

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO  
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE RONDONÓPOLIS  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GESTÃO E TECNOLOGIA AMBIENTAL**

**MÉTODOS ESTATÍSTICOS APLICADOS A ANÁLISE DA  
QUALIDADE DA ÁGUA DA BACIA DO RIO VERMELHO, MATO  
GROSSO -MT**

**Mayara Oliveira da Silva**

Dissertação de Mestrado

Rondonópolis-MT: Setembro / 2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO  
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE RONDONÓPOLIS  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GESTÃO E TECNOLOGIA AMBIENTAL**

**MÉTODOS ESTATÍSTICOS APLICADOS A ANÁLISE DA  
QUALIDADE DA ÁGUA DA BACIA DO RIO VERMELHO, MATO  
GROSSO -MT**

Mayara Oliveira da Silva

Orientador: Domingos Sávio Barbosa

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Rondonópolis-MT: Setembro / 2019

#### **Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.**

O48m Oliveira da Silva, Mayara.  
Métodos estatísticos aplicados a análise da qualidade da água da bacia do Rio Vermelho, Mato Grosso -MT / Mayara Oliveira da Silva. -- 2019  
57 f. : il. color. ; 30 cm.

Orientador: Domingos Sávio Barbosa.  
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Ciências Agrárias e Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Gestão e Tecnologia Ambiental, Rondonópolis, 2019.  
Inclui bibliografia.

1. Gestão Ambiental. 2. Estatística Multivariada. 3. Redes Bayesianas. 4. Bacia Hidrográfica. I. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

**Permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte.**



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO  
PRÓ-REITORIA DE ENSINO DE PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GESTÃO E TECNOLOGIA AMBIENTAL  
Rodovia Rondonópolis-Guiratinga, km 6 (MT-270) - - Cep: 78735910 -Rondonópolis/MT  
Tel : 66 3410 4131 - Email : luis\_otavio@ufmt.br

## FOLHA DE APROVAÇÃO

**TÍTULO : "MÉTODOS ESTATÍSTICOS APLICADOS A ANÁLISE DE RISCO DA QUALIDADE DAS ÁGUAS DA BACIA DO RIO VERMELHO, MATO GROSSO -MT"**

AUTOR : Mestranda Mayara Oliveira da Silva

Dissertação defendida e aprovada em 10/09/2019.

Composição da Banca Examinadora:

---

|                               |  |                                 |   |
|-------------------------------|--|---------------------------------|---|
| Presidente Banca / Orientador | Doutor                                     | Domingos Sávio Barbosa          |  |
| Instituição :                 | UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO        |                                 |   |
| Examinador Interno            | Doutor                                     | Ricardo Alves de Oliveira       |  |
| Instituição :                 | UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA           |                                 |   |
| Examinador Externo            | Doutor                                     | William Marcos da Silva         |  |
| Instituição :                 | UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL |                                 |   |
| Examinador Suplente           | Doutora                                    | Analy Castilho Polizel de Souza |   |
| Instituição :                 | UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO        |                                 |   |

RONDONÓPOLIS, 10/09/2019.

“Tendo sido, pois, justificados pela fé, temos paz com Deus, por nosso Senhor Jesus Cristo;  
Pelo qual também temos entrada pela fé a esta graça, na qual estamos firmes, e nos gloriamos  
na esperança da glória de Deus.  
E não somente isto, mas também nos gloriamos nas tribulações; sabendo que a tribulação  
produz a paciência,  
E a paciência a experiência, e a experiência a esperança.  
E a esperança não traz confusão, porquanto o amor de Deus está derramado em nossos  
corações pelo Espírito Santo que nos foi dado.”

Romanos 5:1-5

## **DEDICATÓRIA**

Ao meu avô *In memoriam* Antônio Henrique.

A minha grande amiga que muito me ensinou e que trago em meu coração em todos os  
momentos *In memoriam* Elaine Bortoloti

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus que proporcionou a realização desse sonho, pois sem ele eu não seria nada. Graças Te dou Senhor.

Aos meus pais Marinês Aparecida e José Alves pelo apoio incondicional em minhas escolhas e minha irmã Joyce Maynara pelo amparo em todos os momentos.

As crianças que são como meus irmãos mais novos e alegam sempre os meus dias e me fazem acreditar na pureza e inocência: Antônio Henrique e João Pedro, não poderia deixar de agradecer aos gêmeos Lucas e Thiago que trouxeram um sopro de vida e alegria aos meus dias. Aos familiares que torceram, acreditaram e contribuíram de forma direta ou indireta para a realização desse trabalho.

Ao meu orientador Prof Dr. Domingos Sávio Barbosa pela orientação, confiança e amizade.

À Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT), Campus de Rondonópolis, pela oportunidade e suporte para realização deste trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudo, durante o período do curso.

A todo corpo docente da pós-graduação em Gestão e Tecnologia Ambiental da UFMT, Campus Rondonópolis, por todo ensinamento. Aos colegas de mestrado, pela grande amizade, compreensão, pelas inúmeras ajudas principalmente nos momentos de socorro, e momentos de alegria proporcionados nessa jornada, especial a Maíra Guarlotti.

Ao grupo de pesquisa do Laboratório de Tecnologia e Gestão Ambiental (LTGA), na pessoa da Nataliny Danila, Bianca Harumi, Lucas Balsan, Herika, Fyama e Hermes pela cumplicidade, descontração e apoio.

Aos amigos da graduação, que desde 2011 estão junto de mim: Élisson Mattos e Eloise Guimarães.

As amigas de sempre e que trago a certeza de que para sempre: Gabriele Cervigni, Amanda Freitas, Myllena Teixeira, Francielly, Renata Gois e Jakeline Oliveira.

A paróquia São Domingos Sávio que me acolheu em seu coração e foi minha segunda casa em tantos momentos.

Ao Grupo de Oração Universitário (GOU) O Céu é o Meu Lugar (OCEOML) que me acompanhou desde o início da graduação em 2011, sendo um local de reabastecimento, partilhas, e berço de muitas amigadas.

Aos Padres Jhony Nery e Marcelo Oliveira, cada qual a seu jeito foram instrumentos vivos do próprio Cristo, através de cada confissão, direcionamento, oração e amizade, levarei sempre em meu coração a certeza que os senhores sempre estiverem comigo e foram sinais da presença de Deus nos momentos mais difíceis. Aos religiosos Frei Pedro Renato e Mayara Benites (“flor do Carmelo”), que serão sempre os meus melhores amigos que Deus poderia ter me dado para viveram um tempo de suas vidas ao meu lado compartilhando tantos ensinamentos e com suas próprias vidas serem testemunhas vivas do evangelho.

Aos amigos que a Igreja Católica em seus movimentos, pastorais e paróquias me apresentou e presenteou para juntos buscarmos o céu e principalmente tentar vive-lo aqui na terra, cito alguns nomes mais muitos estão e sempre estarão guardados em meu coração: Raphaella Silveira, Rodrigo Torres, Alessana Schlichting, João Victor Galvan, Letícia Gasques, Regina Lourdes, Adriana Brito, Ana Caroline Espíndola, Ana Luiza, Andressa Santos, Natalia Simal, Lucas Gerosa, Thiago Aurélio.

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 1.</b> Mapa de localização da Bacia do Rio Vermelho .....   | 17 |
| <b>Figura 2.</b> Biplot das variáveis de qualidade das águas da Bacia do Rio Vermelho em relação as estações de amostragem pela Análise de Componentes Principais (ACP).....        | 23 |
| <b>Figura 3.</b> Biplot das variáveis de qualidade das águas da Bacia do Rio Vermelho em relação aos períodos chuvoso e estiagem pela Análise de Componentes Principais (ACP) ..... | 24 |
| <b>Figura 4.</b> Gráfico de evolução do Índice de Qualidade das Águas (IQA) médio entre os anos de 2006 a 2017 da Bacia do Rio Vermelho .....                                       | 25 |
| <b>Figura 5.</b> Mapa de localização da Bacia do Rio Vermelho .....   | 32 |
| <b>Figura 6.</b> Rede 1:Rede Bayesiana modelada no software NETICA para o problema da gestão da qualidade da água da bacia do Rio Vermelho .....                                    | 35 |
| <b>Figura 7.</b> Rede 1:Rede Bayesiana modelada no software NETICA para o problema da gestão da qualidade da água da bacia do Rio Vermelho .....                                    | 36 |
| <b>Figura 8.</b> Rede 1:Rede Bayesiana modelada no software NETICA para o problema da gestão da qualidade da água da bacia do Rio Vermelho .....                                    | 37 |
| <b>Figura 9.</b> Rede 2: Rede Bayesiana modelada no software NETICA para o problema da gestão da qualidade da água da bacia do Rio Vermelho.....                                    | 38 |
| <b>Figura 10.</b> Rede 2: Rede Bayesiana modelada no software NETICA para o problema da gestão da qualidade da água da bacia do Rio Vermelho .....                                  | 39 |
| <b>Figura 11.</b> Rede 2: Rede Bayesiana modelada no software NETICA para o problema da gestão da qualidade da água da bacia do Rio Vermelho .....                                  | 40 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| <b>Tabela 1.</b> Caracterização das estações de coleta para monitoramento da qualidade das águas da Bacia do Rio Vermelho .....  | 17 |
| <b>Tabela 2.</b> Metodologias utilizadas nas análises físico-químicas e microbiológicas dos parâmetros de qualidade das águas da Bacia do Rio Vermelho .....             | 18 |
| <b>Tabela 2.</b> Metodologias utilizadas nas análises físico-químicas e microbiológicas dos parâmetros de qualidade das águas da Bacia do Rio Vermelho .....             | 19 |
| <b>Tabela 4.</b> Matriz dos pesos das variáveis nos componentes principais, autovalores, porcentagem da variância explicada e proporção acumulada pelos componentes..... | 34 |

## SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>INTRODUÇÃO</b> .....                       | <b>9</b>  |
| <b>REFERÊNCIAS</b> .....                      | <b>12</b> |
| <b>CAPÍTULO I</b> .....                       | <b>14</b> |
| <b>ABSTRACT</b> .....                         | <b>14</b> |
| <b>RESUMO</b> .....                           | <b>14</b> |
| <b>INTRODUÇÃO</b> .....                       | <b>15</b> |
| <b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....               | <b>16</b> |
| <b>Caracterização da área de estudo</b> ..... | <b>16</b> |
| <b>Dados de qualidade das águas</b> .....     | <b>17</b> |
| <b>Análise estatística multivariada</b> ..... | <b>19</b> |
| <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....           | <b>20</b> |
| <b>CONCLUSÕES</b> .....                       | <b>25</b> |
| <b>REFERÊNCIAS</b> .....                      | <b>26</b> |
| <b>CAPÍTULO II</b> .....                      | <b>29</b> |
| <b>ABSTRACT</b> .....                         | <b>29</b> |
| <b>RESUMO</b> .....                           | <b>29</b> |
| <b>INTRODUÇÃO</b> .....                       | <b>30</b> |
| <b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....               | <b>31</b> |
| <b>Caracterização da área de estudo</b> ..... | <b>31</b> |
| <b>Dados de qualidade das águas</b> .....     | <b>32</b> |
| <b>Análise estatística multivariada</b> ..... | <b>33</b> |
| <b>Construção de redes bayesianas</b> .....   | <b>33</b> |
| <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....           | <b>34</b> |
| <b>Rede 1</b> .....                           | <b>35</b> |
| <b>Rondonópolis</b> .....                     | <b>35</b> |
| <b>Bacia do Rio Vermelho</b> .....            | <b>37</b> |
| <b>Rede 2</b> .....                           | <b>38</b> |
| <b>Rondonópolis</b> .....                     | <b>39</b> |
| <b>Bacia do Rio Vermelho</b> .....            | <b>40</b> |
| <b>CONCLUSÕES</b> .....                       | <b>41</b> |
| <b>REFERÊNCIAS</b> .....                      | <b>41</b> |
| <b>APÊNDICES</b> .....                        | <b>44</b> |



## INTRODUÇÃO

A qualidade das águas é resultante das condições naturais e do uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica, por conta dos fenômenos naturais a qualidade da água é afetada tanto pelo escoamento superficial quanto pela infiltração do solo, resultantes da precipitação atmosférica. Já a influência antrópica independente da dimensão (concentrada ou dispersa) contribui significativamente afetando a sua qualidade (VON SPERLING, 2005; TARGA et al., 2012).

Uma bacia hidrográfica pode ser definida como uma área de captação natural da água da precipitação, que faz convergir os escoamentos para um único ponto de saída, chamado de exutório. Sendo basicamente composta por um conjunto de superfícies vertentes e de uma rede de drenagem formada por cursos d'água que confluem até resultar um leito único no exutório (SILVEIRA, 2001; PORTO & PORTO, 2008; TARGA, 2008). A preservação dessas áreas é de grande importância para mantermos os recursos hídricos necessários para a vida da sociedade, visto que a bacia hidrográfica é justamente o palco dessas ações e degradações, refletindo todos os efeitos (BEVILACQUA, 2012).

A falta de um planejamento e gestão baseado no conhecimento ambiental e das relações sócio econômicas vigentes dão origem a maioria dos problemas ambientais. No que diz respeito à bacia do Rio Vermelho os problemas ambientais merecem atenção especial, pois interferem no funcionamento dos principais rios dessa bacia de drenagem e nos usos requeridos da água pela população e são tributários dos rios dos formadores do Pantanal (SOUZA; SIQUEIRA, 2016).

Discussões na esfera governamental e midiática, tem sido observado com relação aos problemas relativos à falta de um adequado sistema de gestão da água, cada vez mais evidente, o setor de recursos hídricos vem ganhando importância e interesse por parte da sociedade brasileira.

Em relação a parte legislativa, a legislação dos recursos hídricos consiste em um conjunto normativo de cunho cível, ambiental e administrativo, que determina as regras para domínio, uso e proteção da água, com a finalidade de garantir a melhoria da qualidade e quantidade disponível desse recurso. Além disso, as legislações visam regular o uso da água em detrimento da sua localização em relação aos grandes centros urbanos, e o crescimento da população, que expõe cada vez mais, a conflitos pelo uso da água, mesmo em lugares com hidrologia relevante.

Conforme Penteadó et al (2017), a constante ampliação dos passivos ambientais que atingem os reservatórios destacam os conflitos e exigem uma gestão participativa que envolva a sociedade civil nas ações o uso e conservação dos recursos hídricos. No entanto, é necessário que todos os atores envolvidos tenham a dimensão dos riscos e é importante que informações claras e objetivas atinjam os mais distintos segmentos da sociedade, ao considerar a água um recurso natural de uso comum a todos.

Diante das problemáticas acerca dos recursos hídricos, a análise efetiva, integrada e conceitual das variáveis se faz necessária, principalmente no que diz respeito a análise de dados, tabulação das percepções, levando para um espaço mais sistêmico, para a partir de então se ter uma proposta de gestão do mesmo. Neste contexto, os métodos estatísticos são de fundamental importância, pois permitem uma mensuração mais palpável do diagnóstico realizado, entretanto os métodos estatísticos univariados, em dados cenários podem não suprir a necessidade e os anseios e questionamentos da pesquisa, em tais situações existe a possibilidade de análise multivariada dos dados. Os métodos estatísticos multivariados, permitem analisar simultaneamente um conjunto de variáveis com o propósito de simplificar ou facilitar a interpretação do fenômeno estudado e o seu desenvolvimento tem possibilitado o estudo acurado de fenômenos cada vez mais complexos.

Outro ponto chave das questões ambientais que limitam a pesquisa por um ponto de vista, são as incertezas, os muitos questionamentos em relação a interação das variáveis, os ajustes do cenário, como proposta de análise para tais situações, existem as redes bayesianas, As redes Bayesianas são um tipo de sistema especialista que representa o conhecimento de domínio com uma estrutura gráfica que usa nós para representar variáveis em um sistema e arcos entre os nós para representar as interações entre as variáveis. Os especialistas podem atribuir pesos as variáveis de seu conhecimento, dando maior peso às relações que eles acreditam que são mais importantes ou que conhecem com maior certeza (PIKE, 2004).

Muitos estudos estão sendo desenvolvidos acerca da modelagem Bayesiana probabilística considerando a incerteza relacionada com as avaliações de qualidade da água, podendo ser levados em conta no planejamento de medidas de mitigação relacionadas com os potenciais impactos (KOTTA E ORAV-KOTTA, 2009; ).

O município de Rondonópolis tem população estimada de 228.857 habitantes (IBGE, 2018), sendo a principal área urbana da bacia do rio Vermelho exercendo assim uma forte pressão sobre os recursos hídricos, como pode ser observado através dos lançamentos de efluentes tratados e não tratados e resíduos sólidos in natura, habitações e comércio construídos nas áreas de proteção permanente dos cursos d'água, desmatamento.

A bacia do Rio Vermelho além de abrigar a área urbana de Rondonópolis, que é uma das cidades que mais cresce demograficamente, vem sofrendo uma grande transformação no decorrer do tempo. Os diversos usos do solo adotados vêm causando danos à bacia, entre eles estão a erosão, descaracterização do leito dos rios, alterações dos habitats aquáticos e diminuição da biodiversidade.

Tendo em vista o contexto da problemática acerca da análise da qualidade das águas e da gestão das bacias hidrográficas, o presente estudo tem por objetivo a aplicação de métodos estatísticos, tais como a análise multivariada e o sistema de redes bayesianas na análise da qualidade das águas da bacia do Rio Vermelho, Mato Grosso -MT, afim de caracterizar o monitoramento da qualidade e vazão das águas do Rio Vermelho e discorrer sobre quais os impactos relativos à disposição dos efluentes tratados e não tratados nas águas.

## REFERÊNCIAS

- BEVILACQUA, A. F. A bacia hidrográfica como unidade territorial de Planejamento e desenvolvimento sustentável. In: VI Encontro Nacional da ANPPAS. Anais... Belém, 2012.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Panorama Rondonópolis**. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mt/rondonopolis/panorama>>. Acessado em: 05 de fev. de 2019.
- KOTTA, R. A. J.; ORAV-KOTTA, H. Bayesian inference for predicting ecological water quality under different climate change scenarios. **Management of Natural Resources, Sustainable Development and Ecological Hazards II**, v. 127, p. 173 - 184, 2009. doi:10.2495/RAV090151
- PENTEADO, C. L. C.; ALMEIDA, D. L.; BENASSI, R. F. Conflitos hídricos na gestão dos reservatórios Billings e Barra Bonita. **Estudos avançados**, v. 31, p. 299-322, n. 89, 2017. <http://dx.doi.org/10.1590/s0103-40142017.31890023>.
- PIKE, W. A. Modeling drinking water quality: Violations with Bayesian networks. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 40, n. 6, p. 1563-1578. 2004. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2004.tb01606.x>
- PORTO, M. F.; PORTO, R. L. L. Gestão de bacias hidrográficas. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 22, n. 63, p. 43-60, 2008. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-40142008000200004>
- SILVEIRA, A.L.L. Ciclo hidrológico e bacia hidrográfica. In: TUCCI, C.E.M. (Org.). Hidrologia: ciência e aplicação. São Paulo: EDUSP, 2001. p 35-51.
- SOUZA, A. V. V., SIQUEIRA, M. L. B. Da convivência do passado as transformações do presente: uma análise da bacia do Rio Vermelho em Rondonópolis – MT. **Biodiversidade**, v.15, n 1, p. 97-108, 2016.
- TARGA, M. S.; BATISTA, G. T.; DINIZ, H. D.; DIAS, N. W.; MATOS, F. C. Urbanização e escoamento superficial na bacia hidrográfica do Igarapé Tucunduba, Belém, PA, Brasil. **Ambi-Agua**, Taubaté, v. 7, n. 2, p. 120-142, 2012. doi:10.4136/1980-993X
- TARGA, M. S. Hidrologia e manejo de bacias hidrográficas. Taubaté: UNITAU, 2008. 61f. 1 Apostila.

VON SPERLING, M. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 3. ed. Vol. I. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, 2005.

## CAPÍTULO I

### STUDY OF THE QUALITY PARAMETERS OF THE MATO-GROSSENSE PANTANAL WATER CONTRIBUTING BASED ON MULTIVARIATIONAL STATISTICAL METHODS

#### ABSTRACT

The intrinsic structure of a water quality dataset describes a characteristic that is characteristic and essential of a lotic system while the uniqueness describes a differential aspect, which may be related to an environmental impact. This analysis allows the manager to distinguish, within a set of variables, which ones can be elected as indicators of impact processes (singularities) from those that are probably a little variable (intrinsic) system attribute. The aim of this study is to identify and evaluate the intrinsic structure and singularities of the water body based on the physical, chemical and biological water quality variables of the Rio Vermelho-MT Basin using long-term monitoring data (2006 to 2017). The methodology consists of the use of multivariate statistical methods, factor analysis (FA) and principal component analysis (PCA). The results indicated that the statistical methods are efficient to rank the parameters, so that the parameters: color, chemical oxygen demand, total nitrogen, total coliforms, chloride, unfilterable residue, *Escherichia coli*, total phosphorus, turbidity, total residue have greater weight in variance and are the characteristic variables of water body changes while: air temperature, water temperature; ammoniacal nitrogen; nitrogen nitrite, pH; dissolved oxygen, BOD5, orthophosphate, average flow; and nitrate may be characterized by low variance as the intrinsic variables of the river, which are of the natural order of the water body. The potentialities and limitations of the methodology are discussed.

**Keywords:** Environmental Management, Multivariate Statistics, Principal Component Analysis; Factor analysis

### ESTUDO DOS PARÂMETROS DA QUALIDADE DAS ÁGUAS CONTRIBUINTES DO PANTANAL MATO-GROSSENSE COM BASE EM MÉTODOS ESTATÍSTICOS MULTIVARIADOS.

#### RESUMO

A estrutura intrínseca de um conjunto de dados de qualidade das águas, descreve uma característica que é própria e essencial de um sistema lótico enquanto a singularidade descreve um aspecto diferencial, que pode estar relacionado com um impacto ambiental. Esta análise, permite ao gestor distinguir, dentro de um conjunto de variáveis, quais são as que podem ser eleitas como indicadoras de processos de impacto (singularidades) daquelas que são provavelmente um atributo pouco variável no sistema (intrínseco). O objetivo deste estudo é identificar e avaliar a estrutura intrínseca e as singularidades do corpo hídrico, com base nas variáveis físicas, químicas e biológicas de qualidade das águas, da Bacia do Rio Vermelho-MT, usando dados de monitoramento de longa duração (2006 a 2017). A metodologia consiste no

emprego de métodos estatísticos multivariados, da análise fatorial (AF) e da análise de componentes principais (ACP). Os resultados indicaram que os métodos estatísticos são eficientes para ranquear os parâmetros, de modo que os parâmetros: cor, demanda química de oxigênio, nitrogênio total, coliformes totais, cloreto, resíduo não filtrável, *Escherichia coli*, fósforo total, turbidez, resíduo total possuem maior peso na variância e são as variáveis características das alterações do corpo hídrico enquanto que: temperatura do ar, temperatura da água; nitrogênio amoniacal; nitrogênio nitrito, pH; oxigênio dissolvido, DBO<sub>5</sub>, ortofosfato, vazão média; e nitrato, podem ser caracterizadas pela baixa variância como as variáveis intrínsecas do rio, que são de ordem natural do corpo hídrico. As potencialidades e limitações da metodologia são discutidas.

**Palavras-chave:** Gestão ambiental, Estatística multivariada, Análise de componentes principais; Análise fatorial

## INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, diversos estudos têm se concentrado na concepção de redes de monitoramento e novas metodologias têm sido propostas, onde se destaca os estudos utilizando abordagens estatísticas multivariadas de dados, através da análise de componentes principais (ACP) e análise fatorial (AF) (MAVUKKANDY et al., 2014; GARDIMAN JUNIOR et al., 2018). Uma série de estudos, tem adotado o uso de métodos multivariados com a finalidade de selecionar variáveis visando otimizar protocolos de monitoramento, reduzindo o número de variáveis a serem avaliadas bem como as estações de amostragem (NONATO et al., 2007; MAS et al., 2010; ROCHA; FREITAS; SILVA, 2014; ALVES et al., 2018). Contudo, a estratégia reducionista não soluciona por completo os objetivos do procedimento de monitoramento ambiental de longo prazo e podem incorrer em perda significativa de informações.

A análise multivariada permite ainda análise das correlações entre as variáveis avaliadas (p. ex. Teste de Correlação de Pearson), discriminando seu peso de importância com base na explicação da variância (p. ex. Análise de Componentes Principais), possibilitando inclusive a criação de grupos de variáveis (p. ex. Análise de Cluster) (CRUZ et al., 2018). Este conjunto de análises permite inferir quanto a estrutura intrínseca dos dados de uma dada região, ou seja, suas características-chave, gerando um conjunto de variáveis ranqueáveis por peso de importância, que podem ser utilizados como descritores classificatórios dos sistemas aquáticos.

O objetivo deste estudo é identificar e avaliar estrutura intrínseca e as singularidades do corpo hídrico, com base nas variáveis físicas, químicas e biológicas de qualidade das águas, da Bacia do Rio Vermelho-MT, usando dados de monitoramento de longa duração (2006 a 2017).

## **MATERIAL E MÉTODOS**

### **Caracterização da área de estudo**

A região hidrográfica do Alto Paraguai está localizada na porção Oeste do Brasil, compreendendo os territórios de Mato Grosso e Mato Grosso do Sul. No trecho nordeste da bacia do Alto Paraguai, encontra-se a sub-bacia do São Lourenço que é formada pelo rio São Lourenço e seus principais afluentes pela margem esquerda como os rios Pombas e Córrego Prata, e pela margem direita, os rios Vermelho e São Pedro (BRASIL, 2006).

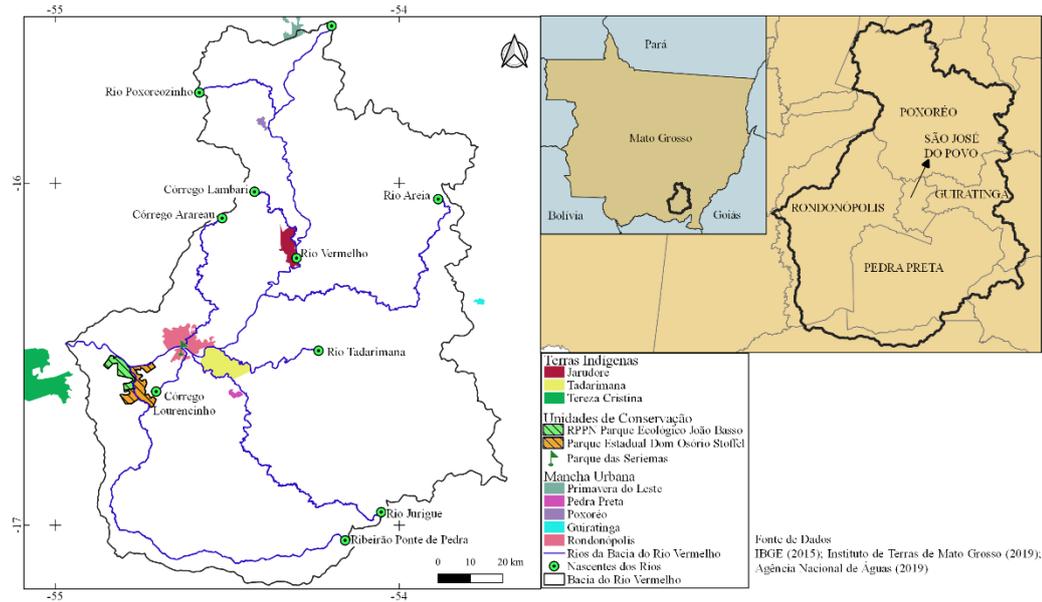
A sub-bacia do rio Vermelho, está localizada na região sudeste do Estado de Mato Grosso situa-se em região do bioma Cerrado, e possui clima tropical úmido. A bacia ocupa uma área de cerca de 150.802 ha (SOUZA; LOVERDE-OLIVEIRA, 2014).

O Rio Vermelho tem como afluente de águas pela margem direita as sub-bacias do Paraíso, Tombador, Areia, Tadarimana, Jurigue, Ponte de Pedra, e pela margem esquerda, as sub-bacias do Poxóreu, Grande, Bagaréu, Arareau, Míau e São Lourenço todas contribuintes do Pantanal Matogrossense.

O uso e ocupação da bacia do rio vermelho é destinado majoritariamente para a pastagem, seguida por culturas temporárias e mata ciliar remanescente, além de área descoberta e área urbanizada (SOUZA, 2015).

A área de maior concentração demográfica da bacia se restringe ao espaço ocupado pela mancha urbana da sede municipal de Rondonópolis. O município de Rondonópolis pelo último censo tinha população de 195.476 pessoas, com densidade demográfica de 47,00 hab/km<sup>2</sup> e população estimada em 2019 de 232.491 pessoas (IBGE, 2019). A área em estudo é apresentada na Figura 1.

Sob o ponto de vista estratégico do uso da água, a Bacia do Rio Vermelho apresenta uma condição de alta complexidade e necessita de atenção prioritária. Inclusas na área de drenagem da bacia, estão três terras indígenas (Tadarimana, Jarudore e Tereza Cristina), sendo a terra indígena Tadarimana com cerca de 9.785 ha, equivalente a área urbana atual do Município de Rondonópolis. Também estão localizadas duas grandes unidades de conservação estadual (Parque Estadual Dom Osório Stoffel, 6.421,69 ha e RPPN João Basso 3.624,57 ha). Compartilham ainda no território da bacia, duas PCHs (Ponte de Pedra, 176 MW e Rondonópolis 26,60 MW) (VICENTE, 2015).



**Figura 1.** Mapa de localização da Bacia do Rio Vermelho

### Dados de qualidade das águas

Os dados do monitoramento da qualidade das águas da bacia do Rio Vermelho estão divulgados nos relatórios de monitoramento da qualidade das águas da região hidrográfica do Alto Paraguai, realizada pela coordenadoria de monitoramento de qualidade ambiental, operada pela SEMA-MT. Atualmente, as estações de coleta estão cadastradas no banco de dados da Agência Nacional das Águas ANA – HIDRO. Os dados de qualidade da água dessas estações podem ser consultados no site da ANA/HIDROWEB (ANA/HIDROWEB, 2019)<sup>1</sup>, e as estações de amostragem estão detalhadas na Tabela 1.

**Tabela 1.** Caracterização das estações de coleta para monitoramento da qualidade das águas da Bacia do Rio Vermelho

| Estação        | Código Estação | Cidade       | Coordenadas Geográficas          |
|----------------|----------------|--------------|----------------------------------|
| Jarudore       | VEM015         | Jarudore     | 16°11'46,73" S<br>54°18'3,45" W  |
| Rondonópolis   | VEM093         | Rondonópolis | 16°28'46,49" S<br>54°39'6,45" W  |
| Ponte de Pedra | VEM111         | Rondonópolis | 16°31'47,04" S<br>54°47'27,47" W |
| Pedra Preta    | JOR046         | Pedra Preta  | 16°36'24,00" S<br>54°27'31,00" W |

<sup>1</sup> <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/apresentacao.jsf>

Nesse estudo, utilizou-se um conjunto de dados de quatro estações de amostragem, no período de 2006 a 2017, de periodicidade trimestral. As variáveis analisadas, com suas respectivas unidades e métodos analíticos estão descritas na Tabela 2.

**Tabela 2.** Metodologias utilizadas nas análises físico-químicas e microbiológicas dos parâmetros de qualidade das águas da Bacia do Rio Vermelho

(continua)

| Sigla | Variável                       | Unidade                    | Método                                 | Fonte de dados       |
|-------|--------------------------------|----------------------------|--|----------------------|
| VMD   | Vazão Média Trimestral         | m <sup>3</sup> /s          | Média trimestral                       | (ANA/UDROWE B, 2019) |
| RTO   | Resíduo Total                  | mg/L                       | Gravimétrico                           | (BRASIL, 2019)       |
| TURB  | Turbidez                       | NTU                        | Nefelométrico                          |                      |
| TAR   | Temperatura do Ar              | °C                         | Eletrométrico                          |                      |
| TH2O  | Temperatura da Água            | °C                         | Eletrométrico                          |                      |
| COR   | Cor                            | UC                         | Espectrofotométrico                    |                      |
| COND  | Condutividade Elétrica         | µS/cm                      | Elétrica Eletrométrico                 |                      |
| DQO   | Demanda Bioquímica de Oxigênio | mg/L.O<br>2                | Titulométrico e espectrofotométrico    |                      |
| N-A   | Nitrogênio Amoniacal           | mg/L.N                     | Espectrofotométrico                    |                      |
| N-NI  | Nitrito                        | mg/L.N                     | Espectrofotométrico                    |                      |
| N-NA  | Nitrato                        | mg N/L                     | Espectrofotométrico                    |                      |
| N-TO  | Nitrogênio Total               | mg/L.N                     | Espectrofotométrico                    |                      |
| ALC   | Alcalinidade                   | mg/L.Ca<br>Co <sub>3</sub> | Titulação potenciométrica              |                      |
| ORT   | Ortofosfato                    | mg/L.P                     | Espectrofotométrico                    |                      |
| DTO   | Dureza Total                   | mg/L.Ca<br>Co <sub>3</sub> | Titulométrico - EDTA-Na                |                      |
| CLO   | Cloreto                        | mg/L                       | Titulométrico                          |                      |
| SUL   | Sulfato                        | mg/L                       | Espectrofotométrico - Cloreto de Bário |                      |
| OD    | Oxigênio Dissolvido            | mg/L.O<br>2                | Eletrométrico                          |                      |
| Ph    | Ph                             |                            | Eletrométrico                          |                      |

**Tabela 3.** Metodologias utilizadas nas análises físico-químicas e microbiológicas dos parâmetros de qualidade das águas da Bacia do Rio Vermelho

(continuação)

| Sigla            | Variável                      | Unidade             | Método               | Fonte de dados |
|------------------|-------------------------------|---------------------|----------------------|----------------|
| DBO <sub>5</sub> | Demanda Biológica de Oxigênio | mg/L.O <sub>2</sub> | Quimioluminescência  |                |
| FTO              | Fósforo Total                 | mg P/L              | Espectrofotométrico  |                |
| RNF              | Resíduo Filtrável             | Não mg/L            | Gravimétrico         |                |
| CTO              | Coliformes Totais             | NMP/10 0ml          | Substrato Enzimático |                |
| <i>ESC COL</i>   | <i>Escherichia coli</i>       | NMP/10 0ml          | Substrato Enzimático |                |

### **Análise estatística multivariada**

O banco de dados foi estruturado e analisado, sendo que nesta análise foi avaliada uma matriz de ordem  $126 \times 26$  (linhas  $\times$  colunas), tendo como variáveis os 26 parâmetros de qualidade de água e como observações os meses de amostragem nas estações descritas na Tabela 1. As análises multivariadas, análise fatorial (AF) e da análise de componentes principais (ACP) foram realizadas no software R (R CORE TEAM, 2019).

Para a AF o método de extração utilizado foi via ACP e rotação Varimax foi utilizada, obtendo-se pesos altos para cada variável em um único fator e pesos baixos ou moderados nos demais fatores. Na ACP dos dados de monitoramento de qualidade de água da bacia do Rio Vermelho, os componentes principais foram extraídos da matriz de correlação, eliminando possíveis influências em virtude das diferentes ordens de magnitude dos parâmetros de qualidade de água. Para estimação do número de componentes principais utilizou-se o critério de Kaiser (KAISER, 1985), denominado neste estudo de fator  $k$ . Sob este critério, foram analisados os componentes com autovalores maiores que 1,0.

O Critério de escolha do melhor ajuste fatorial seguiu os seguintes parâmetros: Raíz Média Quadrada dos Resíduos (RMSR), esse valor deve estar próximo de 0; Raiz Quadrada do Erro Médio de Aproximação (RMSEA) deve estar abaixo de 0,05, Índice Tucker-Lewis (TLI) considerando-se aceitável acima de 0,9 (REVELLE, 2017).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 3 apresenta-se o resultado dos autovalores, bem como a porcentagem de variância explicada por cada fator, e a variância acumulada pelas mesmas. A classificação dos fatores foi feita com base nos fatores cujos valores próprios são superiores a 1,0 sendo este critério é sugerido por Critério de Kaiser (1958): o número de fatores retidos deve ser igual ao número de autovalores maiores que 1,0. A ideia básica do critério é manter no sistema novas dimensões que representem pelo menos a informação de variância de uma variável original.

Dos resultados da AF aplicada ao conjunto de dados, oito fatores foram considerados mais representativos, pois representam 67.64% da variância total, sobre os parâmetros de qualidade da água, onde o Fator 1 (F1) foi responsável por cerca de 18.78%, Fator 2 (F2) por 10.87%, Fator 3 (F3) por 8.28%, de explicação das variações dos dados.

**Tabela 3.** Autovalores, porcentagem da variância explicada e proporção acumulada pelos componentes dos parâmetros de qualidade das águas da Bacia do Rio Vermelho.

| Fator | Autovalor | % Variância | % Acumulada da Variância |
|-------|-----------|-------------|--------------------------|
| 1     | 4,51      | 18,78       | 18,78                    |
| 2     | 2,61      | 10,87       | 29,65                    |
| 3     | 1,99      | 8,28        | 37,92                    |
| 4     | 1,78      | 7,41        | 45,33                    |
| 5     | 1,60      | 6,65        | 51,98                    |
| 6     | 1,35      | 5,61        | 57,59                    |
| 7     | 1,25      | 5,23        | 62,82                    |
| 8     | 1,16      | 4,82        | 67,64                    |
| 9     | 0,99      | 4,12        | 71,76                    |
| 10    | 0,90      | 3,74        | 75,50                    |
| 11    | 0,85      | 3,53        | 79,02                    |
| 12    | 0,74      | 3,07        | 82,09                    |
| 13    | 0,67      | 2,78        | 84,88                    |
| 14    | 0,61      | 2,55        | 87,43                    |
| 15    | 0,55      | 2,30        | 89,73                    |
| 16    | 0,51      | 2,11        | 91,85                    |
| 17    | 0,44      | 1,84        | 93,69                    |
| 18    | 0,35      | 1,45        | 95,14                    |
| 19    | 0,32      | 1,34        | 96,48                    |
| 20    | 0,31      | 1,30        | 97,79                    |
| 21    | 0,18      | 0,75        | 98,54                    |
| 22    | 0,14      | 0,57        | 99,11                    |
| 23    | 0,12      | 0,52        | 99,63                    |
| 24    | 0,09      | 0,37        | 100,00                   |

O modelo fatorial utilizado foi gerando os fatores por meio da máxima verossimilhança, e os valores dos pesos das variáveis nos fatores podem ser observados na Tabela 5. Quando ocorre a rotação Varimax, diminui-se a contribuição das variáveis com menor significância e aumenta-se a contribuição das que possuem maior significância (DAMASIO, 2012). A diferença entre componentes principais e fatores é que enquanto as componentes principais são combinações lineares de variáveis de qualidade de água observáveis, os fatores podem incluir variáveis não-observáveis, hipotéticas e “latentes” (NEISSE; HONGYU, 2016).

A Tabela 4 mostra a matriz fatorial obtida como resultado da AF, os valores em negrito apresentam as maiores correlações entre os parâmetros e cada um dos Fatores e os valores sublinhados destacam as cargas maiores que 0,4.

**Tabela 4.** Matriz dos pesos das variáveis nos fatores e comunidades dos parâmetros de qualidade da água da Bacia do Rio Vermelho.

|      | F1          | F2          | F3          | F4          | F5          | F6          | F7          | F8    | Com |
|------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------|-----|
| VMD  | 0,21        | 0,20        | -0,11       | 0,11        | 0,20        | -0,05       | -0,21       | -0,16 | 6,0 |
| COR  | 0,12        | <b>0,57</b> | 0,05        | -0,02       | 0,06        | 0,01        | -0,03       | 0,01  | 1,1 |
| COND | -0,04       | 0,10        | <b>0,49</b> | -0,20       | 0,02        | -0,22       | 0,24        | 0,22  | 2,9 |
| DQO  | 0,04        | <b>0,76</b> | 0,15        | 0,03        | -0,04       | 0,05        | -0,08       | -0,19 | 1,3 |
| N-A  | -0,11       | 0,00        | 0,04        | -0,04       | 0,29        | -0,05       | 0,07        | 0,00  | 1,5 |
| N-NI | -0,05       | 0,01        | 0,02        | -0,09       | 0,15        | 0,23        | 0,07        | -0,14 | 3,2 |
| N-TO | 0,30        | <b>0,51</b> | -0,12       | 0,04        | 0,19        | -0,08       | 0,07        | 0,17  | 2,5 |
| CTO  | 0,16        | <b>0,46</b> | 0,04        | 0,10        | 0,44        | -0,19       | 0,16        | -0,10 | 3,1 |
| ALC  | -0,06       | -0,17       | <b>0,78</b> | -0,03       | 0,19        | 0,01        | 0,09        | -0,26 | 1,5 |
| ORT  | -0,04       | 0,09        | -0,05       | 0,05        | 0,04        | 0,02        | 0,05        | -0,23 | 1,7 |
| DTO  | 0,09        | 0,01        | <b>0,83</b> | 0,07        | -0,13       | 0,41        | -0,24       | 0,23  | 1,9 |
| CLO  | <b>0,43</b> | 0,08        | 0,11        | 0,08        | 0,08        | -0,08       | 0,17        | 0,42  | 2,8 |
| SULF | 0,10        | 0,31        | <b>0,68</b> | 0,10        | -0,07       | -0,06       | 0,12        | 0,45  | 2,4 |
| RNF  | <b>0,92</b> | 0,24        | 0,05        | 0,00        | -0,06       | -0,04       | 0,01        | 0,02  | 1,2 |
| TAR  | 0,01        | -0,12       | -0,09       | <b>0,98</b> | -0,04       | 0,02        | 0,03        | -0,08 | 1,1 |
| TH2O | -0,01       | 0,14        | 0,04        | <b>0,77</b> | 0,12        | -0,19       | -0,09       | 0,03  | 1,3 |
| OD   | -0,07       | -0,22       | 0,04        | -0,09       | -0,15       | <b>0,64</b> | 0,17        | 0,03  | 1,6 |
| E CO | 0,29        | 0,19        | -0,05       | 0,24        | <b>0,87</b> | 0,18        | -0,12       | -0,05 | 1,7 |
| pH   | 0,06        | -0,01       | 0,06        | -0,02       | 0,11        | 0,21        | <b>0,73</b> | -0,06 | 1,3 |
| DBO  | 0,17        | 0,16        | 0,03        | 0,24        | 0,05        | 0,25        | 0,03        | -0,08 | 3,9 |
| N-NA | -0,04       | -0,23       | -0,07       | -0,04       | -0,10       | 0,13        | 0,03        | -0,06 | 2,7 |
| FTO  | 0,18        | <b>0,46</b> | -0,16       | -0,02       | -0,04       | -0,06       | 0,03        | -0,10 | 1,7 |
| TURB | <b>0,93</b> | 0,11        | -0,04       | -0,05       | 0,03        | 0,00        | 0,03        | 0,07  | 1,1 |
| RTO  | <b>0,73</b> | 0,49        | 0,02        | 0,12        | 0,01        | 0,00        | -0,11       | 0,16  | 2,0 |

Legenda: Legenda: VMD: Vazão Média, COR: Cor, COND: Condutividade, DQO: Demanda química de Oxigênio, N-A: Nitrogênio Amoniacal, N-NI: N-NA: Nitrogênio Nitrito; N-TO: Nitrogênio Total, CTO: Coliformes Totais, ALC: Alcalidade, ORT: Ortofosfato, DTO: Dureza Total, CLO: Cloreto, SULF: Sulfato, RNF: Resíduo Não Filtrável, TAR: Temperatura do Ar, TH2O: Temperatura da Água, OD: Oxigênio Dissolvido, E CO: Escherichia coli, pH: pH, DBO: Demanda Bioquímica de Oxigênio, Nitrogênio Nitrito, FTO: Fósforo Total, TURB: Turbidez, RTO: Resíduo Total.

Na Tabela 4 estão representados os pesos das variáveis nos fatores, sendo que no F1 estão: Cloreto, resíduo não filtrável, turbidez, resíduo total; F2: Cor, demanda química de oxigênio, nitrogênio total, coliformes totais coliformes totais, fosforo total. O F1 tende a ser um fator geral com quase todas variáveis com carga significativa e explica a quantia maior da variância. O segundo Fator e os seguintes são então baseados na quantia residual de variância. Cada fator explica porções excessivamente menores de variância (HAIR JR et. al 2009). Neste caso o Fator 1 e 2 podem ser classificados como singulares face a alta importância para a variância e podem ser denominados como Perda de Qualidade das Águas.

No F3 que explicam 8.28% da variância total, as principais variáveis foram: condutividade, alcalinidade, sulfeto, dureza total; podendo caracterizar com Substâncias Alcalinizantes, ou seja, ricas em sais de cálcio e magnésio que podem conter ainda sulfatos. No F4: a temperatura do ar e da água podendo ser denominado de fator Sazonal da Qualidade das Águas. Os demais componentes, basicamente reforçam a importância das variáveis descritoras da contaminação por efluentes e fontes de difusas associadas a nutrientes.

Seis parâmetros obtiveram peso menor ou igual a 0,30, são elas: vazão média, demanda biológica de oxigênio, nitrogênio nitrito, nitrogênio nitrato, nitrogênio amoniacal, ortofosfato. Julga-se que cargas fatoriais maiores que  $\pm 0,30$  atingem o mínimo de significância; cargas de  $\pm 0,40$  são consideradas mais importantes; e se as cargas são de  $\pm 0,50$  ou maiores, elas são consideradas com significância prática (HAIR et al., 2009). Logo, esses parâmetros não obtiveram o valor do mínimo de significância em suas cargas fatoriais.

Com a técnica da análise fatorial foi possível obter resultados satisfatórios, pois a variabilidade (correlação) das variáveis está contidas nas respectivas cargas fatoriais. Quanto maior a comunalidade, maior será o poder de explicação daquela variável pelo fator.

Também é interessante destacar que os principais fatores de pressão sobre a qualidade das águas da Bacia do Rio Vermelho, identificados nos Relatório Anuais dos últimos 10 anos (BRASIL, 2019) foram lançamento de efluentes e/ou poluição de origem difusa, resultado que coincide com os fatores encontrados pela AF.

A Figura 2 apresenta o biplot ou seja a representação gráfica dos parâmetros de qualidade da água e as estações de amostragem, espacialmente, de forma que a espacialização das relações pode ficar mais clara, sendo que quanto menor o ângulo entre os vetores, mais correlacionadas estão as variáveis. Cada ponto no gráfico representa um par de correlação, ou seja, cada variável principal correlacionada com os componentes principais, indicando assim qual delas estão mais associadas aos componentes (LATTIN et al., 2011). É possível observar que a estação ação de Pedra Preta se diferencia das demais, demonstrando uma singularidade

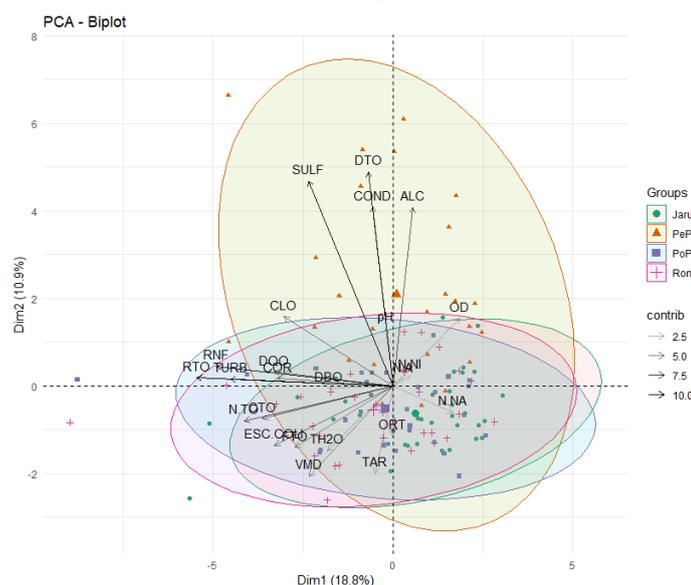
desta estação, sendo mais caracterizada pelas variáveis: sulfato, dureza total, alcalinidade e condutividade, parâmetros que foram característicos do F3.

A dureza em águas naturais, forma complexos com outros compostos, sendo então uma condição importante, pois modifica seus efeitos sobre os constituintes daquele ecossistema. Logo, a dureza é um parâmetro usado no controle de bioensaios de avaliação de toxicidade de substâncias ou de efluentes. As principais fontes de dureza são a dissolução de minerais contendo cálcio e magnésio, exemplificando, as rochas calcárias e os despejos industriais (VON SPERLING, 2007).

Esgotos e efluentes comumente apresentam alcalinidades altas devido à presença de silicatos e fosfatos. A alcalinidade alta em águas naturais pode inviabilizar seu uso para irrigação e pode ser indício de contaminação por efluentes industriais.

Segundo Boesch (2002) e Esteves (2011), a condutividade elétrica é um parâmetro que pode mostrar alterações na composição dos corpos d'água. Sendo um parâmetro importante para controlar e determinar o estado e a qualidade de água (PIÑEIRO DI BLASI et al., 2013). O uso do solo pode modificar diretamente a composição de uma água refletindo-se na condutividade elétrica (ESTEVES, 2011; VON SPERLING, 2005).

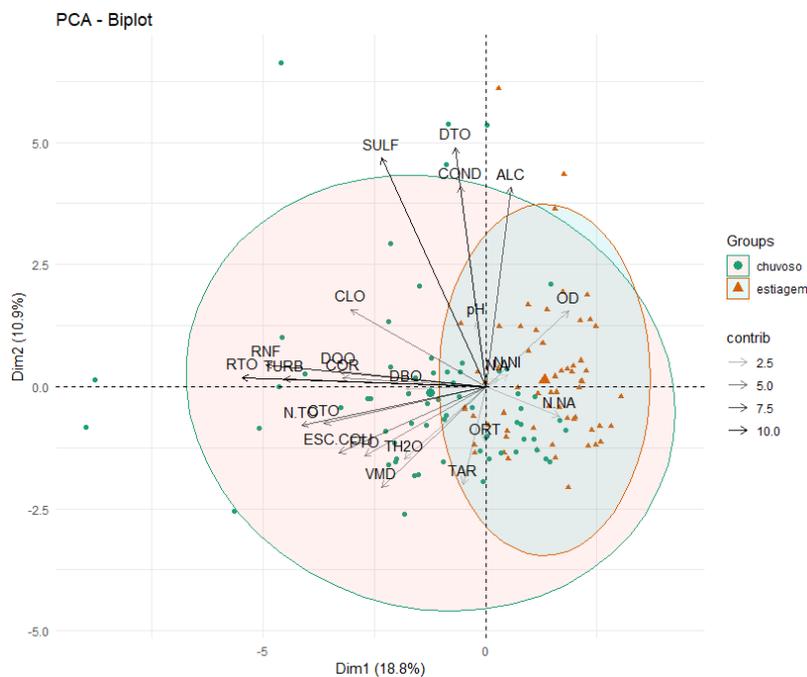
Na análise de ACP representada pelo biplot da Figura 3 verifica-se uma boa separação



**Figura 2.** Biplot das variáveis de qualidade das águas da Bacia do Rio Vermelho em relação as estações de amostragem pela Análise de Componentes Principais (ACP)

Siglas: VMD: Vazão Média, COR: Cor, COND: Condutividade, DQO: Demanda química de Oxigênio, N-A: Nitrogênio Amoniacal, N-NI: N-NA: Nitrogênio Nitrato; N-TO: Nitrogênio Total, CTO: Coliformes Totais, ALC: Alcalidade, ORT: Ortofosfato, DTO: Dureza Total, CLO: Cloreto, SULF: Sulfato, RNF: Resíduo Não Filtrável, TAR: Temperatura do Ar, TH2O: Temperatura da Água, OD: Oxigênio Dissolvido, ESC COLI: Escherichia coli, pH: pH, DBO: Demanda Bioquímica de Oxigênio, Nitrogênio Nitrito, FTO: Fósforo Total, TURB: Turbidez, RTO: Resíduo Total, Jaru: Estação Jarudore, Pepr: Estação Pedra Preta, PoPe: Estação Ponte de Pedra, Rond: Estação Rondonópolis entre os períodos de chuva e estiagem, ou seja uma dissimilaridade entre os grupos. Podendo

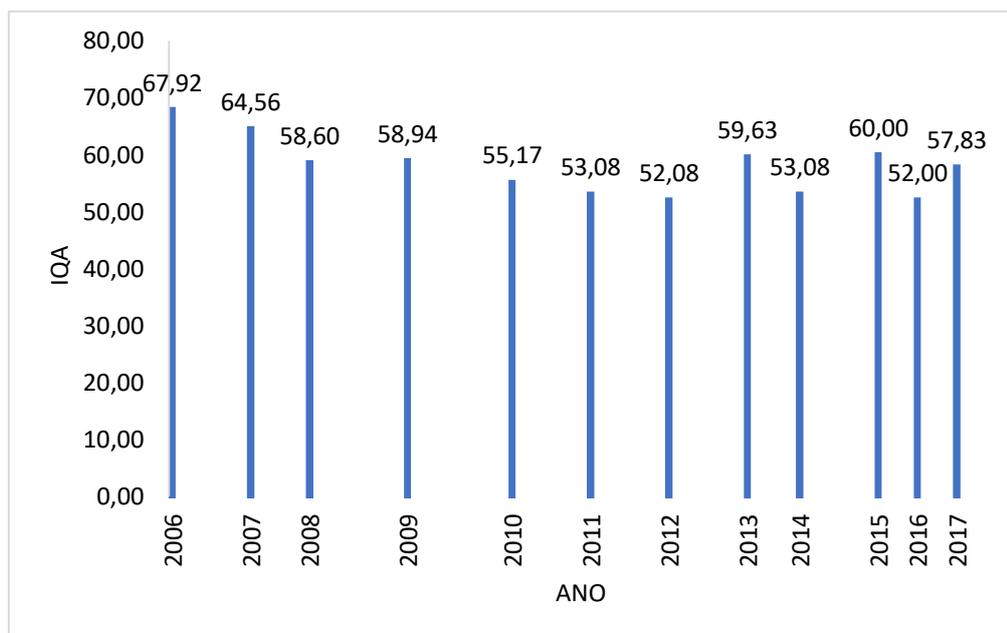
discriminar as variáveis que mais caracterizam o período de estiagem, sendo elas: oxigênio dissolvido, nitrogênio nitrato, ortofosfato, temperatura do ar, pH, nitrogênio nitrito.



**Figura 3.** Biplot das variáveis de qualidade das águas da Bacia do Rio Vermelho em relação aos períodos chuvoso e estiagem pela Análise de Componentes Principais (ACP)

Siglas: Legenda: VMD: Vazão Média, COR: Cor, COND: Condutividade, DQO: Demanda química de Oxigênio, N-A: Nitrogênio Amoniacal, N-NI: N-NA: Nitrogênio Nitrato; N-TO: Nitrogênio Total, CTO: Coliformes Totais, ALC: Alcalidade, ORT: Ortofosfato, DTO: Dureza Total, CLO: Cloreto, SULF: Sulfato, RNF: Resíduo Não Filtrável, TAR: Temperatura do Ar, TH2O: Temperatura da Água, OD: Oxigênio Dissolvido, ESC COLI: Escherichia coli, pH: pH, DBO: Demanda Bioquímica de Oxigênio, Nitrogênio Nitrito, FTO: Fósforo Total, TURB: Turbidez, RTO: Resíduo Total.

O biplot da Figura 3 demonstra que a chuva, entrada de material no corpo hídrico tem grande influência no comportamento do mesmo em relação as variáveis analisadas, levando a uma importante conclusão, o fato de que a amostragem nos dois períodos (chuvoso e estiagem) é fundamental, pois os corpos de água são diferentes nestes períodos, com deterioração dos corpos de água nas chuvas com a entrada de material alóctone.



**Figura 4.** Gráfico de evolução do Índice de Qualidade das Águas (IQA) médio entre os anos de 2006 a 2017 da Bacia do Rio Vermelho

A Figura 4 apresenta a variação do Índice de Qualidade da Água (IQA) médio entre os anos de 2006 a 2017, nota-se que em 2006 o valor médio era de 67,91 e ao fim do período de análise do dado estudo ele caiu em 10 sendo de 57,83, ambos os valores classificados como regular/médio, é possível também perceber os valores dos anos 2016 (52) e 2012 (52,08) tais valores próximos da classificação ruim. A análise da variação do IQA nos permite inferir uma queda na qualidade das águas da Bacia do Rio Vermelhos nos últimos 10 anos.

## CONCLUSÕES

A AF promoveu a reorganização das variáveis de qualidade da água, de forma a caracterizar a estrutura intrínseca das variáveis descritoras da qualidade das águas da Bacia do Rio Vermelho. Sendo que as variáveis com maior variância as do F1 e F2, podendo inferir a elas as alterações que têm acontecido no corpo hídrico, e as com menos variância sendo as variáveis intrínsecas do rio, ou seja refletem as características naturais do mesmo.

No aspecto espacial, a estação de amostragem que demonstrou maior não similaridade do corpo hídrico com as demais foi a estação da Pedra Preta, sendo caracterizada principalmente por quatro variáveis: sulfato, dureza total, alcalinidade e condutividade.

No aspecto temporal, foi possível discriminar as variáveis mais características da estação de estiagem, sendo elas: oxigênio dissolvido, nitrogênio nitrato, ortofosfato, temperatura do ar, pH, nitrogênio nitrito.

## REFERÊNCIAS

ANA/HIDROWEB - Agência Nacional de Águas. **Séries Históricas de Estações**. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br>>. Acesso em: 05 de jan. de 2019.

ALVES, J. P. H.; FONSECA, L. C.; CHIELLE, R. S. A.; MACEDO, L. C. B. Monitoring water quality of the Sergipe River basin: an evaluation using multivariate data analysis. **RBRH**, Porto Alegre, v. 23, e. 27, 2018. <http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.231820170124>

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Recursos Hídricos. **Caderno da Região Hidrográfica do Paraguai**. Brasília: MMA, 2006.

BRASIL. Secretaria de Estado de Meio Ambiente. **Relatórios Anuais**. Disponível em: <[http://www.sema.mt.gov.br/index.php?option=com\\_docman&Itemid=82](http://www.sema.mt.gov.br/index.php?option=com_docman&Itemid=82)>. Acesso em: 15 de jan. de 2019.

BOESCH, D. F. Challenges and opportunities for science in reducing nutrient over-enrichment of coastal ecosystems. **Estuaries**, v. 25, n. 4b, p. 886– 900, 2002. <http://dx.doi.org/10.1007/BF02804914>

CRUZ, D. G.; NOGUEIRA, F. C.; ROSSI, D. Q.; PEREIRA, T. M.; FERREIRA, R. F. Análise fatorial multivariada aplicada na caracterização de contaminantes de um depósito de minério de ferro. **Tecnol. Metal. Mater. Miner.**, São Paulo, v. 15, n. 3, p. 248-253, jul./set. 2018. <http://dx.doi.org/10.4322/2176-1523.1432>

DAMÁSIO, B. F. Uso da análise fatorial exploratória em psicologia. **Avaliação Psicológica**, v. 11, n. 2, p. 213-228, 2012.

ESTEVES, F. **Fundamentos de limnologia**. 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2011. 826 p.

HAIR JR.; J.F.; WILLIAM, B.; BABIN, B.; ANDERSON, R.E. **Análise multivariada de dados**. 6.ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.

GARDIMAN JUNIOR, B. S.; GARCIA, G. O.; CECÍLIO, R. V.; LOOS, R. A.; MAFIA, R. G.; ABAD, J. I. M.; SIMÃO, J. B. P.; BARBOSA, V. H. B. Variáveis-chave para determinação da qualidade da água em microbacias com plantios de eucalipto. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 28, n. 1, p. 127-140, jan.- mar., 2018. <http://dx.doi.org/10.5902/1980509831590>

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Panorama Rondonópolis**. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mt/rondonopolis/panorama>>. Acesso em: 05 de fev. de 2019.

KAISER, Henry F. The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. **Psychometrika**, v. 23, n.3, p. 187-200, 1958.

LATTIN, J.; CARROLL, J. D.; GREEN, P. E. Análise de dados multivariados. São Paulo: **Cengage Learning**, p. 455, 2011.

MAS, S.; DE JUAN, A.; TAULER, R.; OLIVIERI, A. C.; ESCANDAR, G. M. Application of chemometric methods to environmental analysis of organic pollutants: A review. **Talanta**, v. 80, p. 1052-1067, 2010.

MAVUKKANDY, M. O.; KARMAKAR, S.; HARIKUMAR, P. S. Assessment and rationalization of water quality monitoring network: a multivariate statistical approach to the Kabbini River (India). **Environmental Science and Pollution Research International**, v. 21, n. 17, p. 10045-10066, 2014. <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-014-3000-y>. PMID:24865500.

NEISSE, A. C.; HONGYU, K. Aplicação de componentes principais e análise fatorial a dados criminais de 26 estados dos EUA. **Engineering and Science**, v. 2, e. 5, 2016. ISSN: 2358-5390 DOI: 10.18607/ES20165064

NONATO, E. A.; VIOLA, Z. G. G.; ALMEIDA, K. C. B.; SCHOR, H. H. R.. Tratamento estatístico dos parâmetros da qualidade das águas da bacia do alto curso do Rio das Velhas. **Quím. Nova**, v.30, n.4, p.797-804, 2007. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-40422007000400008>.

PIÑEIRO DI BLASI, J. I.; MARTÍNEZ TORRES, J.; GARCÍA NIETO, P. J.; ALONSO FERNÁNDEZ, J. R.; DÍAZ MUÑIZ, C.; TABOADA, J. Analysis and detection of outliers in water quality parameters from 'different automated monitoring stations in the Miño river basin (NW Spain). **Ecological Engineering**, v. 60, p. 60-66, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.07.054>

R Core Team (2019). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

REVELLE, W. (2017) psych: Procedures for Personality and Psychological Research, Northwestern University, Evanston, Illinois, USA, <https://CRAN.R-project.org/package=psych> Version = 1.7.8.

ROCHA, C. H. B.; FREITAS, F. A.; SILVA, T. M. Alterações em variáveis limnológicas de manancial de Juiz de Fora devido ao uso da terra. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 4, p. 431-436, abr. 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662014000400011>

SOUZA, A. V. V. **Influência dos usos e ocupação do solo na qualidade da água do rio Vermelho no sudeste de Mato Grosso**. 2015 80 f. Dissertação ( Programa de Pós-Graduação em Geografia) – Universidade Federal de Mato Grosso, Rondonópolis – MT, 2015.

SOUZA, A. V. V.; LOVERDE-OLIVEIRA, S. M. Análise da qualidade da água do Rio Vermelho em Mato Grosso: no período de cheia no ano de 2014. **Biodiversidade**, v.13, n 2., p.115-126, 2014.

VICENTE, T. C. **Gestão integrada de áreas protegidas: o potencial de Implantação do corredor ecológico cerrado/pantanal na bacia do Rio Vermelho/São Lourenço – MT**. 2015 112f. Dissertação ( Programa de Pós-Graduação em Geografia) – Universidade Federal de Mato Grosso, Rondonópolis – MT, 2015.

VON SPERLING, M. **Estudos de modelagem da qualidade da água de rios**. Belo Horizonte: UFMG, 2007. Vol. 7. 452 p.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgoto**. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2005. 588 p.

## CAPÍTULO II

### BAYESIAN NETWORKS MODEL AS A TOOL FOR RISK MANAGEMENT OF RIO VERMELHO – MT

#### ABSTRACT

The analysis and evaluation of the factors that influence the behavior of water bodies, consequently the watersheds, are important research topics in environmental management. The aim of this study is to apply the principles of Bayesian networks as a management tool for understanding the behavior of the water body using a historical series of the last 10 years (2006 to 2017), analyzing the water quality of Rio Vermelho and its tributaries and predicting possible probabilities of occurrence of hazards in the watershed and their uses. The methodology consists of the use of multivariate statistical methods through principal component analysis (PCA) and then the construction of Bayesian Networks (RB). The results indicate that the construction of the Bayesian network in a watershed for diagnosis and management purposes allows the combination of expert observations with the historical behavior of the watershed, and may further support the simulation of future hazard scenarios.

**Keywords:** Multivariate Statistics, Environmental Management, Artificial Intelligence, Ecological Risk

### MODELO DE REDES BAYESIANAS COMO FERRAMENTA PARA O GERENCIAMENTO DE RISCO DA BACIA DO RIO VERMELHO – MT

#### RESUMO

A análise e avaliação dos fatores que influenciam o comportamento dos corpos hídricos, consequentemente das bacias hidrográficas são tópicos de pesquisa importantes na gestão ambiental. O objetivo do presente estudo é aplicar os princípios das redes Bayesianas como ferramenta de gestão para compreensão do comportamento do corpo hídrico usando uma série histórica dos últimos 10 anos (2006 a 2017), analisando a qualidade da água do Rio Vermelho e seus tributários e prever possíveis probabilidades de ocorrência dos perigos na bacia hidrográfica e seus usos. A metodologia consiste no emprego de métodos estatísticos multivariados através da análise de componentes principais (ACP) e posteriormente realizou-se a construção das Redes Bayesianas (RB). Os resultados indicam que a construção da rede Bayesiana em uma bacia hidrográfica para fins de diagnóstico e gestão permite fazer a combinação de observações de especialistas com o comportamento histórico da bacia hidrográfica, bem como pode subsidiar em estudos posteriores a simulação de cenários de perigos futuros.

**Palavras-chave:** Estatística Multivariada, Gestão ambiental, Inteligência artificial, Risco ecológico

## INTRODUÇÃO

Na gestão de recursos hídricos e, por conseguinte, na gestão da qualidade da água de um determinado rio, muitos esforços têm sido despendidos para compreensão da complexa interação entre aspectos qualitativos e quantitativos. A base para tal fundamentação está na necessária consistência entre as séries históricas hidrológicas (quantitativas) e os dados de monitoramento de qualidade da água.

Nota-se, de modo geral, que a falta de saneamento básico adequado é um dos grandes problemas da degradação ao meio ambiente e este fato atinge diversos municípios em todo território nacional e é agravada cada vez mais pelo aumento desenfreado da demanda por água e esgoto tratado. Logo, a realização de uma análise aprofundada do cenário do saneamento básico nacional e de sua importância para a proteção ambiental – junto à sociedade, com destaque para as empresas que administram este tipo de serviço – consiste em uma etapa necessária para melhoria de todo o processo (TAKENAKA et al, 2015).

É necessário observar que a gestão dos reservatórios de abastecimento de água, devem estar em concordância com a gestão de bacias hidrográficas. Visto que a gestão integrada de bacias hidrográficas articulada com o planejamento regional pode ser um eficiente instrumento de desenvolvimento socioambiental e econômico, possibilitando novas alternativas de múltiplos usos, associados à garantia da qualidade da água dos tributários do reservatório (CAMPAGNOLI; TUNDISI, 2012).

Segundo Bevilacqua (2012), adotar a bacia hidrográfica como unidade territorial de planejamento implica reconhecer que é sobre este recorte espacial que as ações antrópicas e as degradações decorrentes refletem seu efeito.

Sendo assim, a análise e avaliação dos fatores que influenciam o comportamento dos corpos hídricos, conseqüentemente das bacias hidrográficas, a estimativa dos potenciais riscos, e seleção de medidas adequadas de antecedência, de modo a reduzir a frequência ou mitigar os processos poluidores, dentro de cenários com alta incerteza e diferentes combinações de probabilidades, são tópicos de pesquisa importantes na gestão ambiental.

Tais condições propiciam o uso de algumas das técnicas, especificamente a Análise de Componentes Principais (ACP) e as Redes Bayesianas (RB). A partir dessas técnicas, pode-se, por exemplo, correlacionar variáveis de monitoramento de qualidade da água com variáveis (por exemplo, a população), e, assim, criar cenários (LOUCKS; VAN BEEK; 2017).

As redes bayesianas são métodos que podem gerar informações precisas para o estudo da correlação entre as características. São exploradas sobre seu poder e limitações como

esquemas de representação de conhecimento em diferentes sistemas, sob a premissa fundamental de que todas as incertezas podem ser representadas e medidas como probabilidades (PEARL, 1982; MARQUES; DUTRA, 2002). A rede Bayesiana combinando a teoria da probabilidade com a teoria de grafos, não só tem uma rigorosa consistência matemática, mas também tem a carta de estrutura que pode intuitivamente identificar problemas. Portanto, é uma das ferramentas mais poderosas e eficazes para lidar com incertezas (ZOU; YUE, 2017; DEL REY; ZWICKER, 2010). Além disso, é uma maneira intuitiva de entender as relações diretas e indiretas entre caracteres (FELIPE et al., 2015).

Sendo o impacto dos efluentes tratados e não tratados nas águas e a rede de Saneamento Básico na Bacia do Rio Vermelho geradores de dúvidas e questionamentos acerca dos autores envolvidos, o objetivo do presente estudo é aplicar os princípios das redes Bayesianas como ferramenta de gestão para compreensão do comportamento do corpo hídrico usando uma série histórica dos últimos 10 anos (2006 a 2017), analisando a qualidade da água do Rio Vermelho e seus tributários e prever possíveis probabilidades de ocorrência dos perigos na bacia hidrográfica e seus usos.

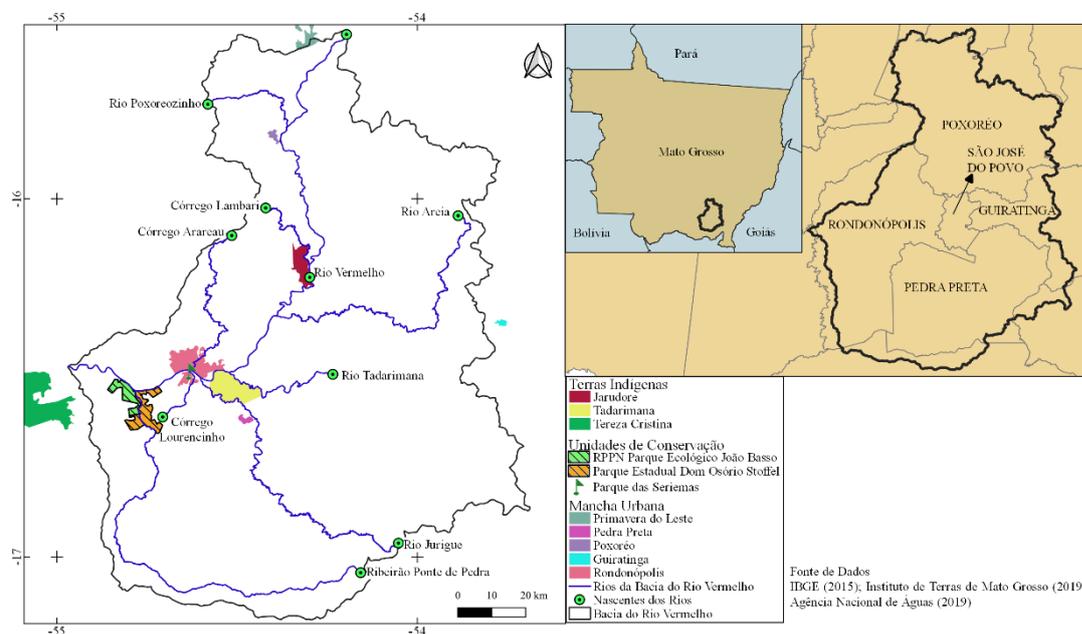
## **MATERIAL E MÉTODOS**

### **Caracterização da área de estudo**

O estudo foi realizado na bacia do rio Vermelho (15°30'/17°15' S e 53°45'/55°00' W), que é localizada na região sudeste do Estado de Mato Grosso. A bacia ocupa uma área de cerca de 150.802 há. (SOUZA; LOVERDE-OLIVEIRA, 2014). O rio Vermelho tem como afluente de águas pela margem direita as sub-bacias do Paraíso, Tombador, Areia, Tadariman, Jurigue, Ponte de Pedra, e pela margem esquerda, as sub-bacias do Poxóreu, Grande, Bagaréu, Arareau, Míau e São Lourenço todas contribuintes do Pantanal Matogrossense.

O uso e ocupação da bacia do rio vermelho é destinado majoritariamente para a pastagem, seguida por culturas temporárias e mata ciliar remanescente, além de área descoberta e área urbanizada (SOUZA, 2015). A área de maior concentração da bacia se restringe ao espaço ocupado pela mancha urbana da sede municipal de Rondonópolis. O município de Rondonópolis pelo último censo tinha população de 195.476 pessoas, com densidade demográfica de 47,00 hab./km<sup>2</sup> e população estimada em 2019 de 232.491 pessoas (IBGE, 2019).

O município de Rondonópolis abriga uma colônia de pescadores, denominada Colônia Z3, dos quais atualmente 330 pescadores estão associados a colônia, sendo que 100 em média pescam ao longo da extensão da bacia do Rio Vermelho, a pesca profissional é a principal fontes de renda das famílias envolvidas e o pescado é consumido por boa parte da população local. A área em estudo é apresentada na Figura 5.



**Figura 5.** Mapa de localização da Bacia do Rio Vermelho

Sob o ponto de vista estratégico do uso da água, a Bacia do Rio Vermelho apresenta uma condição de alta complexidade e necessita de atenção prioritária. Inclusas na área de drenagem da bacia, estão três terras indígenas (Tadarimana, Jarudore e Tereza Cristina), sendo a terra indígena Tadarimana com cerca de 9.785 ha, equivalente a área urbana atual do Município de Rondonópolis. Também estão localizadas duas grandes unidades de conservação estadual (Parque Estadual Dom Osório Stoffel, 6.421,69 ha e RPPN João Basso 3.624,57 ha). Compartilham ainda no território da bacia, duas PCHs (Ponte de Pedra, 176 MW e Rondonópolis 26,60 MW) (VICENTE, 2015).

### Dados de qualidade das águas

Os dados do monitoramento da qualidade das águas da bacia do Rio Vermelho estão divulgados nos relatórios de monitoramento da qualidade das águas da região hidrográfica do Alto Paraguai, realizada pela coordenadoria de monitoramento de qualidade ambiental, operada

pela SEMA-MT. Os dados de qualidade da água dessas estações podem ser consultados no site da ANA/HIDROWEB (ANA/HIDROWEB, 2019)<sup>2</sup>. Os dados relativos ao sistema de saneamento básico estão no Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento (SNIS, 2019),

Neste estudo, utilizou-se um conjunto de dados de quatro estações de amostragem, no período de 2006 a 2017, de periodicidade trimestral. E dados de saneamento básico dos municípios de Poxoréo, Rondonópolis e Pedra Preta dos últimos 10 anos.

### **Análise estatística multivariada**

O banco de dados foi estruturado e analisado, tendo como variáveis os 26 parâmetros de qualidade de água e como observações os meses de amostragem nas estações. A análise multivariada, análise de componentes principais (ACP) foi realizada no software R (R CORE TEAM, 2019). Para a Análise de Componentes Principais (ACP) dos dados de monitoramento de qualidade de água da bacia do Rio Vermelho, os componentes principais foram extraídos da matriz de correlação, eliminando possíveis influências em virtude das diferentes ordens de magnitude dos parâmetros de qualidade de água. Foi considerado valores acima de 0,4 para analisar a correlação entre as variáveis.

### **Construção de redes bayesianas**

Para se construir a rede Bayesiana, partiu-se do princípio de que os dados são originais, atuais e refletem o escopo do problema seguido, a partir da análise estatística multivariada das variáveis, foi selecionado as variáveis para compor a rede e foi acrescido com os conhecimentos especialistas as variáveis de saneamento básico. Usando as correlações juntamente ao especialista, foi definido as direções dos arcos. Posteriormente seguiu-se a construção da rede Bayesiana com o software NETICA, fez-se a verificação da consistência da rede Bayesiana; em seguida a compilação da árvore de junção criada a partir da rede Bayesiana; depois a propagação das evidências da rede Bayesiana a partir das informações obtidas no monitoramento; a probabilidade condicional entre um nó e seus pais foi definida pela Tabela de Probabilidade Condicional( CPT), a CPT é simplesmente uma tabela que tem uma probabilidade para todas as combinações possíveis de estados pai e filho, e por fim o cálculo das distribuições de probabilidades a posteriori.

---

<sup>2</sup> <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/apresentacao.jsf>

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 4 estão apresentados a matriz de correlação entre os Componentes Principais (CPs) e as variáveis originais (cargas dos CPs), ou seja os parâmetros que se correlacionaram com os componentes principais, e destaca-se que os valores em negrito nessa tabela, correspondem aos parâmetros que mais influenciaram o componente principal correspondente, considerando valores maiores que 0,4.

**Tabela 4.** Matriz dos pesos das variáveis nos componentes principais, autovalores, porcentagem da variância explicada e proporção acumulada pelos componentes

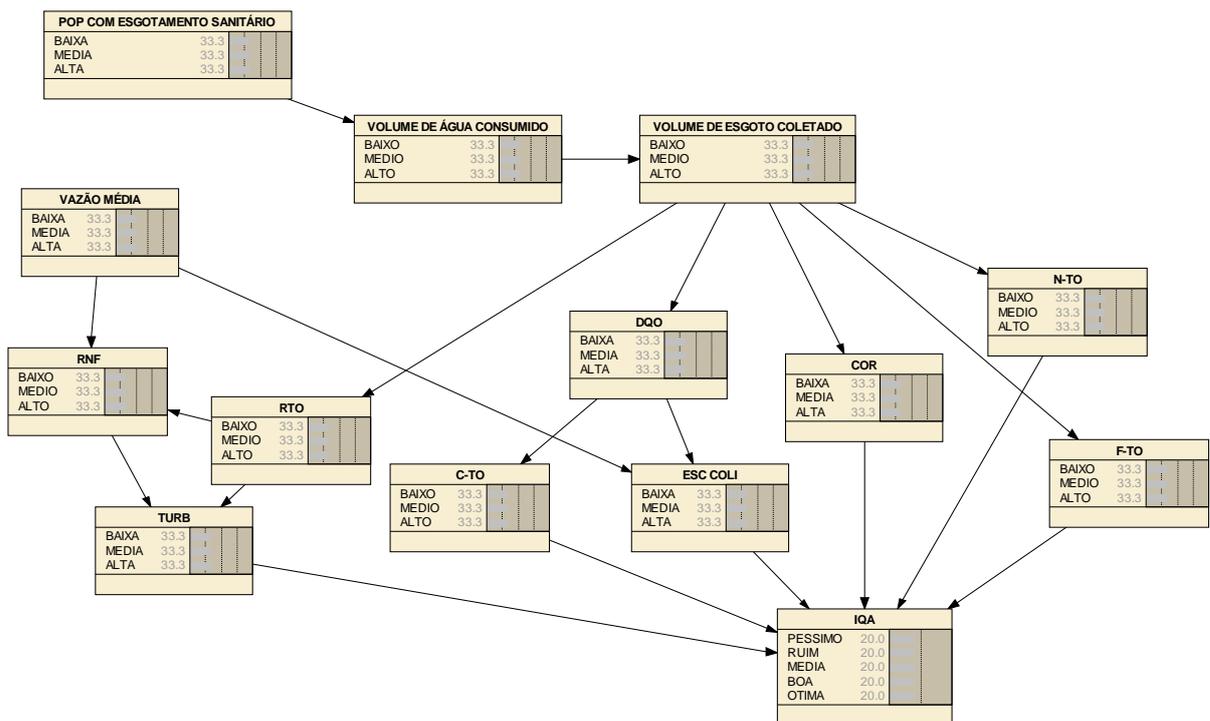
|                          | CP1          | CP2         | CP3          | CP4         | CP5          | CP6         | CP7          | CP8          |
|--------------------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|--------------|
| VMD                      | -0,39        | -0,32       | 0,07         | -0,02       | 0,06         | 0,09        | <b>0,45</b>  | -0,15        |
| COR                      | <b>-0,52</b> | 0,04        | 0,05         | 0,26        | 0,24         | 0,26        | 0,12         | 0,08         |
| COND                     | -0,09        | <b>0,65</b> | 0,10         | 0,19        | 0,16         | -0,15       | -0,25        | 0,21         |
| DQO                      | <b>-0,53</b> | 0,06        | 0,13         | 0,34        | 0,26         | <b>0,42</b> | -0,06        | -0,09        |
| N-A                      | 0,02         | 0,01        | 0,23         | <b>0,44</b> | -0,36        | -0,37       | 0,09         | -0,11        |
| N-NA                     | 0,05         | 0,03        | 0,02         | 0,49        | <b>-0,50</b> | 0,09        | 0,07         | -0,32        |
| N-TO                     | <b>-0,66</b> | -0,11       | -0,08        | 0,18        | 0,04         | -0,07       | -0,21        | 0,09         |
| CTO                      | <b>-0,61</b> | -0,11       | 0,27         | 0,27        | -0,08        | -0,09       | 0,12         | 0,28         |
| ALC                      | 0,08         | <b>0,63</b> | 0,38         | 0,13        | -0,15        | 0,01        | 0,15         | -0,10        |
| ORT                      | -0,02        | -0,19       | 0,14         | 0,33        | -0,20        | 0,12        | <b>-0,51</b> | -0,21        |
| DTO                      | -0,08        | <b>0,78</b> | 0,20         | -0,21       | -0,02        | 0,22        | 0,10         | -0,36        |
| CLO                      | <b>-0,46</b> | 0,27        | -0,20        | -0,23       | -0,16        | -0,44       | -0,16        | 0,03         |
| SUL                      | -0,36        | <b>0,75</b> | 0,20         | -0,06       | 0,18         | -0,07       | -0,12        | -0,08        |
| RNF                      | <b>-0,75</b> | 0,11        | <b>-0,41</b> | -0,25       | -0,17        | -0,03       | 0,01         | -0,11        |
| TAR                      | -0,07        | -0,31       | <b>0,58</b>  | -0,56       | -0,18        | 0,01        | -0,21        | -0,08        |
| TH2O                     | -0,30        | -0,23       | <b>0,70</b>  | -0,38       | 0,05         | -0,08       | -0,29        | -0,06        |
| OD                       | 0,33         | 0,25        | -0,18        | -0,17       | <b>-0,41</b> | <b>0,50</b> | 0,09         | 0,08         |
| E CO                     | <b>-0,56</b> | -0,21       | 0,31         | 0,07        | <b>-0,41</b> | -0,09       | 0,31         | 0,00         |
| pH                       | -0,01        | 0,21        | -0,03        | 0,11        | <b>-0,52</b> | 0,08        | -0,23        | 0,63         |
| DBO <sub>5</sub>         | -0,27        | 0,01        | 0,20         | -0,32       | -0,26        | <b>0,48</b> | 0,10         | 0,27         |
| N-NI                     | 0,26         | -0,10       | -0,18        | 0,00        | -0,35        | 0,04        | -0,30        | <b>-0,41</b> |
| FTO                      | <b>-0,44</b> | -0,21       | -0,17        | 0,19        | 0,14         | 0,37        | <b>-0,42</b> | -0,05        |
| TURB                     | <b>-0,68</b> | 0,06        | <b>-0,50</b> | -0,26       | -0,24        | -0,11       | 0,02         | -0,07        |
| RTO                      | <b>-0,84</b> | 0,07        | -0,23        | -0,20       | -0,03        | 0,04        | -0,01        | -0,12        |
| IQA                      | <b>0,87</b>  | 0,08        | -0,14        | -0,19       | -0,03        | 0,06        | -0,06        | 0,04         |
| Autovalor                | 5,21         | 2,62        | 2,00         | 1,82        | 1,60         | 1,35        | 1,26         | 1,16         |
| % Variância              | 20,86        | 10,46       | 8,01         | 7,28        | 6,39         | 5,40        | 5,03         | 4,64         |
| % Acumulada da variância | 20,86        | 31,32       | 39,33        | 46,61       | 53,00        | 58,40       | 63,44        | 68,08        |

Legenda: Legenda: VMD: Vazão Média, COR: Cor, COND: Condutividade, DQO: Demanda química de Oxigênio, N-A: Nitrogênio Amoniacal, N-NI: N-NA: Nitrogênio Nitrato; N-TO: Nitrogênio Total, CTO: Coliformes Totais, ALC: Alcalidade, ORT: Ortofosfato, DTO: Dureza Total, CLO: Cloreto, SULF: Sulfato, RNF: Resíduo Não Filtrável, TAR: Temperatura do Ar, TH2O: Temperatura da Água, OD: Oxigênio Dissolvido, E CO: Escherichia coli, pH: pH, DBO: Demanda Bioquímica de Oxigênio, Nitrogênio Nitrito, FTO: Fósforo Total, TURB: Turbidez, RTO: Resíduo Total, IQA: Índice de Qualidade das Águas.

O APÊNDICE A apresenta os resultados para as matrizes de correlação para os parâmetros de qualidade das águas.

## Rede 1

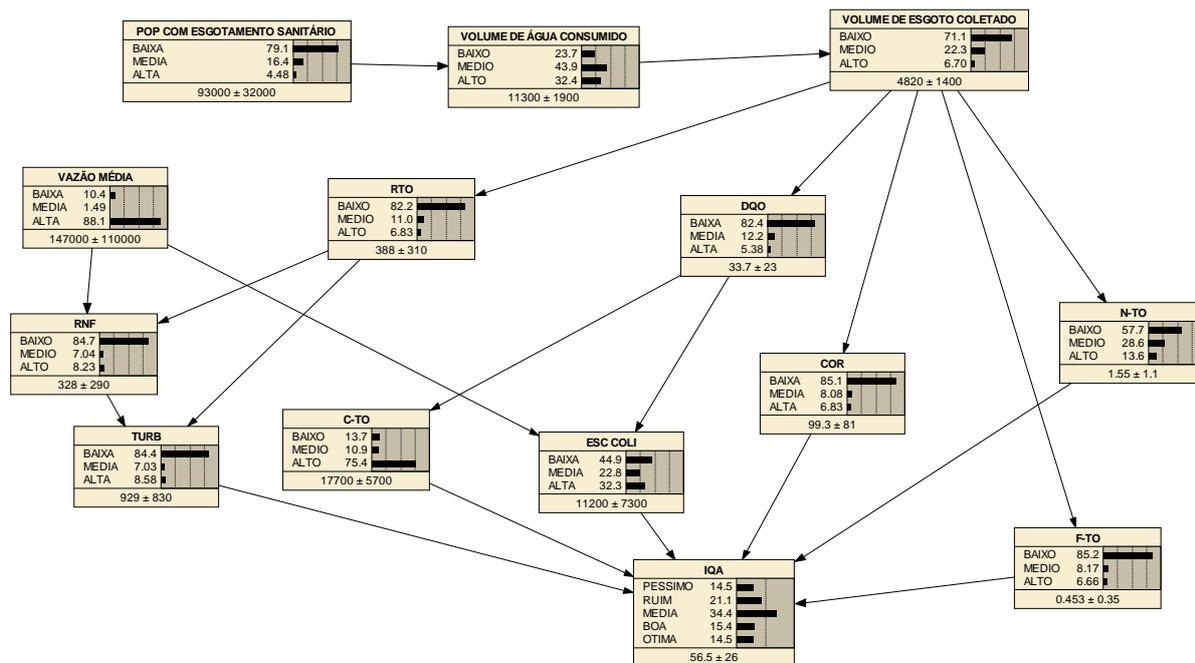
A estrutura da Rede Bayesiana 1 foi construída através da matriz de correlação entre as variáveis e acrescido as variáveis de saneamento básico, supervisionada por conhecimentos especialistas. A Figura 6 apresenta o desenho da estrutura da Rede 1 construída no software NETICA,



**Figura 6.** Rede 1: Rede Bayesiana modelada no software NETICA para o problema da gestão da qualidade da água da bacia do Rio Vermelho

## Rondonópolis

A Figura 7 apresenta a estrutura de Rede 1 após a compilação da CPT, dos dados referentes as duas estações de amostragem que compreendem o município de Rondonópolis

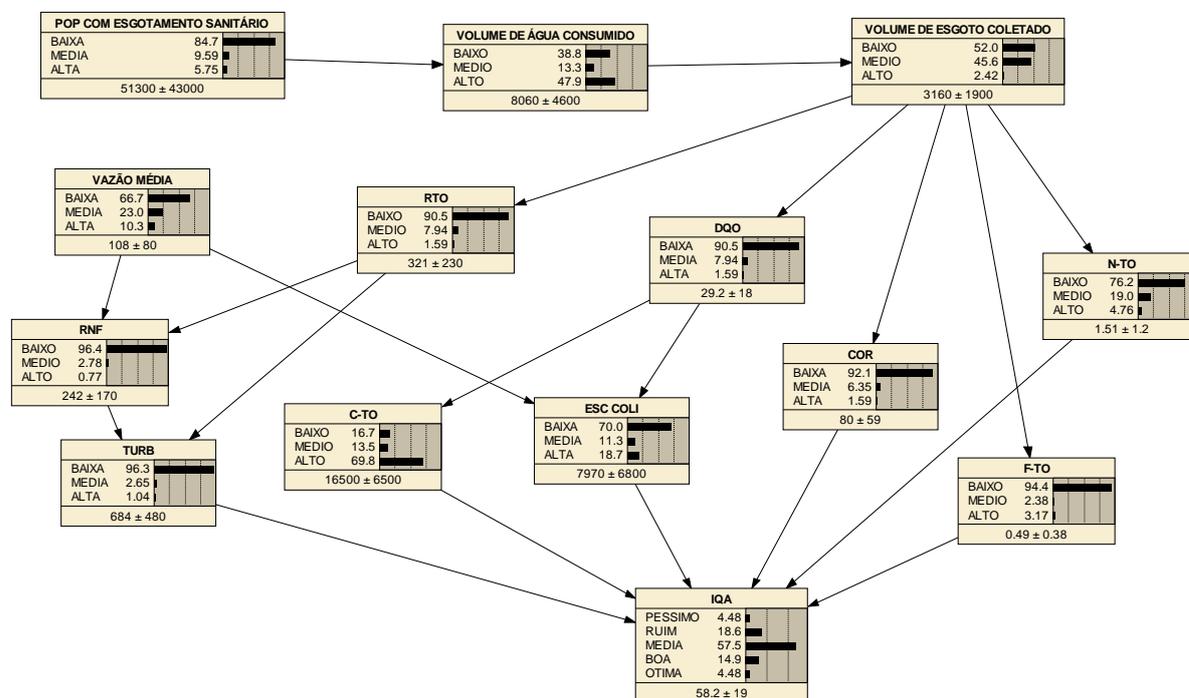


**Figura 7.** Rede 1: Rede Bayesiana modelada no software NETICA para o problema da gestão da qualidade da água da bacia do Rio Vermelho

Simulando um cenário de volume de água consumido alto observa-se a tendência do Índice de Qualidade das Águas (IQA) a classificação média 21,08% seguido de ruim 21,8% (APÊNDICE B). Outra simulação é considerando o volume de esgoto alto, nota-se que coliformes totais tendem a alto 66,2%, volume de água consumido alto 58,0% e o IQA tende a médio/ruim 21,8% e 21,1% (APÊNDICE C). Tendo uma alta Turbidez observa-se a tendência de coliformes totais a alto 74,8%, fosforo total baixo 56,9% e um IQA tendendo a ruim 20,7% (APÊNDICE D). No cenário de nitrogênio total baixo, a Demanda Química de Oxigênio (DQO) tende a baixa 83,9%, volume de esgoto coletado baixo 77,2%, fosforo total baixo 86,9%, coliformes totais alto 75,6% e IQA média 43,9% (APÊNDICE E). Um último cenário é a simulação do IQA ótimo, o mesmo é possível em condições de população com esgotamento sanitário baixa 78,1%, volume de água consumido médio 42,2%, volume de esgoto coletado baixo 67,3%, vazão média alta 87,6% resíduo total baixo 79,1%, resíduo não filtrável baixo 81,2% e turbidez baixa 78,6% (APÊNDICE F),

## Bacia do Rio Vermelho

A Figura 8 apresenta a estrutura de Rede 1 após a compilação da CPT, dos dados referentes as quatro estações de amostragem que compreendem a Bacia do Rio Vermelho, usando ao dados de saneamento dos municípios de Poxoréo, Rondonópolis e Pedra Preta,



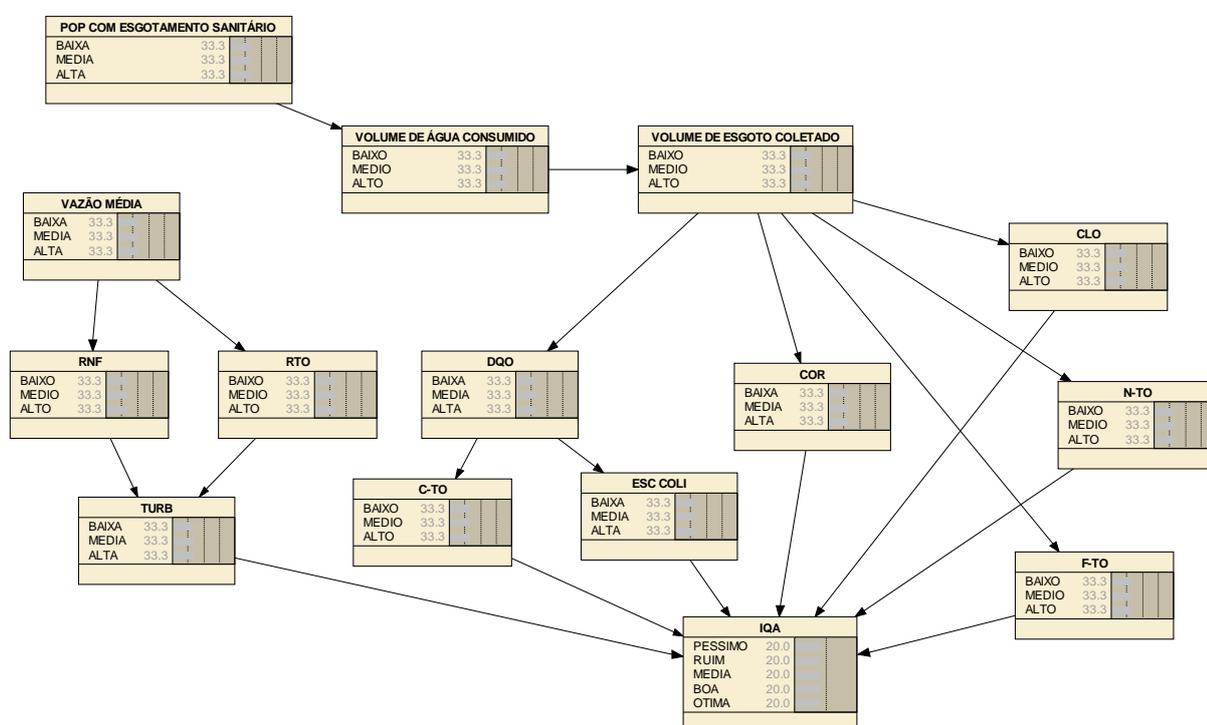
**Figura 8.** Rede 1: Rede Bayesiana modelada no software NETICA para o problema da gestão da qualidade da água da bacia do Rio Vermelho

Simulando volume de esgoto coletado alto temos coliformes totais alto 88,6%, Escherichia coli alta 55,5%, IQA ruim 41,4% (APÊNDICE G). Tendo turbidez alta, temos resíduo não filtrável alto 74,0%, resíduo total alto 100%, volume de esgoto coletado médio 70,8% e IQA ruim 21,6% (APÊNDICE H). Diante de vazão média baixa, resíduo total alto, resíduo não filtrável alto e turbidez média, temos volume de esgoto coletado médio 100%, volume de água consumido alto 70,9% e IQA ruim 27,7% (APÊNDICE I). Outra simulação onde volume de esgoto coletado alto, Escherichia coli alto e coliformes totais alto, o resultado é vazão média baixa 86,9%, volume de água consumido alto 100% e IQA ruim 41,9% (APÊNDICE J). Por fim para se ter um IQA ótimo, ou seja ideal dentro de um corpo hídrico, é possível mediante, população com esgotamento sanitário baixa 82,5%, volume de esgoto

coletado médio 53,3%, resíduo não filtrável baixo 90,5%, resíduo total baixo 80,9%, turbidez baixa 84,6% (APÊNDICE K),

## Rede 2

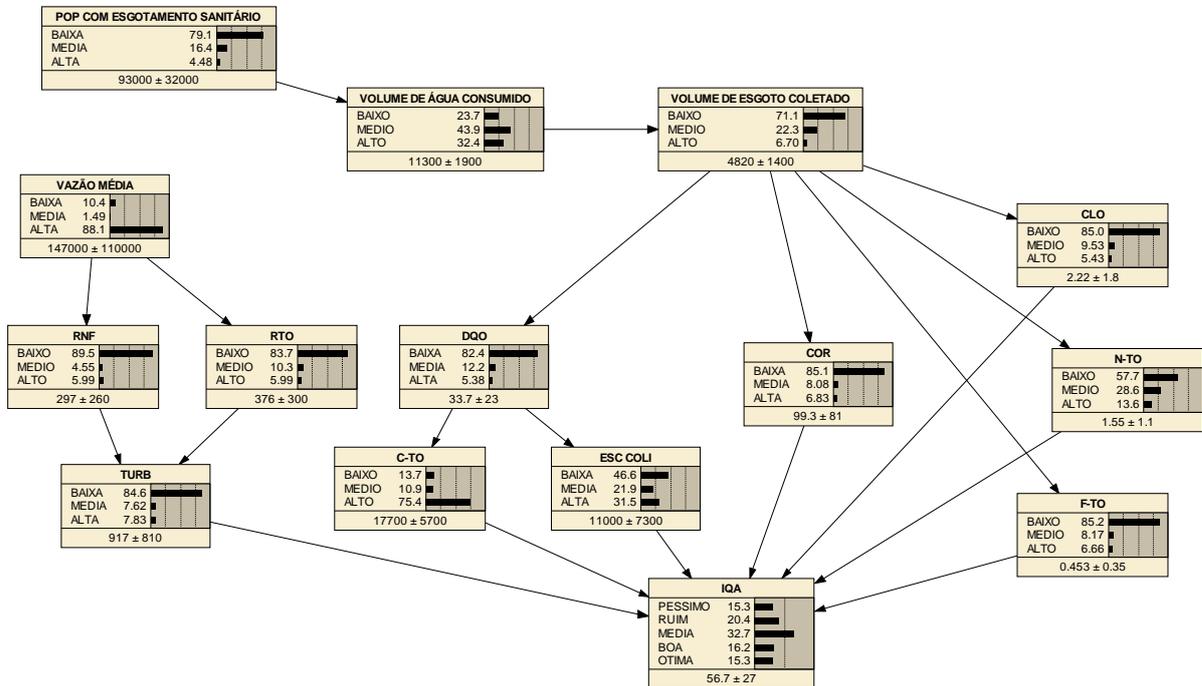
Para a construção da Rede Bayesiana 2 utilizou-se apenas o CP1 que é responsável por 20,86% da variância dos dados. O primeiro Componente Principal (CP1) é a combinação das variáveis que exhibe a variância máxima, ou seja, explica o máximo possível de informações contidas (LATTIN et al., 2011). As variáveis com cargas mais altas são consideradas mais importantes e têm maior influência sobre o CP, São variáveis que neste caso, podem ser classificadas como singulares face a alta importância para a variância. A Figura 9 apresenta a estrutura da Rede Bayesiana construída no software NETICA através do CP1 e dos dados de saneamento juntamente aos conhecimentos especialistas,



**Figura 9.** Rede 2: Rede Bayesiana modelada no software NETICA para o problema da gestão da qualidade da água da bacia do Rio Vermelho

## Rondonópolis

A Figura 10 apresenta a estrutura de Rede 2 após a compilação da CPT, dos dados referentes as duas estações de amostragem que compreendem o município de Rondonópolis,

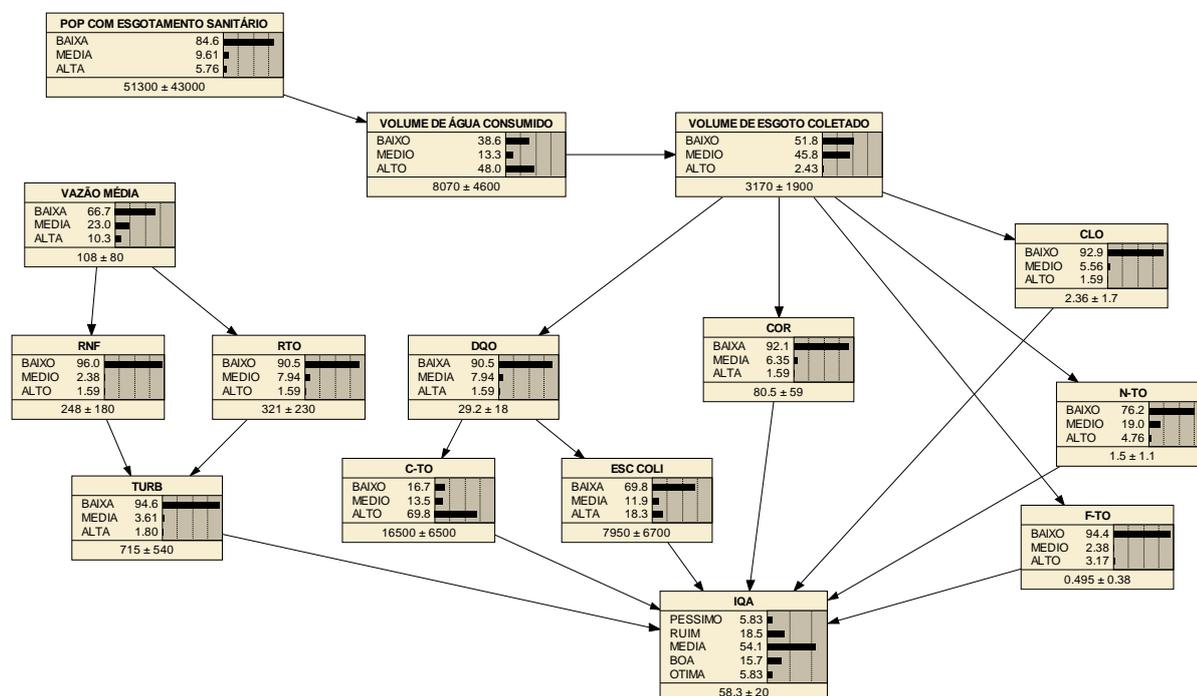


**Figura 10.** Rede 2: Rede Bayesiana modelada no software NETICA para o problema da gestão da qualidade da água da bacia do Rio Vermelho

Configurando a Rede Bayesiana 2 com volume de esgoto coletado alto, nota-se a nova configuração onde temos volume de água consumido alto 58,0%, coliformes totais alto 66,2% e IQA média 21,3% (APÊNDICE L). Simulando nitrogênio total alto, a rede responde com coliformes totais alto 75,0%, DQO baixa 80,1%, vazão média alta 88,1% e IQA ruim 25,0% (APÊNDICE M). Por seguinte a condição para se ter índice de qualidade ótimo é median te volume de esgoto coletado baixo 67,6%, população com esgotamento sanitário baixa 78,2%, Escherichia coli baixa 44,4% e vazão média alta 87,5% (APÊNDICE N),

## Bacia do Rio Vermelho

A Figura 11 apresenta a estrutura de Rede 1 após a compilação da CPT, dos dados referentes as quatro estações de amostragem que compreendem a Bacia do Rio Vermelho, usando os dados de saneamento dos municípios de Poxoréo, Rondonópolis e Pedra Preta,



**Figura 11.** Rede 2: Rede Bayesiana modelada no software NETICA para o problema da gestão da qualidade da água da bacia do Rio Vermelho

Configurando a Rede Bayesiana 2 com volume de esgoto coletado alto, temos volume de água consumido alto 100%, coliformes totais alto 88,5%, fósforo total médio 65,4%, cloreto baixo 100%, DQO alta 65,4% e vazão média baixa 66,7% e IQA ruim 44,5% (APÊNDICE O). Simulando resíduo não filtrável, resíduo total e turbidez alto, a rede se configura com volume de esgoto médio 44,8%, coliformes totais alto 69,8%, volume de água consumido alto 48,0% e IQA ruim 21,5% (APÊNDICE P). Outra configuração é com nitrogênio total alto, as condições para tal simulação são coliformes totais alto 73,0%, turbidez baixa 94,6%, volume de esgoto coletado médio 55,0%, fósforo total baixo 84,9%, volume de água consumido alto 62,8% e IQA ruim 26,8% (APÊNDICE Q). Aumentando fósforo total para alto temos volume de água consumido alto 70,8%, volume de esgoto coletado médio 100%, nitrogênio total baixo 75,5%, coliformes totais alto 70,7%, turbidez baixa 94,6% e IQA média 29,7% (APÊNDICE R). Construindo um cenário com DQO, coliformes totais e Escherichia coli alto a rede se comporta

com, volume de água consumido e esgoto coletado alto 100%, cor média 66,8% e IQA ruim 42,4% (APÊNDICE S). Dentro desta configuração de rede as condições para se ter um IQA ótimo, ou seja ideal para o objeto de estudo a bacia hidrográfica do Rio Vermelho seria nas condições de população com esgotamento sanitário baixa 83,7%, volume de água consumido alto 51,1%, volume de esgoto coletado baixo 46,8%, *Escherichia coli* baixa 53,3%, resíduo não filtrável baixo 90,0% e resíduo total baixo 85,8% (APÊNDICE T),

## CONCLUSÕES

Conclui-se que a construção da rede Bayesiana em uma bacia hidrográfica para fins de diagnóstico e gestão permite fazer a combinação de observações de especialistas com o comportamento histórico da bacia hidrográfica. A aplicação da abordagem probabilística da rede Bayesiana na bacia hidrográfica demonstrou-se uma ferramenta política e interdisciplinar para avaliar os níveis de impactos dos efluentes tratados e não tratados na qualidade da água, bem como pode subsidiar em estudos posteriores a simulação de cenários de perigos futuros.

## REFERÊNCIAS

ANA/HIDROWEB - Agência Nacional de Águas. **Séries Históricas de Estações**. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br>>. Acesso em: 05 de jan. de 2019.

BEVILACQUA, A. F. A bacia hidrográfica como unidade territorial de Planejamento e desenvolvimento sustentável. In: VI Encontro Nacional da ANPPAS. Anais... Belém, 2012.

CAMPAGNOLI, F.; TUNDISI, J. G. Desafios na gestão de reservatórios de hidrelétricas no Brasil. In: CAMPOGNOLI, F.; DINIZ, N. C. (Org.) Gestão de reservatório de hidrelétricas. São Paulo: **Oficina de Textos**, 2012. p.175-82.

DAWSEY, W.J; MINSKER, B; S.; VANBLARICUM, V. L.. J. Bayesian Belief Networks to Integrate Monitoring Evidence of Water Distribution System Contamination. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v.132, n. 4, p.132-234, 2006.  
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2006\)132:4\(234\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2006)132:4(234))

DEL REY, A.; ZWICKER, R. Reduzindo incertezas na interpretação de sinais fracos: a utilização de redes bayesianas na análise ambiental para o planejamento estratégico. Anais e Resumos do 7º Congresso Internacional de Gestão de Tecnologia e Sistemas de Informação, Maio 2010.

FELIPE, V. P.; SILVA, M. A.; VALENTE, B. D.; ROSA, G. J. Using multiple regression, Bayesian networks and artificial neural networks for prediction of total egg production in European quails based on earlier expressed phenotypes. **Poultry science**, v. 94, n. 4, p. 210-217, 2015.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Panorama Rondonópolis**. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mt/rondonopolis/panorama>>. Acesso em: 05 de fev. de 2018.

LATTIN, J.; CARROLL, J. D.; GREEN, P. E. Análise de dados multivariados. São Paulo: **Cengage Learning**, p. 455, 2011.

LOUCKS, D. P.; VAN BEEK, E. Water Resource Systems Planning and Management. **Springer**, Cham 2017. DOI 10.1007/978-3-319-44234-1\_1

MARQUES, R. L.; DUTRA, I. N. Ê. S. Redes Bayesianas: o que são, para que servem, algoritmos e exemplos de aplicações. Rio de Janeiro: **Coppe Sistemas**; UFRJ, 2002.

MOURA, L. H. A.; BOAVENTURA, G. S.; PINELLI, M.P. A qualidade de água como indicador de uso e ocupação do solo: Bacia do Gama – Distrito Federal. **Química Nova**, v. 33, n. 1, 2010, p. 97-103.

PEAR, J. Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems: Network of Plausible Inference, Morgan Kaufmann, San Mateo, California, USA. 1988.

PIKE, W. A. Modeling drinking water quality: Violations with Bayesian networks. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 40, n. 6, p. 1563-1578. 2004. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2004.tb01606.x>

R Core Team (2019). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO - SNIS. **Série Histórica**. Disponível em: <<http://app4.cidades.gov.br/serieHistorica/>> Acesso em: 05 de Mai. De 2019.

SOUZA, A. V. V. Influência dos usos e ocupação do solo na qualidade da água do rio Vermelho no sudeste de Mato Grosso. 2015 80 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Geografia) – Universidade Federal de Mato Grosso, Rondonópolis – MT, 2015.

SOUZA, A. V. V.; LOVERDE-OLIVEIRA, S. M. Análise da qualidade da água do Rio Vermelho em Mato Grosso: no período de cheia no ano de 2014. **Biodiversidade**, v.13, n 2, 2014. 115-126 p.

TAKENAKA, E. M. M.; CRUZ, M. F. C.; CRUZ, E. M. K. Tratamento de água e esgoto: estudo de caso em um município do interior paulista. **Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades**, v. 03, n. 17, 2015, p. 162-175.

VICENTE, T.C. gestão integrada de áreas protegidas: o potencial de Implantação do corredor ecológico cerrado/pantanal na bacia do Rio Vermelho/São Lourenço – MT. 2015 112f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Geografia) – Universidade Federal de Mato Grosso, Rondonópolis – MT, 2015.

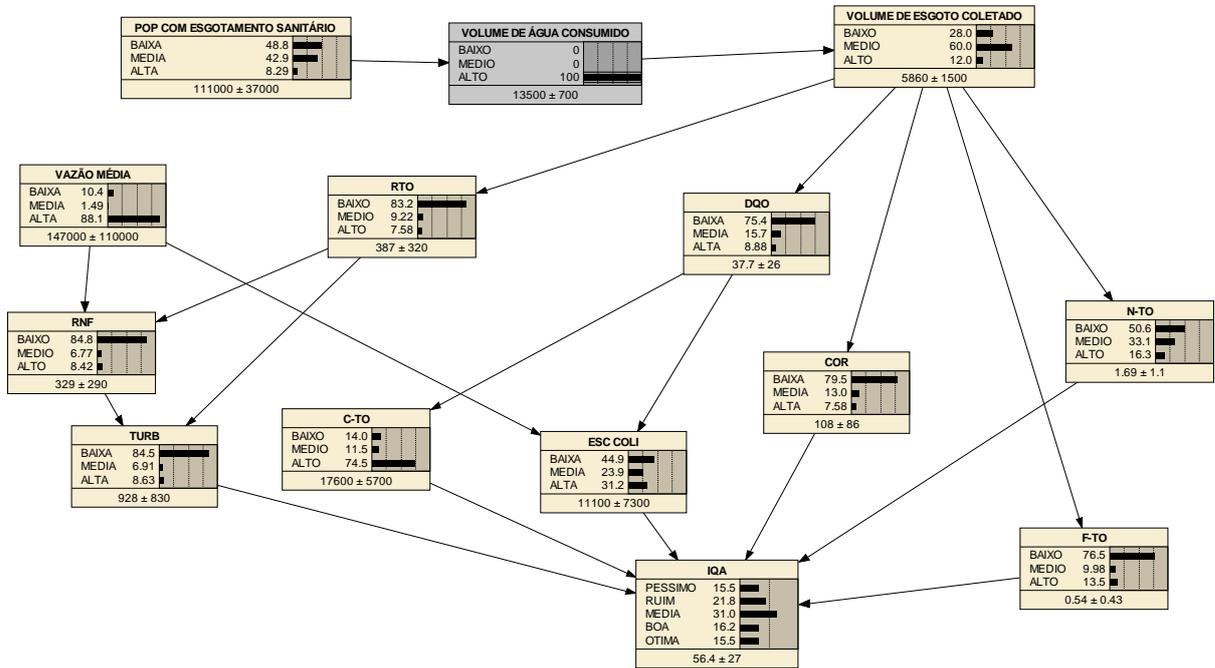
ZOU, X.; YUE, W.L. A bayesian network approach to causation analysis of road accidents using netica. **Journal of Advanced Transportation**, v. 2017, p. 18, 2017.  
<https://doi.org/10.1155/2017/2525481>

## APÊNDICES

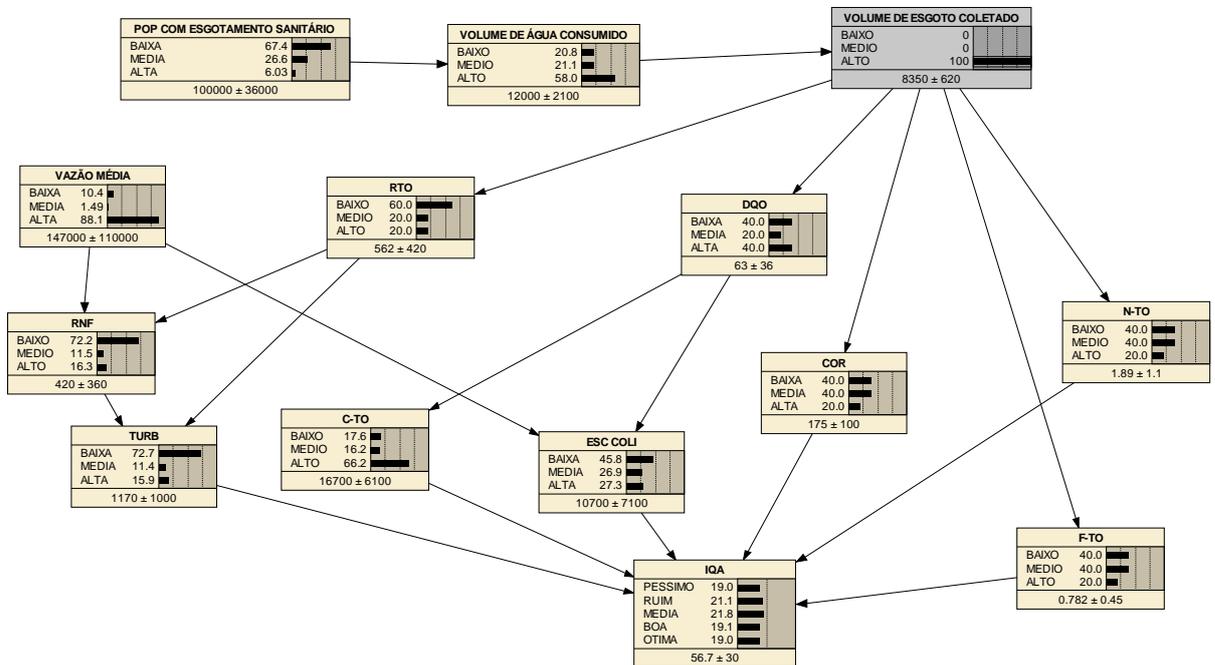
### APÊNDICE A. Matriz de correlação dos parâmetros de qualidade da água da Bacia do Rio Vermelho,

|      | VMD   | COR   | COND  | DQO   | N,A   | N,NI  | N,TO  | CTO   | ALC   | ORT   | DTO   | CLO   | SULF  | RNF   | TAR   | TH2O  | OD    | E,CO  | pH    | DBO   | N,NA  | FTO   | TURB  | RTO   | IQA  |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| VMD  | 1,00  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |
| COR  | 0,32  | 1,00  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |
| COND | -0,12 | 0,29  | 1,00  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |
| DQO  | 0,14  | 0,43  | 0,17  | 1,00  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |
| N,A  | 0,01  | 0,09  | 0,13  | 0,18  | 1,00  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |
| N,NI | 0,11  | 0,37  | 0,21  | 0,23  | 0,35  | 1,00  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |
| N,TO | 0,08  | 0,35  | 0,16  | 0,41  | 0,11  | 0,26  | 1,00  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |
| CTO  | 0,33  | 0,30  | 0,10  | 0,44  | 0,26  | 0,18  | 0,42  | 1,00  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |
| ALC  | -0,18 | -0,09 | 0,39  | 0,00  | 0,21  | 0,04  | -0,11 | 0,11  | 1,00  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |
| ORT  | 0,13  | -0,01 | 0,09  | 0,18  | 0,22  | 0,38  | 0,19  | 0,19  | -0,09 | 1,00  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |
| DTO  | -0,06 | 0,15  | 0,10  | 0,16  | -0,03 | -0,10 | -0,09 | 0,00  | 0,40  | -0,26 | 1,00  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |
| CLO  | 0,12  | 0,34  | 0,23  | 0,11  | -0,05 | 0,10  | 0,26  | 0,21  | -0,01 | 0,03  | 0,00  | 1,00  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |
| SULF | 0,01  | 0,50  | 0,39  | 0,44  | 0,10  | -0,01 | 0,19  | 0,21  | 0,15  | -0,11 | 0,45  | 0,25  | 1,00  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |
| RNF  | 0,40  | 0,62  | 0,22  | 0,44  | -0,12 | 0,16  | 0,43  | 0,40  | -0,02 | 0,16  | 0,19  | 0,36  | 0,41  | 1,00  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |
| TAR  | 0,10  | -0,07 | -0,23 | -0,11 | -0,10 | -0,26 | -0,08 | 0,14  | -0,07 | -0,02 | 0,02  | 0,16  | 0,00  | 0,07  | 1,00  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |
| TH2O | 0,15  | 0,19  | 0,03  | 0,17  | 0,02  | -0,16 | 0,21  | 0,34  | -0,06 | 0,10  | 0,03  | 0,21  | 0,26  | 0,34  | 0,68  | 1,00  |       |       |       |       |       |       |       |       |      |
| OD   | -0,15 | -0,15 | -0,24 | -0,22 | -0,23 | 0,00  | -0,05 | -0,22 | 0,02  | -0,13 | 0,27  | -0,11 | -0,06 | -0,17 | -0,12 | -0,32 | 1,00  |       |       |       |       |       |       |       |      |
| E,CO | 0,53  | 0,35  | 0,13  | 0,41  | 0,25  | 0,22  | 0,41  | 0,70  | 0,10  | 0,26  | 0,08  | 0,34  | 0,19  | 0,46  | 0,11  | 0,31  | -0,23 | 1,00  |       |       |       |       |       |       |      |
| pH   | -0,21 | -0,02 | 0,19  | -0,03 | 0,04  | 0,27  | 0,09  | 0,04  | 0,19  | 0,13  | -0,11 | 0,18  | -0,05 | -0,02 | 0,01  | -0,06 | 0,16  | 0,02  | 1,00  |       |       |       |       |       |      |
| DBO  | 0,17  | 0,08  | -0,01 | 0,18  | -0,15 | -0,08 | -0,01 | 0,20  | -0,09 | -0,05 | 0,17  | 0,10  | 0,16  | 0,23  | 0,22  | 0,20  | 0,00  | 0,26  | 0,04  | 1,00  |       |       |       |       |      |
| N,NA | 0,15  | -0,21 | 0,01  | -0,05 | -0,12 | 0,14  | 0,03  | -0,03 | 0,00  | 0,24  | -0,04 | 0,14  | -0,19 | -0,03 | 0,04  | -0,09 | 0,16  | 0,11  | 0,14  | -0,06 | 1,00  |       |       |       |      |
| FTO  | 0,24  | 0,32  | 0,10  | 0,38  | 0,00  | 0,34  | 0,40  | 0,29  | -0,08 | 0,39  | -0,15 | 0,23  | 0,18  | 0,55  | -0,12 | 0,02  | 0,03  | 0,40  | 0,08  | 0,16  | 0,17  | 1,00  |       |       |      |
| TURB | 0,25  | 0,66  | 0,35  | 0,47  | 0,09  | 0,36  | 0,53  | 0,37  | 0,06  | 0,13  | 0,18  | 0,32  | 0,47  | 0,76  | -0,09 | 0,25  | -0,18 | 0,42  | 0,03  | 0,07  | -0,15 | 0,40  | 1,00  |       |      |
| RTO  | 0,28  | 0,56  | 0,21  | 0,47  | -0,03 | 0,09  | 0,39  | 0,38  | -0,03 | 0,11  | 0,27  | 0,29  | 0,50  | 0,82  | 0,05  | 0,26  | -0,22 | 0,43  | -0,15 | 0,27  | -0,09 | 0,48  | 0,63  | 1,00  |      |
| IQA  | -0,39 | -0,54 | -0,28 | -0,54 | -0,19 | -0,35 | -0,53 | -0,61 | 0,00  | -0,30 | -0,06 | -0,37 | -0,37 | -0,68 | 0,00  | -0,30 | 0,37  | -0,76 | 0,05  | -0,23 | -0,01 | -0,58 | -0,68 | -0,63 | 1,00 |

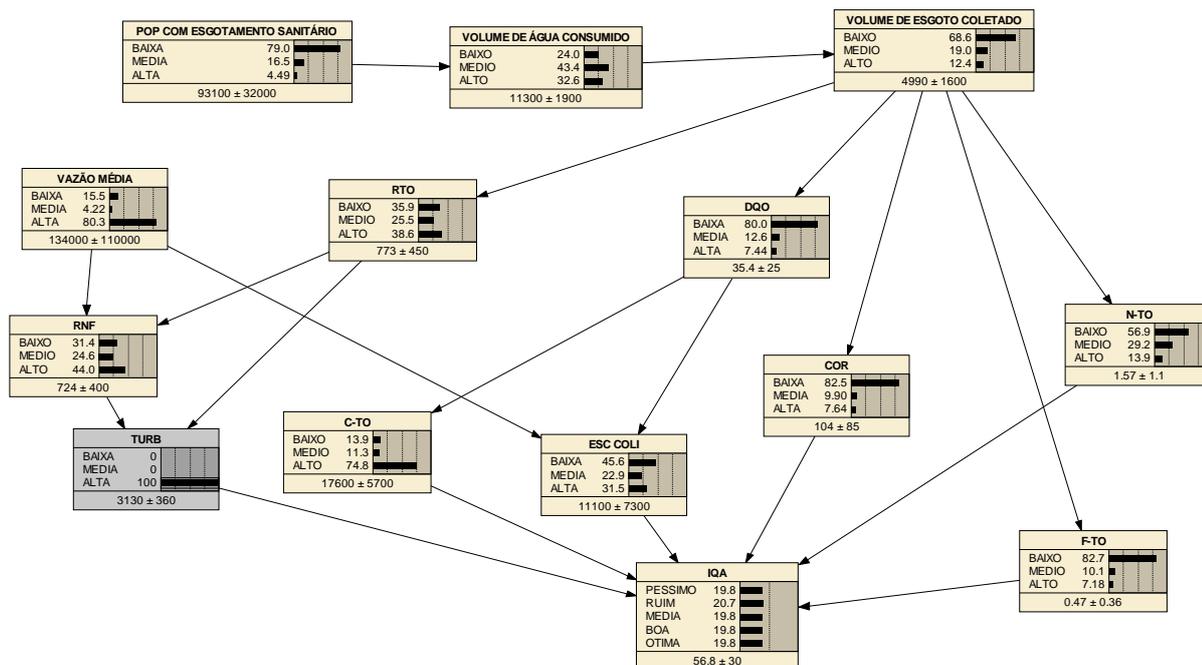
**APÊNDICE B .** Configuração da Rede Bayesiana 1 simulando volume de água consumido alto modelada no software NETICA para o problema da gestão da qualidade da água da bacia do Rio Vermelho



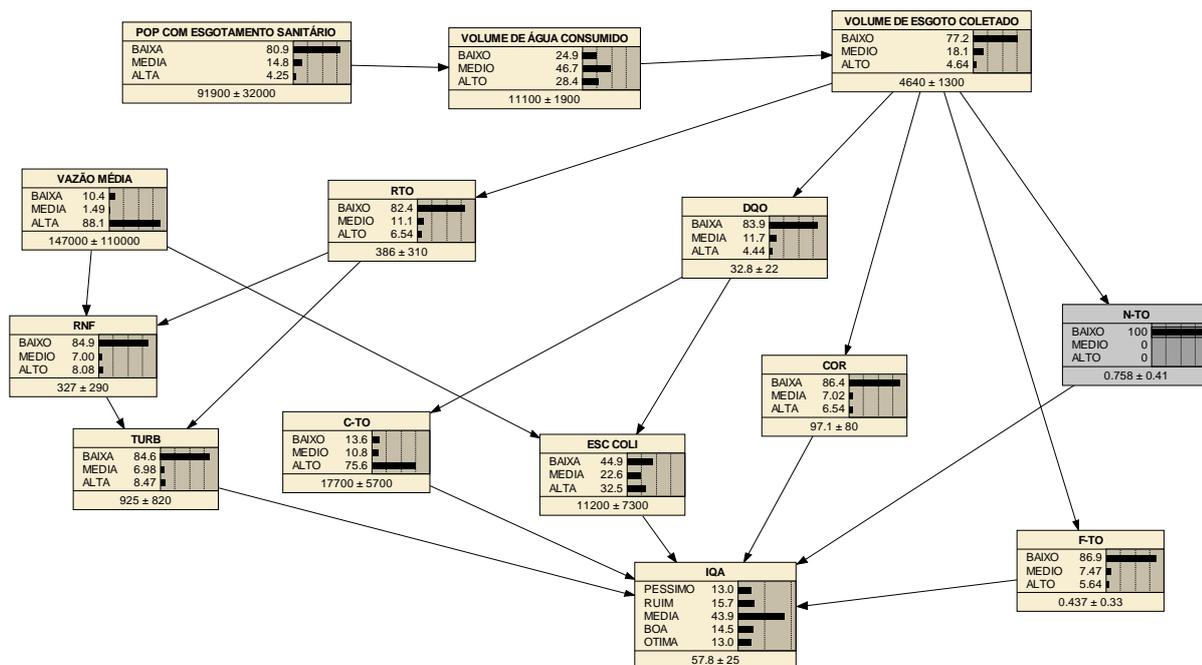
**APÊNDICE C.** Configuração da Rede Bayesiana 1 simulando volume de esgoto coletado alto modelada no software NETICA para o problema da gestão da qualidade da água da bacia do Rio Vermelho



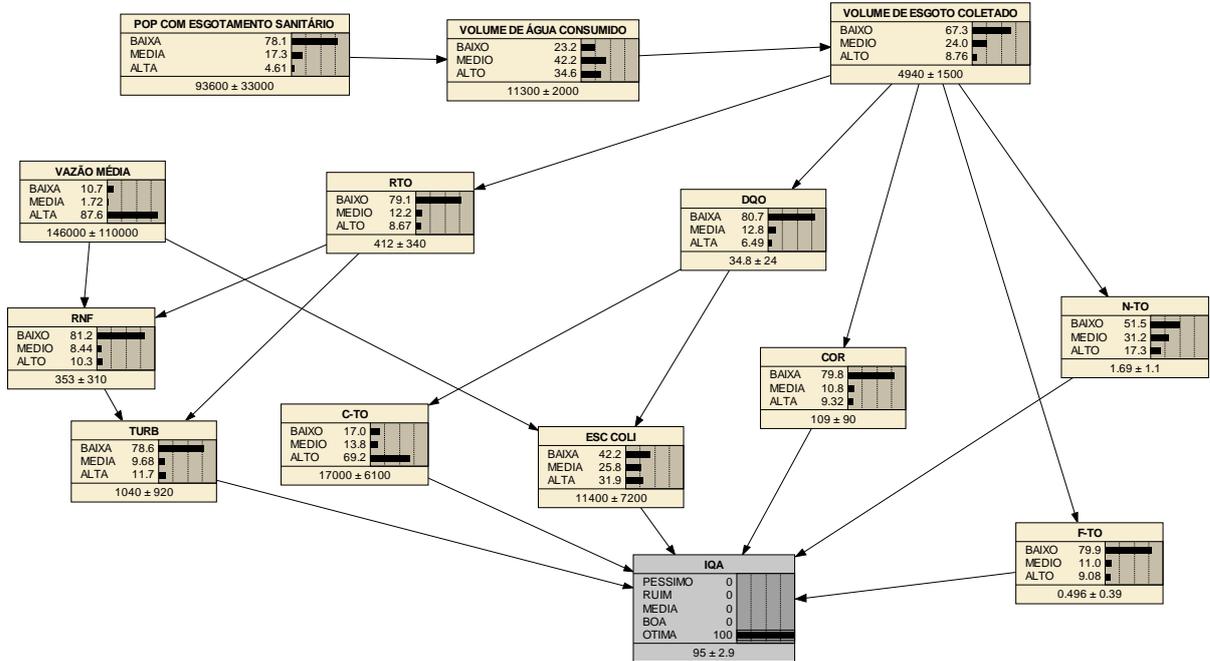
**APÊNDICE D.** Configuração da Rede Bayesiana 1 simulando turbidez alta modelada no software NETICA para o problema da gestão da qualidade da água da bacia do Rio Vermelho



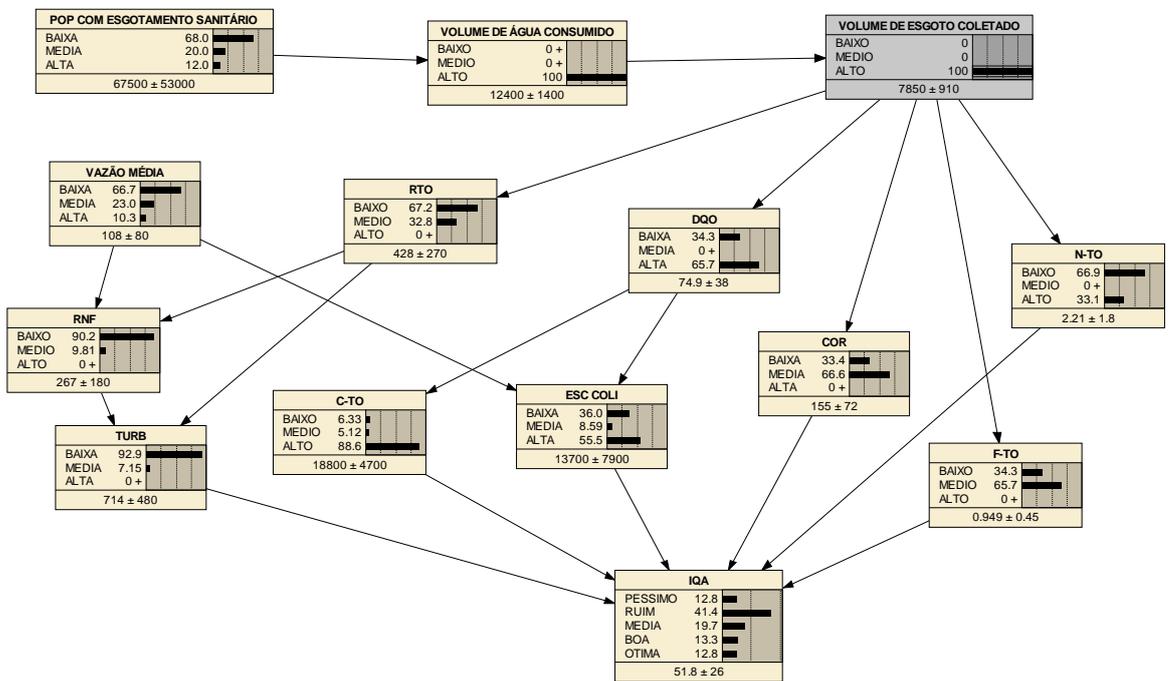
**APÊNDICE E.** Configuração da Rede Bayesiana 1 simulando nitrogênio total baixo modelada no software NETICA para o problema da gestão da qualidade da água da bacia do Rio Vermelho



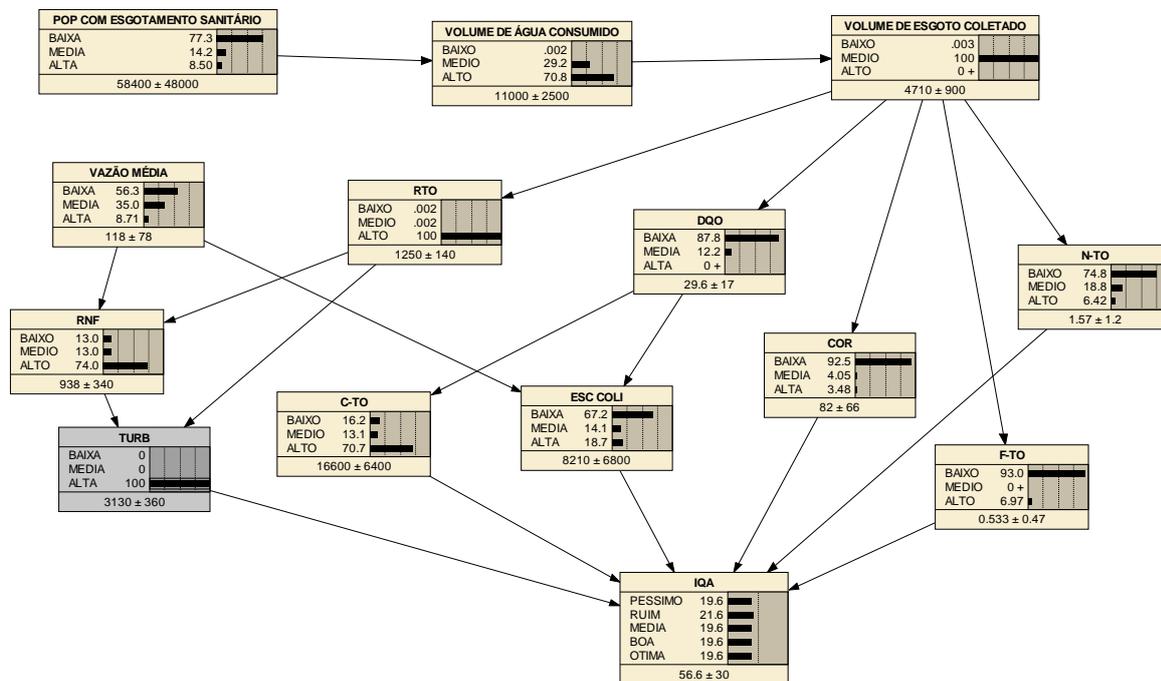
**APÊNDICE F.** Configuração da Rede Bayesiana 1 simulando índice de qualidade da água ótimo modelada no software NETICA para o problema da gestão da qualidade da água da bacia do Rio Vermelho



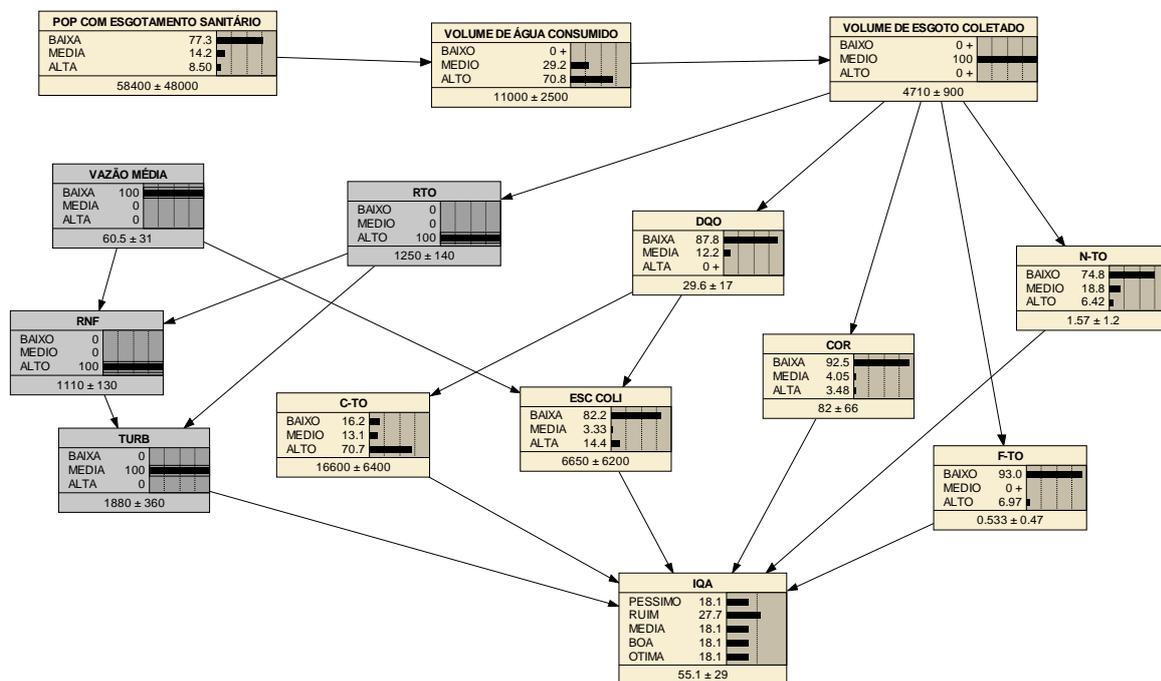
**APÊNDICE G.** Configuração da Rede Bayesiana 1 simulando volume de esgoto alto modelada no software NETICA para o problema da gestão da qualidade da água da bacia do Rio Vermelho



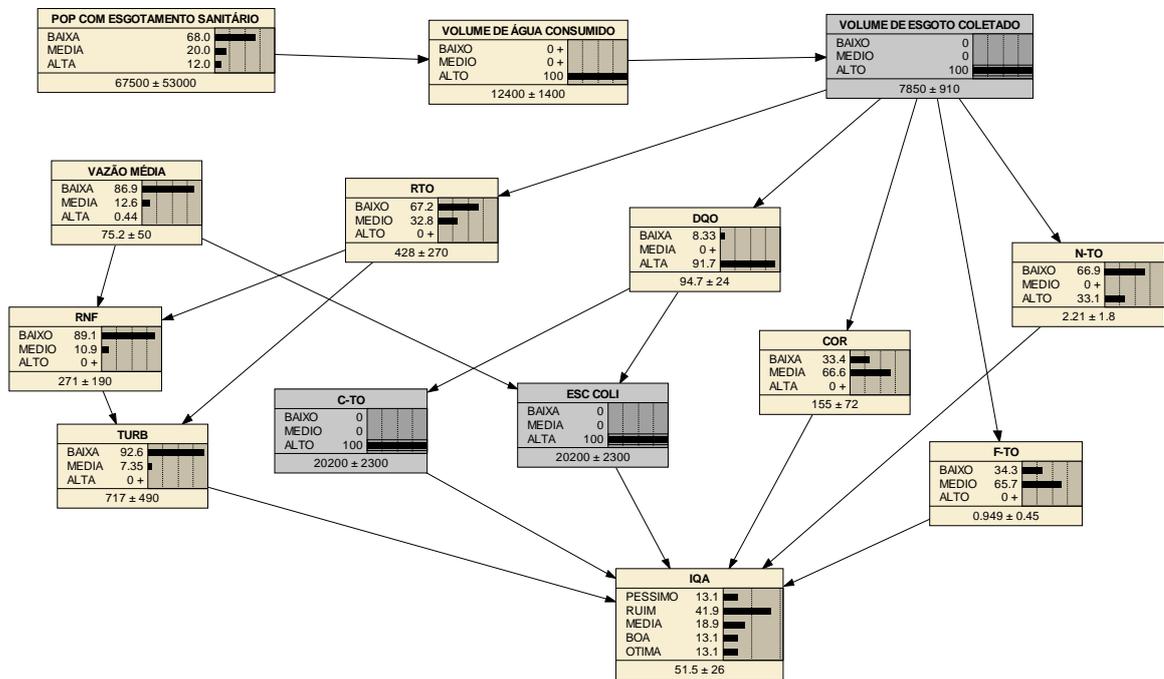
**APÊNDICE H.** Configuração da Rede Bayesiana 1 simulando turbidez alto modelada no software NETICA para o problema da gestão da qualidade da água da bacia do Rio Vermelho



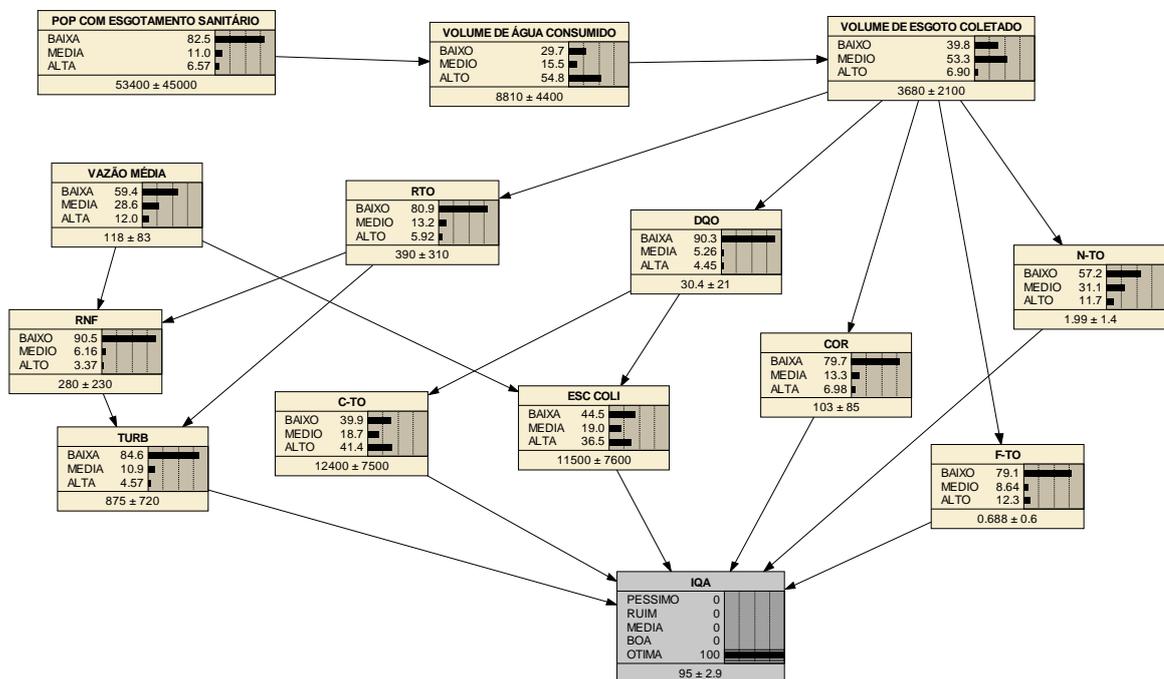
**APÊNDICE I.** Configuração da Rede Bayesiana 1 simulando vazão média baixa, resíduo total alto, resíduo não filtrável alto e turbidez média modelada no software NETICA para o problema da gestão da qualidade da água da bacia do Rio Vermelho



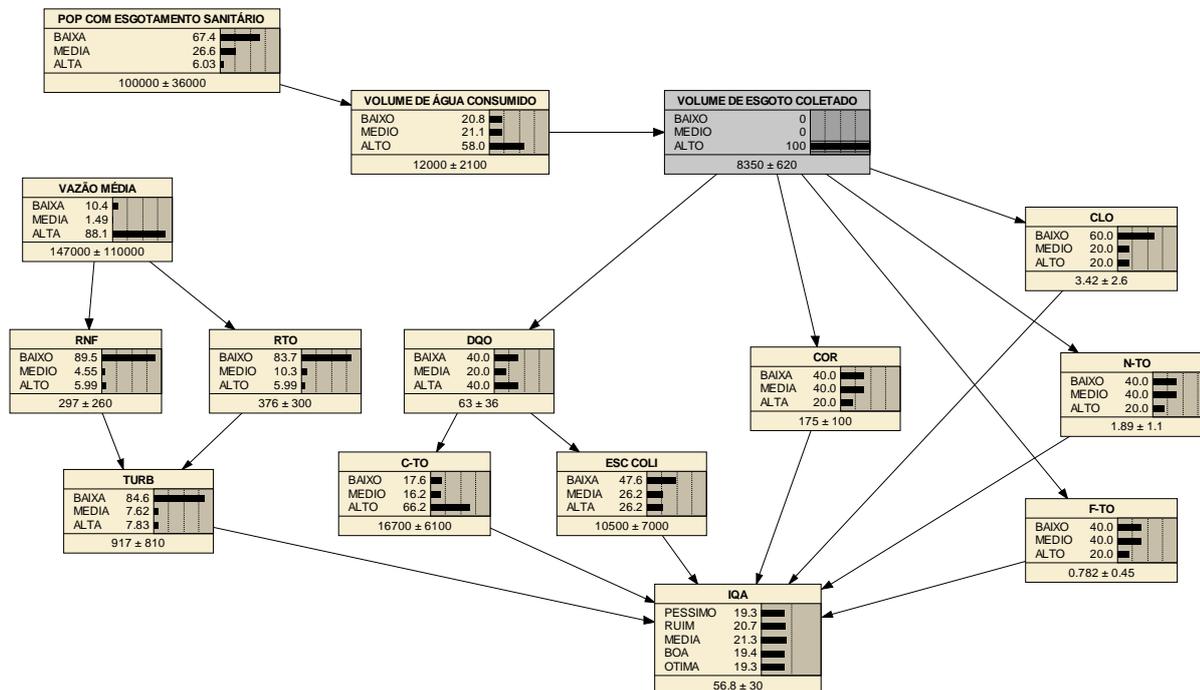
**APÊNDICE J.** Configuração da Rede Bayesiana 1 simulando Volume de esgoto coletado alto, Escherichia coli alto e coliformes totais alto modelada no software NETICA para o problema da gestão da qualidade da água da bacia do Rio Vermelho



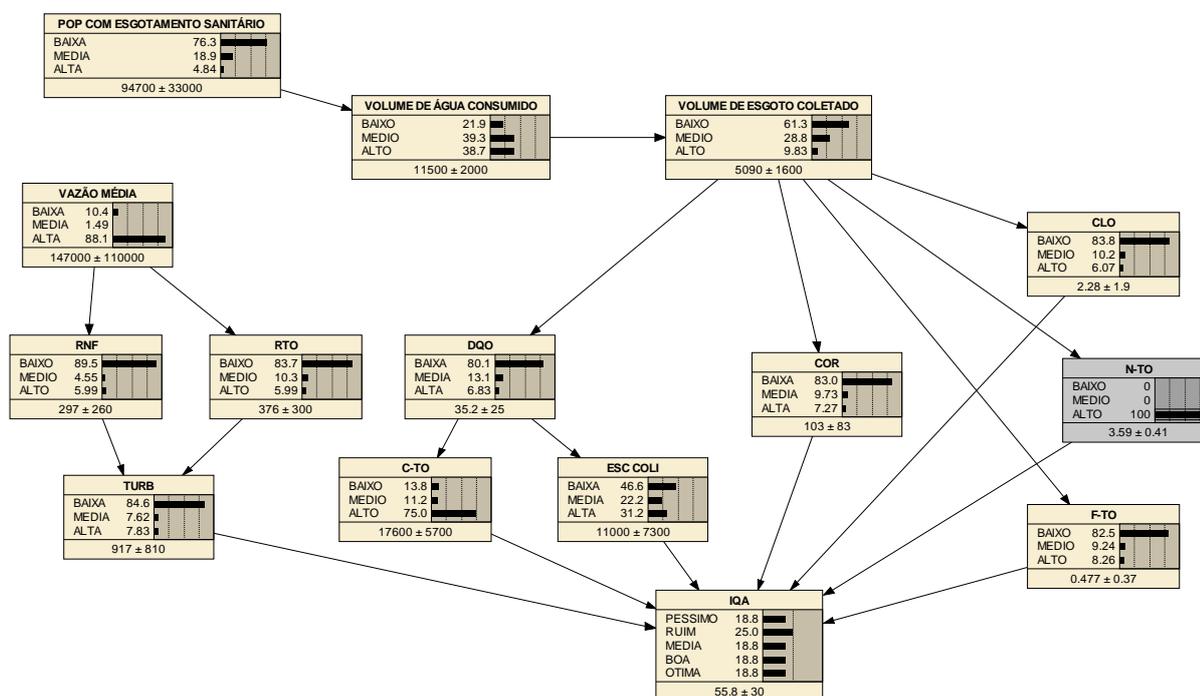
**APÊNDICE K.** Configuração da Rede Bayesiana 1 simulando índice de qualidade das águas ótimo modelada no software NETICA para o problema da gestão da qualidade da água da bacia do Rio Vermelho



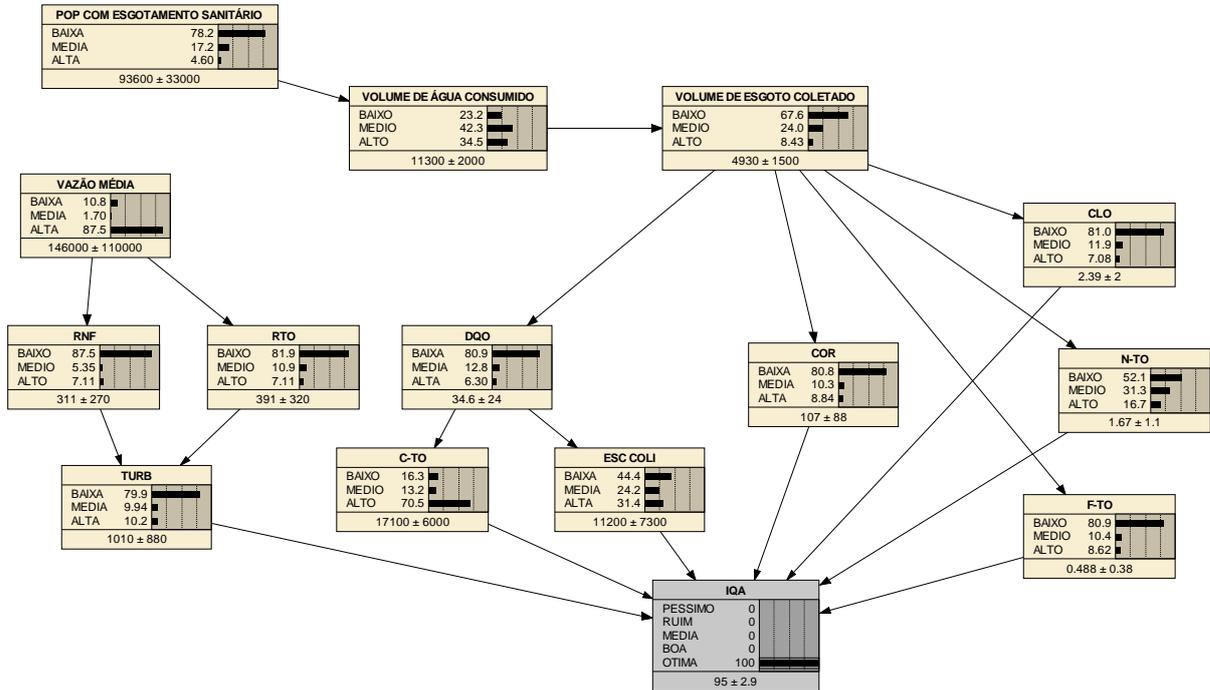
**APÊNDICE L.** Configuração da Rede Bayesiana 2 simulando volume de esgoto coletado alto modelada no software NETICA para o problema da gestão da qualidade da água da bacia do Rio Vermelho



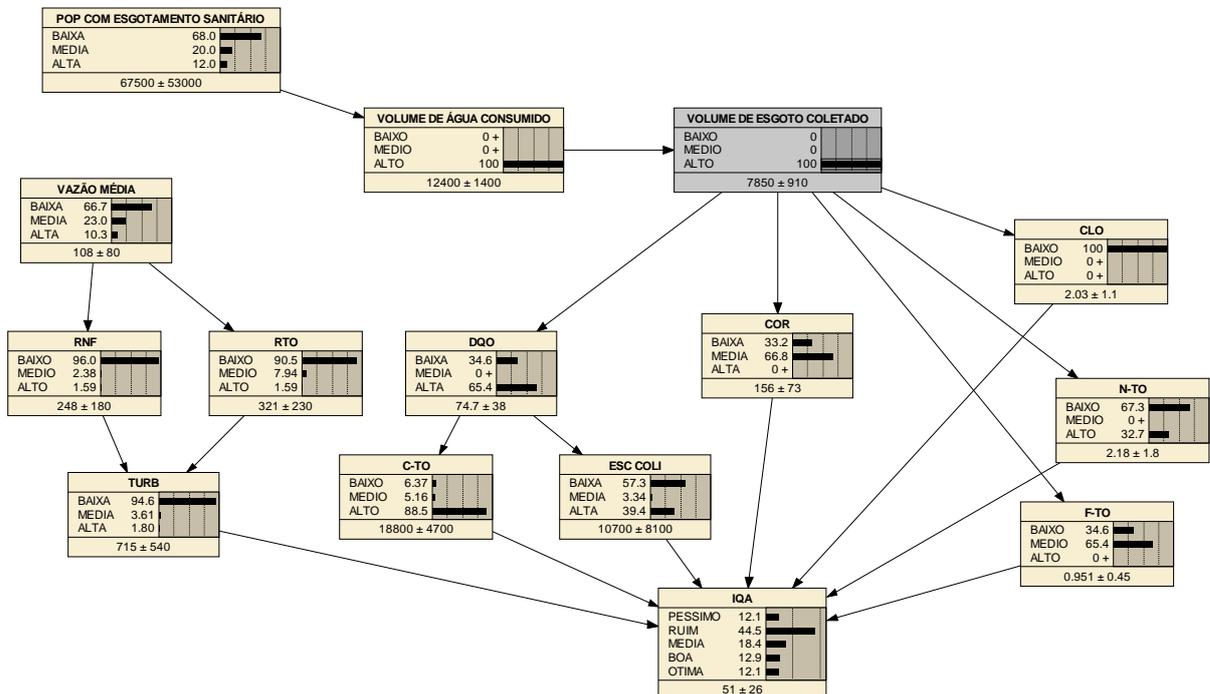
**APÊNDICE M.** Configuração da Rede Bayesiana 2 simulando nitrogênio total alto modelada no software NETICA para o problema da gestão da qualidade da água da bacia do Rio Vermelho



**APÊNDICE N.** Configuração da Rede Bayesiana 2 simulando índice de qualidade das águas ótimo modelada no software NETICA para o problema da gestão da qualidade da água da bacia do Rio Vermelho

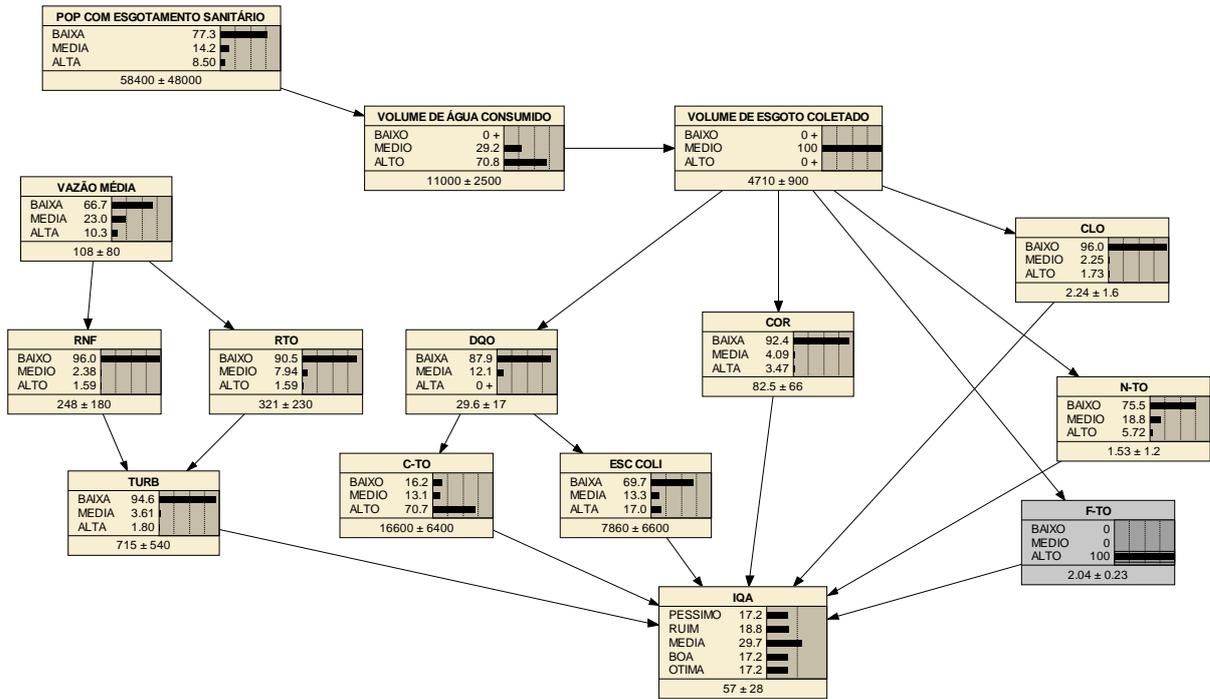


**APÊNDICE O.** Configuração da Rede Bayesiana 2 simulando volume de esgoto coletado alto modelada no software NETICA para o problema da gestão da qualidade da água da bacia do Rio Vermelho

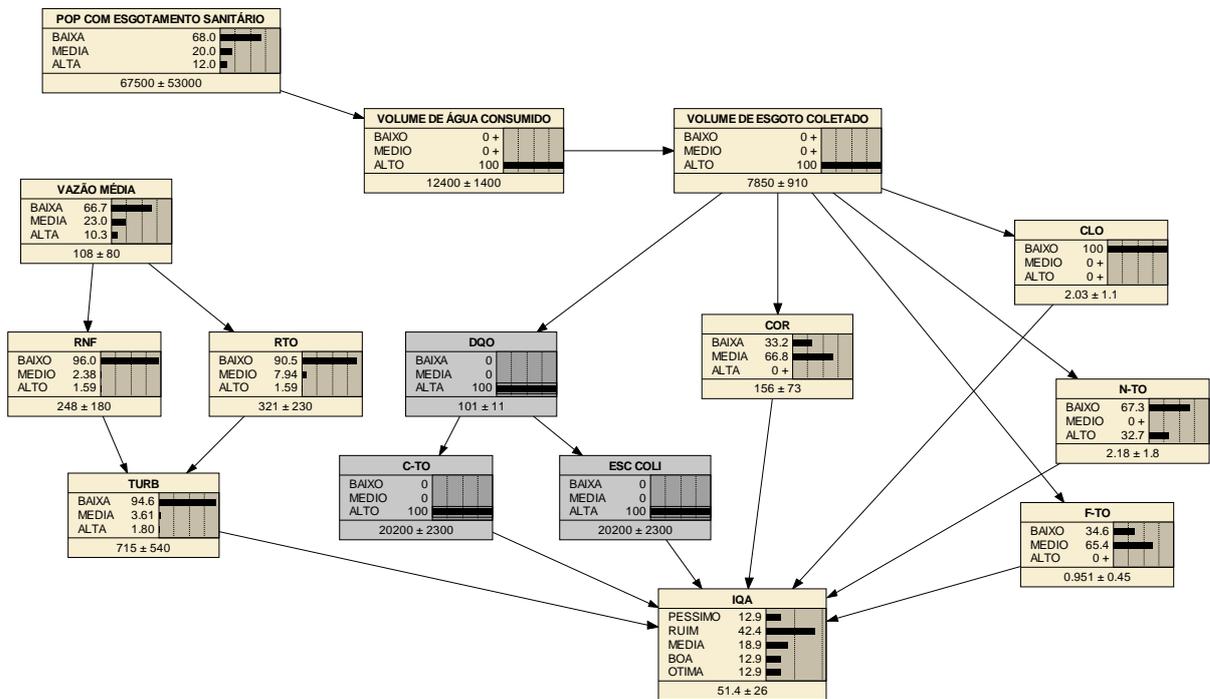




**APÊNDICE R.** Configuração da Rede Bayesiana 2 simulando fósforo total alto modelada no software NETICA para o problema da gestão da qualidade da água da bacia do Rio Vermelho



**APÊNDICE S.** Configuração da Rede Bayesiana 2 simulando DQO, coliformes totais e Escherichia coli alto modelada no software NETICA para o problema da gestão da qualidade da água da bacia do Rio Vermelho



**APÊNDICE T.** Configuração da Rede Bayesiana 2 simulando índice de qualidade das águas ótimo modelada no software NETICA para o problema da gestão da qualidade da água da bacia do Rio Vermelho

