



I-183 - DINÂMICA DO CLORO NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO: CONTRIBUIÇÃO PARA A IDENTIFICAÇÃO DE PERIGOS EM PLANOS DE SEGURANÇA DA ÁGUA

Rafael Kopschitz Xavier Bastos⁽¹⁾

Engenheiro Civil (UFJF), Especialização em Engenharia de Saúde Pública (ENSP/FIOCRUZ), PhD em Engenharia Sanitária (University of Leeds, UK), Professor Associado - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa (UFV).

Ricardo Gomes Passos

Graduando em Engenharia Ambiental (UFV)

Nolan Ribeiro Bezerra

Engenheira Ambiental (UFTO), Especialização em Vigilância em Saúde Ambiental (UFRJ), Mestre em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos (UnB), Doutoranda em Saneamento Ambiental (UFV).

Ulisses Bifano Comini

Graduando em Engenharia Ambiental (UFV).

Vinícius Carvalho Rocha

Graduando em Engenharia Ambiental (UFV).

Endereço⁽¹⁾: Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Civil. Divisão de Água e Esgotos 36570-000 - Viçosa-MG - Fone: (31) 3899 2352 - Fax: (31) 3899 2819 - e-mail: rkxb@ufv.br.

RESUMO

Na perspectiva do desenvolvimento de ferramentas de identificação de perigos e do gerenciamento de risco, portanto como parte de Planos de Segurança da Água, apresentam-se neste trabalho exercícios de espacialização dos teores de cloro residual em redes de distribuição de água. De posse de dados cadastrais da rede de distribuição do campus da Universidade Federal de Viçosa (UFV) (levantamento planialtimétrico, características das tubulações, estimativas de consumo de água), da implementação de um programa detalhado de monitoramento dos teores de cloro residual na rede, e de ensaios de bancada para a determinação da cinética de decaimento do cloro, foram gerados mapas de risco, simulando a dinâmica do cloro residual na rede com o uso do software EPANET. Sob a ótica do gerenciamento de risco, foram identificados ‘pontos críticos’ pontos de atenção’ (regiões da rede com propensão a apresentar, respectivamente, teores de cloro residual abaixo ou próximos do limite mínimo estabelecido na legislação brasileira), definidos, respectivamente, como aqueles que demandariam ações corretivas imediatas ou ações preventivas, incluindo a vigilância redobrada.

PALAVRAS-CHAVE: EPANET, cloro residual, mapa de risco, rede de distribuição.

INTRODUÇÃO

O recurso a ferramentas de avaliação e gerenciamento de riscos, desde a captação até o consumo, é reconhecido hoje como a forma mais efetiva de garantir a segurança da qualidade da água para consumo humano. Essa concepção é sistematizada nas Diretrizes da Organização Mundial da Saúde (OMS) sobre qualidade da água para consumo humano sob a denominação ‘Planos de Segurança da Água’ (PSA). Em resumo, PSA é um instrumento que identifica e prioriza perigos e riscos, define medidas de controle para reduzi-los ou eliminá-los e estabelece planos de gestão para o sistema de abastecimento de água, de forma a manter os riscos sob controle. O principal objetivo é garantir a segurança da água para consumo humano, em processo contínuo, com vistas à minimização da contaminação das fontes de abastecimento de água, à redução ou remoção da contaminação durante o processo de tratamento, e à prevenção de (re)contaminação nos sistemas de distribuição (WHO, 2004).

Sob a ótica do conceito de “múltiplas barreiras”, a rede de distribuição apresenta-se como a última etapa de um sistema de produção e abastecimento de água antes dos pontos de consumo e, portanto, deve constituir efetiva barreira de proteção. Entretanto, vários fatores podem contribuir para a deterioração no sistema de distribuição da qualidade da água tratada, tais como sub-pressões, rachaduras nas tubulações, vazamentos,



infiltrações corrosão, acúmulo de matéria orgânica, formação de biofilmes e ausência de residuais desinfetantes, o que exige permanente atenção por meio de boas práticas operacionais.

Uma das práticas usuais de prevenção à perda de qualidade da água no sistema de distribuição é a manutenção de residuais desinfetantes mínimos, desde a saída do tratamento até os pontos de consumo. Isso, com vistas ao controle do crescimento de organismos no sistema (por exemplo, biofilmes) e, principalmente, como prevenção à eventual recontaminação da água decorrente de refluxos ou infiltrações. A Portaria nº 518/2004 do Ministério da Saúde exige a manutenção de no mínimo 0,2 mg/L de cloro residual livre em qualquer ponto da rede de distribuição (BRASIL, 2004).

Porém, o teor de cloro residual decai ao longo da rede de distribuição, como resultado de um ou mais dos seguintes fatores: reações com diversas espécies orgânicas e inorgânicas presentes na água transportada (decaimento na água) ou na interface com os elementos físicos do sistema, particularmente as tubulações (decaimento de parede), e perda para a atmosfera através de superfícies livres (por exemplo, em reservatórios de distribuição). Dentre os fatores que influenciam o decaimento na água encontram-se a dose de cloro aplicada na ETA, a presença de substâncias (orgânicas e inorgânicas) oxidáveis, o pH e a temperatura da água; em relação ao decaimento de parede podem ser citados: o material e a idade das tubulações e a presença de biofilme. O decaimento dos teores de cloro pode ainda ser favorecido em regiões onde a água apresente maior tempo de residência, como as localizadas em extremidades da rede e, ou em zonas com baixo consumo (VIEIRA *et al.*, 2001).

A manutenção de teores de cloro residual mínimos nas redes de distribuição é, portanto, um elemento central para a garantia da segurança da qualidade da água para consumo humano e a verificação disso deve ser realizada por meio do cumprimento de planos de amostragem mínimos, os mais representativos possíveis desde os pontos de vista espacial e temporal. Entretanto, a prática amostral sempre apresentará limitações.

Assim, na perspectiva do desenvolvimento de ferramentas de identificação de perigos e do gerenciamento de risco, portanto como parte de Planos de Segurança da Água, apresentam-se neste trabalho exercícios de espacialização dos teores de cloro residual em redes de distribuição de água, expressos em termos de mapas de risco.

MATERIAIS E MÉTODOS

Descrição da rede de distribuição de água

O trabalho foi desenvolvido na rede de distribuição de água do campus da Universidade Federal de Viçosa (UFV), que conta com um sistema próprio de produção e abastecimento de água. A Estação de Tratamento de Água (ETA) da UFV é constituída por sistema de tratamento convencional (ciclo completo, desinfecção com cloro gás), tratando cerca de 50 L/s em regime de operação médio de oito horas diárias. A água tratada é direcionada a dois reservatórios de distribuição, os quais podem ser operados em série ou em paralelo, somando aproximadamente 1.500 m³.

A rede de distribuição de água apresenta uma extensão de cerca de 8 km, executada em PVC. Na área central do campus universitário, a rede foi concebida em anéis, dos quais partem redes secundárias em cinco direções, concebidas e dimensionadas como redes ramificadas (Figura 1).

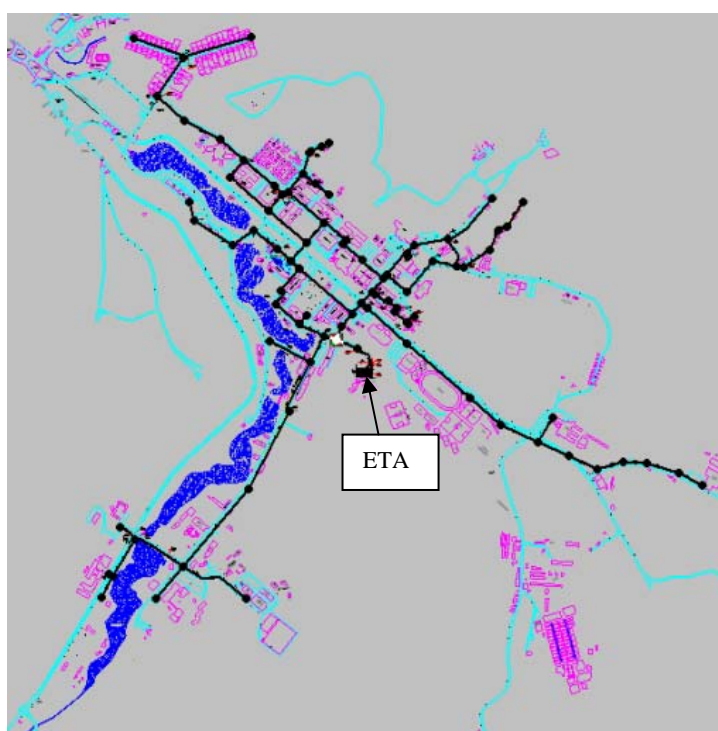


Figura 1: Ilustração esquemática da rede de distribuição de água do campus da UFV.

Monitoramento e modelagem da qualidade da água na rede de distribuição

Ao longo de quatro ramificações, da ETA até as pontas de rede, foram selecionados vários pontos de amostragem (torneiras externas às edificações, com ligação direta na rede de distribuição), de onde, ao longo de nove meses e em frequência, salvo exceções, semanal, foram coletadas amostras de água para a determinação dos seguintes parâmetros: cloro residual (livre e total), ferro (Fe), manganês (Mn). Os teores de cloro foram determinados em campo com o emprego de colorímetro portátil e digital *LaMOTTE 1200* (Chestertown, USA). As análises laboratoriais de Fe e Mn seguiram as especificações do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 1998).

A modelagem da dinâmica do cloro residual na rede de distribuição foi realizada com o programa EPANET desenvolvido pela U.S. *Environmental Protection Agency* (USEPA) (ROSSMAN, 2004), assumindo decaimento de acordo com reação de primeira ordem (Equação 1):

$$R(C_i) = k \cdot C_i \quad \text{Equação (1)}$$

Onde:

R = taxa de reação do cloro ($\text{mg L}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$),
 K = coeficiente da taxa de reação de decaimento (s^{-1})
 C_i = concentração do cloro na água (mg L^{-1}).

Para modelagem de qualidade da água com o EPANET, deve-se considerar duas componentes para a constante k da equação 1: k_b , representando o decaimento na água, e k_w (Equação 2), que representa o decaimento de parede.

$$R(C_i) = R_H \cdot k_w \cdot C_i^n \quad \text{Equação (2)}$$

Onde:

R_H = raio hidráulico da tubulação (m)
 n = ordem da reação com a parede (0 ou 1).

O valor da constante k_b foi obtido a partir de ensaios com frascos de vidro não reativos de cor âmbar (do tipo Winkler), contendo água tratada na ETA, completamente cheios, armazenados à 20°C. Dessa forma, eliminou-se a interferência da luz e do contato com o ar, que exercem demanda de cloro. A cada intervalo de tempo um frasco era aberto e era realizada a leitura do cloro residual. Assim, ajustou-se uma curva de decaimento de cloro de acordo com cinética de primeira ordem e daí resultou o valor de k_b (VIEIRA *et al*, 2001).

O valor de k_w foi obtido a partir do ajuste, por aproximação, entre os valores de concentração de cloro medidos em campo para diversos pontos e os valores gerados pela simulação para os mesmos pontos.

Os parâmetros necessários para simulação do funcionamento hidráulico da rede com o EPANET, tais como demanda de água em determinados pontos da rede (nós), cota de cada ponto e características das tubulações (rugosidade, comprimento, diâmetro), foram adotados de acordo com o cadastro existente. A estimativa da distribuição inicial de vazões na rede, e de suas variações diárias e horárias, foram realizadas com base na estimativa das variações de consumo de água na entrada do sistema de distribuição (saída do reservatório), a partir da medição das variações do nível do reservatório (é preciso esclarecer que o sistema de distribuição carecia de dispositivos de macro e micromedição de consumo). Como resultados da simulação no EPANET foram obtidos valores de vazão e de perda de carga nos trechos e de pressão nos nós.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Do monitoramento na rede de distribuição, foram obtidas curvas de decaimento de cloro livre nas ramificações selecionadas. As Figura 2, 3, 4 e 5 ilustram as variações do cloro residual livre ao longo das ramificações consideradas e as respectivos ajustes de curvas, considerando os dados médios em cada ponto de coleta.

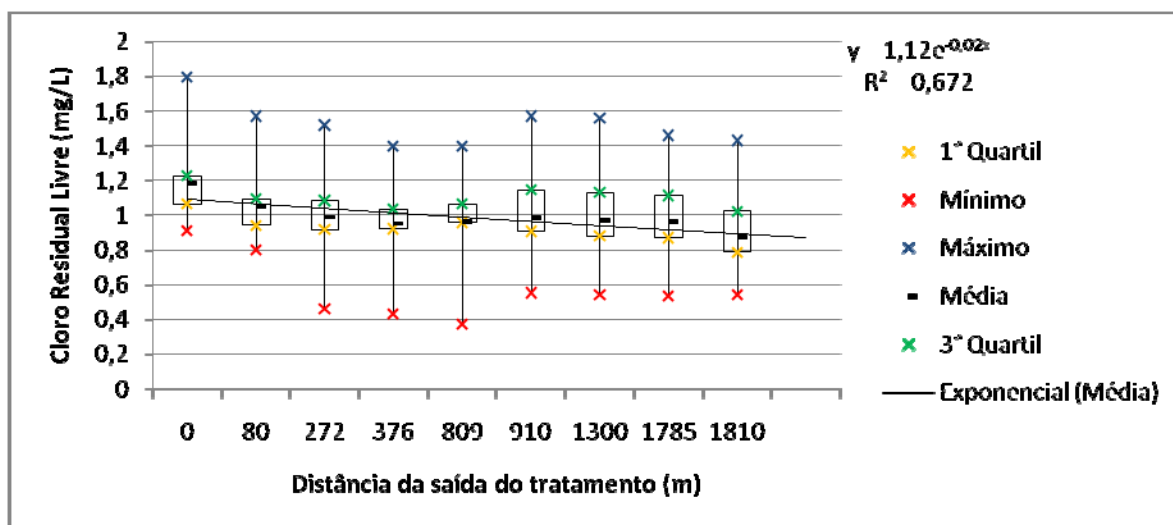


Figura 2 - Decaimento de cloro livre na ramificação ETA - Ponta de rede 1, rede de distribuição de água do campus da UFV, 2008.

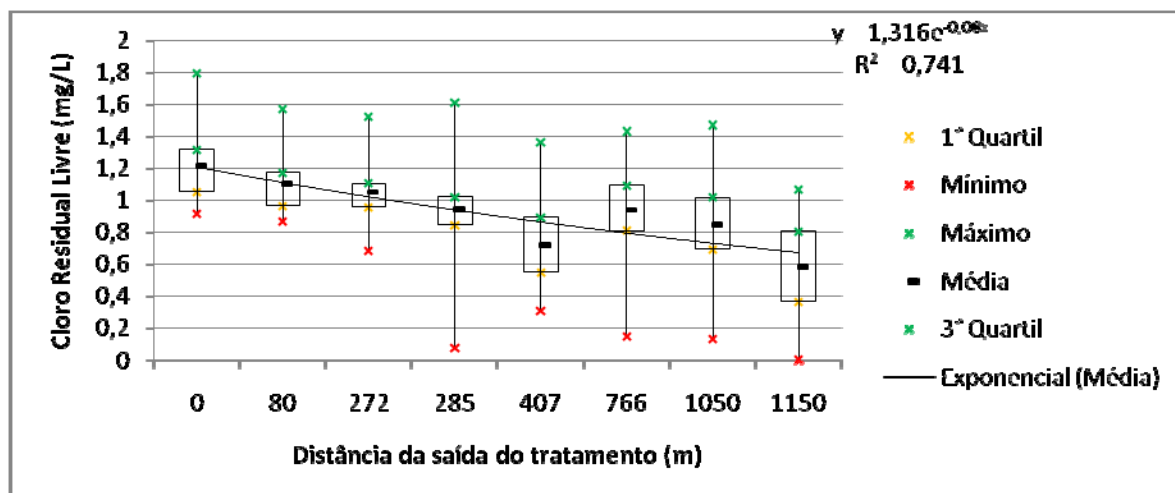


Figura 3 - Decaimento de cloro livre na ramificação ETA - Ponta de rede 2, rede de distribuição de água do campus da UFV, 2008.

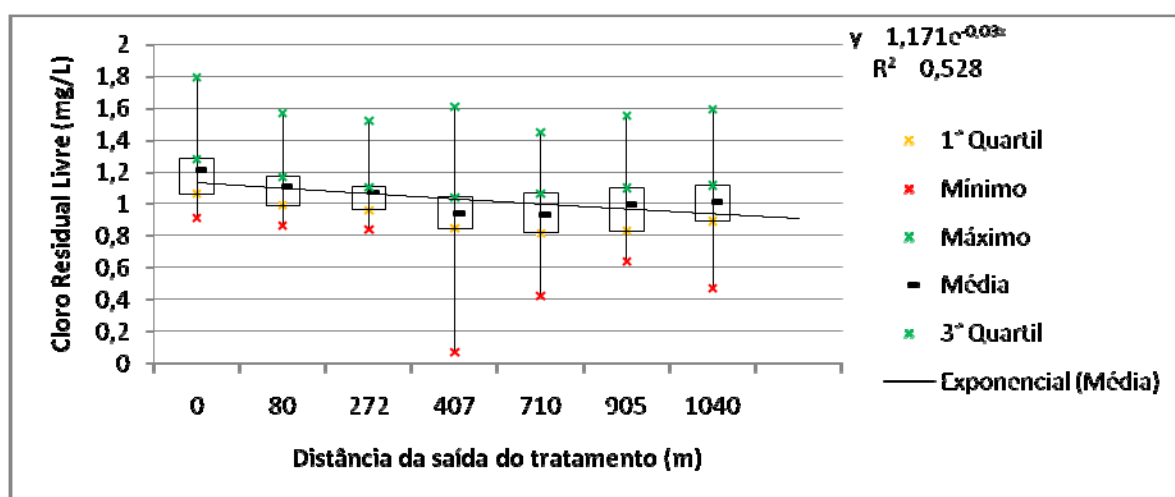


Figura 4 - Decaimento de cloro livre na ramificação ETA - Ponta de rede 3, rede de distribuição de água do campus da UFV, 2008

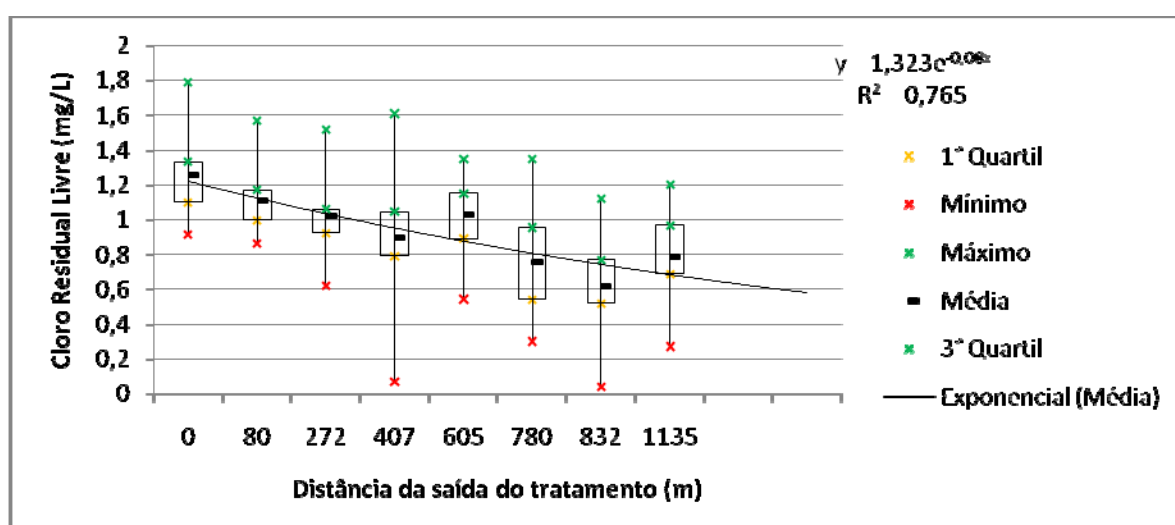


Figura 5 - Decaimento de cloro livre na ramificação ETA - Ponta de rede 4, rede de distribuição de água do campus da UFV, 2008

A Figura 6 ilustra as variações encontradas dos teores de ferro, manganês e cloro residual livre (CRL) para as mesmas ramificações. Observam-se possíveis interferências do manganês nas medidas de cloro residual, fato este que merece investigações complementares, uma vez que o manganês é reconhecidamente um dos principais interferentes no método utilizado para a determinação de cloro (DPD).

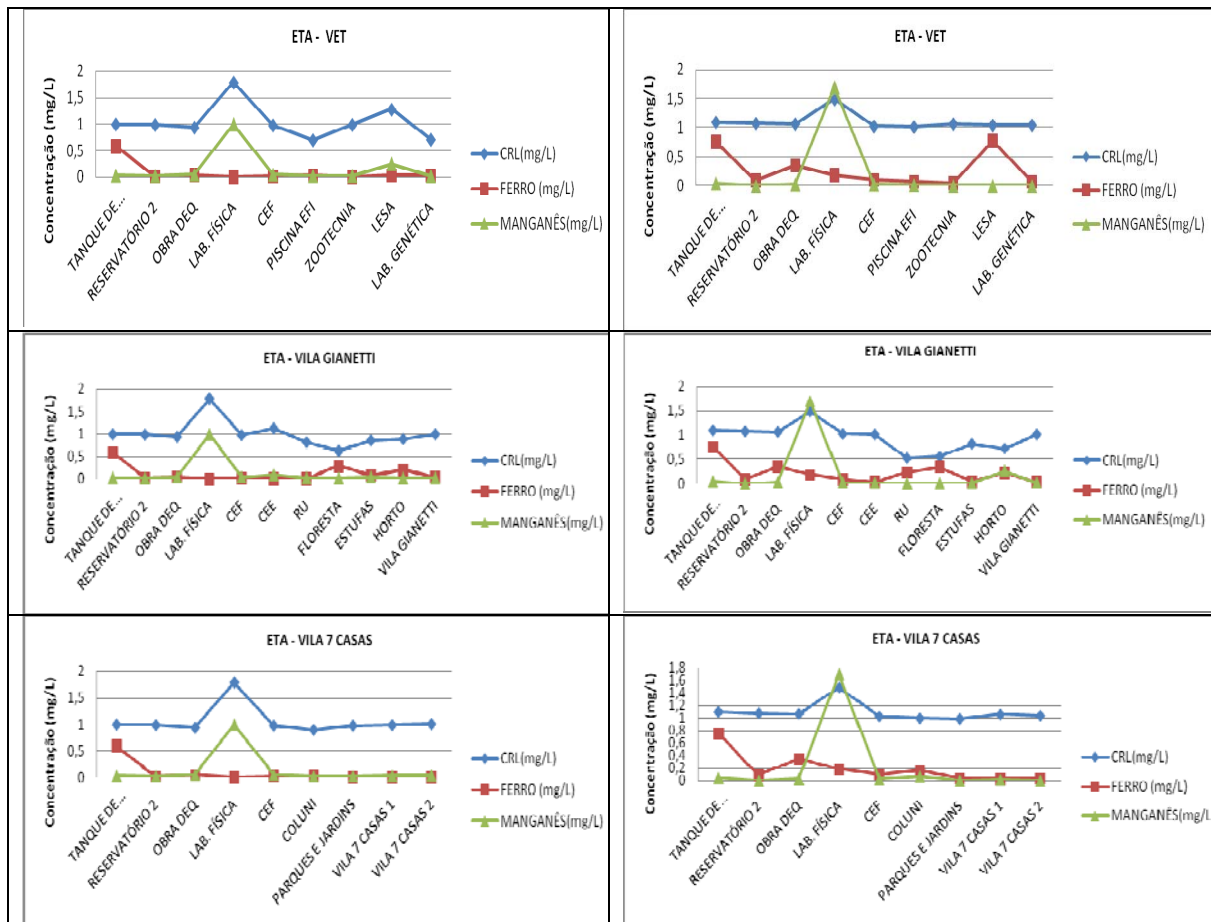


Figura 6 - Teores de Fe, Mn e cloro residual livre ao longo das ramificações ETA - pontas de rede.

Os resultados dos ensaios realizados para determinação de k_b estão apresentados na Figura 7. O valor médio de k_b encontrado foi de $3,7 \text{ d}^{-1}$, sendo este o valor considerado no modelo EPANET. O valor de K_w foi então ajustado, de acordo com as curvas de decaimento (Figuras 2, 3, 4 e 5) a fim de aproximar o modelo com o funcionamento real da rede. Por método de tentativas, um valor de K_w de $0,01 \text{ m.d}^{-1}$ (considerando a reação como de primeira ordem) conduziu a boa aproximação entre os valores medidos e estimados.

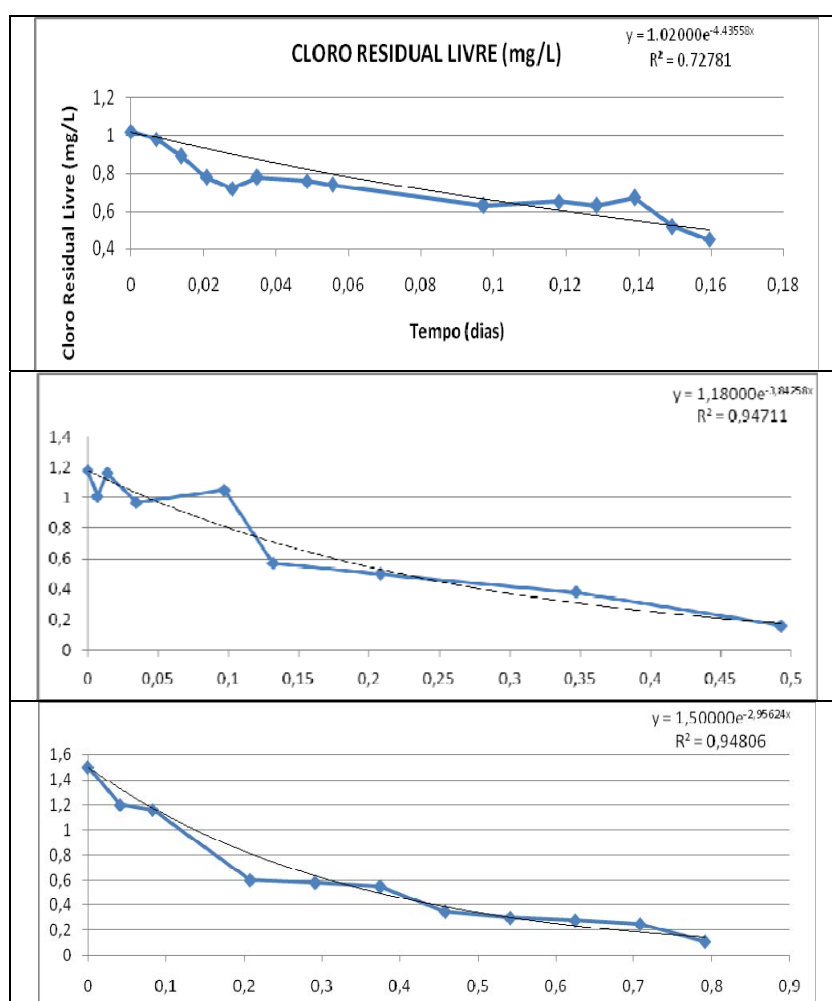


Figura 7 - Decaimento de cloro residual livre ao longo do tempo em ensaios em frascos Winkler.

De posse dos parâmetros de entrada no EPANET, foram realizadas simulações de variação espacial e temporal (diárias e horárias) dos teores de cloro residual livre na rede de distribuição. A título de exemplo, na Figura 8 são apresentados os resultados para quatro horários distintos ao longo de um dia de semana tido como de ‘consumo típico’ no campus universitário (período de aulas).

Observa-se que em alguns (poucos) pontos (pontas de rede) os valores estimados de cloro residual livre estiveram abaixo do mínimo estabelecido na Portaria 518/2004 ($0,2 \text{ mg L}^{-1}$), sendo esses pontos (ou regiões) classificados como ‘pontos críticos’ (em vermelho no mapa de risco). Outros pontos foram considerados ‘pontos de atenção’ (em amarelo no mapa de risco), devido aos valores próximos ao mínimo exigido. A interpretação dessas categorias seria a de que ‘pontos críticos’ seriam aqueles que mereceriam ações corretivas imediatas, enquanto os pontos de atenção seriam objetos de vigilância redobrada e de ações preventivas para evitar que eventualmente se tornem ‘pontos críticos’.

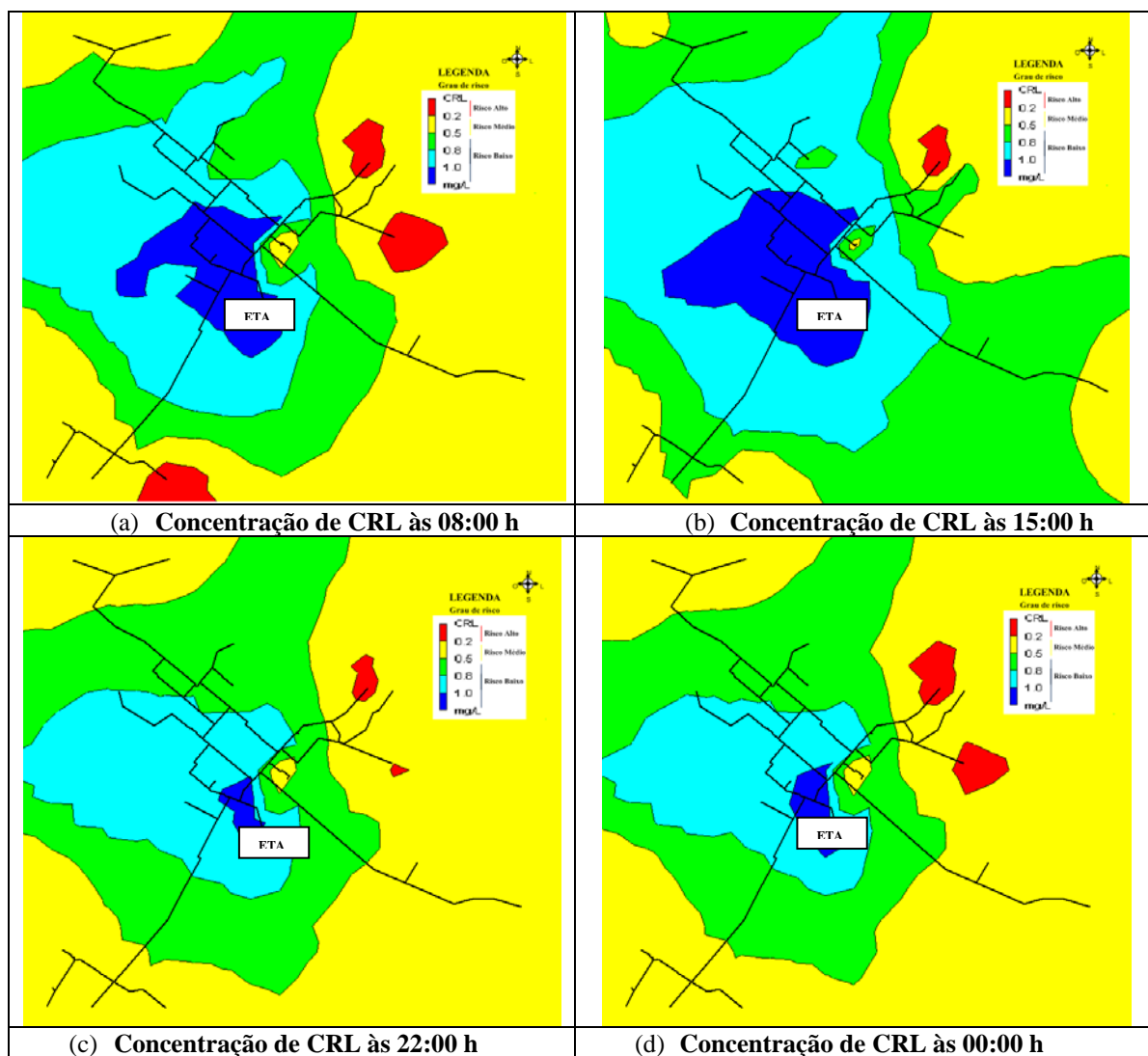


Figura 9 – Cloro residual livre na rede de distribuição de água do campus da UFV, simulação de mapa de risco para um dia de semana típico, (a)08:00h, (b)15:00h, (c)22:00h, (d)00:00h.

CONCLUSÕES

O software EPANET comprovou-se um recurso computacional de grande utilidade para a disponibilização de ferramentas de identificação de perigos e gerenciamento de risco em redes de distribuição de água, em apoio à implementação de Planos de Segurança da Água.

Os resultados aqui apresentados são interpretados como exercícios piloto em uma rede de pequena extensão, os quais devem ser testados e validados em maior escala.

Não obstante, os mapas de risco gerados com o programa EPANET demonstraram grande potencial de aplicação, sugerindo-se a incorporação de outras variáveis, tais como turbidez ou contagem de bactérias heterotróficas, informações sobre a distribuição de pressões na rede ou registros de intermitência no fornecimento de água, e sua análise integrada com a utilização de ferramentas de SIG e de técnicas de análise multicritério.



AGRADECIMENTO

Os autores agradecem ao Ministério da Saúde pelo apoio financeiro ao projeto 'Plano de Segurança da Água' no âmbito do qual foi desenvolvido este trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. APHA – American Public Health Association. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 20th Edition, Washington DC, USA, 1998..
2. BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria nº 518, de 25 de março de 2004. Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 26 mar. 2004. n. 59, Seção I, p. 266-270.
3. ROSSMAN, L. A. *Manual do utilizador do Epanet 2.0 - Simulação hidráulica e de parâmetros de qualidade em sistemas de transporte e distribuição de água*. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2004.
4. VIEIRA, P.; COELHO, S.T., PRAÇA P. Controlo do residual de cloro em sistemas de transporte e distribuição de água. *Anais do Encontro Nacional de Entidades Gestoras*, Lisboa, 2001, 20p.
5. WHO – World Health Organization. *Guidelines for drinking-water quality, third edition. Vol. 1 - Recommendations*. Geneva: WHO, 2004.