

EFICIÊNCIA DA *RHIZOPHORA MANGLE* NA FITORREMEDIAÇÃO DE SEDIMENTOS DE MANGUEZAL CONTAMINADOS POR PETRÓLEO**Jéssica Verâne Lima da Silva**⁽¹⁾Estudante de Oceanografia na Universidade Federal da Bahia – veranelima@yahoo.com.br**Ícaro Thiago Andrade Moreira**⁽²⁾Doutor em Geologia Ambiental e dos Recursos Hídricos pela UFBA – icarotam@gmail.com**Olivia Maria Cordeiro de Oliveira**⁽³⁾Doutora em Geoquímica pela Universidade Federal Fluminense – olivia@ufba.br**Naiara Cristiana Pereira dos Santos**⁽⁴⁾Estudante de Engenharia Ambiental e Sanitária na UNIFACS – eng.naiara@gmail.com**Matheus Pereira dos Santos Bonfim**⁽⁵⁾Pós Graduando em Gestão e Auditoria Ambiental – matheusps.bonfim@gmail.com**Evelin Daiane Serafim Santos Franco**⁽⁶⁾Mestranda em Geoquímica do Petróleo e Meio Ambiente pela UFBA – evelin.engambsan@gmail.com**RESUMO**

O tratamento de petróleo em ecossistemas costeiros torna-se um dos maiores problemas em países tropicais, uma vez que, devido aos avanços tecnológicos e o aumento da demanda, essa fonte de energia tem sido cada vez mais explorada, o qual passa pelos processos de exploração, produção, refino e transporte, conseqüentemente envolvem o ambiente marinho costeiro, estes ecossistemas são um dos primeiros a serem atingidos após derramamentos de petróleo. Neste estudo, foi desenvolvido um experimento em escala piloto, durante 3 meses sobre a implementação de um modelo de fitorremediação com a espécie *Rhizophora mangle*, a fim de obter o quão eficiente a espécie é na degradação de hidrocarbonetos totais de petróleo (HTP) em sedimentos de manguezal. Após 90 dias, os resultados obtidos para a remoção de HTP, mostraram eficiência da técnica, onde foi observado uma degradação equivalente a 55,62% com a utilização da *Rhizophora mangle*.

PALAVRAS-CHAVE: Remediação, ambiente costeiro, contaminação.**INTRODUÇÃO**

O uso do petróleo como base da matriz energética mundial, o qual passa pelos processos de exploração, produção, refino e transporte, conseqüentemente envolvem o ambiente marinho, tornando os hidrocarbonetos derivados de petróleo contaminantes onipresentes nos oceanos. De acordo com a base de dados da International Tanker Owners Pollution Federation Limited (ITOPF) estima-se que, de 1970 a 2013, cerca de 5,74 milhões de toneladas de petróleo foram lançados ao mar, em função de acidentes com petroleiros (ITOPF, 2014), causando impactos potencialmente danosos ao meio ambiente, visto as características dos componentes do contaminante.

A Baía de Todos os Santos (BTS) é considerada a maior e mais importante baía navegável da costa tropical do Brasil (LEÃO & DOMINGUEZ, 2000). A BTS destaca-se historicamente por ter sido palco para as primeiras atividades petrolíferas no território brasileiro, no ano de 1939, quando o petróleo foi descoberto no subúrbio ferroviário do Lobato, em Salvador (BAHIA, 2004).

Os manguezais, quanto às suas especificidades, vale destacar: a grande capacidade retentora dos materiais carreados do continente para o mar, sendo uma zona de deposição de diferentes compostos químicos; a peculiaridade das características hidrogeoquímicas; as altas taxas de sedimentação e os elevados teores de matéria orgânica (MO) devido à intensa produtividade, contribuindo assim significativamente para o ciclo global do carbono (COLOMBO et al., 2005). Representa um dos ambientes mais importantes da zona costeira, sendo uma das áreas mais produtivas do planeta (KENNISH, 2002). A importância desses ecossistemas não se restringe ao contexto ecológico, sendo uma região altamente valorizada pelo homem, utilizada para diversas atividades tais como pesca artesanal, extração de mariscos, agropecuária, turismo, entre outros. A pesca artesanal e a extração de mariscos (moluscos e crustáceos) estão bastante disseminadas em todas as comunidades da região e são as principais fontes de proteína e renda para a população local (MOREIRA, 2011).

Antes de estabelecer os principais efeitos que o derramamento de óleo pode causar em manguezais, deve-se ter em mente que as respostas do ecossistema a este impacto irá depender de fatores químicos, físicos e microbiológicos, tais como: a

quantidade de óleo derramado, sua composição, o hidrodinamismo do local, a irradiação solar, a temperatura, granulometria do sedimento, dentre outros fatores, que irão ajudar a determinar sua toxicidade e seu tempo de permanência no ambiente, podendo explicar a variedade de respostas de diversos manguezais após um derramamento de óleo (COLOMBO et al., 2005).

A BTS é uma região rodeada por municípios nos quais há inúmeras atividades industriais, como o Centro Industrial de Aratu (CIA), a Refinaria Landulpho Alves (RLAM), o Estaleiro do Paraguaçu, entre outros, atribuindo ao ambiente uma alta vulnerabilidade, visto a grande probabilidade de acidentes, e contribuindo para a degradação do meio ambiente na baía, inclusive nos estuários que ali aportam. Na porção norte desta Baía, entre os municípios de São Francisco do Conde e Candeias, ao lado da Refinaria Landulpho Alves, deságua o rio São Paulo, o qual, de acordo com o diagnóstico realizado pelo BAHIA (2004), tem grandes concentrações de alguns metais pesados e hidrocarbonetos derivados do petróleo em sedimentos.

Existem diversas formas de limpeza do ambiente contaminado por óleo, e a escolha da técnica mais adequada é de fundamental importância para minimizar os impactos ambientais decorrentes. Paradoxalmente, os procedimentos de limpeza empregados têm sido definidos levando-se em consideração, principalmente, a demanda sócio-econômica e aspectos estéticos, sendo que os aspectos ecológicos muitas vezes são colocados em segundo plano, o que termina por gerar impactos adicionais e muitas vezes mais sérios do que os do próprio derramamento de petróleo. Os danos ambientais de um derramamento em ecossistemas marinhos são largamente minimizados através do processo natural de intemperismo, determinando uma série de transformações físico-químicas no óleo, sua velocidade de degradação e persistência no meio (COLOMBO et al., 2005).

A fitorremediação oferece vantagens, tais como: aplicável *in situ*, e a uma grande variedade de poluentes simultaneamente, previne a erosão, grandes áreas podem ser tratadas a baixo custo, e ao mesmo tempo embelezar o ambiente (MOREIRA, 2011). Entretanto, o tempo para se obter resultados pode ser longo.

As espécies vegetais podem atuar diretamente, absorvendo, acumulando ou metabolizando os compostos nos tecidos, ou indiretamente, alterando as condições físico-químicas do sedimento, propiciando a imobilização ou alterando a química dos compostos tóxicos.

Existem estudos no Brasil sobre a técnica de fitorremediação, porém, na maioria dos casos são voltados apenas para contaminação por metais pesados (SANTOS, 2005). Dessa forma, torna-se relevante, para o caso do estuário do rio São Paulo, o estudo da eficiência da espécie vegetal de mangue na aplicação da Fitorremediação, que é uma técnica inovadora, barata e ecologicamente correta, visando a importância da recuperação e conservação do ecossistema de manguezal, devido as suas principais funções. A seleção da espécie *Rhizophora mangle*, que esta sendo utilizada neste trabalho, baseou-se no índice do potencial fitorremediador para contaminantes orgânicos encontrado por Moreira (2011) e, em especial, hidrocarbonetos de petróleo por esta espécie, visto ainda que os estudos de fitorremediação utilizando espécies de mangue no Brasil são escassos.

OBJETIVOS

O principal objetivo desta pesquisa tem sido em avaliar a eficiência da *Rhizophora mangle* na fitorremediação de sedimentos de manguezal contaminados por petróleo, como uma forma de contribuir para dotar a Região Nordeste de condições para a avaliação de métodos e técnicas de recuperação de áreas impactadas pela indústria do petróleo, aliada a técnicas ecologicamente corretas.

Para isto são listados os seguintes objetivos específicos:

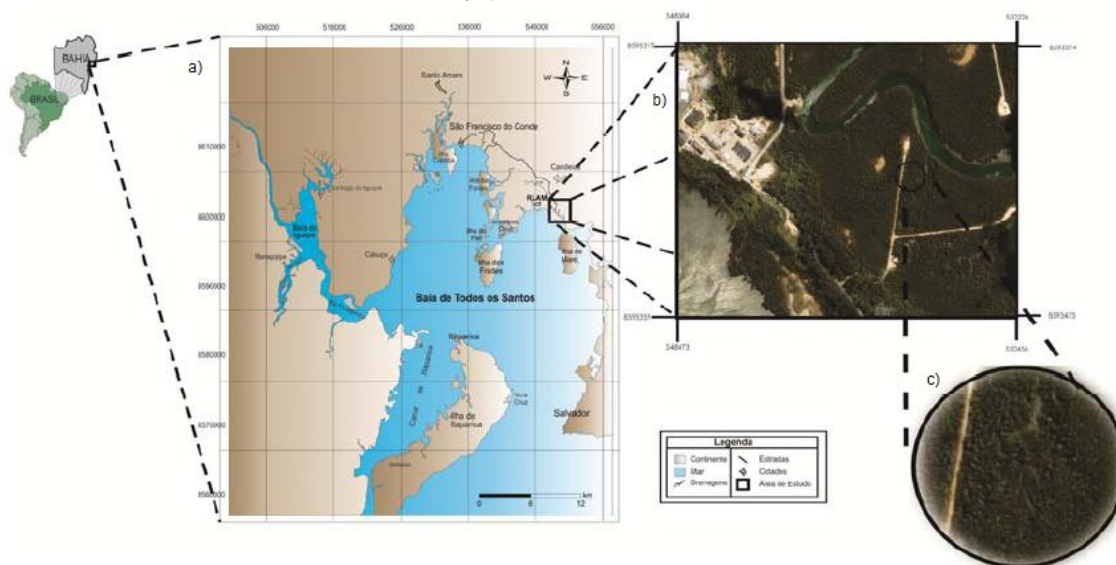
- ✓ Aperfeiçoar o modelo de simulação da fitorremediação utilizado por Moreira (2011);
- ✓ Monitorar a degradação temporal dos hidrocarbonetos totais de petróleo durante a simulação da fitorremediação;
- ✓ Investigar de forma integrada os processos biogeoquímicos durante a simulação da fitorremediação.

METODOLOGIA

A área de estudo correspondeu a bacia do rio São Paulo (Figura 1), que apresenta uma área de drenagem de 37 km², com vazão média de 0,3 m³.s⁻¹ e uma extensão total de 17 km, sendo que mais da metade do seu curso médio está margeado por manchas de manguezais. De acordo com dados do Estado (BAHIA, 2004), na bacia de drenagem desse rio se desenvolvem diversos tipos de atividades de natureza predominantemente industrial, como exploração de petróleo e gás, refino e armazenamento, usinas siderúrgicas, fabricação de fertilizante, atribuindo ao ambiente uma alta vulnerabilidade, visto a grande probabilidade de acidentes.

Na bacia hidrográfica do rio São Paulo existem diversos poços de petróleo, com registro histórico de incidentes do tipo *blow-out* (explosão de poços), ocasionando a contaminação por óleo cru (petróleo) aos ecossistemas, onde o manguezal ocupa um papel de destaque (BAHIA, 2004). Em função desse cenário, surge a necessidade da elaboração e testes de metodologias para remediação dessas áreas, já que são escassos estudos na literatura científica relacionados com a temática desta pesquisa.

Figura 1 - Mapa de situação e localização da área de estudo: a) Mapa de situação da BTS; b) Fotografia aérea do rio São Paulo; c) Local de coleta do sedimento



FONTE: MODIFICADO DA FOLHA DA BAÍA DE TODOS OS SANTOS: SD-24-X-A-IV (BAHIA, 2004).

Trabalhos de campo

Procedimento de amostragem e acondicionamento do sedimento

Os sedimentos foram coletados superficialmente, em área considerada como não contaminada por atividades petrolíferas, na porção nordeste da BTS. Foram recolhidos, em locais de deposição lamosa geralmente inundável, com auxílio de um testemunhador, que consta de um tubo de aço inoxidável de 10 cm de diâmetro e capacidade para coletar testemunhos de até 30 cm, dispendo-os em recipientes previamente descontaminados, para posterior análise. Todas as amostras de sedimento se mantiveram em caixas de isopor até o dia seguinte à coleta. A contaminação artificial com o petróleo proveniente da Bacia do Recôncavo foi feita em parte das amostras coletadas, visto que em uma porção foi mantida a composição natural do sedimento (referência - controle) e em outra parte foi adicionado o petróleo (1% em relação à massa de sedimento necessário). Para caracterização física e biogeoquímica, foi avaliada a granulometria, e analisado o teor de matéria orgânica e do conteúdo de nitrogênio e fósforo. Por fim, foi feita a interpretação geoquímica dos resultados obtidos.

Coleta de água estuarina

Inicialmente, a água foi monitorada quanto aos parâmetros físico – químicos, tais como salinidade, oxigênio dissolvido, pH e temperatura da água no local. Posteriormente a coleta foi realizada com galões de 20L previamente descontaminados. Esses galões com as amostras foram acondicionados em caixas de isopor com gelo e levados ao laboratório, onde permaneceram resfriados até o momento de realização do experimento.

Coleta das mudas de *Rhizophora mangle*

Para seleção das mudas que compõem o processo de fitorremediação, foram escolhidas mudas com idade aproximada de 3 meses, cedidas pela ONG Vovó do Mangue, em Maragojipe.

Trabalho Experimental

Montagem do experimento

Através do experimento foi simulado o ambiente de manguezal (em aquários), buscando representar as condições reais de contaminação de áreas prioritárias selecionadas. O aquário foi composto por seis cubetas e preenchido com água. Este possui um sistema com tubulação, que permite a circulação da água no ciclo do sistema (Figuras 2a, 2b e 2c).

Figura 2 - Delineamento do processo experimental do sistema: (a) aquário, (b) sistema montado, (c) sistema completo (sedimento, mudas e água), respectivamente



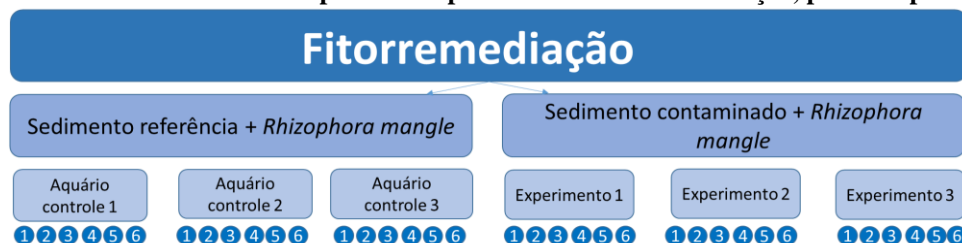
Fonte: Autora (2015).

O referido sistema é composto por um aquário que contém em sua estrutura um flange que controla o nível mínimo em que a água está em contato com as cubetas, simulando o nível de maré baixa, em tempo real. O recipiente foi acoplado a duas estruturas de tubulação uma ligada a uma bomba, dentro de um galão, onde a água foi bombeada para o recipiente, aumentando a energia dessa água e proporcionando seu deslocamento para que preenchesse o aquário.

A estrutura apresentou uma boia que controlava o nível de maré alta e uma tubulação ligada a uma torneira, regulando a saída de água, que se deslocava devido a força da gravidade, gerando um ciclo. A bomba esteve ligada a um relógio digital (*Timer*), que controlava seu funcionamento a cada ciclo de maré, ou seja, a bomba estava sendo controlada pelo relógio digital, que permanecia programado para ligar e desligar no horário real da maré da região em estudo.

No total foram montadas 12 unidades de simulação (3 controles e 3 com sedimento contaminado e a espécie), sendo que em cada unidade de simulação (aquário) estavam inseridas 6 cubetas, conforme ilustra a Figura 3.

Figura 3- Delineamento ilustrativo do processo experimental da fitorremediação, para a espécie em questão



Fonte: Autora (2015).

Metodologia de retirada de amostras

A retirada das amostras de sedimento e de água das unidades de simulação foi realizada nos intervalos de 0, 20, 40, 60 e 90 dias, T0, T1, T2, T3 e T4 respectivamente, sendo que em cada data de coleta foi retirada uma das 6 cubetas presentes no aquário e coletado o sedimento, água e mudas para posteriores análises.

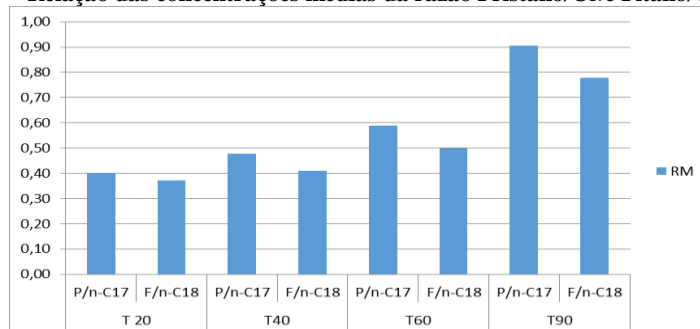
Durante os três meses de simulação, as unidades foram monitoradas para os parâmetros físico-químicos (pH, salinidade, temperatura, oxigênio dissolvido), com o auxílio de equipamentos de alta precisão.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Dado o fato que as análises ainda estão em processamento, sendo essas divididas em diversas etapas (análise de água, de sedimento, da microbiologia e do material particulado) todas essas demandam tempo para apresentarem resultados e a partir deles discussões serem mais endossadas. Com isso, na atual fase da pesquisa, os resultados obtidos para a remoção de HTP, ao longo do experimento, mostraram eficiência da técnica, onde foi observado uma degradação equivalente a 55,62% com a utilização da *Rhizophora mangle*, no qual no tempo 0 o sedimento apresentava 927,83 mg/Kg de concentração de HTP, e após 90 dias apresentou concentração de 516,05 mg/Kg, sendo reduzida em quase a metade. Também foi possível observar um decréscimo na abundância molecular dos n-alcanos, entre o tempo 1 (20 dias) e o tempo 4 (90 dias), e conseqüentemente, um aumento da curva referente aos complexos não resolvidos (UCM, do nome em inglês *Unresolved Complex Mixture*), sendo estes, marcadores da degradação de HTP em compostos menos tóxicos e possivelmente não disponível para a biota, ratificando que a técnica apresenta soluções viáveis para a remediação dos possíveis danos causados pelo manejo petrolífero, no que se refere, principalmente, às áreas de manguezais.

Além desses dados, estudos sugerem que, a partir da análise de alguns compostos no óleo derramado, como determinadas razões com os isoprenóides pristano e fitano, podem ser utilizados como marcadores da presença de óleo no ambiente, identificação do tipo e origem dos hidrocarbonetos, bem como, um monitoramento geoquímico das mudanças na composição devido a processos de biodegradação e/ou intemperismo (WANG; FINGAS, 1997). Dessa forma, a partir das análises cromatográficas, a razão entre Pristano/C17 e Fitano/C18, demonstra um aumento na concentração, que, segundo Volkman e colaboradores (1992), indica que houve degradação, observado na figura 4.

Figura 4 – Relação das concentrações médias da razão Pristano/C17 e Fitano/C18 (mg/Kg)



Fonte: Autora (2016)

Dessa forma, obtêm-se dados para inferir a ocorrência da biodegradação do petróleo a partir dos microrganismos associados à rizosfera da espécie, bem como assimilação pela mesma simultaneamente.

Ainda, em um tempo de coleta, foi possível verificar a predominância de óleo na região da rizosfera da muda, admitindo uma configuração não inicial, o que implica dizer, que a espécie em questão apresentou capacidade de atrair para si esses compostos, visto que, inicialmente, os mesmos estavam homogeneizados ao sedimento, e não concentrados na raiz, conforme mostra a Figura 5.

Figura 5 – Concentração de óleo na rizosfera da *Rhizophora mangle*



Fonte: Autora (2015).

Quanto às mudas da *Rhizophora mangle*, não houve variações que fossem distintas entre as simulações controle e contaminadas, havendo um relativo crescimento da raiz principal, aparição de deformações nas folhas, bem como, surgimento de novos brotos, em ambos experimentos.

O tema abordado cresce em dificuldade na medida em que visa não só recuperar ou remediar, mas fazê-lo segundo as leis naturais, isto é, valer-se dos próprios meios que a natureza idealizou para defender-se. Por fim, torna-se relevante o estudo da eficiência das espécies vegetais de mangue na aplicação da fitorremediação, visto que se trata de uma técnica inovadora, economicamente viável, ecologicamente correta e de fácil aplicação, e, que possa ainda, aumentar a qualidade de vida das comunidades e ecossistemas influenciados por essas ações industriais.

Destaca-se ainda a importância da recuperação e conservação do ecossistema de manguezal diante de suas principais funções ecológicas, como a contribuição na minimização do aquecimento global, através do sequestro de carbono pelas plantas aplicadas, evidenciando a sua importância não só local, mas também a nível global.

CONCLUSÃO

A conclusão que se tem, na atual fase da pesquisa é poder afirmar a eficiência da espécie na remediação dos sedimentos de manguezal contaminados com petróleo, contribuindo no desenvolvimento de bioprocessos para a degradação do petróleo em sedimentos de zonas de manguezal da porção nordeste da Baía de Todos os Santos. Bem como, possivelmente minimizar os problemas relacionados à saúde pública, visto que, com a remediação do ambiente contaminado, cessaria esta via de contaminação, que afeta o ecossistema local, possibilitando a redução de custos com recuperação de áreas com estas problemáticas, conferindo qualidade de vida das populações afetadas localmente, sendo propício maior oferta de emprego, renda, saúde, educação e saneamento, além de auxiliar na compreensão do comportamento das espécies em estudo e de sua eficiência na degradação dos hidrocarbonetos em sedimentos de manguezais. Por fim, produzir patente(s) de bioprocessos e sistemas de tratamentos de sedimentos contaminados por atividades petrolíferas.

REFERÊNCIAS

- BAHIA. Centro de Recursos Ambientais. Diagnóstico do grau de contaminação da Baía de Todos os Santos por metais pesados e hidrocarbonetos de petróleo a partir da análise das suas concentrações nos sedimentos de fundo e na biota associada: relatório do diagnóstico da concentração de metais pesados e hidrocarbonetos de petróleo nos sedimentos e biota na BTS, I, II, III, IV, Salvador. Nov 2004.
- COLOMBO, J. C.; BARREDA, A.; BILOS, C.; CAPPELLETTI, N.; MIGOYA, M. C.; SKORUPKA, C. Oil spill in the Rio de la Plata Estuary, Argentina: 2-hydrocarbon disappearance rates in sediments and soils. *Env. Poll.*, 134: 267– 276. 2005.
- KENNISH, M. J., Environmental threats and environmental future of estuaries. *Env. Cons.*, v. 29, p. 78- 107. 2002.
- LEÃO, Z. M. A. N.; DOMINGUEZ, J. M. L. Tropical coast of Brazil. *Mar. Pol. Bul.* 41, 112 – 122. 2000.
- MOREIRA, Ícaro Thiago Andrade. **Avaliação da eficiência de modelos de remediação aplicados em sedimentos de manguezal impactados por atividades petrolíferas.** 2011. 221f. Dissertação (Mestrado em Geoquímica: Petróleo e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2011.
- SANTOS, Gláucia Cecília Gabrielle dos. Comportamento de B, Zn, Cu, Mn e Pb em solo contaminado sob cultivo de plantas e adição de fonte de matéria orgânica como amenizantes do efeito tóxico. 153f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, São Paulo, 2005.
- VOLKMAN, J. K.; HOLDWORTH, D.G.; NEILL, G.P.; BAVOR, H.J., Jr. Identification of natural, anthropogenic and petroleum hydrocarbons in aquatic sediments. **The Science of the Total Environment**, 112, 203–219, 1992.