

## ANÁLISE DOS MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE CISTERNAS COM BASE NA AVALIAÇÃO DE VOLUMES CALCULADOS PARA ZONAS PLUVIAIS HOMOGÊNEAS DISTINTAS

### ANALYSIS OF CISTERN SIZING METHODS BASED IN THE EVALUATION OF CALCULATED VOLUMES FOR DIFFERENT HOMOGENEOUS PLUVIAIS AREAS.

#### **Amanda Bezerra de Sousa**

Engenheira Civil pela UFRSA. Mestre em Engenharia Sanitária pela UFRN. ([amandabez12@yahoo.com.br](mailto:amandabez12@yahoo.com.br))

#### **Cícero Onofre de Andrade Neto**

Professor Titular da UFRN. Doutorado em Recursos naturais pela Universidade Federal de Campina Grande. ([cicero@ct.ufrn.br](mailto:cicero@ct.ufrn.br))

#### **Adelena Gonçalves Maia**

Professora Adjunta da UFRN. Mestrado e doutorado em Hidráulica e Saneamento pela USP. ([adelenam@gmail.com](mailto:adelenam@gmail.com))

#### **Resumo**

A utilização de água de chuva de cisternas é uma solução alternativa para o abastecimento de água. Um sistema de captação de água de chuva deve ser criteriosamente projetado, adotando-se um método de cálculo adequado e considerando todos os parâmetros de projeto, como área de captação, demandas de água e características pluviais. Este trabalho teve como objetivo analisar métodos diferentes de dimensionamento de cisternas aplicados em zonas pluviais homogêneas distintas, a fim de avaliar a variação dos volumes para cada zona e para cada método, como base de análise. A partir da análise da variação dos volumes, das precipitações e dos valores de PCD, foi possível constatar que a distribuição da precipitação (PCD), nesses casos, teve mais influência no volume necessário da cisterna do que o valor de precipitação média, comprovando que não se deve padronizar o mesmo volume de cisterna para regiões pluviais diferentes. Quatro dos métodos analisados foram considerados inadequados, mas os outros seis foram avaliados como satisfatórios, destacando-se quatro como os mais adequados.

**Palavras-chave:** Áreas pluviais homogêneas, dimensionamento de cisternas, PCD.

#### **Abstract**

The utilization of the rainwater stored in cisterns is one of the alternative solutions for the water supply. A rainwater capitation system adequate should be carefully designed, adopting the appropriate calculation method and considering all the project parameters, as capitation area, water demands, and pluvial characteristics. The objective of this study was to analyze different methods of dimensioning cisterns applied in distinct homogeneous rain zones to evaluate a variation of the volumes for each zone and for each method, as a basis for analysis. By the analysis of the volumes variation, precipitations and the PCD values, was possible detect that the precipitation distribution (PCD) in these cases has more influence in the volume of cisterns than the average precipitation value, proving that it should not be standardized the same volume of cistern for different rainfall regions. Four of the evaluated methods were considered inadequate, but the other six were evaluated as satisfactory, where four of them were the most adequate.

**Keywords:** Pluvial homogeneous areas, cistern design, PCD.

## 1. INTRODUÇÃO

O acesso à água potável tem se tornado um desafio em diversas regiões do país, tanto em termos quantitativos como qualitativos. Em situações mais desfavoráveis quanto aos aspectos hidrológicos de escassez de chuva e altas taxas de evaporação, o atendimento ao abastecimento de água é ainda mais difícil. Além disso, a eutrofização dos mananciais é acelerada pelo lançamento indiscriminado de esgotos, o que dificulta ainda mais o processo de potabilização da água. Brasil *et al.* (2015) avaliaram a eutrofização de 40 reservatórios no Estado do Rio Grande do Norte e a conclusão foi que todos eles se encontram em situação eutrófica ou hipertrófica quanto ao nível de fósforo total. Desta forma, a adoção de fontes alternativas de água, como a captação e uso imediato da água de chuva, se apresenta como uma das soluções para o abastecimento de água em situações diversas.

A adoção de cisternas para armazenamento imediato da água da chuva é uma prática já adotada e disseminada em muitos países (ANDRADE NETO, 2013). Quando captada, armazenada e utilizada de forma correta, com barreiras sanitárias e manejo adequado, essa água apresenta excelente qualidade para diversos usos, inclusive para beber. No Brasil, o uso de água de chuva constitui uma prática difundida, principalmente no meio rural das regiões semiáridas. Somente o Programa Um Milhão de Cisternas (P1MC) do governo federal brasileiro construiu, até fevereiro de 2017, mais de 595 mil cisternas (ASA, 2017). Porém, apesar dos avanços elogiáveis do Programa, este apresenta uma grande falha na sua concepção, que é a padronização do volume da cisterna em 16 m<sup>3</sup> para as mais diversas situações. A adoção de um único volume de armazenamento para o atendimento de famílias com características diferentes e regiões de pluviosidade distintas acarreta em cisternas com volume inadequado, o que ocasiona quantidade de água

insuficiente ou volume excessivo, o que pode, inclusive, comprometer a qualidade da água, tendo em vista que, em qualquer situação de escassez hídrica, a família acabará recorrendo a outras fontes de água, muitas vezes de qualidade duvidosa. No caso do P1MC, o volume único adotado para todas as cisternas construídas é comprovadamente inadequado (COHIM, 2013; COHIM; ORRICO, 2015).

O reservatório representa a parcela mais onerosa em um sistema de captação e aproveitamento de água de chuva, variando entre 50% a 85% do custo total do sistema (THOMAS, 2001), e deve ser dimensionado considerando todos os aspectos relevantes para o cálculo correto: características pluviométricas, área de captação, perdas, consumo *per capita* e demanda (número de usuários). Tomaz (2012) afirma que até o presente momento não foi encontrado um método de dimensionamento de reservatório para armazenamento de água de chuva que não tenha um problema. Desta forma, apesar de existirem inúmeros métodos, é preciso propor novas metodologias e avaliar qual delas apresenta melhor aplicabilidade em situações diversas. O objetivo do presente trabalho é aplicar métodos diferentes de dimensionamento de cisternas em zonas pluviais homogêneas distintas, a fim de avaliar a variação dos volumes para cada zona e para cada método, e assim analisar quais procedimentos de cálculo são mais adequados.

## 2. METODOLOGIA

O estudo foi realizado no Estado do Rio Grande do Norte, na região Nordeste do Brasil, que tem área total de 52.811 km<sup>2</sup> (IBGE, 2010). Com base na análise dos dados pluviais de 1963 a 2010, de 156 estações de coleta, e dados de 1964 a 2010, de 11 estações, o Estado do RN apresenta precipitação média anual de 813 mm, sendo que esse total médio varia entre as diferentes regiões, desde 467 mm até 1.664 mm. A grande variabilidade na distribuição pluviométrica é devido à localização geográfica, orografia e sistema

de ventos locais (SHIMIDT; MATTOS, 2014).

Neste estudo, o Estado foi dividido em zonas pluviais homogêneas, partindo de uma série de dados de precipitação de 167 estações pluviométricas distribuídas nas quatro mesorregiões do Estado. Foi calculado o valor do grau em que a precipitação total anual é distribuída ao longo dos doze meses, através da variável *precipitation concentration degree* (PCD), e com isso foi possível delimitar as zonas que apresentam as mesmas características em termos de variabilidade temporal da precipitação. A adoção do índice PCD se justifica pela capacidade de expressar, de forma efetiva, a associação entre a variabilidade temporal da precipitação e o padrão de eficiência das cisternas (ANDRADE, 2014). Para o cálculo do PCD, as precipitações mensais são consideradas como grandezas vetoriais, orientadas em um círculo trigonométrico, e seu valor varia de 0 a 1, sendo o valor 1 obtido quando a precipitação total anual se concentra em um mês específico, e o valor próximo a 0, quando a precipitação se distribui de forma uniforme ao longo dos meses do ano (LI *et al.*, 2011).

As regiões pluviais homogêneas foram definidas com base na análise de agrupamento, utilizando os valores de PCD encontrados e o valor médio da precipitação anual. A análise de agrupamento visa encontrar uma maneira de descrever padrão de similaridade entre uma série de variáveis não previamente relacionadas, de forma a classificá-las em grupos que sejam heterogêneos entre si e homogêneos dentro deles. Foi utilizado o método hierárquico de Ward (1963), que é um método simples e amplamente utilizado, apresentando resultados satisfatórios. Este é um dos métodos mais utilizados em estudo de agrupamento, tendo sido empregado em vários trabalhos na área climatológica, como Bao e Wallace (2015), Sahin Cigizoglu (2013) e Lyra *et al.* (2006).

Após a definição dos grupos homogêneos, foi escolhido aleatoriamente um município em cada um dos grupos para

dimensionamento das respectivas cisternas, utilizando 10 métodos distintos: Azevedo Netto, Prático Alemão, Prático Inglês, Simplificado Espanhol, Andrade Neto, Rippl, Simulação, *Supply After Spillage* (YAS), Prático Australiano e Eficiência de 80%.

No cálculo do volume, foi considerada área de captação de 85 m<sup>2</sup>, valor adotado como média de telhado baseando-se na pesquisa de Da Silva *et al.* (2009). O número de usuários por residência foi de cinco pessoas, dado empregado com base em uma pesquisa realizada por Cohim e Orrico (2015), na qual os autores avaliaram o perfil de 947 famílias beneficiadas com o Programa um Milhão de Cisternas. O valor da demanda de água adotado foi de 20L/hab.dia, que é o suficiente para o atendimento das necessidades de beber, cozinhar e higiene pessoal; valor este adotado também por Cohim e Orrico (2015).

## 2.1 Métodos de dimensionamento

### 2.1.1 Método de Andrade Neto

O método utilizado por Andrade Neto (2015) constitui-se em um balanço hídrico. O dimensionamento é feito com base na comparação entre a distribuição mensal da chuva ao longo do ano, que reflete na capacidade de captação da água de chuva, e a definição dos meses consecutivos com *deficit*, a partir do cálculo da precipitação mensal crítica necessária para atender a demanda. O dimensionamento é feito inicialmente com base no cálculo da precipitação crítica, que é dada pela Equação 1.

$$P_{cr} = \frac{C_{mensal}}{A \times C} \quad (1)$$

Na qual:

$P_{cr}$  é a precipitação mensal crítica (mm);

$C_{mensal}$  é o consumo mensal (L);

$A$  é a área de captação (m<sup>2</sup>);

$C$  é o coeficiente de aproveitamento que considera que há perda de 20% do volume de água de chuva captado, seja por

evaporação, pela perda da água que cai fora da calha, pelo volume destinado ao tanque de desvio do primeiro milímetro, entre outros. Assim, o coeficiente de aproveitamento é 0,80, que equivale aos 80% da precipitação captada.

Desta forma, os meses que apresentam precipitação inferior à precipitação crítica constituem *deficit*, os demais serão meses de armazenamento. O volume da cisterna é obtido com base na Equação 2.

$$V_c = (N_d \times C_{\text{mensal}}) - (P_d \times A \times C) \quad (2)$$

Na qual:

$V_c$  é o volume da cisterna ( $m^3$ );

$N_d$  é o número de meses que apresentou *deficit* ( $P < P_{cr}$ );

$C_{\text{mensal}}$  é o consumo mensal ( $m^3$ );

$P_d$  é a precipitação total dos meses que apresentaram *deficit* (m);

$A$  é a área de captação ( $m^2$ );

$C$  é o coeficiente de aproveitamento.

O método possibilita o dimensionamento em meses de *deficit* consecutivos e não consecutivos também, sendo que, em caso de *deficit* não consecutivo, o método considera a capacidade de atendimento parcial da demanda e a possibilidade que o *deficit* seja suprido completo ou parcialmente no mês, ou nos meses intermediários seguintes.

### 2.1.2 Método de Rippl

Um método bastante utilizado no dimensionamento de reservatórios de acumulação de água de chuva é o método de Rippl, que se encontra presente em diversos livros e na norma de aproveitamento de água de chuva da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT NBR 15527/2007). Este consiste em um método de diagrama de massas que possibilita a regularização da vazão independente da estação do ano. Tem como ponto forte sua simplicidade e facilidade de aplicação, porém, é muito

criticado por acarretar em uma superestimação do volume reservado, tendo em vista que esse método foi desenvolvido para grandes reservatórios (AMORIM; PEREIRA, 2008; TOMAZ, 2012).

Esse método se subdivide em método analítico e método do gráfico. Os dados utilizados como entrada são a demanda mensal, a precipitação média mensal, a área de coleta e o coeficiente de *Runnof*, e os dados de saída são os volumes de chuva mensal e chuva mensal acumulada, a diferença entre a demanda e o volume de chuva e o volume do reservatório. O método de Rippl realiza o dimensionamento conforme as Equações 3 a 5.

$$Q_{(t)} = P_{(t)} \times A \times C \quad (3)$$

$$S_{(t)} = D_{(t)} - Q_{(t)} \quad (4)$$

$$V = \sum S_{(t)}, \text{ somente para } (5) \\ \text{valores de } S_{(t)} > 0$$

Nas quais:

$S_{(t)}$  = volume de água no reservatório no tempo  $t$  ( $m^3$ );

$Q_{(t)}$  = volume de chuva captada no tempo  $t$  ( $m^3$ );

$D_{(t)}$  = demanda ou consumo no tempo  $t$  ( $m^3$ );

$P_{(t)}$  = precipitação no tempo  $t$  (m);

$C$  = coeficiente de escoamento superficial;

$A$  = área de captação ( $m^2$ );

$V$  = volume do reservatório ( $m^3$ ).

Pode-se utilizar média mensal ou diária, porém, média diária irá acarretar em valores mais precisos de volume de reservatório. Dado o fácil acesso a ferramentas computacionais, não há interferência no grau de dificuldade de cálculo em adotar valores diários, no entanto, não é fácil conseguir dados de precipitação diários de uma série histórica confiável, principalmente pelo fato de que, para se obter uma base de dados que permita uma avaliação adequada, é necessário, pelo menos, 30 anos de registros diários de precipitação (PALLA *et al.*, 2012).

Por meio do método do gráfico, o volume do reservatório é encontrado com base na análise da curva de chuva acumulada ao longo do ano. A abscissa constitui os meses de janeiro a dezembro e, as ordenadas, os volumes acumulados ( $m^3$ ). O método consiste em tangenciar, com uma reta, o ponto máximo e o ponto mínimo da chuva acumulada ao longo do ano, com uma reta paralela ao consumo acumulado. A distância vertical das duas retas paralelas será o volume do reservatório.

### 2.1.3 Método da Simulação

O método da simulação considera duas hipóteses no seu procedimento de cálculo: o reservatório está cheio no início da contagem do tempo "t" e os dados históricos são representativos para as condições futuras (ABNT NBR 15527, 2007). Assim como a maioria dos modelos

computacionais encontrados na literatura, o método da simulação faz o balanço hídrico a partir de volumes pré-definidos de reservatórios, que podem ser escolhidos pelo usuário ou sugeridos pelo modelo (COHIM *et al.*, 2008). Os cálculos são feitos com base no balanço hídrico calculado pelas Equações 6 e 7.

Nas quais:

$S_{(t)}$  = volume de água no reservatório no tempo t ( $m^3$ );  
 $S_{(t-1)}$  = volume de água no reservatório no tempo t-1 ( $m^3$ );  
 $Q_{(t)}$  = volume de chuva captada no tempo t ( $m^3$ );  
 $D_{(t)}$  = demanda ou consumo no tempo t ( $m^3$ );  
 $P_{(t)}$  = precipitação no tempo t (m);  
 C = coeficiente de escoamento superficial;  
 A = área de captação ( $m^2$ );  
 V = volume do reservatório ( $m^3$ ).

$$Q_{(t)} = P_{(t)} \times A \times C \quad (6)$$

$$S_{(t)} = S_{(t-1)} + Q_{(t)} - D_{(t)}, \text{ sendo que } 0 \leq S_{(t)} \leq V \quad (7)$$

### 2.1.4 Método Prático Australiano

O método Prático Australiano se assemelha ao Método da Simulação, sendo que a diferença consiste no fato deste último considerar o reservatório vazio no primeiro mês e, neste método, considerar a interceptação da água que molha a superfície e as possíveis perdas por evaporação. O volume de chuva é obtido pela Equação 8:

$$Q = A \times C \times (P - I) \quad (8)$$

Na qual:

C = coeficiente de escoamento superficial, geralmente 0,80;  
 A = área de captação ( $m^2$ );  
 P = precipitação média mensal (m);

I = interceptação da água que molha as superfícies e perdas por evaporação, geralmente 2 mm (m);  
 Q = volume mensal produzido pela chuva ( $m^3$ ).

O volume do reservatório é realizado por tentativas, até que sejam utilizados valores otimizados de confiança e volume de reservatório. Nesse caso, a confiança deve ser a máxima, tendo em vista que se trata de reservatório de captação de água de chuva, em que esta é a única fonte disponível de água potável. O cálculo é feito conforme a Equação 9:

$$V_{(t)} = V_{(t-1)} + Q_{(t)} - D_{(t)} \quad (9)$$

Na qual:

$V_{(t)}$  = volume de água que está no tanque no fim do mês t ( $m^3$ );  
 $Q_{(t)}$  = volume mensal produzido pela chuva no mês t ( $m^3$ );

$V_{(t-1)}$  = volume de água que está no tanque no início do mês  $t$  ( $m^3$ );

$D_{(t)}$  = demanda mensal ( $m^3$ );

No cálculo da confiança do sistema, utiliza-se a Equação 11.

$$P_r = \frac{N_r}{N} \quad (10)$$

$$\text{Confiança} = (1 - P_r) \quad (11)$$

Na qual:

$P_r$  = falha;

$N_r$  = número de meses em que o reservatório não atendeu à demanda, isto é, quando  $V_t = 0$ ;

$N$  = número de meses considerado, geralmente 12 meses.

Recomenda-se que os valores de confiança estejam entre 90 e 99% (ABNT NBR 15527, 2007).

$$Y_t = \min \left\{ \begin{array}{l} D_t \\ V_{t-1} + \theta Q_t \end{array} \right. \quad (12)$$

$$V_t = \min \left\{ \begin{array}{l} (V_{t-1} + Q_t - \theta Y_t) - (1 - \theta) Y_t \\ S - (1 - \theta) Y_t \end{array} \right. \quad (13)$$

Nas quais:

$Y$  = Produção de chuva do sistema, responsável por suprir a demanda ( $m^3$ ),

$D$  = Demanda ( $m^3$ ),

$V$  = Volume de chuva no reservatório de armazenamento ( $m^3$ ),

$Q$  = Volume total de chuva coletado pelo sistema ( $m^3$ ),

$S$  = Volume do reservatório de armazenamento ( $m^3$ ).

O valor de  $\theta$  pode ser 0 ou 1, dependendo se é o modelo YAS ou YBS. O valor de  $\theta$  será 1 para o YBS e 0 para o YAS. A diferença entre eles é que no modelo YAS considera-se que a demanda é atendida após a adição da água precipitada ao reservatório e o extravasamento ter ocorrido do

### 2.1.5 Modelo *Supply After Spillage* (YAS) e Modelo *Supply Before Spillage* (YBS)

Este método é um modelo comportamental que simula a operação do reservatório em um período de tempo, simulando fluxos de massa com algoritmos específicos. Os dados de entrada que simulam o fluxo são baseados em intervalos de tempo que podem ser minutos, horas, dias ou meses, sendo que quanto menor for o intervalo utilizado na modelagem, mais confiável e econômico será o dimensionamento (PHILIPPI *et al.*, 2006). Este modelo realiza o balanço de massa de acordo com as Equações 12 e 13 (LATHAM, 1983 *apud* FEWKES, 1999).

reservatório. No YBS, a demanda é atendida após a água precipitada ter sido adicionada ao reservatório, antes da ocorrência do extravasamento.

Este modelo se propõe a avaliar o atendimento das demandas com base na análise do comportamento dos reservatórios através da Equação 14.

$$C = \frac{N - U}{N} \times x \quad (14)$$

Na qual:

$C$  = Confiabilidade (%);

$N$  = Número de dias da série;

$U$  = Número de dias em que a demanda não pode ser plenamente atendida.

### 2.1.6 Método de Eficiência de 80%

Este método se assemelha ao YAS, só que estipula o volume final da cisterna como sendo o volume necessário para que haja o atendimento de 80% da sua eficiência.

### 2.1.7 Método Azevedo Netto

O método Azevedo Netto define o volume do reservatório pela Equação 15 (ABNT NBR 15527, 2007):

$$V = 0,042 \times P \times A \times T \quad (15)$$

Na qual:

P = precipitação média anual (mm);  
 T = número de meses de pouca chuva ou seca;  
 A = área de coleta em projeção (m<sup>2</sup>);  
 V = volume de água aproveitável e o volume de água do reservatório (L).

Uma falha no método Azevedo Netto é não especificar critérios para definir o que seria os “meses de pouca chuva”. Outro aspecto negativo é desconsiderar a distribuição da precipitação ao longo do ano e considerar somente a precipitação média anual.

### 2.1.8 Prático Alemão

É um método empírico em que o volume do reservatório é 6% do menor valor entre o volume anual consumido e o volume anual de precipitação aproveitável (ABNT NBR 15527, 2007). O volume anual consumido é a soma das demandas mensais e o volume anual de precipitação aproveitável é dado pela Equação 16.

$$V = A \times P \quad (16)$$

Na qual:

A = área de captação (m<sup>2</sup>);  
 P = precipitação média anual (mm);  
 V = volume anual de precipitação aproveitável (L).

### 2.1.9 Prático Inglês

Segundo a ABNT NBR 15527 (2007), o volume de chuva é obtido pela Equação 17:

$$V = 0,05 \times P \times A \quad (17)$$

Na qual:

P = precipitação média anual (mm);  
 A = área de captação (m<sup>2</sup>);  
 V = volume de água do reservatório (L).

### 2.1.10 Simplificado Espanhol

O método Simplificado Espanhol é um método que pondera precipitações e consumos, e considera o valor médio e um período de reserva de 30 dias (ANQIP, 2009). O volume útil é calculado com a Equação 18:

$$V_U = \left( \frac{V_a + C_e}{2} \right) \times \left( \frac{30}{365} \right) \quad (18)$$

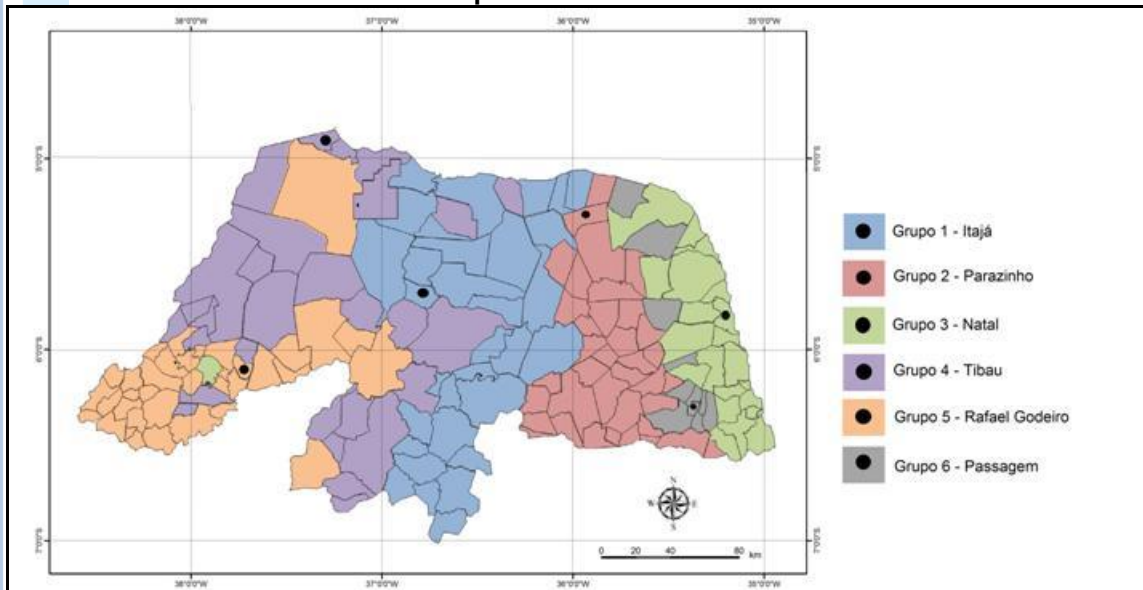
Na qual:

V<sub>a</sub> = volume aproveitável de água de chuva anual (L) (resultado do produto entre o coeficiente de Runoff, precipitação média anual e área de captação);  
 C<sub>e</sub> = consumo anual consumido (L);  
 V<sub>U</sub> = volume útil do reservatório (L).

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O resultado da delimitação das zonas pluviais homogêneas do Estado do Rio Grande do Norte, de acordo com o método de Ward e a localização de cada município escolhido para a realização dos dimensionamentos, está representado na Figura 1. Na Tabela 1, estão apresentados os valores médios de precipitação mensal e anual de acordo com a série histórica analisada e o valor de PCD (*precipitation concentration degree*) para cada município.

**Figura 1 – Mapa de divisão das zonas pluviais homogêneas (através do método de Ward para as variáveis PCD e precipitações médias anuais) e localização dos municípios escolhidos para os dimensionamentos**



Fonte: Própria dos autores.

**Tabela 1 – Valores médios de precipitação (mm) e PCD para cada município**

Meses	Tibau	Itajá	Rafael Godeiro	Parazinho	Natal	Passagem
PCD	0,730	0,693	0,688	0,564	0,510	0,503
Janeiro	70	59	81	50	66	55
Fevereiro	107	100	111	66	111	82
Março	180	165	214	123	206	136
Abril	206	150	200	136	246	166
Maiο	98	90	102	89	229	136
Junho	37	44	49	81	297	155
Julho	19	23	28	72	249	141
Agosto	5	7	7	27	126	64
Setembro	6	3	4	14	57	32
Outubro	2	3	7	5	21	10
Novembro	3	5	6	5	23	13
Dezembro	12	18	25	10	33	21
Total (mm)	745	667	834	678	1.664	1.011

Fonte: Própria dos autores com dados fornecidos pela EMPARN.

Com base nos valores de precipitação da Tabela 1, foram calculados os volumes de cisternas para as seis cidades utilizando cada um dos métodos analisados. Os volumes calculados estão apresentados na Tabela 2. Para os métodos Azevedo Netto, Prático Alemão, Prático Inglês e Simplificado Espanhol, foi utilizado no procedimento de cálculo o total anual médio precipitado. Para os métodos

Andrade Neto, Rippl, Simulação e Prático Australiano, foram utilizados os valores mensais. Já para o YAS e o de Eficiência de 80%, usaram-se dados diários. No método YAS, o volume foi definido com base na avaliação da curva eficiência versus volume, analisando o ponto onde havia a diminuição do aumento da eficiência, ao passo que se aumentava o volume.



**Tabela 2 – Valores dos volumes das cisternas (m<sup>3</sup>) para todas as cidades escolhidas e valor da variância para cada método**

Método de cálculo.	Tibau	Itajá	Rafael Godeiro	Parazinho	Natal	Passagem	Variância
PCD	0,730	0,693	0,688	0,564	0,510	0,503	----
Azevedo Netto ajustado	18,6	16,7	17,9	12,1	17,8	14,4	6,3
Prático Alemão	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	0,0
Prático Inglês	3,2	1,8	3,5	2,9	7,1	4,3	3,2
Simplificado Espanhol	4,1	3,8	4,4	3,8	7,3	5,0	1,8
Andrade Neto	15,3	14,0	12,8	10,9	3,8	6,8	19,9
Rippl	15,3	14,0	12,8	10,9	3,8	6,8	19,9
Simulação	16,0	15,0	13,0	11,0	4,0	7,0	22,0
<i>Supply After Spillage (YAS)</i>	19,0	30,0	20,0	25,0	10,0	13,0	54,70
Prático Australiano	17,0	15,0	14,0	12,0	5,0	8,0	20,57
Eficiência de 80%	25,0	16,6	12,5	14,0	3,5	7,0	56,88

Fonte: Própria dos autores.

Analisando os valores da variância na Tabela 2, é possível constatar que os métodos, nos quais foram adotados valores diários de precipitação, apresentaram os valores mais elevados de variância; nos que foram adotados valores anuais, obtiveram-se os menores valores e, nos que foram utilizados dados mensais, valores intermediários. Os métodos que adotam nos seus procedimentos de cálculo o total precipitado anual podem ser considerados inadequados e imprecisos, tendo em vista que, para situações tão distintas de precipitação, alguns métodos mantiveram volumes finais de cisternas bem parecidos, apresentando valores de variância baixos. O método Prático Alemão, por exemplo, apresentou o mesmo volume para todas as cidades. Isto ocorreu porque o método considera o volume da cisterna como sendo 6% do menor valor entre a demanda anual e o volume total de água de chuva aproveitável; desta forma, em todas as situações, o menor valor foi o da demanda anual, tendo sido um parâmetro de projeto que se manteve constante para todas as cidades (36 m<sup>3</sup>/ano). Não se encontrou qualquer justificativa técnica que esclareça a adoção desta porcentagem na definição do volume da cisterna, portanto, o método Prático Alemão não apresenta um

procedimento de cálculo confiável, sendo apenas uma mera estimativa do volume.

Quanto aos métodos que adotam volumes mensais ou diários, os que apresentaram os menores volumes em quase todas as cidades foram Andrade Neto e Rippl, comprovando que, ao contrário do que se afirma na literatura (AMORIM; PEREIRA, 2008; TOMAZ, 2012), Rippl não superdimensiona o reservatório. Vale salientar que o método de Azevedo Netto obteve volumes relativamente próximos aos métodos que adotam dados mensais de precipitação, porque no cálculo do volume do reservatório foi considerado como meses de pouca chuva os que apresentaram precipitação inferior à precipitação crítica. Desta forma, o método apresentou uma confiabilidade relativamente maior, porque foi ajustado pelo método de Andrade Neto.

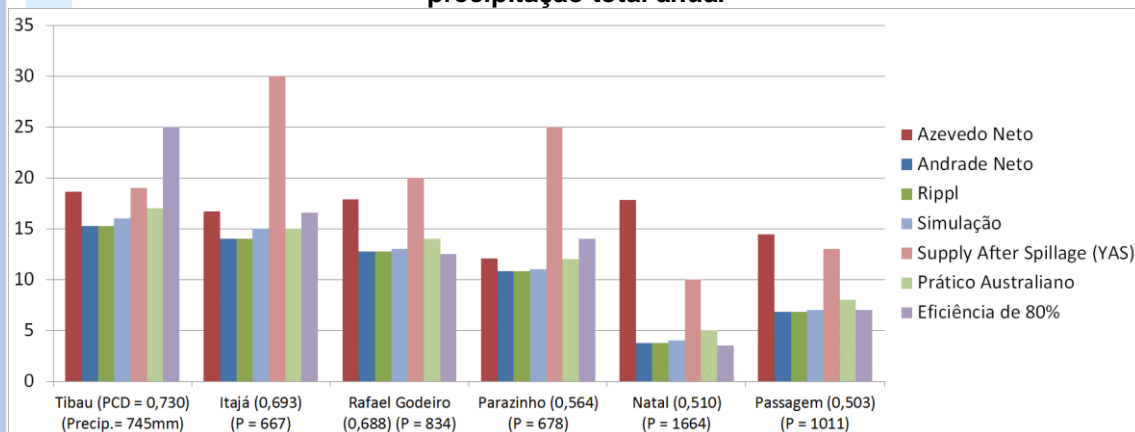
Um aspecto relevante é que, apesar de apresentarem procedimentos de cálculo distintos, os métodos de Rippl e Andrade Neto apresentaram os mesmos volumes para todas as cidades. Isto ocorreu porque em todos os dados de precipitações mensais analisados não houve *deficit* não consecutivo, ou seja, o período chuvoso foi concentrado em uma parte do ano e o período seco no restante dos meses, não

havendo situação que intercalasse os dois períodos. Caso isso ocorresse, o método de Andrade Neto geraria uma cisterna de volume menor, tendo em vista que Rippl considera tudo como *deficit*, enquanto Andrade Neto avalia a possibilidade de compensação total ou parcial do *deficit* no mês chuvoso seguinte.

Na Figura 2, estão representados os volumes calculados (m<sup>3</sup>) dos métodos analisados, com exceção do Prático Alemão, Prático Inglês e Simplificado Espanhol. Os municípios estão organizados em ordem decrescente do valor de PCD, o que significa que na medida em que a cidade se distancia do eixo y, mais bem distribuída é sua chuva ao longo do ano. Quando se avalia a variação do volume, é perceptível que o volume da

cisterna tende a diminuir na maioria dos métodos quando o PCD diminui. Isto demonstra e comprova que a distribuição da precipitação tem mais influência no volume da cisterna do que o seu valor anual absoluto. A exceção da diminuição do volume com a diminuição do PCD é a cidade de Natal quando comparada com Passagem, mas note que o volume da cidade de Passagem é maior em quase todos os métodos, com exceção apenas do método de Azevedo Netto ajustado. Isto se justifica pelo fato de que as cidades apresentam uma diferença de PCD baixa (de 0,007) e a diferença de precipitação bastante elevada (mais de 650 mm), portanto, nesse caso, o valor da precipitação total anual teve peso maior que o PCD.

**Figura 2 – Representação da variação do volume relacionado com o valor de PCD e da precipitação total anual**



Fonte: Própria dos autores.

Note que os métodos Andrade Neto, Rippl, Prático Australiano e o da Simulação apresentam relação direta do volume da cisterna com o PCD, tendo os volumes menores ao passo que o PCD diminui. O método de Azevedo Netto ajustado foi o que menos apresentou relação com o valor do PCD, demonstrando que, apesar de ter sido adotado um critério de definição do que seriam os meses de pouca chuva, o método ainda é impreciso quando comparado com os demais. O método YAS também não obteve relação direta com o valor do PCD. Isto pode ter ocorrido devido ao critério de definição do volume ter sido

uma mera estimativa feita com base na variação da curva eficiência versus volume, sugerindo a necessidade de criação de critérios mais precisos para avaliação disto, como a análise matemática exata dos pontos de inflexão da reta, por exemplo. O método de eficiência de 80% obteve uma relação bem semelhante com os métodos de avaliação da precipitação mensal, com exceção dos municípios de Rafael Godeiro e Parazinho.

Outra forma de avaliar a relação do PCD com o volume das cisternas é quando se compara a variação do volume, do PCD e da precipitação total anual para cada

município. Observando a Tabela 3, é possível perceber que a variação no volume tem maior influência do valor do PCD do que da precipitação; por exemplo, o maior volume de cisterna não foi da menor precipitação e sim do maior PCD. Os valores de correlação R entre as variáveis volume da cisterna e precipitação anual foi de 0,87, já entre o volume e o PCD o valor de R é 0,93. Apesar de ser uma base de dados pequena (6 dados), os valores de correlação sugerem que ambas

variáveis apresentam correlação forte, sendo que, nesse caso, o PCD se correlaciona um pouco mais. Andrade *et al.* (2017) também concluíram que as variáveis hidrológicas mais influentes são a precipitação média anual e o PCD, e que devem ser utilizadas simultaneamente, apesar de, em situações confortáveis de atendimento à demanda (demanda baixa, cisterna grande e área de telhado elevada), o PCD ter sido mais relevante do que a precipitação.

**Tabela 3 – Valores dos volumes das cisternas (m<sup>3</sup>) pelo método de Andrade Neto e Rippl comparados ao valor do PCD e da precipitação**

Cidade	PCD	Precipitação (mm)	Volume da cisterna (m <sup>3</sup> )
Tibau	0,730	745	15,3
Itajá	0,693	667	14
Rafael Godeiro	0,688	834	12,8
Parazinho	0,564	678	10,9
Natal	0,510	1664	3,8
Passagem	0,503	1011	6,8
Média	0,615	933,2	10,6
Variância	0,010	144.274,2	19,9

Fonte: Própria dos autores.

Quando se compara os volumes entre as cidades, é possível observar que cidades com precipitação bem próximas, como Itajá e Parazinho, apresentaram a diferença no volume final de 3,1 m<sup>3</sup>, sendo que a diferença de precipitação é insignificante (11 mm por ano).

A cidade de Natal, capital do Estado, apresentou o volume de 3,8 m<sup>3</sup>. Assim como muitas outras capitais, a cidade está situada na região litorânea e possui a maior precipitação do Estado. Analisando a possibilidade do uso urbano da água de chuva, é possível constatar que o custo disso seria baixo frente ao benefício que pode oferecer, viabilizando a sua utilização.

Quando se comparam os volumes das cisternas, pode-se perceber que houve uma variação elevada (variância de 19,9), mostrando que, apesar do Rio Grande do Norte ser um Estado relativamente pequeno, a influência do regime pluvial tem impacto significativo no volume para reservatório de água de chuva. Outro fato relevante é que todas as cisternas tiveram

o volume inferior a 16 m<sup>3</sup>, volume adotado pelo P1MC.

Nos dimensionamentos realizados, a única variável que sofreu modificação foram os dados de precipitação, mesmo assim os volumes tiveram uma variação elevada. Caso os demais parâmetros também sofressem variação (área de captação, demanda), o volume das cisternas tenderia a variar ainda mais. Isto demonstra que, em situações diversas como ocorre na prática, a adoção do mesmo volume para todas as cisternas é inadequada.

Por realizar a simulação diária da precipitação e da utilização do reservatório, o modelo YAS constitui o método mais preciso e que possibilita aferir a eficiência dos demais métodos. Com isto, foi avaliado a eficiência dos volumes da Tabela 2, e os resultados se encontram na Tabela 4. É possível observar que os métodos Prático Alemão, Prático Inglês e Simplificado Espanhol foram os que obtiveram as menores eficiências: 56, 61 e 64,

respectivamente. O modelo YAS foi o de maior eficiência (aproximadamente 90%). Os métodos Andrade Neto e Rippl foram os que obtiveram menor eficiência quando comparados com os métodos Azevedo Netto ajustado, Simulação, YAS, Prático Australiano e Eficiência de 80%. Note que o valor de eficiência média dos métodos

Andrade Neto e Rippl é 12% menor que o YAS, porém, o volume médio do YAS é quase o dobro. Isto demonstra que, por vezes, o volume é aumentado significativamente para um aumento pequeno da eficiência, o que pode inviabilizar economicamente a construção de cisternas com volumes elevados.

**Tabela 4 – Valores da eficiência (em porcentagem) para os volumes de cisternas encontrados através da simulação pelo modelo YAS, eficiência média para cada método e volume médio (m<sup>3</sup>).**

Método de cálculo	Tibau	Itajá	Rafael Godeiro	Parazinho	Natal	Passagem	Efic. média	Volume médio
Azevedo Netto ajustado	75,52	80,21	90,32	77,42	99,9	96,19	86,59	16,26
Prático Alemão	42,43	47,06	52,12	52,46	76,16	66,48	56,12	2,16
Prático Inglês	45,51	45,43	56,77	55,44	90,08	73,37	61,10	3,80
Simplificado Espanhol	47,85	51,86	59,35	58,46	90,52	75,28	63,89	4,73
Andrade Neto	70,81	75,85	80,94	75,06	81,54	80,13	77,39	10,58
Rippl	70,81	75,85	80,94	75,06	81,54	80,13	77,39	10,58
Simulação	71,96	77,67	81,37	75,27	82,13	80,67	78,18	11,00
Supply After Spillage (YAS)	75,99	89,16	92,73	89,44	95,87	94,44	89,61	19,50
Prático Australiano	73,44	77,67	83,48	77,22	84,96	83,29	80,01	11,83

Fonte: Própria dos autores.

#### 4 CONCLUSÕES

A análise referente à variação dos valores dos volumes, das precipitações e dos valores de PCD permitiu constatar que a distribuição da precipitação (PCD) tem grande influência sobre o volume da cisterna. Quando se compara o volume de cisternas de cidades com valores de precipitação bem próximos, porém com valores de PCD diferentes, observou-se que os volumes foram bem diferentes, demonstrando que, nas condições de realização do estudo, o PCD é a variável mais relevante no dimensionamento de cisternas.

Por meio da variação do volume das cisternas, é possível verificar o impacto da variação do regime pluvial no dimensionamento de cisternas, comprovando que não se pode padronizar o volume de cisterna para regiões pluviais

diferentes, ainda que próximas espacialmente.

Os métodos Azevedo Netto, Prático Inglês e Prático Alemão, os quais constam na NBR 15527 (ABNT, 2007), e o método Simplificado Espanhol, da Especificação técnica ANQIP, são inadequados para dimensionamento de cisternas, porque não sofrem variação do volume final, na medida em que as características pluviais variam, possuem eficiência média baixa e, além disso, os métodos não justificam os parâmetros de cálculo adotados.

Os métodos Andrade Neto, Rippl, Simulação, YAS, Prático Australiano e Eficiência de 80% são apropriados, visto que houve variação considerável no volume, na medida em que as características pluviais variam. Um aspecto que evidenciou a aplicabilidade desses métodos foi a influência direta do valor do PCD no volume da cisterna. O método mais preciso é o YAS, porém, apresenta

dificuldades de definição da eficiência a ser adotada e de obtenção de dados diários de precipitação e, ademais, resulta em maiores volumes. Considerando a eficiência aceitável para volumes razoáveis, a aplicabilidade e a facilidade de cálculo, os métodos Andrade Neto e Rippl foram considerados os mais adequados, porém, o primeiro apresenta a possibilidade de avaliação da compensação do *deficit* não consecutivo, gerando um volume menor e mais preciso que o método de Rippl.

## 5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de Mestrado à primeira autora.

## 6 REFERÊNCIAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15527**: água de chuva – aproveitamento de coberturas em áreas urbanas para fins não potáveis - requisitos. São Paulo. 2007.
- AMORIM, S. V.; PEREIRA, D. J. A. Estudo comparativo dos métodos de dimensionamento para reservatórios utilizados em aproveitamento de água pluvial. **Ambiente Construído**, n. 2. v. 8. p. 53-66, 2008.
- ANDRADE NETO, C. O. Aproveitamento imediato da água de chuva. **GESTA: Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais**. n. 1. v. 1. p. 067-080, 2013. Disponível em: <<http://www.portalseer.ufba.br/index.php/gesta/article/view/7106>>. Acesso em: 9 set. 2015.
- \_\_\_\_\_. Reserva de água em cisternas. (**Notas de aula**). Departamento de Engenharia Civil, UFRN. 2015.
- ANDRADE, L. R.; MAIA, A. G.; LUCIO, P. S. Relevance of hydrological variables in water-saving efficiency of domestic rainwater tanks: multivariate statistical analysis. **Journal of Hydrology**, v. 545. p. 163-171, 2017.
- \_\_\_\_\_. A influência do regime pluviométrico no desempenho de sistemas de aproveitamento de água de chuva. 2014. 33 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária) – UFRN, Natal, 2014.
- ANQIP. ETA 0701 – Sistemas de Abastecimento de Águas Pluviais em Edifícios (SAAP) (in portuguese): Portuguese National Association for Quality in Building Services – ANQIP, Version7. 2009.
- ASA – Articulação do Semiárido. 2017 Disponível em: <<http://www.asabrasil.org.br/acoes/p1mc#objetivo-p1mc>>. Acesso em: 23 fev. 2017.
- BAO, M.; WALLACE, J. M.; Cluster analysis of Northern Hemisphere Wintertime 500-hPa flow regimes during 1920-2014. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 72, p. 3597-3608, 2015.
- BRASIL, J.; ATTAYDE, J. L.; VASCONCELOS, F. R.; DANTAS, D. F.; HUSZAR, V. L. M. Drought-induced water-level reduction favors cyanobacteria blooms in tropical shallow lakes. **Hydrobiologia**, v. 770, p. 145-164, 2015.
- COHIM, E.; GARCIA, A.; KIPERSTOK, A. Captação e aproveitamento de água de chuvas: dimensionamento de reservatórios. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 9., 2008, Salvador. **Anais...** Salvador: ABRH, 2008.
- \_\_\_\_\_; ORRICO, S. R. M. A confiabilidade do volume das cisternas da zona rural para reservar água de chuva. **GESTA: Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais**, v. 3, n. 2, p. 91-99, 2015.
- \_\_\_\_\_. O volume único das cisternas rurais é adequado? In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 20., 2013, Bento Gonçalves. **Anais...** Bento Gonçalves/RS: ABRH, 2013.
- DA SILVA, F. O. E.; TEIXEIRA, L.; SOUZA FILHO, F. A.; DANTAS NETO, S. A. sustentabilidade hídrica de populações abastecidas com cisternas

de placas no semi-árido nordestino: o caso do estado do Ceará. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 18., 2009, Campo Grande. **Anais...** Campo Grande/MS: ABRH, 2009.

FEWKES, A. Modelling the performance of rainwater collection systems: towards a generalized approach. **Urban Water**, v. 1, n. 4, p. 323-333, 1999.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Síntese das características do estado do Rio Grande do Norte**. 2010. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/estadosat/perfil.php?sigla=rn>>. Acesso em: 24 out. 2015.

LI, X.; JIANG, F.; LI, L.; WANG, G. Spatial and temporal variability of precipitation concentration index, concentration degree and concentration period in Xinjiang, China. **Int. J. Climatol.**, n. 31, p. 1679-1693, 2011.

LYRA, G. B.; GARCIA, B. I. L.; PIEDADE, S. M. S. SEDIYAMA, G. C.; SENTELHAS, P. C. Regiões homogêneas e funções de distribuição de probabilidade da precipitação pluvial no Estado de Táchira, Venezuela. **Pesq. Agropec. Bras**, Brasília, v. 41, n. 2, p. 205-215, fev. 2006.

PALLA, A.; GNECCO, I.; LANZA, L. G.; BARBERA, P. L. Performance analysis of domestic rainwater harvesting systems under various European climate zones. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 62, p. 71-80, 2012.

PHILIPPI, L. S.; VACCARI, K. P.; PETERS, M. R.; GONÇALVES, R. F. Aproveitamento da água de chuva. In:

GONÇALVES, R. F. (Coord.). **Uso racional da água em edificações**. Rio de Janeiro: ABES, 2006. cap. 3. p. 73-152.

SAHIN, S.; CIGIZOGLU, K. H. The effect of the relative humidity and the specific humidity on the determination of the climate regions in Turkey. **Theor. Appl. Climatol.**, n. 112, p. 469- 481, 2013.

SCHIMIDT, D. M.; MATTOS, A. Ciclo anual das chuvas e as condicionantes do regime de precipitação no estado do Rio Grande do Norte. In: MATTOS, A.; MATTOS, K. M. C. (Org.). **Projeto MEVEMUC – Monitoramento da Evaporação e as Mudanças Climáticas**. 1. ed. João Pessoa/PB: Moura Ramos Gráfica editora, 2014. Cap. 6, p. 129-146.

THOMAS, T. Escolha de cisternas para captação de água de chuva no sertão. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CAPTAÇÃO DE ÁGUA DE CHUVA NO SEMIÁRIDO, 3., 2001, Campina Grande. **Anais...** Petrolina: ABCMAC, 2001. CD-ROM.

TOMAZ, P. Dimensionamento de reservatórios de água de chuva. In: **Aproveitamento de água de chuva**, 2012. Cap. 109. Disponível em: <[http://www.pliniotomaz.com.br/downloads/livros/Livro\\_aprov.\\_aguadechuva/Capitulo109.pdf](http://www.pliniotomaz.com.br/downloads/livros/Livro_aprov._aguadechuva/Capitulo109.pdf)>. Acesso em: 18 ago. 2016.

WARD, J.H. Hierarchical grouping to optimize an objective function. **Journal of the American Statistical Association**, v. 58, p. 236-244, 1963.