



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

**ECKHARD MOZART BEZERRA DA COSTA**

**A INFLUÊNCIA DA MORFOMETRIA DOS RESERVATÓRIOS  
SUPERFICIAIS NAS PERDAS POR EVAPORAÇÃO NO SEMIÁRIDO  
POTIGUAR**

**NATAL/RN**

**2018**

**ECKHARD MOZART BEZERRA DA COSTA**

**A INFLUÊNCIA DA MORFOMETRIA DOS RESERVATÓRIOS SUPERFICIAIS  
NAS PERDAS POR EVAPORAÇÃO NO SEMIÁRIDO POTIGUAR**

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

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup>. Adelena Gonçalves Maia

Co-orientador: Prof. Dr. Paulo Sergio Lucio

**NATAL/RN**

**2018**

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN  
Sistema de Bibliotecas - SISBI  
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Costa, Eckhard Mozart Bezerra da.

A influência da morfometria dos reservatórios superficiais nas perdas por evaporação no semiárido potiguar / Eckhard Mozart Bezerra da Costa. - 2018.

33 f.: il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária. Natal, RN, 2018.

Orientadora: Profa. Dra. Adelena Gonçalves Maia.

Coorientador: Prof. Dr. Paulo Sergio Lucio.

1. Reservatórios superficiais - Dissertação. 2. Evaporação - Dissertação. 3. Morfometria - Dissertação. I. Maia, Adelena Gonçalves. II. Lucio, Paulo Sergio. III. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 627.81:556.13

ECKHARD MOZART B. COSTA

**A INFLUÊNCIA DA MORFOMETRIA DOS RESERVATÓRIOS SUPERFICIAIS  
NAS PERDAS POR EVAPORAÇÃO NO SEMIÁRIDO POTIGUAR**

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

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup>. Adelena Gonçalves Maia

BANCA EXAMINADORA



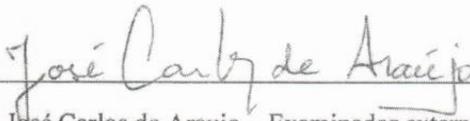
---

Prof.<sup>a</sup> Dra. Adelena Gonçalves Maia – Orientadora  
Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN



---

Prof. Dra. Joana Darc Freire de Medeiros – Examinadora interna  
Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN



---

Prof. Dr. José Carlos de Araújo – Examinador externo  
Universidade Federal do Ceará – UFC

NATAL/RN

2018

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por ter me dado saúde e força.

Agradeço a minha família, principalmente aos meus pais, que sempre me apoiaram de todas as formas possíveis.

À minha namorada, Valeska Bulhões, por todo apoio, incentivo e por estar sempre presente quando mais precisei.

Aos meus colegas, amigos e demais pessoas que fizeram parte de toda a minha jornada acadêmica.

Agradeço a todos os professores, em especial a Fabiana Oliveira, Joana Darc, Vanessa Becker, Ronaldo Angelini, Lúcio Flávio, que me proporcionaram um caminho mais prazeroso ao conhecimento e aos meus orientadores, em especial a Profa. Dra. Adelena Gonçalves Maia, que me orientou desde o primeiro semestre, sendo uma das principais responsáveis pelo desenvolvimento deste trabalho.

## RESUMO

Os reservatórios superficiais são essenciais ao abastecimento de água, produção de alimentos e diversas atividades econômicas nas regiões semiáridas. No entanto, nessas regiões, devido ao clima bastante seco caracterizado pela irregularidade pluviométrica e por altas temperaturas, as elevadas taxas de evaporação interferem significativamente nas eficiências dos reservatórios superficiais. Em meio a isso, a morfometria dos reservatórios tem sido frequentemente reconhecida como uma das características mais impactantes no volume de água evaporado nos reservatórios. Desta forma, utilizando análise de regressão linear múltipla, este trabalho formulou um modelo matemático previsor da taxa de volume evaporado anual médio dos reservatórios a partir dos seus parâmetros morfométricos.

**Palavras-chave:** reservatórios superficiais, evaporação, morfometria.

## ABSTRACT

Superficial reservoirs are essential for water supply, food production and various economic activities in semi-arid regions. However, in these regions, due to the fairly dry climate characterized by rainfall irregularity and high temperatures, the high evaporation rates significantly interfere with the surface reservoir efficiencies. In the midst of this, reservoir morphometry has been frequently recognized as one of the most striking features in the volume of evaporated water in the reservoirs. Thus, using multiple linear regression analysis, this work formulated a predictive mathematical model of the average annual evaporated volume rate of the reservoirs from their morphometric parameters.

**Key words:** surface reservoirs, evaporation, morphometry.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1-Equações utilizadas na obtenção dos parâmetros morfométricos secundários (VON SPERLING, 1999). .....	16
Tabela 2-Estatística descritiva das variáveis dos reservatórios .....	21
Tabela 3-Classificação dos conjuntos concorrentes de preditores pelo Critério de Informação de Akaike (AIC).....	21
Tabela 4-Resultados da Regressão Linear Múltipla e Teste de Hipóteses .....	23

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1-Localização dos reservatórios utilizados na pesquisa.....	13
Figura 2- a) Representação esquemática da divisão dos reservatórios em cinco faixas de armazenamento hipotéticas. b) Gráfico que representa a faixa de armazenamento atribuída a cada mês do ano.....	15
Figura 3-Importância relativa dos preditores do modelo com intervalo de confiança de 95%.24	
Figura 4-a)Gráfico de resíduos vs. valores ajustados; b) Gráfico de localização de escala; c) Gráfico de normalidade dos resíduos; d) Gráfico de alavancagem dos resíduos. ....	26

## LISTA DE ABREVIATURAS

TVE	Taxa de volume evaporado anual médio
FF	Fator de forma
VOL	Volume
BHCA	Área da bacia hidráulica
BHGA	Área da bacia hidrográfica
PROF	Profundidade
PROFM	Profundidade média
DV	Desenvolvimento do volume
FE	Fator de envolvimento
RLM	Regressão linear múltipla
AIC	Critério de informação de Akaike
RSS	Soma residual de quadrados
ER	Relação evidência

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	11
<b>2. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	12
<b>2.1. Área de estudo</b> .....	13
<b>2.2. Evaporação dos reservatórios</b> .....	13
<b>2.3. Parâmetros morfométricos dos reservatórios</b> .....	15
<b>2.4. Regressão linear múltipla</b> .....	16
<b>2.5. Seleção de variáveis significativas</b> .....	17
<b>2.6. Pressupostos da Regressão Linear Múltipla</b> .....	19
<b>2.6.1. Multicolinearidade</b> .....	19
<b>2.6.2. Normalidade dos resíduos</b> .....	19
<b>2.6.3. Homocedasticidade</b> .....	20
<b>2.6.4. Observações influentes</b> .....	20
<b>2.6.5. Linearidade</b> .....	20
<b>3. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	20
<b>3.1. Caracterização geométrica dos reservatórios</b> .....	20
<b>3.2. Volume evaporado anual dos reservatórios</b> .....	21
<b>3.3. Variáveis significativas</b> .....	21
<b>3.4. Modelo matemático</b> .....	22
<b>3.5. Diagnóstico do modelo de regressão</b> .....	24
<b>4. CONCLUSÕES</b> .....	26
<b>5. REFERÊNCIAS</b> .....	28
<b>APÊNDICES</b> .....	31
<b>APÊNDICE A – Dados dos reservatórios utilizados na pesquisa</b> .....	31
<b>APÊNDICE B – Gráfico de correlação entre as variáveis utilizadas na pesquisa</b> .....	33
<b>APÊNDICE C – Script das análises e testes efetuados utilizando o software R.</b> .....	34

## 1. INTRODUÇÃO

Nas regiões de clima semiárido a construção de reservatórios superficiais é condição essencial à obtenção de suprimentos de água, tendo os açudes se tornado a fonte hídrica mais acessada. Esses reservatórios recebem os excedentes hídricos escoados nos eventos pluviométricos capazes de superar as abstrações iniciais de sua bacia e os guarda para disponibilizar a água nos períodos de estio (CAMPOS *et al.*, 2003).

No entanto, nessas regiões, devido ao clima bastante seco caracterizado pela irregularidade pluviométrica e por altas temperaturas, as elevadas taxas de evaporação interferem significativamente nas eficiências dos reservatórios superficiais, chegando a representar mais de 90% do volume precipitado anual médio em alguns reservatórios (FONTES *et al.*, 2003). A evaporação em regiões áridas e semiáridas é muito maior do que os outros elementos do ciclo hidrológico, como precipitação, escoamento e fluxo de água subterrânea (BENZAGHTA *et al.*, 2012). Por exemplo, na Arábia Saudita, a evaporação média anual das superfícies de águas abertas é estimada entre 2500 e 3000 mm, enquanto a taxa de precipitação média anual varia de 100 a 150 mm. (ALHASSOUN *et al.*, 2011). Gokbulak e Ozhan (2006) estudaram a perda por evaporação de 35 hidrelétricas, que equivalem a 8% da capacidade hidrelétrica instalada mundialmente e constataram que nos reservatórios estudados a perda anual por evaporação equivale a 10% da demanda para produção agrícola mundial estimada pro ano de 2000. Considerando as perdas por evaporação das outras hidrelétricas não utilizadas no estudo além de outros reservatórios do mundo (não hidrelétricas), podemos chegar a um montante de perdas hídricas por evaporação altamente relevante.

As taxas de evaporação são também relevantes para a viabilidade econômica de quaisquer projetos de reserva de água, pois as perdas por evaporação contribuem potencialmente para o risco geral de investimento. Percebe-se então que o fenômeno da evaporação no semiárido tem papel fundamental no dimensionamento e manejo de obras hídricas, que deve ser minuciosamente investigado para subsidiar ações de planejamento e gerenciamento na busca de um melhor aproveitamento das águas reservadas (FONTES, 2003). Portanto, diante das adversidades climáticas, das necessidades humanas e dos riscos econômicos, surge a necessidade de integrar criteriosamente o conhecimento da evaporação na elaboração de projetos de reservatórios, priorizando as condições que minimizem este processo.

Em meio a isso, a morfometria tem sido frequentemente reconhecida como uma das características mais importantes que influenciam o volume de água evaporado nos reservatórios

(JOHANSSON *et al.*, 2007; MAJIDI *et al.*, 2015). Para exemplificar, tomemos em conta dois reservatórios com mesmo volume e diferentes morfometrias. Como eles possuem diferentes áreas de espelhos d'água, também possuem diferentes volumes evaporados. Do mesmo modo, um lago mais profundo é capaz de armazenar muito mais calor do que um lago mais raso, as taxas de evaporação sazonal podem variar consideravelmente dependendo da morfometria e, portanto, do regime térmico do lago (MORTON, 1967; HOY e STEPHENS, 1975; CROLEY, 1992). Segundo Mekonnen *et al.* (2012), o volume evaporado é mais sensível à variação da área de superfície do reservatório do que à mudança de características climáticas.

Na caracterização morfométrica dos reservatórios, a utilização de parâmetros geométricos primários, como: volume máximo, área de superfície e profundidade não fornecem sozinhos bons resultados. Uma abordagem para lidar com esse problema tem sido incorporar variáveis que caracterizem as curvas cota x área x volume ou curvas hipsométricas (JOHANSSON *et al.*, 2007). Através das curvas hipsométricas pode-se obter, por exemplo, o fator de forma, número que retrata a abertura da bacia hidráulica do reservatório (CAMPOS *et al.*, 2001).

Na escolha do local de implantação de um reservatório, normalmente seleciona-se um vale com topografia favorável e implanta-se uma barragem para acumular água, sem avaliar a influência da morfometria da bacia hidráulica do reservatório no processo de evaporação. Logo, considerando as altas perdas por evaporação na região semiárida, é importante a escolha de locais que maximizem a eficiência do armazenamento. Em vista disso, o presente trabalho tem como objetivo apresentar os parâmetros morfométricos mais associadas à eficiência dos reservatórios e criar um modelo matemático previsor da taxa de volume evaporado anual médio dos reservatórios através desses parâmetros. Dessa forma, o modelo poderá ser utilizado como ferramenta no planejamento da operação de reservatórios para caracterizar sua susceptibilidade ao processo de evaporação e também na seleção dos melhores locais para implantação de reservatórios de acumulação.

## **2. MATERIAL E MÉTODOS**

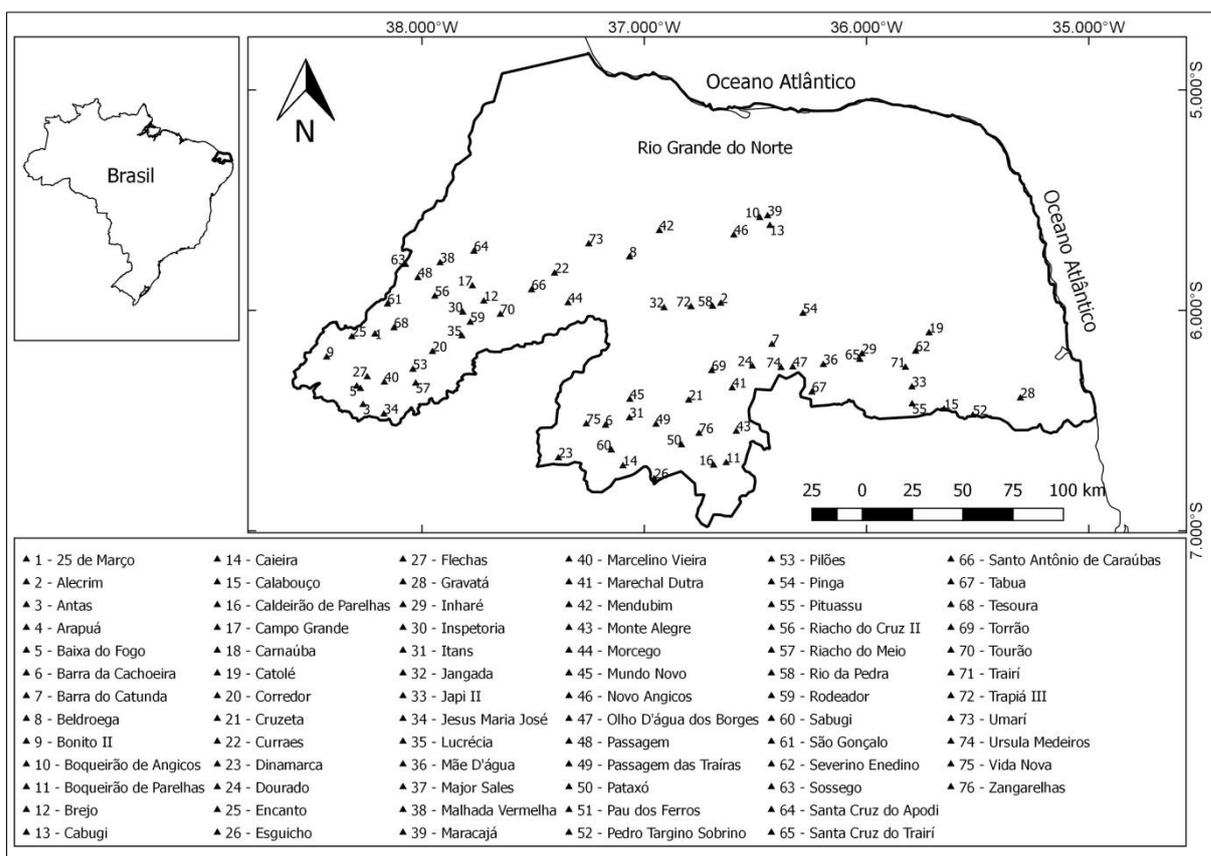
A determinação do modelo matemático proposto neste estudo foi realizada através das atividades listadas a seguir:

- (i) Cálculo da taxa de volume evaporado anual médio dos reservatórios;
- (ii) Obtenção dos parâmetros morfométricos dos reservatórios;
- (iii) Construção do modelo matemático representativo da relação entre a taxa de volume evaporado anual médio dos reservatórios e suas características morfométricas.

## 2.1. Área de estudo

Foram utilizados nesta pesquisa dados de 76 reservatórios localizados na região semiárida do Rio Grande do Norte (Figura 1), sendo todos eles monitorados pela Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Estado (SEMARH), com capacidade de armazenamento variando de 0,09 hm<sup>3</sup> a 599,71 hm<sup>3</sup>.

Figura 1-Localização dos reservatórios utilizados na pesquisa



## 2.2. Evaporação dos reservatórios

O volume evaporado anual dos reservatórios foi calculado através do produto entre a taxa de evaporação local e a área de superfície dos reservatórios que é uma variável oscilante ao longo tempo.

Com relação à taxa de evaporação local, foi utilizado o método de estimativa de Jensen and Haise (1963) indicado na pesquisa de Majidi et al. (2014) como sendo o mais representativo dos valores reais de taxa de evaporação para lagos e reservatórios situados em regiões semiáridas. O método utilizado é apresentado a seguir:

$$E_d = 0,03523 R_s (0,014T_a - 0,37) \quad (1)$$

Em que,  $R_s$  representa a insolação ( $\text{W}/\text{m}^2$ ),  $T_a$  a temperatura do ar em graus Fahrenheit ( $^{\circ}\text{F}$ ) e  $E_d$  a taxa de evaporação diária ( $\text{mm}/\text{dia}$ ).

Os dados de temperatura média do ar e insolação, necessários à utilização do método acima, foram obtidos do BDMEP (Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa) do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) e do Atlas Solarimétrico do Brasil, respectivamente. A maioria das localidades, onde os reservatórios em estudo estão inseridos, não possui estações meteorológicas. Portanto, os dados meteorológicos de cada reservatório foram considerados como sendo os das estações meteorológicas mais próximas aos reservatórios. As estações meteorológicas do semiárido potiguar estão localizadas nas cidades de Apodi, Cruzeta, Florânia, Macau e Mossoró.

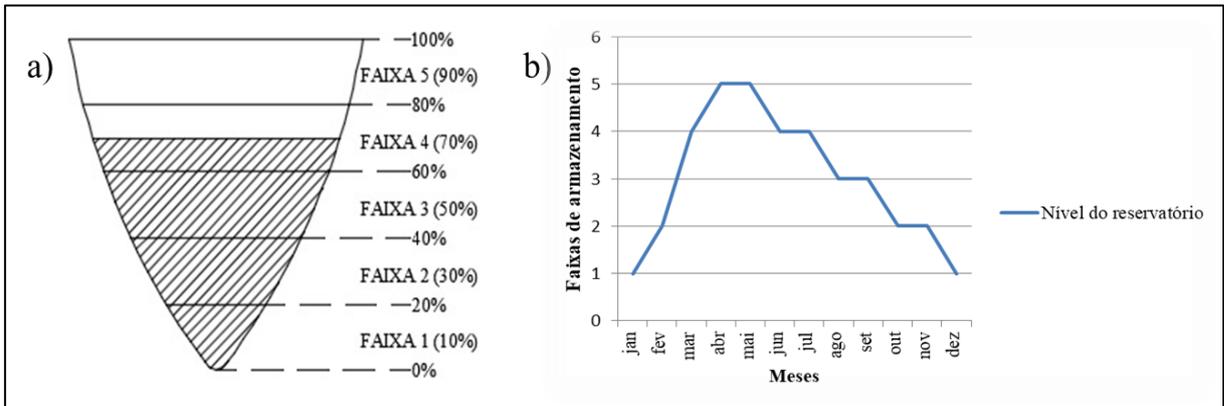
Os volumes evaporados dos reservatórios foram calculados multiplicando-se as suas taxas de evaporação médias mensais pelas suas áreas de superfície, conforme equação abaixo:

$$VE = E_m \cdot A_s \quad (2)$$

Em que,  $VE$  é o volume evaporado mensal,  $E_m$  é a taxa de evaporação média mensal ( $E_m = E_d \cdot 30$ ) e  $A_s$  a área de superfície do reservatório.

A área de superfície dos reservatórios varia de acordo com o nível de armazenamento. Os volumes evaporados foram calculados mensalmente a partir de uma área média de superfície do reservatório. Estas áreas médias foram determinadas a partir de faixas de volume especificados na figura 2(a). Para cada faixa de volume, referente a uma variação de um percentual do volume máximo, foi calculada a área média. Na figura 2(a) temos como exemplo a faixa 4, onde a área média é referente a capacidade de 70% do volume máximo, visto que a faixa 4 representa uma variação entre 60 e 80% do volume máximo. Para cada mês foi considerado que os reservatórios apresentavam volumes em diferentes faixas (fig. 2b). Esta consideração foi feita para que tivéssemos a mesma variação de volume para todos os reservatórios, pois se considerássemos diferentes variações, teríamos outra condição que iria interferir nos volumes evaporados anuais médios. Sabemos que nem todos os reservatórios apresentam este comportamento, de variação de cheio a vazio no período de um ano, logo se deve fazer a ressalva que os nossos resultados são para a variação apresentada na figura 2(b). Foi atribuído um padrão genérico de variação volumétrica dos reservatórios ao longo do ano (fig. 2b), de modo a permitir extrair, a partir das curvas hipsométricas, a área de superfície do reservatório em cada mês. Os reservatórios que apresentam um padrão significativamente diferente do padrão utilizado não poderão ser incluídos no modelo.

Figura 2-a) Representação esquemática da divisão dos reservatórios em cinco faixas de armazenamento hipotéticas. b) Gráfico que representa a faixa de armazenamento atribuída a cada mês do ano.



Dessa forma, foram calculados os volumes evaporados mensais e posteriormente os volumes evaporados anuais de cada reservatório. Os resultados foram convertidos em taxas de volumes evaporados anuais médios (*TVE*) através da relação de porcentagem entre o volume evaporado anual e a capacidade de armazenamento de cada reservatório. Esse procedimento foi realizado com a finalidade de que todos os reservatórios seguissem o mesmo padrão de variação do seu volume ao longo do ano, de forma que a mudança nesse padrão não fosse mais um critério a influenciar os resultados dos volumes evaporados.

### 2.3. Parâmetros morfométricos dos reservatórios

Foram investigados neste trabalho parâmetros morfométricos primários e secundários. Os parâmetros primários investigados foram: volume máximo (*VOL*), área da bacia hidráulica (*BHCA*), área da bacia hidrográfica (*BHGA*) e profundidade máxima (*PROF*), cujos dados foram obtidos a partir das fichas técnicas dos reservatórios fornecidas pela SEMARH. Os parâmetros secundários investigados foram: fator de forma (*FF*), profundidade média (*PROFM*), desenvolvimento do volume (*DV*) e fator de envolvimento (*FE*), cujos valores foram calculados a partir dos parâmetros primários, conforme indicação de Von Sperling (1999). A tabela 1 apresenta um resumo das equações utilizadas no cálculo dos parâmetros secundários.

O fator de forma (*FF*) mede o grau de abertura da bacia hidráulica do reservatório, ou seja, quanto maior o fator de forma, mais aberta é a bacia e maior a susceptibilidade da água armazenada à evaporação (VON SPERLING, 1999).

A profundidade média (*PROFM*) é dada pela relação entre o volume de água acumulado e a superfície do espelho d'água atentando para a coerência entre as unidades adotadas (por exemplo, km<sup>3</sup> e km<sup>2</sup> ou m<sup>3</sup> e m<sup>2</sup>) (VON SPERLING, 1999).

O desenvolvimento do volume (*DV*) é fornecido pela razão entre o volume do lago e o volume de um cone que tenha área igual à do lago e altura equivalente à sua profundidade máxima. Através de simplificações, essa relação pode ser substituída pela equação mostrada na tabela 1. Se *DV* for inferior a 1 o lago tem forma convexa (formato semelhante à letra V), isto é, ele está contido dentro do cone teórico referido acima. Quando *DV* for maior que 1 o lago é do tipo côncavo (formato semelhante à letra U), ou seja, sua bacia ou depressão excede os limites do cone padrão (VON SPERLING, 1999).

Tabela 1-Equações utilizadas na obtenção dos parâmetros morfométricos secundários (VON SPERLING, 1999).

<b>Parâmetro morfométrico secundário</b>	<b>Equação de obtenção</b>
Fator de forma	$FF = \frac{VOL}{PROF^3}$
Profundidade média	$PROFM = \frac{VOL}{BHCA}$
Desenvolvimento do volume	$DV = 3 \cdot \left( \frac{PROFM}{PROF} \right)$
Fator de envolvimento	$FE = \frac{BHGA}{BHCA}$

O fator de envolvimento (*FE*) é um parâmetro adimensional dado pela razão entre a área da bacia hidrográfica do lago e a área do próprio lago. No caso de lagos naturais os valores mais comuns são da ordem de algumas dezenas, ao passo que em represas, cujas bacias hidrográficas são geralmente bem maiores em relação ao tamanho do corpo d'água (barramentos de grandes rios em vales escarpados), o fator de envolvimento atinge algumas centenas, podendo eventualmente ser maior que 1000 (VON SPERLING, 1999).

#### **2.4. Regressão linear múltipla**

Foi empregada a Análise de Regressão Linear Múltipla (RLM) na construção do modelo matemático proposto neste trabalho. Para esse fim foi utilizado o *software* estatístico R, que possui domínio público e código fonte aberto. O R, como é usualmente chamado pelos usuários, é uma importante ferramenta na análise e manipulação de dados, com testes paramétricos

e não paramétricos, modelagem linear e não linear, além de apresentar facilidade na elaboração de diversos tipos de gráficos. O script executado no R, para a RLM e os demais testes, foi disponibilizado no Apêndice C.

A equação geral de regressão linear múltipla usada para desenvolver a equação de estimação para a variável dependente é apresentada como:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_kX_k + \varepsilon \quad (3)$$

Onde,  $Y$  é a variável dependente;  $X_1, X_2, \dots, X_k$  são as variáveis independentes;  $b_0, b_1, b_2, \dots, b_k$  são denominados parâmetros da regressão e  $\varepsilon$  é o termo que representa o resíduo ou erro da regressão. Neste trabalho a taxa de volume evaporado anual médio ( $TVE$ ) foi tomada como variável dependente e os parâmetros morfométricos ( $VOL, BHCA, BHGA, PROF, FF, PROFM, DV$  e  $FE$ ) foram tomados como variáveis independentes.

O teste de hipóteses e o coeficiente de determinação ajustado foram aplicados para avaliar a qualidade do ajuste no nível de significância pretendido. O valor- $p$  obtido para o parâmetro de taxa de volume evaporado anual médio foi comparado com o valor tabulado da distribuição Student para nível de significância  $\alpha = 0,01$  em  $n-1$  graus de liberdade. Quando o valor calculado é inferior ao valor tabulado, a hipótese nula é aceita, o que significa que a hipótese de que as equações de regressão obtidas podem prever as taxas de volumes evaporados, com 99% de precisão e erro padrão de 1%, é verdadeira e válida.

O coeficiente de determinação ajustado ( $r_{ajust}^2$ ) é uma medida da proporção da variação da variável resposta  $Y$  que é explicada pela equação de regressão quando estão envolvidas as variáveis independentes  $X_1, X_2, \dots, X_k$ . Diferente do  $r^2$  múltiplo, o  $r_{ajust}^2$  leva em conta o número de regressores, conforme equação abaixo (LOESCH E HOELTGEBBAUM, 2012):

$$r_{ajust}^2 = 1 - \frac{\frac{SQ_E}{n-p}}{\frac{SQ_T}{n-1}} = 1 - \left( \frac{n-1}{n-p} \right) (1 - r^2) \quad (4)$$

Onde  $SQ_E$  é a soma dos quadrados da regressão,  $SQ_T$  é a soma dos quadrados total,  $n$  é o número de observações,  $p$  é o número de regressores e  $r^2$  o coeficiente de determinação básico.

## 2.5. Seleção de variáveis significativas

Normalmente, nem todas as variáveis são significativas para a construção de um modelo matemático, logo é indispensável obter um subconjunto de variáveis que contribuam no sentido de melhorar o modelo. Desse modo, para determinar as variáveis significantes para a cria-

ção do modelo, foram empregados dois métodos de seleção de variáveis, o Critério de Informação de Akaike (AIC) e o Teste de Hipóteses.

O AIC é um valor numérico pelo qual se classificam conjuntos de preditores concorrentes em termos de perda de informação (SYMONDS E MOUSSALLI, 2010). Desse modo, calculou-se um valor de AIC para cada arranjo de variáveis preditoras e o arranjo com menor valor de AIC representou o melhor conjunto preditor de aproximação.

O AIC foi calculado como:

$$AIC = -2 \log(L(\theta)) + 2K$$

Onde  $L(\theta)$  é a máxima verossimilhança/probabilidade dos parâmetros estimados ( $\theta$ ). O  $\theta$  quantifica os efeitos de variáveis explicativas em um modelo e inclui o intercepto, os coeficientes de regressão e a variância residual.  $K$  é o número de parâmetros livres do conjunto de variáveis explicativas concorrente (TESFAMICHAEL *et al.*, 2018).

Conforme mencionado acima, os conjuntos de preditores foram classificados pelo AIC sendo o melhor conjunto aquele com o valor AIC mais baixo (mais negativo). Portanto, o AIC levou em consideração o quão bem o conjunto de preditores se adaptou aos dados, e o menor número de parâmetros ajustados ( $k$ ), ou seja, os conjuntos com menos parâmetros foram favorecidos (SYMONDS E MOUSSALLI, 2011; TEFAMICHAEL *et al.*, 2018).

O teste de hipóteses também foi utilizado como método de seleção de variáveis significativas e tomou como base as seguintes suposições:

$H_0: \beta_i = 0$  (quando o regressor não é significativo)

$H_1: \beta_i \neq 0$  (quando o regressor é significativo)

A aceitação de  $H_0$  significa que o termo de coeficiente  $\beta_i$  deve ser abandonado da equação de regressão por ser não significativo. Admitindo-se a hipótese  $H_0$  verdadeira, a estatística:

$$t = \frac{\beta_i}{s(\beta_i)} \quad (6)$$

segue uma distribuição de Student de  $n-k-1$  graus de liberdade. Calcula-se o valor- $p$  de  $t$  e compara-se ao nível de significância  $\alpha$ . Se o valor- $p$  for inferior, rejeita-se  $H_0$ . Caso contrário, aceita-se a hipótese de  $H_0$  (LOESCH E HOELTGEBAUM, 2012).

Finalizada a seleção de variáveis significativas, foi calculada a importância relativa de cada preditor utilizando o método LMG (LINDEMANN *et al.*, 1980), que fornece uma média da soma sequencial de quadrados obtida de todas as ordens possíveis dos preditores, com intervalo de confiança de 95% e 1000 réplicas de Bootstrap. A medida LMG decompõe o  $r^2$  em

contribuições não negativas de cada variável que quando somadas equivalem ao  $r^2$  total através da média da soma sequencial dos quadrados entre todas as ordenações possíveis dos regressores.

A medida LMG é dada por:

$$LMG(x_k) = \frac{1}{p!} \sum_{r \text{ permutation}} seqr^2(\{x_k\}|r) \quad (7)$$

Em que,  $r$  denota a  $r$ -permutação, com  $r=1, \dots, p!$ , e  $seqr^2(\{x_k\}|r)$  é a soma sequencial dos quadrados para o regressor  $x_k$  no ordenamento dos regressores na  $r$ -ésima permutação. Por exemplo, quando se emprega três regressores de circunstâncias ( $p = 3$ ), há seis ordenamentos ( $3! = 6$ ) e seis estimações diferentes para cada variável explicativa. A importância relativa de cada variável será dada pela média das seis estimativas.

## 2.6. Pressupostos da Regressão Linear Múltipla

Para garantir a integridade dos testes de ajustamento e de significância do modelo alguns pressupostos precisaram ser atendidos, como: ausência de multicolinearidade, normalidade dos valores e dos erros, linearidade e homocedasticidade.

### 2.6.1. Multicolinearidade

A multicolinearidade é o problema de variáveis independentes que são altamente correlacionadas. Suas consequências são estimativas instáveis e erros padrão inflacionados (LATTIN *et al*, 2011). Esse pressuposto foi verificado através do exame de correlação existente entre as diversas variáveis independentes (Apêndice B). Quando não são identificadas correlações significantes entre as variáveis independentes, elas não contêm informações similares e, portanto não há multicolinearidade entre os dados. A ausência de multicolinearidade também pode ser verificada de modo indireto, através dos valores- $p$  dos coeficientes obtidos durante a análise de regressão.

### 2.6.2. Normalidade dos resíduos

De acordo com Filho (2011), o método de mínimos quadrados opera melhor quando os erros são normalmente distribuídos. Erros substancialmente assimétricos podem comprometer a eficiência dos mínimos quadrados ordinários e podem levantar dúvidas quanto à razoabilidade de se estimar a média condicional da variável resposta a partir das variáveis predictoras. A condição de normalidade dos resíduos é também necessária para a definição de intervalos

de confiança e testes de significância. O pressuposto de normalidade dos resíduos foi avaliado através dos gráficos de resíduos x valores ajustados e de análise de normalidade.

### **2.6.3. Homocedasticidade**

O conjunto de resíduos dos valores ajustados pelo modelo de regressão devem possuir variância constante ou homogênea. A violação desse pressuposto indica que a inferência sobre a significância da estimativa da variável resposta pode estar subestimada ou superestimada para determinadas observações (LATTIN *et al*, 2011).

### **2.6.4. Observações influentes**

As observações influentes têm um potencial de grande impacto sobre os modelos de regressão. Através do gráfico de alavancagem dos resíduos foram identificadas as observações com alta alavancagem e verificada sua exatidão (LATTIN *et al*, 2011).

### **2.6.5. Linearidade**

A linearidade da regressão representa o grau em que a variação na variável dependente está associada com as variáveis independentes de forma estritamente linear. Esse pressuposto foi verificado através dos resultados do coeficiente de determinação ajustado ( $r^2_{ajustado}$ ) e pelos valores-*p* do Teste de Hipóteses.

## **3. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **3.1. Caracterização geométrica dos reservatórios**

A caracterização geométrica dos reservatórios foi representada nesse trabalho pelos parâmetros morfométricos: volume máximo (*VOL*), área da bacia hidráulica (*BHCA*), área da bacia hidrográfica (*BHGA*), profundidade máxima (*PROF*), fator de forma (*FF*), profundidade média (*PROFM*), desenvolvimento do volume (*DV*) e fator de envolvimento (*FE*). Os dados e a estatística descritiva foram apresentados no Apêndice A e na tabela 2, respectivamente.

De acordo com a estatística descritiva os reservatórios possuem formatos e tamanhos variados. Cerca de 70% dos reservatórios são considerados pequenos (volume máximo abaixo de 10 hm<sup>3</sup>) e o restante é considerado de grande porte (volume máximo acima de 10 hm<sup>3</sup>).

Tabela 2-Estatística descritiva das variáveis dos reservatórios

	TVE (%)	FF	VOL (hm <sup>3</sup> )	BHCA (ha)	BHGA (km <sup>2</sup> )	PROF (m)	PROFM (m)	DV	FE
Mínimo	8,82	277,69	0,09	1,42	1,00	4,00	0,73	0,05	7,25
1° Quartil	23,98	2519,78	3,62	66,59	49,75	9,00	3,24	0,94	48,37
Médiana	30,87	4996,62	6,94	167,00	133,00	12,00	4,69	1,10	104,58
3° Quartil	41,79	9115,07	13,96	319,03	500,46	15,37	6,14	1,37	174,29
Máximo	88,57	36772,82	599,71	3413,36	7600,00	47,20	19,13	11,48	21141,65
Desvio padrão	15,34	6863,56	69,20	564,36	1135,68	6,86	3,00	1,26	2429,99

### 3.2. Volume evaporado anual dos reservatórios

As taxas de volume evaporado anuais (*TVE*) calculadas conforme as equações 1 e 2 também são apresentadas no Apêndice A. Os resultados de *TVE* revelaram os reservatórios mais eficientes quanto às perdas por evaporação, sendo eles, os reservatórios Cabugi e Santa Cruz do Apodi. O primeiro deles faz parte do grupo dos reservatórios de menor porte enquanto que o segundo é um dos maiores reservatórios do Estado. Essa comparação indica, a princípio, a ausência de associação entre volume e eficiência de armazenamento de água que também pode ser notada na baixa correlação ( $r=0,27$ ) entre as variáveis *TVE* e *VOL* (Apêndice B). O reservatório menos eficiente é Dinamarca que possui *TVE* aproximada de 90% e também o maior fator de forma (*FF*) dentre os reservatórios em estudo.

A *TVE* apresenta pequeno desvio padrão em relação a outras variáveis. Entretanto, dependendo da capacidade de armazenamento do reservatório, pequenas alterações nesse indicador podem representar grandes prejuízos hídricos.

### 3.3. Variáveis significativas

Foram utilizados o Critério de Informação de Akaike (AIC) e o Teste de Hipóteses como métodos de seleção de variáveis significativas.

Os resultados do método AIC são apresentados na tabela 3.

Tabela 3-Classificação dos conjuntos concorrentes de preditores pelo Critério de Informação de Akaike (AIC)

Nº	Conjuntos concorrentes de preditores	AIC
1	FF ; VOL ; BHCA ; PROF ; PROFM ; DV ; FE	338,24

2	FF ; VOL ; BHCA ; BHGA ; PROF ; PROFM ; DV ; FE	340,00
3	FF ; VOL ; BHCA ; BHGA ; PROFM ; DV ; FE	341,89
4	FF ; VOL ; BHCA ; BHGA ; PROF ; PROFM ; DV	342,75
5	FF ; VOL ; BHGA ; PROF ; PROFM ; DV ; FE	350,18
6	FF ; VOL ; BHCA ; BHGA ; PROF ; PROFM ; FE	351,95
7	VOL ; BHCA ; BHGA ; PROF ; PROFM ; DV ; FE	355,91
8	FF ; VOL ; BHCA ; BHGA ; PROF ; DV ; FE	357,67
9	FF ; BHCA ; BHGA ; PROF ; PROFM ; DV ; FE	361,21

A análise realizada com o AIC indicou os conjuntos de preditores de 1 a 9 (tabela 3) como sendo as opções de representação da variável resposta.

Entretanto, o Teste de Hipóteses indicou as variáveis *FF*, *VOL*, *BHCA*, *PROFM* e *DV* como significativas em nível de confiança acima de 99% para o modelo proposto. A presença das variáveis *FF* e *BHCA* nessa análise comprova a alta influência que o tamanho da área de superfície exerce na evaporação dos reservatórios. No entanto, dentre as variáveis mais significativas, *DV* apresenta-se como o parâmetro de maior significância ( $p < 3,1 \times 10^{-10}$ ).

Dentre os resultados dos métodos de seleção de variáveis utilizados decidiu-se dar prosseguimento a análise com o grupo de preditores indicado pelo Teste de Hipóteses. Essa escolha se deu pela redução do número de regressores em relação ao modelo 1 (tabela 3) e pelo propósito de simplificação do modelo

### 3.4. Modelo matemático

O objetivo foi obter uma relação entre a taxa de volume evaporado anual médio e as características morfométricas dos reservatórios. De acordo com os gráficos de dispersão (Apêndice B) verificou-se baixa associação entre *TVE* e as variáveis morfométricas separadamente. Deste modo, almejando um modelo de previsão com melhor ajuste (maior  $r^2$ ) foi utilizada a regressão linear múltipla, que permite utilizar duas ou mais variáveis preditoras, para verificar a capacidade de previsão das variáveis geométricas e prever a taxa de volume evaporado anual médio dos reservatórios. Logo, a *TVE* anual foi tomada como variável dependente e os parâmetros morfométricos como variáveis independentes.

Tabela 4-Resultados da Regressão Linear Múltipla e Teste de Hipóteses

Variável	Coefficiente	Erro padrão	t	Valor-p
Intercepto	43,29	3,27	13,23	< 0,001
<i>FF</i>	0,001	0,0002	3,88	< 0,001
<i>VOL</i>	0,15	0,03	4,98	< 0,001
<i>BHCA</i>	-0,02	0,003	-5,55	< 0,001
<i>PROFM</i>	-4,91	0,75	-6,55	< 0,001
<i>DV</i>	10,60	1,45	7,33	< 0,001
$r^2_{\text{ajustado}}$	0,66			

Os preditores *FF* ( $t=3,88$ ;  $p<0,001$ ), *VOL* ( $t=4,98$ ;  $p<0,001$ ), *BHCA* ( $t=-5,55$ ;  $p<0,001$ ), *PROFM* ( $t=-6,55$ ;  $p<0,001$ ), *DV* ( $t=7,33$ ;  $p<0,001$ ) são, juntos, previsores da taxa de volume evaporado anual médio dos reservatórios, pois os estimadores dos parâmetros calculados são significativos, conforme os resultados da análise apresentados na tabela 4. Os valores- $p$  encontrados, próximos de zero, mostram a alta significância de todos os coeficientes encontrados na equação de regressão.

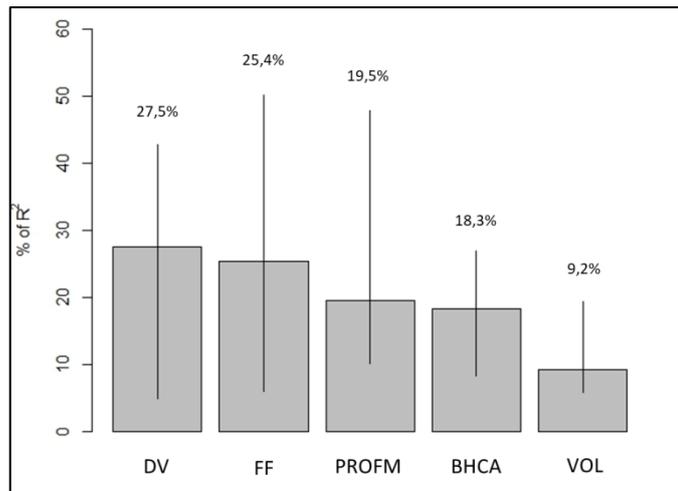
Dessa forma, a análise indicou uma regressão de forte ajuste na qual o modelo é capaz de explicar 66% dos dados coletados através da seguinte equação:

$$TVE = 43,29 + 0,001 \cdot FF + 0,15 \cdot VOL - 0,02 \cdot BHCA - 4,91 \cdot PROFM + 10,60 \cdot DV \quad (8)$$

Onde, *TVE* é a taxa de volume evaporado anual médio dos reservatórios em porcentagem (%), *FF* é o fator de forma, *BHCA* é a área da bacia hidráulica (km<sup>2</sup>), *PROFM* é profundidade média (m) e *DV* é o desenvolvimento do volume do reservatório.

O sinal negativo do preditor *BHCA* aponta uma relação inversamente proporcional dessa variável com *TVE*, o que indica, à princípio, que reservatórios com maiores áreas de superfície perdem menos água por evaporação. Contudo, verifica-se através da figura 3 que a variável *BHCA* possui pequena importância relativa (18,3%) na construção do modelo e, portanto essa relação não pode ser tomada como verdade absoluta.

Figura 3-Importância relativa dos preditores do modelo com intervalo de confiança de 95%.

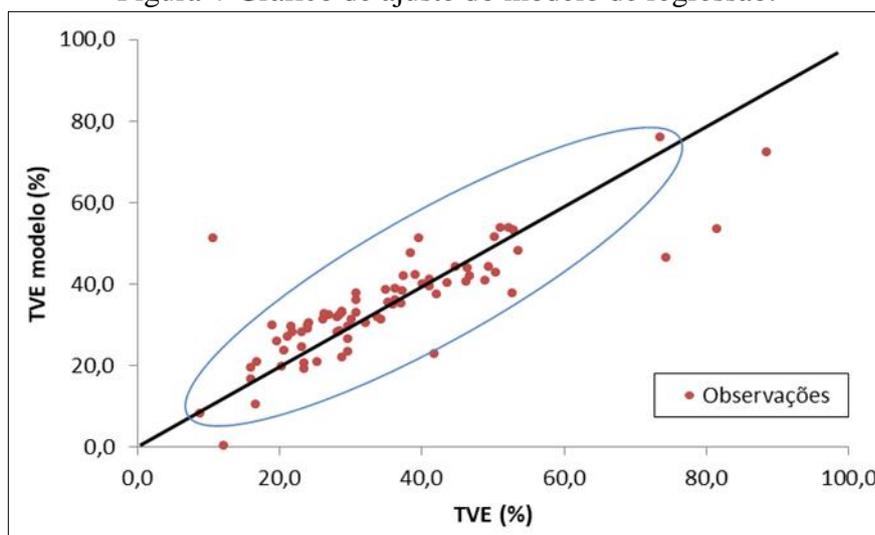


Em relação a contribuição percentual dos outros preditores o parâmetro *DV* é o mais importante contribuindo em mais de 27% na formação do modelo, seguido do parâmetro *FF* (25,4% de contribuição) e *PROFM* (19,5% de contribuição). Dessa forma, os parâmetros secundários apresentaram-se como mais importantes que os parâmetros primários. Juntos, *DV*, *FF* e *PROFM* contribuem em mais de 70% para o ajuste do  $r^2$ . Esse resultado mostra-se coerente, pois a morfometria dos reservatórios é melhor representada pelos parâmetros secundários e principalmente pelo *DV* que está diretamente associado com a morfologia da bacia hidráulica dos reservatórios. Contudo, não se pode desprezar a importância dos dois preditores primários, que contribuem juntos, em mais de 20% no ajuste do modelo.

### 3.5. Diagnóstico do modelo de regressão

Em mais de 96% do conjunto de dados o modelo foi capaz de estimar *TVE* com erros residuais menores que 20%, e apenas em 4% dos reservatórios estudados os erros residuais foram superiores a 20% (figura 5-a). Fazem parte desse último grupo os reservatórios Barra da Cachoeira, Cabugi e Jangada que apesar dos consideráveis valores residuais, não apresentam dados morfométricos heterogêneos que possivelmente ocasionassem esses erros. A figura 4 apresenta o gráfico com a nuvem de pontos, delimitada pela linha azul, em torno da reta do modelo ideal de regressão, através do qual é possível visualizar o nível de explicabilidade do modelo. O baixo número de pontos fora da nuvem também atesta o forte ajuste da regressão.

Figura 4-Gráfico de ajuste do modelo de regressão.



Os pressupostos da regressão foram aceitos indicando que as estimativas são consistentes, implicando em menor erro padrão e menor dispersão em torno da reta, favorecendo o modelo de regressão.

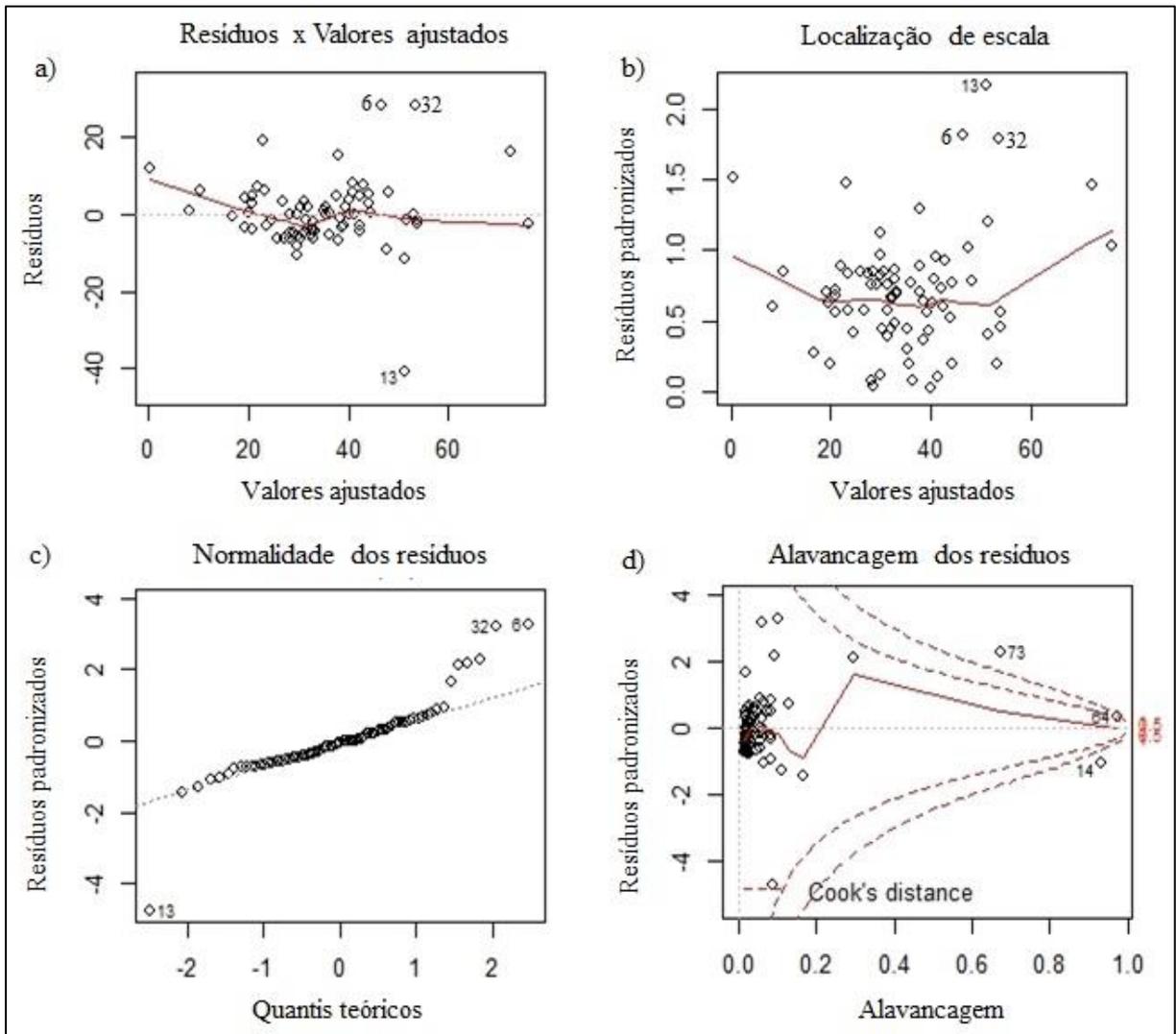
O pressuposto da ausência de multicolinearidade foi verificado através do exame de correlação (Apêndice B) entre as diversas variáveis independentes. De acordo com o exame, nota-se uma correlação significativa entre os preditores BHCA e VOL. Contudo essa multicolinearidade é superada pela força da relação entre as variáveis verificada através da significância dos valores-p desses preditores (SAMOHYL *et al*, 2009). Também é verificava multicolinearidade entre os pares de variáveis BHCA-PROF e DV-FE. Contudo, as variáveis PROF e FE não fazem parte do modelo gerado. A ausência de variáveis independentes fortemente correlacionadas certifica que as variáveis independentes fornecem informações dissimilares entre si para explicar e prever *TVE*, isto é, de modo geral, todas as variáveis possuem significância na explanação do comportamento de *TVE*.

O conjunto de resíduos produzidos em todo o intervalo das observações, apesar de conter alguns pontos destoantes, como os representados pelos pontos (6, 13 e 32), apresentou distribuição normal (figura 5-c) indicando que a grande maioria dos casos amostrados se dispõe normalmente em toda a extensão do grupo.

O pressuposto da ausência de observações influentes foi verificado através do gráfico de alavancagem de resíduos (figura 5-d) no qual se constatou a presença de duas observações (73 e 14) que poderiam forjar os resultados. Da mesma forma, em relação ao pressuposto da homocedasticidade, verificou-se através do gráfico de localização de escala (figuras 5-a e 5-b) a presença de observações (6, 13 e 32) com variância residual não homogênea, ou seja, os resí-

duos desses reservatórios foram significativamente diferentes dos outros. Contudo, a exclusão dos dados desses reservatórios implicou no aparecimento de outras observações influentes. Dessa forma, manteve-se a análise com os dados de todos os reservatórios.

Figura 5-a)Gráfico de resíduos x valores ajustados; b) Gráfico de localização de escala; c) Gráfico de normalidade dos resíduos; d) Gráfico de alavancagem dos resíduos.



#### 4. CONCLUSÕES

Os resultados mostram que o modelo gerado fornece estimativas confiáveis do ponto de vista estatístico para as quantidades evaporadas dos reservatórios. Os preditores mais importantes para a formação do modelo são o desenvolvimento do volume, fator de forma e a profundidade média, as quais são capazes de melhor representar o formato da bacia hidráulica

dos reservatórios. Os reservatórios mais eficientes em relação à evaporação possuem bacias hidráulicas mais fechadas, são mais profundos e menos côncavos. Por fim, conclui-se que a morfometria dos reservatórios está fortemente associada com a eficiência de armazenamento dos reservatórios superficiais na região semiárida e deve ser considerada nos estudos de escolha de locais de implantação de barragens. Além disso, o modelo também pode ser adotado como método de avaliação de eficiência de estocagem de água dos reservatórios da região.

O modelo foi criado com base nas condições climáticas da região semiárida do Rio Grande do Norte e recomenda-se que seja testado em outras regiões para possível calibração. Além disso, outras variáveis morfométricas que dizem respeito ao perímetro e formato da área de superfície do reservatório devem ser investigadas quanto à significância para os modelos de outras regiões. Da mesma forma, a inserção de outras variáveis não geométricas, mas vinculadas ao balanço hídrico, poderiam melhorar o ajuste e aperfeiçoar o modelo. Sobretudo, este trabalho procurou utilizar somente variáveis geométricas. Por último, sugere-se o desenvolvimento de pesquisas sobre as melhores regras de operação a serem adotadas nos reservatórios em função da susceptibilidade ao processo de evaporação.

## 5. REFERÊNCIAS

ALHASSOUN S. A.; ALSHAIKH A. A.; ALREHAILI A. M.; MISBAHUDDIN M., 2011. **Effectiveness of using palm fronds in reducing water evaporation**. Can. J. Civ. Eng. Vol. 38.

ARAUJO, J.C. **Gestão das águas de pequenos açudes na região semiárida**. Cap. 10; p 308-324. In: Recursos hídricos em regiões áridas e semiáridas. MEDEIROS, S. S. *et al* (organizadores) - Campina Grande, PB: Instituto Nacional do Semiárido, 2011.

ARAUJO, J.C. **Recursos hídricos em regiões semiáridas**. Cap. 2; p 29-43. In: Recursos hídricos em regiões semiáridas: estudos e aplicações. GHEYI, H. R. *et al* (organizadores) - Campina Grande, PB: Instituto Nacional do Semiárido, 2012.

Atlas Solarimétrico do Brasil: banco de dados solarimétricos. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2000.

BDMEP – Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa. Disponível em:<<http://www.inmet.gov.br/projetos/rede/pesquisa/>>. Acesso em novembro de 2017.

BENZAGHTA M. A.; MOHAMMED T. A.; GHAZALI A. H.; SOOM M. A. M., 2012. **Validation of Selected Models for Evaporation Estimation from Reservoirs Located in Arid and Semi-Arid Regions**. Arab J Sci Eng. Vol. 37.

CAMPOS, J.N.B.; NASCIMENTO, L.S. V.; STUDART, T.M. DE C., 2001. **Avaliação de erros na estimativa de vazões regularizadas por ajustamento da tabela cota x volume por equações matemáticas**.

CAMPOS, J.N.B.; STUDART, T.M.D.C.; DUARTE, D.; MARTINZ, G., SÉRGIO, L., 2003. **Contribuições ao debate sobre as eficiências de pequenos e grandes reservatórios**. RBRH - Rev. Bras. Recur. Hídricos 8, 31–38.

CORRAR, L.J.; PAULO, E.; FILHO, J.M.D. **Análise Multivariada Para os Cursos de Administração, Ciências Contábeis e Economia**. São Paulo: Atlas, 2007.

CROLEY III, T.E. **Long-term heat storage in the Great Lakes**. Water Resources. Res., 28(1): 69-81, 1992.

FILHO, D. F.; NUNES F.; DA ROCHA E. C.; SANTOS, M. L.; BATISTA, M.; JÚNIOR, J. A. S. **O que fazer e o que não fazer com a regressão: pressupostos e aplicações do modelo linear de mínimos quadrados ordinários**. Revista Política Hoje, v. 20, n. 1, 2011.

FONTES, A.S.; DE OLIVEIRA, J.I.R.; MEDEIROS, Y.D.P., 2003. **A evaporação em açudes no semiárido nordestino do Brasil e a gestão das águas**. XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos.

GOKBULAK, F.; OZHAN, S., 2006. **Water loss through evaporation from water surfaces of lakes and reservoirs in Turkey**. EWATER: Official Publication of the European Water Association (on line). Disponível em: <<http://www.ewaonline.de>>.

HOY, E.D.; STEPHENS, S.K. **The measurement and estimation of lake evaporation from four Australian water storages**. International Association Hydrological Sciences. Publ., 109:225-232, 1975.

JENSEN, M. E.; HAISE, H. R., 1963. **Estimating evapotranspiration from solar radiation**. J. Irrig. Drain. Eng. 89, 15-41.

JOHANSSON, H.; BROLIN, A. A.; HÅKANSON, L., 2007. **New Approaches to the Modelling of Lake Basin Morphometry**. Environ. Model. Assess 213-228. doi:10.1007/s10666-006-9069-z.

LATTIN, J.; CARROLL, J. D.; GREEN, P. E. **Análise de dados multivariados**. São Paulo: Cengage Learning, 2011.

LINDEMAN, R.H.; MERENDA, P.F; GOLD, R.Z. **Introduction to Bivariate and Multivariate Analysis**, Scott Foresman, Glenview, IL, 1980.

LOESCH, C.; HOELTGEBAUM, M. **Métodos Estatísticos Multivariados**. São Paulo: Saraiva, 2012.

MAJIDI, M; ALIZADEH, A; FARID, A; VAZIFEDOUST, M. **Estimating Evaporation from Lakes and Reservoirs under Limited Data Condition in a Semi-Arid Region**. *Water Resources Management* (2015) 29:3711–3733. DOI 10.1007/s11269-015-1025-8.

MEKONNEN, M. M.; HOEKSTRA, A. Y., 2012. **The blue water footprint of electricity from hydropower**. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 16, 179–187. doi:10.5194/hess-16-179-2012

MORTON, F.I. **Evaporation from large deep lakes**. *Water Resources. Res.*, 3(1): 181–200, 1967.

R Core Team (2014). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>.

SAMOHYL, R. W. **Controle Estatístico da qualidade**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.

SEMARH – Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos, 2014. **Programa de monitoramento e fiscalização: ficha técnica dos reservatórios**.

SYMONDS, M. R. E.; MOUSSALLI, A. **A brief guide to model selection, multimodel inference and model averaging in behavioural ecology using Akaike's information criterion**. *Behavioral Ecology And Sociobiology*, [s.l.], v. 65, n. 1, p.13-21, 25 ago. 2010. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s00265-010-1037-6>.

TESFAMICHAEL, S. G.; NDLOVU, A. **Utility of ASTER and Landsat for quantifying hydrochemical concentrations in abandoned gold mining**. *Science of the Total Environment* 618 (2018) 1560–1571.

VON SPERLING, E. **Morfologia de lagos e represas**. DESA/UFMG, Belo Horizonte, 1999.

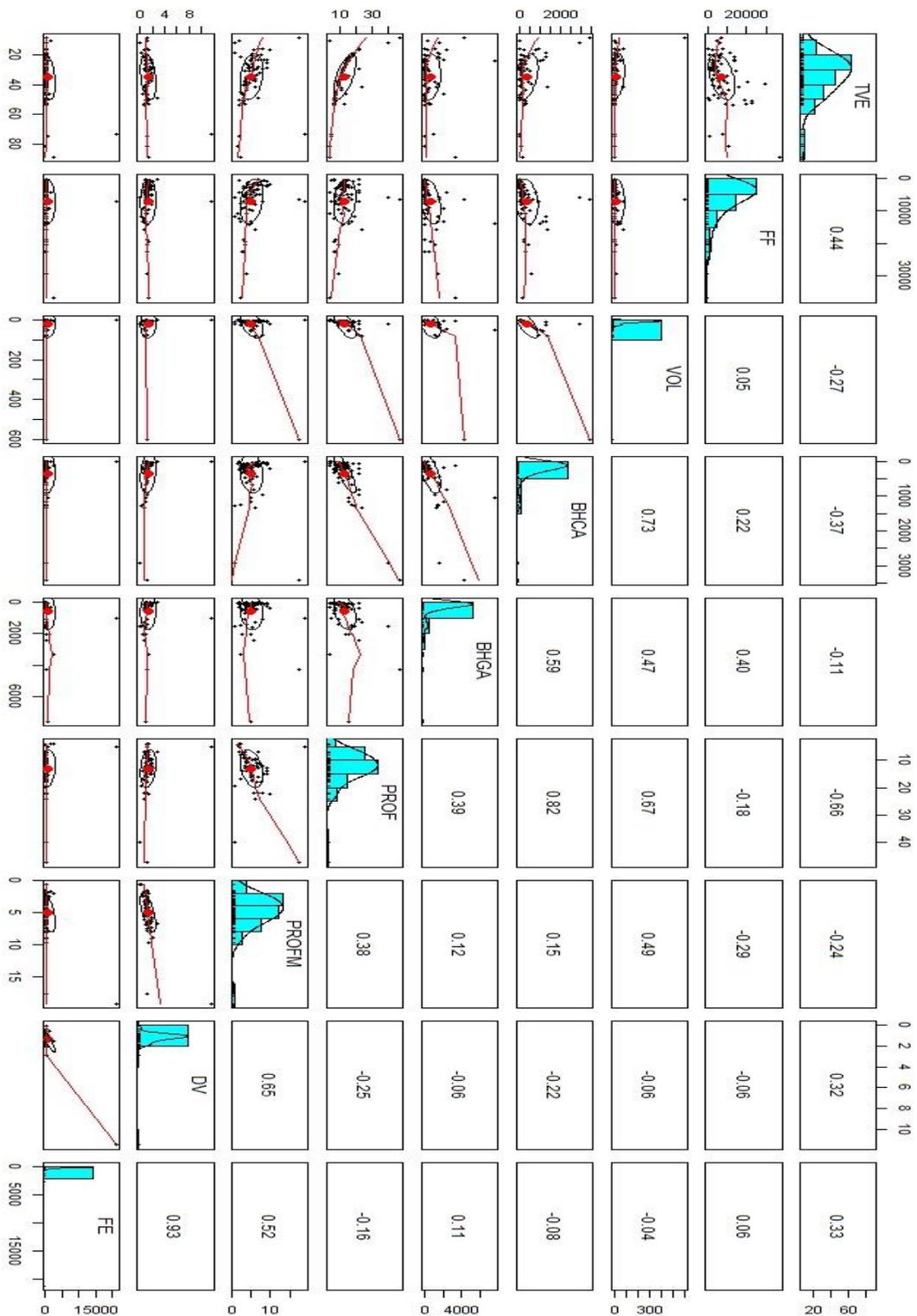
## APÊNDICES

### APÊNDICE A – Dados dos reservatórios utilizados na pesquisa

Nº	Reservatórios	TVE (%)	FF	VOL (hm³)	BHCA (ha)	BHGA (km²)	PROF (m)	PROFM (m)	DV	FE
1	25 de março	46,31	9222,66	4,72	184,80	2057,50	13,80	2,56	0,56	1113,37
2	Alecrim	39,19	9602,19	7,00	162,00	119,57	9,00	4,32	1,44	73,81
3	Antas	49,40	5532,87	2,33	82,31	51,60	7,50	2,84	1,13	62,69
4	Arapuá	53,54	12521,87	4,30	233,00	99,75	7,00	1,84	0,79	42,81
5	Baixa do Fogo	41,16	2827,00	2,06	55,37	10,00	9,00	3,72	1,24	18,06
6	Barra da Cachoeira	74,40	698,68	0,09	4,55	28,00	5,00	1,92	1,15	615,86
7	Barra do Catunda	29,62	2122,92	3,67	46,36	54,00	12,00	7,91	1,98	116,48
8	Beldroega	52,18	22512,64	8,06	310,23	510,00	7,10	2,60	1,10	164,39
9	Bonito II	23,90	2917,66	10,87	216,56	73,26	15,50	5,02	0,97	33,83
10	Boqueirão de Angicos	24,08	5094,53	16,02	328,33	351,20	14,65	4,88	1,00	106,97
11	Boqueirão de Parelhas	18,96	11613,16	9,32	1267,27	1519,00	19,40	0,74	0,11	119,86
12	Brejo	36,25	6042,88	6,45	180,67	102,00	10,22	3,57	1,05	56,46
13	Cabugi	10,65	4449,98	0,28	16,89	275,00	4,00	1,69	1,26	1628,18
14	Caieira	73,57	7237,49	0,90	4,73	1000,00	5,00	19,13	11,48	21141,65
15	Calabouço	23,51	787,91	2,66	32,40	136,00	15,00	8,21	1,64	419,75
16	Caldeirão de Parelhas	28,08	4146,03	9,32	183,78	195,10	13,10	5,07	1,16	106,16
17	Campo Grande	21,82	5767,45	23,14	440,90	1604,00	15,89	5,25	0,99	363,80
18	Carnaúba	34,28	9972,92	25,71	506,50	329,00	15,50	5,08	0,98	64,96
19	Catolé	40,12	2529,77	1,84	60,72	50,00	9,00	3,04	1,01	82,35
20	Corredor	41,16	6369,00	4,64	126,50	60,00	9,00	3,67	1,22	47,43
21	Cruzeta	39,55	29272,75	23,54	616,11	1400,00	9,30	3,82	1,23	227,23
22	Curraes	44,71	7850,39	4,02	172,00	350,00	8,00	2,34	0,88	203,49
23	Dinamarca	88,57	36772,82	2,72	131,25	3330,00	4,20	2,08	1,48	2537,14
24	Dourado	52,83	9079,21	10,32	316,00	501,84	13,00	3,27	0,75	158,81
25	Encanto	27,04	2019,38	5,19	123,78	130,00	13,70	4,19	0,92	105,03
26	Esguicho	20,64	4936,98	27,94	430,18	448,00	17,82	6,49	1,09	104,14
27	Flechas	30,87	5179,21	8,95	259,00	450,00	12,00	3,46	0,86	173,75
28	Gravatá	50,38	764,53	0,26	13,79	1,00	7,00	1,90	0,81	7,25
29	Inharé	26,17	6696,92	17,60	328,13	232,00	13,80	5,36	1,17	70,70
30	Inspetoria	30,87	3338,83	5,77	111,13	31,62	12,00	5,19	1,30	28,45
31	Itans	41,71	15914,35	81,75	1340,00	1268,00	24,00	6,10	0,76	94,63
32	Jangada	81,50	10789,90	0,93	59,60	14,58	4,41	1,55	1,06	24,46
33	Japi II	29,58	3751,52	20,65	362,77	372,30	22,00	5,69	0,78	102,63
34	Jesus Maria José	35,03	7868,42	9,64	250,21	75,00	10,70	3,85	1,08	29,97
35	Lucrécia	30,87	14325,56	24,75	544,21	95,27	12,00	4,55	1,14	17,51
36	Mãe D'água	28,21	1956,37	4,10	62,35	86,72	12,80	6,58	1,54	139,09
37	Major Sales	28,83	1202,48	2,64	61,80	33,70	13,00	4,27	0,99	54,53
38	Malhada Vermelha	50,20	18752,41	7,54	250,20	95,00	7,38	3,01	1,23	37,97
39	Maracajá	30,06	1651,39	2,85	51,28	31,00	12,00	5,56	1,39	60,45
40	Marcelino Vieira	43,69	10916,23	11,20	314,12	275,00	11,00	3,57	0,97	87,55
41	Marechal Dutra	16,90	4305,44	44,42	805,67	2400,00	21,77	5,51	0,76	297,89
42	Mendubim	16,03	7170,31	76,35	970,71	1062,50	22,00	7,87	1,07	109,46
43	Monte Alegre	37,20	2489,80	2,49	46,24	28,50	10,00	5,38	1,62	61,63
44	Morcego	52,92	19557,82	6,71	211,39	700,00	7,00	3,17	1,36	331,14
45	Mundo Novo	46,50	7031,25	3,60	127,50	30,00	8,00	2,82	1,06	23,53
46	Novo Angicos	37,50	5030,24	4,25	120,59	500,00	8,00	3,52	1,32	414,63
47	Olho D'Água dos Brandões	29,62	1131,25	1,95	31,33	53,26	12,00	6,24	1,56	170,00
48	Passagem	35,26	4468,01	8,27	232,03	150,00	12,28	3,56	0,87	64,65
49	Passagem das Traíras	24,01	13822,96	49,70	1042,90	7600,00	15,32	4,77	0,93	728,74
50	Pataxó	38,47	20327,73	15,02	460,94	1081,00	9,04	3,26	1,08	234,52
51	Pau dos Ferros	23,15	13390,14	54,85	1165,36	2050,00	16,00	4,71	0,88	175,91
52	Pedro Targino Sobrinho	23,51	2231,94	7,53	82,47	220,00	15,00	9,13	1,83	266,76
53	Pilões	28,50	2686,33	5,90	126,50	180,00	13,00	4,67	1,08	142,29
54	Pinga	20,24	973,79	5,68	75,34	81,70	18,00	7,54	1,26	108,44
55	Pituassu	16,03	340,33	3,62	52,77	17,40	22,00	6,87	0,94	32,97
56	Riacho da Cruz II	23,15	2344,78	9,60	145,26	31,08	16,00	6,61	1,24	21,40
57	Riacho do meio	46,85	3144,69	1,61	57,07	27,20	8,00	2,82	1,06	47,66

58	Rio da Pedra	21,09	2749,17	13,60	263,51	122,00	17,04	5,16	0,91	46,30
59	Rodeador	16,65	1943,13	21,40	220,66	350,00	22,25	9,70	1,31	158,62
60	Sabugi	21,64	13298,37	25,71	1260,38	1428,00	17,00	2,04	0,36	113,30
61	São Gonçalo	32,22	4844,91	7,37	100,80	49,00	11,50	7,31	1,91	48,61
62	Severino Enedino	48,95	277,69	0,10	1,42	1,70	7,00	6,71	2,87	119,72
63	Sossego	36,28	5298,75	5,30	90,50	30,00	10,00	5,85	1,76	33,15
64	Santa Cruz do Apodi	8,82	6637,69	599,71	3413,36	4264,00	47,20	17,57	1,12	124,92
65	Santa Cruz do Trairí	42,04	4963,00	5,16	135,65	453,00	11,00	3,80	1,04	333,95
66	Santo Antônio de Caraúbas	51,10	22405,14	8,54	289,86	44,55	7,25	2,95	1,22	15,37
67	Tabua	28,83	1096,89	2,41	27,08	27,00	13,00	8,90	2,05	99,70
68	Tesoura	28,50	3482,52	7,65	114,00	87,00	13,00	6,71	1,55	76,32
69	Torrão	37,31	8018,37	6,87	113,00	201,00	9,50	6,08	1,92	177,88
70	Tourão	28,83	3634,61	7,99	184,15	92,75	13,00	4,34	1,00	50,37
71	Trairí	19,58	6573,53	35,23	657,00	1608,00	17,50	5,36	0,92	244,75
72	Trapiá III	35,94	1915,85	1,92	36,00	10,67	10,00	5,32	1,60	29,64
73	Umarí	12,12	5989,33	21,40	2922,67	1533,00	40,00	0,73	0,05	52,45
74	Ursula Medeiros	25,38	2481,78	6,81	75,00	97,83	14,00	9,08	1,95	130,44
75	Vida Nova	33,82	3310,77	4,41	68,00	15,00	11,00	6,48	1,77	22,06
76	Zangarelhas	26,27	2884,84	7,92	202,63	255,12	14,00	3,91	0,84	125,90

## APÊNDICE B – Gráfico de correlação entre as variáveis utilizadas na pesquisa



## APÊNDICE C – Script das análises e testes efetuados utilizando o software R.

```
dados=read.table("Dados_Mozart15.txt",header=T, dec=',')
attach(dados)
cor(dados)
library(psych)
pairs.panels(dados)
##FITTING THE MODEL##
# Multiple Linear Regression
regmult0 <- lm(TVE ~ FF + VOL+ BHCA + BHGA + PROF + PROFM
+ DV + FE, dados)
summary(regmult0) # show results
##VARIABLE SELECTION##
library(MASS)
regmult0 <- lm(TVE ~ FF + VOL+ BHCA + BHGA + PROF + PROFM
+ DV + FE, dados)
summary(regmult0)
step <- stepAIC(regmult0, direction="both")
step$anova # display results
##COMPARING MODELS##
regmult1 <- lm(TVE ~ FF + VOL+ BHCA + PROFM + DV, dados)
summary(regmult1)
# Other useful functions
coefficients(regmult1) # model coefficients
confint(regmult1, level=0.95) # CIs for model parameters
fitted(regmult1) # predicted values
residuals(regmult1) # residuals
anova(regmult1) # anova table
vcov(regmult1) # covariance matrix for model parameters
influence(regmult1) # regression diagnostics
##RELATIVE IMPORTANCE##
# Calculate Relative Importance for Each Predictor
```

```
library(relaimpo)
calc.relimp(regmult1, type = c("lmg"), rela = TRUE)
# Bootstrap Measures of Relative Importance (1000 samples)
boot <- boot.relimp(regmult1, b = 1000, type = c("lmg"), rank = TRUE, diff = TRUE, rela =
TRUE)
booteval.relimp(boot) # print result
plot(booteval.relimp(boot,sort=TRUE)) # plot result
## REGRESSION DIAGNOSTICS ##
# diagnostic plots fornece resultados para homocedasticidade, normalidade e observações
influentes
layout(matrix(c(1,2,3,4),2,2)) # optional 4 graphs/page
plot(regmult1)
```