usadas para extrair informação diretamente dos registros nas estações fluviométricas, permitindo identificar faixas de ocorrência de vazão em função das características das bacias. Tais faixas de ocorrência servem para avaliar a qualidade das afluências obtidas pelas diferentes técnicas de regionalização. Outra fonte de informação sobre as afluências é obtida a partir do monitoramento do nível nos reservatórios, que pode ser utilizado para calcular as afluências por engenharia reversa. Essas diferentes técnicas não permitem, por si só, uma análise explícita do efeito em cascata da densa rede de reservatórios, que corresponde a parte relevante do efeito antrópico sobre o regime de vazões. Esse efeito pode ser, no entanto, incorporado na estimativa de afluências simulando a operação dos reservatórios em cascata.

O processo de modelagem e cálculo para a estimativa das afluências está incrustado de incertezas, sejam inerentes aos dados medidos, ou aos processos de modelagem hidrológica, regionalização e simulação de reservatórios. Por essa razão, apesar de tais procedimentos permitirem a estimativa das afluências, jamais serão capazes de reproduzir perfeitamente os processos reais. Assim, é preponderante a quantificação das incertezas intervenientes no processo de estimativa das afluências. Dentre as diversas fontes de incerteza existentes, destaca-se a incerteza da determinação dos parâmetros do modelo hidrológico, a qual é avaliada paralelamente neste estudo.

Como forma de alcançar estimativas adequadas de afluências, contemplando o conjunto de estratégias e dados disponíveis, foi montado um esquema metodológico para a sua estimação, resumido na Figura 1.

Figura 1. Esquema metodológico para a estimativa de afluência aos reservatórios monitorados pela COGERH



Tendo em vista a constante atualização de dados e de técnicas disponíveis e considerando a relevância das estimativas de afluências aos reservatórios para a avaliação da segurança hídrica no Ceará, o esquema metodológico proposto nesse estudo deve se inserir em um programa de melhoramento contínuo, para atualizações cíclicas das estimativas de afluências.

2. ANÁLISE DE DADOS

Além de dados de vazão medidos nas estações fluviométricas, o processo de modelagem hidrológica, utilizado nesse estudo para o cálculo das afluências, demanda dados pluviométricos e dados que permitam estimativas de evapotranspiração. Estes dados precisam ser tratados e especializados antes de alimentar os modelos hidrológicos. Foram também necessários dados sobre as características fisiográficas das bacias, que permitem avaliar como os padrões gerais de transformação chuva-vazão variam em função das especificidades de cada bacia.

As unidades territoriais consideradas para o levantamento dos dados, foram as bacias das estações fluviométricas, que são as bacias para as quais há dado disponível de vazão, e as bacias incrementais afluentes a aos açudes monitorados, de interesse para esse estudo. Entende-se por bacias incrementais de um determinado açude a parte da bacia hidrográfica que drena suas águas para este açude e que não é controlada pelos açudes monitorados a montante. Para as bacias incrementais dos açudes não há medição direta das vazões afluentes, por essa razão essas bacias são aqui designadas como bacias sem dados, ainda que se possa calcular a precipitação, a evapotranspiração e as características fisiográficas dessas bacias.

Para as bacias das estações fluviométricas, aqui designadas como bacias com dados, foram ainda calculados índices hidrológicos, que guiaram a construção de faixas de ocorrência de vazão.

Neste sentido, são apresentadas a seguir as fontes utilizadas e os processamentos realizados para o tratamento desses dados e sua espacialização nas bacias.

2.1. Dados Pluviométricos

2.1.1. Disponibilidade e consistência de dados pluviométricos

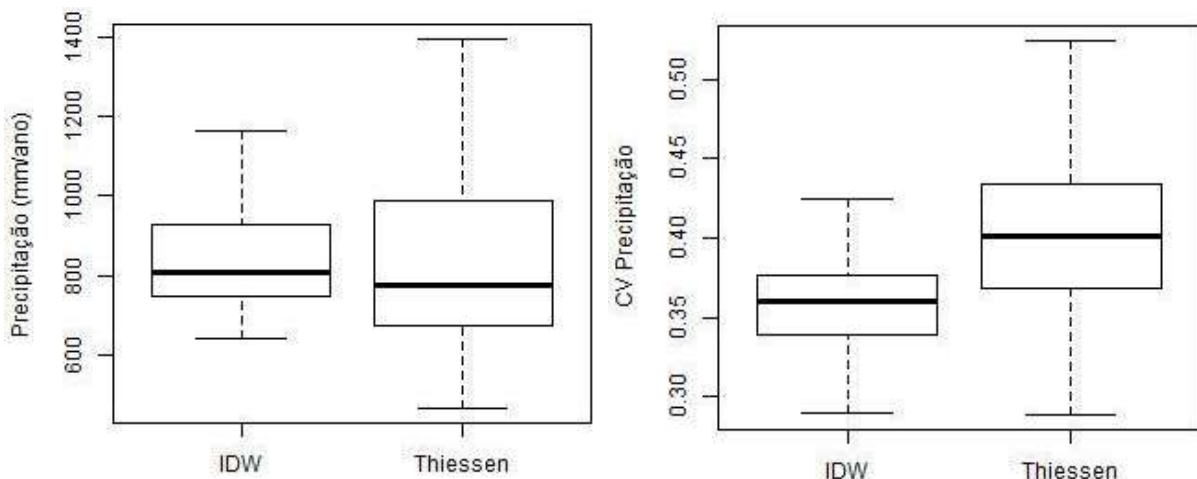
Os dados pluviométricos foram obtidos a partir do Webservice da Agência Nacional de Águas (ANA), pelo qual foi realizado o download dos dados de 1149 estações pluviométricas distribuídas ao longo do território cearense. A análise dos dados pluviométricos mostrou uma baixa dissipabilidade de dados consistidos. Por outro lado, os dados brutos apresentaram disponibilidade espacial e temporal suficiente para a realização deste estudo. Desse modo, foram considerados no estudo os dados brutos, após uma análise de consistência detalhada. Foram utilizadas apenas as estações que apresentaram dados disponíveis em mais de 40% dos dias no período de 1910 a 2019, isto é, 256 estações. A análise de disponibilidade e a metodologia utilizada para a análise de consistência dos dados pluviométricos pode ser consultada no ANEXO 1 deste relatório.

2.1.3. Análise da chuva média na bacia

A fim de obter as séries de precipitações médias sobre as áreas das bacias faz-se necessária a adoção de hipóteses de interpolação da informação medida nos postos pluviométricos. Apesar de muitas vezes negligenciada, a incerteza resultante da interpolação da informação pluviométrica é relevante no processo de modelagem hidrológica. Estudos preliminares compararam dois métodos de interpolação da informação pluviométrica no estado do Ceará: o método dos Polígonos de Thiessen e o método do *Inverse Distance Weighting* (IDW). As médias e coeficientes de variação das precipitações anuais sobre as bacias dos açudes cearenses, calculadas nesse estudo preliminar, estão representados na Figura 2.

Ao considerar que a precipitação em uma determinada região é igual àquela do posto pluviométrico mais próximo, o método de Thiessen implica em transições abruptas no campo de precipitações, que resultam em maior variabilidade espacial e temporal. Já com o campo interpolado pelo IDW a transições são suavizadas. As diferenças entre os campos de precipitação obtidos por cada um dos métodos e as diferenças nas séries de precipitação média resultantes apontam para a necessidade de uma investigação científica que leve a uma menor incerteza na representação das precipitações médias na bacia.

Figura 2. Comparação do Método de Thiessen com o Método do IDW para a interpolação da informação pluviométrica. Os *boxplots* representam a distribuição das médias e coeficientes de variação das precipitações anuais sobre as bacias incrementais dos açudes cearenses monitorados pela COGERH



Nesse estudo, utilizaram-se para interpolação do campo de precipitação as 211 estações que, de acordo com a metodologia de apresentada anteriormente, foram consideradas consistentes. Depois de agregada a informação nas estações para a escala mensal, esta foi interpolada mês a mês pelo IDW, considerando as estações com dados disponíveis no mês. Na interpolação utilizou-se o expoente dois na ponderação pela distância, ou seja, com ponderação pelo inverso do quadrado da distância. Assim, preencheu-se uma grade de 0.01 graus sobre todo o território cearense, representado o mosaico de precipitações mensais para o Ceará no período de outubro de 1910 a

dezembro de 2019. Esse mosaico, produto intermediário deste estudo, está disponível no ANEXO 2.

As séries precipitações médias em cada bacia de interesse foram obtidas realizando o recorte dos pontos de grade do mosaico internos a bacia e aplicando, para cada mês, a média da precipitação nesses pontos.

2.2. Dados Fluviométricos

Foram considerados dados de 38 estações fluviométricas convencionais, sobre o território cearense, operadas pela Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais (CPRM). O cálculo de índices hidrológicos para posterior avaliação de faixas de ocorrência de vazão foram realizados levando em conta essas 38 estações. Dentre elas, selecionaram-se 28 estações para posterior calibração do modelo hidrológico. A escolha das estações fluviométricas levou em consideração fatores como:

- a) um mínimo de 10 anos de dados de vazão (contínuos ou não).
- b) disponibilidade de informação georreferenciada do contorno da área de drenagem da estação fluviométrica no momento do estudo.

A área de drenagem das 28 estações utilizadas é apresentada na Figura 3. As séries diárias de vazão das 28 estações foram agregadas para a escala mensal. A Tabela 1 apresenta a disponibilidade de dados dessas estações.

Figura 3. Área de drenagem das 28 estações fluviométricas utilizadas

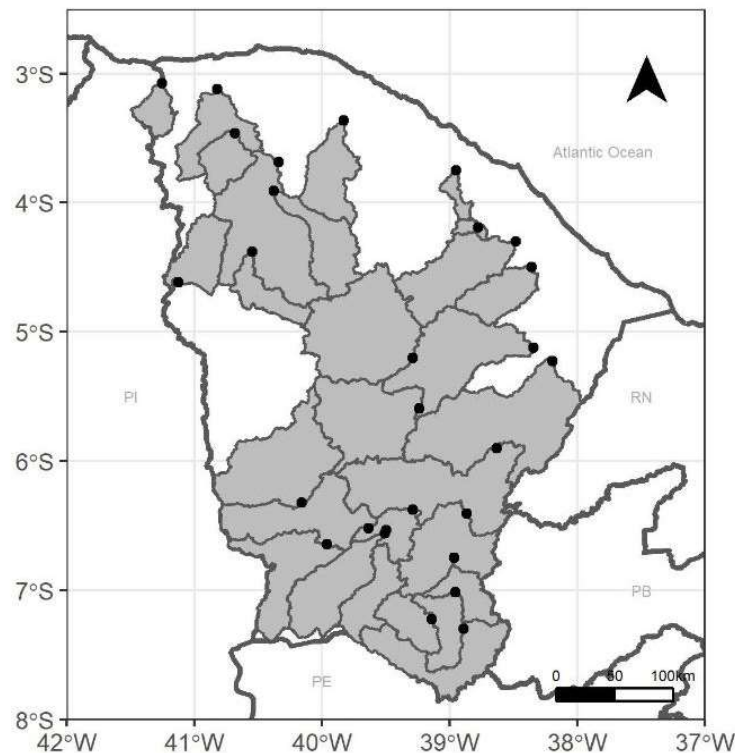


Tabela 1. Disponibilidade de dados das estações fluviométricas usadas na calibração do modelo hidrológico

Estação Fluviométrica		Data inicial	Data final	Período com dados equivalente em anos
ID	Nome			
35370000	Amontada	Mar/1973	Dez/2017	14.1
36020000	Arneiroz	Jan/1973	Dez/2017	43.7
35740000	Barra Nova	Abr/1984	Dez/2017	33.7
36130000	Cariús	Fev/1984	Dez/2017	32.8
35050000	Chaval Retiro	Mar/2000	Dez/2017	16.8
35880000	Chorozinho	Jun/1969	Abr/1994	23.9
35950000	Cristais	Jun/1969	Dez/2017	42.2
35210000	Faz. Cajazeiras	Mai/1962	Dez/2017	24.8
35170000	Granja	Jan/1971	Dez/2017	38.1
35260000	Groairas	Mar/1973	Dez/2017	43.8
36290000	Icó	Jan/1973	Dez/2017	44.8
36160000	Iguatu	Jan/1912	Dez/2017	94.4
36320000	Jaguaribe	Nov/1977	Dez/2017	39.9
36270000	Lav. da Mangabeira	Jan/1973	Dez/2017	30.8
36045000	Malhada	Mar/1979	Dez/2017	35.2
36580000	Morada Nova II	Abr/1973	Dez/2017	43.7
35125000	Moraújo	Mar/1979	Dez/2017	25.1
36390000	Peixe Gordo	Jan/1973	Dez/2017	44.2
36250000	Podimirim	Jan/1973	Dez/2017	45.0
36520000	Quixeramobim	Jan/1973	Dez/2017	41.5
36125000	S. Poço Dantas	Fev/1973	Dez/2017	43.2
36260000	S. Santa Cruz	Fev/2000	Dez/2017	17.9
34740000	Saudoso	Dez/1996	Dez/2017	20.6
36470000	Sen. Pompeu	Mar/1973	Dez/2017	39.0
36210000	Sítio Lapinha	Jan/1965	Dez/2017	45.6
36070000	Sítio Patos	Fev/2000	Dez/2017	17.9
35650000	Sítios Novos	Mar/1973	Dez/1998	18.0
35275000	Sobral	Jan/1973	Dez/2017	40.3

2.3. Estimativas de Evapotranspiração

A evapotranspiração potencial foi calculada pela equação de Penman-Monteith, utilizando as informações de temperatura, umidade do ar e velocidade do vento medidas nas estações do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) sobre o território cearense. As médias mensais e a evapotranspiração potencial anual calculadas nessas estações estão apresentadas na Tabela 2. Essa informação foi especializada nas bacias das estações fluviométricas e posteriormente nas bacias incrementais dos açudes pelo método de Thiessen. Como a estação de Guaramiranga possui representatividade restrita à região de serra onde se encontra não foi considerada na espacialização da evapotranspiração.

Tabela 2. Evapotranspiração potencial média calculada pela equação de Penman-Monteith para as estações meteorológicas do INMET sobre o território cearense

Estação do INMET	Evapotranspiração potencial média (mm)												
	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Total Anual
Sobral	146	125	123	109	115	115	134	171	189	201	188	179	1794
Fortaleza	145	123	118	104	116	115	131	159	167	176	168	163	1684
Guaramiranga	98	83	80	72	75	71	86	107	112	121	113	107	1124
Jaguaruana	178	147	146	126	134	130	146	181	204	220	205	199	2014
Crateús	169	138	130	114	124	138	169	206	225	243	219	205	2079
Quixeramobim	184	151	145	127	128	122	144	191	220	238	220	210	2079
Morada Nova	178	145	140	132	131	133	156	182	194	209	198	194	1992
Tauá	159	132	133	117	124	135	160	189	204	205	197	190	1943
Iguatu	160	136	139	123	127	134	159	201	208	225	213	199	2024
Campos Sales	164	119	126	122	137	151	173	213	235	239	215	195	2090
Barbalha	141	118	126	118	116	118	136	164	180	185	169	159	1729

2.4. Características fisiográficas das bacias

O levantamento de características fisiográficas das bacias se faz relevante para o estabelecimento de métricas que permitem comparar as bacias, o que é necessário no processo de regionalização e também no estabelecimento de faixas de ocorrência das vazões.

As características fisiográficas consideradas foram:

- Percentual da bacia sobre solo cristalino (Crist.)
- Fator de forma (Kc)
- Densidade de drenagem (DD)
- Capacidade de armazenamento do Solo (CAD)
- Declividade média da bacia (Decliv.)
- Curve Number (CN)

Em função da abordagem utilizada, algumas das técnicas consideraram ainda características que comportam o efeito de escala das bacias, como a área e o perímetro.

A Tabela 3 apresenta o resumo das características calculadas para as bacias das estações fluviométricas. As mesmas características, calculadas para as bacias incrementais dos açudes, estão resumidas no ANEXO 3. A base de dados cartográficos utilizada para o cálculo das características fisiográficas está disponibilizada no ANEXO 4.

Tabela 3. Características fisiográficas das bacias das 38 estações fluviométricas avaliadas

Estação Fluviométrica		Área (km ²)	Perímetro (km)	Crist.	Kc	DD (km/km ²)	CAD (mm)	Decliv. (%)	CN (mm)
ID	Nome								
35370000	Amontada	2672	402	0.96	2.19	0.83	61	7	77
36020000	Arneiroz	5868	644	0.92	2.37	0.73	77	5	77
35740000	Barra Nova	311	143	0.99	2.28	0.53	109	22	79
35830000	Caio Prado	1613	295	0.97	2.07	0.84	69	8	76
36130000	Cariús	2047	454	0.66	2.83	0.55	93	9	77
35050000	Chaval Retiro	1001	226	0.44	2.01	0.61	57	9	75
35880000	Chorozinho	4042	538	0.87	2.39	0.76	85	9	76
35950000	Cristais	2034	337	0.81	2.11	0.71	86	4	76
34730000	Croatá	1070	214	0.00	1.85	0.59	59	7	77
35210000	Faz. Cajazeiras	1553	386	0.96	2.76	1.01	75	7	77
35279000	Faz. Bela Vista	46	40	1.00	1.67	0.98	64	3	76
35170000	Granja	3961	487	0.77	2.18	0.89	69	8	77
35260000	Groaíras	2799	474	0.93	2.53	0.93	60	8	77
36290000	Icó	12347	957	0.67	2.43	0.80	79	7	77
36160000	Iguatu	20673	1458	0.81	2.86	0.72	75	7	77
35900000	Itapeim	3099	453	0.62	2.29	0.60	86	3	76
36320000	Jaguaribe	39906	1974	0.78	2.79	0.77	77	7	77
36270000	Lav. da Mangabeira	8368	710	0.56	2.19	0.79	75	7	76
36045000	Malhada	3455	623	0.73	2.99	0.71	75	6	77
36580000	Morada Nova II	17717	1277	0.96	2.71	0.99	69	7	77
35125000	Moraújo	1583	256	0.93	1.81	1.00	66	8	77
36390000	Peixe Gordo	48277	2256	0.79	2.90	0.84	75	7	77
35205000	Pesqueiro	1456	236	0.77	1.74	0.73	75	4	76
36250000	Podimirim	3546	677	0.41	3.21	0.61	72	5	76
36520000	Quixeramobim	7041	650	0.98	2.18	1.09	65	8	77
35570000	São Luís do Curu	7317	672	0.97	2.21	0.74	61	9	76
34740000	Saudoso	2232	364	0.00	2.17	0.62	55	7	77
36470000	Senador Pompeu	5219	629	0.97	2.46	1.01	75	9	77
36110000	Sítio Conceição	2422	498	0.71	2.86	0.58	90	9	77
36210000	Sítio Lapinha	1662	298	0.40	2.07	0.66	97	8	77
36070000	Sítio Patos	13660	1140	0.86	2.75	0.74	70	6	77
36125000	Sítio Poço Dantas	3534	473	0.73	2.25	0.70	85	8	76
36260000	Sítio Santa Cruz	6930	673	0.48	2.28	0.69	81	6	77
35650000	Sítios Novos	468	196	0.92	2.55	0.74	75	9	76
35275000	Sobral	11272	845	0.87	2.25	0.92	67	7	77
35240000	Trapiá	1533	338	0.91	2.44	0.85	66	10	77
35668000	Umarituba Nova	503	224	0.93	2.82	0.74	76	8	76
35235000	Várzea do Grosso	5933	583	0.87	2.14	0.91	71	7	77

2.5. Índices Hidrológicos das Estações Fluviométricas

A partir dos dados de vazão nas 38 estações fluviométricas e dos dados pluviométricos e de evapotranspiração obtidos para as bacias dessas estações calcularam-se índices hidrológicos, que, juntamente com as características das bacias, nortearam o estabelecimento de faixas de ocorrência para as vazões.

Os índices hidrológicos calculados foram a precipitação média anual (P) considerando o período em que há dados de vazão disponível, a lâmina média escoada anual (LE), o coeficiente de variação das vazões anuais (CV) e o coeficiente de escoamento (CE). Além disso, calculou-se um índice de aridez (IA), como a razão entre a evapotranspiração potencial (ETP) e a precipitação.

A Tabela 4 apresenta os índices hidrológicos calculados para as bacias das 38 estações fluviométricas.

Tabela 4. Índices hidrológicos das bacias das 38 estações fluviométricas avaliadas, incluindo a precipitação média anual no período correspondente aos dados de vazão (P), a evapotranspiração potencial (ETP), o índice de aridez (IA), a lâmina média escoada anual (LE), o coeficiente de variação das vazões anuais (CV) e o coeficiente de escoamento (CE)

Estação Fluviométrica		P (mm/ano)	ETP (mm/ano)	IA	LE (mm/ano)	CV	CE
ID	Nome						
35370000	Amontada	598	1794	3.0	11	1.2	0.02
36020000	Arneiroz	616	1944	3.2	35	2.3	0.06
35740000	Barra Nova	1185	1684	1.4	198	0.9	0.17
35830000	Caio Prado	787	2079	2.6	83	1.4	0.11
36130000	Cariús	831	1784	2.1	132	1.2	0.16
35050000	Chaval Retiro	951	1794	1.9	100	0.8	0.11
35880000	Chorozinho	873	1951	2.2	99	1.3	0.11
35950000	Cristais	814	2000	2.5	78	2.0	0.10
34730000	Croatá	857	1849	2.2	113	0.9	0.13
35210000	Faz. Cajazeiras	822	2073	2.5	129	1.2	0.16
35279000	Faz. Bela Vista	850	1794	2.1	157	1.5	0.18
35170000	Granja	1090	1794	1.6	221	0.9	0.20
35260000	Groaíras	760	1865	2.5	67	1.7	0.09
36290000	Icó	896	1806	2.0	72	1.1	0.08
36160000	Iguatu	709	1987	2.8	41	1.4	0.06
35900000	Itapeim	708	1966	2.8	25	1.1	0.04
36320000	Jaguaribe	743	1937	2.6	40	1.5	0.05
36270000	Lav. da Mangabeira	867	1730	2.0	82	1.2	0.10
36045000	Malhada	640	2090	3.3	19	1.7	0.03
36580000	Morada Nova II	683	2058	3.0	33	1.4	0.05
35125000	Moraújo	943	1794	1.9	139	0.9	0.15
36390000	Peixe Gordo	789	1950	2.5	62	1.4	0.08

**Tabela 4. Índices hidrológicos das bacias das 38 estações fluviométricas avaliadas, incluindo a precipitação média anual no período correspondente aos dados de vazão (P), a evapotranspiração potencial (ETP), o índice de aridez (IA), a lâmina média escoada anual (LE), o coeficiente de variação das vazões anuais (CV) e o coeficiente de escoamento (CE)
(Continuação)**

Estação Fluviométrica		P (mm/ano)	ETP (mm/ano)	IA	LE (mm/ano)	CV	CE
35205000	Pesqueiro	873	1794	2.1	103	1.1	0.12
36250000	Podimirim	824	1729	2.1	31	1.3	0.04
36520000	Quixeramobim	701	2079	3.0	58	2.0	0.08
35570000	São Luís do Curu	762	1826	2.4	60	1.9	0.08
34740000	Saudoso	714	1969	2.8	41	1.0	0.06
36470000	Senador Pompeu	736	2032	2.8	51	1.5	0.07
36110000	Sítio Conceição	937	1821	1.9	70	0.9	0.07
36210000	Sítio Lapinha	975	1729	1.8	77	0.9	0.08
36070000	Sítio Patos	565	1998	3.5	17	1.6	0.03
36125000	Sítio Poço Dantas	742	2047	2.8	37	1.2	0.05
36260000	Sítio Santa Cruz	807	1729	2.1	30	1.0	0.04
35650000	Sítios Novos	850	1684	2.0	46	1.6	0.05
35275000	Sobral	803	1896	2.4	116	1.5	0.14
35240000	Trapiá	717	1978	2.8	116	1.4	0.16
35668000	Umarituba Nova	1071	1684	1.6	140	1.4	0.13
35235000	Várzea do Grosso	779	1954	2.5	48	1.4	0.06

3. MODELAGEM HIDROLÓGICA EM BACIAS COM DADOS

A informação das bacias com dados de vazão, ou seja, das bacias das estações fluviométricas, foi utilizada para sistematizar a compreensão sobre a transformação chuva-vazão no território cearense, por meio do processo de modelagem hidrológica. Um modelo hidrológico é uma simplificação matemática da transformação chuva-vazão na bacia, que tenta replicar, para dadas entradas de precipitação e de evapotranspiração, qual a saída de vazão. Além de ser necessária para posterior inferência nas bacias sem dados, a modelagem das bacias com dados permite preencher falhas na disponibilidade de dados de vazão e estender as séries de vazão para o período com dados pluviométricos disponíveis.

No processo de modelagem hidrológica convencional, quando há dados de vazão disponível, o modelo hidrológico adotado é ajustado de modo que a vazão simulada pelo modelo se aproxime, tanto quanto possível, dos dados medidos de vazão. Esse processo de ajuste é conhecido como calibração dos parâmetros do modelo hidrológico e requer um período razoável de dados de vazão medida. Como forma de verificar a acurácia do modelo em representar as vazões e outras situações, reserva-se um período dos dados de vazão, não utilizados na calibração, para a validação do modelo.

A seguir são apresentados as metodologias adotadas e os resultados dos processos de calibração e validação de dois modelos hidrológicos considerados: um modelo conceitual e um modelo de Rede Neural Artificial. Para o primeiro modelo, foi adotado um algoritmo de calibração que permite quantificar a incerteza na determinação dos parâmetros.

3.1. Calibração e Validação de Modelo Hidrológico Conceitual

O modelo conceitual utilizado para a calibração das 28 estações fluviométricas consideradas foi o *Soil Moisture Accounting Procedure* (SMAP) em sua versão mensal (LOPES, BRAGA E CONEJO, 1981). O SMAP mensal representa os estoques e transferências de água na bacia por meio de dois reservatórios fictícios, um para a umidade no solo não saturado e outro para o aquífero. As transferências entre os reservatórios são regidas por equações teóricas, utilizando quatro parâmetros determinísticos que representam o comportamento médio da bacia. São esses parâmetros, denominados SAT, PES, CREC e K, que são calibrados para a bacia de modo a aproximar as vazões calculadas pelo modelo às vazões medidas.

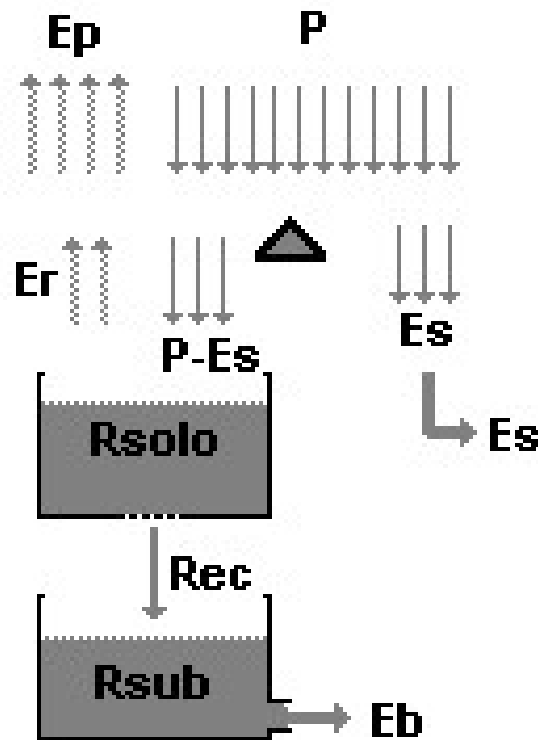
O índice de aderência, utilizado na comparação entre vazões calculadas e medidas, foi o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) que varia entre $-\infty$ e 1. O valor de NSE seria igual a

1 se a vazão calculada aderisse perfeitamente à vazão medida. Por outro lado, um NSE inferior 0 significa que a média das vazões observadas representa uma melhor estimativa da série de vazões que as vazões calculada pelo modelo.

Na Figura 4 tem-se uma representação esquemática no SMAP mensal.

Como forma de amortecer o efeito da inicialização dos reservatórios do modelo SMAP foi utilizado um período de aquecimento de 12 meses.

Figura 4. Representação esquemática do modelo SMAP com passo mensal



Fonte: LOPES, BRAGA e CONEJO (1982).

As séries de vazão foram divididas de modo que o 1/3 dos meses com dados foi reservado para a validação, enquanto o restante dos dados foi utilizado na calibração. Como não há concordância entre os períodos com dados entre as estações fluviométricas, a escolha dos períodos de calibração e validação foram feitas estação a estação. Os períodos de validação foram selecionados de modo que a variabilidade hidrológica fosse adequadamente representada, com anos secos e úmidos, tanto no período de validação propriamente dito, quanto o período complementar, destinado à calibração. Os períodos de validação selecionados estão representados na Tabela 5.

A Tabela 6 apresenta os parâmetros medianos calibrados para a bacia de cada estação fluviométrica, bem como o valor do NSE para o período de calibração e de validação.

Tabela 5. Períodos de validação selecionados para cada estação fluviométrica. Os períodos de calibração correspondem aos 2/3 de meses complementares com dados disponíveis

Estação Fluviométrica		Data inicial da validação	Data final da validação
ID	Nome		
35370000	Amontada	Jun/1994	Dec/2015
36020000	Arneiroz	Aug/1984	Apr/1999
35740000	Barra Nova	Mar/1994	Aug/2005
36130000	Cariús	Jun/1994	Jun/2005
35050000	Chaval Retiro	Feb/2004	Dec/2009
35880000	Chorozinho	Dec/1972	Dec/1980
35950000	Cristais	Mar/1985	Dec/2001
35210000	Faz. Cajazeiras	Mar/1976	Apr/2006
35170000	Granja	Dec/1986	Nov/2001
35260000	Groaíras	Aug/1982	May/1997
36290000	Icó	Jun/1992	Jun/2007
36160000	Iguatu	Sep/1943	Nov/1976
36320000	Jaguaribe	Apr/1993	Aug/2006
36270000	Lav. da Mangab.	Oct/1979	Feb/1990
36045000	Malhada	Feb/1994	Oct/2005
36580000	Morada Nova II	May/1982	Apr/1997
35125000	Moraujo	Feb/1988	Jun/2004
36390000	Peixe Gordo	Jul/1982	May/1997
36250000	Podimirim	Jun/1992	Jun/2007
36520000	Quixeramobim	Sep/1981	Jan/1998
36125000	S. Poço Dantas	Oct/1992	Feb/2007
36260000	S. Santa Cruz	Dec/2001	Dec/2007
34740000	Saudoso	Jun/1997	May/2004
36470000	Sen. Pompeu	Jun/1979	Apr/1998
36210000	Sítio Lapinha	May/1992	Sep/2007
36070000	Sítio Patos	Dec/2005	Dec/2011
35650000	Sítios Novos	Apr/1978	Jun/1989
35275000	Sobral	Jan/1998	Oct/2011

Tabela 6. Mediana dos parâmetros do SMAP calibrados como DREAM para as bacias das estações fluviométricas e qualidade de estimativa de vazões (NSE) no período de calibração e de validação

Estação Fluviométrica		Parâmetro calibrado				Qualidade do ajuste	
ID	Nome	SAT	PES	CREC	K	NSE _{cal}	NSE _{val}
35370000	Amontada	761	3,0	4,6	4,5	0,87	0,74
36020000	Arneiroz	551	5,2	2,4	4,4	0,53	0,78
35740000	Barra Nova	1906	4,5	1,0	3,7	0,65	0,82
36130000	Cariús	707	4,1	0,5	3,6	0,89	0,73
35050000	Chaval Retiro	1363	3,2	0,7	3,0	0,79	0,76
35880000	Chorozinho	1021	3,5	0,4	3,7	0,89	0,89
35950000	Cristais	696	4,5	2,5	4,9	0,84	0,83
35210000	Faz. Cajazeiras	650	3,1	1,0	3,6	0,94	0,81
35170000	Granja	1347	3,1	0,3	4,0	0,94	0,53
35260000	Groaíras	960	3,5	0,6	4,0	0,85	0,75
36290000	Icó	1499	3,8	0,1	3,6	0,87	0,78
36160000	Iguatu	1171	3,4	0,2	3,9	0,72	0,77
36320000	Jaguaribe	1133	4,3	0,4	3,6	0,89	0,69
36270000	Lav. da Mangab.	1645	4,5	0,1	3,7	0,87	0,71
36045000	Malhada	1366	3,5	0,2	3,5	0,78	0,59
36580000	Morada Nova II	919	4,2	3,7	5,1	0,76	0,87
35125000	Moraújo	1593	2,5	0,4	3,5	0,93	0,82
36390000	Peixe Gordo	908	4,8	0,8	3,8	0,82	0,85
36250000	Podimirim	1904	4,8	0,1	3,2	0,69	0,48
36520000	Quixeramobim	640	3,6	0,7	3,7	0,86	0,41
36125000	S. Poço Dantas	1560	3,6	0,3	3,3	0,75	0,68
36260000	S. Santa Cruz	1697	5,0	0,1	3,8	0,78	0,70
34740000	Saudoso	2115	3,4	1,8	1,5	0,84	0,74
36470000	Sen. Pompeu	1338	2,9	0,6	3,6	0,68	0,82
36210000	Sítio Lapinha	2824	4,2	0,1	3,2	0,77	0,74
36070000	Sítio Patos	777	3,6	0,6	3,9	0,72	0,60
35650000	Sítios Novos	1763	4,4	0,5	3,8	0,73	0,66
35275000	Sobral	854	3,5	0,7	4,1	0,95	0,83

A série reconstruída de vazões para cada estação, estendida para o período em que há dados de precipitação disponível, está disponibilizada na forma do ANEXO 5, como um produto intermediário desse estudo.

3.2. Análise da Incerteza dos Parâmetros do Modelo Hidrológico Conceitual

As investigações científicas sobre modelagem hidrológica apontam que não há apenas uma solução para a calibração de modelos hidrológicos (Beven, 2006). Em outras palavras, várias combinações de parâmetros ofereceriam uma qualidade similar de ajuste da vazão modelada à vazão medida. Existe, portanto, uma incerteza ligada à determinação dos parâmetros do modelo hidrológico, que resulta numa incerteza das vazões modeladas.

A fim de avaliar e quantificar a incerteza dos parâmetros, a calibração do SMAP nas bacias das estações fluviométricas foi conduzida com o algoritmo *Differential Evolution Adaptive Metropolis* (DREAM) (Vrugt, 2016; Vrugt *et al.*, 2008, 2009). Esse algoritmo é fundado na técnica de *Monte Carlo Markov Chain* (MCMC), que permite considerar a incerteza da determinação dos parâmetros. Nesse tipo de algoritmo, os parâmetros do modelo hidrológico são tratados como variáveis aleatórias, cujas distribuições são iterativamente aproximadas.

Por meio desse algoritmo, foram determinados 1000 conjuntos de parâmetros para cada uma das bacias. A distribuição desses parâmetros representa a incerteza relacionada na sua determinação. As medianas dos 1000 conjuntos de parâmetros foram utilizadas como estimativas centrais dos valores de parâmetros calibrados (apresentadas na Tabela 6). Os histogramas que representam a distribuição dos parâmetros das bacias estão apresentados na Figura 5 e na Figura 6.

Observa-se grande concentração das distribuições de CREC nas proximidades do valor zero, o que, segundo a representação dos processos hidrológicos pelo SMAP, corresponde a uma baixa recarga do aquífero subterrâneo. Por consequência, observa-se grande dispersão do parâmetro K, que controla o esvaziamento do aquífero, gerando o escoamento de base. De fato, com baixa recarga, o aquífero simulado permanece a maior parte do tempo vazio e o valor de K se torna indiferente. Esse comportamento no modelo está relacionado a baixa capacidade de armazenamento subterrâneo da maior parte do território cearense, que explica, em parte, o caráter intermitente dos regime de vazões local.

Figura 5. Distribuição de probabilidades dos parâmetros calibrados nas bacias das estações fluviométricas (parte1)

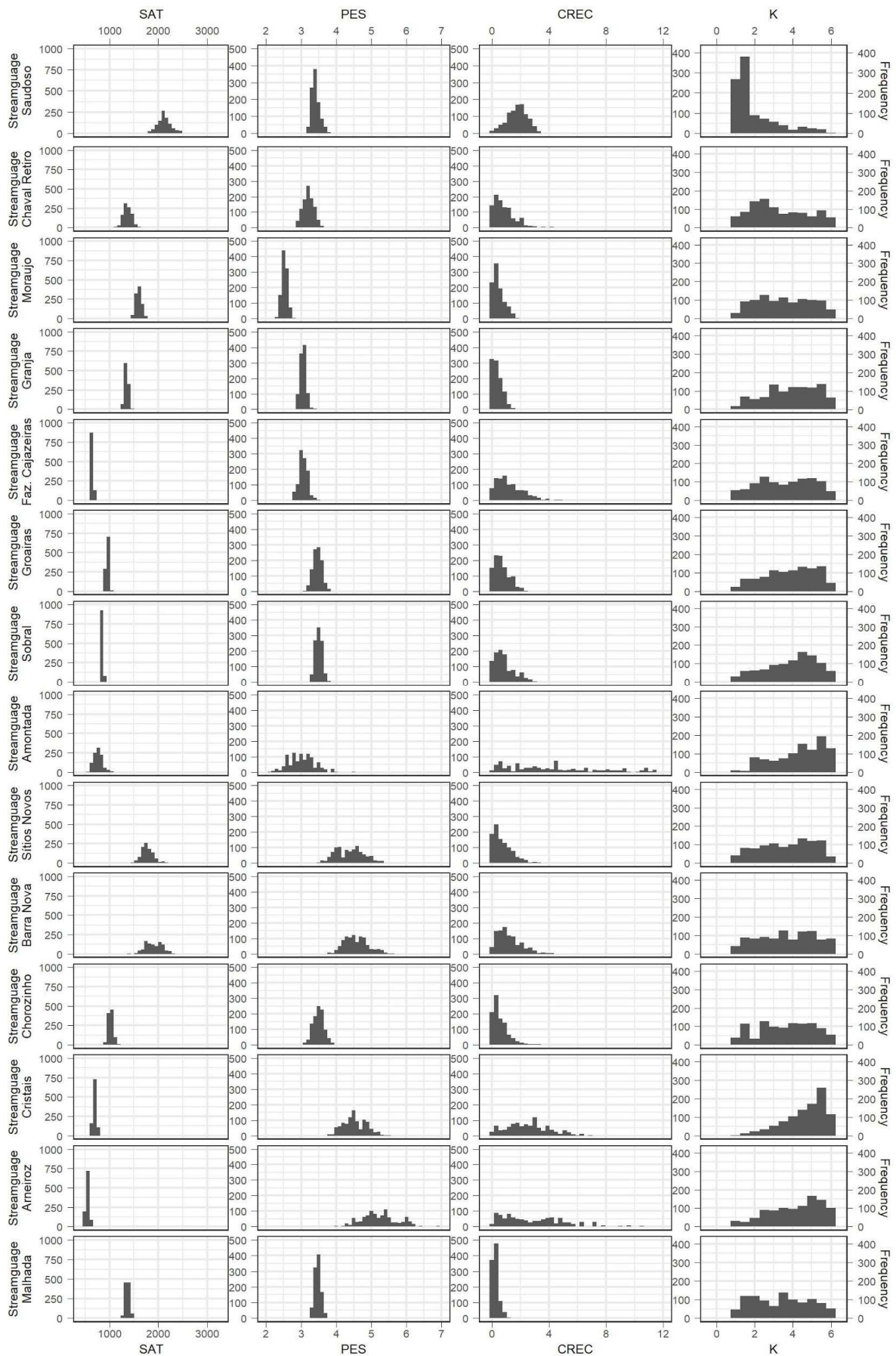
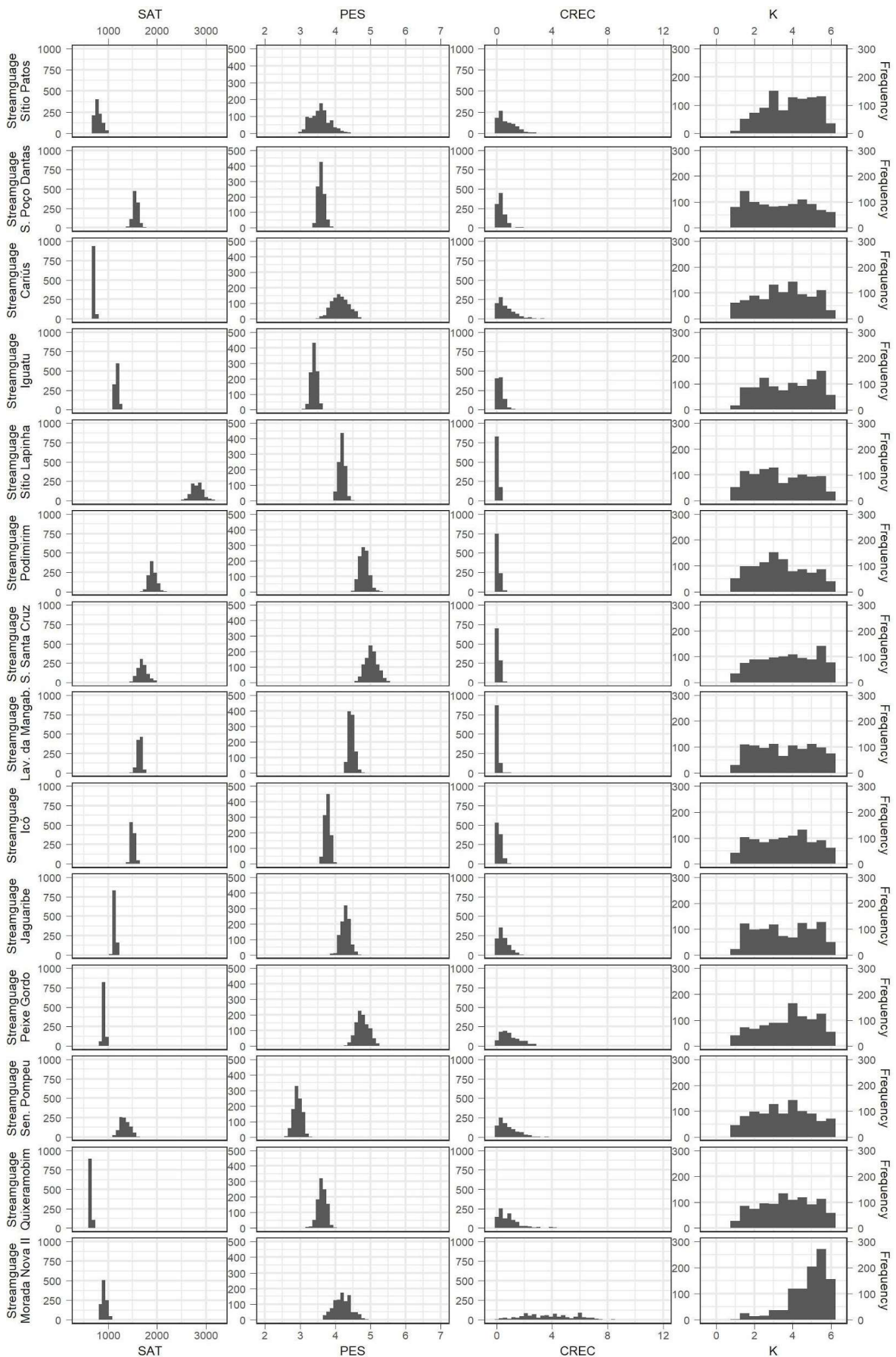
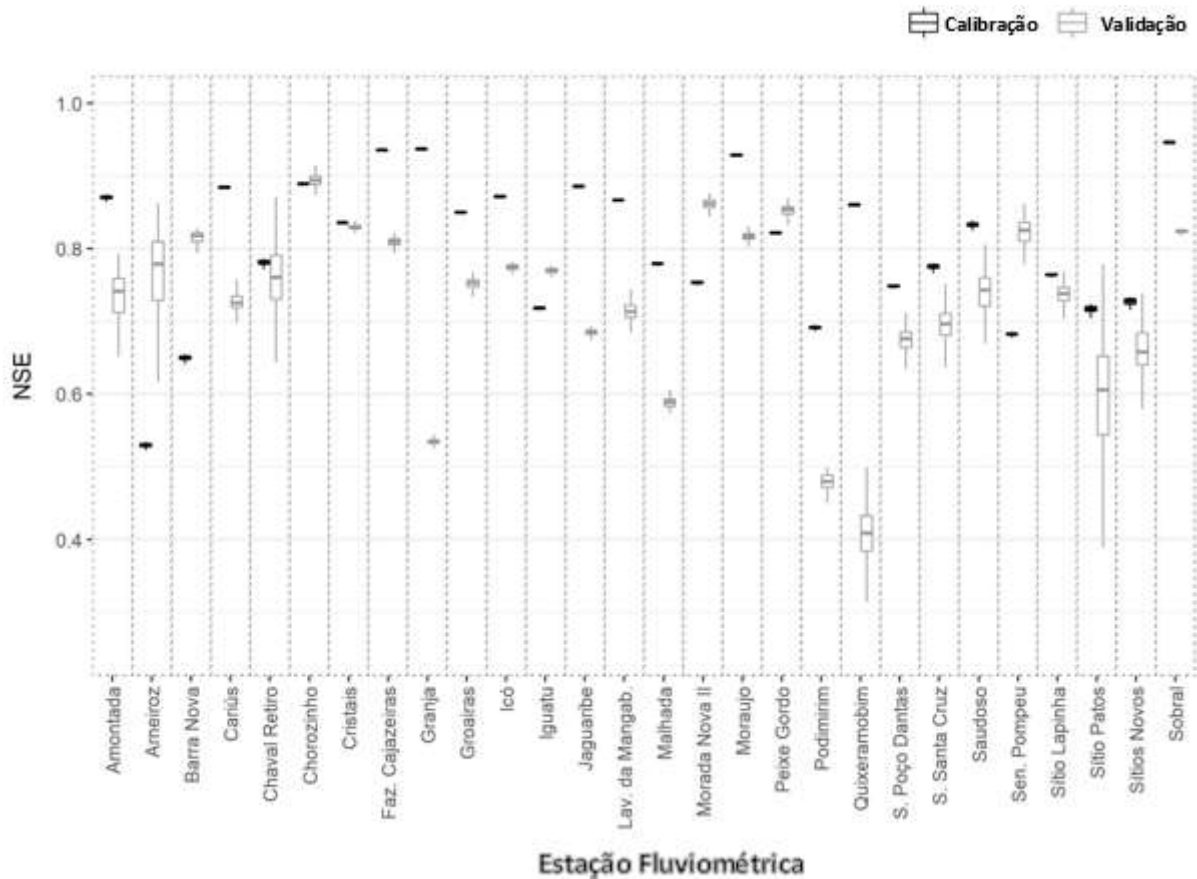


Figura 6. Distribuição de probabilidades dos parâmetros calibrados nas bacias das estações fluviométricas (parte2).



A qualidade do ajuste da modelagem pode ser verificada pelos valores de NSE obtidos pelo conjunto de combinações dos parâmetros nos períodos de calibração e validação de cada estação fluviométrica, apresentados na Figura 7.

Figura 7. Qualidade do ajuste do conjunto de parâmetros calibrados, representada pelo boxplot dos valores de NSE



3.3. Calibração e validação de modelo de Rede Neural Artificial

Diferentemente dos outros modelos utilizados, as redes neurais são do tipo data-driven, ou seja, que não se preocupam em explicar os processos envolvidos. Em vez disso, as redes neurais procuram uma relação numérica entre os dados de entrada (inputs) com os dados de saída (outputs). Neste tipo de modelo, a compreensão dos fenômenos envolvidos determina a seleção dos inputs. Os modelos *data-driven* são bastante flexíveis e, apesar de sua performance depender da disponibilidade dos dados, requerem muito menos tempo para seu desenvolvimento, permitindo sua aplicação em tempo real e apresentando bons resultados para previsão de vazão (Govindaraju, 2013).

Foi utilizada para a regionalização das vazões uma rede neural do tipo *Feed Forward* (FFNN), também conhecida como *Perceptron* multicamadas (MLP, do inglês: *Multilayer Perceptron*). Seu

objetivo é aproximar uma função f^* , tal que: $y = f^*(x)$ para x sendo o conjunto de dados de entrada $(x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, x_n)$. Podemos representar a FFNN com a expressão $y = f(x; \theta)$, sendo θ o conjunto de pesos sinápticos $(W^{(1)}, W^{(2)}, \dots, W^{(n-1)}, W^{(n)})$ que melhor aproximam a função.

Após testes preliminares, foram selecionados, como inputs, as seguintes variáveis: três meses precedentes de precipitação; área da bacia (A), comprimento total de drenagem (CTD), *Curve Number* (CN) e porção da bacia no leito rochoso cristalino (Cr).

A arquitetura da rede foi composta por 2 camadas ocultas com 50 neurônios cada.

Para otimizar o valor dos pesos, a fim de calibrar o modelo, aproximando o output às vazões medidas, foi utilizada a técnica conhecida por *Backpropagation*, para a qual os pesos são ajustados da camada de saída em direção à camada de entrada, passando pelas camadas ocultas. Esta abordagem, baseada no método do Gradiente Descendente.

O modelo é calibrado de maneira regional, para o conjunto de bacias com dados, ou seja, as bacias das estações fluviométricas, podendo ser aplicado na sequência para a estimativa de vazões nas bacias afluentes aos açudes. Como forma de validação do modelo foi adotada uma estratégia de validação cruzada, para a qual o modelo é calibrado sucessivas vezes, deixando, a cada vez, uma das bacias fora do conjunto de dados para a calibração, como se esta não contasse com dados de vazão. Assim, o modelo calibrado é usado para a estimar a vazão na bacia deixada de fora, a cada vez, e, com os dados dessa bacia, a estimativa de vazão é avaliada. O processo de validação cruzada resultou em NSE médio em torno de 0,7.

4. MODELAGEM HIDROLÓGICA EM BACIAS SEM DADOS

Uma vez modelado o processo chuva-vazão nas bacias com dados fluviométricos, pode-se utilizar alguma estratégia de regionalização para levar informação dessas bacias para aquelas afluentes aos açudes, as quais não possuem dados de vazão medidos diretamente.

Dentre as estratégias possíveis de regionalização, uma delas considera tomar as características fisiográficas para comparar as bacias, produzindo um critério para a transferência de informação das bacias com dados para aquelas sem dados. Diferentes formas de regionalização, seguindo esse mesmo princípio, foram avaliadas nesse estudo.

Para cada um dos 155 açudes monitorados pela COGERH, considerou-se a sua bacia incremental, como bacia receptora de informação no processo de regionalização. Define-se bacia incremental de um reservatório como a área da bacia afluente a esse reservatório que não é controlada pelos reservatórios a montante, dentro de uma determinada rede de reservatórios de interesse para o estudo. Procedendo desta forma, após a regionalização da informação hidrológica, o efeito da presença dos reservatórios a montante pode ser incluído explicitamente na análise ao se considerar a simulação da rede.

4.1. Regionalização de Parâmetros do Modelo Hidrológico Conceitual

Os parâmetros do modelo conceitual, calibrados para as bacias das estações fluviométricas, podem ser usados para inferir os parâmetros nas bacias incrementais dos açudes. Três modelos de regionalização dos parâmetros foram testados:

- a) Uma regionalização baseada no método *K-Nearest-Neighbours* (KNN).
- b) Uma regionalização baseada em um modelo linear, aqui chamada (ML1), desenvolvida em estudo anterior para bacias cearenses.
- c) Uma outra regionalização baseada em modelo linear, aqui chamada (ML2), desenvolvida em estudo anterior para bacias cearenses.

4.1.1. Regionalização KNN

Pelo método do KNN, cada bacia incremental é comparada às bacias das estações fluviométricas, sendo identificadas aquelas mais similares, em função das características fisiográficas. Assim, os parâmetros calibrados para as bacias das estações fluviométricas com bacias similares são emprestados para as bacias incrementais dos açudes. Como medida para avaliar se duas bacias são

similares, uma ideia inicial é adotar o inverso da distância euclidiana no espaço das características fisiográficas reduzidas, como apresentado na equação:

$$S_{(a,b)} = 1/D_{E(a,b)} = 1/\sqrt{\sum_{i=1}^n (c_i^a - c_i^b)^2}$$

Onde $S_{(a,b)}$ é a medida de similaridade preliminar entre duas bacias quaisquer a e b .
 $D_{E(a,b)}$ é a distância euclidiana entre as bacias a e b .

c_i^a e c_i^b representam o valor reduzido da característica i para as bacias a e b , respectivamente.

n é o número de características fisiográficas consideradas ($n = 6$).

Entende-se aqui por variável reduzida a variável após ser subtraída a média e dividida pelo desvio padrão do conjunto de observações dessa variável.

Tendo em vista que cada característica fisiográfica possui sua própria relevância na medida de similaridade entre as bacias, considerou-se adicionar pesos às características, obtendo como medida de similaridade:

$$S_{w(a,b)} = 1/D_{E_w(a,b)} = 1/\sqrt{\sum_{i=1}^n [w_i(c_i^a - c_i^b)]^2}$$

Onde $S_{w(a,b)}$ é a medida de similaridade entre duas bacias quaisquer a e b , considerando a relevância das características.

$D_{E_w(a,b)}$ é a distância euclidiana ponderada entre as bacias a e b .

w_i é o peso da característica i .

c_i^a e c_i^b representam o valor reduzido (subtraída a média e dividido pelo desvio padrão) da característica i para as bacias a e b , respectivamente.

n é o número de características fisiográficas consideradas ($n = 6$).

Para definir os pesos de cada característica fisiográfica, foi aplicado um modelo de regressão linear múltipla entre as características fisiográficas e a vazão específica de longo prazo. A hipótese adotada é de que as características mais relevantes para explicar regionalmente a variabilidade da vazão específica média sejam também as mais relevantes para explicar a similaridade e transferências de parâmetros entre bacias. Assim, os coeficientes da regressão linear foram tomados como os pesos para a medida de similaridade.

A regressão linear foi estabelecida considerando os valores reduzidos da vazão específica de longo prazo (q) e das características fisiográficas. Incluiu-se como variável preditora da vazão específica, além das características utilizadas para a medida de similaridade, a precipitação média (P) sobre as bacias. A equação linear resultante da regressão foi:

$$q = 0.325\underline{Crist} - 0.020\underline{Kc} - 0.096\underline{DD} - 0.208\underline{CAD} - 0.176\underline{Decliv} + 0.181\underline{CN} + 1.003\underline{P}$$

Onde o subscrito representa que a variável foi reduzida (subtraída da média e dividida pelo desvio padrão).

Usando a medida de similaridade com os pesos das características, pôde-se definir, para cada bacia incremental, a bacia de estação fluviométrica mais similar. Assim, adotam-se as 1000 combinações de parâmetros calibrados na estação fluviométrica como parâmetros a serem utilizados na estimativa de vazão da bacia incremental. No caso de estimativa determinística das afluições, ou seja, sem a consideração da incerteza, a mediana dos 1000 parâmetros foi adotada.

Foram testadas igualmente estratégias considerando as três e, também as cinco, bacias de estações mais similares. No caso do uso de três bacias doadoras de parâmetros, selecionaram-se aleatoriamente 333 combinações de parâmetros de cada uma das bacias doadoras para compor um conjunto de 999 combinações parâmetros na bacia receptora (bacia incremental do açude). Já no caso com cinco bacias doadoras, cada bacia contribuiu com 200 combinações selecionadas aleatoriamente.

Para comparar as metodologias com um, três e cinco bacias doadoras (1BD, 3BD e 5BD) e validar a regionalização KNN dos parâmetros, utilizaram-se as próprias bacias das estações fluviométricas, em um esquema de validação cruzada. Uma por vez, as bacias das estações foram tratadas como bacias não monitoradas (sem parâmetros calibrados) e tiveram seus parâmetros estimados pela regionalização KNN, ou seja, considerando os parâmetros das bacias das estações mais similares, dentre as demais bacias de estação. Obtidos os parâmetros regionalizados, estes foram usados para o cálculo das vazões, que foram, por sua vez, comparadas com às vazões observadas na bacia. Esse processo de validação não seria possível diretamente nas bacias incrementais dos açudes, já que estas não possuem vazões observadas para comparação.

A Figura 8 e a Figura 9 mostram o valor do NSE para as vazões geradas pelos parâmetros regionalizados, bem como para aquelas obtidas com os parâmetros calibrados na bacia. Na Figura 8 esse resultado é apresentado por estação fluviométrica, enquanto na Figura 9 é mostrado de forma agregada. Em todos os casos a comparação vazão modela *versus* vazão observada foi feita considerando o período definido para a validação.

Figura 8. Qualidade do ajuste do conjunto de parâmetros regionalizados e calibrados, representada pelo *boxplot* dos valores de NSE para cada bacia de estação fluviométrica

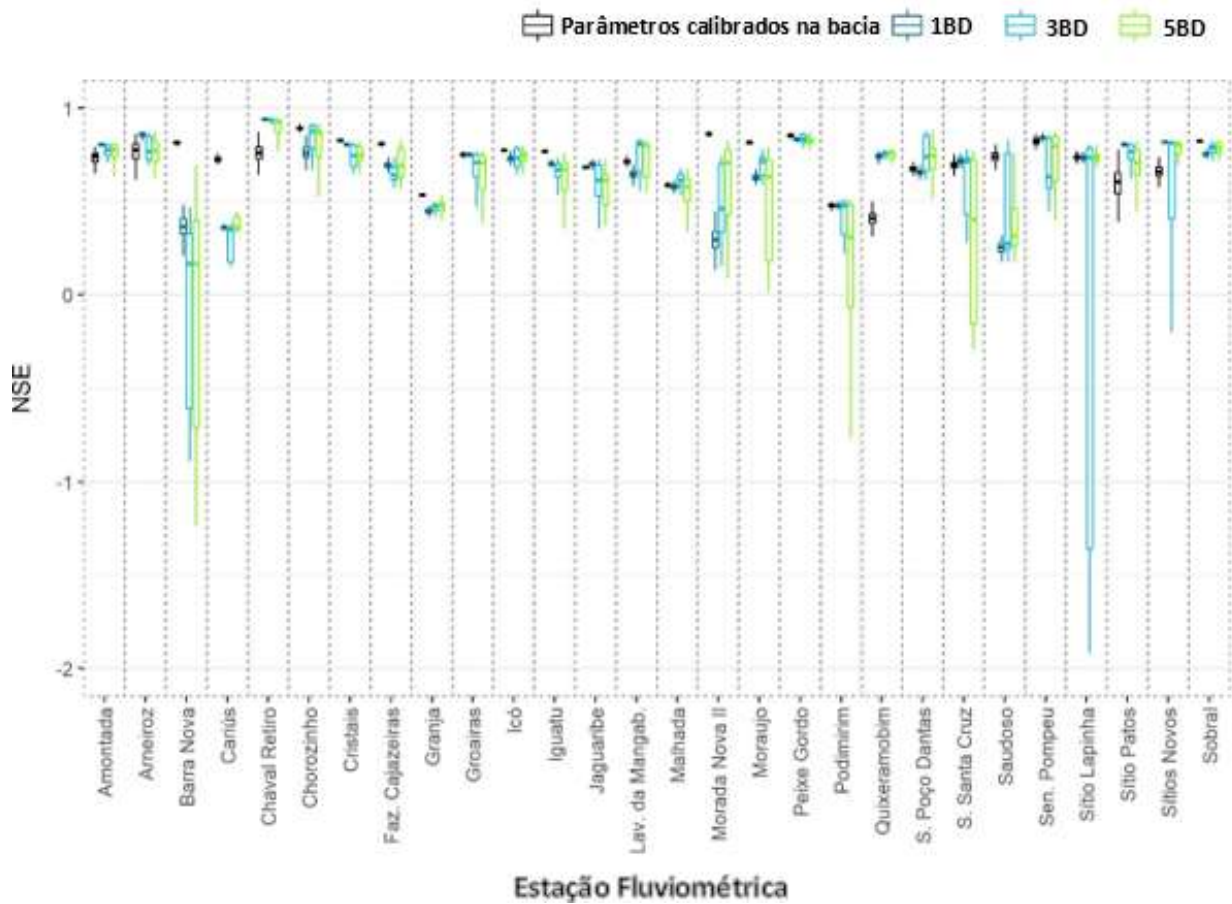
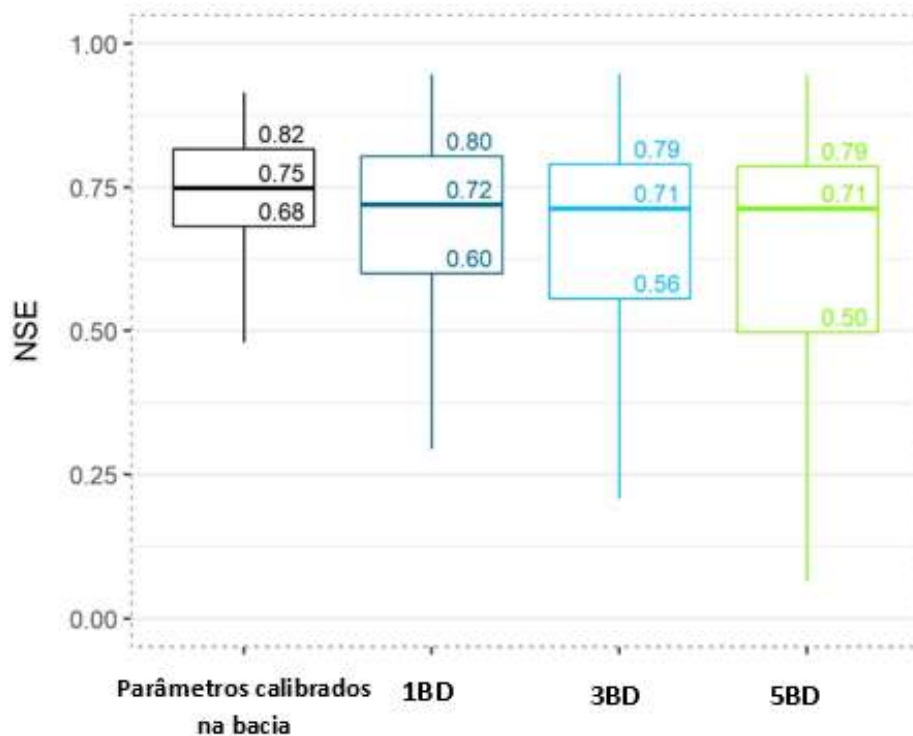


Figura 9. Qualidade do ajuste do conjunto de parâmetros regionalizados e calibrados, representada pelo *boxplot* dos valores de NSE de maneira agregada



Os resultados mostram que a regionalização KNN com apenas uma bacia doadora apresenta não apenas performance ligeiramente superior, mas também menor dispersão das performances em função da incerteza dos parâmetros. Por essa razão, optou-se pela regionalização com apenas uma bacia doadora.

Uma descrição mais detalhada desse processo de regionalização e da sua validação pode ser consultado no artigo científico que resultou desse estudo (i.e. ESTACIO *et al.*, 2021).

A aplicação da regionalização KNN para as bacias incrementais dos açudes, permitiu identificar a bacia de estação fluviométrica mais similar de cada uma das 155 bacias incrementais. Essa relação está apresentada na Tabela 7, com os parâmetros medianos regionalizados, ou seja, transferidos das bacias das estações para as bacias incrementais.

Tabela 7. Parâmetros estimados para as bacias incrementais dos açudes por regionalização KNN com as respectivas estações fluviométricas doadoras de parâmetros

Reservatório		Estação Fluviométrica mais similar		Parâmetros (mediana)			
ID	Nome	ID	Nome	SAT	PES	CREC	K
78	Acarape do Meio	35740000	Barra Nova	1906	4,5	1,0	3,7
1	Acaraú Mirim	35170000	Granja	1347	3,1	0,3	4,0
32	Adauto Bezerra	35210000	Fazenda Cajazeiras	650	3,1	1,0	3,6
45	Amanary	35650000	Sítios Novos	1763	4,4	0,5	3,8
112	Angicos	35170000	Granja	1347	3,1	0,3	4,0
234	Aracoiaba	36130000	Cariús	707	4,1	0,5	3,6
31	Araras	36390000	Peixe Gordo	908	4,8	0,8	3,8
240	Arneiroz II	36160000	Iguatu	1171	3,4	0,2	3,9
83	Arrebata	35275000	Sobral	854	3,5	0,7	4,1
47	Atalho	34740000	Saudoso	2115	3,4	1,8	1,5
49	Ayres de Sousa	35170000	Granja	1347	3,1	0,3	4,0
2	Banabuiú	36390000	Peixe Gordo	908	4,8	0,8	3,8
163	Barra Velha	36070000	Sítio Patos	777	3,6	0,6	3,9
202	Barragem do Batalhão	36045000	Malhada	1366	3,5	0,2	3,5
173	Batente	36045000	Malhada	1366	3,5	0,2	3,5
177	Benguê	36270000	Lavras Da Mangabeira	1645	4,5	0,1	3,7
64	Bonito	36290000	Icó	1499	3,8	0,1	3,6
125	Broco	36070000	Sítio Patos	777	3,6	0,6	3,9
170	Cachoeira	35275000	Sobral	854	3,5	0,7	4,1
217	Caldeirões	35170000	Granja	1347	3,1	0,3	4,0
74	Canafistula	35650000	Sítios Novos	1763	4,4	0,5	3,8
127	Canoas	36125000	Sítio Poço Dantas	1560	3,6	0,3	3,3
33	Capitão Mor	36070000	Sítio Patos	777	3,6	0,6	3,9
65	Carão	36470000	Senador Pompeu	1338	2,9	0,6	3,6
236	Carmina	36470000	Senador Pompeu	1338	2,9	0,6	3,6
53	Carnaubal	36260000	Sítio Santa Cruz	1697	5,0	0,1	3,8

Tabela 7. Parâmetros estimados para as bacias incrementais dos açudes por regionalização KNN com as respectivas estações fluviométricas doadoras de parâmetros (Continuação)

Reservatório		Estação Fluviométrica mais similar		Parâmetros (mediana)			
ID	Nome	ID	Nome	SAT	PES	CREC	K
194	Castanhão	36045000	Malhada	1366	3,5	0,2	3,5
97	Castro	35650000	Sítios Novos	1763	4,4	0,5	3,8
223	Catucinzenta	34740000	Saudoso	2115	3,4	1,8	1,5
158	Cauhipe	35650000	Sítios Novos	1763	4,4	0,5	3,8
3	Caxitoré	35650000	Sítios Novos	1763	4,4	0,5	3,8
4	Cedro	35260000	Groaíras	960	3,5	0,6	4,0
84	Cipoda	36020000	Arneiroz	551	5,2	2,4	4,4
220	Cocó	36210000	Sítio Lapinha	2824	4,2	0,1	3,2
133	Colina	36130000	Cariús	707	4,1	0,5	3,6
34	Cupim	36070000	Sítio Patos	777	3,6	0,6	3,9
197	Curral Velho	36250000	Podimirim	1904	4,8	0,1	3,2
178	Desterro	36070000	Sítio Patos	777	3,6	0,6	3,9
60	Diamante	35650000	Sítios Novos	1763	4,4	0,5	3,8
215	Diamantino II	36250000	Podimirim	1904	4,8	0,1	3,2
134	Do Coronel	35260000	Groaíras	960	3,5	0,6	4,0
5	Edson Queiroz	35275000	Sobral	854	3,5	0,7	4,1
30	Ema	35650000	Sítios Novos	1763	4,4	0,5	3,8
44	Escuridão	35125000	Moraújo	1593	2,5	0,4	3,5
208	Facundo	35880000	Chorozinho	1021	3,5	0,4	3,7
239	Faé	36020000	Arneiroz	551	5,2	2,4	4,4
59	Farias de Sousa	35650000	Sítios Novos	1763	4,4	0,5	3,8
6	Favelas	36070000	Sítio Patos	777	3,6	0,6	3,9
212	Figueiredo	35275000	Sobral	854	3,5	0,7	4,1
172	Flor do Campo	36290000	Icó	1499	3,8	0,1	3,6
119	Fogareiro	35275000	Sobral	854	3,5	0,7	4,1
51	Forquilha	35275000	Sobral	854	3,5	0,7	4,1
72	Forquilha II	36070000	Sítio Patos	777	3,6	0,6	3,9
77	Frios	36020000	Arneiroz	551	5,2	2,4	4,4
210	Gameleira	36125000	Sítio Poço Dantas	1560	3,6	0,3	3,3
169	Gangorra	36270000	Lavras Da Mangabeira	1645	4,5	0,1	3,7
95	Gavião	36130000	Cariús	707	4,1	0,5	3,6
7	General Sampaio	35260000	Groaíras	960	3,5	0,6	4,0
1123	Gerardo Atimbone	36070000	Sítio Patos	777	3,6	0,6	3,9
205	Germinal	36130000	Cariús	707	4,1	0,5	3,6
36	Gomes	35260000	Groaíras	960	3,5	0,6	4,0
211	Itapajé	35740000	Barra Nova	1906	4,5	1,0	3,7
244	Itapebussu	36130000	Cariús	707	4,1	0,5	3,6
180	Itaúna	36270000	Lavras Da Mangabeira	1645	4,5	0,1	3,7
69	Jaburu I	34740000	Saudoso	2115	3,4	1,8	1,5
52	Jaburu II	36070000	Sítio Patos	777	3,6	0,6	3,9

Tabela 7. Parâmetros estimados para as bacias incrementais dos açudes por regionalização KNN com as respectivas estações fluviométricas doadoras de parâmetros (Continuação)

Reservatório		Estação Fluviométrica mais similar		Parâmetros (mediana)			
ID	Nome	ID	Nome	SAT	PES	CREC	K
135	Jatobá	36260000	Sítio Santa Cruz	1697	5,0	0,1	3,8
216	Jatobá II	36290000	Icó	1499	3,8	0,1	3,6
171	Jenipapeiro	36390000	Peixe Gordo	908	4,8	0,8	3,8
1120	Jenipapeiro II	36290000	Icó	1499	3,8	0,1	3,6
213	Jenipapo	36470000	Senador Pompeu	1338	2,9	0,6	3,6
121	Jerimum	35260000	Groaíras	960	3,5	0,6	4,0
147	João Luís	36260000	Sítio Santa Cruz	1697	5,0	0,1	3,8
28	Joaquim Távora	35210000	Fazenda Cajazeiras	650	3,1	1,0	3,6
189	Junco	35880000	Chorozinho	1021	3,5	0,4	3,7
63	Lima Campos	36260000	Sítio Santa Cruz	1697	5,0	0,1	3,8
199	Macacos	35650000	Sítios Novos	1763	4,4	0,5	3,8
164	Madeiro	36470000	Senador Pompeu	1338	2,9	0,6	3,6
235	Malcozinhado	34740000	Saudoso	2115	3,4	1,8	1,5
201	Mamoeiro	36390000	Peixe Gordo	908	4,8	0,8	3,8
8	Manoel Balbino	35260000	Groaíras	960	3,5	0,6	4,0
1124	Maranguapinho	35880000	Chorozinho	1021	3,5	0,4	3,7
126	Martinópole	36070000	Sítio Patos	777	3,6	0,6	3,9
1119	Missi	35275000	Sobral	854	3,5	0,7	4,1
161	Mons. Tabosa	35880000	Chorozinho	1021	3,5	0,4	3,7
206	Monte Belo	34740000	Saudoso	2115	3,4	1,8	1,5
61	Mundaú	35740000	Barra Nova	1906	4,5	1,0	3,7
168	Muquém	36020000	Arneiroz	551	5,2	2,4	4,4
26	Nova Floresta	35210000	Fazenda Cajazeiras	650	3,1	1,0	3,6
155	Olho d'Água	35880000	Chorozinho	1021	3,5	0,4	3,7
9	Orós	36290000	Icó	1499	3,8	0,1	3,6
80	Pacajus	36290000	Icó	1499	3,8	0,1	3,6
88	Pacoti	36320000	Jaguaribe	1133	4,3	0,4	3,6
89	Parambu	36290000	Icó	1499	3,8	0,1	3,6
56	Patos	35170000	Granja	1347	3,1	0,3	4,0
10	Patu	36580000	Morada Nova li	919	4,2	3,7	5,1
148	Pau Preto	36260000	Sítio Santa Cruz	1697	5,0	0,1	3,8
11	Pedras Brancas	36070000	Sítio Patos	777	3,6	0,6	3,9
179	Penedo	35880000	Chorozinho	1021	3,5	0,4	3,7
12	Pentecoste	36070000	Sítio Patos	777	3,6	0,6	3,9
192	Pesqueiro	35880000	Chorozinho	1021	3,5	0,4	3,7
167	Pirabibu	36125000	Sítio Poço Dantas	1560	3,6	0,3	3,3
27	Poço da Pedra	36250000	Podimirim	1904	4,8	0,1	3,2
67	Poço do Barro	36045000	Malhada	1366	3,5	0,2	3,5
90	Poço Verde	36470000	Senador Pompeu	1338	2,9	0,6	3,6
13	Pompeu Sobrinho	35275000	Sobral	854	3,5	0,7	4,1

Tabela 7. Parâmetros estimados para as bacias incrementais dos açudes por regionalização KNN com as respectivas estações fluviométricas doadoras de parâmetros (Continuação)

Reservatório		Estação Fluviométrica mais similar		Parâmetros (mediana)			
ID	Nome	ID	Nome	SAT	PES	CREC	K
82	Potiretama	36270000	Lavras Da Mangabeira	1645	4,5	0,1	3,7
14	Prazeres	35260000	Groaíras	960	3,5	0,6	4,0
62	Premuoca	35260000	Groaíras	960	3,5	0,6	4,0
79	Quandú	36470000	Senador Pompeu	1338	2,9	0,6	3,6
68	Quincoé	36470000	Senador Pompeu	1338	2,9	0,6	3,6
15	Quixabinha	35260000	Groaíras	960	3,5	0,6	4,0
16	Quixeramobim	35275000	Sobral	854	3,5	0,7	4,1
54	Realejo	36250000	Podimirim	1904	4,8	0,1	3,2
117	Riachão	36260000	Sítio Santa Cruz	1697	5,0	0,1	3,8
186	Riacho da Serra	35650000	Sítios Novos	1763	4,4	0,5	3,8
17	Riacho do Sangue	36390000	Peixe Gordo	908	4,8	0,8	3,8
174	Rivaldo de Carvalho	36070000	Sítio Patos	777	3,6	0,6	3,9
181	Rosário	35880000	Chorozinho	1021	3,5	0,4	3,7
21	S. Pedro Timbaúba	36070000	Sítio Patos	777	3,6	0,6	3,9
18	Salão	35275000	Sobral	854	3,5	0,7	4,1
166	Santa Maria	36290000	Icó	1499	3,8	0,1	3,6
55	Santa Maria de Aracatiaçu	35260000	Groaíras	960	3,5	0,6	4,0
233	Santo Antônio	35880000	Chorozinho	1021	3,5	0,4	3,7
50	Santo Antônio de Aracatiaçu	35260000	Groaíras	960	3,5	0,6	4,0
19	Santo Antônio de Russas	35950000	Cristais	696	4,5	2,5	4,9
141	São Domingos	36070000	Sítio Patos	777	3,6	0,6	3,9
190	São Domingos II	36470000	Senador Pompeu	1338	2,9	0,6	3,6
39	São José I	36520000	Quixeramobim	640	3,6	0,7	3,7
85	São José II	36390000	Peixe Gordo	908	4,8	0,8	3,8
185	São José III	36125000	Sítio Poço Dantas	1560	3,6	0,3	3,3
20	São Mateus	35370000	Amontada	761	3,0	4,6	4,5
81	São Vicente	35260000	Groaíras	960	3,5	0,6	4,0
99	Serafim Dias	35125000	Moraújo	1593	2,5	0,4	3,5
159	Sítios Novos	35650000	Sítios Novos	1763	4,4	0,5	3,8
22	Sobral	36130000	Cariús	707	4,1	0,5	3,6
160	Sousa	36070000	Sítio Patos	777	3,6	0,6	3,9
66	Sucesso	36390000	Peixe Gordo	908	4,8	0,8	3,8
254	Taquara	36290000	Icó	1499	3,8	0,1	3,6
75	Tatajuba	36070000	Sítio Patos	777	3,6	0,6	3,9
92	Tejuçuoca	36070000	Sítio Patos	777	3,6	0,6	3,9
23	Thomás Osterne	36260000	Sítio Santa Cruz	1697	5,0	0,1	3,8
111	Tigre	36390000	Peixe Gordo	908	4,8	0,8	3,8
132	Tijuquinha	35880000	Chorozinho	1021	3,5	0,4	3,7
96	Trapiá II	36520000	Quixeramobim	640	3,6	0,7	3,7
129	Trapiá III	35275000	Sobral	854	3,5	0,7	4,1

Tabela 7. Parâmetros estimados para as bacias incrementais dos açudes por regionalização KNN com as respectivas estações fluviométricas doadoras de parâmetros (Continuação)

Reservatório		Estação Fluviométrica mais similar		Parâmetros (mediana)			
ID	Nome	ID	Nome	SAT	PES	CREC	K
24	Trici	36045000	Malhada	1366	3,5	0,2	3,5
122	Trussu	36160000	Iguatu	1171	3,4	0,2	3,9
58	Tucunduba	35275000	Sobral	854	3,5	0,7	4,1
162	Ubalzinho	36130000	Cariús	707	4,1	0,5	3,6
191	Umari	35275000	Sobral	854	3,5	0,7	4,1
110	Valério	36210000	Sítio Lapinha	2824	4,2	0,1	3,2
70	Várzea da Volta	36470000	Senador Pompeu	1338	2,9	0,6	3,6
25	Várzea do Boi	36160000	Iguatu	1171	3,4	0,2	3,9
130	Vieirão	35125000	Moraújo	1593	2,5	0,4	3,5

4.1.2. Regionalização ML1

A regionalização dos parâmetros por meio de um modelo linear se assemelha à metodologia anterior ao estabelecer um mapeamento entre as características fisiográficas das bacias e os parâmetros do modelo hidrológico, usando as bacias das estações fluviométricas para inferir sobre esse mapeamento.

No entanto, diferentemente da regionalização KNN, supõe-se aqui uma relação linear direta entre as características das bacias e os parâmetros. Em estudo anterior, desenvolvido em dissertação de mestrado (ALEXANDRE, 2005), que comparou diversas técnicas de regionalização, obteve-se como método mais robusto as seguintes relações lineares:

$$SAT = 3213,4 - 22,9Crist$$

$$PES = -0,888 + 0,0034P + 0,041CAD$$

Com *Crist* em percentual (entre 0% e 100%), *P* em mm/ano e *CAD* em mm.

Para o caso de aplicação do equacionamento acima com os dados das características apresentados no ANEXO 3 é necessário atenção para a conversão de unidades, segundo o considerado em cada estudo.

Alexandre (2005) considerou o valor de CREC igual a zero, em função do estoque subterrâneo em geral desprezível; enquanto o valor de K, sendo indiferente quando CREC=0, foi definido como um valor qualquer. No caso, foi definido K=3.

Com essas relações lineares, pode-se, a partir das características fisiográficas das bacias incrementais, estimar os seus parâmetros, como apresentado na Tabela 8.

Uma descrição mais completa do estudo anterior que levou as essas relações lineares está disponibilizado no ANEXO 6.

Tabela 8: Parâmetros estimados para as bacias incrementais dos açudes por regionalização ML1.

Reservatório		Parâmetros		Reservatório		Parâmetros	
ID	Nome	SAT	PES	ID	Nome	SAT	PES
78	Acarape do Meio	923	7,3	164	Madeiro	923	6,0
1	Acaraú Mirim	1067	5,1	235	Malcozinhado	3213	6,0
32	Adauto Bezerra	923	6,4	201	Mamoeiro	1143	4,4
45	Amanary	923	5,2	8	Manoel Balbino	923	4,1
228	Amarelas	3129	5,6	1124	Maranguapinho	989	7,5
112	Angicos	1228	5,6	126	Martinópolis	1097	5,1
234	Aracoiaba	1114	7,3	1119	Missi	923	4,2
31	Araras	1231	4,9	161	Mons. Tabosa	923	5,7
240	Arneiroz II	1120	4,6	206	Monte Belo	2793	5,2
83	Arrebita	923	4,3	61	Mundaú	923	5,9
47	Atalho	2765	5,3	168	Muquém	923	5,4
49	Ayres de Sousa	1305	4,6	26	Nova Floresta	944	4,6
2	Banabuiú	999	4,8	155	Olho d'Água	945	6,5
163	Barra Velha	1014	4,0	9	Orós	1362	5,1
202	Barragem do Batalhão	1314	4,7	80	Pacajus	1485	5,4
173	Batente	1305	5,3	88	Pacoti	1212	6,2
177	Benguê	1659	4,5	89	Parambu	1538	5,2
64	Bonito	1498	5,8	56	Patos	1290	3,9
125	Broco	972	3,7	10	Patu	950	4,4
170	Cachoeira	923	4,8	148	Pau Preto	2108	5,1
217	Caldeirões	1296	3,7	11	Pedras Brancas	1027	4,6
74	Canafístula	923	5,0	179	Penedo	923	6,8
127	Canoas	1487	5,6	12	Pentecoste	997	4,6
33	Capitão Mor	923	4,5	192	Pesqueiro	923	7,2
65	Carão	923	4,7	167	Pirabibu	1087	5,7
236	Carmina	923	4,8	27	Poço da Pedra	2149	5,0
53	Carnaubal	1828	4,8	67	Poço do Barro	1303	4,7
194	Castanhão	1343	4,8	90	Poço Verde	930	6,0
97	Castro	923	5,4	13	Pompeu Sobrinho	923	4,5
223	Catucinzenta	3211	6,2	82	Potiretama	1694	4,5
158	Cauhipe	984	5,7	14	Prazeres	944	3,4
3	Caxitoré	923	4,2	62	Premuoca	924	4,8
4	Cedro	923	4,0	79	Quandú	923	5,9
84	Cipoada	923	4,8	68	Quincoé	923	5,8
220	Cocó	1583	8,2	15	Quixabinha	932	3,2
133	Colina	1455	5,1	16	Quixeramobim	988	4,0
34	Cupim	923	4,0	54	Realejo	2151	4,8
197	Curral Velho	2176	4,8	117	Riachão	1620	6,9
178	Desterro	923	4,4	186	Riacho da Serra	923	4,6
60	Diamante	923	6,0	17	Riacho do Sangue	1260	4,8
215	Diamantino II	1872	5,1	174	Rivaldo de Carvalho	923	4,6

Tabela 8: Parâmetros estimados para as bacias incrementais dos açudes por regionalização ML1. (Continuação)

Reservatório		Parâmetros		Reservatório		Parâmetros	
ID	Nome	SAT	PES	ID	Nome	SAT	PES
134	Do Coronel	923	3,4	181	Rosário	945	6,6
5	Edson Queiroz	1047	4,2	21	S. Pedro Timbaúba	980	4,4
30	Ema	923	4,9	18	Salão	1153	4,0
44	Escuridão	923	4,2	166	Santa Maria	1371	5,4
208	Facundo	923	5,1	55	Santa Maria de Aracatiaçu	923	3,4
239	Faé	923	5,4	233	Santo Antônio	923	6,0
59	Farias de Sousa	923	5,1	50	Santo Antônio de Aracatiaçu	1090	3,8
6	Favelas	924	4,5	19	Santo Antônio de Russas	1144	5,2
212	Figueiredo	1109	4,7	141	São Domingos	923	4,0
172	Flor do Campo	1364	5,2	190	São Domingos II	923	7,0
119	Fogareiro	958	4,1	39	São José I	923	3,8
51	Forquilha	1006	4,2	85	São José II	1262	5,3
72	Forquilha II	923	4,0	185	São José III	1336	5,8
77	Frios	923	5,6	20	São Mateus	923	4,1
210	Gameleira	1335	6,0	81	São Vicente	924	3,2
169	Gangorra	1612	5,8	99	Serafim Dias	923	4,2
95	Gavião	1261	7,7	159	Sítios Novos	1084	5,5
7	General Sampaio	940	3,9	22	Sobral	1620	5,4
1123	Gerardo Atimbone	1111	3,9	160	Sousa	923	4,3
205	Germinal	923	8,0	66	Sucesso	1079	4,7
36	Gomes	927	3,2	254	Taquara	1413	6,3
211	Itapajé	923	5,7	75	Tatajuba	1055	4,1
244	Itapebussu	1294	6,3	92	Tejuçuoca	923	4,4
180	Itaúna	1763	5,2	23	Thomás Osterne	2244	5,7
69	Jaburu I	3213	6,2	111	Tigre	986	4,9
52	Jaburu II	1004	4,2	132	Tijuquinha	923	7,7
135	Jatobá	1679	5,5	96	Trapiá II	923	3,9
216	Jatobá II	1562	5,7	129	Trapiá III	923	4,8
171	Jenipapeiro	1306	4,8	24	Trici	1251	4,9
1120	Jenipapeiro II	1392	4,6	122	Trussu	952	5,2
213	Jenipapo	923	6,6	58	Tucunduba	968	4,7
121	Jerimum	923	3,8	162	Ubalzinho	1006	7,0
147	João Luís	1624	5,2	191	Umari	984	4,3
28	Joaquim Távora	923	5,0	110	Valério	2199	6,0
189	Junco	965	6,5	70	Várzea da Volta	923	5,2
63	Lima Campos	1896	5,8	25	Várzea do Boi	1125	4,2
199	Macacos	923	4,3	130	Vieirão	923	3,8

4.1.3. Regionalização ML2

De maneira similar a metodologia anterior, um estudo em 2013, numa parceria entre COGERH, UFC e FCPC, propôs novas relações lineares para SAT e PES:

$$SAT = 3021,6 - 2026,7Crist$$

$$PES = 5,4 + 42,3Decliv - 3,8DD - 2,5Crist$$

Com *Crist* em valores absoluto (entre 0 e 1), *Decliv* também em valores absolutos (entre 0 e ∞) e *DD* em km^{-1} .

Como na versão anterior do estudo, o valor de CREC foi definido como igual a zero e K foi definido igual a 3. A Tabela 9 apresenta os parâmetros calculados pelas relações acima para as bacias incrementais dos açudes.

Uma descrição mais detalha do modelo de regionalização ML2 pode ser consultada no ANEXO 7.

Tabela 9: Parâmetros estimados para as bacias incrementais dos açudes por regionalização ML2.

Reservatório		Parâmetros		Reservatório		Parâmetros	
ID	Nome	SAT	PES	ID	Nome	SAT	PES
78	Acarape do Meio	995	10,0	164	Madeiro	995	3,2
1	Acaraú Mirim	1122	5,2	235	Malcozinhado	3021	5,0
32	Adauto Bezerra	995	2,4	201	Mamoeiro	1189	2,7
45	Amanary	995	2,8	8	Manoel Balbino	995	4,1
228	Amarelas	2947	4,6	1124	Maranguapinho	1053	6,8
112	Angicos	1264	4,1	126	Martinópolis	1149	2,6
234	Aracoiaba	1163	8,0	1119	Missi	995	4,6
31	Araras	1267	2,0	161	Mons. Tabosa	995	2,2
240	Arneiroz II	1169	2,3	206	Monte Belo	2650	5,7
83	Arrebita	995	0,8	61	Mundaú	995	10,0
47	Atalho	2624	5,0	168	Muquém	995	3,2
49	Ayres de Sousa	1332	1,9	26	Nova Floresta	1014	0,3
2	Banabuiú	1062	2,0	155	Olho d'Água	1014	4,0
163	Barra Velha	1075	2,4	9	Orós	1383	4,0
202	Barragem do Batalhão	1341	1,7	80	Pacajus	1492	3,1
173	Batente	1333	1,9	88	Pacoti	1250	4,9
177	Benguê	1646	3,2	89	Parambu	1539	3,6
64	Bonito	1504	4,5	56	Patos	1319	3,0
125	Broco	1038	1,8	10	Patu	1018	1,4
170	Cachoeira	995	3,6	148	Pau Preto	2043	4,2
217	Caldeirões	1325	3,7	11	Pedras Brancas	1086	2,1
74	Canafístula	995	2,8	179	Penedo	995	5,8
127	Canoas	1494	4,4	12	Pentecoste	1060	3,1
33	Capitão Mor	995	4,0	192	Pesqueiro	995	9,7

Tabela 9: Parâmetros estimados para as bacias incrementais dos açudes por regionalização ML2. (Continuação)

Reservatório		Parâmetros		Reservatório		Parâmetros	
ID	Nome	SAT	PES	ID	Nome	SAT	PES
65	Carão	995	5,4	167	Pirabibu	1140	1,6
236	Carmina	995	6,8	27	Poço da Pedra	2079	4,2
53	Carnaubal	1795	4,6	67	Poço do Barro	1330	0,9
194	Castanhão	1366	2,4	90	Poço Verde	1000	5,6
97	Castro	995	2,9	13	Pompeu Sobrinho	995	4,0
223	Catucinzena	3019	5,1	82	Potiretama	1677	0,9
158	Cauhipe	1048	4,9	14	Prazeres	1013	3,5
3	Caxitoré	995	6,7	62	Premuoca	995	2,3
4	Cedro	995	3,9	79	Quandú	995	10,0
84	Cipoada	995	0,3	68	Quincoé	995	2,7
220	Cocó	1578	4,2	15	Quixabinha	1002	3,4
133	Colina	1465	4,9	16	Quixeramobim	1052	0,9
34	Cupim	995	2,4	54	Realejo	2081	6,4
197	Curral Velho	2104	2,9	117	Riachão	1612	4,5
178	Desterro	995	2,2	186	Riacho da Serra	995	2,0
60	Diamante	995	3,7	17	Riacho do Sangue	1293	1,5
215	Diamantino II	1835	2,8	174	Rivaldo de Carvalho	995	2,9
134	Do Coronel	995	3,6	181	Rosário	1014	6,2
5	Edson Queiroz	1104	2,9	21	S. Pedro Timbaúba	1045	1,2
30	Ema	995	5,1	18	Salão	1198	2,3
44	Escuridão	995	8,6	166	Santa Maria	1391	3,1
208	Facundo	995	3,2	55	Santa Maria de Aracatiaçu	995	4,5
239	Faé	995	1,6	233	Santo Antônio	995	8,1
59	Farias de Sousa	995	2,4	50	Santo Antônio de Aracatiaçu	1143	3,4
6	Favelas	995	2,7	19	Santo Antônio de Russas	1190	2,0
212	Figueiredo	1159	1,3	141	São Domingos	995	1,7
172	Flor do Campo	1384	2,8	190	São Domingos II	995	4,7
119	Fogareiro	1026	2,0	39	São José I	995	3,9
51	Forquilha	1068	0,7	85	São José II	1295	1,6
72	Forquilha II	995	2,5	185	São José III	1360	3,0
77	Frios	995	4,1	20	São Mateus	995	5,0
210	Gameleira	1359	5,3	81	São Vicente	995	2,2
169	Gangorra	1604	2,1	99	Serafim Dias	995	4,5
95	Gavião	1293	4,9	159	Sítios Novos	1137	2,6
7	General Sampaio	1010	5,8	22	Sobral	1611	9,9
1123	Gerardo Atimbone	1161	2,1	160	Sousa	995	2,5
205	Germinal	995	9,7	66	Sucesso	1133	2,2
36	Gomes	998	3,6	254	Taquara	1428	3,2
211	Itapajé	995	10,0	75	Tatajuba	1111	4,5
244	Itapebussu	1323	10,0	92	Tejuçuoca	995	2,4
180	Itaúna	1738	6,2	23	Thomás Osterne	2163	5,0

Tabela 9: Parâmetros estimados para as bacias incrementais dos açudes por regionalização ML2. (Continuação)

Reservatório		Parâmetros		Reservatório		Parâmetros	
ID	Nome	SAT	PES	ID	Nome	SAT	PES
69	Jaburu I	3022	4,9	111	Tigre	1050	1,9
52	Jaburu II	1066	1,9	132	Tijuquinha	995	9,5
135	Jatobá	1664	3,6	96	Trapiá II	995	1,3
216	Jatobá II	1560	4,2	129	Trapiá III	995	0,9
171	Jenipapeiro	1334	2,6	24	Trici	1285	2,1
1120	Jenipapeiro II	1410	4,0	122	Trussu	1020	3,5
213	Jenipapo	995	8,2	58	Tucunduba	1034	1,2
121	Jerimum	995	4,4	162	Ubaldinho	1068	4,1
147	João Luís	1614	2,7	191	Umari	1049	3,3
28	Joaquim Távora	995	0,1	110	Valério	2124	5,2
189	Junco	1032	6,5	70	Várzea da Volta	995	5,7
63	Lima Campos	1855	3,2	25	Várzea do Boi	1173	2,7
199	Macacos	995	6,4	130	Vieirão	995	4,7

4.2. Regionalização das Vazões com Rede Neural Artificial (RNA)

Como o modelo RNA incluiu como dados de entrada as características das bacias e é calibrado simultaneamente para o conjunto de bacias com dados, é esperado que para uma nova bacia, com características locais diferentes, o modelo seja capaz de estimar as vazões. Assim, da forma como é concebido, o modelo RNA é em si um modelo regional, de modo que a regionalização das vazões é feita de maneira acoplada ao processo de calibração e validação descrito na seção 3.3.

4.3. Estimativa das Vazões Incrementais Afluentes aos Reservatórios

Depois de estimados, por meio das técnicas de regionalização, os parâmetros das bacias incrementais dos açudes monitorados, foram calculadas, com o SMAP, as séries mensais de afluências produzidas nas bacias incrementais dos açudes, considerando o período 1910-2017. No modelo RNA as afluências incrementais são calculadas diretamente com os dados das bacias incrementais após a calibração do modelo regional.

As séries de afluências incrementais calculadas pelas diferentes estratégias de regionalização, isto é, KNN, ML1 e ML2 RNA, estão disponíveis no ANEXO 8.

Para o caso da regionalização KNN, os resultados mostrados no ANEXO 8 foram gerados considerando a mediana dos parâmetros. No entanto, além dos resultados apresentados no ANEXO 8, 1000 séries de vazões foram geradas para cada bacia incremental, uma para cada conjunto de parâmetros obtidos com o DREAM, considerado a incerteza dos parâmetros.

5. ANÁLISE DE QUALIDADE DA REGIONALIZAÇÃO

5.1. Identificação de Faixas de Ocorrência das Vazões Utilizando Técnicas de Aprendizado de Máquina

Dada a dificuldade de avaliar a real performance dos modelos de regionalização de vazão nas bacias sem dados, foi elaborado um método de avaliação partindo da premissa que os modelos de regionalização de vazão deveriam produzir lâminas escoadas médias semelhantes para bacias com características semelhantes, dentro dos limites de confiança. Assim, as vazões obtidas via regionalização poderiam ser verificadas por meio da identificação de faixas de ocorrência de vazão específica (ou de lâmina escoada) em função das características da bacia.

Para identificar tais faixas de ocorrência foram consideradas técnicas de regressão de Aprendizado de Máquina: Regressão Linear, Rede Neural e Árvore de Regressão. Foram considerados 3 tipos diferentes de Regressão Linear: regressão linear ordinária de mínimos quadrados (OLS), regressão linear elástica (ER) e regressão linear robusta (RR). Após a validação destes modelos de regressão, o intervalo de confiança da lâmina de escoamento médio é definido em função das características da bacia. Um modelo de regionalização de vazão foi considerado válido para determinada bacia se o seu coeficiente de escoamento médio estiver dentro da faixa de confiança dos modelos de regressão.

De forma semelhante à regionalização de vazões, os modelos de regressão para a avaliação das lâminas escoadas consistem em uma função ou modelo matemático para determinar a relação entre as características da bacia e sua lâmina escoada média por meio de. Essa relação é estimada para as bacias que possuem dados e estendida para as que não possuem dados.

Como entrada para a calibração dos modelos, foram consideradas as 38 bacias com dados e suas características presentes na Tabela 3, juntamente com o índice de aridez simplificado apresentado na Tabela 4.

5.1.1. Seleção de Variáveis

As técnicas de regressão linear Elastic e árvore de regressão, não necessitam de um processo prévio seleção de variáveis visto que isto é realizado durante a sua fase de calibração. Assim, para estas duas técnicas, a planilha completa foi utilizada como input da modelagem da lâmina escoada.

Para as técnicas de regressão linear ordinária e regressão robusta, visto que são de rápido tempo de processamento, o conjunto ótimo de variáveis explicativas foi definido por meio do teste de todas as combinações possíveis de variáveis. Desta forma foi encontrado como variáveis significantes:

- para a OLS: o índice de aridez, o perímetro da bacia, o comprimento total de drenagem, a porcentagem do solo em cristalino e o CN da bacia.
- para a RR: o índice de aridez, o perímetro da bacia, a área da bacia, a porcentagem do solo em cristalino e o CN da bacia.

Para a rede neural, visto o seu maior tempo de processamento, foi utilizada a técnica stepwise para encontrar as variáveis significativas, que foram: o índice de aridez, o perímetro da bacia, a densidade de drenagem e a declividade.

5.1.2. Técnicas de regressão

Regressão linear

As técnicas de regressão linear consideram que a variável dependente (lâmina escoada) pode ser reproduzida por uma relação linear das variáveis explicativas (características da bacia) da forma:

$$Y = \beta X + E$$

em que, Y é o vetor com a variável dependente (lâmina escoada média de cada bacia), β é o vetor de parâmetros, X é a matriz com as variáveis explicativas (características da bacia) e E é o vetor com os erros.

A regressão linear tem como principais vantagens: a simplicidade, a facilidade de representação dos resultados, a eficiência e a aceitação como a técnica clássica de regressão. Sua principal desvantagem é a incapacidade de modelar não linearidades existentes na relação entre a lâmina escoada média e as variáveis explicativas.

Dentre os três tipos de regressão linear testados (OLS, ER e RR), OLS é a forma mais tradicional de regressão linear e consiste em encontrar o vetor de parâmetros por meio da minimização da soma dos erros quadráticos, o que também resulta na normalização do vetor de erros.

A ER trata-se da combinação entre a regressão Ridge e a regressão Lasso e tem como objetivo, além de minimizar a soma dos erros quadráticos, a minimização dos valores dos parâmetros encontrados podendo zerar parâmetros associados a variáveis explicativas não importantes. O que traz como vantagens: uma seleção de variáveis realizada na própria calibração do modelo, tratamento da colinearidade entre as variáveis explicativas e diminuição da variância do modelo.

A RR visa diminuir a influência que os valores extremos observados têm sobre a regressão linear. Para isto, são atribuídos pesos diferentes a cada uma das observações. A técnica traz como vantagens: a diminuição de peso de valores extremos no cálculo dos parâmetros e consequentemente a redução da variância do modelo.

As técnicas utilizadas de regressão linear resultaram nas seguintes equações para a regionalização da lâmina escoada:

$$OLS : - 763.85 - 60.32 * IA - 0.08 * Pe + 0.04 * CTD + 40.13 * Cr + 12.87 * CN$$

$$ER : - 45.31 - 61.95 * IA + 0.003 * A - 0.08 * Pe + 34.85 * Cr - 5.28 * Kc + 66.94 * DD + 2.90 * CN$$

$$RR : -817.04 - 49.33 * IA + 0.0044 * A - 0.12 * Pe + 44.13 * Cr + 13.32 * CN$$

em que, IA é o índice de aridez, Pe é o perímetro da bacia, CTD é o comprimento total de drenagem, Cr é o percentual de cristalino, CN é o curve number, A é a área da bacia, Kc é o coeficiente de compactidade e DD é a densidade de drenagem.

Rede neural

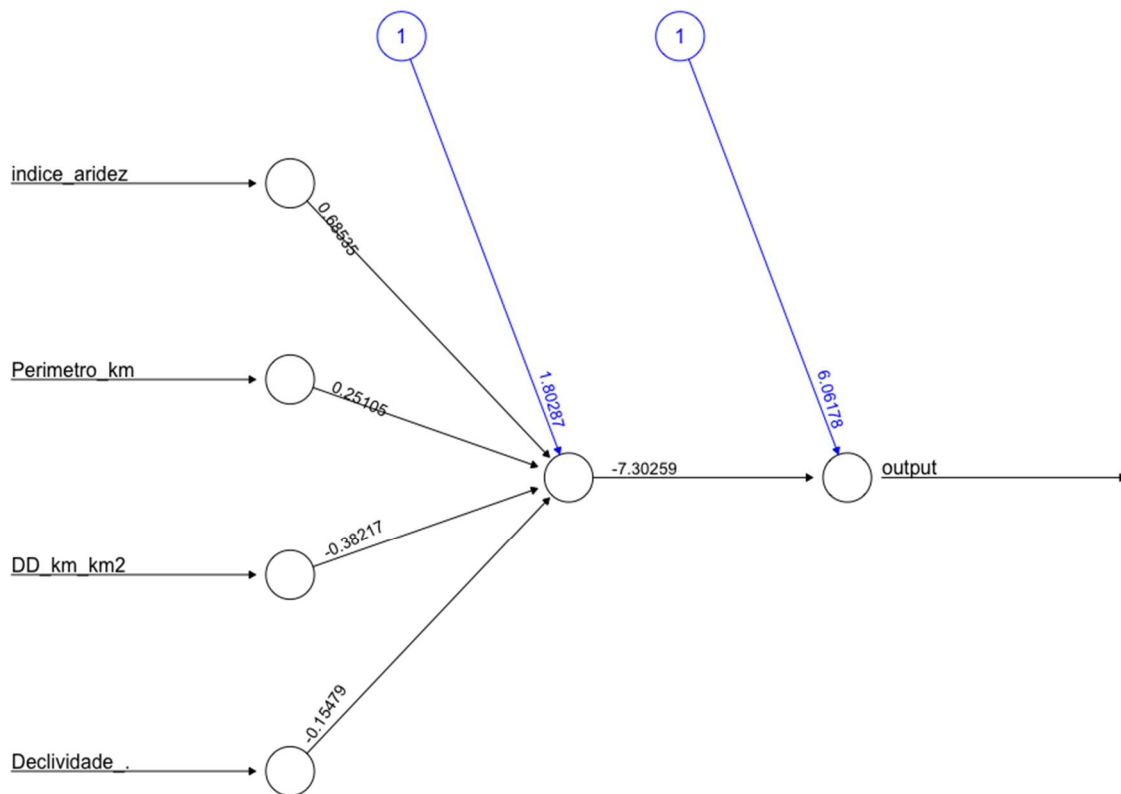
A Rede Neural é uma técnica de regressão baseada em aprendizado de máquina com diversas aplicações na literatura. Sua conceituação é baseada na elaboração de um algoritmo que tenta mimetizar o funcionamento do neurônio humano. De acordo com o "teorema da aproximação universal" uma rede neural de uma camada é capaz de aproximar qualquer função linear; com duas camadas é capaz de aproximar qualquer função contínua e com três ou mais camadas, qualquer função, inclusive descontínua respeitando o gama de entradas e saídas.

Porém, deve-se destacar que nem sempre a escolha por redes profundas é necessariamente melhor, pois redes maiores muitas vezes podem levar a casos de overfitting, e têm maior custo computacional, sendo preferível por questões de parcimônia de parâmetros a escolha por uma arquitetura mais simples.

Para a modelagem da lâmina escoada média, foi utilizada a arquitetura de rede neural tradicional perceptron multicamadas com retropropagação dos erros (backpropagation) como o algoritmo de aprendizado. Após alguns testes iniciais, foi verificado, dada a quantidade pequena de dados de entrada, que a rede de melhor performance consistia em uma camada oculta contendo apenas um neurônio

O resultado da calibração dos parâmetros da rede neural está apresentado na Figura 10.

Figura 10. Modelo de rede neural para a regionalização da lâmina escoada média



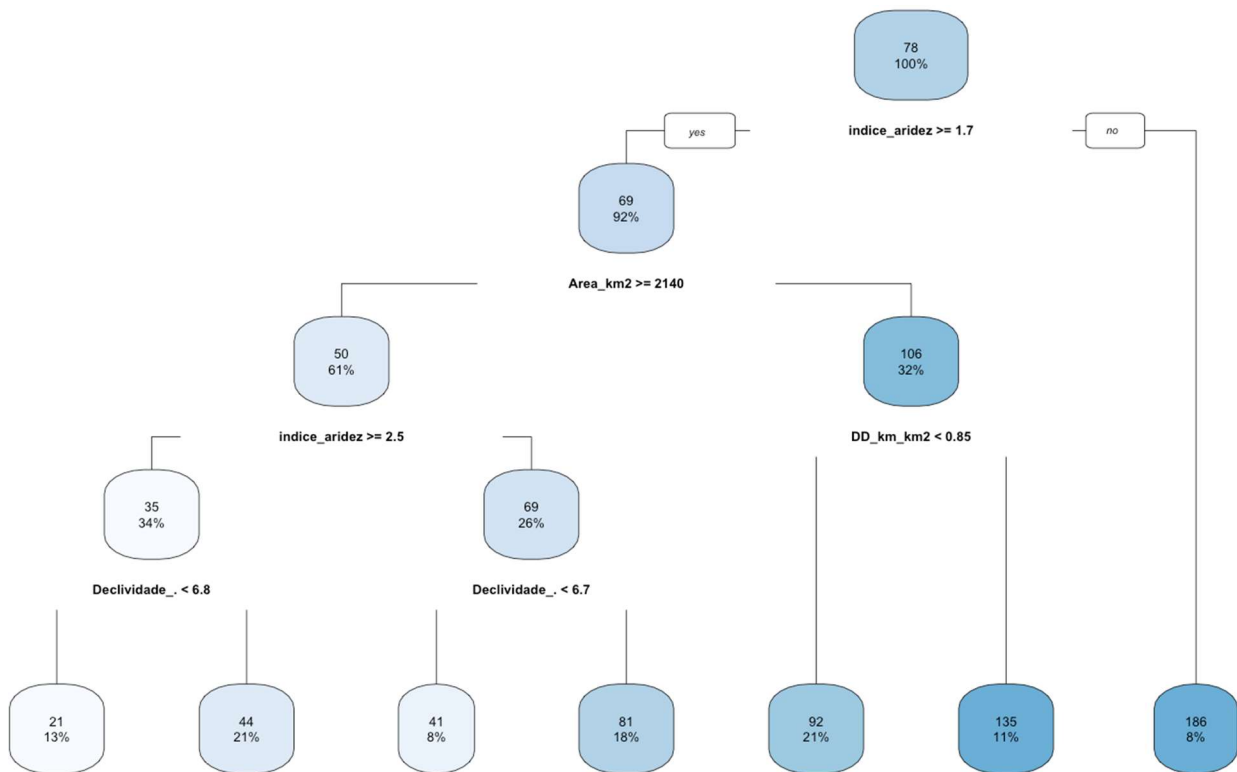
Árvore de regressão

Também baseada em aprendizagem de máquina, a árvore de regressão consiste na divisão das observações em conjuntos homogêneos, as regras que ditam esta divisão são baseadas nos valores de divisores mais significativos. A definição do número de conjuntos e dos divisores é realizada por meio de análise de redução de variância (anova).

Por fim, a árvore calibrada será equivalente a uma função definida por partes, porém de mais fácil visualização. A sua maior vantagem é permitir a exploração de dados, ou seja, facilita a identificação das variáveis mais significantes e poder auxiliar na compreensão dos processos naturais que estão sendo modelados.

O resultado da calibração da árvore de regressão está apresentado na Figura 11. Ao contrário das outras técnicas utilizadas, a árvore de regressão divide as bacias em grupos, cada grupo possuindo um valor de referência (média). Por meio da divisão da árvore se observa que a principal variável é o índice de aridez.

Figura 11. Modelo de árvore de regressão para a regionalização da lâmina escoada média



5.1.3. Performance dos modelos de regressão da lâmina escoada

A performance dos diferentes modelos foi avaliada utilizando como métrica o índice NSE por meio de uma validação cruzada para as bacias que possuem dados. Os resultados para as diferentes técnicas aplicadas estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10. Performance dos modelos de regressão da lâmina escoada média

Técnica de regressão	NSE
OLS	0.50
ER	0.44
RR	0.52
Rede neural	0.48
Árvore de regressão	0.43

Verifica-se que, dentre as técnicas de regressão linear, RR foi a que apresentou melhor resultado. Além disso, OLS e RR, apesar de mais simples, tiveram melhor performance que a rede neural. A árvore de regressão, apesar de gerar conhecimento sobre a física da modelagem, é a que apresenta pior desempenho preditivo.

Desta forma, para a análise posterior dos modelos de regionalização de vazão, foram escolhidas as técnicas de regressão robusta e árvore de regressão. Visto que a primeira foi o modelo

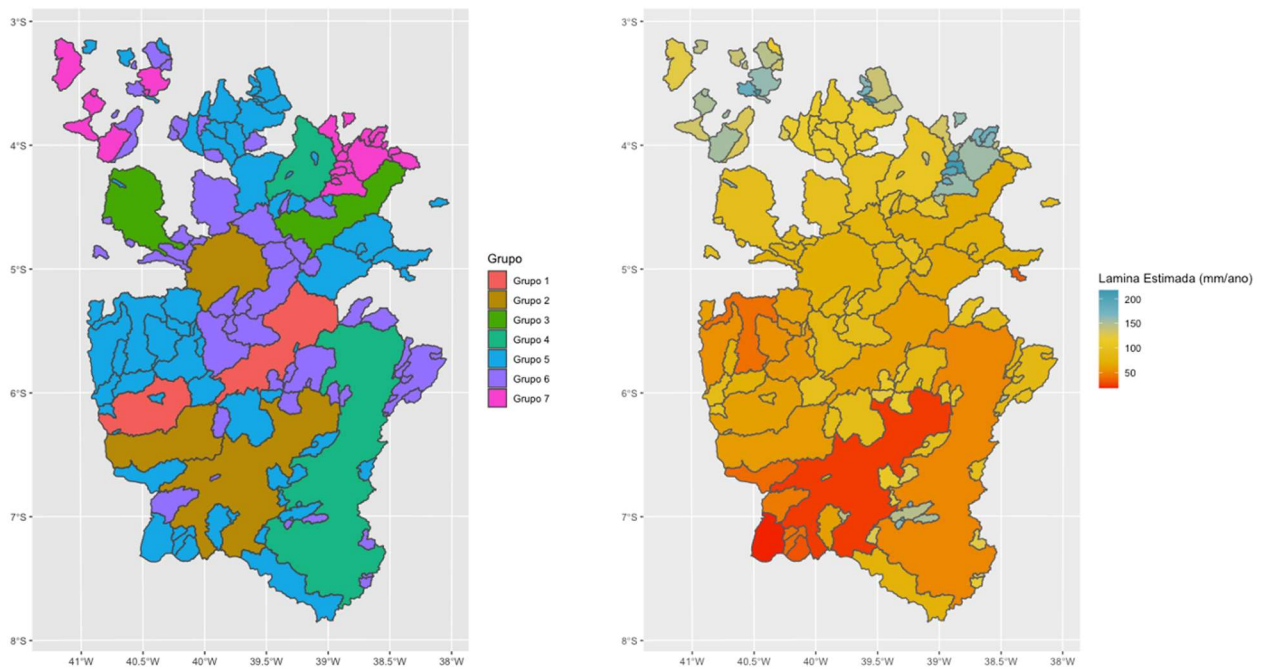
de maior poder preditivo para as lâminas escoadas e que a segunda é uma ferramenta poderosa para agrupar as bacias em classes, apesar do menor poder preditivo.

5.1.4. Faixas de ocorrência das vazões

Devido à natureza diferente das duas técnicas escolhidas, os limites de aceitação (faixa de ocorrência) são calculados de forma diferente. Para a RR, o limite de aceitação é definido pelo intervalo de previsão da regressão considerando um valor de confiança estatística de 95%. Enquanto para a árvore de regressão foi considerada a amplitude observada em cada classe como os limites de aceitação.

Estes limites são encontrados no ANEXO 9, enquanto o resultado espacial da regionalização da lâmina escoada média para a árvore de regressão (classes) e para a regressão robusta (valor previsto) está apresentado na Figura 12. Os grupos foram nomeados da esquerda para a direita tendo como referência o ramo inferior da árvore.

Figura 12. Previsão da lâmina escoada média para: árvore de regressão (esquerda) e regressão robusta (direita)



5.2. Análise da Qualidade das Afluências por Aprendizado de Máquina

A partir de uma análise preliminar em conjunto com os operadores do sistema, verificou-se que os modelos RN e ML2 não apresentaram resultados satisfatórios para as vazões incrementais. Deste modo, apenas os modelos KNN e ML1 foram avaliados segundo as faixas de ocorrência das vazões.

Para a validação dos modelos de regionalização de vazão foi adotada a seguinte estratégia:

- Os resultados dos modelos de regionalização são comparados com os limites de validade estabelecidos pela árvore de regressão. O que resultou, conforme a Figura 13, em 53 bacias aprovadas para o modelo KNN e 55 bacias aprovadas para o modelo ML1;
- As aprovações de cada modelo são combinadas. Este procedimento resultou em 81 das 155 bacias aprovadas, conforme mostrado na Figura 14;
- As bacias que foram reprovadas pela validação da árvore em ambos os modelos são verificadas para os limites de validação da regressão robusta. Resultando em 142 bacias aprovadas para o modelo KNN e 146 bacias aprovadas para o modelo ML1 conforme a Figura 15;
- Os resultados da aprovação pela regressão robusta também foram combinados para os 2 modelos, o que resultou em 152 bacias aprovadas, conforme a Figura 16.
- Para verificar se os modelos de regionalização de vazão que foram validados também estavam consistentes com relação ao coeficiente de escoamento, foi realizada uma análise de regressão para o coeficiente de escoamento de forma análoga à realizada para a lâmina escoada média. Os resultados obtidos foram semelhantes, conforme a Figura 17, mostrando que as técnicas de regressão robusta e árvore de regressão também são as mais adequadas para esta análise;
- Por fim, para as demais bacias foi realizada a indicação de qual modelo deve ser utilizado. O critério para a escolha considerou primeiro a aprovação pela árvore e depois pelo modelo linear. No caso em que ambos os modelos são aprovados, foi dada preferência para o KNN visto que obteve melhores resultados durante a fase de modelagem.

Figura 13. Validação por meio da árvore de regressão para os métodos: KNN (esquerda) e ML1 (direita)

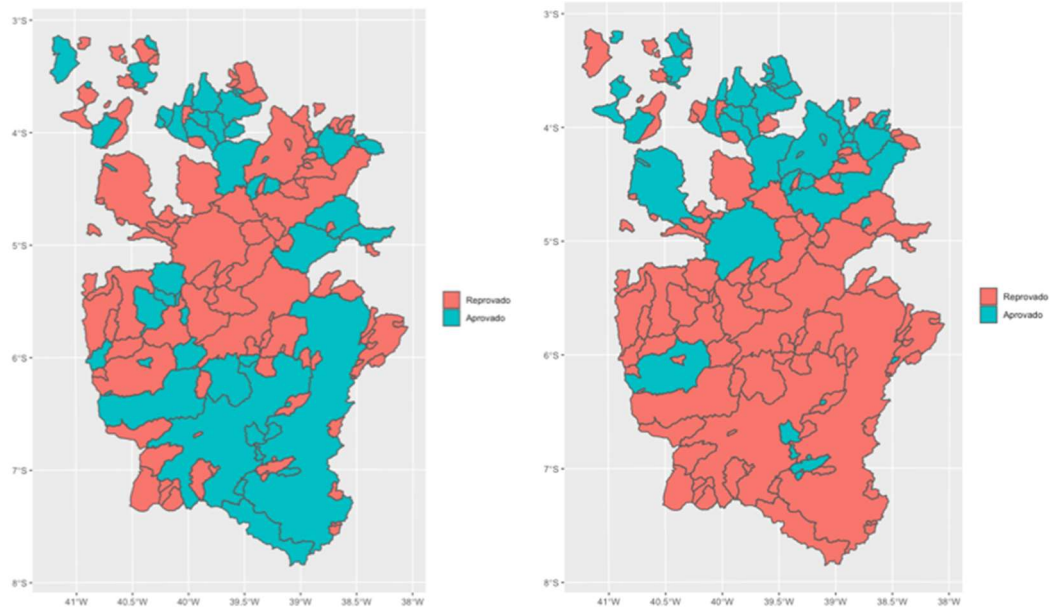


Figura 14. Validação por meio da árvore de regressão considerando a combinação dos métodos KNN e ML1

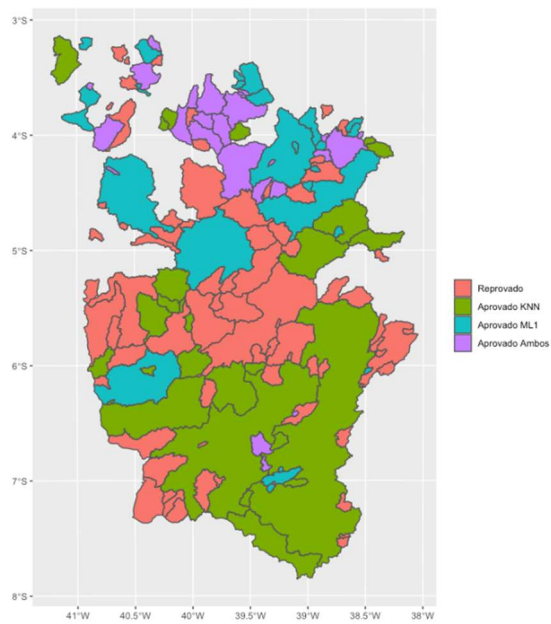


Figura 15. Validação por meio da regressão robusta para os métodos: KNN (esquerda) e ML1 (direita)

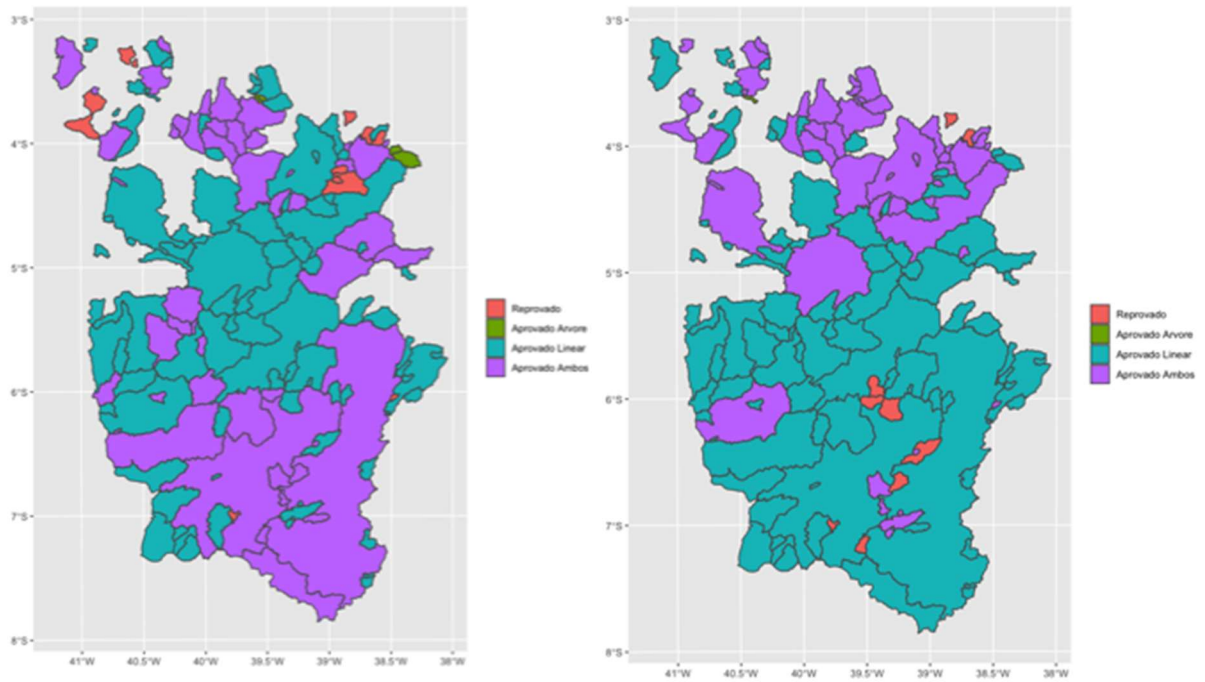


Figura 16. Validação por meio da árvore de regressão e regressão robusta considerando a combinação dos métodos KNN e ML1

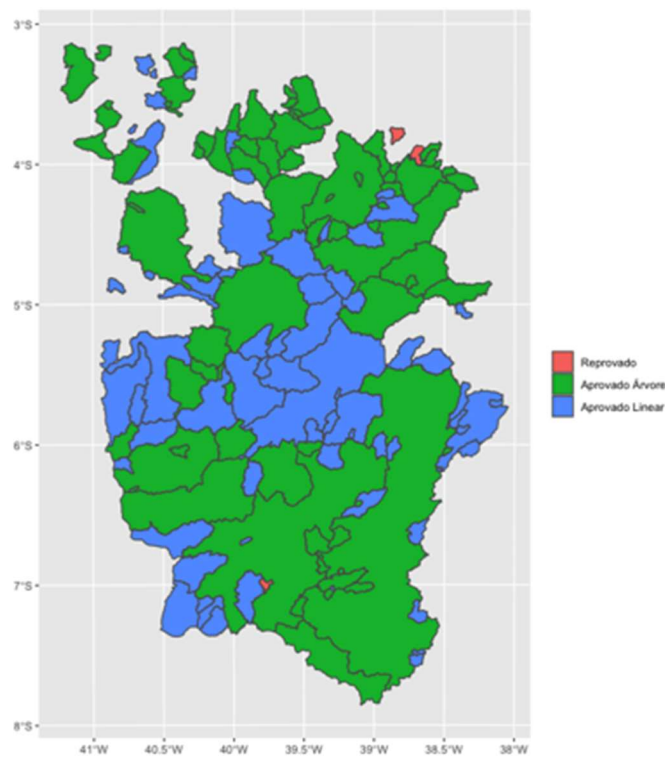
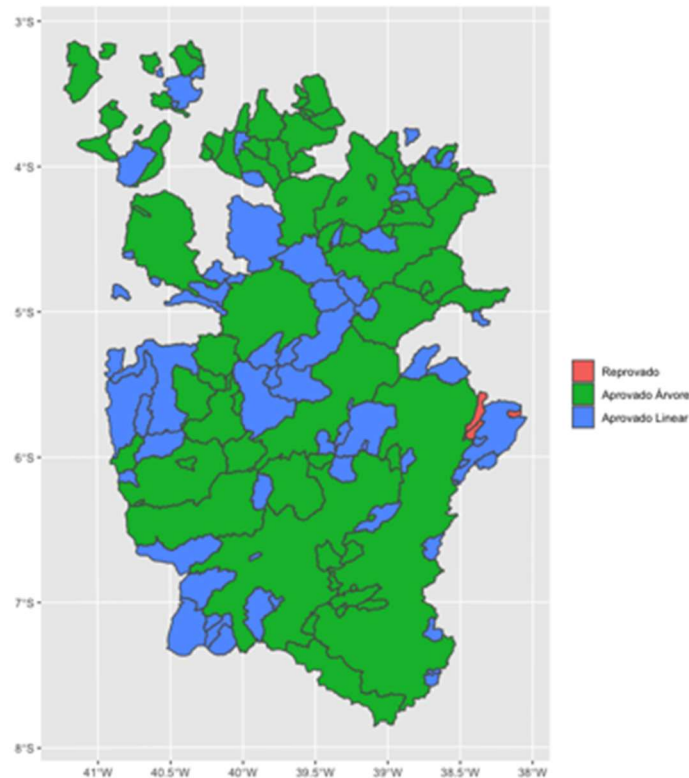


Figura 17. Validação para o coeficiente de escoamento por meio da árvore de regressão e regressão robusta considerando a combinação dos métodos KNN e ML1



A seleção do modelo (KNN ou ML1), pelo aprendizado de máquina, para cada reservatório foram ajustadas a partir da análise de especialistas, considerando os seguintes critérios:

- Consistência em termos de coeficiente de escoamento entre os reservatórios de uma mesma cascata na sua região hidrográfica
- Características fisiográficas da bacia (rede de drenagem, geomorfologia e geologia)
- Histórico da operação do reservatório, como *proxy* do seu comportamento e de suas vazões afluentes

Por meio dessa avaliação e com os ajustes realizados, foi identificado para cada reservatório o modelo de regionalização utilizado para o cálculo das afluições incrementais. Em alguns casos foi utilizada a resposta Multimodelo, que considera a série média entre as séries calculadas com o KNN e o ML1. Para reservatórios que apresentassem grande desvio em relação ao esperado pelos especialistas convencionou-se não fornecer as séries afluentes, mas apenas valores médios regionais de coeficiente de escoamento, coeficiente de variação e de fragmentos de distribuição sazonal das vazões, baseados no comportamento médio dos demais reservatórios da mesma região hidrográfica. Este é o caso dos reservatórios Diamantino II e Realejo, cujos dados supracitados estão apresentados no ANEXO 10.

5.2.1. Índice de qualidade das vazões de referência (IQRV)

Tendo em vista que a qualidade das estimativas de vazões varia de um reservatório a outro, foi definido um índice (IQRV) que classifica as vazões de referência afluente a cada açude em quatro categorias (Insuficiente, Baixa, Média e Alta), segundo os seguintes critérios:

I) Insuficiente – reservatório apresenta divergência entre os modelos (ML1 e KNN), reprovando ambos os critérios de aprendizado de máquina e não é bem avaliado pelos especialistas. Inclui também os reservatórios para os quais foram adotadas as médias regionais;

II) Baixa – reservatório apresenta divergência entre os modelos (ML1 e KNN), é aprovado em pelo menos um critério de aprendizado de máquina e não é bem avaliado pelos especialistas;

III) Média – reservatório apresenta convergência entre os modelos, é aprovado em pelo menos 1 critério de aprendizado de máquina e satisfaz parte dos critérios dos especialistas;

IV) Alta – reservatório apresenta convergência entre os modelos, é aprovado nos dois critérios de aprendizado de máquina e satisfaz os critérios empíricos.

5.3. Análise das Afluências por Engenharia Reversa

Uma das fontes alternativas de dados de afluência é o cálculo das mesmas por meio da engenharia reversa. Apesar de as séries de afluência obtidas por essa estratégia serem mais curtas, a obtenção de uma fonte alternativa de dados pode ser útil na avaliação da qualidade das afluências estimadas via regionalização

O cálculo das afluências aos reservatórios por meio de engenharia reversa é fundamentado na avaliação do balanço hídrico diário no lago. Numa formulação algébrica, estabelece-se:

$$V_{i+1} = V_i + A_i - R_i - E_i - S_i$$

Onde V_i e V_{i+1} são os estoques no reservatório no início do dia i e do dia $i + 1$, respectivamente.

A_i é o volume afluente ao reservatório durante o dia i .

R_i é o volume retirado do reservatório durante o dia i .

E_i é o volume evaporado do reservatório durante o dia i .

S_i é o volume vertido do reservatório durante o dia i .

Reescrevendo o balanço hídrico na forma:

$$A_i = V_{i+1} - V_i + R_i + E_i + S_i$$

Pode-se calcular a afluência através de dados sobre V_{i+1} , V_i , R_i , E_i e S_i .

Os estoques V_{i+1} e V_i foram calculados a partir do monitoramento de nível do reservatório, sendo feito uso da relação Cota-Área-Volume (CAV), para estimar o volume a partir do nível.

As retiradas R_i na forma de vazão regularizada e de liberação pelas comportas, também são monitoradas pela COGERH.

Os volumes evaporados E_i foram estimados pela multiplicação da taxa de evaporação mensal de referência para o lago pela superfície média do lago no dia i . Esta última foi calculada pela CAV, considerando os níveis medidos no início dos dias i e $i + 1$. A taxa de evaporação de referência (considerada fixa para cada mês do ano) foi definida pela evaporação calculada na estação meteorológica de referência de cada reservatório (estabelecida pela COGERH).

O vertimento S_i foi admitido igual a zero quando o nível do reservatório no início do dia i e do dia $i + 1$ era inferior a cota do vertedouro. Caso contrário, o volume vertido foi calculado pela integração da equação do vertedouro:

$$Q_s = K_s \times L_s \times (N - C_s)^{\frac{3}{2}}$$

$$Q_s = K_s \times L_s \times H^{\frac{3}{2}}$$

Onde Q_s é a vazão de vertimento em m^3/s

K é o coeficiente do vertedouro em $m^{0,5}.s^{-1}$

L é a largura do vertedouro em m

N é o nível d'água no reservatório em m

C_s é a cota do vertedouro em m

$H = N - C_s$ é o nível d'água acima da cota do vertedouro

Supõe-se variação linear do nível durante o dia i , segundo:

$$N(t) = N_i + (N_{i+1} - N_i) \frac{t}{86400}$$

Com t em segundos, tal que, $0 < t < 86400$ s.

Quando N_i ou N_{i+1} (ou ambos) é superior a C_s , ocorre vertimento em pelo menos uma fração do dia, de modo que, para uma variação linear do nível:

- Caso ambos N_i e N_{i+1} forem superiores a C_s , supõe-se que o vertimento ocorre durante todo o dia i ($\Delta = 1$), com H_i , variando de $H_{1i} = N_i - C_s$ a $H_{2i} = N_{i+1} - C_s$, com início do vertimento em $t_0 = 0$.
- Se $N_i < C_s$, supõe-se que $N(t)$ **crece** linearmente de N_i até atingir $N_{i+1} > C_s$. Assim, o vertimento só corre a partir de t tal que $N(t) = C_s$, ou seja, o vertimento ocorre durante uma fração $\Delta = \frac{N_{i+1} - C_s}{N_{i+1} - N_i}$ do dia, quando H_i varia de $H_{1i} = 0$ a $H_{2i} = N_{i+1} - C_s$, com início do vertimento em $t_0 = 86400 (1 - \Delta)$.
- Se $N_{i+1} < C_s$, supõe-se que $N(t)$ **decresce** linearmente de $N_i > C_s$ até atingir N_{i+1} . Assim, o vertimento só ocorre até t tal que $N(t) = C_s$, ou seja, ocorre durante uma fração $\Delta = \frac{N_i - C_s}{N_i - N_{i+1}}$ do dia, quando H_i varia de $H_{1i} = N_i - C_s$ a $H_{2i} = 0$, com início do vertimento em $t_0 = 0$.

Durante o vertimento que ocorre no dia i supõe-se, por consequência:

$$H_i(t) = H_{1i} + (H_{2i} - H_{1i}) \frac{(t - t_0)}{\Delta \times 86400}$$

Com $t_0 < t < t_0 + \Delta \times 86400$

Assim, integrou-se a equação do vertedouro com relação ao tempo ao longo da fração do dia i na qual houve vertimento ($t_0 < t < t_0 + \Delta \times 86400$), calculando-se o volume vertido como:

$$S_i = \int_{t=t_0}^{t_0+\Delta \times 86400} K_s \times L_s \times \left(H_{1i} + (H_{2i} - H_{1i}) \frac{t - t_0}{\Delta \times 86400} \right)^{\frac{3}{2}} dt$$

$$S_i = K_s \times L_s \times \frac{2}{5} \times \frac{\Delta \times 86400}{H_{2i} - H_{1i}} \left[\left(H_{1i} + (H_{2i} - H_{1i}) \frac{t - t_0}{\Delta \times 86400} \right)^{\frac{5}{2}} \right]_{t=t_0}^{t_0+\Delta \times 86400}$$

$$S_i = K_s \times L_s \times \frac{2}{5} \times \frac{\Delta \times 86400}{H_{2i} - H_{1i}} \left[H_{2i}^{\frac{5}{2}} - H_{1i}^{\frac{5}{2}} \right]$$

Com os equacionamentos descritos acima, pode-se reconstruir as séries diária de afluência aos reservatórios. Diferentemente das metodologias apresentadas anteriormente, a engenharia reversa permite o cálculo da afluência total aos reservatórios e não a afluência incremental, ou seja, já considerando os vertimentos dos açudes a montante.

Apesar das valiosas informações que podem ser obtidas a partir dessa metodologia, as séries curtas de monitoramento de nível limitam o seu uso para avaliação da disponibilidade hídrica. Além disso, por depender de grande número de dados, o cálculo das afluências por engenharia reversa está sujeito a diversas fontes de incertezas, que devem ser cuidadosamente avaliadas. As séries de afluências diárias calculadas por essa estratégia apresentam flutuações sistemáticas que podem ser amenizadas na agregação para a escala mensal. Incertezas na evaporação sobre os lagos e na CAV, podem ser determinantes no cálculo dessas afluências. Além disso, avaliações preliminares têm mostrado desajuste da equação e/ou do coeficiente do vertedouro na representação dos vertimentos de alguns açudes. São sugeridos aprofundamentos dos estudos para o aproveitamento desses dados resultantes da engenharia reversa.

As séries preliminares de afluências diárias calculadas por engenharia reversa estão disponibilizadas no ANEXO 11. Eventuais valores negativos, decorrentes das flutuações, foram mantidos para permitir uma análise das fontes de flutuações em um posterior tratamento do erro.

6. ESTIMATIVA DE VAZÕES

CONSIDERANDO A AÇÃO ANTRÓPICA

Uma das principais ações antrópicas que condicionam o regime de vazões no território cearense e que deve ser levada em conta durante a modelagem é a presença de reservatórios de acumulação ao longo de toda a rede hidrográfica. Dentre os reservatórios que interferem no regime de vazões do estado distinguem-se aqueles com maior disponibilidade de dados (CAV, capacidade, taxa de evaporação de referência, geometria do vertedouro, etc.), que são em geral de maior porte; e aqueles que compõem a chamada pequena açudagem, para a qual a obtenção de dados é dificultada.

A fim de permitir uma modelagem explícita do efeito dos maiores reservatórios, a estimativa de vazões através da regionalização se deu em torno das bacias incrementais dos açudes monitorados pela COGERH. O efeito desses reservatórios pode ser avaliado por meio da simulação da rede de reservatórios em cascata, com cada reservatório tendo suas afluições condicionadas pela produção de vazões na sua bacia incremental e pela presença de reservatórios a montante.

O efeito da pequena açudagem, por sua vez, foi considerado de maneira implícita dentro da própria modelagem. Tendo em vista que as vazões medidas nas estações fluviométricas, usadas na calibração, incorporam efeito dos pequenos reservatórios a montante, então, os parâmetros calibrados para o modelo hidrológico devem igualmente incorporar esse efeito implicitamente.

As hipóteses e estratégias adotadas se mostraram consistentes, no entanto sugerem-se alguns melhoramentos para os próximos ciclos de atualização das afluições no tocante ao efeito dos reservatórios:

- Além de incorporar o efeito da densa rede de pequenos reservatórios, as vazões medidas nas estações fluviométricas são influenciadas pelo efeito dos grandes reservatórios, que já serão modelados explicitamente pela simulação da rede em cascata. Assim, recomenda-se que seja estabelecida alguma estratégia de remoção do efeito dos grandes reservatórios nos dados de vazão usados para a calibração, seja por modelagem ou por recorte de dados.
- O modelo conceitual não possui uma estrutura adaptada para incorporar o efeito da pequena açudagem, de modo que, por hipótese, seus parâmetros apenas poderiam incorporar esse efeito implicitamente. Assim, recomenda-se a utilização de um modelo que permita representar o efeito da pequena açudagem, seja com adaptações no SMAP ou com o uso de outros modelos.

6.1. Simulação da Rede de Reservatórios em Cascata

Calculadas as aflúências incrementais para cada reservatório monitorado, foi simulada a operação da rede de reservatórios em cascata para o cálculo das regularizações. A rede de reservatórios simulada, considerando os 155 açudes monitorados pela COGERH, é apresentada na Figura 18, também representada na forma de diagrama unifilar iterativo no ANEXO 12.

O balanço hídrico nos reservatórios foi calculado em escala mensal, sendo simulados por ordem de aflúência dos reservatórios, já que a operação dos reservatórios a montante influencia nas aflúências daqueles a jusante. O volume evaporado foi calculado considerando a média da área superficial do lago entre o início e o final do mês. Os vertimentos foram computados, de maneira simplificada, pelo excedente do volume armazenado a cada passo de tempo.

As aflúências totais a cada reservatório foram calculadas como a soma das aflúências incrementais com os vertimentos dos reservatórios imediatamente a montante. Desprezaram-se as aflúências provenientes de regularização de trechos de rios a montante, pois foi considerado que esse volume era consumido antes de atingir o reservatório a jusante. Além disso desprezaram-se efeitos de translação do hidrograma, tendo em vista o passo de tempo mensal. As aflúências totais obtidas, considerando as regionalizações KNN e ML1 estão disponíveis no ANEXO 13.

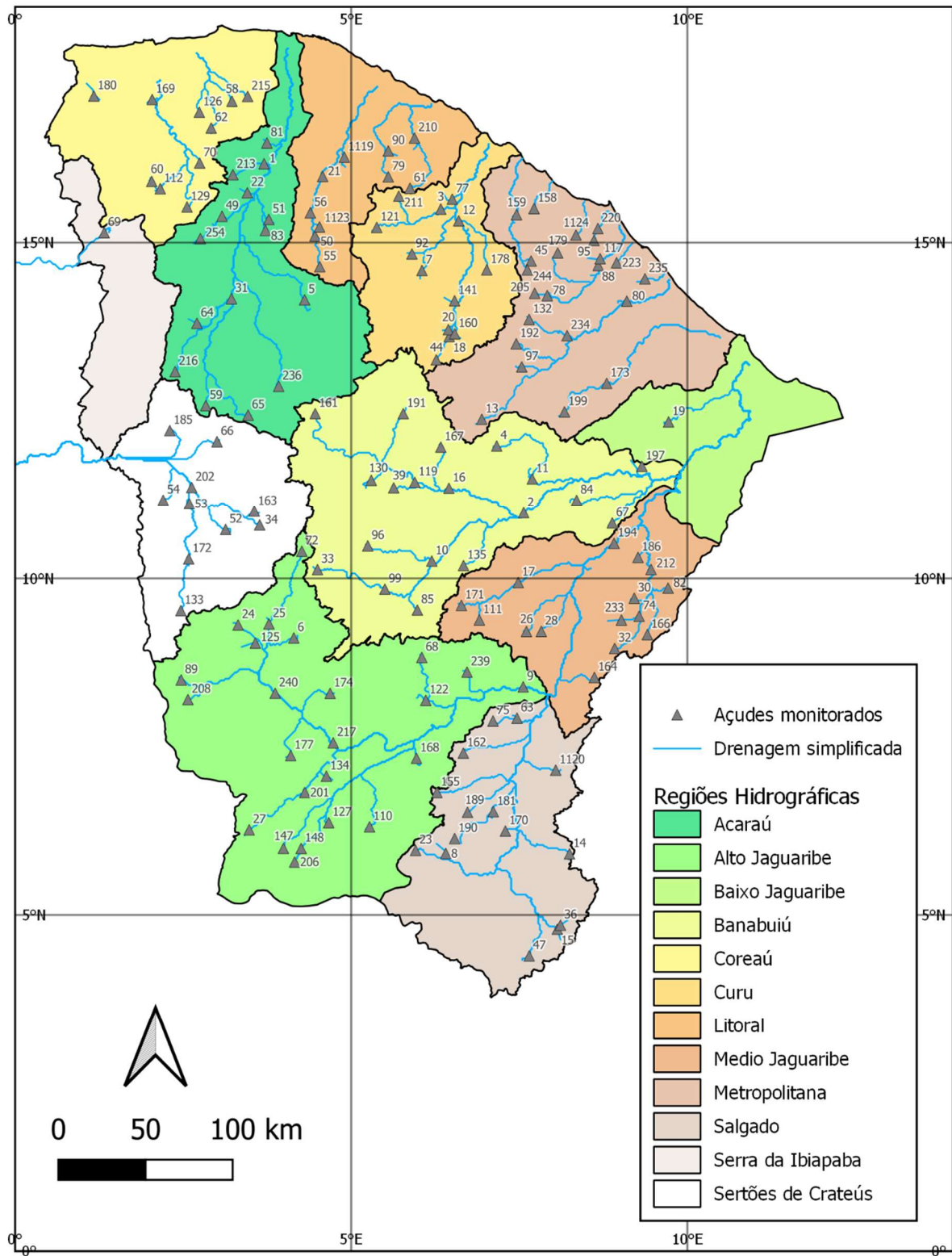
Para cada reservatório, de montante para jusante, a operação foi simulada considerando retirada constante, segundo a operação padrão de reservatórios, ou seja, realizando a retirada enquanto há estoque disponível. Os valores de retirada mensal foram identificados por otimização, calculando-se o valor de regularização que corresponderiam a uma garantia (em frequência) de 90%, ou seja, o Q90 dos reservatórios. As simulações também foram realizadas considerando a garantia de 95% e Q98%. Assim, há três cenários de aflúências totais, em função de os reservatórios serem operados com o Q90, o Q95, ou o Q98.

No caso do açude Castanhão, em razão das condições operacionais específicas, considerou-se ainda o volume mínimo operacional de 117,04 hm³ (cota 65 m) e uma capacidade operacional de 4785,92 hm³ (cota 101 m), para incorporar o volume de espera de cerca de 2000 hm³.

Para os reservatórios sem séries afluentes, isto é, Diamantino II e Realejo, as médias regionais de coeficiente de escoamento e de fragmentos sazonais são utilizadas para estimar as vazões a partir da precipitação. Essas séries de vazão são utilizadas unicamente para a estimativa de Q90, Q95 e Q98 destes reservatórios.

A Tabela 11 apresenta os valores de Q90, Q95 e Q98 para cada reservatório.

Figura 18. Rede de reservatórios em cascata monitorados no estado do Ceará



Acarauá		Alto Jaguaribe		Banabuiú		Coreaú		Curu		Metropolitana		Médio Jaguaribe		Salgado		S. de Crateús	
1	Acarauá Mirim	6	Favelas	2	Banabuiú	58	Tucunduba	3	Caxitoré	13	P. Sobrinho	17	Riacho do Sangue	8	M. Balbino	34	Cupim
5	Edson Queiroz	9	Orós	4	Cedro	60	Diamante	7	GeSampaio	45	Amanary	26	Nova Floresta	14	Prazeres	52	Jaburu II
22	Sobral	24	Trici	10	Patu	62	Premuoca	12	Pentecoste	78	A. do Meio	28	Joaquim Távora	15	Quixabinha	53	Carnaubal
31	Araras	25	Várzea do Boi	11	Pedras Brancas	70	Várzea da Volta	18	Salão	80	Pacajus	30	Ema	23	T. Osterne	54	Realejo
49	Ayres de Sousa	27	Poço da Pedra	16	Quixeramobim	112	Angicos	20	São Mateus	88	Pacoti	32	Adauto Bezerra	36	Gomes	66	Sucesso
51	Forquilha	68	Quincoé	33	Capitão Mor	126	Martinópole	44	Escuridão	95	Gavião	74	Canafistula	47	Atalho	133	Colina
59	Farias de Sousa	72	Forquilha II	39	São José I	129	Trapiá III	77	Frios	97	Castro	82	Potiretama	63	Lima Camp.	163	Barra Velha
64	Bonito	89	Parambu	67	Poço do Barro	169	Gangorra	92	Tejuçoca	117	Riachão	111	Tigre	75	Tatajuba	172	Flor Campo
65	Carão	110	Valério	84	Cipoada	180	Itaúna	121	Jerimum	132	Tijuquinha	164	Madeiro	155	Olho d'Água	185	São José III
81	São Vicente	122	Trussu	85	São José II	215	Diamantino II	141	São Domingos	158	Cauhipe	166	Santa Maria	162	Ubalzinho	202	B. Batalhão
83	Arrebita	125	Broco	96	Trapiá II			160	Sousa	159	Sítios Novos	171	Jenipapeiro	170	Cachoeira	34	Nome
213	Jenipapo	127	Canoas	99	Serafim Dias		Litoral	178	Desterro	173	Batente	186	Riacho da Serra	181	Rosário	52	Cupim
216	Jatobá II	134	Do Coronel	119	Fogareiro	21	S. Pedro Timbaúba	211	Itapajé	179	Penedo	194	Castanhão	189	Junco	53	Jaburu II
236	Carmina	147	João Luís	130	Vieirão	50	Sto Ant. Aracatiçu			192	Pesqueiro	212	Figueiredo	190	São Dom. II	54	Carnaubal
254	Taquara	148	Pau Preto	135	Jatobá	55	Sta Ma. Aracatiçu			199	Macacos	233	Santo Antônio	1120	Jenipap. II		
		168	Muquém	161	Mons. Tabosa	56	Patos			205	Germinal						
	Baixo Jaguaribe	174	R de Carvalho	167	Pirabibu	61	Mundaú			220	Cocó						S. Ibiapaba
19	Sto. Ant. Russas	177	Benguê	191	Umari	79	Quandú			223	Catucinzenta					69	Jaburu I
		201	Mamoeiro	197	Curral Velho	90	Poço Verde			234	Aracoiaba						
		206	Monte Belo			210	Gameleira			235	Malcozinhado						
		208	Facundo			1119	Missi			244	Itapebussu						
		217	Caldeirões			1123	G. Atimbone			1124	Maranguapinho						
		239	Faé														
		240	Arneiroz II														

Tabela 11. Vazões regularizadas com 90%, 95% e 98% de garantia, para cada reservatório

Reservatório		Vazão regularizada (L/s)			Reservatório		Vazão regularizada (L/s)		
ID	Nome	Q90	Q95	Q98	ID	Nome	Q90	Q95	Q98
78	Acarape do Meio	483	386	283	235	Malcozinhado	285	205	160
1	Acaraú Mirim	488	328	200	201	Mamoeiro	302	234	169
32	Adauto Bezerra	23	15	8	8	Manoel Balbino	104	83	63
45	Amanary	64	44	30	1124	Maranguapinho	127	93	64
112	Angicos	424	300	179	126	Martinópolis	140	91	62
234	Aracoiaba	1.626	1.329	1.107	1119	Missi	567	441	328
31	Araras	4.700	3.623	2.951	161	Mons. Tabosa	28	21	17
240	Arneiroz II	1.440	1.055	718	206	Monte Belo	13	5	2
83	Arrebata	119	93	66	61	Mundaú	29	19	13
47	Atalho	846	701	561	168	Muquém	466	358	278
49	Ayres de Sousa	1.362	1.027	732	26	Nova Floresta	90	63	46
2	Banabuiú	8.914	7.522	6.189	155	Olho d'Água	98	77	63
163	Barra Velha	465	313	196	9	Orós	11.016	8.850	6.963
202	Barragem Batalhão	96	67	43	80	Pacajus	3.087	2.430	1.958
173	Batente	750	537	395	88	Pacoti	2.736	2.146	1.763
177	Benguê	236	183	128	89	Parambu	17	10	6
64	Bonito	12	6	4	56	Patos	100	67	45
125	Broco	14	9	5	10	Patu	689	521	400
170	Cachoeira	184	132	93	148	Pau Preto	6	3	1
217	Caldeirões	301	203	156	11	Pedras Brancas	1.243	939	715
74	Canafistula	11	6	3	179	Penedo	17	13	10
127	Canoas	315	243	185	12	Pentecoste	3.925	3.149	2.507
33	Capitão Mor	51	38	28	192	Pesqueiro	67	46	29
65	Carão	122	85	57	167	Pirabibu	126	82	48
236	Carmina	102	72	53	27	Poço da Pedra	28	18	10
53	Carnaubal	308	198	125	67	Poço do Barro	82	54	31
194	Castanhão	21.895	18.692	15.567	90	Poço Verde	34	19	9
97	Castro	287	219	151	13	Pompeu Sobrinho	305	233	162
223	Catucinzenta	154	123	98	82	Potiretama	1	1	0
158	Cauhipe	169	123	87	14	Prazeres	328	277	237
3	Caxitoré	1.629	1.361	1.128	62	Premuoca	36	24	15
4	Cedro	91	59	35	79	Quandú	48	37	29
84	Cipoda	160	113	69	68	Quincoé	74	55	42
220	Cocó	58	39	30	15	Quixabinha	190	159	131
133	Colina	42	25	12	16	Quixeramobim	265	170	113
34	Cupim	21	11	5	54	Realejo	156	131	109
178	Desterro	44	30	21	117	Riachão	52	39	26
60	Diamante	57	42	27	186	Riacho da Serra	152	118	96
215	Diamantino II	286	244	216	17	Riacho do Sangue	361	262	184
134	Do Coronel	12	9	7	174	Rivaldo de Carvalho	75	51	26
5	Edson Queiroz	2.201	1.759	1.425	181	Rosário	487	375	270

Tabela 11. Vazões regularizadas com 90%, 95% e 98% de garantia, para cada reservatório

Reservatório		Vazão regularizada (L/s)			Reservatório		Vazão regularizada (L/s)		
ID	Nome	Q90	Q95	Q98	ID	Nome	Q90	Q95	Q98
30	Ema	20	12	8	21	S. Pedro Timbaúba	227	144	100
44	Escuridão	6	5	4	18	Salão	44	34	25
208	Facundo	0	0	0	166	Santa Maria	62	42	29
239	Faé	181	133	106	55	Santa Maria de Aracatiaçu	86	49	24
59	Farias de Sousa	3	2	1	233	Santo Antônio	1	0	0
6	Favelas	155	100	65	50	Santo Antônio de Aracatiaçu	409	291	218
212	Figueiredo	2.538	2.260	2.079	19	Santo Antônio de Russas	270	177	115
172	Flor do Campo	46	19	7	141	São Domingos	14	10	7
119	Fogareiro	1.944	1.442	1.026	190	São Domingos II	5	4	2
51	Forquilha	246	183	117	39	São José I	99	69	45
72	Forquilha II	7	4	2	85	São José II	198	154	115
77	Frios	256	174	130	185	São José III	15	6	2
210	Gameleira	463	348	269	20	São Mateus	101	76	57
169	Gangorra	194	138	102	81	São Vicente	142	109	78
95	Gavião	200	144	97	99	Serafim Dias	719	581	467
7	General Sampaio	2.433	2.024	1.647	159	Sítios Novos	554	407	276
1123	Gerardo Atimbone	69	49	35	22	Sobral	21	14	9
205	Germinal	131	96	72	160	Sousa	132	96	75
36	Gomes	51	40	32	66	Sucesso	71	44	22
211	Itapajé	12	8	5	254	Taquara	1.120	827	597
244	Itapebussu	96	71	53	75	Tatajuba	17	12	8
180	Itaúna	1.293	993	763	92	Tejuçuoca	271	200	142
69	Jaburu I	1.442	1.169	990	23	Thomás Osterne	129	107	83
52	Jaburu II	182	93	40	111	Tigre	13	10	7
135	Jatobá	6	4	2	132	Tijuquinha	39	32	26
216	Jatobá II	52	37	30	96	Trapiá II	100	72	49
171	Jenipapeiro	79	61	44	129	Trapiá III	40	27	16
1120	Jenipapeiro II	217	165	124	24	Trici	81	47	27
213	Jenipapo	42	28	22	122	Trussu	1.928	1.508	1.209
121	Jerimum	377	298	239	58	Tucunduba	605	458	354
147	João Luís	4	2	0	162	Ubalzinho	283	215	167
28	Joaquim Távora	80	50	25	191	Umari	537	406	295
189	Junco	10	6	3	110	Valério	17	12	9
63	Lima Campos	399	313	235	70	Várzea da Volta	138	87	43
199	Macacos	34	25	17	25	Várzea do Boi	224	131	71
164	Madeiro	4	2	1	130	Vieirão	247	187	142

6.2. Simulação da Rede de Reservatórios Considerando a Incerteza dos Parâmetros

Para incorporar o efeito da incerteza dos parâmetros na simulação da rede de reservatórios, faz-se necessário considerar a propagação dessa incerteza nas séries de afluências incrementais, materializada nas 1000 séries obtidas, para cada reservatório, na regionalização KNN. A consideração das 1000 séries para cada reservatório resultaria em um número muito grande de combinações entre as séries, inviabilizando a simulação de todas as combinações. No caso de uma rede com apenas dois reservatórios, por exemplo, seriam observadas $1000 \times 1000 = 1$ milhão de combinações. Desse modo, de todas as combinações possíveis entre as séries foram simuladas 1000, sorteadas aleatoriamente.

Dessa forma, ao simular a rede de reservatórios para cada uma das combinações, obtêm-se, em vez de um único valor de Q90 (e de Q95), 1000 valores para cada reservatório. A dispersão dos valores de Q90 (e de Q95) representa o efeito da incerteza dos parâmetros propagada para o valor da vazão regularizada. Vale a pena ressaltar que outras fontes de incerteza, não consideradas no presente estudo, devem interferir na faixa de valores possível para a vazão regularizada.

Os percentis P10 até P90 das vazões Q90 e Q95 de cada reservatório, considerando o efeito propagado da incerteza os parâmetros, podem ser consultados no ANEXO 14.

7. SÉRIE DE VAZÕES OFICIAIS

Como produto final desse estudo são definidas as vazões oficiais afluentes aos açudes que deverão ser utilizadas como referência para o gerenciamento dos recursos hídricos do estado. Dentre os açudes monitorados, o açude Curral Velho não foi considerado, já que este não possui função de regularização. Também não são fornecidas as séries afluentes aos açudes Diamantino II e Realejo, conforme explicado na seção 5.2.

As vazões afluentes oficiais aos reservatórios monitorados pela COGERH são apresentadas na forma de afluência incremental, ou seja, considerando a contribuição apenas da área não-controlada a montante do reservatório, e na forma de afluência total ao reservatório, considerando a área total de drenagem. Para esse último formado são considerados três cenários de operação dos reservatórios a montante, com retirada igual ao Q90, ao Q95 e ao Q98. As séries de vazões incrementais e totais podem ser consultadas, respectivamente, no ANEXO 15 e no ANEXO 16

Para cada reservatório, as afluências oficiais, tanto incrementais, quanto totais resultantes, foram escolhidas, segundo os critérios de análise da qualidade da regionalização, entre aquelas obtidas com o modelo regional mais adequado (KNN, ML1 ou Multimodelo). Dados resumidos sobre as séries de vazões oficiais podem ser consultados no ANEXO 17.

8. REFERÊNCIAS

ALEXANDRE, A. M. B. Regionalização de Vazões Máximas, Médias e Parâmetros de Modelos Hidrológicos no Estado do Ceará. **Dissertação de Mestrado**. Universidade Federal do Ceará. 2005.

BEVEN, K. A manifesto for the equifinality thesis. **Journal of Hydrology**, v. 320, n. 1–2, p. 18–36, 2006.

ESTACIO, S. A. B.; COSTA, C. A.; SOUZA FILHO, F. DE A.; ROCHA, R. V. Uncertainty analysis in parameter regionalisation for streamflow prediction in ungauged semi-arid catchments. **Hydrological Sciences Journal**, 2020.

GOVINDARAJU, Rao S.; RAO, Adishesappa Ramachandra (Ed.). **Artificial neural networks in hydrology**. Springer Science & Business Media, 2013.

LOPES, J. C.; BRAGA, J. B. F.; CONEJO, J. L. **Simulação Hidrológica: Aplicações de um modelo simplificado**. III Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. **Anais...**Fortaleza: 1981

VRUGT, J. A. Markov chain Monte Carlo simulation using the DREAM software package: Theory, concepts, and MATLAB implementation. **Environmental Modelling and Software**, v. 75, p. 273–316, 2016.

VRUGT, J. A.; BRAAK, C. J. F. TER; CLARK, M. P.; HYMAN, J. M.; ROBINSON, B. A. Treatment of input uncertainty in hydrologic modeling: Doing hydrology backward with Markov chain Monte Carlo simulation. **Water Resources Research**, v. 44, n. 12, p. 1–15, 2008.

VRUGT, J. A.; BRAAK, C. J. F. TER; GUPTA, H. V.; ROBINSON, B. A. Equifinality of formal (DREAM) and informal (GLUE) Bayesian approaches in hydrologic modeling? **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 23, n. 7, p. 1011–1026, 2009.

9. ANEXOS (Em meio digital)

Anexo	Descrição	Tipo de arquivo
Anexo 1	Análise de disponibilidade e a metodologia de consistência dos dados pluviométricos	.docx
Anexo 2	Série de precipitações mensais (out 1910 - dez 2019) sobre o território cearense, espacializada pelo método IDW em uma grade de 0.01 graus: 1 arquivo descrevendo as coordenadas da grade; 1 arquivo descrevendo a precipitação nos pontos.	.csv
Anexo 3	Características fisiográficas calculadas para as bacias incrementais dos 155 açudes monitorados pela COGERH	.xlsx
Anexo 4	Base cartográfica para o cálculo das características fisiográficas	.tif e .shp
Anexo 5	Séries mensais de vazões medidas (quando há dados) e calculadas com o SMAP (quando não há dados) para as bacias de 28 estações fluviométricas.	.xlsx
Anexo 6	Descrição metodológica, calibração e validação do modelo de regionalização de vazões ML1 - (Alexandre, 2005)	.doc
Anexo 7	Descrição metodológica, calibração e validação do modelo de regionalização de vazões ML2 - Estudo de regionalização de vazões	.doc e .pdf
Anexo 8	Séries mensais de vazões (m ³ /s) INCREMENTAIS afluentes aos 155 açudes monitorados pela COGERH considerando os diversos métodos de regionalização	.xlsx
Anexo 9	Faixas de ocorrência (limite máximo, mínimo e valor previsto) das lâminas médias escoadas (mm/ano) obtidas por técnicas de aprendizado de máquina (RR e árvore de regressão)	.xlsx
Anexo 10	Dados dos reservatórios sem séries de afluência fornecidas (adotadas médias regionais de coeficiente de escoamento, de coeficiente de variação e de fragmentos de distribuição sazonal das vazões)	.xlsx
Anexo 11	Vazões diárias preliminares calculadas por engenharia reversa para os 155 reservatórios monitorados pela COGERH	.xlsx
Anexo 12	Diagrama unifilar iterativo da rede de reservatórios considerando aqueles monitorados pela COGERH	.html
Anexo 13	Séries mensais de vazões (m ³ /s) TOTAIS afluentes aos 155 açudes monitorados pela COGERH considerando os diversos métodos de regionalização e a operação dos reservatórios com Q90 e Q95	.xlsx
Anexo 14	Percentis P10-P90 das vazões Q90, Q95 e Q98 dos reservatórios monitorados, considerando a incerteza dos parâmetros	.xlsx
Anexo 15	Séries mensais de vazões (m ³ /s) INCREMENTAIS afluentes a 154 açudes monitorados pela COGERH considerando o modelo escolhido para cada reservatório - SÉRIES OFICIAIS	.xlsx
Anexo 16	Séries mensais de vazões (m ³ /s) TOTAIS afluentes a 154 açudes monitorados pela COGERH considerando o modelo escolhido para cada reservatório e a operação dos reservatórios com Q90, Q95 e Q98 - SÉRIES OFICIAIS	.xlsx
Anexo 17	Resumo dos resultados	.xlsx