

**FERRO ZERO-VALENTE
NANOMÉTRICO NA
REMEDIÇÃO DE ÁGUAS
SUBTERRÂNEAS
CONTAMINADAS: DO
DESEMPENHO EM CAMPO
AO MODELO INTEGRADO
DE AVALIAÇÃO DA
NANORREMEDIÇÃO
SUSTENTÁVEL (MIANS)**

**NANOSCALE ZERO-VALENT IRON IN CONTAMINATED GROUNDWATER
REMEDIATION: FROM FIELD PERFORMANCE TO THE INTEGRATED
SUSTAINABLE NANOREMEDIATION ASSESSMENT MODEL (MIANS)**

Ciências Exatas e da Terra • 02/09/2026

REGISTRO DOI: [10.70773/revistatopicos/788202565](https://doi.org/10.70773/revistatopicos/788202565)

RESUMO

A aplicação do ferro zero-valente nanométrico (nZVI) na remediação de águas subterrâneas contaminadas apresenta elevado potencial em razão de sua elevada área superficial específica, capacidade redutora e possibilidade de utilização *in situ*. Entretanto, a eficiência química demonstrada em condições experimentais não assegura, isoladamente, efetividade ambiental ou sustentabilidade em escala de campo. Este estudo objetiva analisar criticamente a utilização do nZVI na remediação de águas subterrâneas, confrontando fundamentos químicos, ensaios de tratabilidade, aplicações piloto e de campo, limitações hidrogeológicas, efeitos ecotoxicológicos, síntese verde e perspectivas de economia circular. A pesquisa caracteriza-se como bibliográfica e documental, de natureza exploratória, analítica e comparativa, baseada em síntese crítica da literatura. Adota-se como referência brasileira estudo realizado com água subterrânea e material geológico provenientes de área contaminada em Jurubatuba, São Paulo, confrontando seus resultados com experiências internacionais. A análise demonstra que agregação, passivação, mobilidade, heterogeneidade hidrogeológica, formação de intermediários, rebound, efeitos biológicos e ciclo de vida do nanomaterial constituem variáveis relevantes para avaliação da tecnologia. A partir da convergência dessas evidências, propõe-se o Modelo Integrado de Avaliação da Nanorremediação Sustentável (MIANS), estruturado em cinco dimensões: eficiência química, efetividade ambiental, segurança ecotoxicológica, circularidade e ciclo de vida e persistência do benefício ambiental. O MIANS é apresentado como modelo conceitual exploratório, e não como escala quantitativa validada. Conclui-se que a sustentabilidade da nanorremediação não pode ser inferida exclusivamente a partir do percentual de remoção do contaminante, devendo considerar o benefício ambiental líquido

produzido ao longo da intervenção.

Palavras-chave: ferro zero-valente nanométrico; nanorremediação; águas subterrâneas; sustentabilidade ambiental; ecotoxicologia; MIANS.

ABSTRACT

The application of nanoscale zero-valent iron (nZVI) to contaminated groundwater remediation has significant potential due to its high specific surface area, reducing capacity, and suitability for in situ treatment. However, chemical efficiency demonstrated under experimental conditions does not, by itself, ensure environmental effectiveness or sustainability at field scale. This study critically analyzes the use of nZVI in groundwater remediation by integrating chemical fundamentals, treatability experiments, pilot- and field-scale applications, hydrogeological limitations, ecotoxicological effects, green synthesis, and circular economy perspectives. The research is bibliographic and documentary in nature and adopts an exploratory, analytical, and comparative approach based on a critical synthesis of the literature. A Brazilian study involving groundwater and geological material from a contaminated site in Jurubatuba, São Paulo, is used as a reference and compared with international field experiences. The analysis indicates that aggregation, passivation, mobility, hydrogeological heterogeneity, intermediate product formation, contaminant rebound, biological effects, and the nanomaterial life cycle are relevant variables in assessing the technology. Based on the convergence of these findings, this study proposes the Integrated Sustainable Nanoremediation Assessment Model (MIANS), structured around five dimensions: chemical efficiency, environmental effectiveness, ecotoxicological safety, circularity and life cycle, and persistence of environmental benefits. MIANS is presented as an exploratory conceptual model rather than

a validated quantitative scale. The study concludes that nanoremediation sustainability cannot be inferred exclusively from contaminant removal percentages and should instead consider the net environmental benefit generated throughout the intervention.

Keywords: nanoscale zero-valent iron; nanoremediation; groundwater; environmental sustainability; ecotoxicology; MIANS.

1. INTRODUÇÃO

A contaminação de solos e águas subterrâneas constitui problema ambiental complexo em razão da persistência, mobilidade e toxicidade de diferentes substâncias liberadas por atividades industriais, comerciais e urbanas. Solventes clorados, hidrocarbonetos e espécies metálicas podem permanecer por longos períodos no ambiente subterrâneo, dificultando sua remoção e ampliando os riscos associados à exposição humana e ecológica.

Tecnologias convencionais de remediação apresentam resultados importantes, mas determinadas condições hidrogeológicas e características dos contaminantes estimulam o desenvolvimento de alternativas capazes de promover tratamento diretamente no meio contaminado.

Nesse contexto, o ferro zero-valente (Fe^0) passou a ocupar posição relevante na remediação ambiental em razão de sua capacidade de atuar como agente redutor em diferentes sistemas contaminados. A redução da escala das partículas para dimensões nanométricas aumenta consideravelmente sua área superficial específica e reatividade, originando o ferro zero-valente nanométrico, usualmente denominado nanoscale zero-valent iron (nZVI) [1,2].

O interesse pelo nZVI decorre particularmente da possibilidade de introdução in situ, permitindo que o agente remediador seja aplicado no meio subterrâneo para promover transformação ou imobilização de contaminantes.

Entretanto, a elevada eficiência observada em laboratório não elimina dificuldades associadas à utilização ambiental das nanopartículas. Agregação, passivação, mobilidade limitada, heterogeneidade hidrogeológica e consumo da capacidade redutora em reações paralelas podem modificar significativamente o desempenho em campo [2].

A experiência acumulada em aplicações piloto e reais reforça essa diferença. Revisão recente examinou 32 áreas submetidas a demonstrações piloto ou aplicações em escala plena, distribuídas por oito países ao longo de aproximadamente 22 anos, concluindo que o desempenho depende, entre outros fatores, da formulação do nZVI, do contaminante, das características do local e da metodologia de introdução do material [3].

Surge, portanto, uma questão que ultrapassa a demonstração de eficiência química: em quais condições o nZVI consegue conciliar eficiência de transformação dos contaminantes, efetividade no ambiente real e segurança ambiental?

A hipótese adotada é que a elevada eficiência química do nZVI constitui condição relevante, mas insuficiente, para caracterizar uma intervenção como ambientalmente sustentável. A sustentabilidade dependeria também da capacidade de distribuição do material, dos efeitos ecotoxicológicos, do ciclo de vida e da permanência temporal dos benefícios produzidos.

O objetivo deste estudo é analisar criticamente essas dimensões a partir da literatura e de experiências documentadas, utilizando como referência brasileira ensaio de tratabilidade realizado com água subterrânea e material geológico provenientes de Jurubatuba, São Paulo [4], confrontado com aplicações internacionais.

A partir da convergência das evidências identificadas, propõe-se o Modelo Integrado de Avaliação da Nanorremediação Sustentável (MIANS). O modelo não é apresentado como escala quantitativa validada, mas como estrutura conceitual exploratória destinada a organizar as evidências necessárias à avaliação integrada da sustentabilidade da nanorremediação.

2. METODOLOGIA

O estudo caracteriza-se como pesquisa bibliográfica e documental, de natureza exploratória, analítica e comparativa. Não se trata de revisão sistemática ou metanálise.

A prospecção foi orientada pelo problema de pesquisa e organizada em eixos referentes aos fundamentos do Fe^0/nZVI , remediação de águas subterrâneas, solventes clorados, aplicações de campo, agregação, passivação, mobilidade, seletividade eletrônica, ecotoxicologia, comunidades microbianas, síntese verde, biochar, ciclo de vida e remediação sustentável.

Foram priorizados artigos científicos, revisões, estudos experimentais, trabalhos de campo e documentos acadêmicos capazes de contribuir diretamente para a compreensão da passagem entre eficiência química e sustentabilidade ambiental.

Os trabalhos selecionados foram examinados, quando disponíveis os respectivos dados, segundo contaminante, material remediador, escala, eficiência química, condições ambientais, transporte e estabilidade das nanopartículas, segurança ambiental, persistência dos resultados e aspectos relacionados à produção e ao ciclo de vida.

A comparação entre percentuais de remoção foi realizada com cautela, considerando que diferenças entre contaminantes, formulações, concentrações, doses, hidrogeologia e escalas impedem equiparações quantitativas diretas.

Como referência brasileira, foi selecionada a dissertação de Vinícius Falchi Bernardo, desenvolvida no Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, por utilizar água subterrânea e material geológico provenientes de área efetivamente contaminada e por documentar simultaneamente desempenho químico e limitações hidráulicas [4].

Durante a síntese crítica, os problemas identificados na literatura convergiram progressivamente para cinco grupos: desempenho químico; efetividade nas condições ambientais reais; efeitos ecotoxicológicos; produção/ciclo de vida; e permanência temporal dos resultados. Essa convergência forneceu a base para a formulação conceitual do MIANS.

O modelo não resultou de análise estatística, Delphi, ponderação multicritério ou validação por especialistas. Consequentemente, não foram estabelecidos pesos, pontos de corte ou índice numérico de sustentabilidade.

Quando determinada dimensão não dispõe de informações suficientes, adota-se como interpretação metodológica “evidência

insuficiente para conclusão”, evitando transformar ausência de dados em inferência positiva ou negativa.

3. FUNDAMENTOS E OBTENÇÃO DO FERRO ZERO-VALENTE NANOMÉTRICO

3.1. Do Ferro Zero-Valente Ao NZVI

O ferro zero-valente corresponde ao ferro em estado de oxidação zero (Fe^0). Sua utilização em remediação ambiental decorre principalmente da capacidade de sofrer oxidação e transferir elétrons para determinadas espécies químicas presentes no meio contaminado [1].

De maneira simplificada, a reação de oxidação pode ser representada por: $\text{Fe}^0 \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$.

Os elétrons disponibilizados nesse processo podem participar de reações de redução capazes de modificar a estrutura ou o estado de oxidação de determinados contaminantes. No caso de compostos organoclorados, essas reações podem favorecer a ruptura de ligações carbono-cloro e processos de descloração. Em relação a determinados contaminantes inorgânicos, podem ocorrer redução, precipitação, adsorção ou imobilização, dependendo da espécie química e das condições ambientais [1].

A transformação do ferro zero-valente em partículas nanométricas amplia consideravelmente a superfície disponível para reação. Essa elevada área superficial específica constitui uma das razões fundamentais para a maior reatividade do nZVI em comparação com materiais de maiores dimensões [1,2]. Contudo, a mesma escala que proporciona elevada reatividade favorece fenômenos como

agregação e transformação superficial, que podem reduzir mobilidade e desempenho ao longo do tempo [2].

3.2. Estrutura e Comportamento das Nanopartículas

As partículas de nZVI são frequentemente descritas mediante uma estrutura constituída por núcleo rico em Fe^0 e camada superficial progressivamente oxidada. O núcleo metálico funciona como fonte de elétrons, enquanto a superfície da partícula participa de processos de adsorção, transferência eletrônica, precipitação e outras interações com o meio.

Após sua introdução em água ou solo, o nZVI não permanece quimicamente inalterado. O material sofre corrosão e oxidação, formando espécies de Fe^{2+} e Fe^{3+} , óxidos e hidróxidos de ferro. A natureza dessas transformações depende de pH, potencial de oxirredução, oxigênio dissolvido, minerais, matéria orgânica e demais espécies presentes no ambiente [1,2].

A reação do ferro com a água pode também produzir hidrogênio: $\text{Fe}^0 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$. Essa reação contribui para a modificação das condições geoquímicas do meio.

3.3. Como São Obtidas as Nanopartículas de Fe^0

A produção do nZVI pode ser realizada por diferentes rotas físicas e químicas. Para fins de remediação ambiental, uma estratégia amplamente empregada consiste na redução química de sais de ferro.

Inicialmente, o ferro encontra-se na forma iônica, por exemplo Fe^{2+} ou Fe^{3+} , dissolvido em solução. Um agente redutor fornece elétrons

suficientes para converter essas espécies ao estado metálico. À medida que o ferro metálico é formado, ocorre nucleação e crescimento das partículas. Quando as condições de síntese são adequadamente controladas, obtêm-se partículas de dimensões nanométricas.

Entre os agentes redutores empregados em rotas convencionais encontra-se o borohidreto de sódio (NaBH_4), capaz de promover rápida redução dos íons de ferro. A síntese exige controle de variáveis como concentração, pH, temperatura, velocidade de adição, agitação e condições de oxidação.

3.4. Agregação e Mobilidade

Uma dificuldade importante é a tendência das partículas de nZVI a formar agregados. Quando nanopartículas individuais se aproximam e se associam, o material pode comportar-se progressivamente como estruturas maiores, diminuindo a superfície efetivamente disponível para reação e reduzindo a mobilidade através dos poros do solo e do aquífero [2].

Consequentemente, produzir partículas muito pequenas não garante que elas permanecerão individualmente dispersas após a aplicação. Esse é um dos motivos pelos quais revestimentos, estabilizantes e materiais de suporte vêm sendo investigados.

3.5. Passivação e Perda de Reatividade

À medida que o Fe^0 reage com água, oxigênio e outras espécies, produtos de corrosão podem acumular-se na superfície da partícula. Essa camada pode dificultar o acesso do contaminante ao núcleo metálico e reduzir a transferência de elétrons. A longevidade

funcional do nZVI depende, assim, não apenas da quantidade inicialmente aplicada, mas também da velocidade com que sua capacidade redutora é consumida ou bloqueada [2].

3.6. Seletividade Eletrônica

Nem todos os elétrons liberados pela oxidação do Fe^0 são necessariamente utilizados na transformação do contaminante-alvo. Reações paralelas podem consumir parte significativa da capacidade redutora do material. Essa questão tem impulsionado modificações do nZVI destinadas a aumentar sua seletividade e reduzir reações improdutivas [5].

Consequentemente, o desenvolvimento tecnológico não deve buscar simplesmente máxima reatividade, mas combinação entre reatividade, seletividade, estabilidade e capacidade de alcançar o contaminante.

3.7. Síntese Verde do NZVI

Rotas convencionais de síntese podem empregar reagentes cujo custo, geração de resíduos ou características ambientais reduzem parte das vantagens pretendidas para uma tecnologia de remediação. Nesse contexto, desenvolveram-se abordagens denominadas síntese verde, nas quais compostos provenientes de plantas ou outras biomassas podem atuar como agentes redutores e estabilizantes.

Estudos demonstraram, por exemplo, a preparação de sistema bimetálico nZVI/Cu utilizando extrato de chá verde, aplicado experimentalmente à remoção de Cr(VI) em águas subterrâneas [6]. Revisão recente demonstra expansão das pesquisas envolvendo

folhas, sementes, cascas, resíduos agrícolas e associação do nZVI a biochar e outros materiais de suporte [7].

Entretanto, a expressão “verde” não deve ser utilizada como sinônimo automático de “sustentável”. Escalabilidade, consumo energético, disponibilidade da biomassa, estabilidade das partículas, geração de resíduos, transporte e desempenho ambiental continuam necessitando de avaliação [7].

3.8. NZVI Suportado em Biochar

Outra estratégia consiste em associar o nZVI a materiais carbonáceos, particularmente biochar. O suporte pode reduzir a agregação das nanopartículas e acrescentar capacidade de adsorção ao sistema. Passa-se, assim, de um mecanismo predominantemente redutor para uma atuação combinada entre adsorção pelo suporte e transformação química pelo nZVI.

A utilização de biochar produzido a partir de resíduos de biomassa também cria potencial conexão entre nanorremediação e economia circular. Contudo, a sustentabilidade precisa ser demonstrada considerando todo o sistema e não presumida apenas em razão da origem do suporte.

4. O CASO BRASILEIRO DE JURUBATUBA: DA TRATABILIDADE À POSSÍVEL APLICAÇÃO EM CAMPO

4.1. Caracterização e Desenho Experimental

Uma referência brasileira particularmente relevante foi desenvolvida por Vinícius Falchi Bernardo no Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, envolvendo ensaio de tratabilidade de

água subterrânea impactada por solventes clorados mediante suspensão de nZVI [4]. O estudo utilizou água subterrânea e material geológico provenientes de área situada em Jurubatuba, município de São Paulo.

Foram utilizadas colunas experimentais preenchidas com material saprolítico proveniente da área contaminada e areia fina quartzosa para comparação. A água subterrânea do horizonte investigado foi introduzida no sistema, permitindo acompanhar condições físico-químicas, contaminantes e produtos ao longo das colunas [4].

4.2. Eficiência Química e Evidências de Descloração

Nas condições experimentais empregadas, foram observados abatimentos das concentrações de etenos clorados da ordem de 85% a 90%, considerando concentrações de entrada da ordem de 10^3 ppb [4]. Simultaneamente, verificaram-se alterações físico-químicas compatíveis com a atuação do ferro zero-valente, incluindo alcalinização e redução do potencial de oxirredução.

Durante o experimento, a concentração de cloreto aumentou de aproximadamente 20 mg/L para 35–40 mg/L, enquanto não foi observada formação de cloreto de vinila nas condições analisadas [4]. O aumento do cloreto é compatível com processos de ruptura de ligações carbono-cloro durante a transformação dos compostos organoclorados.

A ausência observada de cloreto de vinila não autoriza generalização universal; significa apenas que, nas condições específicas daquele ensaio, esse comportamento não foi observado.

4.3. Quando a Química Encontra a Hidrogeologia

Apesar da elevada eficiência química, foram observadas alterações como redução da porosidade, formação de caminhos preferenciais e fenômenos associados à modificação do fluxo no meio poroso [4]. Assim, alta reatividade química não garante distribuição homogênea do agente remediador no aquífero.

A própria dissertação conclui pela possibilidade de avanço para aplicação em campo, condicionada à consideração de variáveis relacionadas à entrega do material e ao tempo de reação necessário à mudança de escala [4].

4.4. Tratabilidade, Piloto e Escala Plena

O caso permite distinguir três níveis sucessivos de evidência: ensaio de tratabilidade, que pergunta se o reagente consegue transformar o contaminante nas condições estudadas; teste piloto, que investiga se o reagente pode ser introduzido e distribuído adequadamente em parcela representativa do ambiente real; e aplicação em escala plena, que avalia se o processo produz redução ambientalmente significativa, segura e persistente.

Na mesma experiência encontram-se elevada eficiência química e limitações físicas potencialmente relevantes à efetividade ambiental. Essa distinção constitui um dos fundamentos para a estrutura conceitual posteriormente organizada no MIANS.

5. DO LABORATÓRIO AO CAMPO: EVIDÊNCIAS INTERNACIONAIS DA APLICAÇÃO DO NZVI

5.1. A Mudança de Escala

A passagem do laboratório para o campo constitui etapa crítica. Revisão de Chen e Qian reuniu dados de 32 áreas submetidas a demonstrações piloto ou aplicações em escala plena, distribuídas em oito países ao longo de aproximadamente 22 anos, evidenciando que o desempenho do nZVI depende da formulação utilizada, do contaminante, das características específicas do local e da metodologia empregada para introdução do material [3].

5.2. Taiwan: Degradação de Cloreto de Vinila

Em Taiwan, experiência piloto em área de aproximadamente 200 m² contaminada por compostos organoclorados foi acompanhada durante seis meses por meio de poços de monitoramento multinível [8]. A eficiência de degradação do cloreto de vinila alcançou aproximadamente 50% a 99% na maioria dos poços avaliados, acompanhada por alterações geoquímicas relacionadas ao ferro, sólidos e condições redox [8].

5.3. República Tcheca: Integração Entre Caracterização, Aplicação e Monitoramento

Em instalação industrial da República Tcheca contaminada por etenos clorados, Lacina et al. acompanharam um processo de remediação durante um ano, compreendendo caracterização da área, testes laboratoriais, aplicação piloto de nZVI e monitoramento pós-aplicação [9]. O estudo reforça a importância da integração entre caracterização do sítio, testes prévios e acompanhamento temporal na transposição da tecnologia para condições reais.

5.4. Chapel Hill: Elevada Remoção do PCE e Formação de Intermediários

Em antiga lavanderia a seco em Chapel Hill, Carolina do Norte, aproximadamente 725 kg de nZVI foram introduzidos no aquífero ao longo de duas semanas [10]. A intervenção produziu quase eliminação do PCE no primeiro mês. Entretanto, concentrações elevadas de cis-1,2-DCE persistiram por aproximadamente 12 meses. A redução de massa estimada foi de 96% para o PCE, mas de 58% quando considerados os etenos totais [10].

Esse contraste demonstra que a avaliação exclusiva do contaminante precursor pode superestimar o resultado ambiental da intervenção.

5.5. Biochar-NZVI e Rebound

Em estudo de campo, a aplicação de nZVI produziu queda acentuada das concentrações nas primeiras 24 horas, seguida por rebound nas duas semanas subsequentes [11]. A utilização posterior de biochar-nZVI apresentou resposta mais prolongada, até aproximadamente 42 dias, atribuída à combinação entre adsorção e redução [11].

O caso introduz distinção fundamental: eficiência imediata não equivale a persistência do benefício.

5.6. Hořice: Baixa Permeabilidade e Tecnologia Combinada

Em Hořice, República Tcheca, foram aplicados aproximadamente 49 kg de nZVI, seguidos por monitoramento e posterior associação a campo elétrico de corrente contínua [12]. Ao longo de seis anos e 32 campanhas, a estratégia combinada apresentou melhor atuação em zonas de baixa permeabilidade, mas acrescentou infraestrutura,

consumo energético e manutenção, incluindo reinstalação periódica de ânodos [12].

O caso demonstra que melhoria da efetividade pode introduzir custos e impactos em outras dimensões da intervenção.

5.7. Síntese Crítica dos Casos

Os casos não estabelecem ranking de eficiência. Sua relevância reside na diversidade dos problemas revelados: alterações geoquímicas, produtos de transformação, rebound, baixa permeabilidade e necessidade de tecnologias auxiliares. Mesmo percentual de remoção não significa necessariamente mesmo benefício ambiental.

6. LIMITAÇÕES, ECOTOXICOLOGIA E DESTINO AMBIENTAL DO NZVI

6.1. O Paradoxo da Nanorremediação

A aplicação in situ do nZVI envolve a introdução deliberada de material altamente reativo para reduzir um passivo ambiental. O agente empregado para reduzir determinado risco não deve produzir impacto secundário capaz de comprometer o benefício obtido [13,14].

6.2. Transformação Ambiental e Mecanismos Potenciais

Depois de introduzido no ambiente, o nZVI sofre corrosão, oxidação, agregação e envelhecimento. O Fe^0 é progressivamente convertido em espécies de Fe^{2+} e Fe^{3+} e em óxidos e hidróxidos de ferro [14,15].

Os efeitos biológicos associados ao nZVI dependem de múltiplas variáveis, incluindo concentração, tamanho e método de preparação das partículas, modificações superficiais, características do meio, organismo exposto, modalidade de aplicação e duração da exposição [13-18]. Entre os mecanismos descritos encontram-se interação com membranas celulares, alterações físico-químicas, espécies de ferro e processos associados ao estresse oxidativo [13-16].

6.3. Microrganismos e Integração com Biorremediação

O nZVI pode exercer efeitos inibitórios ou estimulantes sobre comunidades microbianas, dependendo das condições ambientais e das características do material [13-15]. Em determinadas situações, alterações redox, produção de hidrogênio e redução da toxicidade do contaminante podem favorecer comunidades específicas.

A combinação entre processos químicos e biológicos constitui perspectiva relevante. O nZVI pode realizar transformação inicial de compostos persistentes, enquanto comunidades microbianas podem atuar posteriormente sobre contaminantes residuais ou produtos de transformação [15,17].

6.4. Plantas e Organismos do Solo

Revisões e meta-análises demonstram respostas dependentes da dose e das condições de exposição, incluindo resultados favoráveis e adversos sobre organismos do solo e parâmetros fisiológicos vegetais [16,18]. Isso impede generalizações simples sobre segurança ou toxicidade.

6.5. Imobilização, Risco e Benefício Ambiental Líquido

Para contaminantes inorgânicos, imobilização não equivale a destruição. Alterações posteriores de pH, potencial redox ou atividade microbiológica podem, em determinadas condições, favorecer remobilização [15].

A comparação ambientalmente adequada deve considerar o cenário sem intervenção em relação ao cenário após a intervenção, incluindo seus efeitos secundários. Propõe-se, neste estudo, utilizar o benefício ambiental líquido como conceito integrador qualitativo: benefícios decorrentes da redução do risco da contaminação considerados em conjunto com impactos associados à produção, aplicação, transformação e destino do agente remediador. Não se trata, nesta etapa, de equação matemática validada.

7. MODELO INTEGRADO DE AVALIAÇÃO DA NANORREMEDIAÇÃO SUSTENTÁVEL — MIANS

7.1. Proposição e Natureza Conceitual

A análise da literatura demonstra que eficiência química, transporte, hidrogeologia, ecotoxicologia, ciclo de vida e persistência são perspectivas complementares. A dificuldade surge quando elevada eficiência em uma delas é utilizada, isoladamente, como indicativo de sustentabilidade.

A partir da síntese crítica dessas evidências, propõe-se neste estudo o Modelo Integrado de Avaliação da Nanorremediação Sustentável (MIANS), modelo conceitual exploratório destinado à organização integrada das evidências relevantes para avaliação da sustentabilidade da nanorremediação.

Em sua formulação atual, o modelo não constitui escala quantitativa validada, não estabelece pesos, não define pontos de corte, não produz índice numérico, não substitui avaliação de risco específica e não pressupõe equivalência entre diferentes contaminantes ou ambientes.

7.2. As Cinco Dimensões

- I. Eficiência química: pergunta se o nZVI produz a transformação pretendida e qual é o destino do contaminante. Considera redução de concentração, cinética, dose, produtos, intermediários, mecanismo e utilização da capacidade redutora [4,5,10].
- II. Efetividade ambiental: pergunta se o nZVI consegue alcançar o contaminante e manter atividade suficiente nas condições reais. Considera mobilidade, agregação, passivação, permeabilidade, heterogeneidade, distribuição e contato efetivo [2,4,9,12].
- III. Segurança ecotoxicológica: pergunta se a redução da contaminação produz diminuição do risco ambiental global sem impactos secundários desproporcionais. Considera microbiota, plantas, organismos do solo, produtos de corrosão e transformação [13-18].
- IV. Circularidade e ciclo de vida: pergunta se o benefício produzido permanece ambientalmente justificável quando considerado o ciclo da tecnologia. Considera matérias-primas, síntese, energia, transporte, biomassa, suportes, resíduos, escalabilidade e destino [6,7,11,12].

V. Persistência do benefício ambiental: pergunta se o benefício permanece depois da resposta inicial. Considera rebound, remobilização, longevidade reativa, reaplicação e estabilidade temporal [3,10-12].

7.3. Interdependência e Benefício Ambiental Líquido

As cinco dimensões não constituem compartimentos independentes. Ganhos em uma dimensão podem produzir custos, limitações ou benefícios em outra. Maior mobilidade pode ampliar efetividade e modificar padrões de exposição; estabilizantes podem reduzir agregação e introduzir novos materiais; tecnologias auxiliares podem favorecer transporte e aumentar consumo energético.

Consequentemente, a sustentabilidade não decorre da maximização isolada de cada dimensão, mas da análise integrada das relações, sinergias e possíveis compensações entre elas. O MIANS não deve ser interpretado como simples soma de cinco notas.

O benefício ambiental líquido funciona, nesta primeira formulação, como princípio integrador qualitativo e não como equação operacional.

7.4. Evidência Insuficiente

A ausência de informação sobre determinada dimensão não deve ser interpretada como desempenho positivo nem negativo. Quando não existem dados suficientes, a classificação apropriada é “evidência insuficiente para conclusão”. Essa distinção reduz o risco

de transformar ausência de evidência de dano em evidência de ausência de dano.

7.5. Matriz Conceitual do MIANS

Dimensão	Pergunta fundamental	Exemplos de evidências
I. Eficiência química	O contaminante foi efetivamente transformado/removido?	Concentração, cinética, produtos, intermediários
II. Efetividade ambiental	O agente alcançou e atuou no contaminante em condições reais?	Mobilidade, distribuição, permeabilidade, agregação
III. Segurança ecotoxicológica	O risco ambiental global foi reduzido?	Microbiota, plantas, organismos, produtos de transformação
IV. Circularidade e ciclo de vida	Qual o custo ambiental da tecnologia utilizada?	Matéria-prima, síntese, energia, biomassa, resíduos, destino
V. Persistência	O benefício permaneceu?	Monitoramento, rebound, remobilização, reaplicação

7.6. Aplicação Conceitual Preliminar Ao Caso de Jurubatuba

No caso de Jurubatuba, a Dimensão I apresenta evidências favoráveis de eficiência química; a Dimensão II revela limitações que exigem avaliação na mudança de escala; e as Dimensões III, IV e V não dispõem de dados suficientes para conclusão abrangente em campo [4]. O exercício demonstra uma função relevante do modelo: identificar não apenas aquilo que se conhece, mas aquilo que ainda precisa ser conhecido antes de uma afirmação de sustentabilidade.

7.7. Limites e Agenda Futura

As cinco dimensões resultam de síntese crítica da literatura selecionada, e não de validação empírica independente. Ainda não se sabe se possuem a mesma relevância em diferentes contextos, se devem receber pesos distintos ou se existem critérios mínimos não compensáveis. Essas questões constituem agenda de investigação futura.

Uma possível evolução compreende definição de indicadores, operacionalização das variáveis, validação de conteúdo por especialistas, aplicação a casos documentados, investigação de pesos e relações entre dimensões, análise multicritério e de sensibilidade, aplicação prospectiva e validação externa.

O MIANS não pretende substituir a análise ambiental específica de cada área contaminada por classificação abstrata de sustentabilidade. Sua finalidade é fornecer arquitetura comum de investigação. Em síntese: funciona quimicamente? Funciona no ambiente real? Reduz o risco ambiental global? Seu ciclo de vida é ambientalmente justificável? O benefício permanece?

8. DISCUSSÃO

A literatura examinada demonstra que o nZVI possui capacidade relevante de promover transformação ou imobilização de diferentes contaminantes [1,2]. Entretanto, a questão científica mais abrangente consiste em estabelecer em quais condições essa capacidade química se converte em benefício ambiental efetivo, seguro e persistente.

O estudo de Jurubatuba ilustra a diferença entre eficiência e efetividade: a elevada tratabilidade química coexistiu com alterações de porosidade e fluxo capazes de influenciar a entrega do agente remediador [4]. Eficiência química responde se a reação funciona; efetividade ambiental responde se a reação consegue acontecer onde precisa acontecer.

Os estudos internacionais reforçam essa conclusão. Taiwan evidencia alterações geoquímicas [8]; o caso tcheco acompanhado por Lacina et al. destaca a integração entre caracterização e monitoramento [9]; Chapel Hill mostra a relevância dos intermediários [10]; o estudo com biochar-nZVI evidencia rebound e persistência [11]; e Hořice revela o papel da baixa permeabilidade e os custos adicionais de tecnologias auxiliares [12].

O percentual de remoção permanece importante, mas não suficiente. Duas intervenções com redução numérica semelhante podem apresentar destinos químicos, persistência, distribuição espacial e impactos secundários distintos. A seletividade eletrônica também mostra que máxima reatividade não é sinônimo de desempenho ambiental ótimo [5].

A segurança ecotoxicológica deve ser interpretada comparativamente, considerando o risco da área sem intervenção em relação ao risco residual e aos impactos decorrentes da intervenção. A literatura registra respostas biológicas dependentes da formulação, dose e ambiente [13-18].

As rotas de síntese verde e o uso de biochar introduzem oportunidades para circularidade, mas origem biológica não equivale automaticamente a sustentabilidade [6,7]. O tempo

também integra a sustentabilidade, pois rebound e reaplicações modificam recursos, custos e interferências ambientais [11].

Uma consequência central do MIANS é reconhecer que suas cinco dimensões podem apresentar sinergias e compensações. Isso explica por que o modelo, nesta fase, não deve ser convertido em soma simples de pontuações.

A categoria “evidência insuficiente” também constitui resultado metodológico relevante: quando um estudo demonstra eficiência, mas não avalia ecotoxicidade, não se pode concluir segurança; apenas que a segurança não foi suficientemente determinada.

O MIANS não pretende substituir protocolos regulatórios, avaliações de risco ou modelos hidrogeológicos. Sua função é organizar dimensões frequentemente fragmentadas na literatura e explicitar lacunas de conhecimento.

O presente estudo possui limitações decorrentes de sua natureza bibliográfica e documental, da heterogeneidade dos trabalhos analisados e da ausência de protocolo de revisão sistemática. O MIANS ainda não foi submetido a validação de conteúdo por especialistas, análise estatística, aplicação multicritério ou validação externa. Sua transformação em instrumento quantitativo deve ocorrer somente se evidências posteriores demonstrarem que essa operacionalização preserva adequadamente a complexidade das cinco dimensões.

9. CONCLUSÃO

O ferro zero-valente nanométrico apresenta elevado potencial para a remediação de águas subterrâneas contaminadas, particularmente

em razão de sua elevada área superficial, capacidade redutora e possibilidade de aplicação in situ.

A síntese crítica realizada demonstra, contudo, que eficiência química não equivale automaticamente a efetividade ambiental e nenhuma delas, isoladamente, demonstra sustentabilidade.

O caso brasileiro de Jurubatuba ilustra essa distinção, enquanto as experiências internacionais acrescentam variáveis como alterações geoquímicas, formação de intermediários, heterogeneidade do meio, baixa permeabilidade e rebound.

A hipótese formulada é, portanto, corroborada pela síntese crítica: a elevada eficiência química do nZVI constitui condição relevante, mas insuficiente, para caracterizar uma intervenção como ambientalmente sustentável.

A partir dessa constatação, propõe-se o Modelo Integrado de Avaliação da Nanorremediação Sustentável — MIANS, estruturado em cinco dimensões: eficiência química; efetividade ambiental; segurança ecotoxicológica; circularidade e ciclo de vida; e persistência do benefício ambiental.

O modelo incorpora o benefício ambiental líquido como princípio integrador qualitativo e reconhece explicitamente a categoria “evidência insuficiente para conclusão” quando determinada dimensão não estiver adequadamente documentada.

O MIANS é apresentado como modelo conceitual exploratório, e não como escala quantitativa validada ou instrumento normativo. Sua eventual transformação em instrumento de apoio à decisão dependerá da definição de indicadores, validação de conteúdo,

investigação das relações entre dimensões, análise multicritério, análise de sensibilidade e aplicação empírica a diferentes áreas contaminadas.

O estudo permite responder à questão de pesquisa: o nZVI pode conciliar eficiência química, efetividade em campo e segurança ambiental, mas essa conciliação não decorre automaticamente das propriedades do nanomaterial e precisa ser demonstrada no contexto específico de cada intervenção.

Assim, a principal contribuição analítica situa-se na passagem da eficiência de remoção para a demonstração integrada do benefício ambiental líquido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Fu F, Dionysiou DD, Liu H. The use of zero-valent iron for groundwater remediation and wastewater treatment: a review. *J Hazard Mater.* 2014;267:194-205. doi:10.1016/j.jhazmat.2013.12.062.
2. Tosco T, Petrangeli Papini M, Cruz Viggi C, Sethi R. Nanoscale zerovalent iron particles for groundwater remediation: a review. *J Clean Prod.* 2014;77:10-21. doi:10.1016/j.jclepro.2013.12.026.
3. Chen H, Qian L. Performance of field demonstration nanoscale zero-valent iron in groundwater remediation: a review. *Sci Total Environ.* 2024;912:169268. doi:10.1016/j.scitotenv.2023.169268.
4. Bernardo VF. Ensaio de bancada para avaliação de tratabilidade de água subterrânea impactada por solventes

clorados com suspensão de nano ferro zero valente (nZVI) [dissertação]. São Paulo: Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências; 2024. doi:10.11606/D.44.2024.tde-21032024-084005.

5. Zhou L, Li Z, Yi Y, Tsang PKE, Fang Z. Increasing the electron selectivity of nanoscale zero-valent iron in environmental remediation: a review. *J Hazard Mater.* 2022;421:126709. doi:10.1016/j.jhazmat.2021.126709.
6. Zhu F, Ma S, Liu T, Deng X. Green synthesis of nano zero-valent iron/Cu by green tea to remove hexavalent chromium from groundwater. *J Clean Prod.* 2018;174:184-190. doi:10.1016/j.jclepro.2017.10.302.
7. Keshta BE, Dhiss T, Yu J, Kong Q, Javeria H, Abou El-Reash YG, El-Attar HG, Koheil H, Al-Farraj ES, Goda MN, Cid-Samamed A. Eco-friendly synthesis of nZVI for water remediation: latest developments and environmental applications. *RSC Adv.* 2026;16:27453-27480. doi:10.1039/D6RA02489K.
8. Wei YT, Wu SC, Chou CM, Che CH, Tsai SM, Lien HL. Influence of nanoscale zero-valent iron on geochemical properties of groundwater and vinyl chloride degradation: a field case study. *Water Res.* 2010;44(1):131-140. doi:10.1016/j.watres.2009.09.012.
9. Lacina P, Dvorak V, Vodickova E, Barson P, Kalivoda J, Goold S. The application of nano-sized zero-valent iron for in situ remediation of chlorinated ethylenes in groundwater: a field case study. *Water Environ Res.* 2015;87(4):326-333. doi:10.2175/106143015X14212658613596.

10. Jordan M, Shetty N, Zenker MJ, Brownfield C. Remediation of a former dry cleaner using nanoscale zero valent iron. *Remediation*. 2013;24(1):31-48. doi:10.1002/rem.21376.
11. Qian L, Chen Y, Ouyang D, Zhang W, Han L, Yan J, Kvapil P, Chen M. Field demonstration of enhanced removal of chlorinated solvents in groundwater using biochar-supported nanoscale zero-valent iron. *Sci Total Environ*. 2020;698:134215. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.134215.
12. Černíková M, Nosek J, Černík M. Combination of nZVI and DC for the in-situ remediation of chlorinated ethenes: an environmental and economic case study. *Chemosphere*. 2020;245:125576. doi:10.1016/j.chemosphere.2019.125576.
13. Semerád J, Cajthaml T. Ecotoxicity and environmental safety related to nano-scale zerovalent iron remediation applications. *Appl Microbiol Biotechnol*. 2016;100(23):9809-9819. doi:10.1007/s00253-016-7901-1.
14. Lefevre E, Bossa N, Wiesner MR, Gunsch CK. A review of the environmental implications of in situ remediation by nanoscale zero valent iron (nZVI): behavior, transport and impacts on microbial communities. *Sci Total Environ*. 2016;565:889-901. doi:10.1016/j.scitotenv.2016.02.003.
15. Xie Y, Dong H, Zeng G, Tang L, Jiang Z, Zhang C, Deng J, Zhang L, Zhang Y. The interactions between nanoscale zero-valent iron and microbes in the subsurface environment: a review. *J Hazard Mater*. 2017;321:390-407. doi:10.1016/j.jhazmat.2016.09.028.

16. Zhang S, Yi K, Chen A, Shao J, Peng L, Luo S. Toxicity of zero-valent iron nanoparticles to soil organisms and the associated defense mechanisms: a review. *Ecotoxicology*. 2022;31(6):873-883. doi:10.1007/s10646-022-02565-z.
 17. Liu N, Liu J, Wang H, Li S, Zhang WX. Microbes team with nanoscale zero-valent iron: a robust route for degradation of recalcitrant pollutants. *J Environ Sci (China)*. 2022;118:140-146. doi:10.1016/j.jes.2021.12.037.
 18. Cui X, Hou D, Tang Y, Liu M, Qie H, Qian T, Xu R, Lin A, Xu X. Effects of the application of nanoscale zero-valent iron on plants: meta analysis, mechanism, and prospects. *Sci Total Environ*. 2023;900:165873. doi:10.1016/j.scitotenv.2023.165873.
-

¹ Professor Douyem Biotecnologia pela Universidade Federal do Acre
e Rede Bionorte