



TECNOLOGIAS DE REMEDIAÇÃO DE ÁREAS CONTAMINADAS COM ORGANOCLORADOS: UMA AVALIAÇÃO PRELIMINAR VISANDO POSSÍVEIS APLICAÇÕES NO SÍTIO DA RUA CÁPUA, SANTO ANDRÉ – SP

Recebido: 19/07/2012

Aprovado: 28/10/2012

¹Mauro Silva Ruiz

²Abraham Sin Oih Yu

³Fernando Esteves Martins

⁴Leandro Rodrigues Gonçalves

RESUMO

Este trabalho analisa a utilização de tecnologias de remediação para áreas contaminadas com organoclorados com base em revisão bibliográfica e discussões com especialistas. As tecnologias de remediação analisadas foram: biorremediação, fitorremediação, nanoremediação, oxidação química, e dessorção térmica. O propósito é identificar e comparar problemas-chave para cada uma dessas tecnologias tendo em vista a utilização de uma ou mais delas na remediação do sítio contaminado da Rua Cápua, em Santo André – SP. Quatro bancos de dados foram utilizados na revisão preliminar da literatura: *Scopus*, *SciELO*, *Web of Science* e *Science Direct*. Um questionário foi elaborado para orientar a busca de informações para as cinco tecnologias. Questionou-se sobre a publicação de trabalhos científicos e de patentes, usos específicos ou combinados dessas tecnologias por empresas, e casos de aplicação. Como a sistematização dos resultados obtidos revelou uma qualidade insatisfatória das informações e dados gerados, uma nova estratégia de pesquisa para complementá-los foi delimitada. O *Web of Science* foi escolhido como o mais adequado para a realização deste segundo levantamento, porém, os resultados mostraram que mesmo um banco de dados de referência para avaliar as instituições acadêmicas, pesquisadores e maturidade de tecnologias como este, pode resultar em tendências originárias da fonte original dos dados. Além disso, como o conjunto de palavras-chave utilizadas nas pesquisas foi composto por termos genéricos para cada tecnologia, isso significa que, se alguns autores têm utilizado termos mais específicos, uma pequena quantidade de trabalhos por eles publicados pode, eventualmente, não ter sido representada no resultado final.

Palavras-Chave: áreas contaminadas; organoclorados; remediação; tecnologias.

¹ Doutorado pela Universidade do Sul de Illinois em Carbondale.

Professor do Mestrado Profissional em GeAS da Universidade Nove de Julho (UNINOVE), Brasil

E-mail: maurosilvaruiz@uninove.br

² Doutorado em Philosophy e Master Of Science - Stanford University

Professor associado da Universidade de São Paulo, Brasil

E-mail: abraoyu@ipt.br

³ Engenheiro de Produção pela Universidade Presbiteriana Mackenzie

Participante do grupo de Inovação e Economia da Universidade de São Paulo, Brasil

E-mail: fernandossk@hotmail.com

⁴ Mestrando em Administração de Empresas pela Universidade de São Paulo

É pesquisador da Oxiteno, Brasil

E-mail: lrgoncalves@gmail.com



REMEDICATION TECHNOLOGY OF CONTAMINATED AREAS WITH ORGANOCHLORINES: A PRELIMINARY EVALUATION SEEKING POTENTIAL APPLICATIONS ON THE SITE OF STREET CAPUA, SANTO ANDRÉ - SP

ABSTRACT

This paper is aimed to analyze the use of remediation technologies for areas contaminated with organochlorine based on a literature review and discussions with specialists. The remediation technologies analyzed were bioremediation, phytoremediation, nanotechnology, chemical oxidation, and thermal desorption. The purpose is to identify and compare “key problems” for each of these technologies envisaging the use of one or more of these them f or the remediation of the Capua Street site in Santo André, SP. Four databases were used in the preliminary literature review: Scopus, SciELO, Web of Science, and Science Direct. A survey questionnaire was designed to gather information on publications of scientific papers and patents, specific uses of these technologies by companies, and cases of application. Since the quality of the data and information obtained from this questionnaire

application was not satisfactory, a new research approach for complementing them was undertaken. For this purpose, the Web of Science was selected as the most adequate data basis to carry out this second survey. However, it was realized that even for this database - that is reference for evaluating academic institutions, researchers and maturity of technologies – bias coming from the original data source can affect the survey results. Moreover, as the number of keywords used in the research consisted of generic terms for each technology, it can also be assumed that if some authors have used very specific terms, a small amount of work published by them would possibly have been misrepresented in the final result.

Key Words: contaminated sites; organochlorine; remediation; technologies

ÁREAS DE REPARACIÓN DE TECNOLOGÍA DE CONTAMINADOS CON ORGANOCLORADOS: UNA EVALUACIÓN PRELIMINAR EN EL SITIO BUSCANDO APLICACIONES POTENCIALES DE LA CALLE CAPUA, SANTO ANDRÉ – SP

RESUMEN

En este trabajo se analiza el uso de las tecnologías de remediación de áreas contaminadas con revisión de la literatura organoclorados y basado en discusiones con expertos. Las tecnologías de recuperación se analizaron: biorremediación, fitorremediación, nanoremediação, oxidación química, y la desorción térmica. El propósito es identificar y comparar las cuestiones clave para cada una de estas tecnologías con el fin de utilizar uno o más de ellos en la remediación del sitio contaminado de Capua Street, en Santo André - SP. Cuatro bases de datos se utilizaron en la revisión de la literatura preliminar: Scopus, SciELO, Web of Science y Science Direct. Se diseñó un cuestionario para orientar la búsqueda de información para las cinco tecnologías. Preguntado por la publicación de artículos científicos y patentes, usos específicos o combinaciones de estas tecnologías por parte de las empresas, y los casos de aplicación. Desde la

sistematización de los resultados reveló una calidad insatisfactoria de información y datos generados, una nueva estrategia de investigación para complementar era delienada. La Web of Science fue elegido como el más adecuado para la realización de esta segunda encuesta, sin embargo, los resultados mostraron que incluso una base de datos de referencia para la evaluación de las instituciones académicas, los investigadores y la madurez de las tecnologías de este tipo pueden dar lugar a sesgos originarios de fuente original de los datos. Además, como el número de palabras clave utilizadas en la investigación consistió en términos genéricos para cada tecnología, esto significa que si algunos autores han utilizado términos más específicos, una pequeña cantidad de trabajo publicado por ellos posiblemente no han sido representado en el resultado final.

Palabras Clave: zonas contaminadas; organoclorados; remediación; tecnologías



1 INTRODUÇÃO

Solos contaminados por pesticidas organoclorados são encontrados atualmente em diversas partes do mundo resultantes da disposição irregular de resíduos e equipamentos após o encerramento das fábricas. Em geral, tanto no Brasil como em outros países, os sítios contaminados estão localizados em áreas urbanas ou muito próximo a elas, onde geralmente o valor dos lotes é elevado.

De acordo com dois especialistas no assunto, respectivamente V. Luna (2008) e S. H. Ogihara (2008), os custos de remediação de áreas contaminadas com organoclorados no Brasil variam entre US\$ 500 mil a US\$ 6 milhões, dependendo da dimensão espacial e da profundidade dos sítios, da variedade e do nível de concentração dos contaminantes, além da distância de transporte, neste caso quando a tecnologia de tratamento utilizada é *off-site* e o material contaminado precisa ser removido para tratamento em outra localidade.

O sítio da Rua Capua constitui-se em terreno contaminado por resíduos de produção de pesticidas que foram armazenados no local nos últimos 20 anos. Em uma área 10.500 m², estima-se que entre 26.000 a 32.000 toneladas de solo contaminado foram armazenadas em 7 células geotécnicas (Figura 1). As células foram preparadas com PVC e material têxtil e recobertas com areia e argila. As células, o solo e as águas subterrâneas também apresentam elevado nível de contaminantes, dentre eles: lindano (variedades γ -HCH, β -HCH e α -HCH), benzeno e compostos inorgânicos como o chumbo, antimônio, cobre, bário, cromo, o mercúrio e níquel (Cunha; *Autor & Teixeira*, 2010).



Figura. 1: Localização da Rua Capua (Santo André – SP) mostrando a posição das células contendo HCH e outros contaminantes



Fonte: Cunha, Autor & Teixeira (2010)

A maioria do material contaminado existente na área, representado por solo e resíduos industriais, está confinada nas células, porém o HCH e outros compostos clorados também se encontram espalhados nos arredores representando riscos potenciais para as comunidades de entorno.

Atualmente, as empresas de engenharia que atuam na remediação de áreas contaminadas no Brasil vêm utilizando tecnologias dominadas (p.ex: *pump and treat*, oxidação química *in situ*, dessorção térmica *off site*, e incineração) ou, então, contratam empresas nacionais que têm empresas parceiras no exterior especializadas em tecnologias emergentes (por ex: a biotecnologia).

O objetivo deste trabalho é analisar o atual estágio de aplicação de tecnologias de remediação para áreas contaminadas com organoclorados (ênfatizando o hexacloroetano - HCH), tendo como referência as conversas com especialistas e revisão bibliográfica. Embora as publicações de patentes por tecnologias tenham sido levantadas, elas não foram analisadas neste artigo.



2 REVISÃO DA LITERATURA E INFORMAÇÕES DE ESPECIALISTAS

Este item apresenta uma compilação da revisão de literatura e de informações obtidas via conversas com quatro especialistas que atuam como consultores em remediação de áreas contaminadas.

Não existe uma solução tecnológica específica para a remediação de áreas contaminadas por organoclorados porque, freqüentemente, o HCH é acompanhado de outros compostos clorados oriundos dos solventes utilizados na produção de pesticidas (Cunha, Ruiz & Teixeira, 2010). Esta diversidade de contaminantes torna a remediação de uma área uma tarefa complexa que, em algumas situações, pode exigir a combinação de diferentes tecnologias com vistas a reduzir a sua concentração a um nível de risco aceitável. Basicamente, a intervenção mais comum consiste na remoção e no isolamento do solo com elevada concentração de contaminantes em células geotécnicas. Esta foi a primeira abordagem adotada na área da Rua Capua há vários anos.

Três especialistas entrevistados, respectivamente V. Luna (2008); M. Silos (2008); e J. Ohata (2008) indicaram que pelo menos cinco tecnologias comumente usadas na remediação de áreas contaminadas com hidrocarbonetos alifáticos (que são relativamente comuns em áreas urbanas industrializadas) poderiam ser usadas na remediação de áreas contaminadas com organoclorados. São elas: a biorremediação, a oxidação química, a dessorção térmica, o confinamento em células geotécnicas, e a incineração.

Com relação à biorremediação, (Chowdhury, Pradhan, Saha & Nilanjan, 2008) estudaram o impacto dos pesticidas sobre os parâmetros microbiológicos do solo e as estratégias de intervenção possíveis utilizando esta tecnologia. Segundo estes autores, os fatores que influenciam a degradação de pesticidas no solo são: a estrutura dos pesticidas e suas concentrações, os tipos de solos e seus níveis de umidade, temperatura, pH, salinidade e presença de matéria orgânica. Uma biorremediação *in situ* completa (*full scale*) foi usada para tratar 1100 toneladas de solo contaminado com HCH numa antiga fábrica de lindano no Centro-Oeste dos EUA (Otto, Floyd & Bajpai, 2008).

De acordo com esses autores, embora a biorremediação tenha sido sugerida para este tipo de contaminação, tratamentos economicamente viáveis e eficazes ainda estão por ser demonstrados, particularmente para o tratamento de fase sólida, em escala de campo ou para



solos com concentrações elevadas de HCH ($> 20.000\text{mgkg}^{-1}$ de HCHs total). Utilizando uma técnica de biorremediação denominada *landfarming* para remediar solos contaminados com isômeros de HCH, (Rubinos, Villasuso, Muniategui, Barral & Díaz-Fierros, 2007) estudaram um sítio contaminado por resíduo de lindado localizado em O Porriño, no noroeste da Espanha. Os resultados obtidos sugerem que a *landfarming* é uma técnica eficaz do ponto de vista econômico, podendo vir a ser amplamente utilizada na remediação de solos intensamente contaminados com α -e γ -HCH.

A oxidação química *in situ* também é uma tecnologia inovadora que vem se mostrando promissora no tratamento de uma ampla variedade de resíduos perigosos presentes nas águas subterrâneas, sedimentos e solos. Como vantagens de sua utilização, os oxidantes utilizados são facilmente obtidos no mercado e o tempo de tratamento é relativamente curto (estimado em meses) tornando o processo economicamente viável (U.S. Environmental Protection Agency, [U.S. EPA], 1998). Esta tecnologia também pode ser combinada com a biorremediação para o tratamento de compostos orgânicos recalcitrantes (Brown & Leahy, 1997).

A dessorção térmica é uma técnica eficaz para a remoção de matéria orgânica volátil e semi-volátil na remediação de solos contaminados. A formação de dioxinas dibenzo-p-policloradas (PCDD) e dibenzofuranos policlorados (PCDF) tem sido relatada em muitos processos de tratamento de contaminantes bifenils policlorados (PCBs), mas os caminhos de remoção ainda não são bem compreendidos (Sato, Todoroki, Shimoda, Terada & Hosomi, 2010). Dessorção térmica a partir do aquecimento de resistência elétrica (ERH) foi enfatizada por T. Gomes (2008) como uma tecnologia com alto potencial de recuperação de sítios contaminados com organoclorados, porém, pelo fato de envolver o aquecimento do solo a uma temperatura em torno de 105°C (221°F) há riscos de eventual libertação de gases tóxicos voláteis para a atmosfera.

Segundo V. Luna (2008), a oxidação química não tem sido freqüentemente utilizada no Brasil, na remediação de áreas contaminadas com HCH, muito provavelmente em função da existência de poucas áreas conhecidas desse tipo em todo o país, mas considerou que ela tem um grande potencial para futuras utilizações. O referido especialista argumentou também que a combinação de incineração de parte do solo ou resíduos (onde os contaminantes geralmente são mais concentrados) com oxidação química para tratamento da parte restante, em algumas situações, poderá ser uma boa alternativa. Alertou, porém, que os custos de transporte e de incineração em alguns casos poderão inviabilizar esta combinação.



Segundo Zодrow (1999), a fitorremediação pode ser aplicada para ajudar a remover contaminações originadas artificialmente. Algumas plantas têm demonstrado eficácia na recuperação de áreas contaminadas com resíduos químicos orgânicos, tais como: produtos de petróleo, solventes, conservantes de madeira, pesticidas e metais. A eficácia deste processo depende do tipo e do grau de contaminação e, de modo geral, envolve muito mais tempo do que os métodos convencionais de remediação.

A nanotecnologia também é vista como uma alternativa economicamente promissora para a remediação de sítios contaminados com resíduos perigosos envolvendo situações desafiadoras como a presença de fase líquida densa não aquosa (DNAPLs). Algumas nanopartículas como o ferro zero-valente em nanoescala (nZVI) já estão sendo usadas em projetos de remediação (*full scale*), com perspectivas encorajadoras. Pesquisas em andamento, em escala de bancada e escala piloto, estão investigando partículas como monocamadas auto-organizadas em suportes mesoporosos (SAMSTM), dendrímeros e nanotubos de carbono para determinar como aplicar suas propriedades químicas e físicas (que são únicas) para projetos de remediação *full scale*. Há ainda uma grande diversidade de questões sem respostas sobre a nanotecnologia, pressupondo que muitas pesquisas ainda serão necessárias para entender o trajeto e o transporte das nanopartículas no meio ambiente, sua persistência e seus efeitos toxicológicos nos sistemas biológicos (Otto, Floyd & Bajpai., 2008).

Três dos especialistas entrevistados, respectivamente, V. Luna (2008); S. H. Ogihara (2008) e J. Ohata (2008) enfatizaram que a seleção de uma tecnologia ou a combinação de duas ou mais para a remediação de sítios contaminados com HCH dependerá de fatores tais como: (i) o nível de remediação demandado para os usos futuros da área, (ii) a profundidade da contaminação (eventualmente afetando as águas subterrâneas), e (iii) os custos envolvidos na remoção, tratamento, etc.

3 METODOLOGIA

A metodologia para a realização deste estudo consistiu em três etapas:
1. Seleção preliminar das tecnologias potencialmente aplicáveis para a remediação do sítio da Rua Capua

Esta seleção foi baseada em conversas com quatro especialistas em áreas contaminadas e discussões com profissionais de diferentes áreas técnicas do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT). As tecnologias selecionadas para

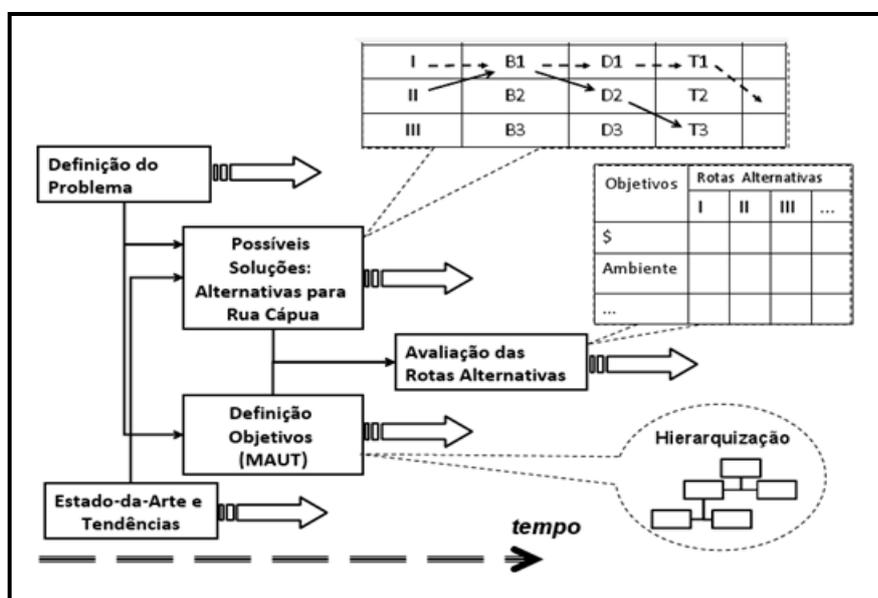


tratamentos *in situ* e *ex situ* foram: fitorremediação biorremediação, nanotecnologia, oxidação química, e dessorção térmica.

2. *Definição de um modelo conceitual para orientar a revisão da literatura e obtenção de dados e informações sobre as tecnologias selecionadas*

A Figura 2 mostra o processo delineado para guiar a coleta de dados e informações e subsidiar a tomada de decisão sobre a tecnologia ou combinação de tecnologias a ser utilizada na remediação da Rua Cápua.

Figura 2: Modelo conceitual para orientar a coleta de dados e informações e tomada de decisão envolvendo as cinco tecnologias selecionadas



Fonte: elaborada pelos autores

O desenvolvimento da Figura 2 baseou-se em três etapas consideradas na teoria da decisão, quais sejam: (i) definição do problema, (ii) definição dos objetivos de remediação, e (iii) busca de alternativas tecnológicas possíveis para a remediação da Rua Capua considerando algum objetivos previamente delineados.

Como há vários objetivos a serem considerados (p. ex: custos envolvidos, o nível de remediação a ser atingido etc.), todos direcionados à remediação da área, a Teoria da Utilidade Multi-Atributo (MAUT) foi usada para apoiar a definição dos objetivos a serem avaliados no contexto de cada tecnologia selecionada. O atual nível do conhecimento, bem como o desenvolvimento dessas tecnologias nos últimos anos, também foram considerados



fatores relevantes para a priorização e posterior seleção da melhor ou melhores alternativas a serem utilizadas na Rua Capua.

3. Definição do escopo da revisão bibliográfica e seleção de bases de dados e palavras-chave

Várias tentativas e erro foram necessários para definir a melhor estratégia para a revisão de literatura, particularmente em relação à seleção de palavras-chave para cada pesquisa de tecnologia e do banco de dados mais adequado.

Uma primeira estratégia de busca de dados e informações para cada tecnologia (Quadro 1) foi elaborada a partir de conversas com profissionais de diversas áreas técnicas do IPT envolvidos em projeto de remediação da Rua Cápua de escopo bem mais amplo que o deste estudo.

Quadro 1: Estratégia preliminar de busca de dados e informações sobre as tecnologias

1. Papers
Palavras-chave
Bancos de dados
Papel / ano de publicação
Trabalhos mais relevantes, incluindo <i>paper review</i> (critérios: número de citações em outros jornais e publicações)
2. Patentes
Palavras-chave
Bancos de dados
Patentes / ano de registro
3. As organizações que utilizam a tecnologia (públicas e privadas)
4. Aplicação tecnológica para a recuperação de sítios contaminados com HCH
5. Estado-da-arte da tecnologia
Nível de recuperação alcançado pela tecnologia
Desenvolvimento da tecnologia / instituições e organizações envolvidas
Impactos e riscos

Fonte: elaborado pelos autores

A busca preliminar foi feita nas bases de dados *Scopus*, *SciELO*, *Web of Science* e *Science Direct* tendo considerado publicações de artigos e patentes nos EUA, China e países europeus.



Os resultados mostraram uma diferença considerável na quantidade de publicações por ano para cada tecnologia devido, pelo menos em parte, a diferenças nas bases de dados e também na quantidade e tipo de palavras-chave utilizadas nas pesquisas realizadas em cada banco de dados. Verificou-se que um processo de normalização para a coleta de dados se fazia necessário a fim de tornar possível a comparação dos resultados obtidos. Percebeu-se também uma diferença significativa na quantidade de publicações para a nanotecnologia em comparação a outras tecnologias.

Com o intuito de normalizar a quantidade e tipo dessas palavras-chave, foi realizada uma análise de um conjunto dos termos utilizados pelos especialistas do IPT, conhecedores de cada tecnologia, de modo a possibilitar uma melhor compreensão da metodologia utilizada para cada tecnologia, uma vez que os levantamentos estavam sendo feitos por pessoas ou grupos distintos. Percebeu-se que quanto maior o número de palavras-chave utilizadas por grupo de especialistas, maior a quantidade de artigos encontrados. Como as tipologias das palavras-chave diferiam significativamente para cada tecnologia, novamente através de uma reunião com os especialistas responsáveis por cada tecnologia, foram selecionadas palavras-chave específicas para executar outra pesquisa na base de dados *Web of Science*, desta vez definido como o banco de dados padrão.

Mais uma vez, percebeu-se que quanto maior a quantidade de palavras-chave utilizadas, maior era a quantidade de artigos encontrados. Como os tipos de palavras-chave eram bastante variados, a estratégia adotada por todos os grupos de especialistas foi padronizar a quantidade e o tipo de palavras-chave para cada tecnologia, de modo a propiciar a comparação dos resultados entre si.

(i) Classificação das palavras-chave

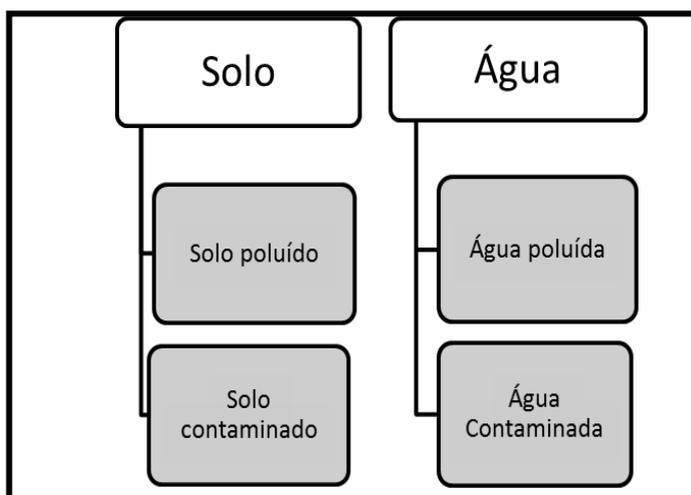
O sítio da Rua Capua apresenta três elementos básicos relevantes para a análise em questão: o solo, a contaminação, e a tecnologia de remediação. Ao se fazer uma analogia com os principais problemas tratados pela Medicina, estes três elementos poderiam ser vistos como: o paciente, a doença, e o tratamento. Na Rua Capua, tanto o paciente como a doença são sempre os mesmos para cada tipo de intervenção (tratamento) a ser adotada, ou seja, para cada uma das cinco tecnologias analisadas. Como as diferenças ocorrem apenas no tratamento, as palavras-chave utilizadas tanto para o paciente (solo) como para a doença (contaminação) foram as mesmas para todos os tipos de tratamentos (tecnologia).

(ii) Paciente (“Patient”)



A contaminação da Rua Capua é caracterizada pela presença de organoclorados (incluindo HCH) no solo e água. Quando a concentração desses poluentes supera o nível tolerado pela legislação estabelecida no Conselho Nacional do Ambiente - Conama, o solo e água podem ser classificados como pacientes. As palavras-chave utilizadas na pesquisa de artigos relacionados ao paciente são apresentadas na Figura 3.

Figura 3: Palavras-chave referentes ao solo e água (“pacientes”) usadas na pesquisa



Fonte: elaborada pelos autores

Destaca-se que as palavras-chave efetivamente utilizadas para a caracterização do paciente foram *soil*, *contaminated soil*, *polluted soil*, *water*, *contaminated water*, e *polluted water*, em função da busca ter sido baseada em bases de dados internacionais.

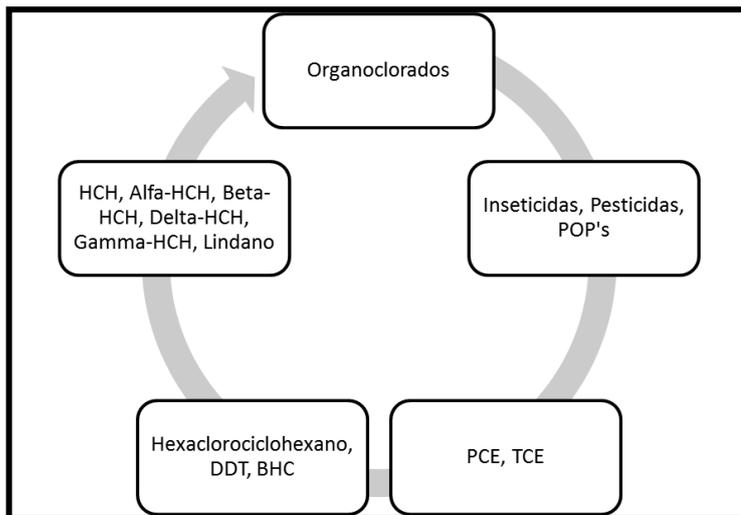
(iii) Doença (“Illness”)

Considerando que o principal contaminante da Rua Cápua é o HCH, é importante mencionar que este organoclorado é formado por três tipos de isômeros - α -HCH, β -HCH, γ -HCH, sendo o último o mais conhecido e comumente utilizado como pesticida.

Considerando que a contaminação em questão é complexa abrangendo uma ampla gama de compostos poluentes, para a busca de dados e informações procurou-se adotar palavras-chave de conotações abrangentes, envolvendo a “família química” em que este composto se enquadra, e os compostos químicos similares aos isômeros de HCH. A Figura 4 mostra os termos técnicos utilizados para orientar a pesquisa.



Figura 4: Levantamento dos termos técnicos utilizados nos contaminantes (doença)



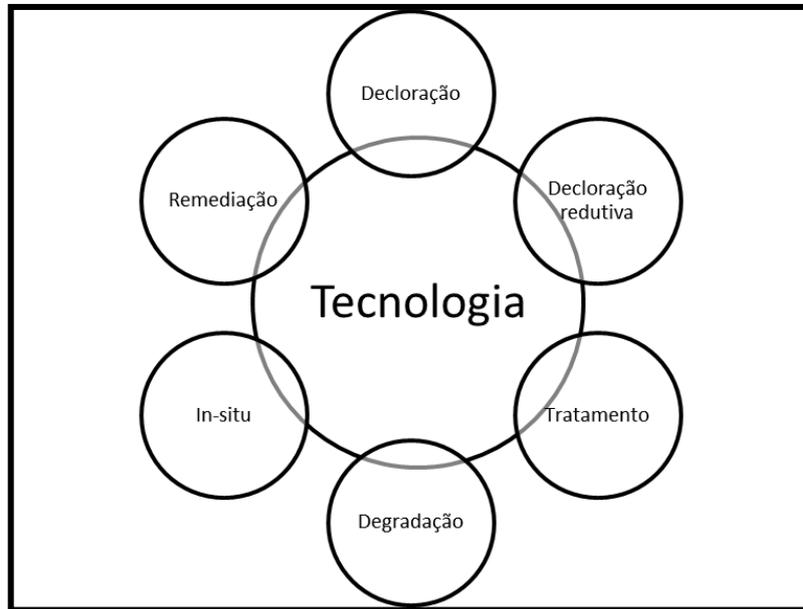
Fonte: elaborada pelos autores

Destaca-se que as palavras-chave (em Inglês) utilizadas para representar a doença foram: *Organochlorines*, *PCE*, *TCE*, *POPs*, *Organic Pesticide*, *Organic Insecticide*, *DDT*, *Hexachlorocyclohexane*, *Alpha-Hexachlorocyclohexane*, *Beta-Hexachlorocyclohexane*, *Gamma-Hexachlorocyclohexane*, *Delta-Hexachlorocyclohexane*, *Lindane*, *HCH* e *BHC*.
(iv) *Tratamento* (“Treatment”)

As alternativas de tratamento possíveis para o paciente (solo e água, neste caso) incluem a biorremediação, a nanoremediação, a fitorremediação, a oxidação química, e a dessorção térmica. Considerando que estas tecnologias são bastante diferentes entre si, as palavras-chave que as caracterizam também são bastante divergentes. No entanto, foi possível encontrar algumas palavras-chave comuns a todas mostradas na Figura 5.



Figura 5: Palavras-chave comuns para as cinco tecnologias (formas de tratamento) consideradas no levantamento



Fonte: elaborada pelos autores

As palavras-chave (em Inglês) comuns a todas as tecnologias selecionadas e utilizadas para encontrar um tratamento para o “paciente” foram: *dechlorination*, *reductive dechlorination*, *treatment*, *degradation*, *in-situ*, e *remediation*. Cada uma delas, adaptadas às terminologias específicas de cada uma das cinco tecnologias estudadas, é apresentada no Quadro 2.



Quadro 2: Lista expandida de palavras-chave para tecnologias (formas de tratamento) utilizadas na pesquisa

Biorremediação	<i>Bioremediation, In-situ Bioremediation, Degradation by bioremediation, Dechlorination by bioremediation, Reductive dechlorination by bioremediation, Microbial degradation, Biodegradation, Biomineralization, Landfarming technic</i>
Fitorremediação	<i>Phytoremediation, In-situ phytoremediation, Degradation by phytoremediation, Dechlorination by phytoremediation, Reductive dechlorination by phytoremediation, Plant* degradation, Phytodegradation, Mineralization, Rhizodegradation, Rhizosphere, Plant-rhizospheric, Natural atenuation using plant*, Hairy root* culture</i>
Nanoremediação	<i>Nanoparticle*, Nanoparticle* remediation, Nanoparticle* treatment, Metallic nanoparticle*, Bimetallic nanoparticle*, Fe Pd nanoparticle* bimetallic, Zerovalent iron, Iron nanoparticle*, ZVIN, Fe-0, Zero-valent iron, Reductive dechlorination by nanoparticle* or Fe/Pd, Nanoscale iron particle*, Metallic iron hydrogenation, Nanomaterial*, Palladium nanoparticle*, Particle* reduction, Dechlorination, Nanoscale zerovalent iron, Land remediation, Nanotechnology</i>
Oxidação química	<i>Chemical oxidation, Permanganate, Fenton reagent, Persulfate, Solubilization, Surfactant*</i>
Dessorção térmica	<i>Thermal remediation, Thermal desorption, Thermal desorption organochlorine, Thermal treatment, Conductive heating, Thermal conductive heating, Dechlorination thermal lindane, In situ thermal remediation, Desorption, Heat-transfer model, Ex situ desorption</i>

* O asterisco é usado para o programa localizar todos os documentos que têm a parte inicial da palavra (até o asterisco) com qualquer terminação. Por exemplo: nanopartículas* para recuperar nanopartícula ou nanopartículas.

Fonte: elaborado pelos autores

Operadores lógicos

Com o intuito de melhorar a busca por artigos considerando estes grupos de palavras-chave ("patient", "illness" e "treatment") e estabelecer uma relação adequada entre eles, foi utilizado os operadores lógicos "()", NOT, AND, e OR", que são ferramentas de busca da *Web of Science*. Os significados de cada uma são apresentados no Quadro 3.



Quadro 3: Tipos de operadores utilizados, seus significados e funções

Operador	Significado	Função
AND	Interseção	Procura por todos os registros onde todos os termos indicados ocorram simultaneamente
OR	União	Procura por todos os registros onde há algum dos termos indicados
NOT	Exclusão	Exclui todos os registros onde são escritas logo após termos o operador NOT

Fonte: elaborado pelos autores

Os parênteses () foram usados para agrupar diversas palavras ligadas por conectivos. Desta forma, os conjuntos de palavras-chave utilizadas na pesquisa foram:

("Patient") AND ("Illness") AND ("Treatment")

Destaca-se também que, entre os parênteses, o operador OR foi usado para inserir variantes de "Patient", "Illness" e "Treatment".

Tecnologias não consideradas: outros tratamentos para a mesma doença ("Illness")

No mesmo processo de pesquisa para o tratamento potencialmente aplicável à Rua Capua, cinco tipos de tecnologias de remediação foram consideradas. No entanto, uma questão que surgiu foi a seguinte: São essas as técnicas de tratamento do paciente ("Patient") e da doença ("Illness") que apresentam as maiores incidências de publicação no banco de dados selecionado?

Para responder a esta questão, um novo levantamento foi realizado no *Web of Science* usando apenas palavras-chave que caracterizam o "Patient" e a "Illness", como segue:

("Patient") AND ("Illness")

Desta forma, foram identificadas tecnologias presentes nas publicações para o tratamento do mesmo problema, mas que não tinham sido consideradas inicialmente no projeto. Estes dados podem ser usados para comparação com as cinco tecnologias de remediação consideradas neste estudo ou mesmo para outras novas tecnologias que, eventualmente, poderiam ser aplicáveis para a remediação da Rua Capua. Para esta pesquisa, as seguintes palavras-chave foram utilizadas:



“Patient”: (*Soil* OR Contaminated Soil**)

AND

“Illness”: (*Organochlorine* OR POP OR Organic Pesticide* OR Organic Insecticide* OR Organochlorine Pesticide* OR Organochlorine Insecticide OR DDT OR Hexachlorocyclohexane OR Alpha-Hexachlorocyclohexane OR Beta-Hexachlorocyclohexane OR Gamma-Hexachlorocyclohexane OR Delta-Hexachlorocyclohexane OR Lindane OR HCH OR Trichloroethylene OR TCE OR Dichloro-Diphenyl-Trichloroethane OR DDT OR Benzene Hexachloride OR BHC*)

Os artigos obtidos em todos os levantamentos foram divididos em diversas áreas do conhecimento, mas apenas as classificadas como Ciências Ambientais foram consideradas para fins de comparação. As publicações sobre Microbiologia, Engenharia Ambiental, dentre outras, não foram contabilizadas para este fim, uma vez que, neste caso, o objetivo era apenas obter dados comparáveis.

Análise da qualidade

Uma rápida observação dos resultados mostrou que entre todos os artigos encontrados nem todos eram relevantes para as tecnologias estudadas. Tendo em vista melhorar a relevância desses resultados, uma análise de qualidade dos resultados da pesquisa foi realizada para todos os artigos encontrados na pesquisa.

Para cada tecnologia, uma amostra de artigos foi selecionada aleatoriamente para representar toda a população de artigos. O tamanho da amostra (n) foi determinada usando a equação (1):

$$n_0 = \left(\frac{1}{e}\right)^2$$

$$n = \frac{N \times n_0}{N + n_0}$$

N = população

n = tamanho da amostra

n_0 = Coeficiente de erro

e = margem de erro = 10%

Ao adotar uma margem de erro de 10%, foram obtidas amostras de artigos para análise e verificação de suas relevâncias para cada tecnologia estudada. Desta forma, foi possível estimar o número de artigos que era necessário para realizar uma avaliação da qualidade. Um



artigo é considerado relevante para estudo em questão se ele trata de pacientes semelhantes aos considerados neste estudo. Esta avaliação envolve julgamentos subjetivos, porém, neste estudo, partiu-se do pressuposto que esta seria a única maneira de verificar a qualidade dos resultados da busca realizada. A participação dos artigos na amostra relevante para este estudo foi, então, definida como a análise de qualidade. Uma análise de melhor qualidade, neste caso, significa uma tática melhor de busca. Por exemplo, para biorremediação, 87% dos artigos da amostra são relevantes.

Resultados

Os dados obtidos para cada tecnologia usando este procedimento são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Publicações de artigos sobre as tecnologias estudadas e análise de qualidade dos resultados obtidos

	Tecnologias estudadas				
	Biorremediação	Fitorremediação	Nanoremediação	Oxidação química	Dessorção térmica
Quantidade de trabalhos	460	258	217	194	333
Análise da qualidade	0,87	0,70	0,46	0,90	0,67
Estimativa da Quantidade de trabalhos relevantes	401	174	100	173	210

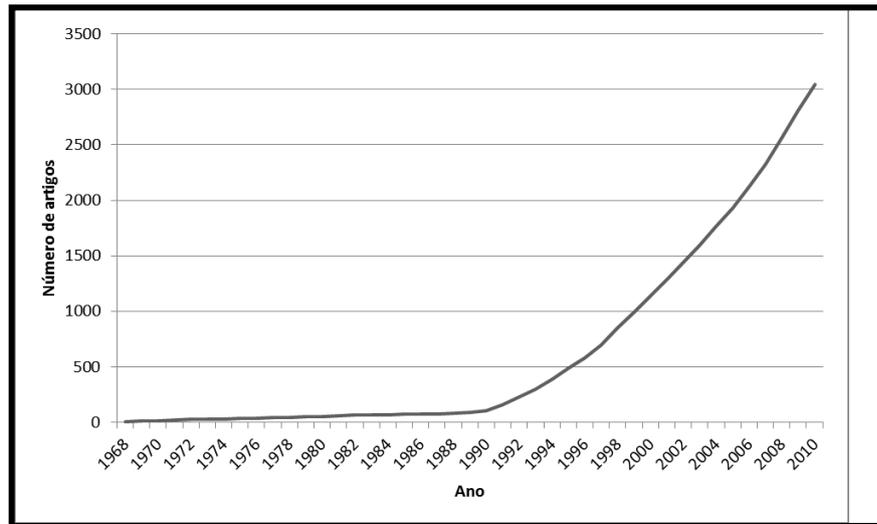
Fonte: elaborada pelos autores

Outras Tecnologias

O resultado obtido na pesquisa de outras tecnologias que não as integrantes das cinco considerados neste estudo (aqui denominado de "Total de Tecnologias"), tomando-se como referência apenas os resultados obtidos para Ciência Ambiental atingiu 3.043 artigos. Contando apenas os artigos obtidos para as cinco tecnologias estudadas, foram obtidos 1.483 (Figura 6). Isto indica que existem outras tecnologias com alto índice de publicações que não foram consideradas no presente estudo.



Figura 6: Curva acumulada de publicações de artigos por ano

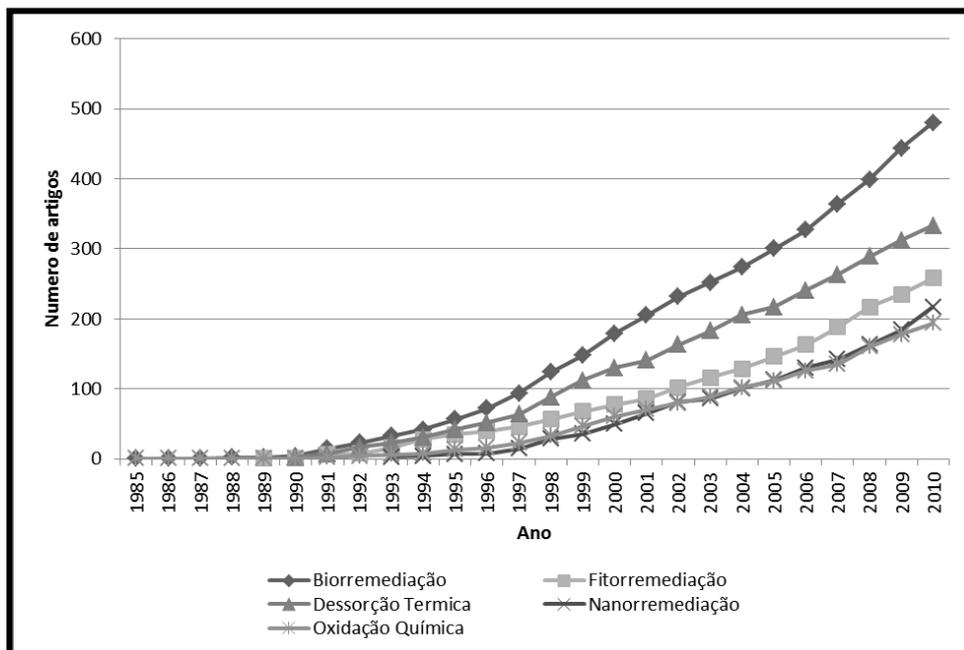


Fonte: elaborada pelos autores

4 DISCUSSÃO

Os resultados da pesquisa mostram um crescimento contínuo de publicações de artigos para cada tecnologia, de modo a praticamente impossibilitar a identificação de qual tem um crescimento mais acentuado que outro. Este crescimento é esperado para publicações em periódicos científicos. A Figura 7 mostra esse crescimento em valores acumulados.

Figura 7: Curvas comparativas em valores acumulados para artigos publicados por tecnologia estudada

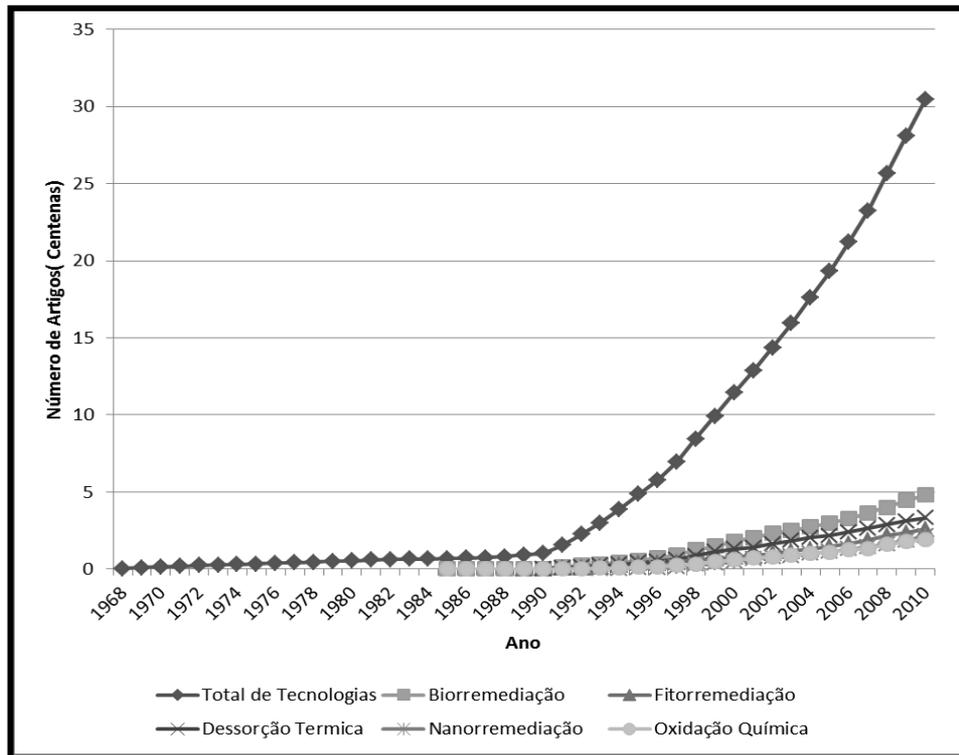


Fonte: elaborada pelos autores



Uma tendência de crescimento semelhante é observada na curva mais acentuada da Figura 8 referente aos artigos publicados para “as outras tecnologias” (identificadas como “total de tecnologias”), que não foram consideradas no presente estudo.

Figura 8: Curva comparativa de “total de tecnologias” (mais acentuada) versus tecnologias consideradas na Rua Cápua



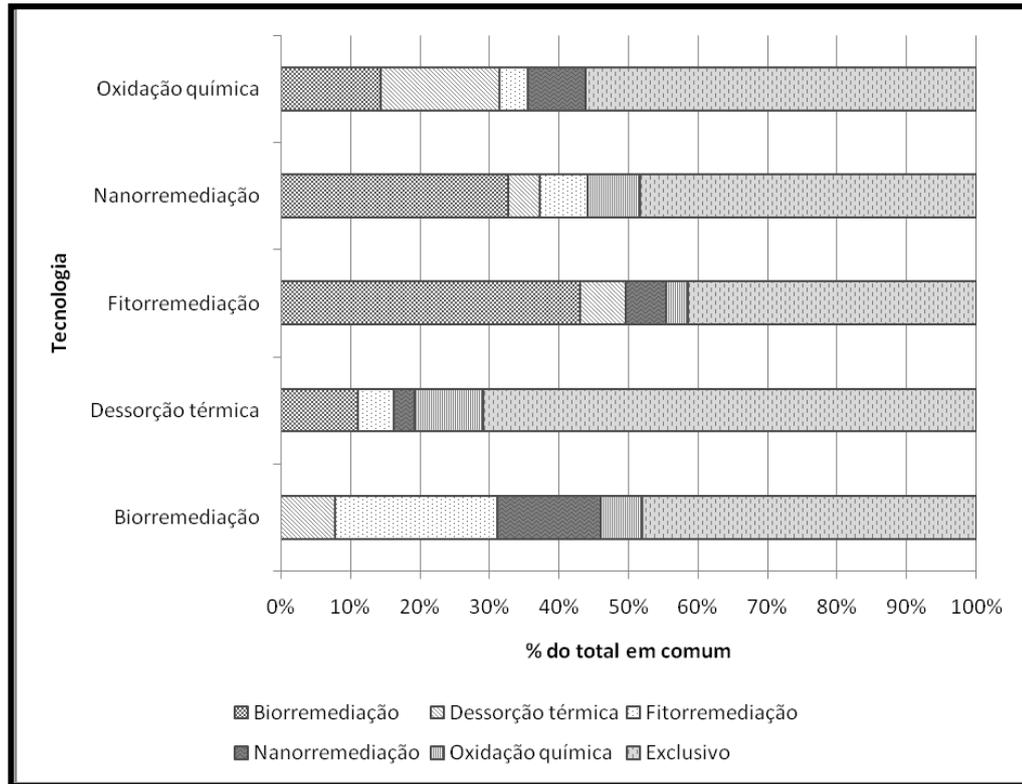
Fonte: elaborada pelos autores

Artigos publicados envolvendo simultaneamente mais de uma tecnologia

Um produto adicional desta pesquisa se refere a artigos que surgiram como resultado de pesquisas que consideram, pelo menos, duas tecnologias simultaneamente. Esta abordagem foi adotada porque a combinação de tecnologias também é uma alternativa a ser considerada para a remediação da Rua Capua. A Figura 9 mostra a porcentagem de artigos por tecnologia estudada em que há sobreposição de uso dessas tecnologias.



Figura 9: Percentagem de artigos por tecnologia estudada em que observa-se sobreposição de usos de algumas delas



Fonte: elaborada pelos autores

A análise da Figura 9 mostra que existe certa afinidade entre biorremediação e fitorremediação indicando que possivelmente elas têm sido utilizadas simultaneamente para remediação de sítios contaminados com organoclorados. A partir dos artigos publicados que tratam de mais de uma tecnologia, também é possível dizer que a dessorção térmica mostra uma baixa “afinidade” com outras tecnologias. Possivelmente, a interação desta tecnologia com as outras como uma alternativa para a remediação de áreas contaminadas por organoclorados ainda não foi suficientemente estudada. Ou então, como a sua utilização envolve aquecimento do solo contaminado a elevadas temperaturas, a sua utilização pode ser tecnicamente incongruente com algumas outras como, por exemplo, a biorremediação e a fitorremediação.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho analisou a utilização de tecnologias de remediação para áreas contaminadas com organoclorados com base em revisão bibliográfica e discussões com



especialistas. As tecnologias de remediação analisadas foram: biorremediação, fitorremediação, nanoremediação, oxidação química, e dessorção térmica.

Os resultados mostraram limitações na utilização destas tecnologias, pois dizem respeito às escolhas feitas pelos pesquisadores envolvidos. Mesmo o uso da *Web of Science* – uma base de dados de referência para avaliar as instituições acadêmicas, pesquisadores e maturidade de tecnologias - pode resultar em resultados tendenciosos originários da fonte original dos dados.

Como o conjunto de palavras-chave utilizadas nas pesquisas foi composto por termos genéricos para cada tecnologia, isso significa que, se alguns autores têm utilizado termos mais específicos, uma pequena quantidade de trabalhos por eles publicados pode, eventualmente, não ter sido representada no resultado final.

É importante ressaltar que as outras tecnologias que não foram inseridas entre as cinco efetivamente estudadas visando a remediação da Rua Cápua também poderiam ter sido consideradas no presente estudo. Isto pode ser depreendido a partir da comparação entre a quantidade de trabalhos publicados sobre as tecnologias estudadas (1.483) e a quantidade de artigos publicados para as outras não consideradas no estudo (3.043).

Isto indica que uma pesquisa bibliográfica detalhada, considerando todas as tecnologias possíveis utilizáveis na remediação de áreas contaminadas com organoclorados, deveria ter sido realizada após a entrevista com os especialistas, tendo em perspectiva avaliar melhor suas opiniões sobre as tecnologias indicadas preliminarmente como potenciais a serem consideradas na Cápua.

REFERÊNCIAS

Brown, R., C. N. & Leahy M. (1997) Combining oxidation and bioremediation for the treatment of recalcitrant organics - in situ and on site bioremediation. Battelle Press.

Cunha. C. L. L., Ruiz, M. S. & Teixeira, C. E. (2010, October) Environmental assessment of remediation technologies: an analytical framework for a



hexachlorocyclohexane (HCH) contaminated site in Brazil. Proceedings of the International Conference on Hazardous and Industrial Waste Management, Crete, Greece. 8.

Kastanek P., Kastanek F. & Hajek M. (2010). Microwave-enhanced thermal desorption of polyhalogenated biphenyls from contaminated soil. *Journal of Environmental Engineering*, vol. 126, n.3, pp. 295-300, Mar.

Otto, M., Floyd, M. & Bajpai (2008) S. Nanotechnology for site remediation. *Remediation*, pp. 99-108.

Phillips T. M. et al. (2006) Full-scale in situ bioremediation of hexachlorocyclohexane-contaminated soil. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* vol. 81, pp. 289–298.

Rubinos et al. (2007) Using the landfarming technique to remediate soils contaminated with hexachlorocyclohexane isomers. *Water Air Soil Pollut.* vol. 181, pp. 385–399.

Sato T. et al. (2010) Behavior of PCDDs/PCDFs in remediation of PCBs contaminated sediments by thermal desorption. *Chemosphere.* vol. 80, pp. 184-189. Jun.

U.S. Environmental Protection Agency.[U.S EPA], (1998, September) Field applications of in situ remediation technologies: chemical oxidation. Washington, DC: Office of Solid Waste and Emergency Response.

Zodrow, J. J. (1999) Recent applications of phytoremediation technologies. *Remediation*. John Wiley & Sons, Inc.