

GIOVANI ENRICO STIEVANO PONCE

**Análise bibliométrica da produção científica vinculada às técnicas de
biorremediação aplicadas em vazamentos de óleo offshore**

Santos, 2019

GIOVANI ENRICO STIEVANO PONCE

**Análise bibliométrica da produção científica vinculadas às técnicas de
biorremediação aplicadas em vazamentos de óleo offshore**

Trabalho de Formatura em Engenharia
de Petróleo do curso de graduação do
departamento de Engenharia de Minas
e de Petróleo da Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo.

Área de Concentração: Química do Petróleo

Orientador: Prof^a. Dra. Patrícia Helena Lara dos Santos Matai

SANTOS
2019

FICHA CATALOGRÁFICA

Ponce, Giovani Enrico Stievano

Análise bibliométrica da produção científica vinculada às técnicas de biorremediação aplicadas em vazamentos de óleo offshore / G. E. S. Ponce -São Paulo, 2014.

107 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo.

1.óleo 2.biorremedição 3.bibliometria 4.ecologia
5.vazamento I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica.
Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo II.t.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais e meu irmão pelo apoio financeiro e moral durante os meus anos de estudo.

Agradeço aos meus colegas, que me acompanharam durante toda a graduação, que ajudaram a superar problemas de origens acadêmicas e pessoais.

Agradeço aos professores do curso de Engenharia de Petróleo por contribuição na minha bagagem de conhecimento a respeito da área.

Agradeço a professora Patrícia Matai, por ter aceitado o árduo desafio de me orientar na realização de um trabalho em uma vertente de pesquisa.

Agradeço ao professor Manuel Jesús Cobo Martín, da Universidade de Cádiz e um dos responsáveis pela criação do software *SciMAT*, pela prontidão no esclarecimento de dúvidas a respeito do funcionamento do programa.

RESUMO

Os derramamentos de petróleo no mar são incidentes que requerem a intervenção humana na forma de técnicas de remediação. Nesse cenário, as técnicas de biorremediação têm logrado destaque por empregar os seres vivos já presentes no ambiente ou que podem ser mobilizados para proporcionar degradação das manchas de óleo e de gotículas emulsificadas. Sendo uma técnica com progressos e transições recentes da escala de laboratório para a escala de campo, faz-se pertinente a pesquisa de trabalhos e a aplicação de técnicas bibliométricas como forma organizacional para observar tendências e o progresso da técnica e de temáticas circundantes. Visou-se, através de um indexador de publicações científicas e de um *software* de mapeamento bibliométrico, a compilação de documentos referentes ao emprego de técnicas de biorremediação em vazamentos de óleo *offshore* com o intuito de se realizar uma análise bibliométrica. A partir de técnicas bibliométricas para *clusterização* em mapas bidimensionais que utilizam palavras-chave vinculadas às publicações, foi possível identificar as áreas e indícios de evolução da pesquisa vinculadas à remediação por meios biológicos, em um período de cinco anos. Constatou-se, ao fim do mapeamento, grande interdisciplinaridade do campo de estudo, com estagnação da base de conhecimento e “afunilamento” de abordagem para poucos temas, a partir do terceiro ano de análise. Por amostragem textual, foi possível observar concordância entre mapas e conteúdo de publicações.

Palavras-Chave: vazamento, biorremediação, ecologia

ABSTRACT

Oil spills at sea are incidents that require human intervention in the form of remediation techniques. In this scenario, bioremediation techniques have been successful for using living beings already present in the environment or that can be moved to it to provide degradation of oil slicks and emulsified droplets. Being a technique with progress and recent transitions from laboratory scale to field scale, it is relevant to review publications and to apply bibliometric techniques as an organizational way to note approached trends and the progress of the technique and related subject matters. The project aims to, using a scientific publication indexer and a science mapping software, point out trends and science fields where bioremediation techniques are research focus to mitigate oil spill impacts. It is possible to describe a scientific vanguard and advances involving the biological remediation methods field, using two-dimensional maps clustering techniques, over a period of five years. At the end of the project, a great interdisciplinarity of the study field was found, with stagnation of the knowledge base and approach convergence to few themes, from the third year of analysis on. By textual sampling, it was possible to observe agreement between diagrams and the content of the publications.

Keywords: spill, bioremediation, ecology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Plano de trabalho adotado para análise do campo de pesquisa	44
Figura 2- Distribuição do número de publicações no período de 2014-2018.	50
Figura 3 - Ranking das dez instituições ou agências financiadoras com maior número de publicações amparadas	51
Figura 4 - Ranking de universidades, institutos ou empresas com maior número periódicos afiliados.....	51
Figura 5 - Ranking dos países de publicação dos documentos, com os territórios com maior número de publicações para as condições descritas.	52
Figura 6 - Ranking de autores com maior número de publicações vinculadas a configuração da pesquisa.	52
Figura 7 - Tipos de documentos indexados às palavras-chave da busca.....	53
Figura 8 - Classificação dos trabalhos indexados, em áreas de estudo reportadas à base de dados.	53
Figura 9 – Número de publicações anuais das dez fontes com maior número de periódicos	54
Figura 10 - Grandes vazamentos afetando as águas dos Estados Unidos, de 1969 a 2019 (visualização em 26/10)	57
Figura 11 - Interface do software para classificação de palavras-chave em conceitos.	59
Figura 12 - Diagrama de frações sobrepostas (palavras-chave "emigrando" e "imigrando" na sucessão dos cinco anos analisados.	60
Figura 13 - Diagrama estratégico baseado no número total de documentos para o ano de 2014, dada a configuração de busca pelas palavras-chave bioremediation oil spill offshore.....	62
Figura 14 - Diagrama estratégico baseado no total de citações recebidas para o ano de 2014, dada a configuração de busca pelas palavras-chave bioremediation oil spill offshore.	62
Figura 15 - Diagrama baseado no índice-h de desempenho, para os clusters de 2014, dada a configuração de busca pelas palavras-chave bioremediation oil spill offshore.	63

Figura 16 - Diagrama estratégico baseado no número total de documentos, para o ano de 2015, dada a configuração de busca pelas palavras-chave bioremediation oil spill offshore.....	65
Figura 17 - Diagrama estratégico baseado no total de citações recebidas, para o ano de 2015, dada a configuração de busca pelas palavras-chave bioremediation oil spill offshore.....	65
Figura 18 - Diagrama estratégico baseado no índice-h de desempenho, para os clusters de 2015, dada a configuração de busca pelas palavras-chave bioremediation oil spill offshore.....	66
Figura 19 - Diagrama estratégico baseado no número total de documentos, para o ano de 2016, dada a configuração de busca bioremediation oil spill offshore.....	68
Figura 20 - Diagrama estratégico baseado no total de citações recebidas, para o ano de 2016, dada a configuração de busca bioremediation oil spill offshore.....	69
Figura 21 - Diagrama estratégico baseado no índice-h de desempenho, para os clusters de 2016, dada a configuração de busca bioremediation oil spill offshore.....	69
Figura 22 - Diagrama estratégico baseado no número total de documentos, para o ano de 2017, dada a configuração de busca bioremediation oil spill offshore.....	70
Figura 23 - Diagrama estratégico baseado no total de citações recebidas, para o ano de 2017, dada a configuração de busca bioremediation oil spill offshore.....	70
Figura 24 - Diagrama estratégico baseado no índice-h de desempenho, para os clusters de 2017, dada a configuração de busca bioremediation oil spill offshore.....	71
Figura 25 - Diagrama estratégico baseado no número total de documentos, para o ano de 2018, dada a configuração de busca bioremediation oil spill offshore.....	71
Figura 26 - Diagrama estratégico baseado no total de citações recebidas, para o ano de 2018, dada a configuração de busca bioremediation oil spill offshore.....	72
Figura 27 - Diagrama estratégico baseado no índice-h de desempenho, para os clusters de 2018, dada a configuração de busca bioremediation, dada a configuração de busca bioremediation oil spill offshore.....	72
Figura 28 - Mapa de evolução dos temas nos períodos de 2014-2018.	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Derramamento anual médio dos Estados Unidos em toneladas.	19
---	----

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	11
2. OBJETIVO.....	12
2.1. Objetivo geral.....	12
2.2. Objetivos específicos	12
3. REVISÃO DA LITERATURA.....	13
3.1. O Petróleo e o meio ambiente.....	13
3.2. Fontes de derramamento de óleo	18
3.3. Técnicas de remediação para vazamentos de óleo	20
3.3.1. Técnicas de remediação para vazamentos de óleo no mar	20
3.3.1.1. Técnicas físicas.....	20
3.3.1.2. Técnicas químicas	25
3.3.1.3. Técnica térmica.....	28
3.3.1.4. Técnicas biológicas	30
3.4. Análise Bibliométrica.....	38
4. MATERIAIS E MÉTODO	43
4.1. Materiais	43
4.2. Método.....	43
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	49
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	86
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	89
ANEXO A - ARTIGO SÍNTESE	100

1. INTRODUÇÃO

O petróleo compreende um dos recursos mais importantes no contexto energético e de insumos para a humanidade. Sendo uma mistura de hidrocarbonetos que precisa ser explorada, costumeiramente, a partir de formações rochosas, alocadas na terra ou em profundidades além da lâmina d'água, intervenções humanas e o uso de tecnologias são requeridos para se encontrar reservas viáveis e para efetuar a extração, armazenamento, transporte e processamento dos hidrocarbonetos encontrados, a fim de propiciar recursos em condições de uso pela indústria e pelo consumidor final. Como em qualquer empreendimento, a indústria petrolífera precisa lidar com riscos, dentre os quais, suscitam-se os de contexto ambiental, pelo fato de implicar a instalação de infraestrutura em locais sem prévio contato antropogênico e por extrair um recurso que naturalmente não se encontrava exposto ou tendendo a se expor.

Eventuais falhas nas medidas de segurança podem ocasionar a perda de controle sobre a produção, transporte e processamento de petróleo, potencialmente causando derramamentos dos fluidos sobre o solo ou sobre a água, e acarretando desequilíbrios ecológicos em escalas regionais ou até mesmo globais pela interferência de um elemento alheio (óleo) ao *habitat* de um conjunto de organismos. Nesse âmbito, faz-se pertinente o desenvolvimento e o emprego de técnicas de mitigação de impactos ecológicos quando problemas de vazamentos já decorreram, seja pela conscientização ambiental dos empreendedores ou por força de sanção monetária executada a partir de regulamentações governamentais. Como a exploração dos recursos pode ocorrer tanto em terra (*onshore*) quanto no mar (*offshore*), as particularidades de cada ambiente e da interação entre suas fauna e flora com o petróleo derramado demandam um *modus operandi* de resposta, equipamentos e recursos distintos para se efetuar a remediação. No mar, as técnicas de remediação podem ser classificadas como físicas, químicas, térmicas ou biológicas, ao passo que, para a remediação *onshore*, as técnicas podem ser divididas em extração de vapor do solo, degradação, biorremediação e em sistemas de bombeamento e tratamento (TEWARI; SIRVAIYA, 2015)

A biorremediação, inserida na última categoria e foco do presente trabalho compreende uma técnica de mitigação de impactos de derramamento de óleo

com emprego de microrganismos alóctones ou autóctones capazes de degradar hidrocarbonetos poluentes. Sendo uma técnica ainda em ascensão e ainda base para diversos estudos e pesquisas atuais, a realização de uma análise bibliométrica baseada na compilação e organização de publicações a respeito de novas descobertas e tecnologias vinculadas pode ser de grande valia para a identificação de tendências, da condição de progresso da pesquisa relacionada à técnica e para a organização temporal de feitos importantes. Nesse âmbito, uma coleta de dados por meio de artifícios como indexadores de jornais e revistas é realizada no presente trabalho, para a composição de uma análise bibliométrica a respeito de técnicas de biorremediação.

2. OBJETIVO

2.1. Objetivo geral

Visa-se com a realização do presente trabalho a compilação e a organização de artigos e documentos referentes ao emprego e desenvolvimento de técnicas de biorremediação em vazamentos de petróleo *offshore*, a fim de se realizar uma análise bibliométrica dos conteúdos organizados.

2.2. Objetivos específicos

- Uso de informações da base de dados *Scopus* para extrair estatísticas e informações bibliográficas a respeito das técnicas de biorremediação aplicadas em ambiente marinho.
- Uso do software *SciMAT* para mapeamento científico, produzindo diagramas estratégicos e temporais.

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1. O Petróleo e o meio ambiente

O petróleo pode ser compreendido, de um ponto de vista químico como uma mistura extremamente complexa de compostos hidrocarbonetos, com algumas menores quantidades de nitrogênio, oxigênio e compostos de enxofre, assim como traços de metal. É a principal fonte de obtenção de combustíveis líquidos como gasolina, querosene e óleo diesel para fornecimento de energia para automóveis, tratores, caminhões, aeronaves e embarcações, e dele são também produzidos óleos e gases para aquecimento doméstico, para geração de eletricidade e manufatura de fibras sintéticas, roupas, plásticos, tintas e outros materiais, suprimindo no contexto energético, mais da metade da demanda global (SPEIGHT, 2014). Os hidrocarbonetos, de forma geral, abrangem uma grande quantidade de compostos de modo que cada acumulação de petróleo é única pelas proporções e variedade de hidrocarbonetos presentes, assim como pela configuração espacial das moléculas constituintes (CHAPMAN, 1983).

No tocante à composição de hidrocarbonetos do petróleo, Balba, Al-Awahdi e Al-Daher (1998) propõem a categorização simplificada em quatro frações: alifáticos, aromáticos, resinas e asfaltenos. As frações alifáticas abrangem cadeias de alcanos (alcanos normais), alcanos ramificados (isoalcanos) e cicloalcanos (naftenos); as frações aromáticas, por sua vez, abrangem hidrocarbonetos monoaromáticos e voláteis como benzenos, toluenos e xilenos, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos, aromáticos naftênicos a compostos com enxofre tal como tiofenos e dibenzotiofenos. As parcelas de hidrocarbonetos aromáticos são associadas à contaminação por óleo, detalhada a posteriori, incluindo componentes confirmados ou suspeitos de serem carcinogênicos, enquanto as resinas e frações de asfaltenos abrangem as moléculas polares com a presença de nitrogênio, enxofre e oxigênio. As resinas consistem em sólidos amorfs solúveis em óleo; já os asfaltenos, por fim, são grandes moléculas dispersas em óleo na forma de coloides. As proporções entre esses componentes, distintas caso a caso, são dependentes de muitos fatores, dos quais pode-se destacar a fonte, a história geológica, idade, migração e alteração do petróleo (BALBA; AL- AWAHDI; AL-DAHER, 1998).

O interesse pela exploração de hidrocarbonetos deve-se, sobretudo aos produtos derivados pela indústria como combustíveis ou não combustíveis, sendo o mercado de combustíveis, significativamente maior (CLEWS; 2016). A partir do óleo cru, através do seu processamento em uma refinaria, permite-se a extração, como produtos, do gás liquefeito de petróleo (uma mistura liquefeita a pressão ambiente de propano e butano), da gasolina e nafta (uma mistura complexa de componentes de baixo ponto de ebulição advindas do refino), do combustível de avião ou querosene (compreendendo uma mistura de frações do petróleo de alto ponto de ebulição) e do óleo combustível (abrangendo as frações ou resíduos mais pesados), geralmente utilizados para abastecimento de plantas de energia, motores de embarcações e afins, além de produção secundária de óleos lubrificantes, ceras, betumes e enxofre. Oriundo do gás natural “cru”, por sua vez, com as operações de processamento, logra-se de materiais similares aos produtos leves do refino do óleo cru, tais como metano e etano, gás liquefeito de petróleo, condensado e variedades menores de produtos como enxofre e gases inertes de alto valor como hélio, neônio e argônio. Metano e etano apresentam baixo ponto de fusão e de ebulição e o condensado representa a fração de hidrocarbonetos pesados condensados com a produção do reservatório (similar a nafta advinda de processos de refino). Destaca-se que os produtos da refinaria devem atender a especificações para os diversos usuários desses produtos, como a nafta para indústria petroquímica e a querosene para veículos aéreos, por exemplo. (CLEWS, 2016).

O mercado e as tecnologias vinculados a petróleo e gás se dividem em dois componentes: *onshore* e *offshore*, ou terra e mar, tendo cada um deles características específicas e com o componente *onshore* sendo menos complexo em termos de tecnologia, mas equiparável no tocante a desafios e dificuldades (SISTEMA FIRJAN, 2017). St. John (1985) já delineara o panorama global de províncias sedimentares que possivelmente poderiam abranger os hidrocarbonetos, das quais 481 identificadas, na época, eram alocadas *offshore* ou *de* forma parcialmente *offshore*. Como já explicitado, o petróleo é um recurso de ocorrência em regiões de mar e terra. Empreendimentos em ambas as regiões se justificam pela receita lograda com os volumes e os preços do produto no mercado. As receitas advindas do óleo já corresponderam a 4,52% do produto interno produto mundial em 1980, correspondendo em 2017 a 1,1% (THE WORLD

BANK, 2019).

Como em qualquer outro empreendimento, a produção de petróleo é passível de acidentes no âmbito ambiental, dado que a intervenção humana para a exploração, destoando do planejamento de produção, pode propiciar a contaminação local. Reis (1996) avalia que muitos locais utilizados pela indústria de petróleo, em terra, sofreram contaminação por atividades prévias e ainda estiveram à mercê do derramamento accidental de diversos materiais (dentre os quais, hidrocarbonetos), o que demanda, dependendo do caso, a restauração das áreas afetadas, enquadrando reservas antigas, locais *onshore* onde foram lançados hidrocarbonetos ou água contaminada, ou ainda lugares com manchas de óleo de lançamentos *offshore* trazidos para a costa. A problemática da contaminação do solo está vinculada com a estrutura complexa de poros e dos trajetos de transporte de fluidos que compreendem empecilhos para a mitigação de impactos, tendo em vista que hidrocarbonetos podem se localizar em diversos lugares do solo, aprisionados pela pressão capilar como uma fase discreta líquida, ou ainda estar dissolvidos em lençóis freáticos, sendo transportados para longe da origem do seu lançamento.

No âmbito marinho, Kingston (2002) analisou o impacto em longo prazo de derramamentos de óleo, revisando informações a respeito de efeitos em aves marinhas, e em comunidades bentônicas e na persistência no mar. Em termos gerais, a recuperação ambiental em locais de derramamento de óleo é relativamente ágil, decorrendo entre 2 - 10 anos, proporcionada pelas características do mar e pela reprodução da maior parte das espécies marinhas por meio de larvas pelágicas. Há, porém, especificidades vinculadas a cada espécie e a cada ambiente. No Alaska (Estados Unidos), o derramamento de óleo implicou poucos danos a população de mergulhões, pois foram incorporadas aves jovens alóctones. Por outro lado, as populações bentônicas de anfipódes *Ampelisca* precisaram de 10 anos para recuperar sua densidade populacional antes do derramamento a partir da embarcação Amoco Cadiz, devido a espécies oportunistas que tomaram o seu nicho ecológico. Kingston (2002) estabelece que a bioacumulação de componentes do óleo em organismos marinhos deve-se aos metabólitos geralmente polares e facilmente solúveis que podem ser de maior toxicidade que seus componentes de origem, já que há grande depuração de

elementos contaminantes em organismos filtrantes. O impacto do óleo é tido como imprevisível em cada ambiente e ecossistema, e é vinculado às condições da fauna e flora, à densidade e ao tipo de óleo, ao comportamento das ondas, às influências antrópicas nas regiões afetadas e ao grau de limpeza local.

Capuzzo (1985) analisou uma série de impactos em diferentes níveis de organização em seres marinhos ocorridos de maneira prévia a impactos em níveis de organização ecológica superiores, classificando-os em bioquímicos-celulares, pertinentes aos organismos, à população e à comunidade, além de apontar que a toxicidade de determinado componente do óleo é vinculada à solubilidade e à divisão entre partes hidrofóbicas e hidrofílicas. Um organismo armazenando hidrocarbonetos em compartimentos lipofílicos pode ter problema nas suas funções de membrana, além de ter seus processos de consumo de energia e de adequação ao seu habitat comprometido. O grau em que os organismos são impactados pelos hidrocarbonetos é correlacionado a biodisponibilidade destes, a capacidade de transformação dos poluentes e aos metabólitos sintetizados, sendo a resposta do organismo condicionada aos processos inerentes ao metabolismo nas condições do ambiente em que os seres estão inseridos. Além da própria mortalidade advinda do óleo, nos organismos remanescentes, podem ocorrer problemas na alimentação, crescimento, desenvolvimento e ainda empecilhos ao pertencimento a uma população.

Apesar de em uma visão mais generalista e sinótica, considerar de maior preocupação ao meio ambiente os vazamentos de hidrocarbonetos catastróficos e de maior volume, não se pode relevar as consequências de derramamentos em pequenas escalas no tocante a impactos regionalizados no equilíbrio ecológico. Sirvaya (2015) descreveu os derramamentos de óleo como passíveis de quatro classificações: derramamentos menores, derramamentos médios, derramamentos maiores e desastres, com base na quantidade de óleo

aportada em terra ou em regiões costeiras. Brussaard et al. (2016) desenvolveram um estudo de ecotoxicidade e biodisponibilidade dos derramamentos de pequena escala frente a microrganismos como plânctons, bactérias e algas, com base em uma avaliação *in situ*, a partir do derramamento intencional de óleo, avaliação de derramamentos existentes e estudos através da comparação das condições de derramamento em uma célula de mesocosmo simulada e células de controle. Após a realização de ensaios químicos, com bactérias bioreportadoras e de toxicidade com linhas celulares de mamíferos, fora constatado que mesmo pequenos vazamentos e derramamentos rapidamente propiciam exposições biodisponíveis com potenciais efeitos tóxicos, atestados em algas, zooplâncton, fitoplâncton, flagelados, pequenos crustáceos e organismos afins.

Pertinente ao estudo de acidentes por derramamento ocorridos em terra, Jernelov (2018) analisou os efeitos na ecologia por uma visão macroscópica e histórica, revisando grandes eventos de derramamentos de óleo, em distintos locais e por distintas causas como a erupção de *Lake Gusher*, Fontes de Baku, sabotagens na guerra entre Romênia e Império Austro-Húngaro, ataques a poços na Guerra do Golfo, vazamentos em dutos no Ártico, contaminações nas florestas equatoriais da América do Sul, nos mangues colombianos e no Delta do Rio Níger. Apesar da conjuntura de cada incidente ser completamente distinta das demais, o autor evidencia que, mesmo com presença de fauna e flora completamente distintas, os impactos diretos e indiretos acabam por ser os mesmos, já que o derramamento de hidrocarbonetos propicia a mortalidade de animais e plantas, em alguns casos, de impacto irreversível, seja por “quebrar” o isolamento térmico que aves possuem, seja por afetar animais que retiram oxigênio de água contaminada por gotículas de óleo, ou por sobreaquecimento propiciado pelos fluidos derramados e causas afins, ainda proporcionando mudanças drásticas nas paisagens em decorrência dos eventos. Sendo os vazamentos de hidrocarbonetos eventos que acarretam danos ao meio ambiente em distintas escalas e em distintos ambientes, faz-se necessário o desenvolvimento de técnicas e tecnologias que possam mitigar os impactos dos derramamentos na biosfera, instigado por iniciativas próprias ou por força de lei, na forma de autuações. As referidas técnicas, detalhadas a posteriori, podem ser compreendidas como técnicas de remediação e se diferenciam pelos

mecanismos, frentes de ações, peculiaridades e restrições de emprego. Dado o grande número de técnicas envolvendo a remediação de derramamentos de óleo, o trabalho foca sua abordagem às técnicas de biorremediação utilizadas em derramamentos de óleo *offshore*.

3.2. Fontes de derramamento de óleo

O estudo de técnicas de remediação faz-se pertinente pois vazamentos de óleo não compreendem eventos isolados ou extraordinários. Embora atenções sejam centradas em incidentes envolvendo óleo cru, um derramamento de óleo ou descargas podem ocorrer em qualquer instante do “ciclo de vida” do petróleo, como durante a exploração e produção do óleo, o transporte por navios, o transporte por dutos, ferrovias, caminhões-tanque, o refino, a armazenagem, o uso como combustível, como base material para a indústria de manufatura ou ainda no processo de disposição, o que torna a possibilidade de vazamentos muito mais ampla e os padrões de derramamentos (volumes derramados e preocupações ambientais) dependentes das atividades locais envolvendo o petróleo (Fingas, 2011). Para exemplificação das origens do derramamento de petróleo, Fingas (2011) listou os derramamentos médios de óleo, em toneladas, no período de 1969 a 2007 nos Estados Unidos, apresentados na Tabela 1:

Tabela 1 - Derramamento anual médio dos Estados Unidos em toneladas.

Derramamento anual médio de óleo dos Estados Unidos (em toneladas)						
	1969	1977	1978 - 1987	1988 - 1997	1998 - 2007	% Total (1998 - 2007)
Fonte						
Produção	4491	1243	2169	1420		5,07
Derramamentos de plataformas offshore	3694	192	259	182		0,65
Dutos offshore	640	495	116	373		1,33
Navios de apoio offshore	14	35	7	1		0
Poços produtores terrestres	143	521	742	863		3,08
Refino	429	502	2145	1734		6,19
Derramamento de refinaria	429	502	2145	1734		6,19
Transporte	69809	43092	27250	13770		49,16
Dutos terrestres	37049	25885	16900	10965		39,15
Caminhões-tanque	429	698	745	1312		4,68
Ferrovias	286	332	309	204		0,73
Navios-tanque	27,	8607	6028	514		1,83
Barcaças-tanque	4547	7570	3269	776		2,77
Armazenamento e Consumo	16932	13887	39789	11088		39,58
Navios não-tanque	714	969	402	229		0,82
Outros navios	2123	939	900	595		2,12
Estações de gás e paradas						0,41
de caminhões	171	171	223	116		
Residencial	21	26	74	71		0,25
Estações terrestres regulamentadas pela Agência de Proteção Ambiental	4286	4963	35002	8525		30,43
Aeronaves	529	531	552	578		2,06
Instalações da costa	8889	6112	2151	604		2,016
Origem desconhecida terrestre	129	138	314	74		0,26
Veículos motores	71	39	170	295		1,05
Total	91660	58723	71354	28011		100%

Fonte: Adaptado de Fingas (2011).

Deve-se perceber que a maior fonte de derramamentos de óleo advém de incidentes terrestres e de instalações regulamentadas. Observa-se, entretanto que a tabela apresentada não reflete as diferenças apresentadas do óleo derramado diretamente no ambiente marinho ou em água doce e outras superfícies, incluindo áreas de contenção em torno de tanques de armazenagem. As propriedades do óleo derramado e a localização dos incidentes condicionam os impactos dos derramamentos e devem ser consideradas como um fator adicional na análise de óleo derramado (FINGAS, 2011).

3.3. Técnicas de remediação para vazamentos de óleo

Muitas técnicas para contornar o problema de desastres com óleo tem sido desenvolvidas. Há uma relação, segundo Choi e Cloud (1992), de tais técnicas com o tipo e a quantidade do óleo derramado, condições ambientais e o ambiente circundante. Dadas as especificidades das técnicas, pode-se seccionar a remediação em incidentes de derramamento que ocorrem no solo e os que ocorrem em água. A remediação ambiental, na qual se inserem as técnicas que lidam com óleo derramado, trata do uso de diferentes tecnologias com intuito de remover contaminantes de diferentes meios ambientais (GUERRA et al., 2018). Nesse âmbito, portanto, os procedimentos apresentados em sequência, respeitando-se as variáveis das quais são dependentes, são realizados após eventos de vazamento, individualmente ou em conjunto.

3.3.1. Técnicas de remediação para vazamentos de óleo no mar

As técnicas de remediação utilizadas em vazamentos marinhos, de acordo com Larson¹ (2010, apud DAVE; GHALY, 2011), podem ser classificadas, de acordo com o mecanismo de ação no óleo, em: físicas, químicas, térmicas e biológicas.

3.3.1.1. Técnicas físicas

As técnicas físicas, também denotadas por mecânicas, compreendem métodos que não empregam componentes químicos ou afins para mudar as propriedades dos fluidos derramados e são utilizados como elementos de contenção e controle do óleo espalhado, não requerendo permissões especiais para implementação. São implementadas localmente por navios de nicho,

¹ LARSON, H. **Responding to oil spills disasters: The regulations that govern their response**. Responding to oil spill disasters: The regulations that govern their response. Retrieved on 26th February, 2010 from http://www.wiseintern.org/journal/2010/HattieLarson_Presentation.pdf.

especialmente equipados para o procedimento e envolvem a ação em duas etapas: efetuando-se a contenção do derramamento do óleo no mar e posteriormente realizando-se a extração do óleo. Tais etapas demandam alto gasto de capital, necessidade de um planejamento logístico para acompanhamento da operação e ainda pela necessidade de disposição posterior. (VENTIKOS et al., 2004; MUIZIS, 2013; TEWARI; SIRVAIYA, 2015).

O uso de barragens ou barreiras, *skimmers*, e ainda materiais absorventes compreendem os principais recursos inseridos nessa técnica. As barragens ou barreiras podem ser entendidas como estruturas flutuantes que limitam o espalhamento e o movimento de óleo fisicamente, assim como seu movimento, a fim de possibilitar a recuperação posterior. Geralmente, são utilizadas individualmente ou conjugadas, com as funções principais de circundar e isolar as manchas de óleo (reduzindo o espalhamento das manchas e facilitando a recuperação posterior), proteger áreas como entrada de portos, rios e regiões biologicamente sensíveis a derramamentos ou para desviar de áreas em que é possível a recuperação do óleo derramado.

As barreiras podem ser classificadas nos tipos cortina, cerca, vedação em terra e resistentes a fogo. As barreiras do tipo cortina compreendem uma saia de subsuperfície suportada por uma câmara de ar ou espuma, de seção circular. As barreiras do tipo cerca, por outro lado, são estruturadas como seções flutuantes posicionadas por boias, verticalmente, e que são compatíveis com áreas de alta circulação de correntes e perfis de onda ilimitados. As barreiras de vedação em terra são utilizadas em zonas entremarés, enquanto as barreiras resistentes ao fogo são utilizadas em conjunto a técnicas de combustão *in situ*, de acordo com a tendência de flutuabilidade, material utilizado para a confecção e ainda com o peso e a tendência de parar os hidrocarbonetos (FINGAS; DUVAL; STEVENSON, 1979, VENTIKOS et al., 2004; DAVE; GHALY, 2011; MUIZIS, 2013).

As barreiras, entretanto, têm suas limitações ligadas ao vento, ondas e correntes, forças que podem implicar falhas e potencial escape de óleo (a priori, contido). A possibilidade de fuga é vinculada ao tipo de óleo e tipo de projeto de barreira. Em termos mais específicos, as falhas de contenção podem ser explicadas pelas seguintes causas, influentes sozinhas ou em conjunto: um fluxo

por debaixo da barreira a mercê de correntes; respingos induzidos por ondas e ventos; falha mecânica por fadiga das estruturas e juntas de barreira; ancoragem incorreta, posicionamento da barreira relativo à corrente incorreto e falhas humanas relativas a compensação das mudanças de maré na força de corrente e direção (FINGAS; DUVAL; STEVENSON, 1979; MUIZIS, 2013)

Fingas, Duval e Stevenson (1979) descrevem que os *skimmers*, por outro lado, são mecanismos projetados para remover óleo da superfície da água, sem, entretanto, proporcionar grandes alterações nas propriedades físicas ou químicas do óleo, comumente utilizados em apoio às barragens. Na visão dos autores, podem ser classificados em *skimmers* de represa, de sucção, centrífugos, submersos e ainda de superfície adsorvente.

Os *skimmers* de represa podem ser definidos como mecanismos que aproveitam a gravidade para drenar o óleo da superfície da água, utilizando simples dispositivos como uma represa, um tanque e um duto ligado a um equipamento externo de bombeio. A borda superior da represa flutuante é alinhada à superfície da água, ou ainda com a interface óleo-água, assim o óleo tende a fluir até a represa, dadas as correntes e a cota inferior do fundo da represa, que acaba sendo preenchida, e o fluido, a partir de então, é extraído por meio de bombeio da represa (FINGAS; DUVAL; STEVENSON, 1979; MUIZIS, 2013).

Os *skimmers* de sucção, diferentemente do tipo represa, compreendem mecanismos, para Fingas, Duval e Stevenson (1979), alocados na superfície d'água, flutuando na região de interface entre o óleo e água, aos quais são acoplados uma bomba de vácuo. A ponta da ferramenta apresenta um alargamento da mangueira, em que a área de contato é ampliada para sucção. Os *skimmers* dessa categoria são considerados os mais pertinentes para águas calmas, em que as barreiras de contenção podem ser utilizadas na condução do óleo em direção ao bocal em que ocorrerá a sucção.

Os dois equipamentos supracitados estão a mercê da influência da ação das ondas, onde os maiores problemas associados são a grande oscilação induzidas pelas águas agitadas, a perda de eficiência por se sugar ar das partes acima do óleo e água da parte inferior, a presença de detritos no óleo. Óleos muito espessos também tendem a ser empecilhos a eficiência e a passagem de demais hidrocarbonetos (FINGAS; DUVAL; STEVENSON, 1979).

Skimmers centrífugos podem ser entendidos como equipamentos que baseiam na condução do óleo derramado por meio da criação de vórtices com o emprego de hélices em áreas de contenção onde o fluido é extraído e é passado por separador de água e óleo. Os maiores problemas vinculados a esse separador centram-se em limitações de condições operacionais similares ao que demandam os *skimmers* de represa, necessitando de uma condição de mar calmo, com ondas não ultrapassando o limite de 60 centímetros de altura e correntes restritas a uma velocidade de 30 centímetros por segundo ou 0.6 nós.

Com um emprego de uma embarcação de apoio, em situações de manchas de óleo não espessas de hidrocarbonetos, pode-se fazer o emprego de *skimmers* de submersão, baseados no uso de uma embarcação e de uma esteira rotativa inclinada, conduzindo o óleo para as extremidades, onde um instrumento mecânico desfaz a adesão do óleo, que pela flutuabilidade é coletada por um duto que conduz para o bombeio onde será extraído. A efetividade do equipamento na extração do óleo da água é aprimorada com a passagem lenta do mecanismo sobre a água a fim de que o óleo não escape do duto. A previsibilidade da coleta do óleo é maior quanto maior for a capacidade do fluido em ascender pela flutuabilidade, ou seja, o método se mostra mais efetivo para óleo de baixos pesos específicos, mais susceptíveis a flutuar com velocidade em sentido à superfície. Apresenta como vantagem, frente aos outros *skimmers* já citados, menor susceptibilidade a redução de eficiência por impacto de ondas, entretanto tendo restrição para uso em manchas e vazamentos confinados, pela exigência de embarcações e aparatos relativamente grandes e em movimento. (FINGAS; DUVAL ; STEVENSON, 1979) Como última classe de *skimmers*, os autores descrevem a existência dos mecanismos de absorção e adsorção de superfície, ou *skimmers* oleofílicos, baseados na aderência do óleo a uma superfície (em forma de um disco, corda, tambor ou cinturão) a fim de se facilitar a recuperação de óleo a partir da água. As superfícies são movidas ao longo da mancha formada para a remoção da mancha. A remoção de fato do óleo se dá pela ação de uma lâmina limpadora ou por um rolo de pressão, conduzindo os resíduos removidos para um contêiner ou sendo bombeado para a infraestrutura de armazenamento de barcas ou estruturas *onshore*. Por se tratar de um método em que uma superfície tende a estar rotacionada, sua vulnerabilidade centra-se na geração de turbulência e de ondas, afastando o óleo da coleta,

intensificadas quando há movimento da mancha e do *skimmer*.

A outra alternativa apontada é o uso de materiais absorventes compatíveis na água para a absorção. O uso desses materiais é pertinente ao permitir que haja a transição de fase do óleo de líquido para semi-sólido, facilitando a recuperação por uma estrutura absorvente, que captura o óleo por absorção (distribuição do adsorbato ao longo do corpo do absorvente) e adsorção (distribuição do adsorbato ao longo da superfície do adsorvente) dadas suas propriedades de hidrofobicidade e oleofilicidade. Os materiais adsorventes podem ser classificados em minerais inorgânicos (como perlita e cinzas vulcânicas), materiais orgânicos sintéticos (como polipropileno e espuma de poliuretano) e materiais orgânicos naturais, advindos de vegetais (como espigas de milho e fibras de madeira).

Os materiais orgânicos sintéticos tendo a capacidade de sorver superior aos demais materiais citados, apresentando em contraponto, a dificuldade de degradação no meio ambiente (BAYAT et al., 2005), enquanto materiais naturais não são persistentes no meio ambiente, absorvem de 6 a 8 vezes o seu peso em óleo e são atóxicos. Como desvantagens, entretanto, apresentam absorvência não seletiva e podem requerer esforço humano para extração e para disposição (FINGAS; DUVAL; STEVENSON, 1979). Minerais podem ser escolhidos para aplicação quando balanceadas suas características de não inflamabilidade, inércia química, fácil disponibilidade e baixo custo frente aos problemas de formação de areias em espaços abertos e o risco de inalação pelo manuseio (BANDURA et al., 2017). Destaca-se que alguns materiais são submetidos a tratamentos químicos a fim de se tornarem mais propensos a se molharem por óleo em vez de água e a se manterem flutuantes na superfície (FINGAS; DUVAL; STEVENSON, 1979).

Os métodos mecânicos podem compreender os melhores métodos para a limpeza de um derramamento, porém, como visto, apresentam dependência do mar e do vento local (OBI; KAMGBA; OBI, 2014). Dadas as vantagens e as desvantagens supracitadas, alternativas como químicas e biológicas também podem ser consideradas para a implementação.

3.3.1.2. Técnicas químicas

As técnicas químicas são adequadas para emprego tanto *onshore* quanto *offshore* e são empregadas com intuito de bloqueio do espalhamento do óleo e proteção ao sensível habitat marinho (TEWARI; SIRVAIYA, 2015). O grande trunfo de métodos dessa categoria é a ação focada nas propriedades físicas e químicas do óleo, diferentemente das técnicas físicas. Fingas, Duval e Stevenson (1979) estabelecem que o uso de agentes químicos deve ser avaliado se a ausência do uso implicasse um dano ambiental maior aos recursos físicos e biológicos do ambiente submetido ao derramamento de óleo. Segundo Vergetis ² (2002, apud VENTIKOS et al., 2004), vários agentes químicos são utilizados para o tratamento do óleo, dos quais podem ser citados os agentes dispersantes, gelificantes, de combustão, químicos para biorremediação, para neutralização e agentes para afundamento/submersão.

Os dispersantes são produtos com ação similar a um detergente que agindo sobre hidrocarbonetos, reduzem a tensão interfacial entre óleo e água de modo a dispersá-los, na forma de emulsões, pela coluna d'água do mar, reduzindo a concentração dos contaminantes e permitindo a aceleração da degradação dos hidrocarbonetos por processos naturalmente presentes no ambiente, o que mitiga impactos na costa e na vida marinha. Os dispersantes são desenvolvidos a partir de surfactantes com afinidade tanto para óleo (lipofílicos), quanto para água (lipofílicos) e quando aplicados sobre a mancha, difundem-se, dadas as afinidades de suas extremidades, até a interface entre os fluidos, propiciando uma redução da tensão interfacial entre o óleo e a água e a formação de gotículas de óleo de 1 a 70 micrômetros dispostas em uma coluna que pode se estender de 5 a 10 metros (LESSARD; DEMARCO, 2000, VENTIKOS et al., 2004).

Os agentes gelificantes, por sua vez, compreendem uma solução para a recuperação de óleo derramado baseada na gelificação seletiva de fase. Ao se misturar o agente gelificante com o óleo, o resultado logrado são géis flutuantes de óleo na presença de água, que tornam conveniente a coleta e recuperação do

² VERGETIS, E. **Oil pollution in Greek seas and spill confrontation means-methods**, National Technical University of Athens, Greece, 2002.

mar, evitando a potencial dispersão que o óleo apresentaria como filme (LV; YANG; MA, 2018). De forma geral, os agentes gelificantes podem ser classificados em catalisadores de polimerização e agentes de interligação (FINGAS; STOODLEY; LAROCHE, 1990). Cornwell e Smith (2015), por sua vez, classificam os agentes gelificantes em gelificantes poliméricos e gelificantes de baixo peso molecular, em que os primeiros (advindos da natureza como agarose ou gelatina ou sintéticos como ácido poliacrílico e polietilenoglicol) formam uma rede abrangente para amostra, permitindo a gelificação através de ligações covalentes ou não covalentes. A segunda categoria abrange moléculas pequenas que através de ligações não covalentes são potentes da formação de um gel “supramolecular” ou gel físico, normalmente moldado a partir de ligações de hidrogênio, forças de van der Waals, interações π - π , ligações metal-ligante, solvofobicidade e afins. O funcionamento dos agentes gelificantes de baixo peso molecular é pautado pela auto-montagem hierárquica, em que as ligações não covalentes formam fibrilas, que se agregam em nanofibras, que por fim acabam por interagir e abranger a amostra, na forma em uma rede similar a um sólido.

Os componentes mais comuns dessa composição incluem famílias estruturalmente diversas como aminoácidos, peptídeos e açúcares, por exemplo (DU et al, 2015). Motta, Stoyanov e Soares (2018) consideram os agentes gelificantes como uma subclasse de solidificantes, uma classe mais abrangente que compreendem além dos agentes poliméricos e de interligação, outros produtos que podem imobilizar o óleo em um sólido inerte ou mesmo em uma estado semi-sólido (FINGAS; STOODLEY; LAROCHE, 1990).

A combustão do óleo, em especial de derramamentos recentes pode ser pertinente para eliminação de grandes quantidades na superfície da água, sendo compatível com parcelas de hidrocarbonetos voláteis, que podem sofrer fácil ignição. Nesse âmbito é importante a sustentação da combustão através a inserção de resíduos de madeira e outros materiais como partida da combustão e como sustentação das chamas. Há agentes de combustão comerciais, porém são projetados para espessos filmes de óleo (superiores a 3 milímetros) e que provém aumento da área de superfície exposta a combustão, adição de catalisadores, oxidantes e componentes voláteis de baixo ponto de ebulição, absorvância e “trapeamento” do óleo ou ainda criando um mecanismo de absorção embasado na difusão pela superfície e ação capilar pelo material

aderido (DEWLING; MCCARTHY, 1980). Os impactos do método cerceiam a questão da combustão propriamente dita no tocante a poluição do ar e segurança de operação (FINGAS; DUVAL; STEVENSON, 1979). Tewari e Sirvaiya (2015) enquadram a combustão propriamente como uma técnica em uma categoria à parte.

Os agentes de afundamento ou submersão podem ser compreendidos como componentes com atração a óleo e repelência a água, absorvendo os hidrocarbonetos do filme de óleo e afundando-o de modo que não se apresentem mais visíveis. Em águas profundas, estes agentes mitigam os impactos ambientais em zonas de alta piscosidade. O método pode ainda ser vantajoso em regiões da plataforma continental ou onde os efeitos adversos na biodiversidade do fundo marinho são mínimos, mas ainda está sujeito a regulamentações devido a sua periculosidade ainda existente. Naturalmente, o óleo tende a afundar em rios interiores e águas costeiras por conta da natural absorção por argilas, silte e outros materiais particulados, porém o emprego de agentes de submersão, nos quais normalmente podem ser usufruídos grãos de areia, pó de tijolo, cinzas vulcânicas, vermiculita, cimento, rochas esmagadas e materiais afins, é condicionado a situações de derramamentos de óleos pesados, viscosos e intemperizados. O material particulado deve ser apropriadamente distribuído sobre o filme de óleo, misturado aos hidrocarbonetos e deixado em tempo para a correta interação óleo-material, eventualmente propiciando uma massa aglomerada mais pesada que a água, que acaba por afundar (DEWLING; MCCARTHY, 1980).

Os agentes químicos para biorremediação, na visão de Vergetis ² (2002, apud VENTIKOS et al., 2004) enquadram-se nessa categoria, sendo ressaltados como elementos que realizam a aceleração da degradação biológica, embora abordagem distinta seja apresentada a posteriori. Os agentes neutralizadores por sua vez podem ser compreendidos como neutralizadores ácidos, cáusticos e de solvência e são considerados componentes de apoio (OILFIELD WIKI, 2019).

Os componentes químicos não se restringem somente aos componentes citados previamente, pois outros componentes quaisquer que ajam nas

² VERGETIS, E. **Oil pollution in Greek seas and spill confrontation means-methods**, National Technical University of Athens, Greece, 2002

propriedades químicas e físicas de um filme de óleo a fim de facilitar a remoção futura possam ser utilizados, como, por exemplo, aditivos viscoelásticos, segundo Vergetis² (2002, apud VENTIKOS et al., 2004).

3.3.1.3. Técnica térmica

A remediação térmica pode compreender as técnicas envolvendo a combustão de óleo. As vantagens da remediação utilizando técnicas térmicas está centrada no baixo custo, facilidade logística, versatilidade (MULLIN; CHAMP, 2003) e pouca necessidade de equipamentos especializados, como ignitores e barreiras resistentes a fogo, para eliminação de grandes quantidades de óleo (TEWARI; SIRVAYA, 2015). Apresentam, entretanto, como desvantagens o risco operacional de incêndios, perigosos à vida humana e ao meio ambiente, além de impactos à saúde humana vinculados aos produtos de combustão, como a fumaça (MULLIN; CHAMP, 2003).

A combustão propicia a modificação da composição do óleo derramado, diminuindo o volume e transportando compostos relacionados ao petróleo antes presentes na água para a atmosfera, mitigando a necessidade de estrutura para armazenagem, transporte e coleta física dos hidrocarbonetos, reduzidos a um resíduo de combustão mais viscoso que o fluido original, que pode demandar diferente técnica de remoção. O tipo de óleo derramado, entretanto não apresenta impactos na determinação de como os hidrocarbonetos podem sofrer ignição e queimar, salvo os casos em que o óleo se encontra emulsificado ou apresenta composição pesada. Este último requer longos períodos de aquecimento e flamas mais quentes para entrar em ignição, comparativamente a óleos mais leves, demandando, a depender do caso, como iniciador de ignição, querosene e óleo diesel (FINGAS, 2017). Em geral, para uma combustão *in situ* eficiente, fatores como o ponto de fulgor (temperatura a partir da qual a mancha produz vapores em uma suficiente para ignição), velocidade do vento, estabilidade da emulsão óleo-água, temperatura ambiente, espessura do filme de óleo, evaporação da mancha em ignição, temperatura de

² VERGETIS, E. **Oil pollution in Greek seas and spill confrontation means-methods**, National Technical University of Athens, Greece, 2002

ebulição da água (abaixo da mancha isolante), espalhamento de chama, emulsificação da água em óleo e altura de chamas geradas são cruciais (BUIST et al., 1999).

As desvantagens do emprego da combustão centram-se no risco de *flashbacks* e incêndios secundários que poderiam ameaçar a vida humana, na propriedade e nos recursos e os potenciais efeitos ambientais e de saúde humana da combustão por produtos, principalmente a fumaça.

As vantagens são a logística simples, altas taxas de eliminação e eficiência de queima, versatilidade e custo. A queima pode ser usada em água doce e salgada, em lagos, córregos e oceanos, em terra ou em zonas úmidas/pântanos com apenas alguns centímetros de água. Pode ser usado nas condições tropicais e nas condições do Ártico (MULLIN; CHAMP, 2003), e nesse âmbito as técnicas de combustão compreendem o método padrão para lidar com óleo no gelo, dado que a contenção natural do óleo é potente de espessá-lo de forma suficiente para o êxito da ignição e da combustão (FINGAS, 2017).

A realização da combustão *in situ* requer equipamentos específicos, dos quais destacam-se ignitores, barreiras de contenção resistentes fogo e aditivos, estes compreendendo promotores de ignição e combustão, supressores de fumaça e agentes de absorção. Os primeiros elementos compreendem ponto de partida para a combustão, enquanto as barreiras servem ao contingenciamento já citado previamente, com o diferencial de serem resistentes de fogo. O aditivo de ignição, por sua vez, é o elemento que propicia o aumento do poder de ignição e o espalhamento de chamas sobre o óleo remanescente que não entrou em combustão e o de combustão propicia maior eliminação de óleo pela queima. Os elementos de supressão compreendem compostos organometálicos adicionados aos combustíveis para a redução de fumaça, e os agentes de absorção, já apresentados previamente, desempenham a função para a absorção do óleo e são restritos para utilização em pequenos derramamentos (BUIST et al., 1999). Pode-se notar que embora a técnica de remediação térmica compreenda de fato o emprego do calor para mitigação dos impactos do óleo, naturalmente, como no emprego de outras técnicas, requer a utilização suplementar de elementos de outras classificações, como químicos ou físicos.

3.3.1.4. Técnicas biológicas

A biodegradação de hidrocarbonetos compreende uma ocorrência natural em regiões de derramamentos de óleo (FINGAS, 2017). Muitos microrganismos possuem a capacidade de degradar hidrocarbonetos advindos do petróleo, sendo que alcanos com dez a vinte e seis carbonos são comumente observados como de fácil degradação. Hidrocarbonetos aromáticos de baixo peso molecular, como tolueno, benzeno e xileno, componentes de elevada toxicidade encontrados no petróleo também apresentam facilidades para serem biodegradados por organismos marinhos, em oposição a muitas estruturas ramificadas ou com anéis de condensação, que resistem à biodegradação. Estas são compatíveis com grupos pequenos de microrganismos, que demandam alto tempo para metabolizar hidrocarbonetos de estrutura mais complexas (ATLAS, 1995).

Os passos comuns para a degradação envolvem a oxidação do substrato por oxigenases, requerendo oxigênio molecular. Os alcanos a partir de então são convertidos em ácidos carboxílicos que serão posteriormente biodegradados via β -oxidação, processo pelo qual se utilizam ácidos graxos de lipídios para formar acetatos, que adentram o ciclo de ácido tricarboxílico. Anéis de hidrocarbonetos aromáticos, por sua vez, sofrem hidroxialquilação para formar dióis. Os anéis então são quebrados para a formação de catecóis, que são degradados em intermediários do ciclo do ácido tricarboxílico, estes com distintas estereoquímicas, sendo o produto bacteriano sem potencial carcinogênico em contraste com os produtos intermediários fúngicos. No estado final, a biodegradação ou mineralização se dá com a produção de dióxido de carbono e água, assim como biomassa na forma de grandes proteínas que são incorporadas a rede alimentar de determinado habitat (ATLAS, 1995).

Sendo a degradação biológica de hidrocarbonetos um evento intrínseco a natureza, pode ser usufruída para fins de mitigação de impactos e remediação de óleos derramados no mar. A persistência de poluentes advindos da mistura de hidrocarbonetos apresenta alto vínculo com a quantidade e a qualidade da mistura de hidrocarbonetos e com as propriedades do ecossistema afetado. Vazamentos de petróleo podem perdurar quase indefinidamente em determinado lugar, entretanto em outro local, submetido a outras condições, o mesmo derramamento de óleo pode ser facilmente degradado em poucas horas ou dias (ATLAS, 1995).

As populações de bactérias degradantes de hidrocarbonetos estão largamente distribuídas nas águas marinhas, de água doce e no solo, sendo mais presentes, segundo Cooney e Summers³³ (1976, apud ATLAS; BARTHA, 1992), em ambientes com água. Os gêneros mais proeminentes nos ambientes aquáticos, compreendem os *Pseudomonas*, *Achromobacter*, *Micrococcus*, *Nocardia*, *Vibrio*, *Acinetobacter*, *Brevibacterium*, *Corynebacterium*, *Flavobacterium*, *Candida*, *Rhodotula* e *Sporobolomyces* (BARTHA; ATLAS, 1977). A capacidade de degradação de óleo em determinado local vinculada aos microorganismos dialoga com a composição genérica da comunidade e das enzimas degradantes (ATLAS, 1995).

O cerne da biodegradação do óleo como emprego para mitigar grandes derramamentos de óleo no mar está baseada na compreensão da possibilidade de que microrganismos podem degradar e metabolizar substâncias químicas propiciando o aprimoramento da qualidade do meio ambiente (DAVE; GHALY, 2011). Ao emprego de microrganismos para a biodegradação de óleo, seja pelo estímulo através da introdução de nutrientes, bactérias ou microrganismos, denomina-se biorremediação (HELMKE et al., 2013). Embora a biorremediação possa ser efetiva, durante o longo período de recuperação local, não é sempre considerada sua implementação. Dave e Ghaly (2011) consideram a aplicação conjunta de dispersantes com técnicas mecânicas, seguidas da biorremediação em si como o método mais efetivo para o tratamento de vazamentos de óleo no mar, entretanto deve-se suscitar que a performance e as taxas de biorremediação são afetados por fatores bióticos como já explicitados (enzimas e composição de microrganismos) e por fatores abióticos ou físico- químicos que abrangem por exemplo a estrutura química do poluente e sua biodisponibilidade (PRINCE, 1997).

Atlas e Bartha (1992) delineiam que a composição química do óleo, o estado físico dos poluentes do óleo, as populações microbianas, a temperatura, a disponibilidade de oxigênio, e dos nutrientes e o potencial de hidrogênio são fatores condicionantes da performance da biodegradação do óleo.

Prince (1997), por sua vez, considera que fatores como a

³³ COONEY, J. J.; SUMMERS, R. J. (1976). Proc. Znt. Biodet. Symp., 3rd, 1975 pp. 141-155.

biodisponibilidade, pressão, salinidade e concentração como atores de impacto na efetividade do método.

A composição química, como já discutido, determina a disparidade de degradações e preferências de ataques dos microrganismos (como por exemplo, aromáticos de peso molecular alto, resinas e asfaltenos são vistos pela literatura como elementos de baixa taxa de degradação, havendo, entretanto, resultados igualmente inconclusivos (ATLAS; BARTHA, 1992). A composição física é influente na medida em que em concentrações altas de hidrocarbonetos ultrapassam a capacidade de solubilidade de água, permitindo a formação de um filme, que dependendo do espalhamento pela água, pode propiciar superfícies maiores ou menores para a colonização de microrganismos óleo-degradantes. A formação de emulsões do tipo “*mousse*” pode desacelerar a degradação, embora a emulsificação em geral favoreça a verdadeira dissolução de hidrocarbonetos na água, provendo maior área de contato entre as gotículas de óleo e os microrganismos, que eficientemente podem transportar hidrocarbonetos para o interior celular.

As comunidades de microrganismos por sua vez são importantes pela sua exposição e adaptabilidade ao derramamento de hidrocarbonetos, tendo potencial de resposta e degradação aprimorado; enquanto que a temperatura afeta a natureza física e química do óleo ademais do metabolismo dos microrganismos; a disponibilidade de oxigênio é crucial para a oxidação do substrato por oxigenases e condições aeróbicas são necessárias para que a oxidação microbial, embora degradações anaeróbicas sejam retratadas na literatura, os nutrientes como nitrogênio, fósforo e outros minerais são requeridos para a incorporação da biomassa das bactérias e fungos e o potencial de hidrogênio tendendo a um valor ótimo de ação para a degradação em valores levemente alcalinos (ATLAS; BARTHA, 1992). A biodisponibilidade, apontada por Prince (1997) por sua vez é importante dada a compreensão da performance da biorremediação, está limitada pelo transporte de massa e pressões altas, tais como altas salinidades mitigam a atividade microbial. A segunda, sobretudo, por influenciar nos níveis de nutrientes e oxigênio costeiros e nas regiões oceânicas (PRINCE, 1997).

Tewari e Tervaiya (2015) classificam as técnicas de biorremediação para vazamentos *offshore* em duas classes: os métodos de bioaumentação e

bioestimulação.

A bioestimulação pode ser compreendida como a adição de um ou mais nutrientes limitantes de *performance* para aceleração de taxas de biodegradação de contaminantes ao se induzir de uma alta taxa de crescimento de populações microbianas autóctones (NIKOLOPOULOU; KALOGERAKIS, 2010, TYAGI; FONSECA; CARVALHO, 2010). Apesar do derramamento de hidrocarbonetos compreender uma grande fonte de carbono, na maior parte dos ambientes marinhos, as condições são desfavoráveis ao crescimento das comunidades devido à presença limitada de fósforo e nitrogênio, assim como de oxigênio (NIKOLOPOULOU; KALOGERAKIS, 2010). A adição de nitrogênio e fósforo para melhoria da biodegradação tem sido foco de muitos pesquisadores, sendo a adição de bioestimulantes, no ambiente marinho, avaliada como crucial para efeitos de estímulo, conhecida a incapacidade do ambiente em proporcionar as condições ideais de nutrição para os microrganismos. A injeção de bioestimulantes, deve, primariamente, prover nutrição dos micróbios circundantes das gotículas de óleo na água, e, de forma secundária, resistir à dissolução e o “lavado” pelas ondas (TYAGI; FONSECA; CARVALHO, 2010). Além disso, há a preocupação de se gerar a eutrofização, com altas quantidades de fósforo e nitrogênio instigando o crescimento acelerado de algas em águas nutritivas (NIKOLOPOULOU; KALOGERAKIS, 2009).

Nikolopoulou e Kalogerakis (2010) avaliam cinco componentes como elementos principais utilizados para a bioestimulação: fertilizantes de liberação lenta, nutrientes inorgânicos solúveis em água, fertilizantes oleofílicos e oxigênio como substrato limitante. Ron e Rosenberg (2014), adicionalmente, suscitam a possível relevância do ácido úrico como uma possibilidade como fertilizante advindo de meios naturais e com relativa grande eficiência.

Os fertilizantes de liberação lenta podem ser compreendidos como soluções para o contorno da problemática de “lavagem” dos produtos em regiões de mar aberto e sujeitas às marés, suprimindo a anterior necessidade de constância de aplicações de outros tipos bioestimulantes. Normalmente, os bioestimulantes do tipo de liberação lenta abrangem nutrientes inorgânicos na forma de sólidos encapsulados em compostos como parafina ou óleo vegetal. Apesar de uma liberação lenta de nutrientes persistir por mais tempo no mar, solucionando os problemas da necessidade de uma fonte de longo prazo de nutrientes, problemas

podem surgir pela insuficiência no aprimoramento das taxas de biodegradação. Um dos principais representantes dessa categoria é o fertilizante *Customblen* (óleo vegetal embebendo fosfato de cálcio, fosfato de amônio e nitrato de amônio (NIKOLOPOULOU; KALOGERAKIS, 2010).

Os nutrientes inorgânicos compreendendo sobretudo o fósforo e nitrogênio tiveram sua eficiência comprovada no aprimoramento do processo de biodegradação, de modo que a taxa de biodegradação do óleo dialoga com a proporção ótima de carbono, nitrogênio e fósforo de 100:10:1, sendo a quantidade ótima demandada para o crescimento dos microrganismos dependentes dos nutrientes já pré-existentes no mar e dos tipos de componentes de óleo (NIKOLOPOULOU; KALOGERAKIS, 2010). Os produtos solúveis em água que se enquadram na categoria supracitada, comumente se manifestam na forma de sais como nitrato de potássio e nitrato de amônio, por exemplo, além de muitos fertilizantes inorgânicos comerciais. Normalmente, são dispostos no filme d'água por meio do espalhamento de grãos secos, que estão sujeitos a "lavagem" pelas ondas e pela oscilação de marés, sendo difícil a persistência em regiões altamente energéticas envolvendo as regiões costeiras (NIKOLOPOULOU; KALOGERAKIS, 2010).

Os fertilizantes oleofílicos por sua vez compreendem outra alternativa para as situações de rápida diluição e lavagem de nutrientes solúveis em água, contendo nitrogênio e fósforo. Os aditivos oleofílicos permanecem dissolvidos na fase oleofílica e, portanto, estão disponíveis e dispostos na interface água-óleo ou óleo sedimento, onde há melhoria no crescimento bacteriano e no metabolismo, segundo Santas e Santas ⁴ (2000, apud NIKOLOPOULOU; KALOGERAKIS, 2010). Destaca-se que a eficiência dos fertilizantes oleofílicos também é condicionada pelas propriedades do ambiente onde está o fertilizante, como por exemplo, a energia de ação das ondas e das marés. Nenhum aprimoramento, entretanto, foi observado em regiões de transporte de água limitado, indicando a existência de divergências na literatura a respeito da persistência desta classe de fertilizantes no mar (NIKOLOPOULOU; KALOGERAKIS, 2010). A adição de biossurfactantes ramnolipídicos, da classe

⁴ SANTAS, R; SANTAS, P. Effects of wave action on the bioremediation of crude oil saturated hydrocarbons. **Marine Pollut Bull.** 40:434–439 (2000).

dos glicolípídeos, garante a biodisponibilidade do petróleo intemperizado em situações em que os níveis de nitrogênio e fósforo inseridos são altos, entretanto, agregando-se os surfactantes com nutrientes solúveis em água, os resultados logrados são significativamente maiores (MCKEW et al., 2007).

Muitos experimentos laboratoriais apontaram que a adição de nutrientes limitadores de crescimento, em específico nitrogênio e fósforo aprimoraram a biodegradação de óleo, sendo o necessária a compreensão das condições locais de implementação dos fertilizantes. Enquanto o uso de fertilizantes com a afinidade com a água se mostra pertinente em condições de baixa energia e em regiões costeiras com grãos finos, locais protegidos do impacto da água, os fertilizantes de liberação lenta, por outro lado, podem ser adequados em situações em que se requer dosificação de nutrientes em condições em que as partículas não dissolvidas não são influenciadas pela ação de ondas. Os fertilizantes oleofílicos por outro lado são mais adaptados para locais enérgicos, espraamentos de granulometria grossa e áreas de alta exposição aos impactos dos fatores marinhos.

Ron e Rosenberg (2014), adicionalmente, suscitam a importância experimental que o ácido úrico pode representar na biorremediação. Sendo naturalmente advindo de resíduos gerados por pássaros, morcegos, répteis terrestres e muitos insetos, além de ser um dos principais componentes de fertilizantes baratos e biodisponíveis, o ácido pode consistir uma efetiva fonte de nitrogênio para biorremediação de poluentes de petróleo, tendo em vista seu aspecto insolúvel. Koren et al.(2003) atestou experimentalmente a adesão de ácido úrico a gotículas de petróleo em concomitância a adesão de uma cepa de bactéria *Acinetobacter* biodegradante que prosperou em crescimento populacional a essas condições. Sabe-se que muitas espécies distintas de bactérias usufruem do ácido úrico como fonte de nitrogênio, incluindo cepas degradadoras como as bactérias *Alcanivorax* (KNEZEVICH et al., 2006). Em volumes de controle usando sulfato de amônio solúvel em água e fosfato em vez de ácido úrico e fosfato para simular um sistema aberto, para dada concentração de bactérias, não foi detectável degradação de óleo na amostra, corroborando a ideia de que o ácido úrico é uma forma útil e base para desenvolvimento de mais uma estratégia para fertilização e bioestimulação (RON; ROSENBERG, 2014).

A bioestimulação com nutrientes permite a ocorrência e proliferação

adaptadas de forma rápida e adequada ao ambiente de derramamento, sendo de eficiência para a mitigação de impactos advindos do derramamento de óleo no mar (NIKOLOPOULOU; KALOGERAKIS, 2010).

Nikolopoulou e Kalogerakis (2010) tratam a disponibilidade de oxigênio como um fator especial e limitante da biodegradação, com efeito similar aos bioestimulantes supracitados. A adição de fertilizantes em um ambiente anóxico não impacta o aprimoramento de uma ambicionada biodegradação, considerando-se que em muitas situações a concentração de oxigênio no mar aproxima-se de zero, o que leva a uma taxa quase nula de biodegradação. Deve-se suscitar que biodegradações anaeróbicas já foram reportadas na literatura, mas são menos influentes que os processos aeróbicos. Distintamente de regiões como lençóis freáticos e solos contaminados, no ambiente marinho, há enormes dificuldades em se entregar o oxigênio aos hidrocarbonetos no cenário de um eventual derramamento e é factível o uso do oxigênio somente para aprimoramento de um processo de bioestimulação a movimentação das camadas superiores do filme de óleo.

A bioaugmentação, por outro lado, compreende a aplicação de um conjunto de estratégias customizadas e adaptadas às condições do local contaminado, baseado na adição de culturas previamente criadas com o intuito de aprimoramento da biodegradação de hidrocarbonetos. As opções de técnicas comumente utilizadas com este fim são: adição de uma cepa bacteriana pré-adaptada ao filme de óleo; a introdução de bactérias geneticamente desenvolvidas e a adição de genes pertinentes a biodegradação em um vetor a fim de ser transferido para microrganismos (EL FANTROUSSI; AGATHOS, 2005; TYAGI; FONSECA; CARVALHO, 2010).

Embora a ideia de se introduzir seres alóctones em diferentes ambientes (moldados ou naturais) não seja nova, sendo implementado na agricultura e no tratamento de resíduos, é de se suscitar que a bioaugmentação ainda se mantém como uma metodologia experimental para locais contaminados, com uma remediação *in situ*, majoritariamente documentada em escala de microcosmo ou de laboratório para representar efeitos em escalas de campo ou macrocosmo (EL FANTROUSSI; AGATHOS, 2005).

Similar a qualquer outro processo, há a necessidade de um estudo de viabilidade do método para adoção da fórmula microbiana mais adequada e

compatível para determinado local, baseada, a priori, no potencial metabólito do microrganismo, que reflete sua persistência nas condições específicas do meio ambiente (TYAGI; FONSECA; CARVALHO, 2010). Para El Fantroussi e Agathos (2005), a escolha do mecanismo de ação pode ser baseada na seleção do biótopo, na composição dos poluentes derramados, no veículo biótico a ser empregado a ser utilizado para a biodegradação (como por exemplo a cepa pura, consórcio ou vetores gênicos). Thompson et al. (2005) estabelece que a melhor abordagem deve partir de um conhecimento primário das comunidades microbianas que habitam o local alvo. As estratégias de alocação de bactérias, entretanto, mostraram-se mais efetivas quando empregado consórcios bacterianos, ou seja, componentes mais representativos de um sistema mais robusto (RAHMAN, 2002), entendendo-se por consórcio, a associação entre as populações ligadas a atividades naquele habitat que gera a divisão de ações e de retorno (GONTIER, 2016). A quantidade de biomassa a ser inoculada para a bioaugmentação advém de biorreatores, sendo crítica a transição da massa para o local contaminado.

Os inoculantes microbianos são suspensões homogêneas, produzidas nas condições ótimas, submetidas a situações de *stress* quando em contato com o ambiente local, propiciando em alguns casos o decrescimento populacional inicial da população inoculada. O uso de materiais carreadores provém um suporte físico para a biomassa, além de um melhor acesso a nutrientes, umidade e aeração, que tendem a ser favoráveis para a persistência dos microrganismos no ambiente. Moslemy (2002) comprovou os efeitos do encapsulamento gelatinoso em um consórcio bacteriano agindo em contaminação por gasolina, observando um real aprimoramento da biodegradação do fluido combatido.

Apesar da eficiência da bioaugmentação ser ainda questionada dado a concentração dos maiores êxitos na escala laboratorial, muitos pesquisadores têm conduzido estudos para assegurar que a bioaugmentação possa ser uma estratégia potencial para combater vazamentos de óleo. O uso de bioaugmentação conjugado a bioestimulação provém vantagens superiores em comparação ao uso único da bioestimulação, em contextos em que uma rápida resposta é requerida ou a toxicidade do poluente e falta de microrganismos apropriados é impactante. O uso de bactérias autóctones para aumentar as taxas populacionais dos organismos biodegradantes já existentes é vantajosa em desempenho frente

ao emprego de bioestimulação conjugada à bioaugmentação alóctone. O resultado aprimorado com o uso em combinação se deve, sobretudo a solução da problemática do uso de microrganismos indígenas e a falta de nutrientes (NIKOLOPOULOU; PASADAKIS; KALOGERAKIS, 2013).

3.4. Análise Bibliométrica

Sendo um dos objetivos do trabalho a compilação de artigos referentes a técnicas de biorremediação em uma fronteira temporal de 5 anos, é pertinente e necessário a compreensão das bases da bibliometria para a realização de uma análise pertinente a posteriori. Faz-se igualmente necessário uma reflexão a respeito da essência do trabalho, para poder classificá-lo e direcioná-lo.

A estratégia de pesquisa pode ser compreendida como o planejamento geral do estudo, envolvendo a etapa de coleta de dados, ou seja, a forma de controle das variáveis envolvidas e a interpretação dos dados utilizados, segundo Cervo e Bervian ⁵ (1996, apud VIANNA, 2012). No trabalho a ser desenvolvido, tal estratégia é comprovada com o emprego de uma pesquisa bibliográfica, baseada em fontes secundárias em que se discutirá todo o tema e as problemáticas associadas a uma bibliografia já existente, já publicada a respeito de determinado assunto (VIANNA, 2012). O intuito da estratégia de pesquisa é propiciar ao investigado a cobertura de uma gama de fenômenos superior ao que uma pesquisa direta poderia proporcionar (VIANNA, 2012), apresentando em desvantagem a necessidade de confiança às fontes consultadas, que podem apresentar dados equivocados ou de baixa credibilidade, na visão de Gil⁶ (1991, apud VIANNA, 2012).

Dada a compreensão dos meios utilizados para a realização do trabalho, faz-se também pertinente o entendimento de como a bibliometria, pode ser útil para análise. Araújo (2006) a define como “a técnica quantitativa e estatística de medição dos índices de produção e disseminação do conhecimento científico”. Tague-Stucliffe (1992) descreve a bibliometria como um artifício de construção de modelos matemáticos e medidas para predições e tomadas de decisão.

⁵ CERVO, A.L.; BERVIAN, P.A. **Metodologia Científica**. 4.ed. São Paulo: Makron Books, 1996.

⁶ GIL, A.C. Como elaborar projetos de pesquisa. 3. Ed. São Paulo: Editora Atlas, 1991.

Pritchard (1969) foi responsável pela disseminação do termo da forma como é, substituindo o termo bibliografia estatística por bibliometria, pelas distinções de definições claras e convergentes a respeito dos assuntos abordados, sendo utilizada para aludir a aplicação matemática de termos e métodos estatísticos para livros e outras mídias de comunicação.

A bibliometria está pautada e embasada em três leis básicas que estruturam seu estudo: a Lei de Bradford (produtividade de periódicos), Lei de Lotka (produtividade dos autores) e lei de Zipf (frequência de ocorrência de palavras) (FERREIRA, 2010), estas descritas e detalhadas a seguir (ARAÚJO, 2006; FERREIRA, 2010; VIANNA, 2012);

- A Lei de Bradford ou Lei da Dispersão enuncia que é possível a organização de uma coleção de periódicos relativos a determinado assunto, em ordem de produtividade decrescente, em três grupos relativos, cada um com seu respectivo terço de artigos relevantes, em que haverá um grupo com um número restrito de periódicos altamente produtivos (relevantes, mais citados), um grupo com um número intermediário de artigos menos produtivos e o último grupo concentrando uma quantidade ainda maior de número de periódicos de menor produtividade;
- A Lei de Lotka ou Lei do Quadrado sintetiza a premissa de que a maior parte da literatura científica é produzida por um número de autores pequeno. O número de autores se iguala em produção ao número reduzido de produtores. Em suma, esta lei empírica estabelece que o número de autores que tenham publica “n” trabalhos é inversamente proporcional a “n ao quadrado”;
- A Lei de Zipf ou Lei do Mínimo esforço é vinculada a uma tendência natural de disposição dos autores em se utilizar as palavras, tendendo a repetí-las com frequência o seu trabalho. As palavras indiretamente aludem, desta forma, ao assunto do trabalho, dadas as possibilidades de ordenamento das palavras relacionadas a determinados assuntos.

Vianna (2012) considera a bibliometria, em conjunto com outras disciplinas como a informetria e a cientometria, denominados como Estudos Métricos da Informação, como cruciais não só para o reconhecimento do que está sendo

pesquisado, mas também como artifício de verificação de influência de uma produção no meio científico.

Dadas as padronizações de moldes de artigos científicos, há maior possibilidade de emprego de componentes da estrutura para organização e ordenação de critérios (MARICATO, 2010).

Destaca-se que a realização de um estudo é dependente de métodos bibliométricos que, a partir de dados bibliográficos da base de dados de publicações, permitem a construção de imagens estruturais dos campos científicos, introduzindo uma medida de objetividade para a avaliação da literatura científica (GARFIELD, 1979). Os grupos de pesquisa compartilham interesses e apresentam contatos advindos de comunicação direta, e através de conferências, que, a priori, são invisíveis para o mundo exterior (ZUPIC; ČATER, 2015).

O propósito dos métodos bibliométricos se divide em duas vertentes: a análise de *performance* e o mapeamento científico (COBO et al., 2011b). A primeira é embasada na avaliação da pesquisa e no desempenho das publicações individuais e das instituições, enquanto o mapeamento científico é capaz de revelar a estrutura e o dinamismo de campos científicos, o que é útil para um pesquisador que deseja avaliar uma linha de conhecimento em específico. Os métodos bibliométricos permitem uma quantificação padronizada para avaliação da literatura, o que, poderia ser feito subjetivamente, provendo evidências de categorias teoricamente derivadas em uma revisão de um artigo (ZUPIC; ČATER, 2015).

Há cinco principais métodos bibliométricos de avaliação, que se distinguem na forma que parte deles constroem métricas para aferição de influência e similaridade: *citation analysis* (análise de citação), *co-citation analysis* (análise de co-citação) and *bibliographical coupling* (acoplamento bibliográfico). Há ainda o método que utiliza dados de coautoria para mensurar colaboração (*co-author*) e o método que permite encontrar conexões entre conceitos que co-ocorrem em títulos de publicações, palavras-chave ou mesmo, em resumos (*co-word*). Apesar da maior parte dos estudos bibliométricos utilizar a análise de citação de um determinado campo geralmente na forma de listagem dos mais citados trabalhos, autores ou jornais de determinada área, como uma forma de compreensão da influência e da importância dessas respectivas entidades no seu campo, tal método não permite a capacidade de identificação de redes e interconexões entre

trabalhos (ÜSDIKEN; PASADEOS, 1995, ZUPIC; ČATER, 2015).

A *co-citation analysis* pode ser definida como frequência em que duas unidades são citadas juntas. Ao se usar tal método, parte-se da premissa de que se dois itens são citados juntos, há maior probabilidade que os conteúdos dos tais sejam relacionados. A co-citação pode ser empregada para diferentes tipos de unidades de análise, podendo ser empregada para documentos, autores e jornais aproveitando-se do princípio de que agrupamentos repetidos estruturados por especialistas refletem a consideração que estes tem pelos itens agrupados, seja pelo fato de nesses grupos se encontrarem informações valiosas e/ou interessantes (ZUPIC; ČATER, 2015). O uso de co-citação é útil por refletir o estado do campo de pesquisa no passado, dado que o processo de publicação consome tempo. Sendo um método de análise de uma entidade dinâmica, pode ser de grande valia para a identificação de quebras de paradigmas e mudanças de pensamentos em campos de pesquisa (PASADEOS; PHELPS; KIM, 1998)

O método *bibliographical coupling*, por sua vez, se aproveita do uso do número de referências compartilhadas por dois documentos como uma medida de similaridade entre eles (ZUPIC; ČATER, 2015). O número de referências compartilhadas entre dois trabalhos é estático durante todo o tempo, ou seja a relação entre dois documentos independe do tempo em que a análise é realizada, na medida em que o número de referências de dentro de uma publicação é imutável, o que permite, em um contexto de mudança de hábitos de citação, um melhor desempenho do método em um intervalo limitado de tempo. De forma geral, o método *bibliographical coupling* é baseado na conexão entre os autores do artigo em foco, ao passo que a conexão advinda pelo método de *co-citation* é estabelecida pelos autores que estão citando os mesmos trabalhos. Como vantagens da *co-citation* pode-se elencar a identificação de documentos mais relevantes que outros para campo de pesquisa. O método *bibliographical coupling*, por outro lado, dispõe de maior confiabilidade para *clusterização* de nichos de especialidades formados por documentos de menor impacto (ZUPIC; ČATER, 2015).

A *co-author analysis* (análise de co-autor) tem como base a verificação de redes de cientistas criadas pela colaboração em artigos científicos (ACEDO et al., 2006), dado que a coautoria reflete as mais altas conexões sociais quando comparada com outras métricas, o que faz da metodologia a mais adequada para

identificação de redes sociais do que para a compreensão de estruturas dos campos de pesquisa, podendo ter aproveitamento para informações de instituições de afiliação dos autores e suas localizações geográficas (ZUPIC; ČATER, 2015).

A *co-word analysis* (análise de co-palavra), por fim, pode ser compreendida como uma técnica de análise de conteúdo que usa os termos e palavras em determinado documento para o estabelecimento de relações e a construção de estruturas conceituais de determinada área (ZUPIC; ČATER, 2015). A ideia do método está centrada na premissa de que se palavras frequentemente co-ocorrem em documentos, provavelmente os conceitos por trás dessas determinadas palavras são relacionados. O método é o único, dentre os cinco apresentados, a utilizar o conteúdo do texto para a construção de uma métrica de similaridade. O resultado logrado com a *co-word analysis* é uma rede de temas e suas relações compreendem um espaço conceitual de um campo de estudo. Sendo um método com viés conceitual, pode ser utilizado para verificar mudanças no espaço conceitual em diferentes períodos (COULTER; MONARCH; KONDA; 1998), podendo ser empregada para títulos de documentos, palavras-chave, textos completos e ainda resumos. A qualidade de resultados pode ser prejudicada com o emprego de uma análise restrita às palavras-chave, devido a falhas dos indexadores e à heterogeneidade de *journals* em demandar ou não palavras-chave em suas publicações. Textos inteiros ou trechos cada vez maiores, por outro lado, proporcionam muitos ruídos e atrapalham os algoritmos de classificação geográficas (ZUPIC; ČATER, 2015).

O uso de métodos bibliométricos com uma vertente de análise utilizando mapeamento científico apresentou uma diferente perspectiva nos campos de estudos, pois tradicionalmente eram utilizadas as metodologias de meta-análise e revisão de literatura estruturada (ZUPIC; ČATER, 2015), que demandavam tempo elevado para análises e eram limitadas a um estudo que se planejava fazer, o que se flexibilizou com o uso do mapeamento, dada suas possibilidades de quaisquer e múltiplos estudos, um foco de aspecto macro maior na busca por padrões na literatura, que podem ser expressos de forma gráfica (ZUPIC; ČATER, 2015).

4. MATERIAIS E MÉTODO

4.1. Materiais

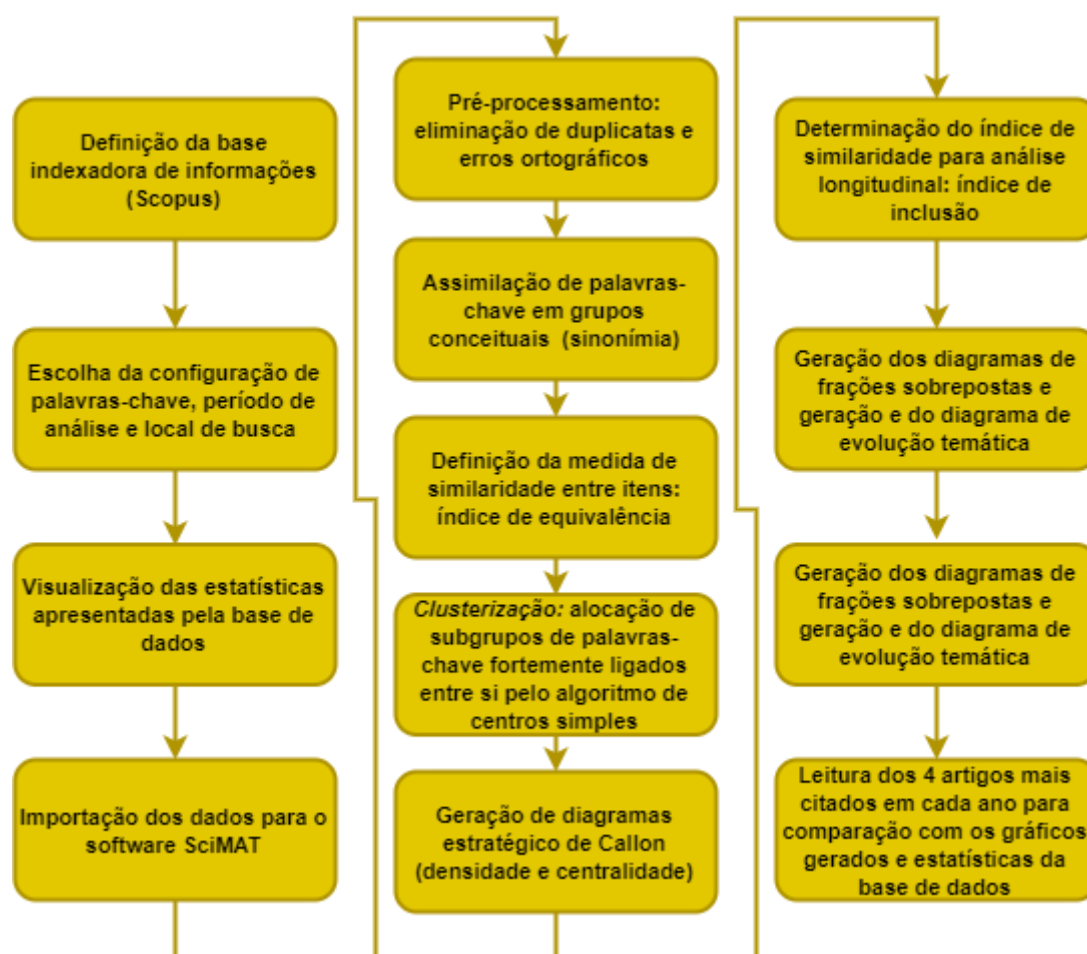
Para a realização da metodologia serão requeridos um microcomputador com acesso à internet e a programas como *Microsoft Excel* e *Word*, além dos *softwares open source SciMAT* para a construção de um mapeamento científico. Foi utilizada também a base de dados *Scopus*, da empresa de informações *Elsevier*, a partir do qual realizou-se a busca de dados bibliográficos.

4.2. Método

A metodologia de estudo e análises para o trabalho em questão foi baseada no mapeamento científico ou mapeamento bibliométrico, compreendendo uma representação espacial de como especialidades, disciplinas campos de pesquisa e documentos individuais são relacionados uns aos outros, de modo em que haja enfoque no monitoramento de um campo científico e delimitação de áreas de pesquisa a fim de se determinar suas estruturas e suas evoluções (COBO et al., 2012). O mapeamento científico, em suma, pode ser compreendido como uma abordagem quantitativa de métodos de pesquisa bibliométricas e é utilizado para achar representações de conexões intelectuais dentro do sistema dinâmico do conhecimento científico (COBO et al., 2011b, ZUPIC; ČATER, 2015).

O fluxo de trabalho da análise através do mapeamento científico, envolve a adoção de diferentes passos, os quais podem ser discriminados como a recuperação e busca de dados, pré-processamento, extração das redes, normalização, mapeamento, análise e visualização, sendo que ao fim do processo cabe ao analista ainda a interpretação e o molde de suas conclusões. A figura 1 ilustra o *modus operandi* detalhado para a realização do mapeamento científico e da análise do campo, discutido, paulatinamente, em sequência:

Figura 1 - Plano de trabalho adotado para análise do campo de pesquisa



Fonte: própria (2019)

O indexador de publicações Scopus compreende a fonte de dados para o estudo bibliométrico, em que informações a respeito de técnicas de biorremediação para vazamentos de óleo no mar serão buscadas. Destaca-se que a base de dados apresenta artifícios para restrição de busca como tipo de acesso a publicação, ano da publicação, nome de autores, área de estudo, tipo de documento, título da fonte da publicação, palavras-chave, entre outras. A estratégia de busca de informações bibliográficas foi centrada na escolha de uma configuração de palavras-chave, um período (importante para uma análise longitudinal) e um local de busca nas publicações. Optou-se pela configuração “*bioremediation oil spill offshore*”, com uma busca no período de 2014 a 2018 (5 anos), buscando-se tais palavras-chave em toda a extensão de publicações.

A escolha por essa configuração de pesquisa é justificada pelo interesse em se observar a evolução recente dos temas vinculados a área, a partir de quatro conceitos (palavras-chave iniciais) assumidos como de maior interesse (critérios subjetivos), que são exigidos em conjunto nas publicações, no caso, *bioremediation* (biorremediação), *oil* (óleo), *spill* (derramamento), *offshore* (no mar). A falta de delimitação de busca das palavras-chave nas zonas de resumo, título e área de pesquisa permite que publicações sejam “capturadas” pelo indexador apresentando as palavras-chave desejadas apenas em contextos de breves citações ou passagens, não necessariamente, estabelecendo ligações destas com o conteúdo central do trabalho. Apesar de tal busca ser potente de gerar falta de direcionamento ao objetivo inicial, desejou-se capturar todos os contextos ligados a essas palavras.

Com os documentos pesquisados, fez-se a importação dos dados bibliográficos para o software *SciMAT*, que realizou todos os passos da análise de forma nativa. A descrição de todos os passos realizados é apresentada a seguir.

O tipo de análise desejada compreende o primeiro passo do fluxo do mapeamento científico. No trabalho, dentre a variedade de análises possíveis, optou-se pela análise por ocorrência de palavras-chave, análise que é capaz de relacionar os conceitos do campo, mapeando a força de interação entre informações (CALLON; COURTIAL; TURNER, 1983). Ao final da análise, é esperado um conjunto de *clusters*, que agregam informações textuais e podem ser compreendidos como grupos semânticos (COBO et al., 2011a), que podem ser avaliados em termos de evolução por subperíodos ou como meios de análise de performance, através de grafos (COBO et al., 2011b).

Em sequência, efetua-se o pré-processamento dos dados. O pré-processamento compreende uma das etapas mais importantes do mapeamento científico, pois a qualidade da análise advém da qualidade dos dados compilados. Nesse âmbito, métodos como a detecção de duplicatas e de termos escritos de forma errônea (COBO et al., 2011b) foram empregados, como por o exemplo o método de distâncias Levenshtein, baseado no número de operações necessárias, mínimas para converter uma palavra em outra e por consequência, é potente de destacar palavras com grafias semelhantes (LEVENSHTEIN, 1966).

O software, nativamente, apresenta a opção de agregar palavras a partir de número de operações pré-definidos. Foram realizadas as pesquisas para 1, 2 ou 3 operações, para o tratamento inicial dos dados, acompanhadas a posteriori, pelo

tratamento e “limpeza” manual da base de dados, de duplicatas e erro de pronúncia. Tal etapa se apresentou custosa em relação a tempo gasto, dada a forma distinta que editoras escrevem a mesma palavra e a presença de alguns erros ortográficos.

O passo seguinte é baseado na assimilação de palavras-chave em grupos de forma conceitual. Essa fase é necessária também para limpeza da base e é igualmente custosa em tempo, porque requer o conhecimento semântico do analista a respeito da área de estudo. Nessa etapa palavras, que representam o mesmo conceito são agregadas em grupos, que unificam as características de todas as palavras internas.

Com o agrupamento realizado, por fim, pode-se demandar a análise para o programa. O primeiro passo envolveu o cálculo de similaridades entre itens, no caso, vinculado com a frequência com que palavras-chave ocorrem juntas, e que são responsáveis pela formação das redes de grupo que originam os *clusters*. Nesse âmbito medidas diferentes têm sido utilizadas pela literatura para normalizar uma rede bibliométrica, como exemplo, o cosseno de Salton (SALTON; MCGILL, 1983), o Índice de Jaccard (PETERS; RAAN, 1993) e a força de associação (COULTER; MONARCH; KONDA; 1998, VAN ECK; WALTMAN, 2007), todavia, foi utilizada como medida de similaridade, o índice de equivalência.

Conhecido ainda como força de associação ou índice de afinidade probabilística, o índice de equivalência pode ser descrito como uma razão entre o número de documentos em que duas palavras-chave coocorrem ao quadrado, dividido pelo produto entre o número de documentos em que uma palavra ocorre pelo número de documentos que a outra palavra aparece (COBO et al., 2011a). Quando duas palavras sempre ocorrem sozinhas, o índice de equivalência assume valor unitário, ao passo que, em situações em que nunca aparecem em conjunto, o resultado do índice equivale a zero.

Calculados os índices de similaridade entre palavras-chave, o passo seguinte é a *clusterização*, que está vinculada com a alocação de subgrupos de palavras-chave fortemente ligados entre si, correspondentes a centros de interesse ou problemas de pesquisa, objetos de significantes investimentos por pesquisadores (CALLON; COURTIAL; LAVILLE, 1991). Nesse passo, fora utilizado nativamente pelo *software*, o algoritmo de centros simples, baseado em dois passos através dos dados para produzir as redes desejadas (COULTER, 1998). O primeiro passo compreende a representação das associações mais fortes, enquanto o segundo

passo é baseado na adição de ligações de fraca intensidade.

O algoritmo de *clusterização* demanda quatro parâmetros para agregação: frequência mínima de ocorrência de palavras, limites de ocorrência e tamanhos mínimos e máximos da rede. As duas primeiras variáveis tem sua utilidade vinculada a evitar que associações fracas dominem a construção da rede, dado que duas palavras não frequentes na base de dados, mas que sempre aparecem juntas podem ter valores de ligação maiores em comparação a palavras que mais frequentes e que quase sempre aparecem juntas. No projeto, foi estabelecido um corte de frequência de 10 palavras, demandando extensões das redes dos *clusters* que abrangessem de 5 a 10 grupos, no máximo. Com a *clusterização* realizada, pode-se por fim buscar a construção de diagramas estratégicos para a detecção dos temas de maiores destaques, baseando-se na construção de Callon (CALLON; COURTIAL; LAVILLE, 1991), que classifica os *clusters* moldados em quatro categorias de valoração temática, para detecção dos principais temas.

Os diagramas representados são baseados em duas grandezas, a centralidade e a densidade de Callon. A primeira pode ser compreendida como uma medida do grau de interação entre redes, definida como o fator 10 multiplicado pela somatória dos índices de equivalência entre uma palavra pertencendo a um tema, ou *cluster*, e outra pertencendo a outro tema, outro *cluster* (COBO et al., 2011b). A centralidade mede, em suma, para determinado *cluster*, a intensidade de ligação com outros *clusters* (CALLON; COURTIAL; LAVILLE, 1991), ou seja, a força de ligações externas entre temas e que pode aludir a importância do tema no campo (COBO et al., 2011b). A densidade de Callon por sua vez representa a força das ligações que fazem a coesão dos *clusters* e que representam a capacidade do cluster de se manter e de se desenvolver em um determinado tempo (CALLON; COURTIAL; LAVILLE, 1991). A medida de densidade pode ser calculada como o produto do fator 100 pela somatória dos índices de equivalência entre palavras dentro dos clusters, dividido pelo número total de palavras no *cluster*.

Com essas duas medidas, é possível realizar a plotagem dos clusters em um gráfico, com quatro quadrantes que são representantes sintéticos da morfologia da rede, sendo úteis para uma análise dinâmica (CALLON; COURTIAL; LAVILLE, 1991). Colocando-se a centralidade como eixo horizontal, e a densidade como eixo vertical, pode-se determinar uma classificação entre os temas (*clusters*) da seguinte forma:

- *Clusters* que se encontram no primeiro quadrante são fortemente ligados com outros, assim como apresentam ligações internas fortes, o que significa que são provavelmente bem desenvolvidos e são estratégicos, compreendendo os temas motores, centrais do campo (CALLON; COURTIAL; LAVILLE, 1991).
- *Clusters* de alta centralidade, mas baixa densidade (segundo quadrantes) são fortemente relacionados com outros *clusters*, mas suas ligações internas são fracas. Indicam que, embora estratégicos os temas sejam para o campo de pesquisa, provavelmente recebem mais investimentos e outras atenções de outros campos, não sendo bem desenvolvidos. Podem ser representativos de problemas de pesquisa, que estão se tornando centrais, mas que ainda não são objetos de significativos investimentos, ou seja, temas transversais ou básicos (CALLON; COURTIAL; LAVILLE, 1991).
- Os *clusters* do terceiro quadrante, com alta densidade e baixa centralidade, na verdade, correspondem aos temas periféricos, internamente bem desenvolvidos. Podem ser interpretados como clusters que em algum momento já foram centrais, mas que, devido a ausência de interesse acabaram sendo isolados, embora discutidos no passado (CALLON; COURTIAL; LAVILLE, 1991).
- Os clusters no quarto quadrante com baixos valores de centralidade e de densidade representam as margens da rede, sem apresentar indícios de contribuição explícitas ao campo (CALLON; COURTIAL; LAVILLE, 1991).

Após a construção e interpretação dos clusters em diagramas estratégicos, onde se pode inferir a importância dos temas, procedeu-se para a construção de diagramas de evolução temática, ao longo do período de análise, ou seja, uma análise longitudinal. A evolução dos temas é percebida, no caso de coocorrência, quando há palavras presentes em ambos os temas, que se manifestam em períodos distintos. Então, pode-se denominar as palavras de intersecção entre dois temas detectados em períodos diferentes, como vínculos temáticos ou conceituais (COBO et al., 2011a). Para normalizar o vínculo temático, o índice de inclusão é utilizado (número palavras que estão presentes em ambos os temas divididos pelo número de palavras mínimo entre os dois temas. Em caso de palavras de um tema estarem em totalidade presentes nos temas dos anos seguintes, o índice é equivalente ao valor 1. Utilizando-se tais gráficos, pode montar um gráfico bipartido com grafos

indicando a evolução temática e um gráfico de evolução de palavras-chave. Com os resultados logrados, constatações a respeito da evolução dos temas no campo podem ser realizadas.

Por fim, para se comprovar um leve direcionamento e concordância entre informações dos mapas construídos, pode-se ler uma amostragem dos trabalhos indexados pela busca a fim de se comprovar a concordância dos diagramas com o conteúdo. Para o presente projeto, foram utilizados como amostragem os quatro artigos mais citados de cada ano, como forma de atestar, algum leve direcionamento dos mapas com os conteúdos dos trabalhos. Apesar de não serem representativos da população, as publicações mais citadas provavelmente terão sua abordagem vinculadas aos temas motores do campo de pesquisa.

A análise desenvolvida também levará em conta e associados os índices de performance como números de citações, índice-h, ou seja número “h” de artigos que receberam “h” citações (HIRSCH, 2005), o número de documentos, além de informações estatísticas providas pela base de dados, que facilmente, podem ser consultadas antes do delineamento dos diagramas, dos mapas, ou seja, podem ser entendida como a etapa “zero” ou suplementar do projeto.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

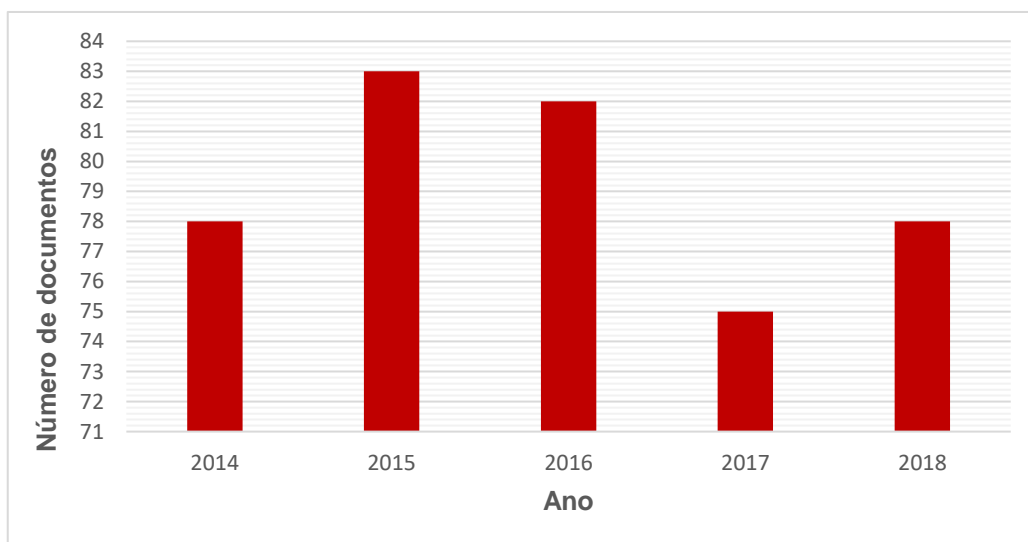
A partir da avaliação de configurações de palavras-chave buscadas na base de dados *Scopus*, o conjunto assumido como mais adequado para a realização da análise envolveu a busca das palavras-chave previamente apresentadas: *bioremediation oil spill offshore*, no corpo de todas as publicações, em um horizonte temporal, anteriormente apresentado, de cinco anos. A escolha de um conjunto de termos pode ser embasada na sensibilidade qualitativa e quantitativa a qual uma pesquisa está submetida, considerando que palavras-chave de conceito mais genérico e abrangente podem enviesar as buscas para outras áreas temáticas, da mesma forma que poucos termos podem não ser suficientemente restritivos. A opção adotada apontou a existência de 386 documentos, que cumpriram os requisitos demandados.

Deve-se suscitar que, ao se priorizar a busca de termos em todo o corpo de publicações frente a “filtragem” por títulos, resumos e palavras-chave, cria-se o

risco de seleção de trabalhos que tratam dos conceitos pesquisados, de forma secundária ou suplementar. A restrição de busca em trechos da publicação que, inerentemente ressaltam a síntese e a essência conceitual da publicação (como exemplo, o resumo), podem ser de maior direcionamento a compreensão do campo de pesquisa. A estratégia adotada no presente trabalho, entretanto, também valorizou a importância suplementar dos conceitos de biorremediação de vazamentos de óleo, eventualmente presentes dentro de publicações na forma de passagens ou breve citações.

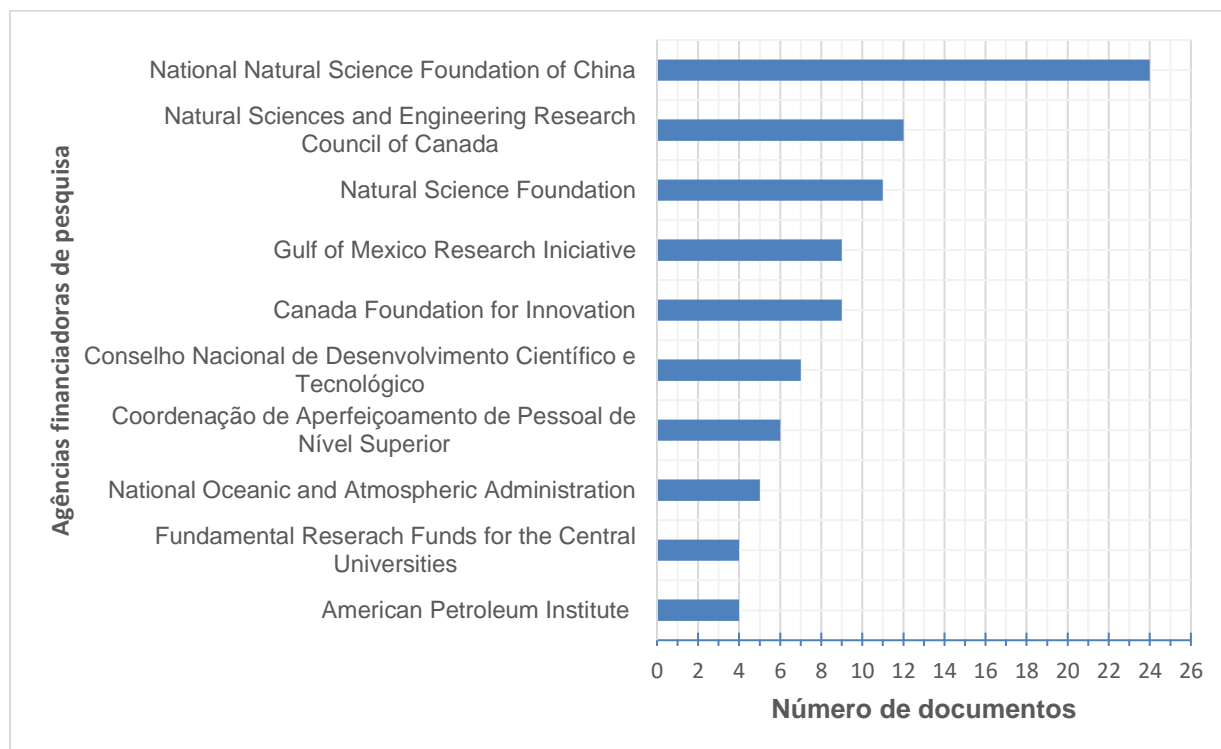
A partir da busca inicial, a base *Scopus* já foi potente de apresentar dados para análise, tendo em vista que a submissão de periódicos em uma revista ou *journal* e à base de dados, demanda a entrada de variáveis como o local de publicação, a agência fomentadora da pesquisa, a localização do estudo, autores envolvidos na composição do periódico e uma área científica primordialmente associada aquela publicação. Organizando-se tais informações na forma de gráficos, algumas constatações iniciais do campo temático da busca podem ser obtidas. As Figuras 2 a 9 elucidam as estatísticas vinculadas às publicações, com a configuração de busca “*bioremediation oil spill offshore*” em todos os campos dos documentos:

Figura 2- Distribuição do número de publicações no período de 2014-2018.



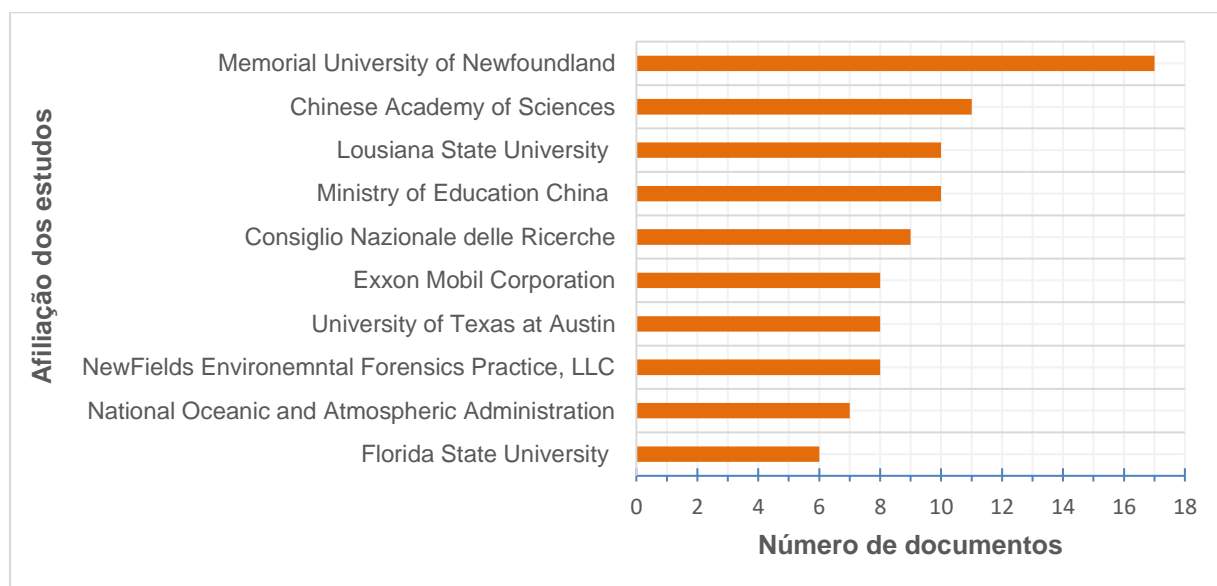
Fonte: adaptado de Scopus (2019).

Figura 3 - *Ranking* das dez instituições ou agências financiadoras com maior número de publicações amparadas



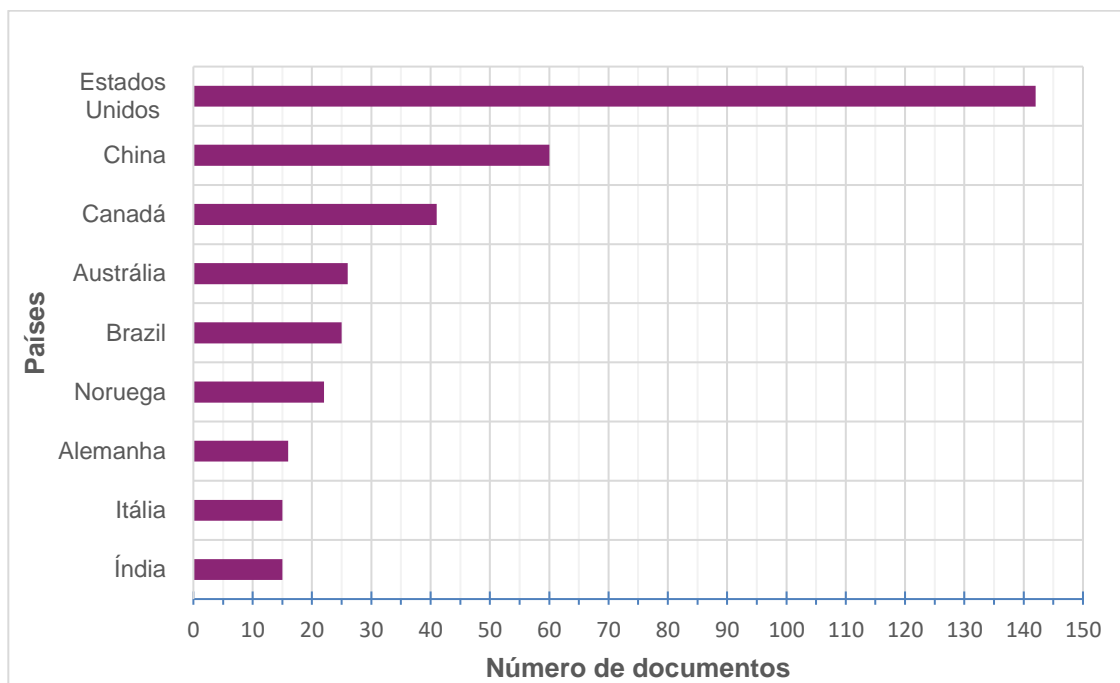
Fonte: adaptado de Scopus (2019)

Figura 4 - Ranking de universidades, institutos ou empresas com maior número periódicos afiliados.



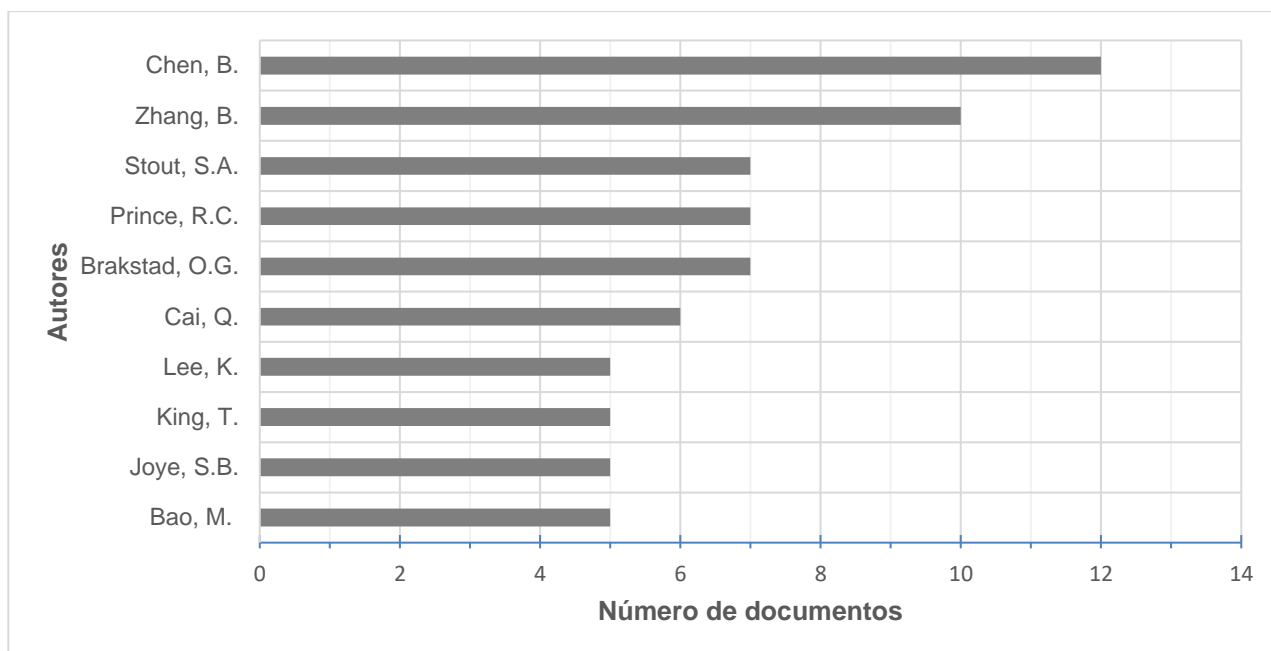
Fonte: adaptado de Scopus (2019)

Figura 5 - *Ranking* dos países de publicação dos documentos, com os territórios com maior número de publicações para as condições descritas.



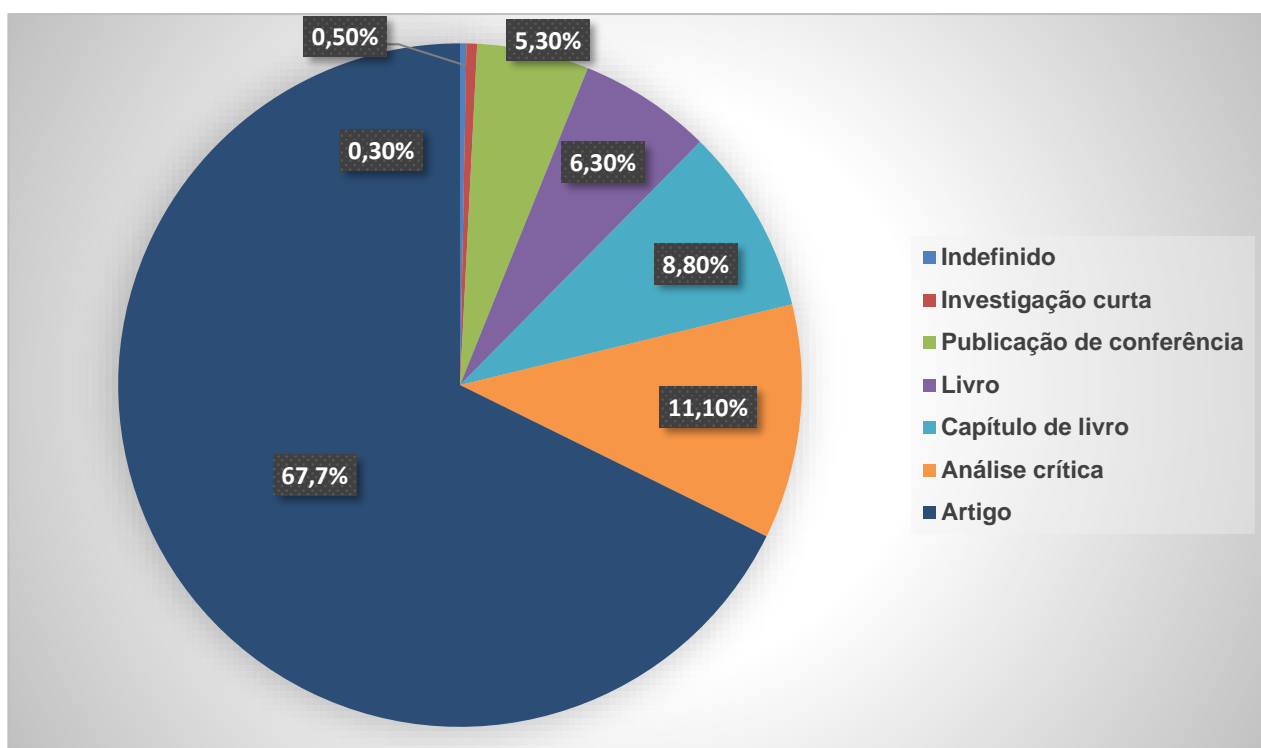
Fonte: adaptado de Scopus (2019)

Figura 6 - *Ranking* de autores com maior número de publicações vinculadas a configuração da pesquisa.



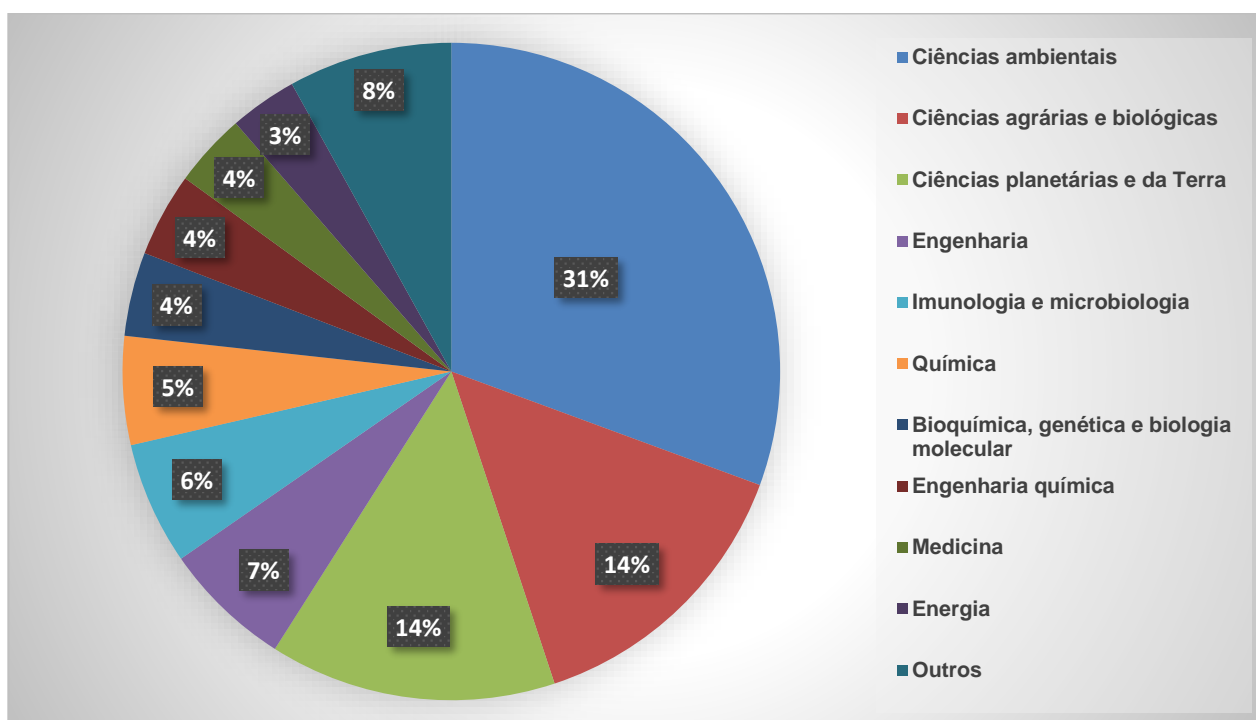
Fonte: adaptado de Scopus (2019)

Figura 7 - Tipos de documentos indexados às palavras-chave da busca.



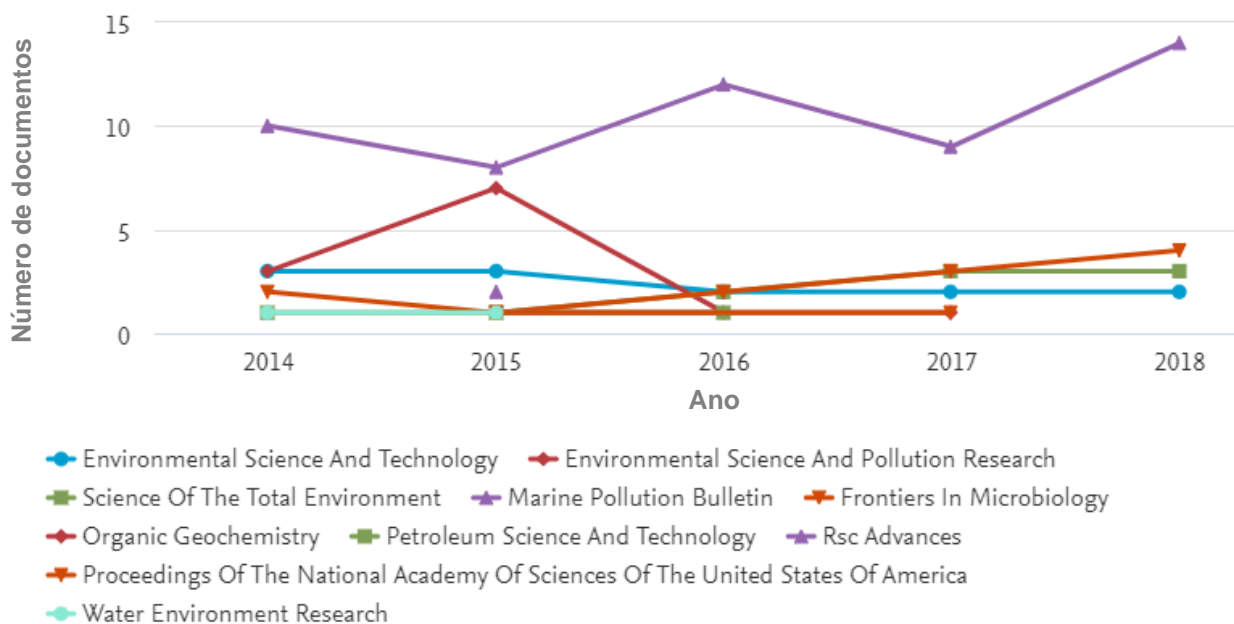
Fonte: adaptado de Scopus (2019)

Figura 8 - Classificação dos trabalhos indexados, em áreas de estudo reportadas à base de dados.



Fonte: adaptado de Scopus (2019)

Figura 9 – Número de publicações anuais das dez fontes com maior número de periódicos



Fonte: adaptado de Scopus (2019)

Apesar da compilação de tais informações não serem diagnóstico de conteúdo, algumas constatações podem ser feitas, a respeito de eventuais tendências da pesquisa. Pode-se perceber que 2015 e 2016 (Figura 2) são os anos com maior destaque, quantitativamente, em relação a publicações, indexadas pelas palavras de pesquisa. Naturalmente, a probabilidade dos documentos de maior importância estarem concentrados nesse período de dois anos, também passa a ser maior, o que pode ser comprovado a posteriori, com os três documentos mais citados da pesquisa, publicados entre 2015 e 2016. O fato de haver um maior número de publicações nesse período pode ser apenas fruto do acaso ou correlacionado a eventos de derramamento de óleo no mar ou desenvolvimento tecnológico para mitigação de acidentes como tais. Uma medida de correlação entre o número de publicações e acidentes ou entre publicações e desenvolvimento tecnológico poderia suscitar uma tendência com maior precisão, o que é inviável com a análise de dados “crus”, cujo conteúdo não foi lido, a priori.

Destaca-se como possíveis eventos estimuladores de pesquisa vinculadas aos temas desejados, um vazamento oriundo de embarcações em *Galveston Bay*, no Texas (Estados Unidos) e um evento ocorrido em Yellowstone (Estados Unidos),

este oriundo do vazamento de dutos, ocorridos em 2015. Outras pesquisas podem ainda estar vinculadas a eventos em horizontes de tempo distantes. O acidente no campo de Macondo, da plataforma *Deepwater Horizon*, até tal instante completava 5 anos, com problemas ambientais ainda persistentes, mantendo margem ainda para o desenvolvimento de análises, métodos e tecnologias que possibilitem quantificação, mitigação ou resolução de impactos ambientais decorrentes do vazamento do óleo.

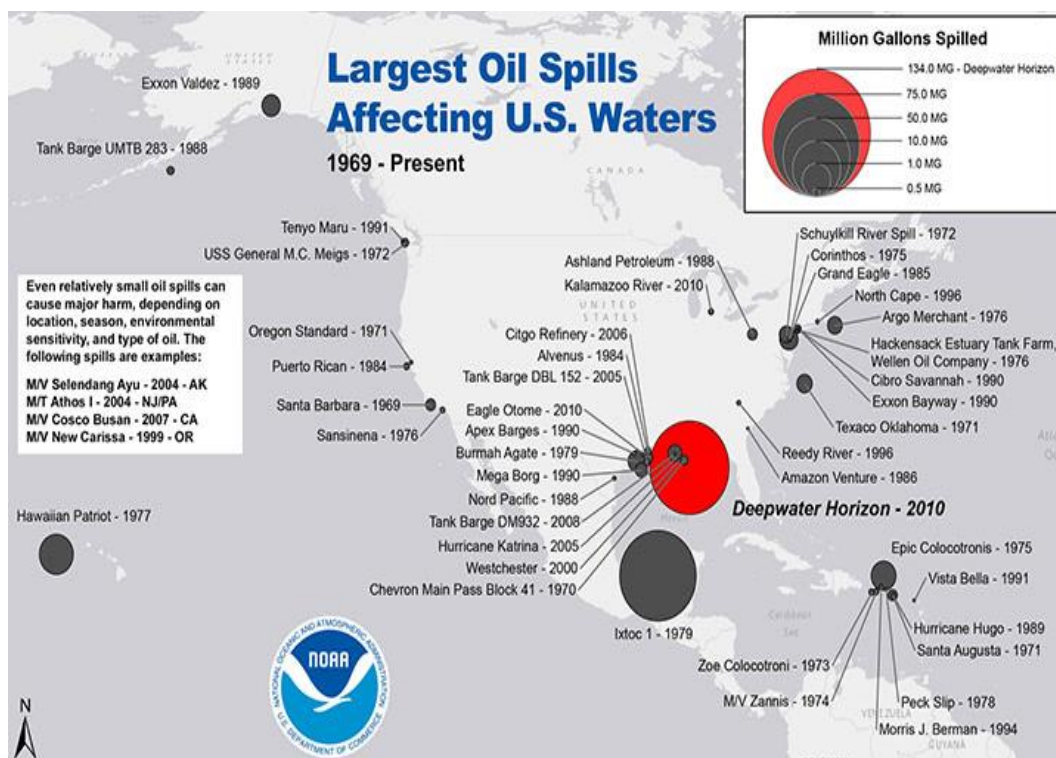
A configuração de palavras-chave buscada também ressaltou a tendência de fragmentação do campo de estudo, com relação a autores de publicações, áreas de estudo, *journals* e revistas de publicações e afiliações. Embora, 386 documentos tenham sido indexados com a estratégia de busca adotada, há uma divisão com muitos autores, fontes e tipos de documentos vinculados a um número restrito de publicações. A Figura 4 lista que a universidade com maior trabalhos vinculados a base, possui 17 publicações (cerca de 4,3% do total indexado), enquanto o autor com maior quantidade de trabalhos apresenta 12 publicações (Figura 6) e o *journal* no ano de suporte a maior quantidade de publicações, em 2018, conteve 14 documentos (Figura 9). Os números logrados, entretanto, não devem ser considerados justificativas para atestar que a biorremediação é uma área sem destaque no meio científico. A grande fragmentação, observando-se o número total de publicações, pode ser considerada como um efeito da interdisciplinaridade que abrange os tópicos vinculados, tendo em vista a grande distribuição de trabalhos por autores e editoras científicas, e que é retratado pela Figura 8, com a grande variedade de rótulos científicos aplicados às publicações (áreas enquadradas). O fato da maior motivação do estudo de técnicas de biorremediação estar pautado na mitigação de danos ambientais justifica a maior parcela dos documentos encontrarem-se vinculados a área de estudo de ciências ambientais.

Outro aspecto a ser ressaltado nessa análise primordial é o fomento de instituições estatais a pesquisa de âmbito científico, potentes de se gerar principalmente artigos científicos, análises e capítulos de livros, como observado pelas Figuras 3 e 7. As situações de vazamento de óleo implicam problemas em ecossistemas, cuja mitigação e eventual resolução é da alçada de Estados e governos, dado a escala da evolução dos problemas. Dessa forma, naturalmente, espera-se que haja o envolvimento de organizações estatais e de pesquisa para o fomento da resolução dos problemas de vazamentos de óleo, cujos estudos visam a

mitigação dos prejuízos econômicos e sobretudo, ambientais. Há de se suscitar, entretanto, que é esperada alguma participação direta em pesquisa de empresas como *Exxon Mobil Corporation* e *NewField Environmental Forensics Practice* (Figura 4), dado que a primeira, envolvida com toda a cadeia de petróleo, possivelmente pode realizar estudos de contingência de impactos, a partir de situações hipotéticas para redução de prejuízo material e oriundo de sanções governamentais, enquanto que a segunda, por ser uma empresa de serviços e consultoria, pode propor e desenvolver soluções, para lograr lucro através da prestação de serviços. Naturalmente, o desenvolvimento de novos estudos, correspondendo a vanguarda tecnológica, é em sua maioria, realizado pelas instituições acadêmicas ou universidade, o que também se comprova pela visualização da Figura 4.

Diferentemente da fragmentação temática constatada a partir da busca por técnicas de biorremediação para vazamentos de óleo no mar, a localização das publicações está concentrada, sobretudo, na China, com Estados Unidos e Canadá como locais secundários, observando-se a Figura 5. Tal concentração pode estar vinculada a fatores como políticas educacionais, poder econômico dos países envolvidos ou até mesmo como uma resposta reativa a incidentes, que implicaram danos na ecologia local dos respectivos países, mesmos que em épocas remotas, conhecidos os impactos advindos da persistência de hidrocarbonetos no meio ambiente. Os Estados Unidos estiveram à mercê das consequências do vazamento de óleo em Macondo, advindo do *blowout* sentido na plataforma de produção *Deepwater Horizon*, no golfo do México em 2010, além de outros vazamentos anteriores de menor dimensão. O histórico de acidentes, apresentado na Figura 10, pode suportar a evidência de ações reativas na forma de pesquisa.

Figura 10 - Grandes vazamentos afetando as águas dos Estados Unidos, de 1969 a 2019 (visualização em 26/10)



Fonte: National Oceanic and Atmospheric Administration (2019)

A imagem de título “Maiores vazamentos e óleo afetando as águas dos Estados Unidos”, demarca as localizações, desde 1969, onde decorreram os vazamentos de óleo, com o ano de ocorrência ao lado. A dimensão dos círculos assim como as cores são representativos da dimensão do vazamento, oscilando de 0.5 milhão de galões de óleo a 134 milhões de galões (este último valor correspondente ao vazamento de óleo do desastre de Macondo, em 2010) e representativo do acidente da plataforma *Deepwater Horizon*.

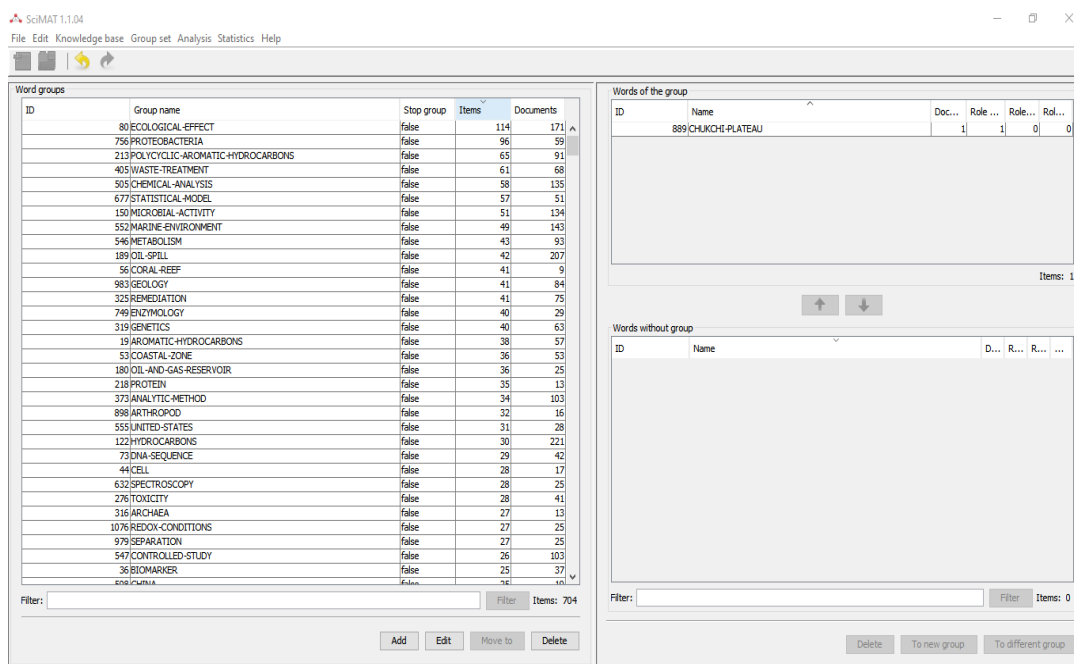
Com relação a China, há alguns eventos que também possam ter justificado o discrepante nível de investimentos na área de técnicas de mitigação de impactos, como acidente com o navio-tanque na vizinha Coreia do Sul, onde ocorreu um acidente com o navio Hebei Spirit, em 2007, em Daeson. No Canadá, as influências dos acidentes como o derramamento advindo do navio Exxon-Valdez, ocorrido no Alaska, em 1989, ou ainda acidente do acidente anterior do petroleiro Odyssey, em 1988. Embora sejam suscitadas tais hipóteses, sem o conhecimento completo do

conteúdo dos trabalhos, nenhuma correlação estatística pode ser realizada confirmando ou descartando tais hipóteses, dentro da restrição temporal pré-estabelecida.

Após as constatações iniciais, feitas sobre as informações reportadas na base de dados, a utilização de técnicas de mapeamento científico faz-se necessária para distinção dos temas abordados em relevância para a compreensão do campo temático. Nesse âmbito, como já explicitado, fez-se o uso do *software* de mapeamento científico *SciMAT* para uma avaliação temporal. Após a extração de informações bibliográficas da base de dados *Scopus*, as palavras-chave, elementos centrais para a construção do mapa temático, precisaram de alto grau de tratamento para eliminação de redundâncias, sinônimos e erros ortográficos. Nessa etapa do tratamento, concentraram-se as maiores dificuldades, por conta da quantidade de palavras-chave e informações a serem tratadas.

A construção de um mapa temático é dependente da alocação de palavras-chave em grupos de mesmo conceito, como já exposto anteriormente. Ao se buscar, em uma base de dados, os documentos vinculados a configuração de palavras-chave de entrada, estes também apresentam em seu conteúdo uma sequência de palavras-chave, que serão utilizadas para compreensão das relações temáticas. Os 386 documentos indexados apresentaram em conjunto a quantidade de 4442 palavras-chave, demandando tratamento prévio, antes da realização da análise. O tratamento de palavras-chave compreendeu a etapa de maiores e dificuldades e dispêndio temporal de todo o projeto. Os indícios de grande interdisciplinaridade ressaltados anteriormente, manifestaram-se no elevado número de palavras-chave, com conceitos implícitos distintos. Ao final do trabalho de tratamento, logrou-se de 621 grupos conceituais de palavras-chave, sobre os quais, a construção dos mapas temáticos pode ser realizada. A Figura 11 ilustra a organização temática das palavras-chave, extraídas pelo programa:

Figura 11 - Interface do *software* para classificação de palavras-chave em conceitos.



Fonte: própria (2019)

Destaca-se que a interface do software expõe os grupos formados, as palavras-chave internas a esse grupo e as palavras-chave sem grupos, que podem ser adicionalmente manualmente aos grupos existentes, ou podem integrar grupos novos. Ao lado esquerdo da interface do usuário, encontram-se os grupos temáticos, cuja procura pode ser facilitada por um mecanismo de filtragem, enquanto na aba direita superior, encontram-se palavras-chave inseridas em cada um dos grupos e a aba inferior direita retrata as palavras que ainda precisam de agrupamentos.

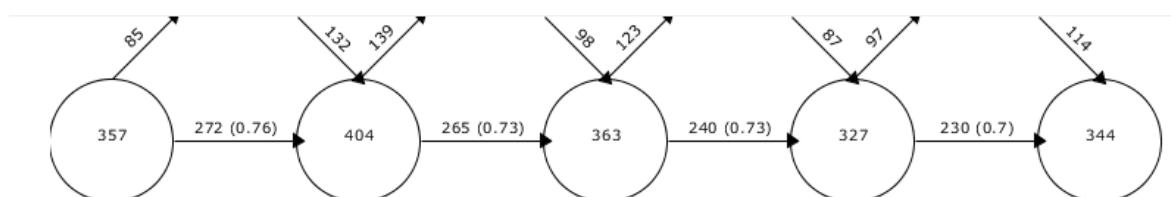
O tratamento de dados compreende uma etapa essencial para eliminação de sinônimos, termos escritos em ordens invertidas e plurais, dada a limitação do *software* em interpretação da semântica dos termos. O agrupamento de palavras-chave é concomitantemente o maior trunfo e onde pode, a depender do analista, residir a maior fragilidade do método de mapeamento científico, dado que a classificação nos grupos é feita manualmente. Dado que o mapeamento científico pode ser compreendido como um artifício para melhor observação dos temas de

maior valia dentro de técnicas de biorremediação em vazamentos de óleo, o desconhecimento do significado dos termos pela não leitura dos trabalhos pode condicionar uma classificação de palavras em grupos em que não são compatíveis, enviesando a análise. A vantagem da limpeza e classificação manual dos termos em grupos é o menor esforço computacional e a clareza nas ligações temáticas, propiciando análises e conclusões claras, sem ambiguidade ou contradições.

Como as práticas de biorremediação envolvem, claramente, o uso de seres vivos direta ou indiretamente, durante a extração de palavras-chave da base de dados, nomes científicos de fungos, animais, bactérias, arqueobactérias e plantas apresentaram alta frequência na base de conhecimento. Desse modo, como a distinção de espécies poderia divergir as conexões entre temas, a estratégia melhor adotada levou em conta a classificação taxonômica de animais, bactérias, arqueobactérias e plantas em filos, mantendo-se todas as arqueobactérias citadas como palavras-chave e de menor frequência na classificação taxonômica de reino. Outra estratégia necessariamente adotada levou em consideração a inserção de palavras-chave, em grupos com conceitos, mas abrangentes, em vez de assimilação apenas por sinonímia, de conceitos em mesmo nível de abrangência, buscando-se assim a redução do número de grupos com poucos integrantes, e que para a análise não apresentam representatividade temática.

Após a classificação, em agrupamentos, a análise foi executada pelo *software* produzindo um diagrama de sobreposição de palavras-chave ao longo do período de cinco anos, apresentado pela Figura 12:

Figura 12 - Diagrama de frações sobrepostas (palavras-chave "emigrando" e "imigrando" na sucessão dos cinco anos analisados.



Fonte: própria (2019)

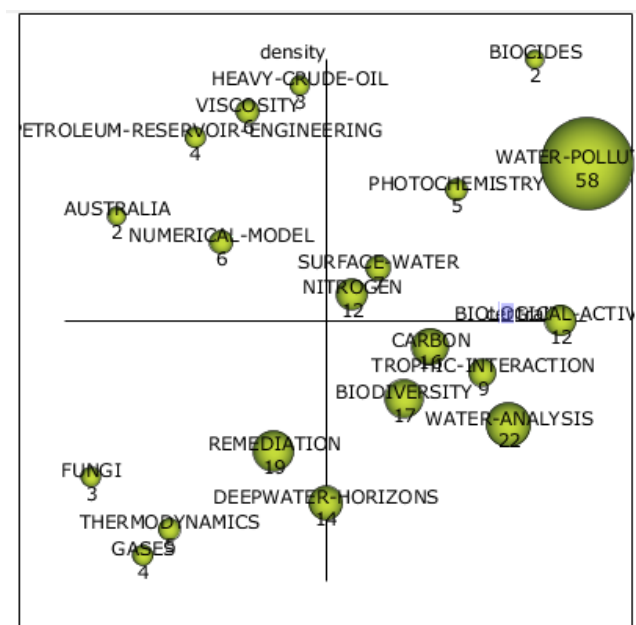
O diagrama gerado pelo *software*, quando demandada sua análise apresenta de forma esquemática a evolução da palavras-chave ao longo dos cinco períodos

de análise, de acordo com a filosofia Price e Gurse (1975). Os círculos são representantes de cada período, no caso de estudo, da esquerda para direita, os anos de 2014 a 2018, dentro dos quais, os números representam a quantidade de palavras-chave dentro do subperíodo. As setas entre os períodos representam a quantidade de palavras-chave compartilhadas entre eles e, entre parêntesis, o Índice de Similaridade, a fração de sobreposição entre palavras (índice de inclusão). As setas “entrando” nos círculos representam o nível de novas palavras-chave do subperíodo enquanto as setas com sentido de saída dos círculos indicam as palavras-chave que foram descontinuadas no período seguinte.

Analisando-se o diagrama, algumas peculiaridades do campo de estudo podem ser discutidas a seguir. O número de palavras-chave do período sofre poucas modificações no intervalo de 5 anos retratado, assim como o número de palavras-chave transientes também é relativamente alto frente as palavras que se mantêm no período. O índice de similaridade entre as palavras se mantém estável. Tais resultados indicam que a terminologia do campo de pesquisa de técnicas de biorremediação se manteve estagnada, com um núcleo central de palavras-chave e seus conceitos e um alto número de palavras-chave transitórias que não são assimiladas à base de conhecimento, ou seja, não são base para o desenvolvimento de novos conceitos. A estagnação pode ser justificada pelo período curto de análise, em que mudanças de paradigma e metodologias são morosas e podem não se manifestar em 5 anos. A consolidação da terminologia e o progresso de campo de estudo poderiam ser verificados com uma análise em um período maior, em que fosse comprovado o aumento da similaridade entre os períodos (COBO et al., 2011a).

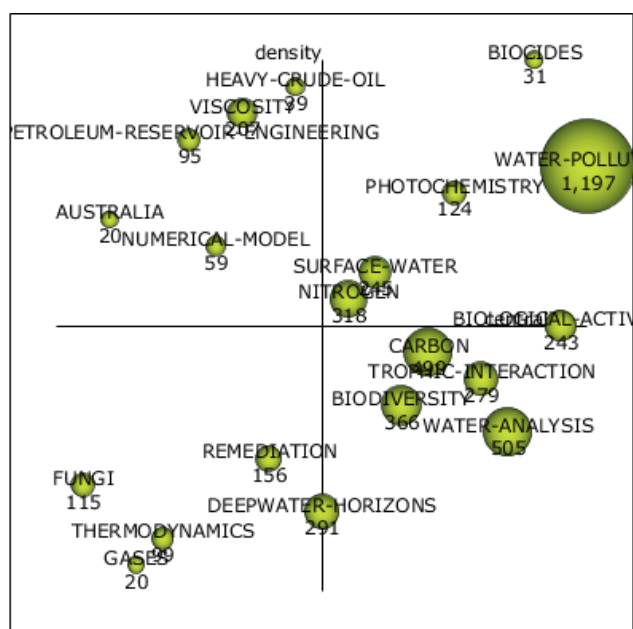
Atestado o conservadorismo na base de conhecimento das técnicas de biorremediação, o programa ainda é potente de apresentar uma visualização de *clusters* temáticos, organizadas na forma do diagrama estratégico de Callon (CALLON; COURTIAL; LAVILLE, 1991) em que se caracterizam os grupos de palavras em dois parâmetros; centralidade e densidade, como já apresentado anteriormente. As figuras 13 a 28 ilustram os diagramas de Callon, para os períodos de 2014 a 2018, em que a dimensão das esferas representadas é proporcional à contagem de documentos em cada *cluster* ou à quantidade de citações deles ou ao índice-h. Sobre tais diagramas, discussões vinculando-se tempo a importância temática podem ser realizadas.

Figura 13 - Diagrama estratégico baseado no número total de documentos para o ano de 2014, dada a configuração de busca pelas palavras-chave *bioremediation oil spill offshore*.



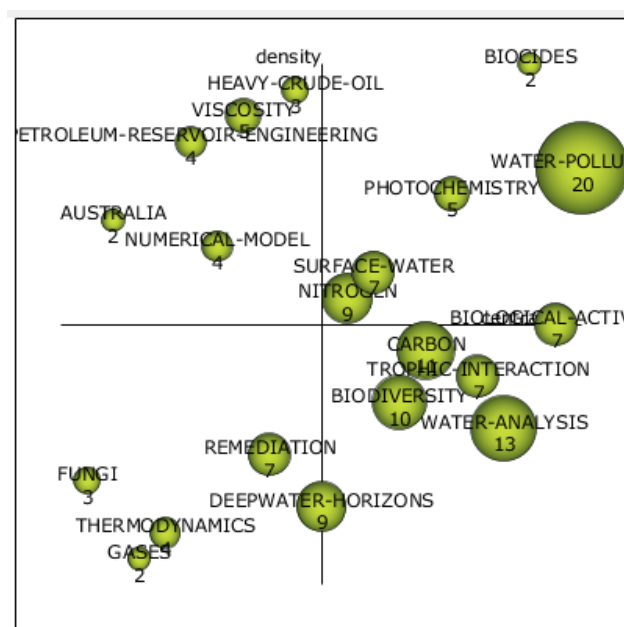
Fonte: própria (2019).

Figura 14 - Diagrama estratégico baseado no total de citações recebidas para o ano de 2014, dada a configuração de busca pelas palavras-chave *bioremediation oil spill offshore*.



Fonte: própria (2019).

Figura 15 - Diagrama baseado no índice-h de desempenho, para os *clusters* de 2014, dada a configuração de busca pelas palavras-chave *bioremediation oil spill offshore*.



Fonte: própria (2019).

A partir dos diagramas construídos para 2014 (Figuras 13, 14 e 15), levando em conta medidas quantitativas e qualitativas de performance, como o índice-h, algumas constatações, podem ser extraídas. Os temas (*clusters* de palavras-chave que carregam o nome da palavra mais “central”) *WATER-POLLUTION* (poluição da água); *PHOTOCHEMISTRY* (fotoquímica), *SURFACE-WATER* (superfície da água) e *NITROGEN* (nitrogênio), localizados no quadrante direito superior, são temas motores, assumidos como bem desenvolvidos e importantes na estruturação do campo de pesquisa, dado o posicionamento de alta centralidade e alta densidade. Os termos alocados nesse quadrante são relacionados externamente a conceitos aplicados a outros temas que são relacionados de forma próxima (COBO et al., 2011a).

O quadrante superior esquerdo apresenta os temas com alto desenvolvimento isolado e de importância marginal ao campo científico (COBO et al., 2011a). Nesse âmbito, as palavras *PETROLEUM-RESERVOIR-ENGINEERING*

(engenharia de reservatórios de petróleo); *AUSTRALIA* (Austrália); *NUMERICAL-MODEL* (modelo numérico) e *VISCOSITY* (viscosidade).

O quadrante inferior esquerdo por sua vez é representativo dos termos fracamente desenvolvidos e marginais, o que alude a termos recentemente pesquisados ou trabalhados (emergentes), ou temas, em processo de desaparecimento, eventualmente, pela não pertinência ao campo científico. Nessa categoria, os termos *REMEDIATION* (remediação); *FUNGI* (fungos); *THERMODYNAMICS* (termodinâmica) e *GASES* (gases).

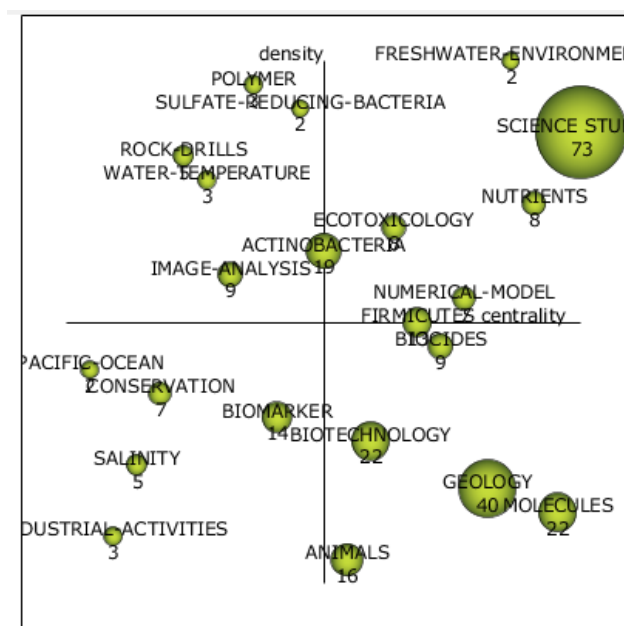
O último quadrante (inferior direito) é referente aos termos importantes para um campo de pesquisa, mas ainda não desenvolvidos, sendo correspondentes aos termos transversais e básicos (COBO et al., 2011a), enquadrando-se nessa zona os grupos *CARBON* (carbono); *BIODIVERSITY* (biodiversidade); *TROPHIC-INTERACTION* (interação trófica) e *WATER-ANALYSIS* (análise de água).

Os termos *DEEPWATER-HORIZON* (plataforma *Deepwater Horizon*) e *BIOCHEMICAL-ACTIVITY* (atividade bioquímica) são termos de transição, considerado o diagrama estratégico. O primeiro apresenta indícios de ser um termo em desenvolvimento, que está saindo da emergência, ganhando um campo de pesquisa, enquanto o segundo alude a um tema que já é uma área pesquisada, mas que está transitando para maior desenvolvimento, a constituir um tema motor, base para outras interrelações. Para quaisquer outros mapas estratégicos, o mesmo raciocínio pode ser desenvolvido.

Com exceção do tema *WATER-POLLUTION*, os temas motores não apresentaram índice-h alto, tampouco apresentaram um número grande de citações. Os temas básicos e transversais apresentaram um número alto de citações, documentos e fator de impacto. Os temas específicos abrangeram poucos documentos, com o tema *REMEDIATION* concentrando grande número de documentos, mas sem apresentar grande impacto, enquanto os demais termos apresentam poucos documentos, poucas citações e pouco impacto. Os temas importantes, mas não totalmente desenvolvidos apresentam uma contagem alta de documentos, com fatores de impactos também altos e compreendem o maior destaque do período.

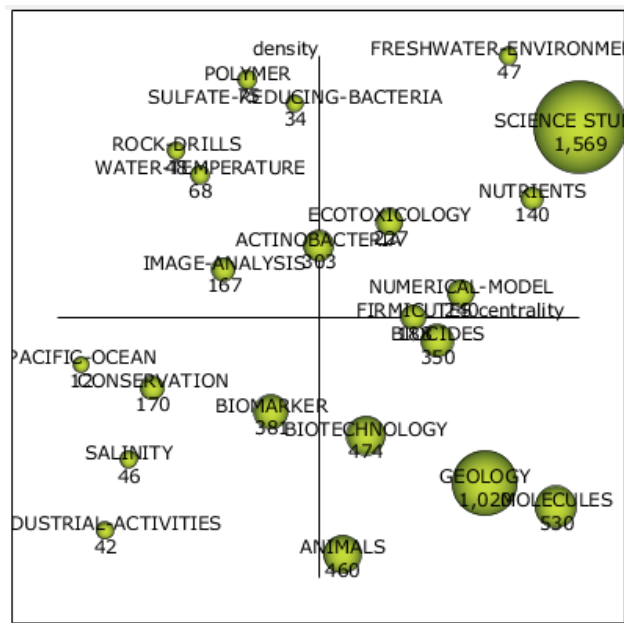
Nesse período, o que se pode atestar é que o foco foi o desenvolvimento em temas incipientes em relação ao campo, ou seja novos, mas relevantes a área de estudo.

Figura 16 - Diagrama estratégico baseado no número total de documentos, para o ano de 2015, dada a configuração de busca pelas palavras-chave *bioremediation oil spill offshore*.



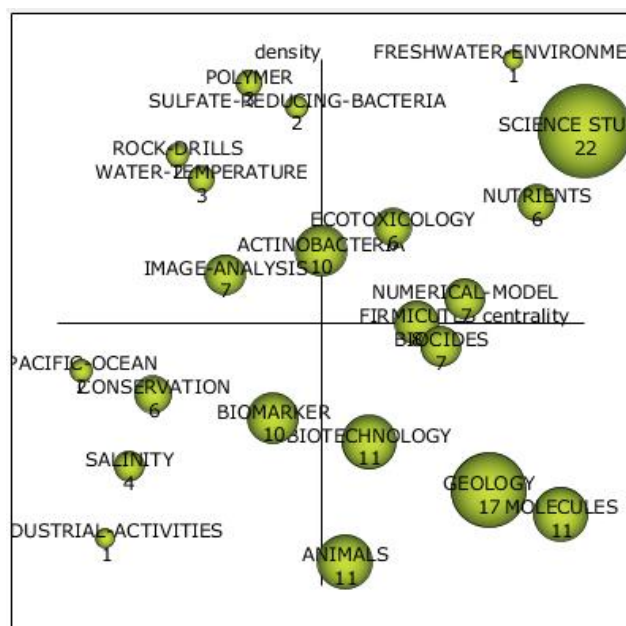
Fonte: própria (2019).

Figura 17 - Diagrama estratégico baseado no total de citações recebidas, para o ano de 2015, dada a configuração de busca pelas palavras-chave *bioremediation oil spill offshore*.



Fonte: própria (2019).

Figura 18 - Diagrama estratégico baseado no índice-h de desempenho, para os *clusters* de 2015, dada a configuração de busca pelas palavras-chave *bioremediation oil spill offshore*.



Fonte: própria (2019).

Para o ano de 2015, o resultado do diagrama rompeu com a tendência apresentada anteriormente, sem haver a persistência dos *clusters* no diagrama do ano seguinte. Pode-se perceber que o tema motor *SCIENCE STUDIES* (estudos científicos) apresenta um baixo impacto conjugado a um alto número de citações, existindo entre os demais temas motores, homogeneidade. O tema básico ou transversal *GEOLOGY* (geologia) apresentou um elevado número de citações, tendo o segundo maior número de documentos, com os temas *MOLECULES* (moléculas), *BIOTECHNOLOGY* (biotecnologia) e *ANIMALS* (animais) apresentando tendências similares de citações e impacto de publicações. A respeito dos temas específicos, pode-se destacar o grupo *IMAGE-ANALYSIS* (análise de imagem) com um número elevado de citações, entretanto, apresentando poucas publicações e um índice de impacto baixo. Outro destaque a se considerar é o conceito *ACTINOBACTERIA* (filó de actinobactérias), que apresenta elevado impacto, embora baixo o número de citações. Em conceitos emergentes ou de desenvolvimento em transição o conceito *BIOMARKERS* (biomarcadores) e *CONSERVATION* (conservação) podem ser destacados, o primeiro, por abranger poucos trabalhos, mas apresentar um alto nível de impacto e o segundo por ter altas citações, mas um baixo nível de impacto.

Ao se verificar as três figuras acima, percebe-se o alto grau de fragmentação

das publicações, tendo em vista a quantidade de temas nos diagramas, com as variáveis analisadas (número de documentos, índice-h e citações) bem distribuídas entre os tais. Em geral, o número de documentos é baixo, o que limita também o máximo fator de impacto de tal documentos. Além disso, é necessário suscitar que o número de citações apresentadas pode superar o número de documentos, levando -se em conta que os círculos podem abranger mais de uma palavra-chave.

Reiterando-se o que fora dito, a fragilidade do método é vinculada ao tratamento de dados e disponibilidade da rede. Como premissas adotadas na metodologia, decidiu-se pela imposição de um limite de frequência na construção dos diagramas de Callon, para o aparecimento de dados do *cluster*, com ocorrência mínima de dez vez para o ano. Tal medida adotada proporcionou alta seletividade, eliminando temas para os três anos seguinte, como pode ser percebido pelas Figuras 19-27. Com essa ocorrência pelo acaso, pode-se destacar que nos anos seguintes, os temas tendem a uma concentração, ou ao acaso, de serem trabalhados com palavras-chave dentro de um conceito relevante maior.

As figuras 19 a 27, diferentemente das figuras correspondentes aos anos anteriores, não podem ser levadas em contas para uma análise qualitativa. Considerados o corte proposto para frequência de palavras-chave, nos passos de formação de clusters, para esses anos, foi proporcionada a origem de apenas dois *clusters*. Como entre dois clusters, há apenas uma possibilidade de cálculo de índice de equivalência, o valor da centralidade de ambos os resultados, deve, necessariamente ser o mesmo, podendo somente variar a sua densidade. Dessa forma, é inviável a qualificação dos temas nas quatro classificações propostas. O diagrama vale, entretanto, como forma de verificar o desenvolvimento interno dos clusters, através da densidade. O que justifica o comportamento dos temas limítrofes é o fato de que o diagrama é construído de modo relativo e normalizado pela quantidade de temas a serem avaliados (por exemplo: a posição de um tema em um eixo, é dependente da razão entre a quantidade de temas com centralidade ou densidade menores que o tema a ser posicionado e o total). Dessa forma, no caso de dois únicos *clusters*, valores normalizados aleatórios de 0,5 e 1 são atribuídos a cada um dos temas, não havendo serventia analítica.

Dessa forma, a conclusão plausível a ser extraída das Figuras 19 a 26 é vinculada ao fato de que os temas *MARINE ENVIRONMENT* (ambiente marinho), *HYDROCARBONS* (hidrocarbonetos) e *SCIENCE STUDIES* são mais

desenvolvidos internamente, considerando-se a construção aberrática do diagrama estratégico para esses casos.

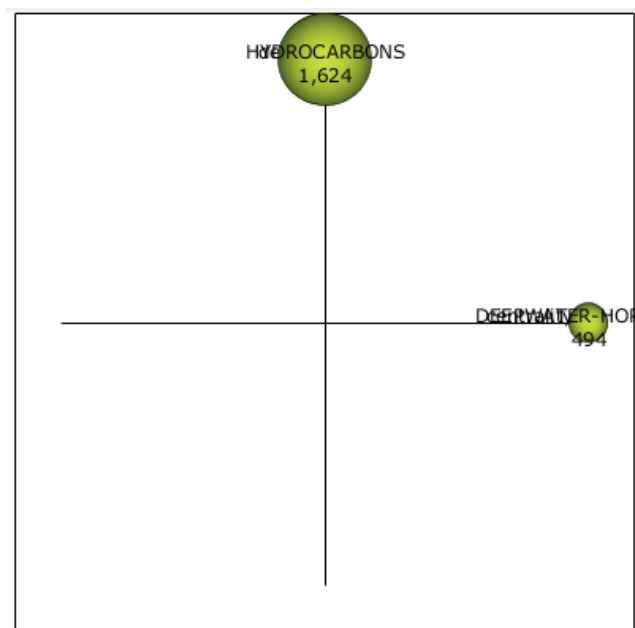
De forma geral, alguns aspectos são notáveis no horizonte de 5 anos. Em 2 dos 5 anos, os temas básicos e transversais (considerando-se os temas em transição de áreas) obtiveram destaques por possuírem as maiores pontuações de citações e impactos, em conjunto (salvo temas únicos, motores, em 2014 e 2015). Esse desempenho era esperado considerando-se que temas mais básicos e transversais tem maior probabilidade de terem atenção e citações, do que outros temas. A identificação, portanto, faz-se consistente (COBO et al., 2011a). Suscita-se também que em cada ano, há um tema motor que se ressaltava frente aos demais e é o que apresenta o maior índice de impacto e o maior número de citações, que pode ser interpretado como o tema mais consolidado do ano.

Figura 19 - Diagrama estratégico baseado no número total de documentos, para o ano de 2016, dada a configuração de busca *bioremediation oil spill offshore*.



Fonte: própria (2019).

Figura 20 - Diagrama estratégico baseado no total de citações recebidas, para o ano de 2016, dada a configuração de busca *bioremediation oil spill offshore*.



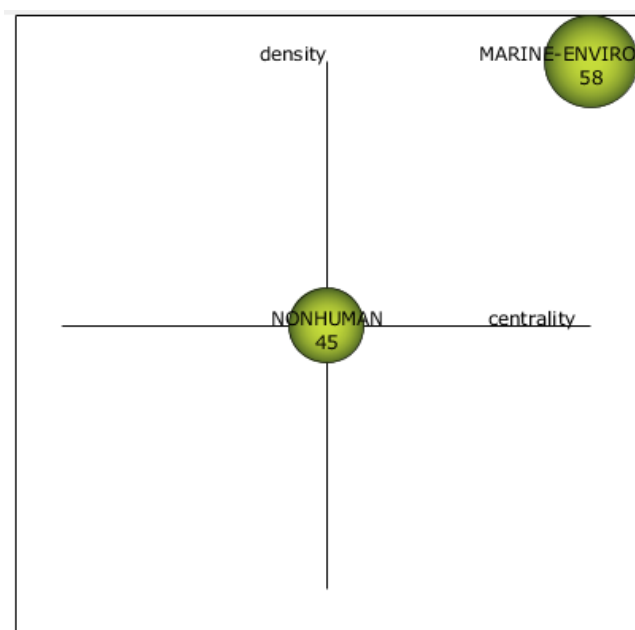
Fonte: própria (2019).

Figura 21 - Diagrama estratégico baseado no índice-h de desempenho, para os *clusters* de 2016, dada a configuração de busca *bioremediation oil spill offshore*.



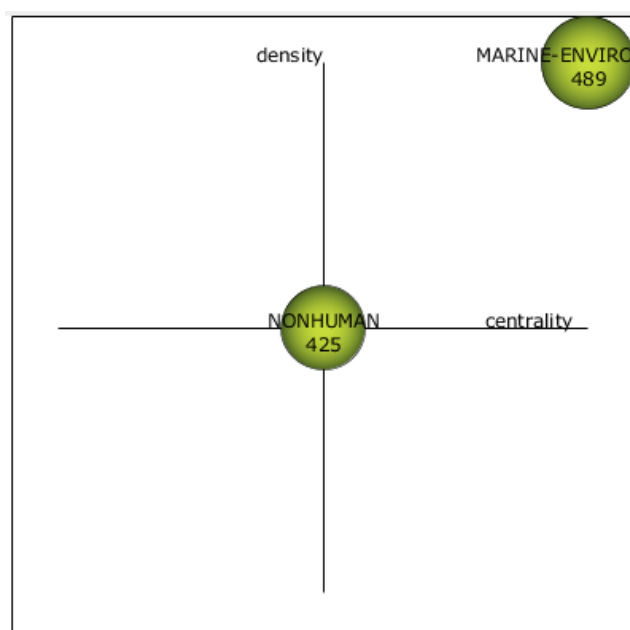
Fonte: própria (2019).

Figura 22 - Diagrama estratégico baseado no número total de documentos, para o ano de 2017, dada a configuração de busca *bioremediation oil spill offshore*.



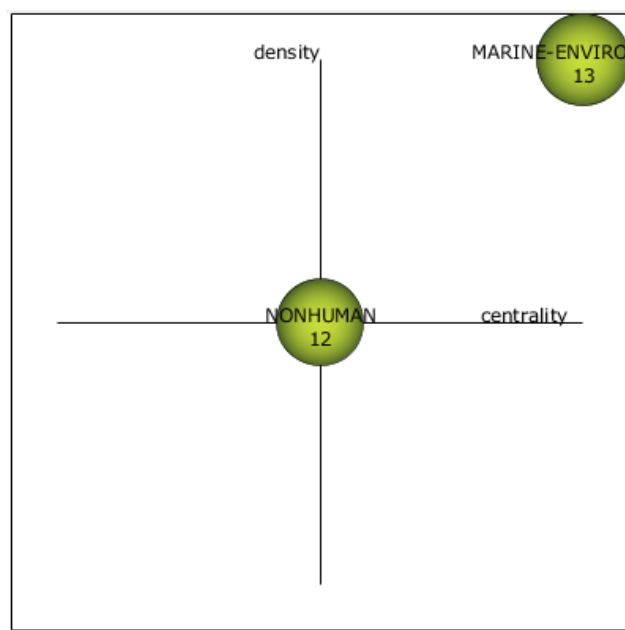
Fonte: própria (2019).

Figura 23 - Diagrama estratégico baseado no total de citações recebidas, para o ano de 2017, dada a configuração de busca *bioremediation oil spill offshore*.



Fonte: própria (2019).

Figura 24 - Diagrama estratégico baseado no índice-h de desempenho, para os clusters de 2017, dada a configuração de busca *bioremediation oil spill offshore*.



Fonte: própria (2019).

Figura 25 - Diagrama estratégico baseado no número total de documentos, para o ano de 2018, dada a configuração de busca *bioremediation oil spill offshore*.



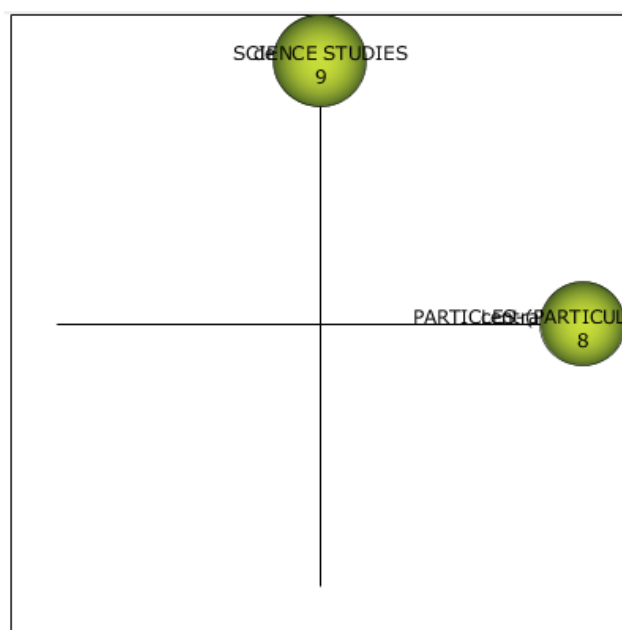
Fonte: própria (2019).

Figura 26 - Diagrama estratégico baseado no total de citações recebidas, para o ano de 2018, dada a configuração de busca *bioremediation oil spill offshore*.



Fonte: própria (2019)

Figura 27 - Diagrama estratégico baseado no índice-h de desempenho, para os clusters de 2018, dada a configuração de busca *bioremediation*, dada a configuração de busca *bioremediation oil spill offshore*.

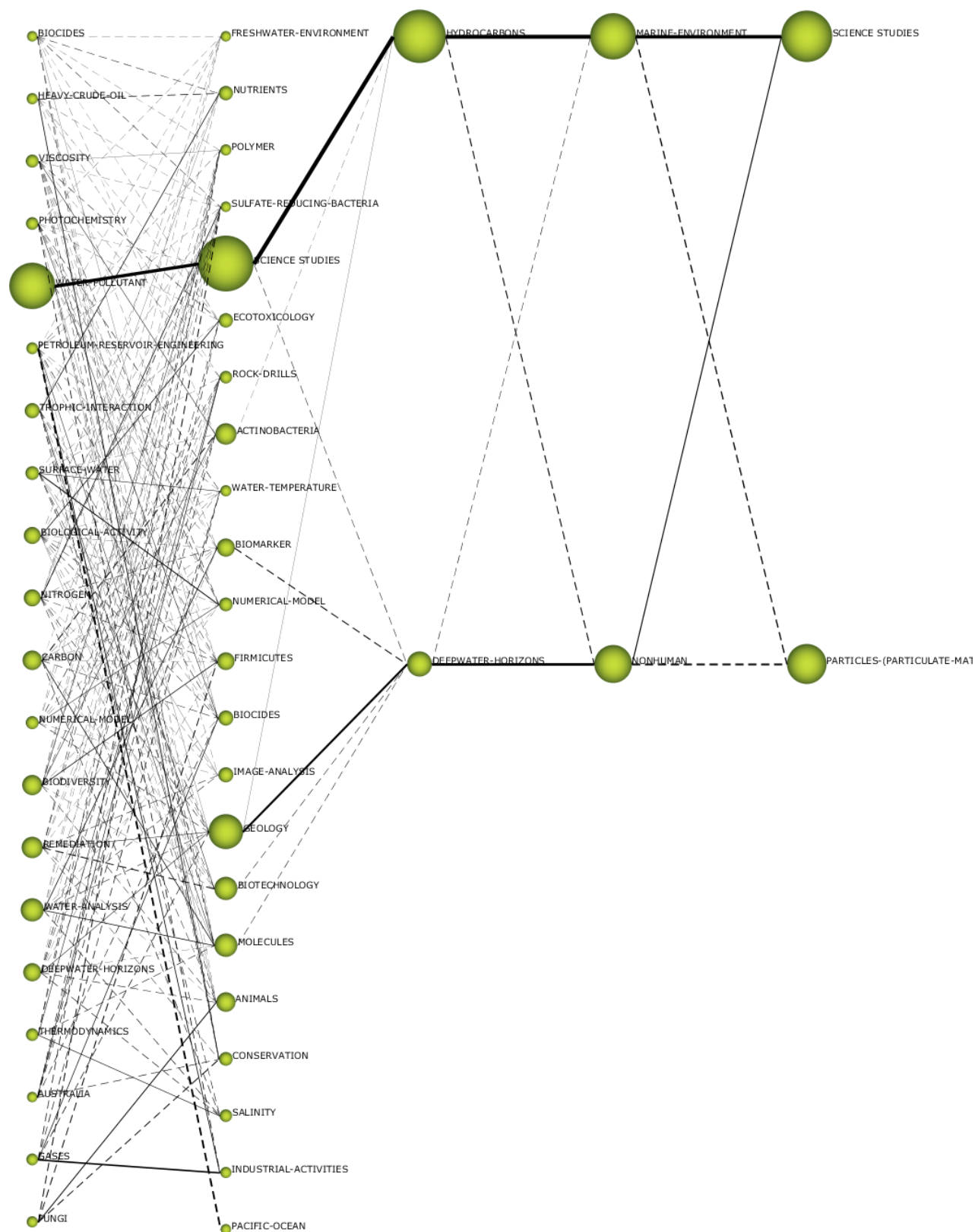


Fonte: própria (2019).

Após o desenvolvimento dos diagramas temáticos, o *software SciMAT* ainda permite a construção de um diagrama de evolução temática (Figura 28). A evolução temática está baseada no posicionamento de *clusters* em uma linha temporal, em

que são interconectados com linhas sólidas ou pontilhadas. As linhas sólidas entre temas evidenciam que os temas ligados apresentam o mesmo nome ou que o nome de um tema é parte de outro. As linhas pontilhadas, por outro lado, representam que os temas compartilham elementos que não são o nome do tema. A espessura das linhas é proporcional ao Índice de Inclusão apresentado previamente, ao passo que o volume das esferas é proporcional ao número de documentos publicados. O gráfico é separado em 5 estágios, da esquerda para direita, representando o progresso de temas, de 2014 a 2018.

Figura 28 - Mapa de evolução dos temas nos períodos de 2014-2018.



Fonte: própria (2019).

Observando-se o gráfico, nota-se que, especialmente nos primeiros anos de estudo há elevada interrelação entre temas, implicando que os temas de forma geral se relacionam com mais de uma área temática. De 2016 em diante, o mesmo comportamento não é visualizado, havendo interrupções de áreas temáticas. Observando-se o desenvolvimento de pesquisa a respeito de práticas de biorremediação para mitigação de impactos do mar, pode-se perceber que o campo não é coeso, com alguns temas de pesquisa não sendo potentes de originar outros. Tal comportamento pode ser justificado pelo fato de que os temas sem linearidade podem ser muito recentes e podem compreender o início de uma área temática nova, ou o tema é conectado com inúmeras áreas temáticas, que é difícil de caracterizá-lo ou ainda, que o tema não é bem descrito pelas palavras-chave, sendo inviável de se detectar as conexões com outros.

Na primeira categoria, palavras-chave como *FIRMICUTES* (filó de bactérias Firmicutes), *ACTINOBACTERIA*, *ECOTOXICOLOGY* (ecotoxicologia) podem ser enquadradas. As duas primeiras são referentes a filós de bactérias, em que foram enquadradas manualmente as espécies, e podem aludir a possíveis estudos da implementação de tais bactérias como seres consumidores do óleo derramado. A terceira palavra pode aludir a novos ramos de estudos quantitativos, ilustrando qualitativamente *danos* de organismos intencionais ou não dentro de um ambiente. Palavras como *BIOCIDES* e *ANIMALS* (biocidas e animais) podem se enquadrar na segunda categoria, por compreenderem temas básicos ou transversais que são difíceis de serem enquadrados tematicamente, dada a semântica generalista implícita do termo. A palavra *IMAGE-ANALYSIS* pode se enquadrar na terceira categoria, por conta da generalidade de sua semântica, não sendo detalhados os métodos analíticos em si, que poderiam enviesar a palavra para uma ligação com um tema ou com outro.

Deve-se destacar que tal classificação advém de um pré-julgamento, não sendo fruto da leitura dos temas. Há possibilidade de existirem outras justificativas ou mesmo de um tema ter mais de uma justificativa para sua interrupção na linha de evolução.

A falta de continuidade entre temas, com vazios na evolução, indica que há falta de atração da comunidade que pesquisa práticas de biorremediação para vazamentos de óleo em gás, tendo em vista que os temas perdem a sua relevância.

Isso evidencia ainda mais a fragmentação do estudo, dados que novos temas propostos, algumas vezes transversais, deixam de ser trabalhados, porque a interdisciplinaridade do campo se opõe ao foco na continuidade de desenvolvido do tema.

Observando-se, por outro lado, a dimensão das esferas entre os temas contínuos, percebe-se que pouco se reduz. Tal sinal é indicativo de que a comunidade de estudo, ao menos, mantém o interesse pelos temas, entretanto, deve-se suscitar que um trabalho crescente, apenas, poderia ser constatado com o paulatino crescimento das esferas. Os temas *HYDROCARBONS*, *DEEPWATER HORIZON*, *MARINE ENVIROMENT*, *SCIENCE STUDIES*, *NONHUMAN* e *PARTICLES* (hidrocarbonetos, plataforma *Deepwater Horizon*, ambiente marinho, estudos científicos, não-humano e partículas) abrangem um enorme número de conceitos, alguns dos quais podem ter alta correlação com o estudo das práticas de remediação de vazamentos de óleo, dado que a motivação do estudo dessas práticas, geralmente está vinculado a perturbação e danos ao ecossistema marinho.

Verificando-se, de modo geral a Figura 27, em suma, pode-se perceber que a área de estudos científicos (*SCIENCE STUDIES*), em geral, é a que melhor apresenta desenvolvimento no campo de evolução temática. Deve-se destacar que o grupo, montado manualmente com termos que fizessem menção a textos científicos, publicações, bibliografia, não tem semanticamente nenhuma palavra vinculada a técnicas de mitigação, meio ambiente, biorremediação, vazamentos de óleos e afins. A sua forte presença como elemento motor, possivelmente, deve-se ao fato de que, nas publicações, os autores devem citar outros trabalhos científicos como embasamento para os próprios. Naturalmente, infere-se que o estudo de práticas de biorremediação é calcado em trabalhos e conceitos já trabalhados por outros autores. A evolução das palavras-chave, apresentada previamente, ratifica, a manutenção de uma base de conhecimento, durante os cinco anos de análise.

Destaca-se que o mapa de evolução construído destoou das expectativas, pela ausência de progresso. A capacidade organizacional na fase de agrupamento de palavras, poderia proporcionar menor número de grupos com mais documentos incluídos. Com maiores grupos, com menores ocorrências, os cortes de frequência, mesmo que altos, não seriam responsáveis pela exclusão de *clusters*, dada a maior probabilidade de uma palavra do cluster suprir o requisito mínimo de frequência. Os grupos motores (limítrofes), apresentados na Figura 28, indiretamente, foram

grupos com elevado números de elementos, que propiciou, um favorecimento indireto, na sua manutenção final no diagrama. Um comportamento replicado para redução do número de *clusters* com poucos elementos, poderia ser benéfico a análise. Nesse ponto, também se encontra a fragilidade do método, pois o mapeamento científico é um artifício para se suscitar os temas de maior importância no tocante a um campo de estudo, de forma longitudinal. O não conhecimento de palavras que poderiam ser inseridas no determinado tema, dificulta a organização, ainda, considerando-se a extração através de uma base de dados, a qual não foi imposta nenhuma limitação temática.

Dadas as considerações acima, a performance do mapeamento científico poderia ser aprimorada considerando-se uma base de dados com informações de poucos revistas e jornais, focadas em práticas de biorremediação. Isso restringiria eventuais abordagens interdisciplinares e proporcionaria a facilidade em maiores grupos de cluster, ademais de provavelmente, possibilitar palavras-chave com alto números de citações, que poderiam ser submetidas até mesmo a rígidas restrições de frequência. Cobo et al.(2011a) fizeram a avaliação do campo de pesquisa para Teoria dos Conjuntos Nebulosos em dois jornais, para exemplificação do mapeamento científico.

Apesar da análise por mapeamento científico permitir a compreensão dos aspectos dinâmicos e estruturais do campo científico (COBO et al., 2011a), a compreensão do campo em si, é vinculada a uma revisão sistemática de toda a literatura. Para confirmação da pertinência dos resultados de *clusterização* a área de estudo, fez-se a análise quatro textos mais citados de cada ano, como já explicitado. Parte-se da premissa de que os textos mais citados, por serem os mais citados e mais importantes da área tenham conteúdo relacionado aos *clusters* conceituais. Destaca-se que uma amostra ainda maior poderia ser analisada para uma melhor representatividade e validade das leis estatísticas, tendo em vista que cerca de apenas 5% dos documentos estão sendo levados em consideração. A limitação, no âmbito do desenvolvimento do projeto, deu-se pela disponibilidade de tempo.

Prosseguindo-se a análise, fora realizada a leitura dos 4 artigos mais citados dentro de cada ano, a partir da busca das palavras-chave *bioremediation oil spill offshore*. Os resultados logrados e o ranking das publicações são apresentadas a seguir.

Para o ano de 2014, Gong et al. (2014) desenvolvem uma revisão do comportamento do óleo, quando submetido a dispersantes, suscitando as relações do óleo com dispersante com os sedimentos que os transportam, o modelo de destino e dispersão. A publicação em si apresenta uma abordagem teórica, apresentando os conceitos relacionados, instrumentos e modelos utilizados para a avaliação da dispersão do óleo e, portanto, naturalmente, tende a ser um artigo com elevado número de citações para outros que queiram usufruir da base teórica para a constituição de experimentos, envolvendo, por exemplo, dispersantes e modelos de dispersão. A biorremediação nesse trabalho não é abordada em discussão, apenas sendo suscitado, de passagem, a ação de microrganismos na degradação do óleo.

Silva et al. (2014), por outro lado, mencionam mecanismos de biorremediação, focando-se em uma revisão do uso de biossurfactantes, ou seja, surfactantes oriundos do metabolismo de seres vivos, na remediação de vazamentos de óleo e na cadeia de petróleo. Sendo um documento com aspecto de compêndio, resumindo o estado da arte da pesquisa de biossurfactantes até aquele momento, incluindo organização em tabelas e listas, de forma similar a publicação de Gong et al. (2014), o número alto de citações é justificado pelo fato da publicação ter alto potencial teórico para servir de base para uma publicação de um trabalho, experimental, por exemplo.

Souza, Vessoni-Penna e Oliveira (2014) também realizaram uma revisão de práticas de biorremediação, centrando-se também em biossurfactantes, entretanto, sem tratar do uso em toda a cadeia. Em tal documento, a abordagem priorizou a explicação dos meios de ações dos surfactantes e suas vantagens frente a surfactantes químicos e outros métodos de remediação. Ao fim do trabalho, também são citados trabalhos a respeito de experimentos para geração e aplicação de biossurfactantes. O mérito do trabalho também está centrado na sua consolidada base teórica para fundamentar publicações derivadas.

Joye, Tesk e Kostka (2014), responsáveis pelo quarto artigo mais citado com a busca com a busca de palavras-chave pré-determinadas focaram seu estudo na interação entre os microrganismos autóctones presentes na coluna d'água do Golfo do México com o vazamento de óleo ocorrido em Macondo na plataforma *Deepwater Horizon*, analisando-se a degradação de óleo nas regiões de formação de pluma e na superfície, por avaliação genética, em uma escala temporal,

considerando-se os efeitos e a interação microrganismo-dispersantes, advindos da intervenção emergencial a partir do vazamento. O trabalho em si não foca na biorremediação, mas avalia os estudos de sequenciamento que permitiram, a detecção das populações de bactérias autóctones responsáveis pela degradação do óleo. Por descrever com detalhamento, o processo, os seres detectados e a performance de degradação, pode amparar estudos com as cepas detectadas como presentes na degradação do óleo de Macondo.

Analisando-se o conteúdo das publicações de maior impacto no ano de 2014, algumas similaridades em características podem ser ressaltadas. Ambas as publicações apresentam uma base teórica grande, compilando informações de publicações que trataram da interação microrganismo-óleo e propondo discussões a respeito dos resultados logrados por outros autores. Os trabalhos são de elevada importância por compreenderem uma revisão sistemática da literatura, discutindo o *status* daquela área de pesquisa como reação a duas ocasiões de vazamentos de óleo: o desastre de Macondo (2010) e do campo de Frade (2011). Observando-se o diagrama estratégico e de evolução e as quatro publicações, há convergência entre os temas apresentados nos diagramas e o que é visto nos documentos, que por serem os mais citados, devem ressaltar os temas motores. Os temas motores *WATER POLLUTANT* (poluentes da água), *SURFACE WATER* (superfície da água) e *BIOLOGICAL ACTIVITY* (atividade biológica) são temas que sustentam a abordagem principal dos quatro trabalhos. Os temas *DEEPWATER HORIZON* (plataforma *Deepwater Horizon* e *REMEDIATION* (remediação), temas que podem ser classificados como novos, por sua vez, estão presentes também nas publicações, seja por uma passagem em citação ou por compreenderem o foco de um estudo de caso. Os temas transversais *WATER-ANALYSIS* (análise da água) e *TROPHIC INTERACTION* (interação trófica), *CARBON* (carbono) e *BIODIVERSITY*, tal como na classificação de Callon, são temas que não estão presentes em concomitância nos quatro trabalhos e nem são focos de atenção, sendo abordados de forma secundária ou como consequência dos temas motores, convergindo para a posição de temas apresentada nos diagramas.

Sob a perspectiva de análise para o ano de 2015, o artigo mais citado, na verdade, corresponde a um resultado classificado como “falso positivo”, pois apesar de abranger todas as palavras-chave pesquisadas, indica uma publicação pertinente ao estudo da contaminação e persistência de biocidas utilizados no

faturamento hidráulico para controle de biofilmes, que podem bloquear canais fraturados. No texto, há menção a biodegradação, mas no contexto de mitigação da concentração residual de biocidas no meio ambiente. A ideia de vazamento, por outro lado, é atrelada às contaminações de biocidas no contexto do processo e o transporte de insumos para o faturamento (KAHRILAS et al., 2015). Obtendo-se tal artigo como o mais influente, no tocante a citações, percebe-se a necessidade de restrição na busca de publicações, seja por adição de palavras-chave de maior especificidade, seja por meio de restrição dos veículos (jornais, revistas), em que as buscas são realizadas.

Kleindienst et al.(2015) desenvolveram uma análise experimental do impacto de dispersantes na biodegradação por microrganismos autóctones vinculados ao derramamento de óleo ocorrido em Macondo pela plataforma *Deepwater Horizon*, em que se percebeu que o uso de dispersantes não favoreceu a biorremediação, eventualmente havendo a competição e o favorecimento entre bactérias que degradam tipos de hidrocarbonetos específicos em taxas igualmente específicas. O texto tem seu mérito centrado na base experimental, utilizando-se de amostras de óleo vazado do incidente supracitado e não se atendo à compreensão dos mecanismos que implicaram a diferença de performance entre as duas situações analisadas. As conclusões extraídas podem ser comprovadas ou contestadas em escala de campo.

A terceira publicação com o maior número de citações de 2015, de responsabilidade de Kleindienst, Paul e Joye (2015b), também debate a influência dos dispersantes químicos na atividade das comunidades microbianas, com o foco, entretanto, nas bases teóricas e no compilado de resultados experimentais de outros autores. Assim, como em outras publicações baseadas na revisão da literatura para obtenção de respostas para uma problemática, é facilmente perceptível o valor da publicação por buscar resultados de autores, que trabalharam em diferentes abordagens visando o mesmo objetivo.

Ivshina et al.(2015), responsáveis pela quarta publicação com maior número de citações do ano, apresentam uma abordagem teórica e generalizada sobre os planos de resposta ao vazamento de óleo, seja em terra quanto no mar, discutindo-se as condições de viabilidade necessárias para aplicação de cada técnica de remediação. A publicação dá destaque para o uso de biorremediação, apresentando maior detalhamento da técnica, assim como vantagens de sua

aplicabilidade, em terra e mar, e o legado de conhecimento advindo do seu uso prático na mitigação de impactos advindos do vazamento do navio *Exxon-Valdez* (1989).

Analisando-se o conjunto dos quatro artigos mais citados de 2015, a partir da premissa assumida de que são representativos de todas as publicações, pode-se perceber que há convergência entre os diagramas estratégicos e a evolução temática com sobretudo, com os temas motores apresentados, como *SCIENCE STUDIES* (estudos científicos), *ECOTOXICOLOGY* (ecotoxicologia) e *NUTRIENTS* (nutrientes). As quatro publicações fazem menções a estudos de seus pares nas áreas de análise, ressaltam o efeito danoso de químicos na presença de microrganismos e avaliam o efeito da disponibilidade de nutrientes no crescimento e desenvolvimento e microrganismos autóctones, e tais considerações são pontos cruciais para estruturação dos assuntos das publicações. Assim como inferido pelo diagrama estratégico, temas como *BIOTECHNOLOGY* (biotecnologia), *GEOLOGY* (geologia), *MOLECULES* (moléculas) e *ANIMALS* (animais) não estão presentes em todos os textos e quando abordados no texto, são apresentados como passagens de contextualização ao leitor, sendo, portanto, pertinente a classificação de tais temas como transversais ou básicos. Os temas *WATER TEMPERATURE* (temperatura de água), *POLYMER* (polímero) e *SULFATE REDUCING BACTERIA* (bactérias redutoras de sulfato), são temas presentes, detalhados em seus respectivos artigos, mas que mesmo nessa pequena amostragem, são de incidência em poucas publicações, por sua importância possivelmente marginal ao campo (o primeiro é citado em dois trabalhos, o segundo é apresentado em dois trabalhos e o terceiro tem maior desenvolvimento, em um trabalho).

Dada a restrição de frequências impostas na metodologia para a construção dos diagramas, obtendo-se em cada um dos períodos de 2016 a 2018, apenas dois *clusters* de destaque, é esperado, que os temas sejam facilmente percebidos nas publicações.

Abdel-Shafy e Mansour (2016), responsáveis pela publicação mais citada para a configuração de pesquisa buscada, centraram seu estudo na pesquisa e fundamentação teórica da origem, toxicidade, distribuição e remediação de hidrocarbonetos aromáticos policíclicos, abordando sua incidência tanto em solo, como na água e no ar. Destaca-se que a biorremediação é tratada com destaque

como maneira de mitigação da concentração de tais elementos voláteis, porém o tema *DEEPWATER HORIZON* (plataforma *Deepwater Horizon*) não se mostra presente em tal publicação nem como passagem para contextualização. O fato de no diagrama estratégico, o tema se apresentar na transição entre temas motores e transversais pode justificar a ausência no principal artigo do ano.

O segundo trabalho mais citado do ano, de Dang e Lovell (2016), está focado na apresentação de uma base teórica a respeito dos mecanismos de formação de biofilmes em ambiente marinho, ressaltando as espécies responsáveis pela formação, as características necessárias, o comportamento em conjunto e as perspectivas de estudo de associação entre bactérias. O trabalho apresenta uma extensa base teórica a respeito das interações entre microrganismos entre si e com o meio, sendo plausível a sua compreensão no meio científico. O tema *DEEPWATER HORIZON*, em tal publicação, não é sequer mencionado, ao passo que o tema *HYDROCARBON* está presente em apenas algumas passagens.

Beyer et al. (2016), responsáveis pelo terceiro artigo mais influente do ano indexado, direcionam sua abordagem aos efeitos do derramamento de óleo do vazamento da *Deepwater Horizon*, no tocante a persistência da poluição e toxicidade ao ecossistema. O texto não faz menção a biorremediação, ressaltando, todavia, que o óleo disposto no mar está sujeito a biodegradação para microrganismos. O tema *HYDROCARBON* está presente em todo o texto, dado que o foco do estudo é na interação de hidrocarbonetos com corais, plâncton, aves, bactérias, mamíferos, peixes e répteis, após o derramamento. Obviamente, por tratar do vazamento de óleo de tal plataforma, o tema *DEEPWATER HORIZON* está presente em todo o texto.

Passow (2016) por sua vez analisou em laboratório a dinâmica de formação de neve marinha em seis experimentos, em que se verificava condições com óleo, dispersantes e fitoplâncton na formação da neve em si e na formação de agregados óleo-minerais. O tema *DEEPWATER HORIZON* está presente na medida que a publicação é reativa, ao se analisar a sedimentação de material particulado no leito marinho a partir do tempo de exposição do óleo na superfície. O tema *HYDROCARBON* também é extremamente presente no texto, dado que a motivação do estudo se deu a partir da perturbação ambiental pela descarga acidental de óleo no mar.

Levando-se em consideração os quatro trabalhos supracitados, pode-se

perceber que para os trabalhos indexados em 2016, também há convergência, considerando-se os quatro artigos mais citados entre o comportamento temático nos diagramas. Os dois temas encontram-se em posições limítrofes, e o comportamento nos textos sustenta tais posições. Hidrocarbonetos podem ser tratados com especificidade, como no caso de Abdel-Shafy e Mansour (2016), como também podem ser tratados de forma generalizada, como nos outros textos, sustentando uma pesquisa, dada a aberração do diagrama. O fato de o grupo envolver palavras com maior ou menor especificidade justificam as distintas abordagens. O tema *DEEPWATER HORIZON* também pode ser avaliado como um assunto central e de motivação de projetos para alguns trabalhos (estruturando duas das publicações mais citadas), da mesma forma que um tema transversal e básico para outros (sendo sequer mencionados), o que explicita a sua característica de compreender um campo de pesquisa, não consolidado e em desenvolvimento.

Para o ano indexado de 2017, Varjani e Upasani (2017) propuseram uma revisão também teórica a respeito dos fatores que condicionam a degradação de óleo no mar e no solo, explicitando o mecanismo e estudos previamente realizados para compreensão de performance de degradação e funcionamento do processo. Após a fundamentação teórica do mecanismo de biodegradação, as técnicas de biorremediação são também fundamentadas. Naturalmente, por se tratar da avaliação de técnicas de biorremediação em vazamentos de óleo, o tema *MARINE ENVIRONMENT* (ambiente marinho) está presente durante todo o texto, embora o tema *NONHUMAN* (não humanas), por sua vez não esteja explicitamente presente.

Bagby, et al. (2017) por sua vez estudou de forma experimental a persistência de hidrocarbonetos, na água e em sedimentos e a taxa de biodegradação, a partir do derramamento de óleo da *Deepwater Horizon*. Naturalmente, o tema *MARINE ENVIRONMENT* está inserido em todo o texto, mesmo baseando-se estudos de laboratório. O tema *NONHUMAN* por sua vez não pode ser destacado do texto, tendo em vista que não referencia ou conteúdo diretamente alusivo.

A terceira publicação de maior relevância, de Mclachlan e Defeo (2017) distintamente de todas as outras anteriores trata-se de um livro que também alude a uma situação de “falso positivo”, em que são abordados os ecossistemas costeiros. O tema *MARINE ENVIRONMENT* pode ser considerado um tema motor para a publicação, tendo-se em vista, que a descrição ecológica aborda a fauna e

a flora bênticas, tal como o impacto nos organismos que circulam pelas zonas de transição entre solo e água. O termo *NONHUMAN* não está explicitamente caracterizado nos índices da obra.

Liu, Bacosa e Liu (2017) também desenvolveram uma análise dos fatores condicionantes da biodegradação de hidrocarbonetos, entretanto, de forma distinta a Varjani e Upasani (2017), não compilaram informações de outros trabalhos, desenvolvendo o próprio estudo laboratorial para distinguir os aspectos que são mais favoráveis para o crescimento e desenvolvimento de diferentes espécies de micróbios degradantes de óleo, focando-se em águas do México. A importância da publicação está centrada no legado de sucesso (condições testadas e avaliadas) que os autores deixam para seus pares, que desejam a avaliação em campo utilizando determinada espécie de micróbio. Naturalmente, o tema motor *MARINE ENVIRONMENT* permeia toda a publicação, não havendo, todavia, explicitada a abordagem do tema *NONHUMAN*.

Tomando-se como análise as quatro publicações mais citadas no período indexado, pode-se notar que há completa concordância do conteúdo dos quatro trabalhos, com a classificação do tema *MARINE ENVIRONMENT* como tema motor central. O tema *NONHUMAN*, entretanto, não apresenta destaque em nenhum dos quatro documentos apresentados. Se observado o comportamento do tema em relação ao diagrama estratégico, percebe-se que está completamente centralizado. Uma explicação provável para o uso é a generalidade semântica da expressão, que abrange as palavras também generalizadas. Como a construção das relações entre palavras chave é baseada na coocorrência, naturalmente, palavras com sentido geral podem ser utilizadas em conjunto com palavras com sentido mais específico e restrito dentro de uma área de pesquisa. Nesse âmbito, é complexa a caracterização do tema *NONHUMAN* no diagrama estratégico de Callon.

Por fim, para o ano indexado de 2018, Ward et al. (2018) desenvolveram um estudo a respeito da oxidação parcial do óleo derramado a partir do acidente com *Deepwater Horizon*, suscitando-se a investigação da oxidação por processos abióticos, como predominante. O tema *PARTICLES* (partículas) não é diretamente referido no texto, mas permeia o conteúdo, dado que o foco do estudo desenvolvido pelos autores está embasado na motivação da oxidação de manchas de óleo na superfície do mar. O tema em si tem a semântica agregada a dimensão, o que é plausível de se enquadrar pelo estudo. O tema *SCIENCE STUDIES*, dada a sua

generalidade (ainda que menor do que o tema *NONHUMAN*) também é pertinente ao conteúdo, tendo em vista que o trabalho é baseado em testes laboratoriais.

Simonsen, Strand e Oye (2018) desenvolveram um estudo (o segundo mais citado do ano) a respeito do uso de nanopartículas magnetizadas para a indústria de óleo, em que se destaca o uso na remediação física por absorção e adsorção de óleo derramado. Naturalmente o tema *PARTICLES* é altamente pertinente dado que o estudo é todo realizado em função de diferentes tipos de partículas, em escala nanométrica, com propriedades de atração magnética. Pode-se aceitar o tema *SCIENCE STUDIES* como também abordado dentro da publicação, dada que apresenta um compilado de informações a respeito de descobertas de outros autores sobre a valia e as propriedades das partículas em questão.

Logeshwaran et al. (2018) revisaram os efeitos da contaminação de hidrocarbonetos no ecossistema, ressaltando-se o impacto em lençóis freáticos por hidrocarbonetos. A biodegradação e os fatores que a aprimoram também são discutidos no trabalho. O tema *PARTICLES* está presente no trabalho, dado que há passagens em que a noção de partículas é necessária para se tratar da hidrofobicidade entre componentes e para se aludir a pequenas escalas de contaminação. O tema *SCIENCE STUDIES* pode ser creditado como presente no trabalho, pelo mesmo motivo acima.

Fourati et al. (2018) estudaram a origem e a distribuição de hidrocarbonetos aromáticos policíclicos e alifáticos, e a relação dos tais hidrocarbonetos com parâmetros e variáveis bioquímicas, utilizando-se de amostras do Golfo de Gabès, na Tunísia, a fim de se determinar contaminações petrogênicas e ações de degradação de origem bióticas. O tema *PARTICLE* está inserido no texto com diferentes conotações, sendo referido de maneira genérica para aludir a dimensões, mas também para aludir a parâmetros específicos bioquímicos. Novamente, o tema *SCIENCE STUDIES* pode ser eventualmente aceito se considerado as referências do autor para trabalhos passados de seus pares.

Observando-se o teor dos cinco artigos mais citados de 2014 a 2018, pode-se perceber que há concordância entre os *clusters* formados e o posicionamento destes nos diagramas com o conteúdo dos principais trabalhos. Deve-se suscitar, entretanto, que os poucos *clusters* produzidos entre os anos 2016 a 2018 não permitem uma análise detalhada sem que haja influência da subjetividade do analista. Nos três últimos anos, os *clusters* gerados tenderam a se posicionar em

regiões limítrofes por conta do significado genérico das palavras-chave internas ao grupo originário do *cluster* e pela única relação possível de centralidade, só consegue interagir com outro tema. Dessa forma, as palavras-chave que podem ser aplicadas em diferentes contextos, condicionam a uma indecisão de posicionamento do tema, dada a única relação obrigatória, possível. Uma seleção e agrupamento com palavras menos genéricas no início do tratamento de dados poderia pautar uma análise com melhor acuidade.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados logrados com o mapeamento científico, agregado a leitura dos artigos mais citados e às informações disponíveis pela base de dados, pode-se constatar como características do campo de estudo desenvolvido, os seguintes aspectos:

- Há grande fragmentação do campo de estudo, no âmbito de autores, revistas e jornais, devido, sobretudo a uma interdisciplinaridade intrínseca do tema;
- No intervalo de tempo de 5 anos, a base de conhecimento a respeito de técnicas de biorremediação se manteve constante;
- Os artigos de maior relevância no campo de estudo têm uma gênese reativa, pois normalmente são publicações que utilizam para estudo de caso, acidentes com vazamentos de óleo já ocorridos
- A evolução temática do estudo tendeu a uma convergência para poucos temas entre 2016 a 2018. Considerando-se o corte de frequências utilizados na composição dos gráficos, pode-se afirmar que a evolução temática no intervalo de tempo de 5 anos passou de muitos temas com muitas palavras-chave correlatas frequentes nas publicações a poucos temas e com palavras-chave frequentes. Com dois *clusters* produzidos, é inviável a utilização do diagrama de Callon.
- A classificação dos temas no diagrama estratégico de Callon é concordante com o conteúdo das amostras dos textos assumidos como mais representativos.

- O estudo de técnicas de biorremediação é importante como meio de mitigação de prejuízos ambientais e econômicos, em decorrência da interação entre hidrocarbonetos e os meios bióticos e abióticos do ambiente afetado. Como as tecnologias desenvolvidas não objetivam lucros, naturalmente, é esperado o grande envolvimento estatal no fomento a pesquisa, o que é justificado pelas Figuras 4 e 5.

Os resultados obtidos no presente trabalho, devem, entretanto, ser considerados e analisados com ressalvas, tendo em vista que há um tratamento prévio de informações, que é influenciado por avaliações subjetivas. O *software SciMAT*, para gerar diagramas, demanda que palavras-chave, em uma análise de coocorrência, sejam primordialmente organizadas em grupos, por similaridade conceitual. Demanda-se, então, que o analista tenha uma bagagem suficiente para classificar os temas em grupos previamente pensados, a fim de tornar sua base de trabalho concisa. Em uma busca que pode tanger a interdisciplinaridade, o conhecimento de todos os termos indexados e aplicações vinculadas torna-se inviável, implicando a classificação de palavras-chave, que poderiam ser ligadas a outras, em grupos separados. O resultado de tal postura é um número elevado de grupos sobre os quais, após a análise, a interpretação tende a ficar complexa e os resultados enviesados. O estudo proposto no presente trabalho foi permeado por esses problemas.

Há de suscitar que algumas práticas de busca apresentam o potencial de mitigar problemas correlacionados. A importação de dados bibliográficos a partir de jornais e revistas vinculados exclusivamente a práticas de biorremediação podem excluir os termos e palavras-chave advindos de outras disciplinas, o que não ocorre quando a restrição de busca é vinculada a uma configuração de palavras-chave como *“bioremediation oil spill offshore”*. Por consequência, tende a ser maior a frequência de palavras-chave com mesma grafia ou mesmo significado, proporcionando uma base de dados com menos termos a serem classificados, considerando um mesmo volume de documentos, advindos de uma busca restrita por configurações de palavras-chave e oriundos de uma busca com restrição de jornais e revistas. Outro mecanismo de melhor direcionamento de resultados que poderia ser empregado é a busca de palavras-chave restritas a campos como título e resumo. A restrição de busca nesses campos, onde se encontram informações

essenciais das publicações, impede que passagem irrelevantes, como exemplos ou citações sejam indexadas, em documentos com outros objetivos ou assuntos.

A análise bibliométrica não apresenta fronteiras ou limitações dada a sua aplicabilidade nos mais diversos campos do conhecimento, sendo passível os mais diversos tipos de análise. O mapeamento científico, todavia, ainda é dependente do analista. Com o desenvolvimento tecnológico, recursos de inteligência computacional poderiam ser empregados identificação de padrões que reduzissem o enviesamento, e o trabalho manual de classificação de dados, em situações em que o número de termos é grande. Ademais de terem a sensibilidade de iterar para achar a melhor configuração de rede, o melhor valor para corte de frequência e dados afins, que ainda são dependentes da tentativa e erro, dados empíricos

Como sugestão a pesquisas futuras e continuidade do projeto, há margem para teste de outros parâmetros, outras configurações de grupo com as mesmas palavras-chave indexadas com a pesquisa, salvo em casos em que a base de dados pode ter publicações adicionadas ou extraídas, em um período maior (melhor sensibilidade para mudanças de paradigmas). Ademais, outros tipos de análise como *bibliographical coupling* e análise co-autor poderiam ser executadas para o mesmo campo de pesquisa, por exemplo, para estruturar a colaboração e a estrutura social do campo, e para detecção de campos emergentes e pequenos, respectivamente.

A temática de remediação de vazamentos de óleo, especificamente, de biorremediação, é um campo ascendente de extremo interesse das indústrias de petróleo, da sociedade civil e das instituições governamentais dadas as dimensões de impacto de um vazamento de petróleo. A biorremediação aparece como uma alternativa inata no meio afetado, que ainda apresenta lacunas a serem estudadas para o aprimoramento de sua eficiência na eliminação de hidrocarbonetos na água.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDEL-SHAFY, H. I.; MANSOUR, M. S. M. A review on polycyclic aromatic hydrocarbons: Source, environmental impact, effect on human health and remediation. **Egyptian Journal of Petroleum**, v. 25, n. 1, p. 107–123, mar. 2016.

ARAÚJO, C.A. **Bibliometria**: evolução histórica e questões atuais. *Em Questão*, Porto Alegre, v. 12, n. 1, p. 11-32, jan./jun. 2006.

ATLAS, R.M.; BARTHA, R. **Hydrocarbon Biodegradation and Oil Spill Bioremediation**. In: MARSHALL, K.C. *Advances in Microbial Ecology*. 1st ed. Boston: Springer, 1992. P. 287-338.

ATLAS, R. M. Petroleum biodegradation and oil spill bioremediation. **Marine Pollution Bulletin**, v. 31, n. 4, p. 178–182, 1995

BAGBY, S. C. et al. Persistence and biodegradation of oil at the ocean floor following *Deepwater Horizon*. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 114, n. 1, p. E9–E18, 3 jan. 2017.

BALBA, M. T.; AL-AWADHI, N.; AL-DAHER, R. Bioremediation of oil-contaminated soil: microbiological methods for feasibility assessment and field evaluation. **Journal of Microbiological Methods**, v. 32, n. 2, p. 155–164, 1998.

BANDURA, L. et al. Application of Mineral Sorbents for Removal of Petroleum Substances: A Review. **Minerals**, v. 7, n. 3, p. 37, 2017.

BARTHA, R.; ATLAS, R. M. The Microbiology of Aquatic Oil Spills. **Advances in Applied Microbiology**, v. 22, n. C, p. 225–266, 1977.

BAYAT, A. et al. Oil Spill Cleanup from Sea Water by Sorbent Materials. **Chemical**

Engineering & Technology, vol. 28, no. 12, p. 1525–1528, 2005.

BEYER, J. et al. Environmental effects of the Deepwater Horizon oil spill: A review. **Marine Pollution Bulletin**, v. 110, n. 1, p. 28–51, set. 2016.

BRUSSAARD, C. P. D. et al. Immediate ecotoxicological effects of short-lived oil spills on marine biota. **Nature Communications**, v. 7, p. 1–11, 2016.

BUIST, I. et al. In Situ Burning. **Pure and Applied Chemistry**, v. 71, n. 1, p. 43– 65, 2007.

CALLON, M.; COURTIAL, J. P.; LAVILLE, F. Co-word analysis as a tool for describing the network of interactions between basic and technological research: The case of polymer chemistry. **Scientometrics**, v. 22, n. 1, p. 155–205, set. 1991.

CALLON, M. et al. From translations to problematic networks: An introduction to co-word analysis. **Information (International Social Science Council)**, v. 22, n. 2, p. 191–235, 1 mar. 1983.

CAPUZZO, J. M. Biological effects of petroleum hydrocarbons on marine organisms: Integration of experimental results and predictions of impacts. **Marine Environmental Research**, v. 17, n. 2, p. 272–276, 1985.

CHAPMAN, R. E. **Petroleum Geology**. 1.ed. Netherlands: Elsevier, 1983. v. 16. p. 73.

CHOI, H. M.; CLOUD, R. M. Natural sorbents in oil spill cleanup. **Environmental Science & Technology**, v. 26, n. 4, p. 772–776, abr. 1992.

CLEWS, R. J. Chapter 5 - **Fundamentals of the Petroleum Industry**. In: CLEWS, R. J. B. T.-P. F. FOR THE I. P. I. (Ed.). San Diego: Academic Press, 2016. p. 83– 99.

COBO, M. J. et al. An approach for detecting, quantifying, and visualizing the evolution of a research field: A practical application to the Fuzzy Sets Theory field. **Journal of Informetrics**, v. 5, n. 1, p. 146–166, jan. 2011.

COBO, M. J. et al. Science mapping software tools: Review, analysis, and cooperative study among tools. **Journal of the American Society for Information Science and Technology**, v. 62, n. 7, p. 1382–1402, jul. 2011.

COBO, M. J. et al. *SciMAT*: A new science mapping analysis software tool. **Journal of the American Society for Information Science and Technology**, v. 63, n. 8, p. 1609–1630, ago. 2012.

CORNWELL, D. J.; SMITH, D. K. Expanding the scope of gels - Combining polymers with low-molecular-weight gelators to yield modified self-assembling smart materials with high-tech applications. **Materials Horizons**, v. 2, n. 3, p. 279– 293, 2015.

COULTER, N.; MONARCH, I.; KONDA, S. Software engineering as seen through its research literature: A study in co-word analysis. p. 18, [s.d.].

DANG, H.; LOVELL, C. R. Microbial Surface Colonization and Biofilm Development in Marine Environments. **Microbiology and Molecular Biology Reviews**, v. 80, n. 1, p. 91–138, mar. 2016.

DAVE, D.; GHALY, A. E. Remediation Technologies for Marine Oil Spills : A Critical Review and Comparative Analysis D . Dave and A . E . Ghaly Department of Process Engineering and Applied Science, Faculty of Engineering , Dalhousie University , Halifax , Nova Scotia , Canada. **American Journal of Environmental Sciences**, v. 7, n. 5, p. 423–440, 2011.

DEWLING, R . T.; MCCARTHY, L. T. Chemical treatment of oil spills. **Environment International**, v. 3, n. 2, p. 155–162, 1980.

DU, X. et al. Supramolecular Hydrogelators and Hydrogels: From Soft Matter to Molecular Biomaterials. **Chemical Reviews**, v. 115, n. 24, p. 13165–13307, 2015.

EL FANTROUSSI, S.; AGATHOS, S. N. Is bioaugmentation a feasible strategy for pollutant removal and site remediation? **Current Opinion in Microbiology**, v. 8, n. 3, p. 268–275,

2005.

FERREIRA, A. G. C. Bibliometria na avaliação de periódicos científicos. **Pesquisa Brasileira em Ciência da Informação e Biblioteconomia**, v. 5, n. 2, 2010.

FINGAS, M. F. **Oil Spill Science and Technology**: Prevention, Response, and Cleanup. 1. ed. Oxford: Gulf Professional Publishing, 2011.

FINGAS, M. F.; DUVAL, W. S.; STEVENSON, G. G. **The basics of oil spill cleanup**: with particular reference to southern Canada. 1 ed. Ottawa: Environment Canada, 1979.

FINGAS, M. F.; STOODLEY, R.; LAROCHE, N. Effectiveness testing of spill- treating agents. **Oil and Chemical Pollution**, v. 7, n. 4, p. 337–348, 1990.

FOURATI, R. et al. Sources and spatial distribution of dissolved aliphatic and polycyclic aromatic hydrocarbons in surface coastal waters of the Gulf of Gabès (Tunisia, Southern Mediterranean Sea). **Progress in Oceanography**, v. 163, p. 232–247, abr. 2018.

GARFIELD, E. Is citation analysis a legitimate evaluation tool? p. 17, **Scientometrics**. 1(4), p. 359-375, 1979.

GONG, Y. et al. A review of oil, dispersed oil and sediment interactions in the aquatic environment: Influence on the fate, transport and remediation of oil spills. **Marine Pollution Bulletin**, v. 79, n. 1–2, p. 16–33, fev. 2014.

GONTIER, N. Symbiosis, History of. In: KLIMAN, R. M. B. T.-E. OF E. B. (Ed.). . Oxford: Academic Press, 2016. p. 272–281.

GUERRA, F. D. et al. Nanotechnology for Environmental Remediation: Materials and Applications. **Molecules (Basel, Switzerland)**, v. 23, n. 7, p. 1760, 18 jul. 2018.

HELMKE, E. et al. **Bioremediation Method for Accelerated Biological**

Decomposition of Petroleum Hydrocarbons in Sea Ice Covered Polar Regions, and Bacteria and Enzyme Mixtures as Agents for Carrying Out Said Method. Depositante: Stiftung Alfred Wegener Insitut fur Polar und Meeresforschung. Procurador: Leydig, Voit & Mayer, Ltd. EUA n. 12/523818. Depósito: 6 jan. 2008. Concessão: 21 mai. 2013.

HIRSCH, J. E. An index to quantify an individual's scientific research output. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 102, n. 46, p. 16569–16572, 15 nov. 2005.

IVSHINA, I. B. et al. Oil spill problems and sustainable response strategies through new technologies. **Environmental Science: Processes & Impacts**, v. 17, n. 7, p. 1201–1219, 2015.

JERNELÖV, A. **Environmental Effects of Terrestrial Oil Spills.** In: DELLASALA, D. A.; GOLDSTEIN, M. I. B. T.-E. OF THE A. (Eds.). Oxford: Elsevier, 2018. p. 323–335.

JOYE, S. B.; TESKE, A. P.; KOSTKA, J. E. Microbial Dynamics Following the Macondo Oil Well Blowout across Gulf of Mexico Environments. **BioScience**, v. 64, n. 9, p. 766–777, 2014.

KAHRILAS, G. A. et al. Biocides in Hydraulic Fracturing Fluids: A Critical Review of Their Usage, Mobility, Degradation, and Toxicity. **Environmental Science & Technology**, v. 49, n. 1, p. 16–32, 2015.

KLEINDIENST, S. et al. Chemical dispersants can suppress the activity of natural oil-degrading microorganisms. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 112, n. 48, p. 14900–14905, 2015.

KLEINDIENST, S.; PAUL, J. H.; JOYE, S. B. Using dispersants after oil spills: impacts on the composition and activity of microbial communities. **Nature Reviews Microbiology**, v. 13, n. 6, p. 388–396, jun. 2015.

KINGSTON, P. F. Long-term Environmental Impact of Oil Spills. **Spill Science &**

Technology Bulletin, v. 7, n. 1, p. 53–61, 2002.

KNEZEVICH, V. et al. Petroleum bioremediation in seawater using guano as the fertilizer. **Bioremediation Journal**, v. 10, n. 3, p. 83–91, 2006.

KOREN, O. et al. Petroleum Pollution Bioremediation Using Water-Insoluble Uric Acid as the Nitrogen Source. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 69, n. 10, p. 6337–6339, 2003.

LESSARD, R. R.; DEMARCO, G. The significance of oil spill dispersants. **Spill Science and Technology Bulletin**, v. 6, n. 1, p. 59–68, 2000.

LEVENSHTEIN, V. I. Binary codes capable of correcting deletions, insertions and reversals. **Soviet Physics Doklady**, v.8, p. 707-710, 1966

LIU, J.; BACOSA, H. P.; LIU, Z. Potential Environmental Factors Affecting Oil-Degrading Bacterial Populations in Deep and Surface Waters of the Northern Gulf of Mexico. **Frontiers in Microbiology**, v. 7, 10 jan. 2017.

LOGESHWARAN, P. et al. Petroleum hydrocarbons (PH) in groundwater aquifers: An overview of environmental fate, toxicity, microbial degradation and risk-based remediation approaches. **Environmental Technology & Innovation**, v. 10, p. 175–193, maio 2018.

LV, P.; YANG, S.; MA, P. C. Bio-based oil gelling agent for effective removal of oil spills from the surface of water. **Materials Chemistry Frontiers**, v. 2, n. 10, p. 1784–1790, 2018.

MARICATO, J.M. **Dinâmica das relações entre Ciência e Tecnologia: estudo Bibliométrico e Cientométrico de múltiplos indicadores de artigos e patentes em biodiesel**. Tese (Doutorado) - Escola de Comunicações e Artes da Universidade de São Paulo (USP). São Paulo, 2010

MCKEW, B. A. et al. Efficacy of intervention strategies for bioremediation of crude oil in marine systems and effects on indigenous hydrocarbonoclastic bacteria. **Environmental**

Microbiology, v. 9, n. 6, p. 1562–1571, 2007. 3 ed.

MCLACHLAN, A.; DEFEO, O. **The Ecology of Sand Shores**. 3 ed. Estados Unidos: Academic Press, 2017

MOSLEMY, P.; NEUFELD, R. J.; GUIOT, S. R. Biodegradation of gasoline by gellan gum-encapsulated bacterial cells. **Biotechnology and Bioengineering**, v. 80, n. 2, p. 175–184, 2002.

MOTTA, F. L.; STOYANOV, S. R.; SOARES, J. B. P. Application of solidifiers for oils spill containment: A review. **Chemosphere**, v. 194, p. 837–846, 2018.

MUIZIS, A. **Evaluation of the Methods for the Oil Spill Response in the Offshore Arctic Region**. 2013. Trabalho em conclusão (Bacharelado em Engenharia Ambiental) - Helsinki Metropolia University of Applied Sciences, Helsinki, Finlândia, 2013.

MULLIN, J. V.; CHAMP, M. A. Introduction/overview to in situ burning of oil spills. **Spill Science and Technology Bulletin**, v. 8, n. 4, p. 323–330, 2003.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. Largest Oil Spills Affecting U.S. Waters Since 1969. **Office of Response and Restoration**. 26 out 2019. Disponível em <<https://response.restoration.noaa.gov/oil-and-chemical-spills/oil-spills/largest-oil-spills-affecting-us-waters-1969.html>>. Acesso em: 26 out. 2019.

NIKOLOPOULOU, M.; KALOGERAKIS, N. Biostimulation Strategies for Enhanced Bioremediation of Marine Oil Spills Including Chronic Pollution. In: TIMMIS, K. N. (Ed.). **Handbook of Hydrocarbon and Lipid Microbiology**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010. p. 2521–2529.

NIKOLOPOULOU, M.; KALOGERAKIS, N. Biostimulation strategies for fresh and chronically polluted marine environments with petroleum hydrocarbons. **Journal of Chemical Technology & Biotechnology**, v. 84, n. 6, p. 802–807, 1 jun. 2009.

NIKOLOPOULOU, M.; PASADAKIS, N.; KALOGERAKIS, N. Evaluation of autochthonous

bioaugmentation and biostimulation during microcosm-simulated oil spills. **Marine pollution bulletin**, v. 72, 6 maio 2013.

OILFIELD WIKI. **Spill Control and Cleanup**. Disponível em: http://www.oilfieldwiki.com/wiki/Spill_control_and_cleanup. Acesso em: 14 jun. 2019.

OBI, E.O.; KAMGBA, F.A.; OBI, D.A. Techniques of Oil Response in the sea. **IOSR Journal of Applied Physics (IOSR-JAP)**, v. 6, n. 1, p. 36 - 41, 2014.

PASADEOS, Y.; PHELPS, J.; KIM, B.-H. Disciplinary Impact of Advertising Scholars: Temporal Comparisons of Influential Authors, Works and Research Networks. **Journal of Advertising**, v. 27, n. 4, p. 53–70, dez. 1998.

PASSOW, U. Formation of rapidly-sinking, oil-associated marine snow. **Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography**, v. 129, p. 232–240, 2016.

PETERS, H. P. F.; VAN RAAN, A. F. J. Co-word-based science maps of chemical engineering. Part I: Representations by direct multidimensional scaling. **Research Policy**, v. 22, n. 1, p. 23–45, fev. 1993.

PRINCE, R. C. Bioremediation of marine oil spills. **Trends in Biotechnology**, v. 15, n. 5, p. 158–160, 1997.

PRITCHARD, A. Statistical Bibliography or Bibliometrics?. **Journal ou Documentation**. [s.l: s.n.]. v. 25, 1969.

RAHMAN, K. S. M. et al. Bioremediation of gasoline contaminated soil by a bacterial consortium amended with poultry litter, coir pith and rhamnolipid biosurfactant. **Bioresource Technology**, v. 81, n. 1, p. 25–32, 2002.

REIS, J. C. **Environmental control in petroleum engineering**. Houston, Tex: Gulf Publ,

1996.

RON, E. Z.; ROSENBERG, E. Enhanced bioremediation of oil spills in the sea. **Current Opinion in Biotechnology**, v. 27, p. 191–194, 2014.

SALTON, G.; MCGILL, M.J. **Introduction to modern information retrieval**. New York: McGraw-Hill, 1983.

SCOPUS. **Analyze search results**, 2019. Disponível em <<https://www.scopus.com/term/analyzer.uri?sid=367e503e8683cc152c7ed25625b1bd51&origin=resultslist&src=s&s=ALL%28oil+spill+bioremediation+offshore%29&sort=cp-f&sdt=cl&sot=b&sl=38&count=395&analyzeResults=Analyze+results&cluster=scopubyr%2c%222018%22%2ct%2c%222017%22%2ct%2c%222016%22%2ct%2c%222015%22%2ct%2c%222014%22%2ct&txGid=7471ea7ff4d43059eab0e9c19c6f22de>>. Acesso em 31 out. 2019

SILVA, R. et al. Applications of Biosurfactants in the Petroleum Industry and the Remediation of Oil Spills. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 15, n. 7, p. 12523–12542, 15 jul. 2014.

SIMONSEN, G.; STRAND, M.; ØYE, G. Potential applications of magnetic nanoparticles within separation in the petroleum industry. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 165, p. 488–495, jun. 2018.

SISTEMA FIRJAM. **Ambiente Onshore de Petróleo e Gás no Brasil**. Rio de Janeiro, 2017

SMALL, H. Co-citation in the scientific literature: A new measure of the relationship between two documents. **Journal of the American Society for Information Science**, v. 24, n. 4, p. 265–269, jul. 1973.

SOUZA, E. C.; VESSONI-PENNA, T. C.; OLIVEIRA, R. P. D. S. Biosurfactant-enhanced hydrocarbon bioremediation: An overview. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 89, p. 88–94, abr. 2014.

SPEIGHT, G.S. **The chemistry and technology of Petroleum**. 3.ed. Boca Raton: CRC Press, 2014. p.3.

ST. JOHN, B. **Offshore Exploration Potential. Offshore Technology Conference**. Houston, Texas Offshore Technology Conference, , 1985. Disponível em: <https://doi.org/10.4043/4874-MS>

TAGUE-SUTCLIFFE, J. An introduction to informetrics. **Information Processing & Management**, v. 28, n. 1, p. 1–3, 1992.

TEWARI, S.; SIRVAIYA, A. Oil spill remediation and its regulation. **International Journal Of Engineering Research and General Science**, v. 1 (6), n. November, p. 2394–8299, 2015.

THE WORLD BANK. **Oil Rents (% of GDP)**, 2011. Disponível em: <<https://data.worldbank.org/indicator/ny.gdp.petr.rt.zs?end=2017&start=2017&view=map>>. Acesso em: 14 jun. 2019.

THOMPSON, I. P. et al. Bioaugmentation for bioremediation: The challenge of strain selection. **Environmental Microbiology**, v. 7, n. 7, p. 909–915, 2005.

TYAGI, M.; DA FONSECA, M. M. R.; DE CARVALHO, C. C. C. R. Bioaugmentation and biostimulation strategies to improve the effectiveness of bioremediation processes. **Biodegradation**, v. 22, n. 2, p. 231–241, 2011.

ÜSDIKEN, B.; PASADEOS, Y. Organizational Analysis in North America and Europe: A Comparison of Co-citation Networks. **Organization Studies**, v. 16, n. 3, p. 503–526, maio 1995.

VAN ECK, N.J.; WALTMAN, L. BIBLIOMETRIC MAPPING OF THE COMPUTATIONAL INTELLIGENCE FIELD. **International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems**, v. 15, n. 05, p. 625–645, out. 2007.

VARJANI, S. J.; UPASANI, V. N. A new look on factors affecting microbial degradation of petroleum hydrocarbon pollutants. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 120, p. 71–83, maio 2017.

VIANNA, F.C. **Discussão epistemológica da produção científica brasileira em biodiesel**. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Faculdade de Economia e Administração da Universidade de São Paulo, Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo, e Instituto de Física da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

VENTIKOS, N. P. et al. A high-level synthesis of oil spill response equipment and countermeasures. **Journal of Hazardous Materials**, v. 107, n. 1–2, p. 51–58, 2004.

VOGELS, G. D.; VAN DER DRIFT, C. Degradation of purines and pyrimidines by microorganisms. **Bacteriological reviews**, v. 40, n. 2, p. 403–468, jun. 1976.

WARD, C. P. et al. Partial Photochemical Oxidation Was a Dominant Fate of *Deepwater Horizon* Surface Oil. **Environmental Science & Technology**, v. 52, n. 4, p. 1797–1805, 20 fev. 2018.

ZUPIC, I.; ČATER, T. Bibliometric Methods in Management and Organization. **Organizational Research Methods**, v. 18, n. 3, p. 429–472, jul. 2015.

ANEXO A – ARTIGO SÍNTESE

Universidade de São Paulo

Engenharia de Petróleo – Escola Politécnica

Número: 9373611

Data: 05/12/2019



Análise bibliométrica da produção científica vinculada às técnicas de biorremediação aplicadas em vazamentos de óleo offshore

Giovani Enrico Stievano Ponce

Orientadora: Prof. Dra. Patrícia Helena Lara dos Santos Matai

Artigo Sumário referente à disciplina PMI3349 – Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia de Petróleo II
Este artigo foi preparado como requisito para completar o curso de Engenharia de Petróleo na Escola Politécnica da USP.

Template versão 2018v11.

Resumo

Os derramamentos de petróleo no mar são incidentes que requerem a intervenção humana na forma de técnicas de biorremediação. O presente projeto visa, através do indexador de publicações científicas e de um software de mapeamento bibliométrico, ressaltar as tendências de pesquisa e campos científicos onde a biorremediação é foco de estudo para mitigação de impactos de vazamentos de petróleo. A partir de técnicas bibliométricas para biorremediação em mapas bidimensionais utilizando palavras-chave vinculadas a publicações, é possível delinear a vanguarda científica e os avanços de pesquisa envolvendo a área de remediação por meios biológicos, em um período de 5 anos. Constatou-se, ao fim do mapeamento, grande interdisciplinaridade do campo de estudo, com estagnação da base de conhecimento e “afunilamento” de abordagem para poucos temas, a partir do terceiro ano de análise. Por amostragem textual, foi possível observar a concordância entre mapas e conteúdo de publicações.

Abstract

Oil spills at sea are incidents that require human intervention in the form of bioremediation techniques. The project aims to, using a scientific publications indexer and a science mapping software, point out trends and science fields where bioremediation techniques are research focus to mitigate oil spills impacts. From bibliometric techniques for bioremediation in two-dimensional maps, using keywords linked to publications, it is possible to delineate a scientific vanguard and research advances involving an area of remediation by biological methods, using two-dimensional map clustering techniques, over a period of five years. At the end of the project, a great interdisciplinarity of the study field was found, with stagnation of the knowledge base and approach convergence to few themes, from the third year of analysis on. By textual sampling, it was possible to observe agreement between diagram and the content of the publications.

1. Introdução

O petróleo compreende um dos recursos mais importantes no contexto energético e de produção de insumos para a humanidade. O fato de se extrair os recursos a partir de formações rochosas, na terra e no mar submetendo-o a uma cadeia de processos que envolve a extração, o armazenamento, transporte e processamento de hidrocarbonetos explorados pode expor o recurso a um ecossistema, que não teve prévio contato com o óleo e que tenderá a emitir uma resposta, geralmente negativa. A indústria petrolífera, como qualquer outro empreendimento, precisa lidar com os riscos, dentre os quais, o ambiental ganha maior destaque.

Eventuais falhas nas medidas de segurança da cadeia de petróleo, podem propiciar a perda de controle sobre o fluxo do óleo, potencialmente causando derramamentos dos fluidos sobre a água e a terra, propiciando desequilíbrios ecológicos que podem ser globais ou locais. Reis (1996) avalia que muitos locais utilizados pela indústria de petróleo, em terra, já eram previamente contaminados e ainda estão a mercê de derramamento acidental de diversos materiais, dentre os principais hidrocarbonetos, que podem se alocar em diversos lugares do solo, aprisionados por pressão capilar ou contaminando lençóis freáticos, compreendendo empecilhos para recuperação. No âmbito marinho, os problemas vinculados às populações se manifestam de forma específica para cada espécie, sendo dependentes também a solubilidade do óleo na água,

porcentagem de frações hidrofílicas e hidrofóbicas, biodisponibilidade dos hidrocarbonetos, a capacidade de metabolismo do óleo e a toxicidade dos metabólitos gerados. Os impactos gerados pelos hidrocarbonetos podem ser de natureza bioquímica-celular, relacionada a organismos, a populações e a comunidade, resultando além de mortalidade, problemas de alimentação de alimentação, crescimento e pertencimento a uma comunidade (CAPUZZO, 1985). Mesmos os impactos em locais com distintas características, macroscopicamente derramamentos de óleo proporcionam, em todos os casos, mortalidade de animais, plantas e afins, pelos mesmos mecanismos de toxicidade (JERNELOV, 2018).

Conhecidos os impactos advindos do derramamento de óleo em terra ou mar, faz-se necessário o desenvolvimento e aplicação de técnicas de remediação de impactos, seja por iniciativas própria das indústrias do ramo de petróleo ou por força de lei e incentivos a pesquisa, mecanismos governamentais. Em relação aos derramamentos ocorridos em mar, frutos de posterior análise do presente trabalho, as técnicas de remediação podem ser classificadas pelo mecanismo de ação em físicas, químicas, termal e biológicas (DAVE; GHALY, 2011). As técnicas físicas abrangem método que não utilizam componentes químicos ou a fins para mudar as propriedades dos fluidos derramados e são utilizadas como elementos de contenção e controle do óleo espalhado, não requerendo permissões especiais para implementação, e compreendem o uso de barreiras ou barragens (instrumentos para contenção), *skimmers* (instrumentos de remoção) e materiais absorventes, para transição da fase líquida do óleo para semi-sólido, facilitando a remoção (TEWARI; SIRVAIYA, 2015; VENTIKOS et al, 2004; DAVE; GHALY, 2011; FINGAS; DUVAL; STEVENSON, 1979, MUIZIS, 2013).

As técnicas químicas, por outro lado estão centradas no uso de elementos modificantes das propriedades físicas e químicas de óleo, dos quais podem ser destacados agentes dispersantes (dispersam óleo emulsificado na coluna d'água), gelificantes (gelificação seletiva da fase oleosa), para combustão (elementos de sustentação do processo), químicos para biorremediação (aceleração da degradação natural), neutralização (agentes de apoio para equilíbrio de potencial de hidrogênio) e agentes para afundamento e submersão, que absorvem hidrocarbonetos e os afundam (FINGAS; DUVAL; STEVENSON, 1979, LESSARD; DEMARCO, 2000, VENTIKOS et al., 2004, LV; YANG; MA, 2018, FINGAS; STOODLEY; LAROCHE, 1990, CORNELL; SMITH, 2015; DEWLING; MCCARTHY, 1980; TEWARI; SIRVAIYA, 2015).

O método termal, por sua vez, pode compreender as técnicas de combustão de óleo, que propiciam a modificação da composição e transição de volumes de materiais na água para a atmosfera, sendo normalmente empregado in situ (FINGAS, 2011).

As técnicas biológicas ou biorremediação, foco da análise do presente, aproveitam-se de uma situação naturalmente presente no mar, intensificando-a para fins de mitigação da concentração de óleo. Muitos microrganismos possuem a capacidade de degradar hidrocarbonetos advindos do petróleo, em especial alcanos entre dez e vinte e seis carbonos e aromáticos de baixo peso molecular (ATLAS, 1995), usufruindo-se de um processo enzimático. A ideia da biorremediação está vinculada a compreensão de que microrganismos podem a primorizar a qualidade do meio ambiente (DAVE; GHALY, 2011).

As técnicas de biorremediação, segundo Tewari e Tervaiya (2015) para vazamentos de óleo em situações offshore podem ser classificadas em métodos de bioaugmentação e bioestimulação.

A primeira pode ser compreendida como a adição de um ou mais nutrientes limitantes de performance para aceleração das taxas de biodegradação de contaminantes, através da indução de uma taxa de crescimento de populações microbianas autóctones (NIKOLOPOULOU; KALOGERAKIS, 2010, TYAGI; FONSECA; CARVALHO, 2010). Apesar do derramamento de óleo fornecer carbono, o crescimento das comunidades microbianas é limitado pelos baixos níveis de fósforo, nitrogênio e oxigênio do ambiente marinho (NIKOLOPOULOU; KALOGERAKIS, 2010). Dessa forma, passa a ser interessante a injeção de nutrientes, que possam ao mesmo tempo nutrir os micróbios circundantes das gotículas de água na água e ser diversos, promover a eutrofização e ainda serem resilientes a influência das ondas e das correntes (NIKOLOPOULOU; KALOGERAKIS, 2010, TYAGI; FONSECA; CARVALHO, 2010). Nesse âmbito, Nikolopoulou e Kalogerakis (2010) descrevem os cinco principais componentes utilizados para a bioestimulação são os fertilizantes de liberação lenta, (resilientes a lavagem por ondas e marés), nutrientes inorgânicos (grãos secos como sais de fósforo e nitrogênio, solúveis em água), fertilizantes oleofílicos (disponíveis na interface óleo-água onde há maior concentração de microrganismos), oxigênio (promovendo a oxidação do óleo) e ácido úrico (barato e biodisponível).

A bioaugmentação, por outro lado, compreende a aplicação de um conjunto de estratégias adaptadas, baseadas na adição de culturas previamente criadas no local contaminado, para o aprimoramento da biodegradação. As opções mais comumente utilizadas para bioaugmentação envolvem a adição de cepas bacterianas pré-adaptadas ao filme de óleo, introdução de bactérias geneticamente desenvolvidas e a adição de genes pertinentes a biodegradação em um vetor a fim de ser transferido para microrganismos (EL FANTROUSSI; AGATHOS, 2005; TYAGI; FONSECA; CARVALHO, 2010). Apesar da ideia de se inserir seres alóctones para remediação não seja nova, a bioaugmentação ainda vista como uma metodologia experimental documentada em escala de microcosmo ou de laboratório (EL FANTROUSSI; AGATHOS, 2005).

O desenvolvimento de técnicas de biorremediação para mitigação de danos advindos do derramamento de óleo no mar ainda são focos de estudos pelo mundo acadêmico, dada as margens de aperfeiçoamento, falta de compreensão de mecanismos e discordância entre especialistas. O uso de técnicas bibliométricas pode ser um artifício para compreensão do campo de pesquisa e das relações entre temas vinculados a biorremediação. O presente trabalho é baseado no emprego de tais técnicas em informações bibliográficas vinculadas a biorremediação, advindas de uma base de dados.

Araújo (2006) define a bibliometria como a “técnica quantitativa e estatística de medição dos índices de produção e disseminação do conhecimento científico. Tague-Stucliffe (1992) descreve a bibliometria como um artifício de construção

de modelos matemáticos e medidas para predições e tomadas de decisão. Para o presente trabalho, serão utilizados métodos bibliométricos baseados na vertente de mapeamento científico, compreendido como técnicas capazes de revelar a estrutura e o dinamismo de campos científicos, sendo útil para o pesquisador que deseja avaliar uma linha de conhecimento em específico.

Como meio de se encontrar conexões entre conceitos que co-ocorrem em publicações, palavras-chave ou mesmo resumos, pode-se utilizar a métrica de análise de co-palavra. A análise de co-palavra pode ser entendida como a técnica que usa termos e palavras de documento para construção das estruturas conceituais de determinadas áreas (ZUPIC; ČATER, 2015). A ideia da construção de relações está baseada na premissa de que palavras que aparecem juntas em publicações com frequência provavelmente representam conceitos relacionados entre si, permitindo a construção de índices de similaridade. A partir de uma análise por co-palavra, obtém-se uma rede de temas em que as relações compreendem um espaço conceitual e que pode ser analisado longitudinalmente, para verificar a dinâmica de variação de conceitos, e interpretar os resultados logrados, por meio de diagramas classificatórios de temas como os de Callon (CALLON; COURTIAL; LAVILLE, 1991) e diagramas de ligação temporais.

O trabalho em si lança mão de uma análise de co-palavra para a área de estudo de técnicas de biorremediação aplicadas a vazamentos de petróleo, a fim de se compreender as vanguardas científicas e a dinâmica das áreas pesquisadas. Visa-se ao final do estudo a construção de diagramas estratégicos e temporais que permitam a compreensão do campo de estudo da biorremediação, utilizando-se como informações de apoio, estatísticas fornecidas pela base de dados e o conteúdo dos artigos mais citados e mais relevantes dentro da fronteira de estudo desejada.

2. Metodologia

Utilizando-se os softwares *SciMAT* (open source) e *Excel* (como *software* de apoio), desejou-se a realização de um mapeamento científico, entre os anos de 2014-2018, dos temas vinculados a técnicas de biorremediação para vazamentos de óleo *offshore* a partir da base de dados *Scopus*, associando-se as informações interpretadas com as estatísticas da própria base de dados e com o conteúdo dos artigos mais representativos no período estabelecido. Os passos realizados, em grande parte, internamente pelo *software*, são apresentados a seguir:

1. Busca por informações bibliográficas a partir da base *Scopus*, a partir da busca da configuração de palavras-chave “bioremediation oil spill offshore” no corpo do texto de publicações indexadas entre os anos de 2014 a 2018;
2. Extração das estatísticas da própria base de dados a respeito dos resultados da pesquisa;
3. Importação das informações bibliográficas para o software *SciMAT*;
4. Pré-processamento e tratamento das palavras-chave, eliminando erros ortográficos, termos em redundância, escritos com hífen ou sem e afins, utilizando métodos assistidos para limpeza de base como distâncias Levenshtein e tratamento manual;
5. Agrupamento de palavras-chave por sinonímia e igualdade de conceitos e representatividade.
6. Início do processamento do programa, com a indicação da métrica de co-palavra para análise e optando-se pelo índice de equivalência como medida de similaridade entre grupos de palavras que podem ser agregados em *clusters*;
7. Escolha do algoritmo iterativo de centros simples para a *clusterização* dos grupos de palavras;
8. Definição dos parâmetros mínimos para composição dos *clusters*, envolvendo a frequência mínima de palavras (assumido experimentalmente com dez), limites de ocorrência (assumido como livre), tamanhos mínimos (escolhido como 5 grupos) e máximo da rede (10 grupos).
9. Escolha do algoritmo de relação entre temas para análise longitudinal (índice de inclusão) e dos índices qualitativos para dimensionar a representação dos *clusters*.
10. Produção de diagramas de Callon, de visão longitudinal, além de diagramas de sobreposição de palavras-chave entre períodos.
11. Interpretação dos gráficos gerados;
12. Leitura dos 4 artigos mais citados a cada ano do período de restrição entre 2014 e 2018.
13. Comparação e interpretação dos resultados logrados com os gráficos.

O índice de equivalência apresentado pode ser compreendido como a razão entre o número de documentos em que duas palavras co-ocorrem ao quadrado, dividido pelo produto entre o número de documentos em que uma palavra aparece pelo número de documentos que outra palavra ocorre (COBO et al., 2011). o algoritmo de centro simples, pode ser entendido como um algoritmo de produção de redes, dividido entre dois passos: construindo as redes pelas associações mais fortes (maiores índices de equivalência), em que essas ligações podem ser denominadas ligações internas e o segundo passo adiciona essas redes fracas ligações entre outras redes (COBO et al., 2011). O algoritmo de inclusão por sua vez, pode ser compreendido como a razão entre o número de palavras-chave compartilhadas entre dois *clusters* de períodos distintos e o número menor de palavras-chave entre esses dois *clusters*.

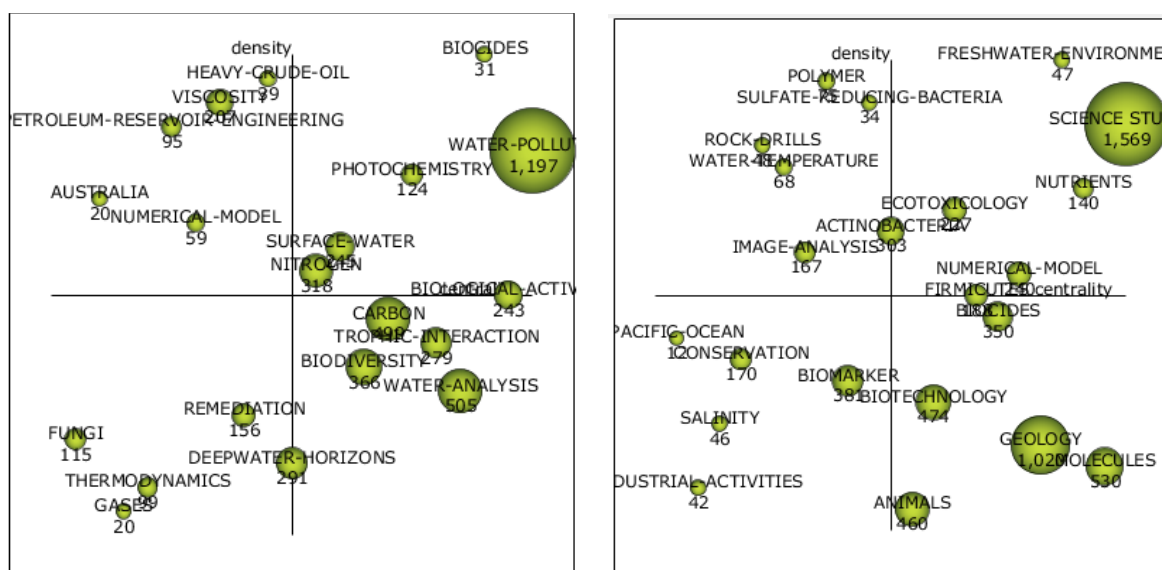
O diagrama de Callon por sua vez, é um diagrama que posiciona os temas gerados em um gráfico de quadrantes, em que o eixo horizontal, pode ser indicada a centralidade, representativa da força de ligação entre *clusters* distintos e no eixo

vertical pode ser encontrado uma medida de densidade, vinculada a força de ligação internas aos *clusters*. O posicionamento dos temas em um gráfico de quatro quadrantes permite uma classificação do tema

3. Resultados

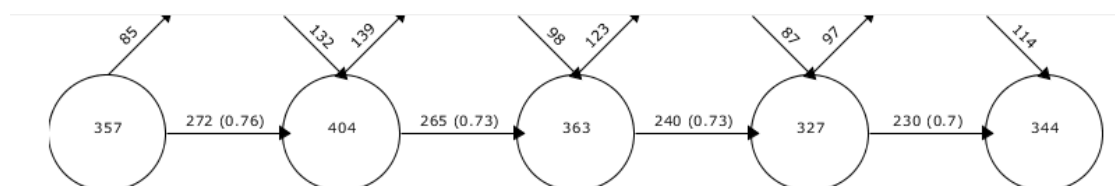
A partir do processamento do texto, as Figuras 1 e 2, representativas de alguns produtos do processo foram geradas, a partir de um de 386 documentos com 4442 palavras-chave indexadas originalmente:

Figura 1. Diagrama de Callon para os anos de 2014 e 2015 (da esquerda para direita), com os clusters apresentados como esferas de dimensão proporcional ao número de citações recebidas.



Fonte: própria (2019)

Figura 2 – Diagrama de frações sobrepostas (palavras-chave “emigrando” e “imigrando” na sucessão dos cinco anos analisado)



Fonte: própria (2019)

Ademais das Figuras 1 e 2, diagramas de Callon foram gerados para os anos de 2016 a 2018, além de um gráfico para análise longitudinal. A não exposição dos diagramas de Callon para tal intervalo de tempo se deve ao fato de que o comportamento observado em tais gráficos é aberrático por conta da geração de somente dois *clusters*, em que uma análise por centralidade não é viável considerando-se que o valor de tal variável é o mesmo para ambos os valores. Outras unidades quantitativas como número de documentos e índice-h de performance foram utilizadas para dimensionamento das esferas apresentadas nos diagramas de Callon, apresentando resultados similares.

A partir da interpretação da Figura 1 gerada, pode-se inferir que os temas *WATER-POLLUTION* (poluição de água), *PHOTOCHEMISTRY* (fotoquímica), *SURFACE-WATER* (superfície de água), *NITROGEN* (nitrogênio) para o ano de 2014 e, para o ano de 2015, os temas *SCIENCE-STUDIES* (estudos científicos), *ECOTOXICOLOGY* (ecotoxicidade), *NUTRIENTS* (nutrientes), *NUMERICAL-MODEL* (modelo numérico) e *FRESHWATER* (água doce), localizados nos quadrantes direitos superiores dos dois gráficos da Figura 1, são temas motores, assumidos como bem desenvolvidos e importantes na estruturação do campo de pesquisa, dado o posicionamento de alta centralidade e alta densidade. Os termos alocados nesse quadrante são relacionados externamente a conceitos aplicados a outros temas que são relacionados de forma próxima (COBO et al., 2011). Tal interpretação se dá pois os temas são bem desenvolvidos internamente e apresentam relação forte com outros temas dos campos.

Os temas *PETROLEUM-RESERVOIR-ENGINEERING* (engenharia de reservatórios de petróleo), *AUSTRALIA* (Austrália), *NUMERICAL-MODEL* (modelo numérico) e *VISCOSITY* (viscosidade), para o ano de 2014, e *IMAGE-ANALYSIS* (análise de imagem), *WATER-TEMPERATURE* (temperatura de água), *ROCK-DRILLS* (perfuração de rochas),

SULFATE-REDUCING BACTERIA (bactérias sulfato redutoras) e *POLYMER* (polímeros) podem ser enquadrados como temas específicos, de desenvolvimento isolado e importância marginal ao campo científico, pois apresentam um alto desenvolvimento interno mas poucas relações com outros temas do campo de estudo (campos superiores esquerdos dos dois diagramas da Figura 1).

Os temas *WATER-ANALYSIS* (análise de água), *BIODIVERSITY* (biodiversidade), *TROPHIC-INTERACTION* e *CARBON* (carbono) para o ano de 2014 (Figura 1) e *BIOTECHNOLOGY* (biotecnologia), *GEOLOGY* (geologia), *MOLECULES* (moléculas), *ANIMALS* (animais) e *BIOCIDES* (*biocidas*), alocados nos quadrante inferior direito dos dois diagramas da Figura 1 podem ser entendidos como temas importantes para um campo, ou seja dependentes a outros temas, mas que são internamente pouco desenvolvidos. Os temas localizados nesse quadrante podem ser compreendidos como temas de transversais ou básicos.

Já os temas denotados como *REMEDIATION* (remediação), *THERMODYNAMICS* (termodinâmica), *GASES* (gases), *FUNGI* (fungos), para o ano de 2014, e *PACIFIC-OCEAN* (Oceano Pacífico), *BIOMARKER* (biomarcadores), *SALINITY* (salinidade) e *INDUSTRIAL ACTIVITIES* (atividades industriais) podem ser compreendidos como temas completamente marginalizados no campo de pesquisa, seja por serem termos em transição tornando ao desaparecimento, seja por serem emergentes, pois nem desenvolvidos internamente nem externamente, em relação a ligações com outros temas, esses índices se encontram.

De forma geral, pode-se perceber que na Figura 1, os temas básicos e transversais obtiveram destaques por possuírem os maiores valores, em conjunto (salvos um tema motor em cada ano) apresentaram maiores números de citações que os outros temas. Esse desempenho é esperado pois temas básicos e transversais apresentam maior probabilidade de terem atenções e citações do que outros temas (COBO et al., 2011). Suscita-se também que em cada ano, há um tema motor que se resalta frente aos demais e é o que apresenta o maior número de citações, sendo assim interpretado como o tema mais consolidado do ano. Ademais, é possível a verificação de um alto grau de fragmentação entre as publicações, pela quantidade de temas dispostos em ambos os mapas. Naturalmente a dimensão das citações é influenciada também pela quantidade de documentos, que não é alta, limitando assim a quantidade de documentos que pode sofrer o aporte de citações), influenciando a dimensão das esferas.

Pela Figura 1 gerada e os diagramas não gerados (para os anos de 2016 a 2018), pode-se perceber a fragilidade do método tendo em visto que a premissa de formação de *clusters* relacionada a frequência mínima para grupos de palavras, assumida como dez anualmente, proporcionou que um grande número de palavras não fossem levadas em consideração para os anos seguintes, tornando a análise por diagrama de Callon ineficiente. Nos três anos restantes do horizonte de tempo definido, apenas dois *clusters* foram formados, impondo necessariamente, que o mesmo valor de centralidade seja atribuído em ambos os temas, dada a única possibilidade de interação possível. A montagem de dois *clusters* somente para os anos seguintes pode ser efeito de um enviesamento involuntário ocorrido no início do tratamento de informações, na fase de agrupamento por similaridade conceitual. Como não foram agregadas palavras somente pela sinonímia, pode-se ocorrer deformidades na análise, dado que um agrupamento de palavras, em que termos genéricos foram agregados, são potentes de superestimar dados como o número de documentos e citações, enquanto que agrupamentos de palavras conceituais com poucos elementos, mas que poderiam ser agregados a outros grupos, tendem a apresentar menor número de documentos, citações e performance em geral, justificando para os anos seguintes o desaparecimento de *clusters*. O resultado logrado pode ser indicativo, de que há uma convergência de muitos temas em um período para poucos temas ao longo dos anos.

A Figura 2, por sua vez, ilustra os períodos (representados pelas circunferências) de 2014 a 2018, da esquerda para a direita, em que a quantidade de palavras-chave de cada período é representada internamente. As setas entre os períodos representam a quantidade de palavras-chave compartilhadas entre eles e, entre parêntesis, o índice de similaridade entre períodos, no caso, o índice de inclusão. As setas “entrando” nos períodos são representativas de que novas palavras-chave entram no subperíodo enquanto as setas com sentido oposto indicam as palavras-chave descontinuadas no período seguinte.

Analisando-se o gráfico pode-se atestar que a terminologia do campo de pesquisa de técnicas de biorremediação aplicadas a vazamentos de óleo *offshore* se manteve estagnada, com um núcleo central de palavras-chave e seus conceitos e um alto número de palavras-chave transitórias que não são assimiladas pela base de conhecimento, não sendo base para o desenvolvimento de novos conceitos. A estagnação pode ser justificada pelo período curto de análise, em que mudanças de paradigma e metodologias são morosas e podem não se manifestar em 5. Mudanças poderiam ser mais bem verificadas no campo com um tempo de análise melhor. A consolidação de uma terminologia e o progresso do campo poderiam ser comprovados com o aumento da similaridade continuamente entre períodos (COBO et al., 2011).

Com o processamento do *software* ainda é possível a construção de um mapa longitudinal, não apresentado no presente documento. Fora atestado que nos primeiros anos, há elevada interrelação entre temas, com muitas ligações entre os *clusters*. De 2016 em diante tal comportamento não foi observado, havendo interrupções entre evoluções temáticas. Dessa forma, é possível atestar que o campo de pesquisa não é coeso, com alguns temas não sendo possíveis de originarem outros. A partir do mesmo gráfico, é possível perceber que o tema *SCIENCE STUDIES* (estudos científicos) é o que melhor apresenta desenvolvimento no campo de evolução temática, possivelmente pelo fato de que nas publicações, os autores costumam citar seus pares para embasar seus trabalhos ou mesmo como forma de compilação de informações. De modo geral, o formato do gráfico pode ser explicado com razoabilidade, considerando-se a possibilidade de interferência no tratamento de dados.

A leitura dos 4 artigos mais citados de cada ano, por sua vez comprovou a compatibilidade com os temas, enquanto as estatísticas presentes na base de dados reforçaram a compreensão da fragmentação e interdisciplinaridade comprovada

anteriormente. O fato de instituições estatais serem as maiores responsáveis pelo fomento e desenvolvimento de pesquisa é justificada pelo fato de a problemática do vazamento de óleo no mar ser um evento com potencial de instigar consequências de dimensões globais, demandando até intervenções estatais.

Conclusão

A partir dos resultados logrados com o mapeamento científico, agregado a leitura dos artigos mais citados e às informações disponíveis pela base de dados, pode-se constatar como características do campo de estudo desenvolvido, os seguintes aspectos:

- Há grande fragmentação do campo de estudo, no âmbito de autores, revistas e jornais, devido, sobretudo a uma interdisciplinaridade intrínseca do tema;
- No intervalo de tempo de 5 anos, a base de conhecimento a respeito de técnicas de biorremediação se manteve praticamente constante;
- Os artigos de maior relevância no campo de estudo têm uma gênese reativa, pois normalmente são publicações que utilizam para estudo de caso, acidentes com vazamentos de óleo já ocorridos
- A evolução temática do estudo tendeu a uma convergência para poucos temas entre 2016 a 2018. Considerando-se o corte de frequências utilizados na composição dos gráficos, pode-se afirmar que a evolução temática no intervalo de tempo de 5 anos passou de muitos temas com muitas palavras-chave correlatas frequentes nas publicações a poucos temas e com palavras-chave frequentes. Com dois *clusters* produzidos, é inviável a utilização do diagrama de Callon.
- A classificação dos temas no diagrama estratégico de Callon é concordante com o conteúdo das amostras dos textos assumidos como mais representativos.
- O estudo de técnicas de biorremediação é importante como meio de mitigação de prejuízos ambientais e econômicos, em decorrência da interação entre hidrocarbonetos e os meios bióticos e abióticos do ambiente afetado. Como as tecnologias desenvolvidas não objetivam lucros, naturalmente, é esperado o grande envolvimento estatal no fomento a pesquisa.

4. Referências

- ARAÚJO, C.A. **Bibliometria**: evolução histórica e questões atuais. Em *Questão*, Porto Alegre, v. 12, n. 1, p. 11-32, jan./jun. 2006.
- ATLAS, R. M. Petroleum biodegradation and oil spill bioremediation. **Marine Pollution Bulletin**, v. 31, n. 4, p. 178–182, 1995.
- CALLON, M.; COURTIAL, J. P.; LAVILLE, F. Co-word analysis as a tool for describing the network of interactions between basic and technological research: The case of polymer chemistry. **Scientometrics**, v. 22, n. 1, p. 155–205, set. 1991.
- CAPUZZO, J. M. Biological effects of petroleum hydrocarbons on marine organisms: Integration of experimental results and predictions of impacts. **Marine Environmental Research**, v. 17, n. 2, p. 272–276, 1985.
- COBO, M. J. et al. An approach for detecting, quantifying, and visualizing the evolution of a research field: A practical application to the Fuzzy Sets Theory field. **Journal of Informetrics**, v. 5, n. 1, p. 146–166, jan. 2011.
- CORNWELL, D. J.; SMITH, D. K. Expanding the scope of gels - Combining polymers with low-molecular-weight gelators to yield modified self-assembling smart materials with high-tech applications. **Materials Horizons**, v. 2, n. 3, p. 279–293, 2015.
- DAVE, D.; GHALY, A. E. Remediation Technologies for Marine Oil Spills: A Critical Review and Comparative Analysis D Dave and A. E Ghaly Department of Process Engineering and Applied Science, Faculty of Engineering, Dalhousie University, Halifax, Nova Scotia, Canada. **American Journal of Environmental Sciences**, v. 7, n. 5, p. 423–440, 2011.
- DEWLING, R. T.; MCCARTHY, L. T. Chemical treatment of oil spills. **Environment International**, v. 3, n. 2, p. 155–162, 1980.

- EL FANTROUSSI, S.; AGATHOS, S. N. Is bioaugmentation a feasible strategy for pollutant removal and site remediation? **Current Opinion in Microbiology**, v. 8, n. 3, p. 268–275, 2005.
- FINGAS, M. F.; DUVAL, W. S.; STEVENSON, G. G. **The basics of oil spill cleanup**: with particular reference to southern Canada. 1 ed. Ottawa: Environment Canada, 1979.
- FINGAS, M. F.; STOODLEY, R.; LAROCHE, N. Effectiveness testing of spill- treating agents. **Oil and Chemical Pollution**, v. 7, n. 4, p. 337–348, 1990.
- FINGAS, M. F. **Oil Spill Science and Technology**: Prevention, Response, and Cleanup. 1. ed. Oxford: Gulf Professional Publishing, 2011.
- JERNELÖV, A. **Environmental Effects of Terrestrial Oil Spills**. In: DELLASALA, D. A.; GOLDSTEIN, M. I. B. T.-E. OF THE A. (Eds.). Oxford: Elsevier, 2018. p. 323– 335.
- LESSARD, R. R.; DEMARCO, G. The significance of oil spill dispersants. **Spill Science and Technology Bulletin**, v. 6, n. 1, p. 59–68, 2000.
- LV, P.; YANG, S.; MA, P. C. Bio-based oil gelling agent for effective removal of oil spills from the surface of water. **Materials Chemistry Frontiers**, v. 2, n. 10, p. 1784– 1790, 2018.
- MUIZIS, A. **Evaluation of the Methods for the Oil Spill Response in the Offshore Arctic Region**. 2013. Trabalho em conclusão (Bacharelado em Engenharia Ambiental) - Helsinki Metropolia University of Applied Sciences, Helsinki, Finlândia, 2013.
- NIKOLOPOULOU, M.; KALOGERAKIS, N. Biostimulation Strategies for Enhanced Bioremediation of Marine Oil Spills Including Chronic Pollution. In: TIMMIS, K. N. (Ed.). **Handbook of Hydrocarbon and Lipid Microbiology**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010. p. 2521–2529.
- REIS, J. C. **Environmental control in petroleum engineering**. Houston, Tex: Gulf Publ, 1996.
- TAGUE-SUTCLIFFE, J. An introduction to informetrics. **Information Processing & Management**, v. 28, n. 1, p. 1–3, 1992.
- TEWARI, S.; SIRVAIYA, A. Oil spill remediation and its regulation. **International Journal Of Engineering Research and General Science**, v. 1 (6), n. November, p. 2394–8299, 2015.
- TYAGI, M.; DA FONSECA, M. M. R.; DE CARVALHO, C. C. C. R. Bioaugmentation and biostimulation strategies to improve the effectiveness of bioremediation processes. **Biodegradation**, v. 22, n. 2, p. 231–241, 2011.
- VENTIKOS, N. P. et al. A high-level synthesis of oil spill response equipment and countermeasures. **Journal of Hazardous Materials**, v. 107, n. 1–2, p. 51–58, 2004.
- ZUPIC, I.; ČATER, T. Bibliometric Methods in Management and Organization. **Organizational Research Methods**, v. 18, n. 3, p. 429–472, jul. 2015.

