

Biorremediação: micro-organismos x resíduos

Aline Silvestre da Silva¹, Giliaria de Almeida Andrizen¹, Hellyezer Vilela de Morais¹,
Letícia de Andrade¹, Luana Bertholdi Bernadino¹, Luíz Antônio dos Santos¹,
Marcella Ramos Machado¹, Viviane Valadares Oliveira¹, Marcela Ferreira Paes²

¹ Graduandos do Instituto Federal do Espírito Santo, Vila Velha, ES

² Instituto Federal do Espírito Santo, Vila Velha, ES

Autor para correspondência: Alinesilvestre9@gmail.com

Palavras-chave: biorremediação, aplicações da biorremediação, técnicas de biorremediação, impactos sociais da biorremediação

A biorremediação é o processo através do qual se faz uso de micro-organismos ou plantas capazes de degradar bioquimicamente compostos e substâncias contaminantes para a limpeza ou descontaminação de áreas ambientais afetadas por poluentes diversos, visando promover a restauração do equilíbrio ecológico do ambiente afetado, proteger as espécies e buscar a preservação da cadeia alimentar, em todos os seus níveis tróficos. Entretanto, não se pode esperar que a ação dos organismos seja imediata, uma vez que todo ser vivo tem sua ação condicionada às próprias condições encontradas no local prejudicado. O trabalho das empresas de biotecnologia tem se concentrado na pesquisa e no desenvolvimento genético desses organismos, buscando modificar seus genes e aumentar sua eficiência despoluidora.

Sendo a biorremediação um processo que envolve a biotecnologia e a possibilidade de manipulação genética dos organismos ou utilização de organismos exóticos ao ambiente natural, o tema da biorremediação vem sendo debatido constantemente no intuito de avaliar os prós e os contras dessa técnica, abordados neste trabalho.

BIORREMEDIAÇÃO: CONCEITO E FINALIDADE

Nas últimas décadas, as atividades industriais dos setores petrolífero, agrícola, metalúrgico, farmacêutico e têxtil têm se intensificado cada vez mais, gerando novos produtos, como os polímeros, os agrotóxicos, o minério, os fármacos e os corantes. Estes produtos, muitas vezes, requerem ou geram substâncias desconhecidas e estranhas ao sistema funcional dos seres vivos, chamadas de **xenobióticos**. Os xenobióti-

cos podem ser tóxicos e causar danos irreparáveis ao ser humano e ao meio ambiente devido aos seus produtos de degradação que resultam em efeitos nocivos e/ou mutagênicos, podendo levar à eliminação seletiva de indivíduos e acarretar modificações na estrutura ecológica e funcional da comunidade biológica.

Por estas razões há, atualmente, uma grande preocupação em desenvolver biotecnologias para descontaminar ambientes poluídos por xenobióticos. Os processos biológicos de

Xenobióticos - (*xenos*, do grego = estrangeiro), compostos químicos estranhos ao organismo humano.

descontaminação, enquadrados na categoria de **biorremediação** utilizam, geralmente, micro-organismos autóctones (do próprio ambiente) ou introduzidos (em estado nativo ou geneticamente modificados, foco deste artigo) com capacidade de biodegradar xenobióticos, resultando em produtos de degradação com estrutura menos recalcitrante em relação à molécula original, ou na mineralização do xenobiótico, produzindo compostos químicos simples, como: CO₂, H₂O, NH₃, SO₄⁻², PO₄⁻².

Os micro-organismos geneticamente modificados são produtos da tecnologia do DNA recombinante, que oferece a possibilidade de contornar algumas das limitações dos processos de biorremediação, principalmente aquelas relacionadas ao tempo de degradação do poluente. A manipulação genética pode permitir o aumento da taxa de degradação através de diferentes estratégias, tais quais: a inserção de genes que codificam enzimas catabólicas específicas para a molécula-alvo, que conferem resistência a compostos inibitórios no ambiente ou aos produtos de degradação da molécula-alvo, e que auxiliam na solução de problemas ligados à baixa concentração do poluente, como, por exemplo, aumento da captação/absorção do composto pela célula ou da expressão da enzima.

O PROCESSO – COMO FUNCIONA?

As plantas e micro-organismos tais como bactérias, fungos e leveduras são utilizados no processo de biorremediação, que biodegradam os xenobióticos de diferentes formas. Eles podem catalizar os xenobióticos através de enzimas específicas, transformando-os em compostos químicos mais simples que servem como **co-metabolismo** . O produto deste co-metabolismo pode servir como substrato para transformações enzimáticas de outras espécies microbianas, possibilitando a degradação completa do xenobiótico, oferecendo menos riscos para os seres vivos que fazem parte desse habitat e reduzindo a quantidade de poluentes no ecossistema. Porém, se a estrutura química do xenobiótico for semelhante à estrutura de moléculas naturais, tais como **lignina** ,

terpenos e **esteróides** , eles são totalmente metabolizados por micro-organismos do ambiente. Ou ainda, podem ser fixados nas estruturas dos micro-organismos, como por exemplo, a *Cupriavidus metallidurans CH34*, que foi geneticamente modificada para aumentar a capacidade de agregar metais pesados em sua membrana.

Contudo, atualmente não existem ou ainda não foram descobertas rotas enzimáticas catabólicas capazes de degradar todos os compostos sintetizados pelo homem. Dessa forma, a engenharia genética tornou-se uma ferramenta fundamental para os processos de biorremediação, nos quais, cada vez mais, micro-organismos são modificados acrescentando-se genes de interesse, tornando-os capazes de catabolizar compostos específicos. Porém, existem limitações técnicas e éticas que dificultam a realização de tal processo. Um dos problemas principais é a instabilidade dos genes exógenos inseridos nos micro-organismos, principalmente quando inseridos em forma de **plasmídeos** , quando poderá haver uma segregação deficiente, ou seja, parte da população, gerada após um ciclo celular, poderá não ter o plasmídeo. Após a modificação genética desses organismos, eles se tornam capazes de executar os mesmos procedimentos de degradação de xenobióticos que os organismos não modificados conforme descrito acima.

É válido ressaltar que para o desenvolvimento dos micro-organismos e para que desenvolvam e desempenhem as reações esperadas, é necessário oferecer condições adequadas de crescimento, que incluem controle de temperatura e pH adequados; e quantidade de nutrientes e oxigênio suficientes para o bom desenvolvimento desses organismos. Nesse contexto, o processo torna-se muito dispendioso, principalmente pelo fato de a degradação dos compostos ocorrer, na maioria das vezes, no meio ambiente, onde o controle de tais condições é um grande desafio para os pesquisadores.

Ademais, biorremediação é uma tecnologia complexa e sua implementação ocorre em etapas envolvendo a análise do ambiente a ser descontaminado (solo, sedimento, aquífero), da caracterização do contaminante (natureza do composto, distribuição, quantidade), dos riscos e da legislação.

Esteróides - conjunto de moléculas lipídicas que tem em comum uma estrutura aromática básica de quatro anéis de hidrocarboneto.

Terpenos é um grupo de compostos, usualmente de pequena massa molecular, e que, dada a sua insolubilidade em água e o seu parentesco longínquo com os esteróides são incluídos no grupo dos lipídeos.

Biorremediação é o processo através do qual se faz uso de micro-organismos ou plantas capazes de degradar bioquimicamente compostos e substâncias contaminantes para a limpeza ou descontaminação de áreas ambientais afetadas por poluentes diversos, visando promover a restauração do equilíbrio ecológico do ambiente afetado, proteger as espécies e buscar a preservação da cadeia alimentar, em todos os seus níveis tróficos.

Plasmídeos são pequenas moléculas circulares de DNA, presentes em determinadas bactérias, capazes de se replicarem independentemente do DNA cromossômico.

Co-metabolismo é uma transformação metabólica, cujo composto é apenas parcialmente degradado, por ação de uma ou mais enzimas de uma rota catabólica sem que o produto resultante contribua para a sobrevivência do microrganismo.

Lignina (do latim *lignum* que significa madeira), é uma molécula tridimensional amorfa observada nas plantas terrestres, em associação com a celulose na parede celular que tem a propriedade de conferir rigidez, impermeabilidade e resistência contra ataques biológicos aos tecidos vegetais.

ETAPAS DE IMPLEMENTAÇÃO DE UM PROCESSO DE BIORREMEDIÇÃO

O processo de biorremediação consiste de etapas complexas que incluem análise do ambiente contaminado, caracterização do xenobiótico, tipo de técnica que será implantada e legislação vigente, conforme descrito na figura 1.

Com isso, os parâmetros físicos, químicos e biológicos relacionados à degradação, requerem a condução de um estudo detalhado, com uma visão interdisciplinar, envolvendo profissionais de diferentes áreas de conhecimento, como genética, microbiologia, biologia molecular, bioquímica, química orgânica e analítica como também engenharia, para que a técnica utilizada possa obter um ótimo resultado.

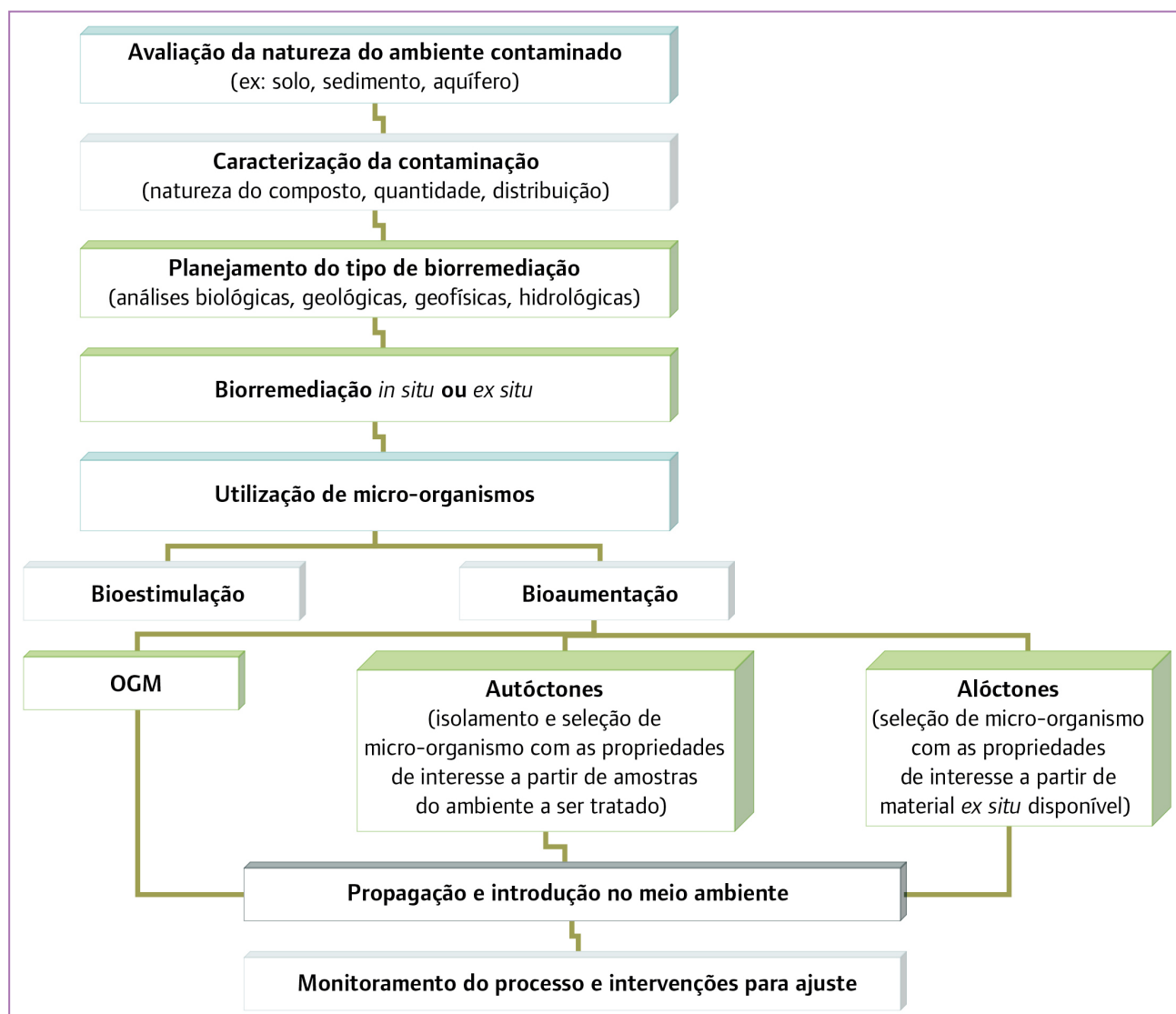


Figura 1.

Fases de implementação da biorremediação. A biorremediação é um processo complexo que necessita de planejamento adequado das metodologias que serão empregadas para a descontaminação do local. Ao longo do processo é necessário monitoramento e eventuais ajustes para a obtenção do resultado desejado. Fonte: Adaptado de GAYLARDE *et al*, 2005.

APLICAÇÕES DA BIORREMEDIAÇÃO

As técnicas de biorremediação são classificadas de acordo com o local onde o procedimento é realizado, sendo denominadas *in situ* e *ex situ*. A biorremediação *in situ* é caracterizada pelo tratamento do xenobiótico no local contaminado, sendo classificados como biorremediação passiva, bioestimulação e bioaumentação. Já na *ex situ*, há necessidade de remoção do material contaminado e seu transporte até a unidade de tratamento como, por exemplo, os biorreatores, **biopilhas** e compostagem.

Além das técnicas supracitadas, destaca-se o processo conhecido como **landfarming** sendo executado *in situ*, quando o tratamento é realizado no local onde ocorreu a contaminação, e *ex situ*, quando o material contaminado é removido e a técnica é executada em outro local.

As possíveis aplicações destas técnicas são em águas superficiais e subterrâneas, solos, aterros, áreas de contenção e resíduos industriais e urbanos, a fim de eliminar os xenobióticos presentes em excesso no meio ambiente. Dentre eles, destacam-se o petróleo bruto, hidrocarbonetos oriundos do petróleo, óleo diesel, solventes diversos, lodo de esgoto urbano e industrial, e outros compostos xenobióticos ou **biogênicos**.

TÉCNICAS DE BIORREMEDIAÇÃO

In situ

Biorremediação passiva: consiste na degradação natural por micro-organismos presentes no solo. O contaminante permanece no local e através de processos naturais, como a biodegradação, o ambiente é descontaminado. Por depender de processos naturais, a biorremediação passiva é muito lenta, sendo necessário o uso de um conjunto de técnicas.

Bioestimulação: consiste na adição de nutrientes no ambiente, a fim de induzir o crescimento da população nativa e acelerar naturalmente a biodegradação, diminuindo assim, o tempo da biodegradação do ambiente.

Bioaumentação: consiste na adição de micro-organismos exógenos no ambiente, com o objetivo de aumentar a microbiota nativa, esta técnica faz com que a biodegradação seja mais rápida, pois reduz o período de adaptação dos micro-organismos que antecede a degradação. No entanto, a aplicação desta técnica deve ser analisada cuidadosamente, pois a inoculação de micro-organismos exógenos no ambiente pode gerar riscos desconhecidos. Desta forma, a utilização de técnicas que aplicam apenas o uso da microbiota nativa, em geral, são mais eficazes.

Ex situ

Biorreator: são tanques fechados onde o solo contaminado é misturado com água para formar uma suspensão de sólidos. A formação da suspensão no interior do biorreator possibilita o aumento dos contaminantes aos micro-organismos degradadores. Além disso, as condições dentro do biorreator são otimizadas para aumentar ao máximo o crescimento microbiano.

Biopilhas: consiste na disposição do material contaminado em montes denominado biopilhas. A fim de realizar esta técnica, o solo é escavado e preparado em biopilhas, em seguida, são adicionados nutrientes e injetado ar com o objetivo de estimular a atividade microbiana nativa e aumentar a biodegradação dos contaminantes.

Compostagem: é o uso de microrganismos termofílicos aeróbios em pilhas construídas para degradar o contaminante. Os micro-organismos decompõem a matéria orgânica em nutrientes simples. Esta técnica reduz a quantidade de resíduos destinados aos aterros sanitários e potencializa o seu reaproveitamento.

In situ e Ex situ

Landfarming: os microrganismos presentes na superfície do solo são estimulados a degradar os contaminantes, transformando-os em substâncias estabilizadas, como água e CO₂, isto ocorre pela aração, **gradagem** e aeração do solo. Esta técnica pode ser realizada *ex situ*, quando o solo contaminado é removido para outro local e o **landfarming** é operado ou *in situ*, quando a descontaminação do solo é no local onde o mesmo foi contaminado.

Biopilhas - técnica que envolve a disposição do material contaminado em pilhas e a estimulação da atividade aeróbica microbiana através de aeração e/ou adição de nutrientes e aumento da umidade do solo, o que resulta na redução de concentrações de hidrocarbonetos de petróleo presentes no solo através da biodegradação.

Landfarming é um método de biorremediação que consiste na degradação biológica de resíduos em uma camada superior de solo, que é periodicamente revolvida para haver aeração.

Biogênicos – Bio corresponde a vida; gênico vem de gênese (criação, geração), portanto o significado de biogênico é gerar vida por si mesmo, ou o momento de transferir vida a algo. Portanto, são produzidos pela ação de organismo vivo.

Gradagem é a etapa de preparação do solo que antecede a aração.

Sequência Palindrômica

é uma sequência de pares de bases do DNA, que é lida igualmente, de frente para trás e de trás para frente. Tais sequências compõem os sítios de reconhecimento e clivagem das enzimas de restrição.

Vetor de clonagem

- um agente, como fago ou plasmídeo, no qual um segmento de DNA diferente será inserido e utilizado para transformar as células hospedeiras, na técnica de construção de DNA recombinante.

Cosmídeos são moléculas de DNA circulares extracromossomais que combinam as vantagens de um plasmídeo com a de um bacteriófago. O limite de clonagem é de 35 a 50 kb.

Cromossomo YAC é um vetor de clonagem na forma de um cromossomo artificial de levedura, construído com o uso de elementos cromossômicos de levedura, incluindo telômeros, centrômeros, origem de replicação e genes marcadores. São utilizados para clonar longos segmentos de DNA eucariótico.

TECNOLOGIA DO DNA RECOMBINANTE

A engenharia genética, também conhecida como tecnologia do DNA recombinante, é uma metodologia que utiliza ferramentas biotecnológicas para purificar, amplificar, modificar e expressar sequências de genes específicos de forma precisa. Os modelos, geralmente, são desenvolvidos *in vivo*.

Os modelos *in vivo* são construídos pela inserção de um gene de interesse em um **vetor de clonagem**, que pode ser um plasmídeo, um **cosmídeo** ou um cromossomo **Yac**, por exemplo. O princípio básico da

metodologia é de copiar e colar. Para tanto, separa-se o gene de interesse utilizando enzimas de restrição (recortam **sequências palindrômicas** específicas do DNA). A mesma enzima de restrição cliva a molécula de DNA do vetor e juntamente com a DNA ligase torna o gene de interesse parte integrante do material genético do vetor, formando um DNA recombinante. O plasmídeo recombinante passa a se inserir em outras bactérias e, através do processo de transcrição e tradução, a proteína de interesse passa a ser expressa.

A técnica de confecção de moléculas de DNA recombinante acima descrita está esquematizada na Figura 2.

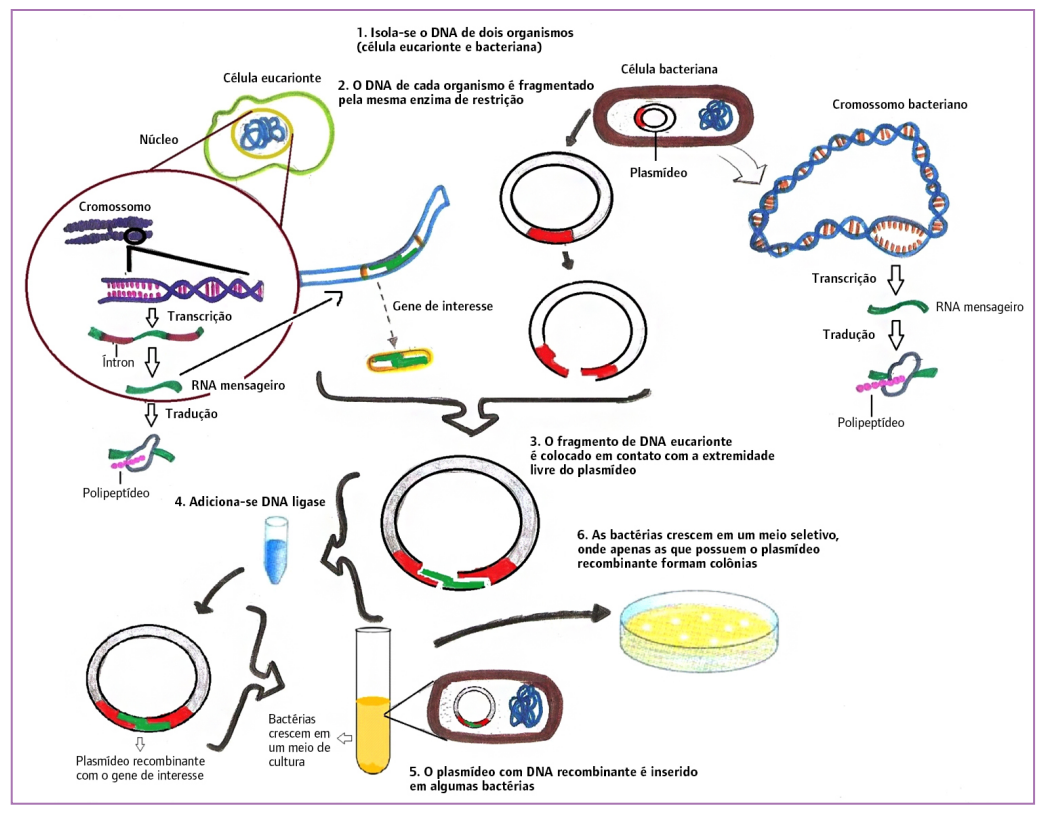


Figura 2.

Esquema da produção de um DNA recombinante. A incorporação de genes exógenos em uma bactéria geralmente é feita via plasmídeo, e pode resultar na manutenção do DNA exógeno na forma de plasmídeo ou na inserção dos genes no cromossomo bacteriano. Através do processo de transcrição e tradução, o produto gênico pode ser isolado e utilizado para pesquisa ou comercialização.

Atualmente, não podemos mais imaginar a nossa rotina sem tais metodologias. Por exemplo, essas técnicas são utilizadas para a produção de medicamentos, tais como a insulina, vacina contra a hepatite B, hormônio de crescimento (GH) e **eritropoetina**; produção de enzimas utilizadas em produtos de limpeza, alimentação (**quimosina**) e produção de papel; produção de combustível de terceira geração; e na biorremediação de áreas degradadas, foco deste artigo.

BIORREMEDIAÇÃO E OS IMPACTOS SOCIAIS

Normalmente, são despejados no esgoto urbano gorduras de diversos tipos e uma série de produtos de uso doméstico tais como: sabões, desinfetantes, águas sanitárias, sodas cáusticas, xampus, sabonetes, entre outros, que paralisam a biodegradação natural da matéria orgânica contida nessas águas ao eliminar os micro-organismos que realizam essa importante função. No caso de indústrias, são despejados volumes na maioria das vezes incompatíveis com as dimensões do sistema de tratamento juntamente com outros

subprodutos dos processos de produção, que desestabilizam a biodegradação natural.

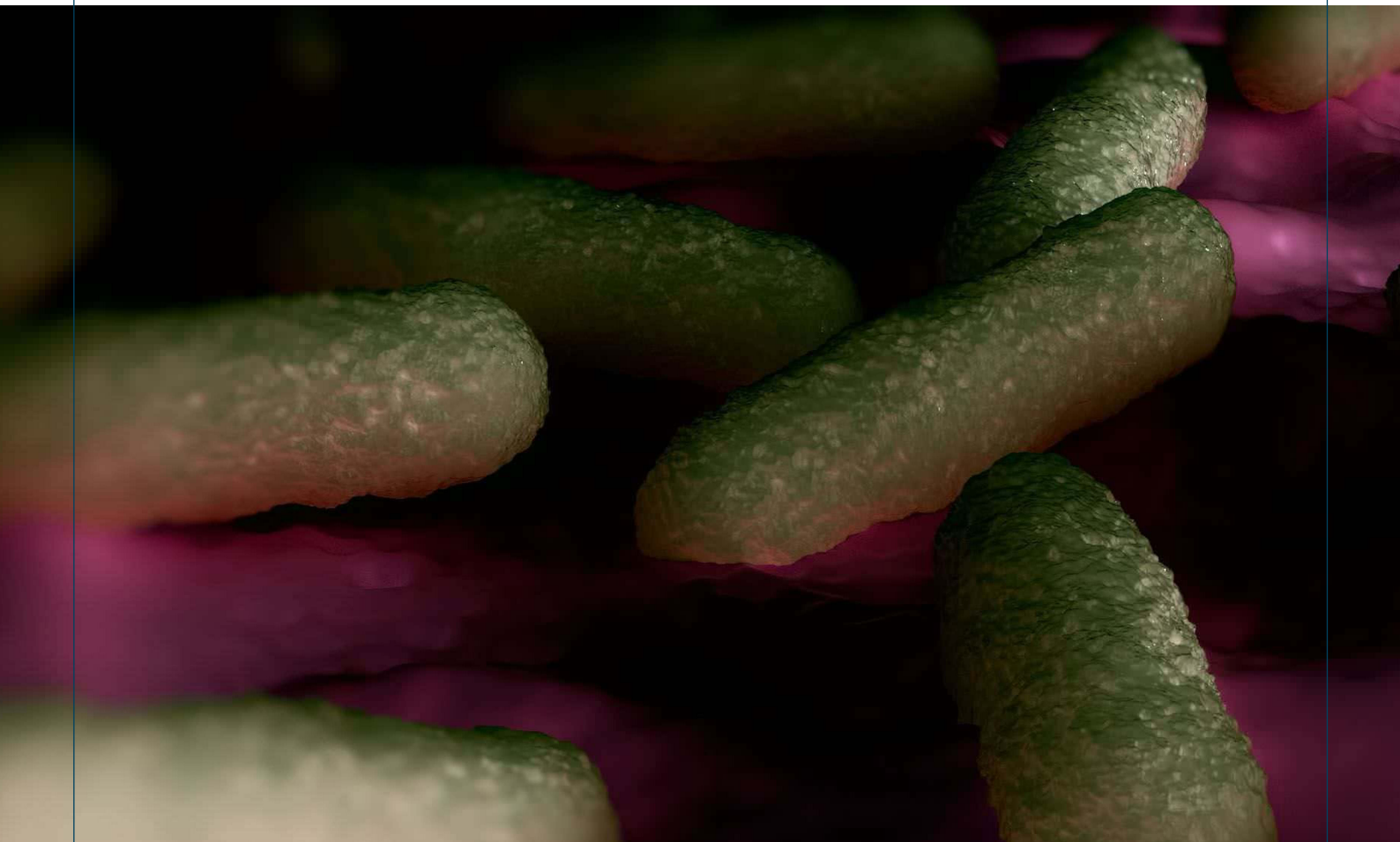
As consequências são o acúmulo de gorduras, entupimentos, mau cheiro e transbordamentos de fossas, caixas de gordura e sumidouros, além de altas despesas de manutenção. Porém, devido às novas técnicas oferecidas atualmente, como o uso de enzimas sintetizadas por micro-organismos com alto poder de degradar substâncias nocivas, esses problemas já podem ser sanados eficazmente. Vários biorremediadores reúnem uma mistura líquida de microrganismos naturais, enzimas e **surfactantes** para degradar a matéria orgânica de fossas, ralos, caixas de gordura e tubulações, limpando e desodorizando. Sua aplicação é extremamente simples, seja manualmente ou por meio de bomba dosadora programável, não oferecendo riscos à saúde humana.

Diante do exposto, observa-se que os benefícios da utilização de micro-organismos no processo de biorremediação são inúmeros diante dos impactos ambientais gerados principalmente pelos processos de incineração, aterro e lavagem do solo. Na indústria,

Eritropoetina (EPO) é uma glicoproteína produzida principalmente nos rins, principal regulador da eritopoese.

Quimosina, antigamente chamada de renina, é enzima do estômago que ocorre principalmente em crianças e cliva especificamente a ligação peptídica Phe-Met na proteína do leite k-caseína, provocando assim a coagulação do leite e facilitando a digestão.

Surfactante - (derivada da expressão em inglês *surface active agent*, significa agente de atividade superficial) é um composto caracterizado pela capacidade de alterar as propriedades superficiais e interfaciais de um líquido.



por exemplo, os processos tornam-se mais limpos, através do uso de plantas de biodegradação que atuam nos compostos mais difíceis; na agricultura, promove a rápida decomposição de materiais como a amônia, nitrito e nitrato. Nos setores municipais, estabilizam condições através de eliminação de odores e redução de formação de espuma em estações de águas residuais e de tratamento de esgoto; nos setores comerciais previnem o entupimento das caixas de gordura e fossas ocasionados por graxas, óleos, gorduras e proteínas fibrosas; na agricultura aceleram, estabilizam e desodorizam a compostagem de resíduos animais, lodo de esgoto, polpa de alimentos, dentro outros, e nas residências aceleram a destruição de compostos causadores de odor e outros materiais em sistemas sépticos.

A avaliação do processo de biorremediação obedece a alguns critérios, portanto é preciso considerar a eficiência da remoção dos poluentes, a possibilidade de se promover a recuperação de forma economicamente viável e ecologicamente aceitável, sem resíduos indesejáveis e deve ser considerada a rapidez de

todo o processo de remediação do sistema.

É válido considerar que a técnica de biorremediação tem contribuído nos últimos anos para a recuperação de ambientes degradados ou prejudicados devido à intensificação da atividade humana, podendo ser utilizada para o tratamento de aterros sanitários e controlados, lixões, resíduos de petróleo, efluentes e solos contaminados, minimizando os impactos negativos no meio ambiente e na reversão do quadro crítico. Portanto, é fundamental a disponibilização de recursos para pesquisas e aperfeiçoamento de novas técnicas que possibilitem um resultado ainda mais eficiente, eficaz e de baixo custo.

REFERÊNCIAS

GAYLARDE, C. C.; BELLINASSO, M. L.; MANFIO, G. P. Biorremediação: Aspectos biológicos e técnicos da biorremediação de xenobióticos. *Biotecnologia ciência & desenvolvimento*, n.34, p. 36-43, 2005. Disponível em: < www.biotecnologia.com.br/revista/bio34/biorremediacao_34.pdf> Acessado em 15/12/2015

PARA SABER MAIS

JACQUES, R. J. S.; BENTO, F. M.; ANTONIOLLI, Z. I.; CAMARGO, F. A. O. Biorremediação de solos contaminados com hidrocarbonetos aromáticos policíclicos. *Cienc. Rural [online]*, vol.37, n.4, pp. 1192-1201, 2007. Disponível em: <[dx.doi.org/10.1590/S0103-84782007000400049](https://doi.org/10.1590/S0103-84782007000400049)> Acessado em 04/01/2016

PELOGGIA, A. A metanização de resíduos sólidos orgânicos. Disponível em: <www.arquiteturadovale.com/colunas.php?id=MTkHYPERLINK "http://arquiteturadovale.com/colunas.php?id=MTk="=> Acessado em 20/01/2016

PEREIRA, A. R. B.; FREITAS, D. A. F. Uso de microrganismos para a biorremediação de ambientes impactados. *Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, v.6, n.6, p. 975 – 1006, 2012.

ROSA, A. H.; FRACETO, L. F.; MOSCHINI-CARLOS, V. *Meio ambiente e sustentabilidade*. 1ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2012. 412 p.

SCHENBERG, A. C. G. Biotecnologia e desenvolvimento sustentável. *Estud. Av.* v. 24, n.70, p. 7-17, 2010.

