

RESISTÊNCIA ANTIMICROBIANA NO SANEAMENTO: SOLUÇÕES BASEADAS NA NATUREZA, INFRAESTRUTURA CINZA E VIGILÂNCIA AMBIENTAL INTEGRADA

Gabriela Anzanello - gabriela.anzanello@ufrgs.br - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH/UFRGS)

Elisa Maestri Dornelles - elisamaestridornelles@gmail.com - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH/UFRGS)

Ana Paula Guedes Frazzon - ana.frazzon@gmail.com - Instituto de Ciências Básicas da Saúde, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (ICBS/UFRGS)

Salatiel Wohlmuth da Silva - salatiel.silva@ufrgs.br - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH/UFRGS)

Fernando Jorge Corrêa Magalhães Filho - fernando.magalhaes@ufrgs.br - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH/UFRGS)

Resumo: A resistência antimicrobiana (RAM) tem ampliado o escopo da avaliação do saneamento ao evidenciar que a remoção de matéria orgânica, nutrientes, sólidos e indicadores fecais não descreve integralmente a segurança ambiental de efluentes tratados. Bactérias resistentes a antimicrobianos (ARB), genes de resistência a antimicrobianos (ARG), fármacos residuais e outros fatores de pressão seletiva podem circular entre esgotos, sistemas de tratamento, corpos hídricos e comunidades humanas, exigindo estratégias de vigilância integradas. Este trabalho discute a RAM como indicador emergente de qualidade ambiental no saneamento, com ênfase na comparação entre Soluções baseadas na Natureza (SbN), infraestrutura cinza e arranjos híbridos. A abordagem considera wetlands construídos, lagoas, sistemas plantados, tecnologias convencionais, desinfecção e pós-tratamentos como barreiras complementares, cujo desempenho depende de escala, matriz afluente, regime hidráulico, operação, clima e uso do corpo receptor. Também é apresentada uma plataforma regional de monitoramento no Sul do Brasil, articulada aos projetos ClimaRes WaSH e INCT SbN, envolvendo sistemas reais de diferentes portes e matrizes, incluindo esgoto doméstico, contribuições associadas a combined sewer overflow e águas residuárias de suinocultura. A integração entre parâmetros físico-químicos, cultivo seletivo, identificação microbiana, antibiograma, ARG, fármacos e dados hidrometeorológicos pode apoiar decisões sobre projeto, operação, reúso, lançamento e pós-tratamento. A incorporação da RAM à agenda do saneamento fortalece a conexão entre qualidade da água, saúde ambiental, resiliência climática e economia circular.

Palavras-chave: Resistência antimicrobiana; Soluções baseadas na Natureza; Wetlands construídos; Vigilância ambiental; Saneamento resiliente.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

ANTIMICROBIAL RESISTANCE IN SANITATION: NATURE-BASED SOLUTIONS, GREY INFRASTRUCTURE AND INTEGRATED ENVIRONMENTAL SURVEILLANCE

Abstract: Antimicrobial resistance (AMR) has broadened the scope of sanitation assessment by showing that the removal of organic matter, nutrients, solids and fecal indicators does not fully describe the environmental safety of treated effluents. Antimicrobial-resistant bacteria (ARB), antimicrobial resistance genes (ARG), residual pharmaceuticals and other selective pressure factors may circulate among wastewater, treatment systems, receiving waters and human communities, requiring integrated surveillance strategies. This paper discusses AMR as an emerging indicator of environmental quality in sanitation, with emphasis on the comparison between Nature-based Solutions (NbS), grey infrastructure and hybrid arrangements. The approach considers constructed wetlands, ponds, planted systems, conventional technologies, disinfection and post-treatment processes as complementary barriers whose performance depends on scale, influent matrix, hydraulic regime, operation, climate and receiving water use. A regional monitoring platform in Southern Brazil is also presented, linked to the ClimaRes WaSH and INCT SbN projects, involving full-scale systems of different sizes and matrices, including domestic wastewater, combined sewer overflow contributions and swine wastewater. The integration of physicochemical parameters, selective culture, microbial identification, antimicrobial susceptibility testing, ARG, pharmaceuticals and hydrometeorological data can support decisions on design, operation, reuse, discharge and post-treatment. Incorporating AMR into the sanitation agenda strengthens the connection between water quality, environmental health, climate resilience and circular economy.

Keywords: Antimicrobial resistance; Nature-based Solutions; Constructed wetlands; Environmental surveillance; Resilient sanitation.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

1. INTRODUÇÃO

A resistência antimicrobiana (RAM) está entre os desafios sanitários e ambientais mais complexos da atualidade, pois conecta práticas clínicas, produção animal, saneamento, qualidade da água e dinâmica de ecossistemas. Embora a RAM seja frequentemente discutida a partir da perspectiva hospitalar ou do uso de antimicrobianos em humanos e animais, sua dimensão ambiental tem recebido atenção crescente, especialmente porque bactérias resistentes a antimicrobianos (*antibiotic-resistant bacteria*, ARB) e genes de resistência a antimicrobianos (*antibiotic resistance genes*, ARG) podem circular entre esgotos, águas superficiais, solos, sedimentos, sistemas produtivos e comunidades humanas (Berendonk et al., 2015; Larsson; Flach, 2022). Nesse sentido, o ambiente não deve ser interpretado apenas como destino final da contaminação, mas como compartimento ativo na persistência, seleção, recombinação e disseminação de determinantes de resistência.

O esgoto ocupa posição estratégica dentro do monitoramento de RAM, pois integra contribuições domésticas, comerciais, hospitalares, agroindustriais, pluviais e urbanas, carregando microrganismos, material genético, fármacos, metais, além de nutrientes e matéria orgânica. Por essa razão, sistemas de coleta e tratamento de esgoto podem funcionar simultaneamente como barreiras sanitárias e como pontos sentinela para vigilância ambiental da RAM. Estações de tratamento de esgoto (ETEs) podem receber elevada diversidade de ARB e ARG e, dependendo da configuração tecnológica e das condições operacionais, reduzir, transformar ou permitir a persistência parcial desses elementos no efluente final e nos lodos gerado (Rizzo et al., 2013). Assim, quando se fala em eficiência de tratamento, os indicadores convencionais, como DBO e nutrientes, são insuficientes no contexto de vigilância e risco microbológico emergente.

A vigilância da RAM em águas residuárias tem avançado como uma abordagem complementar à vigilância clínica e epidemiológica, uma vez que a detecção de ARB permite avaliar microrganismos cultiváveis com resistência fenotípica e potencial relevância sanitária, e a quantificação de ARG amplia a leitura para a fração não cultivável da comunidade microbiana e para o potencial genético de resistência. Revisões recentes destacam que o monitoramento baseado em esgoto pode capturar sinais populacionais e ambientais de circulação de bactérias resistentes, especialmente para grupos como *Escherichia coli*, *Enterococcus* spp. e Enterobacterales, além de genes associados a β -lactâmicos, sulfonamidas, tetraciclina, fluoroquinolonas e mecanismos de efluxo multidroga (Chau et al., 2022; Tiwari et al., 2022). No entanto, a consolidação dessa vigilância ainda depende do avanço de estratégias metodológicas integradas, capazes de associar a identificação microbiana e perfis de resistência de maneira factível, associando esses resultados a dados físico-químicos das ETEs e das bacias hidrográficas receptoras.

Todavia, falar em um avanço de vigilância e monitoramento tão robusto contrasta com o cenário da universalização do saneamento que, no Brasil, ainda representa uma grande problemática. Levar esgotamento sanitário de forma uniforme em um país continental é uma tarefa difícil, que requer que pensemos fora do modelo tradicional, pensando principalmente em soluções descentralizadas, adequadas aos locais onde uma rede coletora de esgoto não é algo viável, como em comunidades isoladas, urbanas e/ou rurais. Além da corrida pela universalização, a emergência climática se põe

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

como um tema latente, e os esforços precisam ser voltados não apenas em alcançar cobertura de coleta e tratamento, mas sim instalar sistemas resilientes, adaptáveis às variações climáticas. Nesse cenário, as Soluções baseadas na Natureza (SbN) ocupam papel relevante. Wetlands construídos (WC), lagoas e outros arranjos vêm sendo aplicados ao tratamento de águas residuárias em diferentes escalas. Além de serem uma alternativa promissora para o tratamento descentralizado de esgoto, as SbN dialogam com princípios como economia circular, serviços ecossistêmicos e resiliência climática, temas centrais para uma nova geração de políticas e tecnologias de saneamento, por serem soluções robustas, capazes de atingirem elevadas eficiências, ao mesmo tempo de consomem pouca ou nenhuma energia elétrica e apresentam grande facilidade de operação e manutenção. Entretanto, sua avaliação frente à RAM ainda exige cautela: a capacidade de remover matéria orgânica, nutrientes e sólidos não implica, necessariamente, a mesma eficiência na atenuação de ARB e ARG.

Estudos com wetlands construídos indicam que esses sistemas podem reduzir a abundância de antibióticos, ARB e ARG, mas o desempenho varia conforme tempo de detenção hidráulica, tipo de fluxo, substrato, vegetação, temperatura, carga afluyente, comunidade microbiana e presença de etapas prévias ou posteriores de tratamento (Liu et al., 2022; Sabri et al., 2021). Em sistemas em escala real, WC podem atuar como tratamento adicional para reduzir a descarga de antibióticos e ARG ao ambiente, embora a remoção não seja uniforme para todos os compostos e genes. Revisões sobre o tema reforçam que os mecanismos de atenuação envolvem sedimentação, filtração, adsorção, competição microbiana, predação, degradação, rizosfera e transformação da comunidade, mas também apontam lacunas sobre persistência, transferência horizontal de genes e comparação com tecnologias convencionais de tratamento (Chen et al., 2023).

A comparação entre SbN e infraestrutura cinza representa uma etapa necessária para avançar de avaliações pontuais para uma abordagem integrada de segurança sanitária e ambiental. Sistemas convencionais, como lodos ativados, lagoas de estabilização, filtros, desinfecção por cloro, radiação UV e processos oxidativos, possuem mecanismos distintos de remoção e inativação microbiana, podendo apresentar vantagens e limitações específicas quanto à persistência de ARB, ARG e elementos de pressão seletiva. Da mesma forma, SbN podem apresentar boa robustez operacional e co-benefícios ambientais, mas precisam ser avaliadas quanto ao seu papel como barreira, zona de atenuação ou eventual ponto de persistência de microrganismos resistentes. Essa comparação não deve ser conduzida como oposição simplificada entre “verde” e “cinza”, mas como análise de complementaridade tecnológica, considerando escala, carga afluyente, variabilidade climática, operação, manutenção, custo, risco, potencial de reuso e qualidade dos corpos receptores. É nesse contexto que os projetos ClimaRes WaSH e INCT SbN, melhor explicados nos itens subsequentes, oferecem uma oportunidade estratégica para integrar pesquisa aplicada, saneamento, saúde ambiental e resiliência climática. Ao articular sistemas reais de tratamento, diferentes escalas de aplicação, múltiplos tipos de efluentes e abordagens laboratoriais complementares, esses projetos permitem construir uma base regional de conhecimento sobre RAM no saneamento do sul do Brasil. Essa perspectiva inclui wetlands construídos aplicados ao esgoto doméstico unifamiliar, sistemas de grande porte sujeitos a contribuições variáveis e *combined sewer overflow* (CSO), SbN para águas residuárias de suinocultura, unidades vinculadas a centros de treinamento e pesquisa, residenciais estudantis, outros sistemas descentralizados e, futuramente, comparações com infraestrutura cinza e dados de bacia hidrográfica. O objetivo integrado dos projetos é descrever a presença de ARB e ARG em

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

diferentes ETEs, de infraestrutura cinza e verde, compreendendo padrões de ocorrência, atenuação e persistência da RAM em condições reais de operação, bem como nos cursos hídricos receptores.

Assim, este trabalho parte da premissa de que a universalização do saneamento e a adaptação climática dos serviços de água, esgoto e saúde devem incorporar novos indicadores de qualidade ambiental. A RAM, nesse sentido, não deve ser tratada como um tema acessório ou exclusivamente laboratorial, mas como componente emergente da avaliação de desempenho e segurança de sistemas de tratamento. Ao combinar dados de ARB, ARG, identificação microbiana, antibiograma, parâmetros físico-químicos, características operacionais e contexto territorial, torna-se possível avançar de uma visão restrita de eficiência de remoção para uma abordagem mais ampla de vigilância ambiental. Essa abordagem é essencial para apoiar decisões sobre projeto, operação, pós-tratamento, reuso, lançamento de efluentes e comparação entre tecnologias, contribuindo para que SbN e infraestrutura cinza sejam avaliadas de forma integrada diante dos desafios contemporâneos da RAM, da resiliência climática e da qualidade ambiental.

2. VIGILÂNCIA AMBIENTAL DA RAM EM SISTEMAS DE SANEAMENTO

2.1. Resistência antimicrobiana como indicador emergente de qualidade ambiental

A incorporação da RAM à agenda do saneamento amplia a leitura tradicional de desempenho dos sistemas de tratamento. A avaliação baseada em matéria orgânica, sólidos, nutrientes e indicadores fecais continua essencial, sobretudo em contextos de déficit de infraestrutura sanitária, porém esses parâmetros não capturam integralmente a circulação de ARB, ARG, antimicrobianos residuais, metais e outros fatores capazes de exercer pressão seletiva na população microbiana (Bengtsson-Palme; Larsson, 2016). Em ambientes aquáticos e sistemas de esgoto, esses elementos podem persistir, interagir com comunidades microbianas e contribuir para a manutenção ou disseminação de determinantes de resistência. Essa compreensão tem orientado a discussão internacional sobre RAM como tema ambiental e de saúde pública associado ao conceito de *One Health* (Berendonk et al., 2015; Larsson; Flach, 2022).

Ao concentrar contribuições residenciais, comerciais, hospitalares, industriais, pluviais e de serviços, as ETEs se tornam pontos relevantes para observar sinais microbiológicos e químicos associados à RAM em escala territorial. Em áreas rurais, periurbanas ou descentralizadas, essa leitura pode refletir também práticas produtivas, criação animal, manejo de dejetos, uso de antimicrobianos e diferentes níveis de acesso ao saneamento. Essa convergência torna o esgoto uma matriz estratégica para complementar dados clínicos e laboratoriais, permitindo identificar padrões de circulação de ARB e ARG que dificilmente seriam percebidos por abordagens restritas ao ambiente hospitalar (Chau et al., 2022; Karkman et al., 2018; Manaia et al., 2018; Rizzo et al., 2013).

A vigilância da RAM em águas residuárias pode seguir por diferentes caminhos, como recuperação de ARB em meios seletivos, que permite isolar microrganismos viáveis, identificar grupos de interesse sanitário e caracterizar perfis de suscetibilidade. Aliado à isso, análise de antibiograma por disco-difusão permite obter dados importantes sobre resistência expressa frente a

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

diferentes classes de antimicrobianos. As análises de ARG, por sua vez, ampliam a leitura do resistoma ao incluir frações cultiváveis e não cultiváveis da comunidade microbiana, além de genes associados a mecanismos como inativação enzimática, alteração de alvo, proteção ribossomal, redução de permeabilidade e efluxo (Knight et al., 2024; Majeed et al., 2021).

A interpretação desses indicadores requer contextualização e integração com os demais dados, pois além detecção de ARB ou ARG em efluentes e lodos, é preciso entender a concentração, persistência ao longo das etapas de tratamento, perfil taxonômico, e a interação com a qualidade físico-química. Além disso, o tipo de uso do corpo receptor, exposição humana e sensibilidade ambiental são fatores fundamentais para a discussão de RAM em ambientes naturais. Um mesmo resultado microbiológico pode ter implicações distintas em um sistema isolado sem reuso, em um efluente lançado em área de recreação, em uma bacia usada para abastecimento ou em uma região sujeita a eventos extremos de chuva e extravasamento (Che et al., 2019). Por isso, a RAM precisa ser incorporada ao monitoramento como indicador contextual, associado às características do sistema de tratamento e do território onde ele está inserido.

Diferentes tecnologias de tratamento podem modificar a dinâmica da RAM por mecanismos como retenção física, sedimentação, adsorção, competição microbiana, predação, radiação, oxidação, inativação celular e alterações na estrutura da comunidade. Processos biológicos convencionais, lagoas, WC, filtração, desinfecção, processos oxidativos e sistemas híbridos podem reduzir determinados grupos bacterianos e genes, enquanto outros permanecem detectáveis ou apresentam remoção variável. Essa resposta depende da carga afluente, do tempo de detenção hidráulica, da configuração do sistema, da temperatura, do regime operacional, da presença de pré ou pós-tratamento e da composição da comunidade microbiana, reforçando a necessidade de comparar tecnologias, escalas e condições reais de operação.

Ao reunir parâmetros físico-químicos, microbiológicos, fenotípicos e moleculares, a vigilância ambiental da RAM permite identificar pontos críticos, orientar decisões sobre operação, indicar demandas de pós-tratamento e apoiar comparações entre SbN, infraestrutura cinza e sistemas híbridos. Essa abordagem contribui para uma leitura mais completa dos efluentes tratados e dos corpos receptores, especialmente em um cenário de urbanização, mudanças climáticas, expansão do tratamento descentralizado e crescente demanda por tecnologias resilientes.

2.2. Soluções baseadas na Natureza e infraestrutura cinza: barreiras, limites e conexão

No contexto do saneamento e esgotamento, pode-se dizer que a infraestrutura cinza se apoia em obras, equipamentos, reatores, unidades de separação, bombeamento, aeração, desinfecção e controle operacional intensivo. As SbN, por sua vez, utilizam processos ecológicos e biofísicos mediados por água, plantas, substratos e comunidades microbianas, geralmente com menor demanda energética e maior integração com a paisagem. WC, lagoas e arranjos híbridos vêm sendo utilizados para tratar diferentes águas residuárias, ao mesmo tempo que produzem co-benefícios ambientais, como retenção de nutrientes, suporte à biodiversidade, amortecimento hidráulico e valorização territorial (Masi; Rizzo; Regelsberger, 2018; Masoud; Alfarra; Sorlini, 2022; Vymazal, 2011).

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

Em sistemas convencionais, a sequência de unidades pode incluir tratamento preliminar, sedimentação, processos biológicos aeróbios ou anaeróbios, clarificação, filtração, desinfecção e, em alguns casos, etapas terciárias ou avançadas. A barreira tende a ser organizada por processos mais controlados, como separação de sólidos, degradação biológica, remoção de nutrientes, inativação microbiana e oxidação química. Em SbN, a barreira é distribuída no próprio sistema, combinando retenção física, sedimentação, filtração, adsorção, degradação, absorção vegetal, transformações na rizosfera, competição microbiana, predação e alterações na estrutura da comunidade. Essa diferença altera a forma como se avaliam desempenho, robustez e risco, pois uma tecnologia com alta eficiência para matéria orgânica e nutrientes pode responder de modo distinto diante de microrganismos resistentes, ARG, antimicrobianos residuais e outros fatores de seleção.

Assim como muitos outros sistemas, a RAM em ETEs depende de vários fatores e varia conforme os arranjos. Então, em linhas gerais, sistemas convencionais podem reduzir parte da carga de ARB e ARG, mas a magnitude dessa redução depende da configuração tecnológica, da composição do afluente, do tempo de retenção, do manejo do lodo, da desinfecção e das condições operacionais (Karkman et al., 2018; Manaia et al., 2018; Rizzo et al., 2013). ETEs também concentram elevada densidade microbiana, matéria orgânica, nutrientes, partículas, antimicrobianos e metais, compondo ambientes nos quais remoção, persistência e transformação da RAM ocorrem simultaneamente. Essa complexidade explica por que a literatura descreve as ETE como pontos relevantes para disseminação ambiental de resistência e, ao mesmo tempo, como barreiras sanitárias capazes de reduzir parte desse fluxo quando bem projetadas e operadas.

Em WC e outras SbN, os mecanismos associados à RAM envolvem a interação entre matriz filtrante, biofilme, plantas, matéria orgânica, oxigênio, tempo de detenção hidráulica e comunidade microbiana. Estudos de revisão indicam remoções variáveis de antibióticos e ARG em WC, com diferenças entre classes de compostos, genes-alvo, configurações de fluxo, substratos, vegetação e condições climáticas. Essa variabilidade é particularmente relevante para sistemas sujeitos a oscilações de vazão, carga orgânica, diluição por chuva, curtos-circuitos hidráulicos, colmatagem, sazonalidade e mudanças na qualidade do afluente, como alguns dos sistemas monitorados pelos projetos aqui apresentados.

Todavia, para de fato se avançar na universalização do saneamento e na atuação da RAM em esgotos, é preciso pensar em uma abordagem integrada, aproveitando os benefícios que ambas as classes tem a oferecer: nas infraestrutura cinza, tem-se a possibilidade de retenção e atenuação de ARG e ARB, associados à benefícios ecossistêmicos, climáticos e socioambientais; já na infraestrutura cinza, tem-se a possibilidade de inativação e eliminação mais controlada de microorganismos. Assim, a união de SbN com infraestrutura convencional para polimento de efluentes parece coerente quando o risco microbiológico, o reuso ou a sensibilidade do corpo receptor exigem barreiras adicionais. A etapa de desinfecção, mais associada à infraestrutura cinza e a pós-tratamentos, ocupa lugar central quando a finalidade do efluente exige maior controle microbiológico. Cloração, radiação UV, ozonização e processos oxidativos avançados podem reduzir ARB por inativação celular, dano oxidativo ou dano fotoquímico, mas a redução de ARG exige condições suficientes para degradar ou danificar material genético intracelular e extracelular. Estudos com UV demonstram que doses eficazes para inativação bacteriana podem ser insuficientes para reduzir determinados ARG em água e esgoto (McKinney; Pruden, 2012). Revisões recentes sobre desinfecção que processos oxidativos,

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

como cloração, ozônio, UV e arranjos híbridos de processos oxidativos avançados apresentam potencial para controle de ARB e ARG, com desempenho condicionado à matriz, dose aplicada, tempo de contato, turbidez, matéria orgânica, subprodutos, custo energético e integração com etapas anteriores de tratamento (Li et al., 2024; Mosaka et al., 2023).

A comparação entre SbN e infraestrutura cinza também precisa considerar o contexto de escala, uma vez que sistemas unifamiliares e de pequenas comunidades recebem contribuições mais localizadas e tendem à apresentar menor mistura de fontes, enquanto sistemas centralizados, grandes ETEs e unidades sujeitas a CSO integram sinais de áreas extensas, diferentes usos do solo, variações de vazão e eventos de chuva. Essa diferença altera a carga afluente, a diversidade microbiana, a concentração de contaminantes, o tempo de retenção e o potencial de transporte para corpos receptores. Em cenários de mudanças climáticas, eventos extremos podem aumentar extravasamentos, reduzir a eficiência hidráulica, provocar diluição aparente de parâmetros físico-químicos e ampliar o carregamento de ARB e ARG para bacias urbanas e periurbanas. A infraestrutura cinza oferece maior controle operacional e possibilidade de intensificação, mas pode ser vulnerável a sobrecargas hidráulicas, consumo energético elevado e custos de expansão. SbN tendem a oferecer amortecimento, integração territorial e cobenefícios ambientais, embora demandem área, um bom planejamento hidráulico e executivo.

A discussão sobre economia circular amplia essa comparação ao incluir recursos, energia, carbono, nutrientes, biomassa e serviços ecossistêmicos. WC e outras SbN se alinham a uma lógica de saneamento menos centrada apenas na remoção e disposição final, aproximando o tratamento de águas residuárias de estratégias de reuso, retenção de nutrientes, produção vegetal, recuperação de áreas degradadas, integração paisagística e adaptação climática (Masi; Rizzo; Regelsberger, 2018; Masoud; Alfarra; Sorlini, 2022). A infraestrutura cinza, por sua vez, pode incorporar a economia circular por meio de recuperação de energia, aproveitamento de biogás, reuso de água, remoção e recuperação de nutrientes, valorização de lodos e integração com tecnologias avançadas. A presença de RAM acrescenta uma face de segurança a essas possibilidades, pois reuso, recuperação de recursos e lançamento em corpos hídricos exigem avaliação microbiológica compatível com as rotas de exposição e com o destino final do efluente ou subproduto.

A complementaridade entre SbN e infraestrutura cinza se torna mais atrativa quando a pergunta deixa de ser qual tecnologia é superior e passa a considerar qual arranjo oferece maior segurança, resiliência e viabilidade para cada contexto. Em áreas rurais, pequenas comunidades, comunidades isoladas, unidades unifamiliares ou empreendimentos descentralizados, SbN podem representar alternativas robustas e de menor complexidade operacional, com possibilidade de acoplamento a pós-tratamentos quando necessário. Em grandes sistemas urbanos, bacias sujeitas a CSO ou efluentes com maior complexidade microbiológica e química, arranjos híbridos podem combinar controle operacional, retenção hidráulica, atenuação ecológica e desinfecção. Essa leitura cria o elo com uma abordagem regional de monitoramento, na qual sistemas reais de diferentes escalas, tipologias e matrizes de efluente são avaliados com o mesmo conjunto de perguntas: onde a RAM entra, como se transforma, quanto é atenuada, que fração persiste e que barreiras adicionais podem ser necessárias.

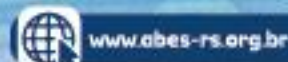
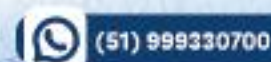
Realização



Correalizadores



Apoio Institucional



2.3. ClimaRes WaSH e INCT SbN: plataforma para monitoramento da RAM no saneamento e ambiente

O monitoramento da RAM em sistemas reais de saneamento no Sul do Brasil vem sendo estruturado a partir da convergência entre três frentes complementares. O projeto ClimaRes WaSH – Ações integradoras de Gestão, Governança e Soluções baseadas na Natureza para Água, Saneamento e Saúde no contexto da Resiliência Climática, financiado no âmbito do Edital FAPERGS 05/2025 (CRIEC, Programa de Unidades do Centro de Referência Internacional em Estudos Relacionados às Mudanças Climáticas) oferece o enquadramento mais amplo da agenda. Sua proposta articula pesquisa, monitoramento, governança, regulação, ferramentas de apoio à decisão e capacitação para enfrentar os impactos das mudanças climáticas sobre os sistemas de água, saneamento e saúde. Nessa perspectiva, a qualidade ambiental deixa de ser tratada apenas como resultado de uma campanha de amostragem e passa a compor uma base de evidências para planejamento, adaptação, mitigação e resposta a eventos extremos, especialmente em territórios nos quais enchentes, estiagens, sobrecargas hidráulicas e fragilidades de infraestrutura afetam diretamente a segurança sanitária.

Figura 1- Estrutura institucional da plataforma de monitoramento da RAM no saneamento.



Fonte: autoria própria.

Já o INCT SbN (Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Soluções baseadas na Natureza) amplia essa agenda ao atuar como uma rede nacional com articulação internacional voltada ao desenvolvimento, adaptação e difusão de SbN. Financiado por MCTI, CNPq, CAPES e FAPERGS, o INCT SbN reúne instituições de pesquisa, parceiros públicos, setor produtivo e redes internacionais para fortalecer a aplicação dessas tecnologias em infraestrutura, habitação, rios urbanos, áreas úmidas, qualidade da água e controle da poluição. Sua atuação cria um ambiente favorável para que sistemas demonstrativos e unidades em escala real sejam avaliados não apenas como objetos de pesquisa, mas

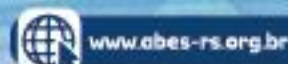
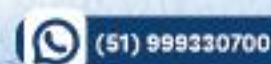
Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



como plataformas de aprendizagem tecnológica, formação de recursos humanos, transferência de conhecimento e apoio a políticas públicas. Essa característica é essencial para a discussão da RAM, pois a comparação entre sistemas reais exige continuidade de monitoramento, acesso aos dados operacionais, diversidade de configurações e capacidade de traduzir resultados laboratoriais em critérios úteis para projeto, operação e gestão.

A articulação entre ClimaRes WaSH e INCT SbN (Figura 1) permite transformar uma sequência de coletas em uma rede regional de vigilância ambiental. A lógica que orienta essa rede dialoga com a mensagem já trabalhada em ações de divulgação dos projetos: a RAM também é uma questão de água, saneamento e saúde; ETEs funcionam como pontos estratégicos para acompanhar a circulação de bactérias resistentes; e SbN, por serem sistemas robustos, adaptáveis e aplicáveis em diferentes escalas, devem ser avaliadas também quanto à sua capacidade de atenuar ou permitir a persistência de ARB e ARG. Essa abordagem evita restringir a RAM ao ambiente clínico e aproxima o tema da realidade operacional do saneamento, dos corpos receptores, das bacias hidrográficas e das escolhas tecnológicas associadas à universalização e à resiliência climática.

A rede em construção reúne sistemas com diferentes escalas, matrizes afluentes e configurações tecnológicas (Figura 2). A ETE Feitoria, em São Leopoldo/RS, representa um sistema de grande porte sujeito a contribuições de CSO, com etapas de lagoa e WCFH, permitindo avaliar a RAM em um contexto de mistura de fontes, elevada variabilidade hidráulica e influência de eventos de chuva. A ETE Banca, já fornece um contraponto importante por representar um sistema descentralizado unifamiliar, com tanque séptico seguido de WC, no qual a carga afluente é mais localizada e menos sujeita à mistura de fontes urbanas. A comparação inicial entre esses dois sistemas indicou que desempenhos físico-químicos satisfatórios podem coexistir com respostas microbiológicas muito diferentes, reforçando a importância de analisar escala, composição do afluente e persistência de ARB ao longo do tratamento.

A ampliação do monitoramento para outros sistemas no sul do Brasil, como a ETE Guaíba, a ETE CEU, a ETE UNOESC e a ETE para água residuária suinocultura em Videira/SC, aumenta a diversidade de situações representadas pela rede. A ETE Guaíba insere um arranjo urbano de grande porte com etapas convencionais seguidas de WC horizontal multiestágio, favorecendo a discussão sobre sistemas híbridos entre infraestrutura cinza e SbN. A ETE CEU, associada ao residencial estudantil em Frederico Westphalen/RS, permite avaliar um efluente doméstico gerado por população concentrada em sistema descentralizado com WC vertical parcialmente saturado. A ETE UNOESC, em Videira/SC, incorpora o contexto institucional, o tratamento descentralizado e a perspectiva de reuso, conectando RAM, fármacos e segurança de práticas alinhadas à economia circular. Também em Videira, o sistema de suinocultura, composto por dois módulos de WC em sequência, um recebendo efluente bruto e um para polimento, acrescenta uma matriz de maior complexidade produtiva e sanitária, relevante para interpretar a interface entre produção animal, saneamento, ambiente e *One Health*.

A escala de monitoramento varia de unidades unifamiliares e descentralizadas a ETEs urbanas de grande porte. A matriz afluente inclui esgoto doméstico, CSO, efluentes institucionais e águas residuárias de suinocultura. A configuração tecnológica envolve diferentes modalidades de WC, sistemas parcialmente saturados, lagoas, unidades multiestágio e arranjos híbridos com infraestrutura cinza. O contexto territorial inclui áreas rurais, periurbanas, urbanas, institucionais e produtivas, cada

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

uma com diferentes rotas de exposição, demandas de reuso, pressões operacionais e vínculos com corpos receptores. A literatura sobre vigilância baseada em esgoto reforça que esse tipo de matriz pode captar sinais populacionais e ambientais de circulação de microrganismos e genes, especialmente quando os dados são interpretados em conjunto com características locais e séries temporais consistentes.

Figura 2 - Registros fotográficos das ETEs com indicação dos sistemas.



Fonte: acervo próprio.

Os primeiros resultados da conexão dos projetos envolvem campanhas de monitoramento na ETE Feitoria e na ETE Banca mostram como essa rede pode gerar hipóteses aplicadas. No sistema unifamiliar, as ARB recuperáveis ficaram predominantemente associadas ao esgoto bruto, com redução expressiva no efluente tratado. No sistema de grande porte sujeito a CSO, houve persistência de colônias em meios seletivos após as etapas de tratamento, incluindo táxons de relevância sanitária e isolados com resistência fenotípica múltipla. Essa diferença sugere que a presença de WC deve ser interpretada em conjunto com escala, regime hidráulico, composição do afluente, variabilidade

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

climática, etapas associadas e tempo de retenção. Estudos em escala real também indicam que WC podem reduzir antibióticos e ARG, mas com desempenho variável entre compostos, genes, configurações e condições operacionais, o que reforça a importância de monitoramentos regionais e multissistêmicos.

A metodologia integrada prevista para a rede combina monitoramento físico-químico, cultura seletiva, identificação por MALDI-TOF MS, antibiograma, quantificação de ARG, metagenômica quando aplicável, avaliação de fármacos e incorporação de dados meteorológicos e operacionais. Essa estrutura permite acompanhar a RAM desde a entrada do sistema até o efluente final, incluindo os locais que recebem o efluente tratado, seja o solo ou um curso hídrico. A mesma base pode apoiar análises multivariadas, indicadores de desempenho, matrizes de risco e comparação entre condições sazonais, produzindo evidências para decisões sobre operação, manutenção, pós-tratamento, reuso, lançamento e proteção de corpos receptores.

Ao consolidar esse portfólio regional, o trabalho passa a tratar a RAM de forma ampla, dependente de tecnologia, escala, território e clima. Os sistemas monitorados deixam de ser exemplos isolados e passam a compor uma plataforma de aprendizagem sobre como ARB, ARG e antimicrobianos entram, persistem, são atenuados ou chegam aos efluentes tratados em condições reais de operação. Essa base cria o elo direto com o próximo item, dedicado aos primeiros insights obtidos nos sistemas já avaliados e às hipóteses que eles permitem formular para a comparação entre SbN, infraestrutura cinza e bacias hidrográficas.

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A incorporação da RAM à agenda do saneamento desloca a avaliação de desempenho dos sistemas de tratamento para uma perspectiva mais ampla de segurança sanitária e qualidade ambiental. A remoção de matéria orgânica, nutrientes, sólidos e indicadores fecais continua sendo essencial para a gestão do esgoto, mas não é suficiente para descrever integralmente a circulação de ARB, ARG, antimicrobianos residuais e outros fatores de pressão seletiva em efluentes tratados, lodos, corpos receptores, e as bacias hidrográficas, como um todo. Em um cenário no qual a universalização do saneamento avança em paralelo à intensificação de eventos climáticos extremos, a RAM passa a representar uma dimensão crítica para compreender riscos microbiológicos emergentes e fomentar o know-how para decisões sobre tratamento, lançamento, reuso e proteção ambiental.

A leitura integrada entre SbN, infraestrutura cinza e sistemas híbridos permite superar interpretações simplificadas sobre as tecnologias, unindo-as para melhor atender cada contexto. WC, lagoas e outros arranjos de SbN oferecem robustez operacional, baixo consumo energético e cobenefícios associados à resiliência climática e à economia circular. Tecnologias convencionais, e para etapas desinfecção e pós-tratamentos avançados, por sua vez, podem fornecer maior controle operacional e barreiras adicionais quando o risco microbiológico, o reuso ou a sensibilidade do corpo receptor exigem maior intensificação. A escolha tecnológica deve considerar escala, matriz afluente, regime hidráulico, variabilidade climática, operação, manutenção, custo, rotas de exposição e desempenho frente a indicadores convencionais e emergentes.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

A articulação entre ClimaRes WaSH e INCT SbN cria uma oportunidade estratégica para transformar sistemas reais de tratamento em plataformas de vigilância ambiental. Ao reunir unidades descentralizadas, sistemas institucionais, ETEs de grande porte, arranjos sujeitos a CSO, SbN aplicadas a águas residuárias de suinocultura e futuras comparações com infraestrutura cinza e dados de bacia, essa rede permite observar a RAM em condições reais de operação. Essa abordagem é particularmente importante porque a persistência ou atenuação de ARB e ARG não depende apenas da presença de uma tecnologia específica, mas da interação entre carga afluente, configuração do sistema, tempo de retenção, comunidade microbiana, clima e contexto territorial.

A vigilância ambiental da RAM exige integração metodológica e interpretação proporcional ao risco. Cultivo seletivo, identificação microbiana, antibiograma, quantificação de ARG, metagenômica, análise de fármacos, parâmetros físico-químicos e dados hidrometeorológicos oferecem camadas complementares de informação. Quando analisadas em conjunto, essas camadas permitem identificar pontos críticos, comparar tecnologias, reconhecer limitações operacionais, indicar demandas de pós-tratamento e subsidiar critérios para reúso e lançamento. Esse movimento aproxima o saneamento de uma lógica mais preventiva, na qual ETEs deixam de ser avaliadas apenas como unidades de remoção de carga poluidora e passam a funcionar também como pontos sentinela de saúde ambiental.

Ao tratar a RAM como indicador emergente, este trabalho reforça a necessidade de atualizar a forma como se define qualidade ambiental no saneamento. A próxima geração de sistemas de tratamento precisará responder simultaneamente à universalização, à adaptação climática, à segurança microbiológica, à economia circular e à proteção de bacias hidrográficas. Nesse contexto, SbN e infraestrutura cinza não devem ser vistas como alternativas excludentes, mas como componentes de um portfólio tecnológico capaz de combinar eficiência, resiliência e redução de risco. Incorporar ARB, ARG e fármacos ao monitoramento não representa apenas adicionar novos parâmetros laboratoriais; representa ampliar a capacidade do saneamento de antecipar ameaças, proteger ecossistemas e fortalecer a saúde pública em uma perspectiva integrada.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao projeto ClimaRes WaSH – Ações integradoras de Gestão, Governança e Soluções baseadas na Natureza para Água, Saneamento e Saúde no contexto da Resiliência Climática, ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Soluções baseadas na Natureza (INCT SbN) e às instituições e redes de pesquisa associadas, bem como aos respectivos órgãos financiadores, em especial à FAPERGS, ao CNPq, à CAPES e ao MCTI, pelo apoio institucional, científico e financeiro ao desenvolvimento das atividades de pesquisa.

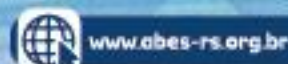
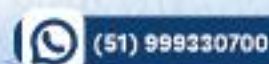
Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



REFERÊNCIAS

BENGTSSON-PALME, Johan; LARSSON, D. G. Joakim. Concentrations of antibiotics predicted to select for resistant bacteria: Proposed limits for environmental regulation. **Environment International**, v. 86, p. 140–149, jan. 2016.

BERENDONK, Thomas U. *et al.* Tackling antibiotic resistance: the environmental framework. **Nature Reviews Microbiology**, v. 13, n. 5, p. 310–317, maio 2015.

CHAU, K. K. *et al.* Systematic review of wastewater surveillance of antimicrobial resistance in human populations. **Environment International**, v. 162, p. 107171, abr. 2022.

CHE, You *et al.* Mobile antibiotic resistome in wastewater treatment plants revealed by Nanopore metagenomic sequencing. **Microbiome**, v. 7, n. 1, p. 44, dez. 2019.

CHEN, Pingping *et al.* New and traditional methods for antibiotic resistance genes removal: Constructed wetland technology and photocatalysis technology. **Frontiers in Microbiology**, v. 13, p. 1110793, 4 jan. 2023.

KARKMAN, Antti *et al.* Antibiotic-Resistance Genes in Waste Water. **Trends in Microbiology**, v. 26, n. 3, p. 220–228, mar. 2018.

KNIGHT, Margaret E. *et al.* National-scale antimicrobial resistance surveillance in wastewater: A comparative analysis of HT qPCR and metagenomic approaches. **Water Research**, v. 262, p. 121989, set. 2024.

LARSSON, D. G. Joakim; FLACH, Carl-Fredrik. Antibiotic resistance in the environment. **Nature Reviews Microbiology**, v. 20, n. 5, p. 257–269, maio 2022.

LI, Fei *et al.* Molecular level removal of antibiotic resistant bacteria and genes: A review of interfacial chemical in advanced oxidation processes. **Water Research**, v. 254, p. 121373, maio 2024.

LIU, Linmei *et al.* Fate of resistome components and characteristics of microbial communities in constructed wetlands and their receiving river. **Science of The Total Environment**, v. 844, p. 157226, out. 2022.

MAJEED, Haniyyah J. *et al.* Evaluation of Metagenomic-Enabled Antibiotic Resistance Surveillance at a Conventional Wastewater Treatment Plant. **Frontiers in Microbiology**, v. 12, p. 657954, 13 maio 2021.

MANAIA, Célia M. *et al.* Antibiotic resistance in wastewater treatment plants: Tackling the black box. **Environment International**, v. 115, p. 312–324, jun. 2018.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



PUCRS



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

MASI, F.; RIZZO, A.; REGELSBERGER, M. The role of constructed wetlands in a new circular economy, resource oriented, and ecosystem services paradigm. **Journal of Environmental Management**, v. 216, p. 275–284, jun. 2018.

MASOUD, Ahmed M. N.; ALFARRA, Amani; SORLINI, Sabrina. Constructed Wetlands as a Solution for Sustainable Sanitation: A Comprehensive Review on Integrating Climate Change Resilience and Circular Economy. **Water**, v. 14, n. 20, p. 3232, 13 out. 2022.

MCKINNEY, Chad W.; PRUDEN, Amy. Ultraviolet Disinfection of Antibiotic Resistant Bacteria and Their Antibiotic Resistance Genes in Water and Wastewater. **Environmental Science & Technology**, v. 46, n. 24, p. 13393–13400, 18 dez. 2012.

MOSAKA, Thabang B. M. *et al.* Inactivation of antibiotic-resistant bacteria and antibiotic-resistance genes in wastewater streams: Current challenges and future perspectives. **Frontiers in Microbiology**, v. 13, p. 1100102, 16 jan. 2023.

RIZZO, L. *et al.* Urban wastewater treatment plants as hotspots for antibiotic resistant bacteria and genes spread into the environment: A review. **Science of The Total Environment**, v. 447, p. 345–360, mar. 2013.

SABRI, N. A. *et al.* Performance of full scale constructed wetlands in removing antibiotics and antibiotic resistance genes. **Science of The Total Environment**, v. 786, p. 147368, set. 2021.

TIWARI, Ananda *et al.* Wastewater surveillance of antibiotic-resistant bacterial pathogens: A systematic review. **Frontiers in Microbiology**, v. 13, p. 977106, 15 dez. 2022.

VYMAZAL, Jan. Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: Five Decades of Experience. **Environmental Science & Technology**, v. 45, n. 1, p. 61–69, 1 jan. 2011.

Realização



Correalizadores



Apoio Institucional



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br