

FUNDAÇÃO OSWALDO CRUZ
ESCOLA POLITÉCNICA DE SAÚDE JOAQUIM VENÂNCIO
CURSO TÉCNICO EM BIOTECNOLOGIA INTEGRADO AO ENSINO MÉDIO

Cecília Quintão Bibiani

O USO DA NANOTECNOLOGIA NA DESPOLUIÇÃO DO MEIO AMBIENTE

Rio de Janeiro

2022

Cecília Quintão Bibiani

O USO DA NANOTECNOLOGIA NA DESPOLUIÇÃO DO MEIO AMBIENTE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Escola Politécnica de Saúde Joaquim Venâncio
– Fundação Oswaldo Cruz (EPSJV-Fiocruz)
como requisito parcial para aprovação no
Curso Técnico em Biotecnologia.

Orientadora: Profa Dra Virginia de Lourdes
Mendes Finete

Rio de Janeiro

2022

*Dedico esse trabalho a minha irmã Rebeca,
obrigada por me ensinar mais e mais todos os
dias.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a minha família, principalmente meus pais, Erich e Glória, meus maiores incentivadores, por todo o esforço investido na minha educação, e por sempre acreditarem em mim.

Ao meu namorado Lucas, que sempre esteve ao meu lado, agradeço por toda a ajuda, confiança nas minhas escolhas e pelo companheirismo ao longo desse ciclo.

Um agradecimento especial à minha orientadora Virginia de Lourdes Mendes Finete, sou muito grata pela confiança depositada na minha proposta de projeto. Obrigada por me acolher e me manter motivada durante todo o processo.

Por último, gostaria de agradecer também à Escola Politécnica de Saúde Joaquim Venâncio - Fundação Oswaldo Cruz (EPSJV - Fiocruz) e a todo seu corpo docente, por quatro anos de ensino que vão muito além de um ensino acadêmico.

“O essencial é invisível aos olhos.”

*(O Pequeno Príncipe - Antoine de
Saint-Exupéry)*

RESUMO

A nanotecnologia é a junção da ciência e da tecnologia utilizada para o entendimento da matéria em escala atômica e molecular, possibilitando a criação de materiais e estruturas, através de seu controle em escala nanométrica. Os principais campos de atuação e aplicação da nanotecnologia são os da área da medicina, das indústrias (Têxtil, Cosméticos e Alimentícia), da informática e do meio ambiente. Na área ambiental, o uso da nanotecnologia se destaca na prevenção, tratamento e controle de danos à água, ar e solo, nas construções inteligentes e no aproveitamento de resíduos. Esta pesquisa buscou apresentar os tipos de poluição ambiental, as suas consequências e o papel da nanotecnologia na prevenção e no tratamento dessa poluição. A metodologia deste trabalho foi baseada na abordagem qualitativa e utilizou como estratégia de pesquisa a revisão de literatura por meio da busca de artigos científicos, livros e trabalhos em bases de dados como PubMed, LILACS, Google Scholar e SciELO, no período compreendido entre os anos de 1989 e 2022. Como resultados da pesquisa são apresentadas as principais aplicações da nanotecnologia para a preservação dos recursos ambientais, estudando formas de controlar sua degradação, relacionando as vantagens e possíveis desvantagens de seu uso para a despoluição do meio ambiente.

Palavras-chave: Nanotecnologia; Nanopartículas; Nanobiotecnologia; Meio Ambiente; Poluição.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Gráficos representativos da emissão de GEEs no ambiente. Elaborados a partir de Ibrahim et al (2016).	35
Figura 2: Esquema representativo da fitorremediação do solo. Elaborado a partir de Ibrahim et al. (2016) e Bolan et al. (2014).	42
Figura 3: Esquema representativo das principais nanopartículas utilizadas no tratamento da poluição da água, ar e solo.	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tipos de resíduos sólidos de acordo com a sua fonte de geração.....	20
Tabela 2: Principais métodos de tratamento de água com nanotecnologia.	25
Tabela 3: Principais nanomateriais utilizados no tratamento do ar.	34
Tabela 4: Principais nanomateriais utilizados no tratamento do solo.....	44

LISTA DE SIGLAS

Ca - Cálcio
CaO - Óxidos de cálcio
CH₄ - Metano
CMC - Carboximetilcelulose
CNF - Nanofibra de carbono
CNMs - Materiais à base de carbono
CNTs - Nanotubos de carbono
CO - Monóxido de carbono
CO₂ - Dióxido de carbono
COVs - Compostos orgânicos voláteis
CQDs - Pontos quânticos de carbono
CRHA - Ácido cítrico nanométrico de cinzas de casca de arroz
Cs - Césio
DDT - Dicloro-difenil-tricloroetano
Fr - Frâncio
GEEs - Gases do efeito estufa
H₂O - Água
H₂O₂ - Peróxido de hidrogênio
H₂S - Sulfato de hidrogênio
HCHO - Formaldeído
HCO₃ - Bicarbonato
HPAs - Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos
K - Potássio
K-Ti-NT - Titanato de potássio
Li - Lítio
MF - Microfiltração
MnOx - Óxido de manganês
MNPs - Nanopartículas magnéticas
MWCNTs - Nanotubos de carbono de paredes múltiplas
N₂O - Óxido nitroso
Na - Sódio
Na-TiNT - Titanato de sódio
NF - Nanofiltração
nm - Nanômetro
NO - Óxido nítrico
NO₂ - Dióxido de nitrogênio
NO₂ - Dióxido de nitrogênio
NO_x - Óxidos nitrosos
NPA - Nitrato de peroxiacetila
nZVI - Nanopartículas de ferro zerovalente
O₂ - Oxigênio
O₃ - Ozônio
OMS - Organização Mundial da Saúde

PAN - Poliacrilonitrila eletrofiada
Pb - Chumbo
POA - Processos oxidativos avançados
PVP - Polivinilpirrolidona
SO₂ - Dióxido de enxofre
SWCNTs - Nanotubos de carbono de parede simples
TCLP - Toxicidade característica do processo de lixiviação
TiO₂ - Dióxido de titânio
TNTs - Nanotubos de titanato
UF - Ultrafiltração
UR - Umidade relativa
UV - Ultra violeta
ZVI - Ferro zerovalente

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	4
2.1 OBJETIVO GERAL	4
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
3. METODOLOGIA	5
4. POLUIÇÃO AMBIENTAL – CONCEITO, TIPOS E DANOS	6
4.1 POLUIÇÃO DA ÁGUA	6
4.1.1 Tipos de poluição da água	7
4.1.2 Danos causados pela poluição das águas	8
4.2 POLUIÇÃO DO AR	10
4.2.1 Tipos de poluentes do ar	10
4.2.2 Fontes de poluição do ar	14
4.2.3 Danos causados pela poluição do ar	16
4.3. POLUIÇÃO DO SOLO	19
4.3.1 Fontes de poluição do solo	19
4.3.2 Danos causados pela poluição do solo	21
5. O USO DA NANOTECNOLOGIA PARA A PREVENÇÃO DA POLUIÇÃO AMBIENTAL E NO TRATAMENTO DE EFLUENTES	23
5.1 NANOTECNOLOGIA NA PREVENÇÃO DA POLUIÇÃO DA ÁGUA	24
5.1.1 Principais tratamentos existentes para a água utilizando a nanotecnologia	25
5.1.1.1 Adsorção	26
5.1.1.2 Membranas	27
5.1.1.3 Fotocatálise	28
5.1.1.4 Desinfecção	29
5.1.1.5 Monitoramento e sensores	31
5.2 NANOTECNOLOGIA NA PREVENÇÃO DA POLUIÇÃO DO AR	33
5.2.1 Principais tratamentos existentes para o ar utilizando a nanotecnologia	34
5.2.1.1 Tratamentos para a poluição do ar externo	34
5.2.1.2 Tratamentos para a poluição do ar interno	38
5.3 NANOTECNOLOGIA NA PREVENÇÃO DA POLUIÇÃO DO SOLO	40
5.3.1 Principais tratamentos existentes para o solo utilizando a nanotecnologia	43
6. VANTAGENS E DESVANTAGENS DO USO DA NANOTECNOLOGIA PARA A DESPOLUIÇÃO DO MEIO AMBIENTE	46
6.1 PRINCIPAIS VANTAGENS DO USO DA NANOTECNOLOGIA	46
6.2 PRINCIPAIS DESVANTAGENS DO USO DA NANOTECNOLOGIA	48
7. CONCLUSÃO	51
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52

1. INTRODUÇÃO

Pode-se definir nanotecnologia como sendo a junção da ciência e da tecnologia utilizada para o entendimento e controle da matéria em escala atômica e molecular. Outra forma de definição, dessa vez falando de um modo mais prático, é como sendo a criação de materiais, dispositivos e sistemas através do controle da matéria em escala nanométrica, tendo como principal efeito a exploração de novos fenômenos e propriedades, podendo eles ser físicos, químicos, biológicos, mecânicos ou elétricos (LONGO, 2004).

O prefixo "nano" é usado na ciência como sinônimo de bilionésimo. Sendo assim, um nanômetro (abreviação "nm") seria um metro dividido por um bilhão, ou seja, 1 nanômetro é igual a 10^{-9} metros ou 0,000000001 metros. Portanto a escala nanométrica se refere à unidade de medida utilizada quando se mede algo em nanômetros (CHAVES, 2005).

Em síntese, nanopartículas são qualquer material com dimensões entre 1 nm e 100 nm. Podendo ser formadas por diversos materiais como o ouro, a prata, o carbono, o zinco, a argila, etc, têm diversas aplicações em diferentes áreas, como na área industrial com os nanotubos de carbono, que conduzem corrente elétrica, térmica e mecânica de maneira mais eficiente, ou então em nosso organismo, com o consumo de nanopartículas de prata, que podem atuar no combate de fungos e bactérias (DA SILVA; TOMA, 2018).

Um marco histórico importante para o estabelecimento da nanotecnologia como um novo campo de pesquisa (ou, “como uma nova área do conhecimento”) ocorreu em 1959. O físico Richard Feynman foi convidado a dar uma palestra em Pasadena, Califórnia, para a Sociedade Americana de Física, logo após seu famoso jantar anual. Por mais que já fosse um físico renomado na época, o que a Sociedade de Física não esperava era que Feynman surgiria com um conceito totalmente novo na área, uma tecnologia que pudesse manipular coisas em escala atômica. Com essa palestra, Feynman plantou essa semente na cabeça de milhares de pessoas que ao longo de vários anos passaram a pesquisar sobre como essa tecnologia funcionaria e se seria possível atingi-la (SCHULZ, 2018).

Os principais campos de atuação e aplicação da nanotecnologia são os da área da Medicina, Indústrias (Têxtil, Cosméticos e Alimentícia), Informática e Meio Ambiente.

Na área médica, temos o diagnóstico e tratamento de alguns tipos de câncer e o transporte de medicamentos para dentro das células através das nanocápsulas, nanoestruturas poliméricas que possuem diferentes tipos de organização estrutural, sendo uma de suas propriedades

incorporar fármacos em seu interior/núcleo. Essas cápsulas são produzidas usando polímeros biocompatíveis visando transportar o medicamento, para liberá-lo de forma lenta no organismo. Algumas das vantagens dessa nova estratégia em relação ao método tradicional que usamos para tomar medicamentos são o menor número de efeitos colaterais e a maior eficiência no tratamento (DA SILVA; TOMA, 2018).

Nas áreas industriais o uso da nanotecnologia pode se dar para a criação de nanocosméticos, como alguns protetores solares, na produção de embalagens sustentáveis e tecidos inteligentes que são melhores para seu funcionamento e para o meio ambiente, além de seu uso para a continuação da exploração do petróleo e gás (DA SILVA; TOMA, 2018).

No meio ambiental, o uso da nanotecnologia também está presente e será o tema desenvolvido neste trabalho. Tanto o meio ambiente quanto a nanotecnologia são utilizados pelos seres humanos todos os dias de formas às vezes imperceptíveis. O meio ambiente está em nossa água, nossos alimentos e até mesmo o ar que respiramos, enquanto a nanotecnologia pode ser encontrada em roupas, medicamentos, cosméticos, brinquedos, materiais esportivos, em indústrias, no desenvolvimento de alimentos, na produção de vidros e baterias etc. (PARANÁ, 2018).

O meio ambiente está cada vez mais sendo destruído, já que seus recursos em sua maioria não são renováveis e são utilizados de forma desenfreada, degradados principalmente por indústrias, mas também pela irresponsabilidade humana, o reflexo disso seria a degradação total de água, ar e solo, impossibilitando a vida em nosso planeta (PEREIRA; CURI, 2012). Uma das aplicações da nanotecnologia na área ambiental é a de resgatar os recursos limitados que temos, estudando formas de prevenir a degradação de futuros recursos.

Nesse contexto, a nanotecnologia ambiental se destaca no tratamento e purificação da água e na prevenção e controle de danos em desastres ambientais. Temos também seu uso nas construções inteligentes onde ocorre menor desperdício de água, maior área verde, produção de energia solar e o aproveitamento de resíduos (DA SILVA; TOMA, 2018).

Alguns materiais dentro da área da nanotecnologia ambiental dignos de citação são os óxidos de ferro nanoestruturados e as nanocápsulas. Os óxidos de ferro nanoestruturados apresentam diversas vantagens em sua utilização, tais como seu baixo custo, sua facilidade de separação por meio da utilização de campos magnéticos externos (por conta de sua propriedade ferromagnética), alta capacidade de adsorção de poluentes e eficaz ação como fotocatalisadores

nas reações de degradação de poluentes orgânicos e redução de poluentes metálicos, assim como na inativação de vírus em meios aquáticos - tais características se mostram úteis principalmente quando se trata da despoluição de resíduos nas águas (BERGAMASCO; MATEUS; SANTOS; SILVA, 2019).

Neste trabalho, baseado na abordagem qualitativa pela revisão da literatura científica, estudou-se o uso da nanotecnologia no meio ambiente, com ênfase na sua aplicação para a prevenção da poluição ambiental e o tratamento de efluentes, buscando compreender suas aplicações e inúmeros benefícios, mas considerando também os potenciais riscos do uso dessa tecnologia. Foram abordados temas sociais, ambientais e econômicos relacionados.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Apresentar o papel da nanotecnologia na despoluição do meio ambiente.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1- Estudar os tipos de poluição ambiental e suas principais consequências;
- 2- Destacar a aplicação da nanotecnologia para a prevenção da poluição ambiental e no tratamento de efluentes;
- 3- Relacionar as vantagens e desvantagens do uso da nanotecnologia para a despoluição do meio ambiente.

3. METODOLOGIA

Este trabalho foi baseado na abordagem qualitativa e utilizou como estratégias de pesquisa a revisão da literatura científica por meio da busca de artigos científicos, livros e trabalhos em bases de dados como PubMed, Lilacs, Google Scholar e SciELO, no período compreendido entre os anos de 2007 e 2022, tendo como referência os descritores: Nanotecnologia; Nanopartículas; Nanobiotecnologia; Meio Ambiente; Poluição.

O trabalho foi desenvolvido em 3 capítulos:

- Capítulo 1 - Poluição ambiental – conceito, tipos e danos;
- Capítulo 2 - O uso da nanotecnologia para a prevenção da poluição ambiental e no tratamento de efluentes;
- Capítulo 3 - Vantagens e desvantagens do uso da nanotecnologia para a despoluição do meio ambiente.

4. POLUIÇÃO AMBIENTAL – CONCEITO, TIPOS E DANOS

A poluição pode ser definida como uma alteração ecológica que ocorre na relação entre os seres vivos, muitas vezes provocada pelo ser humano, e que prejudica, direta ou indiretamente, a vida e o bem estar de todos. Seus principais danos são aos recursos naturais como água, ar e solo e o impedimento de atividades econômicas que se baseiam nesses recursos, como a pesca e a agricultura (NASS, 2002).

4.1 POLUIÇÃO DA ÁGUA

A água é um dos recursos com maior utilização por todos os seres vivos. Em nossa vida social e industrial, os recursos hídricos são utilizados para múltiplos fins, tais como: abastecimento doméstico, abastecimento industrial, irrigação, preservação da flora e da fauna, recreação e lazer, diluição de despejos, geração de energia elétrica e navegação (DERISIO, 2012).

Por sua vez, esses usos hídricos podem ser subdivididos em dois grupos:

Grupo 1 – Usos consuntivos: abastecimento público, abastecimento industrial, bebida de animais, irrigação. Esse grupo é considerado consuntivo, ou seja, a água é retirada e consumida, podendo ser parcial ou totalmente, no processo a que se destina, não retornando de forma direta ao corpo d'água. Seu consumo pode ocorrer por meio de transpiração, evaporação, incorporação em produtos, consumo por seres vivos, dentre outras formas.

Grupo 2 – Usos não consuntivos: recreação e lazer, preservação da flora e da fauna, geração de energia, transporte, diluição de despejos (BRASIL, 2019).

De uma maneira geral, a poluição do recurso água pode ocorrer por diversos meios, como por exemplo:

- Poluição natural, que é provocada por folhas, cadáveres de animais mortos, chuvas, salinização, erosão, escoamento superficial, etc.;
- Poluição pelo lançamento de despejos industriais provenientes das operações desenvolvidas em diferentes etapas dos processamentos industriais;
- Poluição por conta de despejo indevido de esgotos domésticos, os quais resultam do uso da água para fins higiênicos, lavagem de pisos e utensílios, preparo de alimentos, etc;
- Poluição dos corpos d'água por meio da drenagem de áreas agropastoris, provocada principalmente pelo carreamento de defensivos agrícolas, fertilizantes, fezes de animais, etc.

4.1.1 Tipos de poluição da água

Quando se fala sobre a poluição das águas, temos principalmente três tipos a destacar: a Química, a Física e a Biológica.

- Poluição Química da água - dois tipos de poluentes caracterizam a poluição química:
 - Biodegradáveis: são produtos químicos que, com o passar do tempo, são decompostos pela ação de bactérias. Alguns exemplos de poluentes biodegradáveis são os inseticidas, fertilizantes, detergentes, petróleo, etc.
 - Persistentes: consistem em produtos químicos que se mantêm por um longo período de tempo no ambiente e nos organismos vivos. Estes tipos de poluentes podem acabar causando graves problemas como a contaminação de alimentos, peixes e crustáceos. Alguns exemplos de poluentes persistentes são o Dicloro-difenil-tricloroetano (DDT), o mercúrio, entre outros (PEREIRA, 2004).
- Poluição Física da água - altera as características físicas da água; as principais são:
 - Poluição térmica: decorre do lançamento nos rios da água aquecida usada no processo de refrigeração de refinarias, siderúrgicas e usinas termelétricas.
 - Poluição por resíduos sólidos: este tipo de poluição pode decorrer de sólidos suspensos, dissolvidos e coloidais. Em geral, eles podem ser provenientes de ressuspensão de fundo de fontes pluviais devido à circulação hidrodinâmica intensa, provenientes de esgotos domésticos e industriais, além da erosão de solos carregados pelas chuvas ou erosão das margens de rios (PEREIRA, 2004).
- Poluição Biológica da água - A água pode ser contaminada por organismos patogênicos, que existem nos esgotos. Assim, ela pode conter:
 - Bactérias: provocam infecções intestinais, como febre tifóide, cólera, leptospirose, salmonelose, podendo ser epidêmicas e endêmicas;
 - Vírus: podem provocar diferentes tipos de infecções, dentre elas hepatites, como os vírus das hepatites A e E, e conjuntivites, como adenovírus;
 - Protozoários: responsáveis pelas amebíases e giardíases;
 - Vermes: esquistossomose e outras infestações (PEREIRA, 2004).

4.1.2 Danos causados pela poluição das águas

O problema da poluição das águas deve levar em consideração o uso ao qual foi feito esse recurso. Partindo desse princípio, algumas considerações sobre os prejuízos causados pela poluição das águas em função de seus principais usos deve ser feita (DERISIO, 2012).

- Águas destinadas ao abastecimento público

Os sistemas de abastecimento público de água situados junto ou depois de locais de descarga de resíduos líquidos estará sujeito a causar uma série de danos ambientais, tais como:

- Contaminação ou poluição bacteriana das águas, onde o número de microrganismos do grupo coliforme, ou outros gêneros patogênicos, podem ultrapassar os limites estabelecidos para o tratamento econômico de água por processos convencionais, gerando risco potencial à saúde pública;

- Mudanças rápidas e imprevisíveis na qualidade do corpo d' água receptor, resultando em problemas nas operações de tratamento;

A contaminação química da água, incluindo substâncias que não podem ser removidas pelos processos normais de tratamento, pode ocasionar: dureza excessiva¹, corrosão das canalizações, cor, sabor e odor desagradáveis, condições para o desenvolvimento de algas, formação de espumas e elevação do custo do tratamento, em razão da necessidade de aumento na adição de produtos químicos (DERISIO, 2012).

- Águas para uso industrial

As indústrias que utilizam as águas de locais situados a jusante² de lançamentos estarão sujeitas a causar danos ambientais, como:

- Poluição causada por agentes químicos (formação de poluentes secundários, metais pesados, matéria orgânica incluindo benzeno, fenol, álcool, naftaleno, antraceno, etc.);

- Poluição térmica causada por reações de compostos químicos lançados na água (ISSAKHOV; ALIMBEK; ZHANDAULET, 2021).

- Águas em que ocorrem pesca comercial

As áreas utilizadas para a pesca comercial, quando sob influência de resíduos líquidos não

¹ A água dura é causada pelo excesso de cálcio e magnésio. Muitas vezes outros elementos como ferro, zinco, estrôncio ou alumínio também estão presentes. O processo de reversão da água dura é chamado abrandamento

² Jusante é vazante da maré; baixa-mar ou o sentido da correnteza num curso de água (da nascente para a foz)

tratados, poderão causar danos ao ambiente, por exemplo:

- Destruição dos peixes por asfixia, redução do nível de oxigênio, bloqueio das brânquias e presença de substâncias tóxicas;
- Deterioração e enfraquecimento dos peixes, devido à propagação de doenças e à ação destrutiva de outros animais;
- Obstrução dos locais destinados à deposição de ovos e áreas que servem de alimento, devido ao assoreamento;
- Substituição natural de espécies mais desejáveis por espécies mais resistentes;
- Redução do valor econômico de áreas, por estarem ligadas à indústria da pesca (DERISIO, 2012).

- Águas utilizadas na agricultura e pecuária

A presença de lançamentos de poluentes a montante de áreas agropecuárias envolvem:

- Degradação severa dos habitats aquáticos e ribeirinhos, com ameaças significativas para as espécies aquáticas;
- Pesticidas e outros produtos químicos aplicados em terras de cultivo entram em aquíferos utilizados para água potável, representando riscos para a saúde humana e animal;
- A destruição de campos de plantações, devido à presença de agentes poluentes agressivos (SHORTLE; ABLER, 2001).

- Águas para navegação

Os prejuízos à navegação decorrem principalmente da:

- Formação de bancos de lodo;
- Ação agressiva das águas sobre os cascos das embarcações;
- Necessidade de escavação dos locais navegáveis, conseqüentemente encarecendo a conservação de canais e estruturas (DERISIO, 2012).

- Águas destinadas à recreação e lazer

As águas que são contaminadas por meio de resíduos industriais e/ou domésticos podem promover inconvenientes quando se trata do seu uso para fins de práticas desportivas e recreativas, podendo implicar a:

- Contaminação por vírus e bactérias, além de infecção por parasitas, com o conseqüente aparecimento de disenterias intestinais, febre tifóide, cólera, doenças de pele como dermatites,

etc;

- A ocorrência de incômodos à população gerados pelos maus odores, aspectos estéticos indesejáveis e presença de espuma na água, etc (DERISIO, 2012).

4.2 POLUIÇÃO DO AR

A poluição do ar é definida como sendo um fenômeno nocivo ao sistema ecológico e às condições normais de existência e desenvolvimento humano quando algumas substâncias na atmosfera excedem uma determinada concentração. Diante de problemas de poluição ambiental cada vez mais graves, estudiosos têm realizado uma quantidade significativa de pesquisas relacionadas e, nesses estudos, a previsão da poluição do ar tem sido de suma importância (BAI et al, 2018).

Em geral, o recurso ar é utilizado pelas comunidades de forma descuidada, pois é disponibilizado livremente sem que seu uso implique qualquer ônus ou esforço. As quantidades utilizadas são enormes. Além dos usos metabólicos naturais do ar pelo homem, animais e plantas, e dos benefícios das condições climáticas naturais, outros usos importantes devem ser adicionados: comunicação, transporte, combustão, processos industriais e, sobretudo, o uso do ar como meio receptor e transportador de resíduos de atividades humanas. Em decorrência do uso indiscriminado ou abusivo, principalmente em espaços limitados ou confinados, ocorre a poluição do ar (DERISIO, 2012).

4.2.1 Tipos de poluentes do ar

Os poluentes presentes no ar atmosférico podem ser divididos em três categorias principais: partículas sólidas, gases ou gotículas líquidas. Além disso, podem ser naturais ou artificiais. As fontes de poluição do ar referem-se aos vários locais, atividades ou fatores que são responsáveis pela liberação de poluentes na atmosfera (JUREWICZ et al, 2018).

- **Particulados**

Os poluentes particulados são uma mistura complexa de partículas sólidas e líquidas suspensas no ar (SIERRA-VARGAS; TERAN, 2012), podendo se apresentar em diferentes tamanhos como grosseiro, fino ou ultrafino (LEE et al, 2021).

Esses poluentes particulados são liberados na atmosfera quando temos a queima de alguns materiais, como carvão, gasolina, diesel e madeira. Eles também podem ser produzidos pela decomposição de compostos orgânicos que ocorrem no meio ambiente e por meio de veículos e fábricas nas grandes cidades (SIERRA-VARGAS; TERAN, 2012).

Os principais poluentes que incluem material particulado são: gases como o ozônio (O_3), o dióxido de nitrogênio (NO_2) e o dióxido de enxofre (SO_2); e contaminantes biológicos como vírus, bactérias, pêlos de animais e saliva de alguns animais, ácaros da poeira doméstica e pólen, que podem exacerbar reações alérgicas e doenças das vias aéreas, como asma, rinite alérgica e pneumonite de hipersensibilidade (LEE et al, 2021).

O tamanho dos poluentes particulados pode ser particularmente importante para prever o efeito dos mesmos na inflamação das vias aéreas, já que muitas vezes eles são uma mistura complexa de materiais com um núcleo carbonáceo e outros constituintes, como compostos orgânicos, ácidos e partículas finas de metal. Quando inaladas, partículas maiores que $10\ \mu m$ geralmente ficam presas no nariz ou na garganta e não entram nos pulmões, porém partículas menores que isso tem um grande risco de penetrar nas vias aéreas e respiratórias, causando algumas doenças, como asma e doença pulmonar obstrutiva crônica (LEE et al, 2021).

- Gases

O segundo grupo de poluentes do ar são os gases. Embora apenas uma pequena porcentagem dos gases atmosféricos poluem o ar, eles desempenham um papel importante porque são perigosos e têm efeitos negativos. Os principais poluentes gasosos na atmosfera podem ser categorizados como gases contendo: carbono, enxofre, nitrogênio e ozônio.

a) Os gases contendo carbono são os poluentes do tipo monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos e hidrocarbonetos oxigenados. O monóxido de carbono (CO), um gás altamente tóxico produzido pela combustão incompleta de hidrocarbonetos, é uma causa relativamente comum de lesões humanas. A toxicidade humana é frequentemente negligenciada porque o CO é insípido e inodoro e seus sinais e sintomas clínicos são inespecíficos (PROCKOP; CHICHKOVA, 2007). Os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs) são compostos formados a partir da combustão incompleta de material orgânico, além da evaporação de gasolina, óleo combustível e solvente. Eles compreendem uma importante classe de contaminantes ambientais, muitos deles comprovadamente carcinogênicos (TFOUNI; VITORINO; TOLEDO, 2007) Os hidrocarbonetos oxigenados são compostos que contêm

oxigênio além de carbono e hidrogênio. Alguns deles são formados pela combustão enquanto outros são poluentes secundários, formados como resultado de reações químicas entre hidrocarbonetos e oxigênio na presença da luz solar. Muitos dos hidrocarbonetos e hidrocarbonetos oxigenados são carcinogênicos, sendo o benzeno um exemplo de hidrocarboneto carcinogênico, encontrado em refinarias e petroquímicas (FILHO, 1989).

b) O principal poluente que contém enxofre é o dióxido de enxofre (SO_2). Quando combustíveis contendo enxofre passam por um processo de combustão, o enxofre libera oxigênio do ar e produz dióxido de enxofre que, em altas concentrações, é um gás irritante. Algumas fontes de produção do dióxido de enxofre incluem também refinarias de petróleo, fabricação de cimento, navios e alguns equipamentos não rodoviários de queima de diesel (CHEN et al., 2007). O SO_2 reage com substâncias na atmosfera para formar partículas de ácido sulfúrico e partículas de sal sulfato, gerando um grande perigo, pois o ácido sulfúrico é um poluente altamente corrosivo. Outros poluentes do ar que contêm enxofre são os mercaptanos (compostos de carbono, enxofre e hidrogênio) e o sulfato de hidrogênio (H_2S) que podem ser produzidos pela decomposição da matéria orgânica. Mercaptanos e sulfato de hidrogênio não são poluentes comuns, mas quando presentes podem ser distinguidos pelo cheiro de repolho e ovo podre (FILHO, 1989).

c) Os gases contendo nitrogênio incluem o óxido nítrico (NO) e dióxido de nitrogênio (NO_2). O óxido nítrico é incolor, relativamente inofensivo e um subproduto da queima de combustível em altas temperaturas, porém ele pode reagir com átomos de oxigênio para formar o dióxido de nitrogênio, um poderoso oxidante que produz ácido nítrico, quando interage com água, podendo afetar a saúde humana. Além disso, ele absorve a radiação solar, contribuindo para a baixa visibilidade na atmosfera e tem um papel importante na mudança climática global (BALA et al., 2021). As duas principais fontes de produção de óxido de nitrogênio são a combustão de fontes estacionárias na indústria, geração de energia, aquecimento de ambientes e automóveis. Os óxidos de nitrogênio são os principais componentes requeridos na formação da chuva ácida. Além do óxido nítrico e do dióxido de nitrogênio, existem compostos orgânicos nitrogenados como, por exemplo, o nitrato de peroxiacetila, comumente chamado de NPA, que é fitotóxico, ou seja, causa danos às plantas (FILHO, 1989).

d) O ozônio é um gás composto por três átomos de oxigênio (O_3) enquanto o oxigênio que respiramos contém apenas dois átomos de oxigênio (O_2). O ozônio é um gás incolor, com odor

característico de ar fresco, frequentemente visto durante tempestades e trovoadas. Ele ocorre naturalmente, mas também pode ser formado por reações químicas envolvendo os óxidos de nitrogênio e hidrocarbonetos, na presença de luz solar, próximo da superfície da Terra, essas reações químicas que envolvem a luz solar são chamadas de reações fotoquímicas. Existem três fontes naturais de ozônio, sendo que a principal delas ocorre na estratosfera, onde a produção de ozônio acontece por meio da reação fotoquímica da luz ultravioleta com o oxigênio, a segunda fonte seria pelos relâmpagos, mas em menor quantidade. Existe ainda uma terceira forma de produção de ozônio: por meio de reações fotoquímicas envolvendo óxido de nitrogênio e hidrocarbonetos emitidos naturalmente pela vegetação, que em média representa mais da metade das concentrações de ozônio medidas. Um exemplo de hidrocarbonetos naturais são os terpenos, que são compostos químicos produzidos por árvores coníferas (FILHO, 1989).

- Líquidos

A chuva ácida recebeu durante algumas décadas no final do século passado amplo interesse científico e público, principalmente devido aos seus graves efeitos de larga escala sobre os ecossistemas e a sua natureza transfronteiriça (GRENNFELT et al, 2020).

O dióxido de enxofre (SO_2) e os óxidos de nitrogênio e ozônio, em certa quantidade, são as principais causas da chuva ácida. Estes poluentes têm origem de atividades humanas como a combustão de combustíveis fósseis em centrais termoelétricas e automóveis. Estes constituintes interagem com os reagentes presentes na atmosfera, o que resulta em deposição ácida na água da chuva (SINGH; AGRAWAL, 2008).

A acidez é medida em unidades de pH. O símbolo pH representa o potencial Hidrogeniônico de uma solução, ou seja, a concentração de íons hidrogênio carregados eletricamente em uma solução (íons H^+). A chuva que cai através de uma atmosfera limpa tem pH de 5,6 a 7,0, enquanto a chamada chuva ácida tem um pH abaixo de 5,6 por conta dos poluentes presentes. Em geral, quanto mais baixo o pH, mais poluída e mais corrosiva a chuva será (FILHO, 1989).

4.2.2 Fontes de poluição do ar

O ar que respiramos diariamente pode ser poluído, por exemplo, por partículas³, fumo ou gases que são gerados em sua maioria pelo homem (RIBEIRO, 2019). Dentre esses poluentes, temos os considerados poluentes primários, pois são emitidos diretamente para a atmosfera (exemplos: CO, NO₂, SO₂, metano, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos) ou poluentes secundários que são os que resultam de reações químicas envolvendo substâncias precursoras presentes no ar (exemplo: formação de O₃ troposférico por meio da reação fotoquímica com o NO₂) (WHO, 2013).

Esses poluentes originam-se principalmente da combustão incompleta de combustíveis fósseis, seja para fins de transporte, aquecimento e/ou produção industrial, mas também pode ter origem natural, como por exemplo as partículas provenientes da erosão do solo, a polinização, material sólido resultante da erupção vulcânica e fumaça de queima de florestas e ainda do ar, que é uma fonte de contaminação do solo e da água pela deposição dos poluentes nele presentes (WHO, 2013).

As fontes de poluição podem ser classificadas em específicas e múltiplas:

- As fontes específicas são fixas/estacionárias em determinado território, ou seja, ocupam na comunidade uma área relativamente limitada. Quase todas as fontes específicas são de natureza industrial e permitem uma avaliação na base fonte por fonte.

- As fontes múltiplas podem ser fixas/estacionárias ou móveis, geralmente se encontram dispersas pela comunidade, o que faz a avaliação por meio do esquema fonte por fonte ser inviável. Nesse conjunto, estão incluídas as fontes que queimam combustível (lavanderias, veículos, hospitais etc.), evaporação de produtos de petróleo, queima de resíduos sólidos e atividades que produzem odores, tais como restaurantes, aviários, etc.

As fontes de poluição do ar também podem ser divididas em: fontes naturais, fontes industriais, incineração de resíduos sólidos, combustão, compostos orgânicos voláteis e atividades produtoras de odores (LISBOA, 2014).

- Fontes Naturais

A poluição natural pode ser originada principalmente por fenômenos biológicos e

³ Partículas são poluentes atmosféricos generalizados, constituídos principalmente por uma mistura de partículas sólidas e líquidas suspensas no ar

geoquímicos presentes em nosso planeta. Entre as fontes naturais podem-se apontar:

- As partículas emitidas pelos vulcões, que contêm óxidos de nitrogênio e de enxofre, além de cinzas e partículas sólidas.

- Incêndios acidentais em florestas são comumente classificados como sendo fontes naturais, apesar de muitas vezes terem se iniciado por atividades humanas.

- Tempestades de poeira, que carregam grandes quantidades de material particulado.

- Emissão de compostos orgânicos pela vegetação, dentre eles o pólen, causador de alergias. Além disso, temos a Floresta Amazônica, que é uma grande emissora de metano, um dos principais gases causadores do efeito estufa.

- Os oceanos, que são “armazéns químicos”, são importantes fontes de emissão de componentes atmosféricos. As variações de temperatura na superfície do mar modificam as concentrações de uma grande diversidade de gases dissolvidos: dióxido de carbono, metano, óxido nitroso, dissulfeto de carbono, sulfeto de carbonila, cloreto de metila, etc (BOUBEL et al, 1994).

- Existem também as fontes de radiação, sendo o sol a principal fonte produtora de radiação, mesmo tendo pouco efeito na contagem geral de poluição externa. Os tipos de radiação industrial são restritos às áreas de produção, geralmente em ambientes internos (raios infravermelhos, ultravioletas, etc.). A radiação ionizante é usada em vários campos da indústria e da medicina, principalmente para esterilização de materiais (LISBOA, 2014).

Em um aspecto geral, a contaminação proveniente de fenômenos naturais é assimilada pela natureza, a qual possui mecanismos físicos e químicos suficientes para degradar os contaminantes emitidos (BOUBEL et al, 1994).

- Fontes Industriais

Quanto às fontes industriais, grande parte desse tipo de poluição provém da fabricação de produtos a partir de matérias-primas como o minério de ferro, a madeira proveniente das árvores e a gasolina feita a partir de petróleo bruto. Cada um destes processos de fabricação produz um produto, juntamente com vários produtos residuais, que denominamos poluentes. Ocasionalmente, uma parte ou a totalidade do material poluente pode ser recuperado e convertido num produto utilizável (BOUBEL et al, 1994).

- Incineração de resíduos sólidos

Quanto à queima de resíduos sólidos, encontra-se a incineração ao ar livre, em materiais

de construção e em instalações centrais. A incineração feita ao ar livre provoca, inevitavelmente, poluição do ar, pois há partículas e gases sendo lançados livremente no ambiente. O uso de incineradores em edifícios do ponto de vista da poluição afeta muitas vezes a qualidade do ar, por esta razão foram proibidos no mundo inteiro. Os incineradores usados em grandes centrais, devido ao seu tamanho, tem maiores possibilidades de produzirem uma maior quantidade de poluição (LISBOA, 2014).

- Combustão

Os poluentes do ar se originam principalmente da combustão incompleta de combustíveis fósseis, para fins de aquecimento, transporte e produção industrial. Aproximadamente 80% dos contaminantes gasosos na atmosfera são formados durante a queima de combustíveis fósseis (LISBOA, 2014).

Os problemas com a reação de combustão ocorrem porque o processo também produz muitos outros produtos, a maioria dos quais são denominados poluentes atmosféricos. Estes poluentes podem ser o monóxido de carbono, dióxido de carbono, óxidos de enxofre, óxidos de azoto, fumo, cinzas volantes, metais, óxidos metálicos, sais metálicos, aldeídos, cetonas, ácidos, hidrocarbonetos polinucleares, e muitos outros (BOUBEL et al, 1994).

- Compostos orgânicos voláteis

Outra fonte de poluição do ar vem da evaporação de compostos orgânicos, como o petróleo. Isso ocorre porque durante o manuseio e extração do petróleo e seus derivados há emissões por evaporação (LISBOA, 2014).

Os produtos petrolíferos são obtidos a partir de petróleo bruto. No processo de obtenção do petróleo bruto do solo para a refinaria, ocorrem muitas possibilidades de emissão de hidrocarbonetos e redução das emissões gasosas de enxofre (BOUBEL et al, 1994).

- Odores

As atividades produtoras de odores causam uma poluição desagradável do ar. Temos, como exemplo, as fábricas que liberam gás sulfídrico, oficinas de pintura, odores de esgoto e da decomposição de resíduos, matadouros, granjas, etc. (LISBOA, 2014).

4.2.3 Danos causados pela poluição do ar

Os danos ou efeitos da poluição do ar podem ser considerados levando-se em conta alguns aspectos principais, como: saúde, materiais, propriedades da atmosfera e vegetação

(DERISIO, 2012).

- Danos à saúde

Em comparação com outras necessidades da vida, o ar tem um consumo contínuo obrigatório, sendo essencial para todos os sentidos. Os efeitos da poluição do ar sobre a saúde podem provocar:

- doenças agudas ou morte;
- doenças crônicas, causando encurtamento da vida ou dano ao crescimento;
- alteração de algumas funções fisiológicas importantes, tais como transporte de oxigênio pela hemoglobina, ventilação do pulmão, adaptação ao escuro ou outras funções do sistema nervoso;
- sintomas adversos, como, por exemplo, a irritação sensorial;
- desconforto, prejuízo da visibilidade, odor ou outros efeitos da poluição do ar suficientes para levar indivíduos a trocar de residência ou local de emprego (DERISIO, 2012).

- Danos aos materiais

Alguns fenômenos podem ser identificados quando falamos sobre o dano causado aos materiais pela poluição do ar. Entre eles destacam-se a abrasão, a deposição, os ataques químicos diretos e indiretos, além da corrosão eletroquímica (DERISIO, 2012).

Como exemplo disso, temos os principais efeitos dos poluentes atmosféricos sobre os metais, que são a corrosão da superfície, com eventual perda de material e a alteração das propriedades elétricas dos metais. Já a principal preocupação em relação à deterioração das pedras pela poluição atmosférica é a sujidade e deterioração do calcário, que é amplamente utilizado como material de construção e em estátuas de mármore. Além disso, o dióxido de enxofre afeta a composição do couro e do papel, causando uma deterioração significativa. Isso causa preocupação em relação a destruição de livros encadernados em couro nas bibliotecas do mundo (VALLERO, 2008).

Além dos fenômenos mencionados, destacam-se alguns fatores que influenciam os danos causados a materiais pelos poluentes atmosféricos, como: umidade relativa, temperatura, luz solar, velocidade do vento, posição dos objetos na atmosfera. Como exemplo, pode-se dizer que, na ausência de umidade, não haverá corrosão eletroquímica, mesmo em um ambiente altamente poluído. Na maioria dos metais, há uma umidade atmosférica significativa, que, se excedida, produz um aumento súbito na taxa de corrosão (DERISIO, 2012).

- Danos às propriedades da atmosfera

Para um cidadão comum, a deterioração da visibilidade é o primeiro indício da presença de poluição do ar. A visibilidade é definida como a maior distância, em uma determinada área, onde é possível ver e identificar "a olho nu". A redução da visibilidade ocorre devido à presença de partículas sólidas e líquidas suspensas na atmosfera, que absorvem e dispersam a luz. Essa redução na visibilidade está relacionada ao tamanho, concentração e propriedades físicas das partículas poluentes presentes (DERISIO, 2012).

Considerando a influência dos gases e partículas sobre as propriedades ópticas da atmosfera, a redução da visibilidade em ambientes urbanos pode ser causada principalmente pelas seguintes interações na atmosfera: dispersão e absorção de luz por moléculas gasosas e partículas provenientes de poluição atmosférica (VALLERO, 2008).

- Danos à vegetação

A vegetação de maneira geral pode ser afetada pelos poluentes atmosféricos por meio dos seguintes mecanismos:

- redução da penetração da luz (o que gera a redução da capacidade de fotossíntese) por sedimentação de partículas nas folhas ou por interferência de partículas em suspensão na atmosfera;

- deposição de poluentes no solo, seja por meio de sedimentação ou por carreamento pelas chuvas, permitindo assim a penetração dos poluentes pelas raízes e alterando as condições do solo;

- penetração dos poluentes pelos estômatos das plantas. Os estômatos são pequenos poros na superfície das plantas, geralmente localizados nas folhas (sobretudo em sua face inferior). A troca de gases (O_2 - CO_2) promovida pelas plantas se dá, quase totalmente, através dos estômatos, que podem ter sua abertura e fechamento determinado para cada planta em função da umidade relativa do ar, das condições de iluminação e da temperatura. Poluentes gasosos podem penetrar por esses estômatos, juntamente com o ar, e assim serem absorvidos pela planta. Certas partículas podem depositar-se nas superfícies das plantas e, se forem solúveis em água, penetrar pelos estômatos com a chuva do orvalho, por exemplo (DERISIO, 2012).

4.3. POLUIÇÃO DO SOLO

O solo, além de ser um recurso ambiental renovável, também contribui fundamentalmente para a humanidade, através de atividades como a agricultura e a pecuária. Embora o solo tenha muita importância em nossas vidas, nem sempre é visada sua preservação, o que leva ao fenômeno da erosão e voçorocas⁴ que consomem e destroem o solo, impossibilitando diversas atividades e manutenção humana. Devido às suas propriedades químicas, vários resíduos podem contaminar o solo e os lençóis freáticos, dispersando a poluição a longas distâncias (VIANNA, 2015).

Por ser um recurso amplamente utilizado, o solo tem diversos usos, sendo os principais:

- como um elemento de fixação e nutrição da vida vegetal;
- como fundação para edificações, estradas, aterros, sistemas de disposição de resíduos etc.;
- como elemento a ser extraído e utilizado na área da construção de maneira geral e na manufatura de diversos objetos;
- como elemento de armazenamento dos combustíveis fósseis;
- como elemento de armazenamento de água para fins diversos, destacando o uso da água como manancial de abastecimento público (DERISIO, 2012).

4.3.1 Fontes de poluição do solo

Dentre as diversas fontes de poluição do solo, destacam-se aquelas de origem natural, associadas a catástrofes, tais como terremotos, vendavais e inundações, além daquelas derivadas da atividade humana, como a poluição decorre: da disposição de resíduos sólidos industriais, domésticos e hospitalares; de resíduos líquidos sanitários e industriais; da urbanização e ocupação do solo; de atividades agropastoris; de atividades extrativas; e de acidentes no transporte de cargas (DERISIO, 2012).

Os resíduos gerados pelas atividades humanas são, na maioria das vezes, colocados diretamente sobre o solo, como é o caso de aterros clandestinos que geram problemas para o meio ambiente, principalmente quando se trata do solo em decorrência da produção de chorume, sendo

⁴ A voçoroca ou boçoroca é um fenômeno geológico que consiste na formação de grandes buracos de erosão, causados pela chuva e intempéries, em solos onde a vegetação é escassa e não mais protege o solo, que fica cascalhento e suscetível de carregamento por enxurradas.

definido como um resíduo líquido com alta carga orgânica e coloração distinta, produzido pela decomposição química e microbiológica de resíduos sólidos depositados no aterro. A atividade contaminante da infiltração pode atingir e contaminar os aquíferos (VIANNA, 2015).

Além da contaminação por meio do chorume, ainda existem várias formas de contaminação do solo, como por meio do uso de agrotóxicos. A contaminação direta ocorre quando há um vazamento, derramamento ou lançamento direto no solo. A contaminação indireta pode ocorrer através do vento, lavagem de plantas por irrigação, água da chuva ou pela incorporação dos resíduos de biomassa dessas plantas no solo, bem como sua transferência para o solo, absorvendo e transferindo essas substâncias (BARREIRA; PHILIPPI JUNIOR, 2002).

Levando em consideração sua origem, os resíduos sólidos podem ser agrupados de acordo com a tabela 1:

Tabela 1: Tipos de resíduos sólidos de acordo com a sua fonte de geração.

Origem	Tipos de resíduos
Lixo Domiciliar	Resíduos sólidos de atividades residenciais.
Lixo Comercial	Resíduos sólidos das áreas comerciais.
Lixo Público	Resíduos sólidos de produto de limpeza pública.
Lixo de Serviços de Saúde	Resíduos hospitalares, ambulatoriais e farmácias.
Lixo Industrial	Resíduos produzidos pela indústria.
Lixo Agrícola	Resíduos das atividades agrícolas e da pecuária.
Lixo Entulho	Resíduos da construção civil.

Adaptado de Bitencourt, Pedrotti e Santos (2013), baseado em Consoni et al. (2002).

Os resíduos sólidos de atividades residenciais, de áreas comerciais e de produtos de limpeza pública são aqueles gerados pelas residências, empresas, atividades de comércio e qualquer outra atividade pública. Sua composição pode variar de acordo com o nível socioeconômico da comunidade onde se apresenta (BITENCOURT; PEDROTTI; SANTOS, 2013).

Os resíduos de serviços de saúde são aqueles de origem hospitalar ou ambulatorial – incluindo-se nessa classificação os resíduos de farmácias e laboratórios de análises. Eles são classificados como perigosos (classe I) e não perigosos (classe II), e podem apresentar materiais contaminados com microrganismos patogênicos (BITENCOURT; PEDROTTI; SANTOS, 2013).

Os resíduos industriais, agrícolas e de entulho são aqueles produzidos pelas indústrias, atividades agrícolas e de pecuária e da construção civil (BITENCOURT; PEDROTTI; SANTOS, 2013).

Os resíduos sólidos são classificados de acordo com sua periculosidade e suas características. Segundo ABNT (2004), os resíduos sólidos podem ser classificados, basicamente em perigosos (classe I) e não perigosos (classe II):

Classe I – Perigosos: são resíduos ou mistura de resíduos que, por sua natureza (inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade) e por suas propriedades físicas, químicas ou infectocontagiosas, podem apresentar:

- Risco à saúde pública, provocando ou acentuando um aumento de mortalidade por incidência de doenças.
- Riscos ao meio ambiente, quando o resíduo for gerenciado de forma inadequada.

Classe II A – Não inerte: todo resíduo sólido ou mistura de resíduos sólidos que não se enquadra na classe I ou na classe II B. Nesta classificação incluem-se os resíduos sólidos domiciliares.

Classe II B – Inerte: todo resíduo sólido ou mistura de resíduos sólidos que, submetido ao teste de solubilidade (Solubilização de Resíduos Sólidos - Método de Ensaio - NBR 10.006), não teve nenhum de seus constituintes solubilizados em concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.

4.3.2 Danos causados pela poluição do solo

Cada um dos usos desse recurso resulta em mudanças no meio ambiente. A construção civil tem como fim a urbanização e ocupação do solo; a exploração extrativa do solo resulta na remoção de grandes quantidades de materiais e na alteração da topografia. Além disso, a atividade agrícola tem como consequência a aplicação de nutrientes e defensivos agrícolas no solo e a remoção sazonal da cobertura vegetal (DERISIO, 2012).

A erosão do solo é geralmente caracterizada por três ações, que envolvem o afrouxamento do solo, seu transporte e sua deposição. Estes processos resultam geralmente na remoção da camada superior do solo que é rica em matéria orgânica, nutrientes e vida (SHI et al, 2012). Essa remoção, além de causar alterações de relevo, riscos às obras civis e a retirada da camada

superficial e fértil do solo, provoca o assoreamento dos rios, e como consequência indireta, ocorrem inundações e alterações dos cursos d'água (DERISIO, 2012).

As principais práticas que são recomendadas para evitar a erosão do solo estão ligadas à manutenção da cobertura vegetal, utilização de árvores como quebra-ventos, cobertura do solo com serragem e técnicas mecânicas, como aração e plantio, além da execução de canaletas para desvio das águas pluviais e a execução de muros de arrimo⁵ (DERISIO, 2012).

Outras práticas para controle da erosão também envolvem o cultivo continuado de plantas; cultivo em curvas de nível; e o terraceamento (LIMA; LIMA; MELO, 2007).

Além da erosão há uma crescente preocupação pública, pois uma grande variedade de produtos químicos orgânicos tóxicos estão sendo introduzidos inadvertida ou deliberadamente no meio ambiente. Isso gera preocupação, pois com o passar do tempo os líquidos da decomposição dos resíduos podem se infiltrar no solo, o que se soma as águas pluviais que o penetram, neste caso à medida que passam, extraindo esses resíduos, levando o material para camadas mais profundas e aquíferos subterrâneos, contaminando essas nascentes vitais (BALBA; AL-AWADHI; AL-DAHER, 1998).

Os impactos desses sistemas de disposição de resíduos no solo é muitas vezes localizado. Nos locais de disposição de resíduos orgânicos, também são produzidos gases, compostos principalmente por metano e dióxido de carbono, que limitam o fornecimento de oxigênio à superfície do aterro, causando a morte da vegetação (DERISIO, 2012).

A presença de metais em resíduos aplicados ao solo na forma de despejos líquidos industriais ou lodos também pode inibir a renovação da vegetação. Esta situação é agravada em áreas agrícolas, já que alguns metais são fitotóxicos e, dependendo da taxa de aplicação e do teor de metais no solo, pode ocorrer a redução da produtividade. Certos metais podem se acumular nas partes comestíveis das plantas, o que pode causar problemas e tornar esses alimentos impróprios para o consumo (DERISIO, 2012).

⁵ Muros de arrimo ou muros de contenção são um tipo específico de muro que serve para suportar a terra além de isolar o terreno.

5. O USO DA NANOTECNOLOGIA PARA A PREVENÇÃO DA POLUIÇÃO AMBIENTAL E NO TRATAMENTO DE EFLUENTES

Quando falamos sobre nanotecnologia, podemos esperar diversos benefícios para o meio ambiente, principalmente se tratando de três áreas: prevenção da poluição ou dos danos indiretos ao meio ambiente; tratamento ou remediação da poluição; e detecção e monitoramento da poluição.

O uso de nanomateriais catalíticos que aumentam a eficiência e a seletividade de diversos processos industriais resultaria num aproveitamento mais eficiente de matérias primas, com um menor consumo de energia e uma produção de quantidades menores de resíduos indesejáveis, muitas vezes jogados na natureza. A nanotecnologia vem contribuindo para o desenvolvimento de alguns sistemas de iluminação de baixo consumo energético. No campo da informática, o uso de nanoestruturas de origem biológica pode oferecer uma estratégia alternativa para a produção de dispositivos microeletrônicos. A nanotecnologia também vem aprimorando o desenvolvimento de telas como, por exemplo, monitores de computador ou telas dobráveis de plástico que podem ser lidos como uma folha de papel que, além de serem mais leves e terem uma melhor resolução, têm as vantagens da ausência de metais tóxicos na sua fabricação e de terem um menor consumo de energia (QUIM, 2004).

A grande área superficial das nanopartículas lhes permite, em muitos casos, excelentes propriedades de adsorção de metais e de substâncias orgânicas. A etapa subsequente de coleta de partículas e remoção de poluentes pode ser facilitada, por exemplo, usando nanopartículas magnéticas. As propriedades redox e/ou semicondutoras de nanopartículas podem ser aproveitadas nos processos de tratamento dos efluentes industriais e de águas e solos contaminados com base na degradação química ou fotoquímica de poluentes orgânicos (QUIM, 2004).

A nanotecnologia vem possibilitando a fabricação de sensores de tamanho cada vez menores, mais seletivos e mais sensíveis para uma melhor detecção e monitoramento de poluentes orgânicos e inorgânicos no meio ambiente. Os avanços nos sensores que detectam os poluentes implicam diretamente num melhor controle dos processos industriais; na detecção mais precoce e precisa de contaminação; monitoramento em tempo real do tratamento de poluentes e progresso de remediação; monitoramento mais eficaz dos níveis de poluentes em alimentos e

outros produtos para consumo humano; na capacidade técnica para a introdução de normas ambientais mais rigorosas, etc (QUIM, 2004).

5.1 NANOTECNOLOGIA NA PREVENÇÃO DA POLUIÇÃO DA ÁGUA

Atualmente, uma das maiores questões de risco social no mundo é a possibilidade da falta de água potável para a população. Mesmo em países como o Brasil, que possui grandes reservas de água potável, essa água não é distribuída uniformemente em grandes áreas geográficas e em todos os setores sociais. Na região Nordeste, principalmente nas áreas de clima semiárido, há um alto *déficit* hídrico, o que causa a falta de água potável para consumo e produção de alimentos, e que afeta mais significativamente os moradores mais pobres das áreas rurais. O acesso à água é um problema socioeconômico pois mesmo em áreas onde os recursos não são escassos, os segmentos mais pobres da população não têm acesso ou têm seu acesso limitado (FOLADORI; SILVEIRA, 2016).

Além disso, em muitos casos, a escassez de água está relacionada ao seu uso excessivo e controle privado do abastecimento pelo setor agrícola ou industrial, podendo ser considerado um problema político-administrativo devido ao desperdício e vazamento nas instalações de distribuição e abastecimento e também um problema técnico, pois os sistemas de armazenamento, tratamento e distribuição dependem de procedimentos técnicos que podem ser cada vez mais aprimorados. Dessa forma, a nanotecnologia tem um grande potencial, a partir de pesquisas que estão sendo desenvolvidas para limpar, dessalinizar e/ou despoluir os cursos d'água, e assim permitir um maior acesso a parte da população que não o tem (FOLADORI; SILVEIRA, 2016).

Existe uma variedade de técnicas dentro da nanotecnologia que permitem trabalhar a matéria em nível atômico e molecular. Os materiais que são manufaturados menores que 100 nanômetros são conhecidos como nanomateriais. Estes desenvolvem propriedades físico-químicas diferentes daquelas que exibem a mesma matéria em tamanho maior. O ouro, por exemplo, é considerado um material inerte, mas quando seu tamanho é reduzido ao nível nanométrico, pode-se ter mais de 70% de seus átomos na superfície externa, tornando-se reativo e útil como sensor em líquidos (ZHANG; SAEBFAR, 2010).

Vários desses materiais são utilizados em processos de remediação, tratamento e purificação da água. Sua pequena escala e grande superfície externa em relação à sua massa favorecem a diluição, reatividade e adsorção, sugerindo que a vantagem do tamanho nano também pode estar no super magnetismo, ressonância de plasma ou em efeitos quânticos (QU; ALVAREZ; LI, 2013).

5.1.1 Principais tratamentos existentes para a água utilizando a nanotecnologia

Existem vários métodos diferentes de tratamento da água a partir da utilização de nanomateriais (Tabela 2). Os principais deles são por meio da adsorção, membranas de filtração, fotocatalise e desinfecção (OECD, 2011; PENDERGAST, HOEK, 2011; QU et al., 2013).

Tabela 2: Principais métodos de tratamento de água com nanotecnologia.

Aplicações	Principais nanomateriais utilizados
Adsorção	Nanotubos de carbono Metais em nanoescala Nanofibras
Membranas	Nano-zeólitas Nano-Ag (nano-prata) Nanotubos de carbono Nanobiorreatores Osmoses
Fotocatalise	Nano-TiO ₂ (dióxido de titânio)
Desinfecção	Nano-Ag (nano-prata) Nano-TiO ₂ (dióxido de titânio) Nano-ZnO (óxido de zinco) Nanotubos de carbono
Monitoramento e sensores	Nanotubos de carbono Quantum dots Nanopartículas magnéticas Enzimas

Elaborado a partir de Pendergast e Hoek (2011), Qu et al. (2013) e OECD (2011).

Alguns desses procedimentos permitem a destoxificação *in situ*⁶, o que implica em enormes benefícios técnicos e econômicos em corpos e cursos de água (KARN; KUIKEN; OTTO, 2009). Entretanto, existem diversos riscos associados potencialmente com os poucos estudos desses métodos de tratamento, portanto esse desenvolvimento tecnológico insuficiente da área ainda requer melhorias (QU; ALVAREZ; LI, 2013).

5.1.1.1 Adsorção

A adsorção consiste em degradar e/ou atrair os contaminantes até materiais orgânicos, metálicos e/ou polímeros, utilizando agentes químicos e processos magnéticos para, depois, separá-los ou removê-los (COLMENARES et al., 2009).

Comparados com a limitada área de superfície de sítio ativo e a baixa eficiência dos adsorventes convencionais, os nano-adsorventes oferecem um avanço considerável devido a sua alta cinética de adsorção, demonstrado por sua grande área de superfície específica e locais de adsorção associados, curta distância de difusão intrapartícula, tamanho de poro ajustável e química de superfície que fornecem recursos úteis para uma adsorção eficaz (QU et al., 2013).

Sua alta capacidade de adsorção se dá, principalmente, por causa de sua grande área específica e dos sítios de adsorção altamente ativos que são criados por uma alta energia de superfície e estrutura de superfície dependente de tamanho em nanoescala. Os nano-adsorventes são efetivamente utilizados na remoção de compostos orgânicos, além disso, íons metálicos podem ser utilizados por sua seletividade em relação a determinados poluentes, o que pode permitir ser aumentado pela funcionalização (AUFFAN et al., 2008).

Óxidos metálicos em nanoescala, como dióxidos de titânio, óxidos de ferro, óxidos de zinco, alumina, entre outros, têm sido explorados como adsorventes efetivos e de baixo custo para tratamento de água, oferecendo um maior custo benefício para a tecnologia de remediação devido a seu tamanho e efeito de adsorção (ENGATES; SHIPLEY, 2011; ZHANG, 2003).

A adsorção é controlada principalmente pela formação de um complexo com a superfície de óxidos metálicos em nanoescala, que sofre uma reação de oxidação de um elétron sob irradiação visível (PENG et al., 2012). Entre os óxidos metálicos em nanoescala, as

⁶ *In Situ* é uma expressão do latim que significa “no lugar” ou “no local”, na tradução literal.

nanopartículas magnéticas têm atraído uma atenção considerável devido ao seu potencial de aplicação (XIN et al., 2012) e sua exibição de propriedades magnéticas como, por exemplo, superparamagnetismo, por forte resposta magnética sob campos magnéticos baixos aplicados (KILIANOVÁ et al., 2013).

5.1.1.2 Membranas

As membranas são barreiras físicas que removem contaminantes e dissolvem sais na água, tornando ela mais branda, ou seja, reduzindo a sua dureza, ocasionada pela elevada concentração de determinados íons minerais como cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}). Vários materiais nanoporosos são usados com esta finalidade (COLMENARES et al., 2009).

O processo que utiliza membranas provou ser uma maneira eficaz de remediação da água devido à sua alta eficiência de separação, fácil operação onde não é necessária adição química ou entrada térmica, de modo que não leva à poluição secundária assim como nenhuma regeneração de mídia gasta é necessária (BALAMURUGAN et al., 2011; PENDERGAST; HOEK, 2011; BUONOMENNA, 2013).

O desempenho dos sistemas de membranas é diretamente influenciado pelo material da membrana, que proporciona uma compensação inerente entre a seletividade da membrana e a permeabilidade. Os materiais mais comuns utilizados nesse processo para aplicação no tratamento de água são polímeros, por exemplo, acetato de celulose, poliácridonitrila e poliamida (YANG et al., 2009).

Com base no tamanho dos poros e aplicação de filtração, o processo de membrana pode ser classificado como microfiltração (MF) para remoção de sólidos em suspensão, protozoários e bactérias; ultrafiltração (UF) para remoção de vírus e colóides; nanofiltração (NF) para metais pesados, remoção de matéria orgânica dissolvida, dessalinização, reutilização de água e produção de água ultrapura (osmose reversa e osmose direta) (ULBRICHT, 2006; BERNARDO et al., 2009; BALAMURUGAN et al., 2011).

Ao longo da última década, a nanotecnologia levou a criação de novas membranas de tratamento de água, por incorporação de nanomateriais a membranas já existentes, por meio de mistura ou enxerto de superfície para a produção de membranas com estrutura desejável e novas funcionalidades, como alta permeabilidade, reatividade catalítica, degradação de contaminantes e autolimpeza, (PENDERGAST; HOEK, 2011) além disso, controlar a incrustação da membrana

devido a grupos de nanopartículas funcionais e suas propriedades hidrofílicas (VATANPOUR et al., 2012).

5.1.1.3 Fotocatálise

Os principais problemas que afetam a competência do tratamento de água são a remoção dos poluentes orgânicos não biodegradáveis que são resistentes aos métodos convencionais de tratamento, bem como a eliminação de patógenos veiculados pela água sem a formação de subprodutos de desinfecção tóxica. Enfrentar esses problemas exige uma necessidade de desenvolver uma tecnologia inovadora, de baixo custo e ecologicamente correta que possa destruir esses poluentes com menor consumo de energia e menor utilização de produtos químicos. Portanto, as atividades de pesquisa têm se concentrado em processos oxidativos avançados (POAs) como métodos alternativos que são capazes de oxidar e mineralizar uma ampla gama de produtos químicos orgânicos (COMNINELLIS et al., 2008) devido aos seus radicais altamente potentes e fortemente oxidantes (GAYA; ABDULLAH, 2008).

A fotocatalise, um conhecido POA, foi estabelecido como um método eficiente para aumentar a biodegradabilidade de contaminantes orgânicos persistentes e remover os patógenos microbianos atuais e emergentes. A fotocatalise também é utilizada para produzir energia através da degradação de biomassa e produção de hidrogênio (COLMENARES et al., 2009).

A oxidação fotocatalítica compreende uma classe de reações que usam um catalisador ativado por energia solar, química ou outras formas de energia (KUDO et al., 2003; BAHNEMANN, 2004; AUGUGLIARO et al., 2006) e depende da geração de espécies radicais reativas fortes, como H_2O_2 , O_2 , O_3 (PERA-TITUS et al., 2004), e principalmente radical hidroxila ($\text{OH}\cdot$) (HUANG et al., 2000), um forte agente oxidante que destrói não seletivamente todas as moléculas orgânicas na água (WANG; XU, 2012).

A principal fonte para a geração de ($\text{OH}\cdot$) são os oxidantes convencionais H_2O_2 e O_3 (KARCI, 2014). Diferentes métodos têm sido relatados para fotolisar esses oxidantes, facilitando o cumprimento dos requisitos específicos de tratamento e melhorando a versatilidade dos POA (MALATO et al., 2009). Os métodos são baseados em UV (GOI; TRAPIDO, 2002) e na combinação de luz UV e oxidantes (H_2O_2 , O_2 , O_3 , etc.) (MALATO et al., 2009; KARCI, 2014).

Além dos métodos que envolvem catalisadores, o método de fotocatalise homogênea, que se baseia na adição de peróxido de hidrogênio (H_2O_2) a sais de ferro dissolvidos pode ser

classificado em dois tipos de reação: (1) reação de Fenton que não envolve qualquer irradiação de luz e (2) reação de foto-Fenton que reage a um comprimento de onda de luz de 600 nm (CHONG et al., 2010).

Os métodos de fotocatalise heterogêneos usam semicondutores de banda larga em contato com a água como, por exemplo, TiO_2 (FUJISHIMA et al, 2008; GAYA; ABDULLAH, 2008; WANG; JING, 2014), trióxido de tungstênio (LIU et al., 2013; ZHAO et al., 2012), ZnO (KAUR; SINGHAL, 2014; YASSYTEPE et al., 2008), dióxido de estanho (AL-HAMDI; SILLANPÄÄ; DUTTA, 2015; JANA et al., 2014), sulfeto de cádmio (CHRONOPOULOS et al., 2014; UPADHYAY et al., 2012), etc.), os quais são fotoexcitados pela luz na presença de oxigênio (MALATO et al, 2009).

5.1.1.4 Desinfecção

O processo de desinfecção é aplicado para inativar vários tipos de patógenos microbianos, incluindo vírus, bactérias, protozoários e outros microrganismos que frequentemente são encontrados na água de descargas de esgoto ou escoamento de confinamentos de animais para os corpos d'água.

Embora os atuais desinfetantes convencionais como cloro, cloraminas, ozônio, dióxido de cloro e cloro gasoso (SAVAGE; DIALLO, 2005) possam controlar efetivamente o crescimento microbiano, eles têm reatividade de curta duração e podem ser problemáticos devido à formação de subprodutos tóxicos de desinfecção (LI et al., 2008). Esses subprodutos são formados pela reação entre os referidos desinfetantes oxidantes convencionais com vários constituintes em água (HOSSAIN et al, 2014).

Mais de 600 subprodutos tóxicos de desinfecção foram reconhecidos em todo o mundo (RICHARDSON et al., 2007) e a maioria é considerada cancerígena. Esse dilema é agravado quando altas dosagens do desinfetante oxidante são necessárias para matar patógenos altamente resistentes, como *Cryptosporidium* e *Giardia* (LI et al., 2008). Essas limitações provocam uma necessidade urgente de equilibrar os riscos de patógenos microbianos e formação de subprodutos tóxicos.

Portanto, é importante fornecer uma técnica alternativa inovadora que possa efetivamente prevenir sua formação e melhorar a confiabilidade da desinfecção usando desinfetantes inofensivos, não corrosivos e solúveis em água (RUTALA et al., 2008).

Embora as práticas tradicionais de desinfecção, como a cloração e a ozonização, tenham melhorado significativamente a saúde pública, o desafio de fornecer uma desinfecção eficaz sem formar subprodutos de desinfecção nocivos (DBPs) exige inovação tecnológica. Vários nanomateriais têm fortes propriedades antimicrobianas, incluindo nano-Ag, nano-ZnO, nano-TiO₂, CNTs. (LEAD et al., 2018) Estes nanomateriais inativam microorganismos liberando íons metálicos tóxicos (por exemplo Ag⁺ e Zn²⁺), comprometendo a integridade da membrana celular por meio do contato direto ou gerando espécies reativas de oxigênio com menos tendências a formar DBPs. (LI et al., 2008)

O nano-Ag, por exemplo, é uma escolha comum para dispositivos de tratamento de água no ponto de uso (POU)⁷, devido a sua forte atividade antimicrobiana de amplo espectro e baixa toxicidade para os seres humanos. A atividade antimicrobiana do nano-Ag é largamente atribuída à liberação do Ag⁺, que ataca grupos funcionais com alta afinidade para Ag⁺, por exemplo, tiol em proteínas e fosfatos no DNA. Portanto, a química da solução, como a presença de ligandos Ag⁺ (por exemplo, sulfetos, cloretos, fosfatos), desempenha um papel importante na biodisponibilidade e toxicidade do nano-Ag. (XIU; MA; ALVAREZ, 2011) Como a dissolução do nano-Ag leva ao seu eventual esgotamento, o controle de liberação e as estratégias de reabastecimento são cruciais para sua eficácia a longo prazo. Polímeros reativos que mudam o estado de hidratação e inchaço ou se degradam ao mudanças na química local (por exemplo, concentração de protease) induzidas pelo aumento das concentrações microbianas podem ser potencialmente usadas para conseguir a liberação de biocidas sob demanda. (WEST; HUBBELL, 1999)

A estrutura fibrosa, a atividade antibacteriana e a condutividade dos CNTs permitem seu uso em filtros antimicrobianos. O mecanismo antibacteriano dos CNTs e alguns outros nanomateriais à base de carbono (por exemplo, grafite, óxido de grafite, óxido de grafeno) foi proposto para envolver perturbação da membrana e tensão de oxidação dependente da estrutura eletrônica. (LIU et al., 2011) CNTs curtos, dispersos e metálicos com pequenos diâmetros são mais tóxicos. (VECITIS et al., 2010; KANG; MAUTER; ELIMELECH, 2008) Os filtros CNTs também podem ser usados em processos eletroquímicos, nos quais uma pequena tensão intermitente inativa os microorganismos fisicamente presos por oxidação. (VECITIS et al., 2011)

⁷ Os dispositivos de tratamento de água no ponto de uso (POU) são projetados para tratar pequenas quantidades de água potável para uso em casa.

O potencial elétrico resulta em eletroforese de vírus em CNTs, aliviando o impacto negativo da matéria orgânica natural na retenção de vírus pelo filtro CNT. (RAHAMAN; VECITIS; ELIMELECH, 2012)

5.1.1.5 Monitoramento e sensores

Um grande desafio para o gerenciamento de remediação ambiental é monitorar a emissão de substâncias tóxicas, ou seja, poluentes orgânicos e inorgânicos, patógenos e poluentes atmosféricos perigosos, juntamente com a avaliação precisa da extensão e composição desses contaminantes (SHANKARAN; GOBI; MIURA, 2007).

Devido à maior reatividade relativa das nanopartículas, a eficiência dos sensores nanométricos aumenta milhares de vezes em relação à capacidade sensível dos materiais. Diversos materiais reativos são utilizados em escala nano como, por exemplo, enzimas e nanotubos de carbono (QU; ALVAREZ; LI, 2013). Portanto, várias técnicas analíticas têm sido empregadas na detecção e monitoramento de poluição ambiental, por exemplo, a ressonância plasmônica de superfície (HOMOLA; PILIARIK, 2006; SHANKARAN; GOBI; MIURA, 2007), cromatografia líquida de alta eficiência (SHINTANI, 2014), cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (TRANCHIDA et al., 2015), cromatografia de fluido supercrítico (ISHIBASHI et al., 2015), eletroforese capilar (SÁNCHEZ-HERNÁNDEZ et al., 2014), análise de injeção de fluxo (GEREZ; RONDANO; PASQUALI, 2014), entre outras. No entanto, essas técnicas são inadequadas para detecção ambiental de rotina devido ao seu alto custo e consumo de tempo, além de seus requisitos complexos (SU et al., 2012).

Os crescentes avanços nas áreas de nanociência e nanotecnologia estão tendo uma influência notável no campo de monitoramento e sensoriamento ambiental, onde um grande número de nanopartículas foi introduzido para detecção e remediação de uma ampla gama de contaminantes em meios gasosos e aquosos (ANDREESCU et al., 2009; THERON; WALKER; CLOETE, 2008).

Muitas investigações foram realizadas para desenvolver nanosensores de alta seletividade e sensibilidade para monitorar diferentes tipos de gases no ar ambiente (ZHOU et al., 2015) a fim de evitar uma potencial explosão ou envenenamento, particularmente por gases perigosos inodoros, incolores e insípidos, como hidrogênio (BAIK et al., 2009; LUPAN et al., 2008) e para

gases venenosos e irritantes como o dióxido de nitrogênio (NO_2) (BEHESHTIAN et al., 2012; YOUNG et al., 2005). Da mesma forma, a aplicação de sensores baseados em nanomateriais é amplamente estudada para monitoramento da qualidade da água pela detecção de poluição fecal de organismos (SAVICHTCHEVA; OKABE, 2006), como coliformes fecais, coliformes totais, vírus e parasitas causadores de doenças, (THERON et al, 2010) além da detecção de diferentes tipos de contaminantes vestigiais (como pesticidas, compostos fenólicos, ânions inorgânicos, metais pesados) (GOVINDHAN; ADHIKARI; CHEN, 2014). Desse modo, temos uma aplicação interessante dos pontos quânticos de carbono (CQDs) no campo do monitoramento por meio da detecção química. A detecção de metais pesados como o Hg^{2+} é de extrema importância por conta de seus efeitos nocivos ao meio ambiente e à saúde humana. Os CQDs são muitas vezes usados para detecção química devido à sua baixa toxicidade, solubilidade em água, alta fotoestabilidade e estabilidade química superior. (LIM; SHEN; GAO, 2015)

A principal preocupação é o potencial risco à saúde e ao meio ambiente que as nanopartículas podem causar como efeito colateral. Isso pode ocorrer quando as nanopartículas são usadas livremente no ambiente (temos como exemplo a remediação *in situ*) (BARDOS et al., 2015; KARN; KUIKEN; OTTO, 2009), mas também em diferentes fases do ciclo de vida dos nanomateriais. Os nanomateriais que absorvem contaminantes podem transportá-los a outros lugares; sendo que os próprios nanomateriais podem ser prejudiciais e ter efeitos tóxicos. Além disso, devido à sua maior reatividade química, os nanomateriais se comportam como novos elementos químicos e suas propriedades tóxicas não são suficientemente estudadas (COLVIN, 2003; MAYNARD, 2007; OBERDÖRSTER, OBERDÖRSTER, OBERDÖRSTER, 2005).

Os poucos estudos sobre o impacto das nanopartículas no meio ambiente são realizados em laboratório, seguindo protocolos utilizados para produtos químicos em tamanhos maiores, o que não equivale precisamente ao comportamento das nanopartículas, além de que os ecossistemas são muito mais complexos que as reduzidas variáveis de laboratório. Os principais estudos dos efeitos toxicológicos das nanopartículas na água têm sido realizados com nanotubos de carbono, dióxido de titânio e nano-prata. Porém, nenhum desses estudos é conclusivo; no caso dos nanotubos de carbono os resultados têm sido variados e contraditórios, o dióxido de titânio parece danificar as membranas celulares dos micro-organismos, enquanto a nano-prata pode ser altamente tóxica para micro-organismos como bactérias, fungos e algas (GREBLER; NENTWICH, 2012).

5.2 NANOTECNOLOGIA NA PREVENÇÃO DA POLUIÇÃO DO AR

A poluição do ar é um dos problemas mais significativos do mundo, e pode ser definida como a alteração na composição natural da atmosfera causada pela introdução de substâncias químicas, físicas ou biológicas que estão sendo emitidas por organismos antropogênicos, geogênicos e, ou biogênicos (DALY, 2007). A má qualidade do ar tem um impacto adverso no ecossistema (por exemplo, vegetação e organismos vivos) e na saúde humana, possivelmente causando vários tipos de doenças que podem ser fatais, como câncer, doenças respiratórias e cardiovasculares. A Organização Mundial da Saúde (OMS) em 2014 informou que cerca de sete milhões de pessoas morreram em 2012 devido à exposição à poluição do ar. A poluição do ar pode ser dividida em dois grupos principais, externo e interno.

- Poluição do ar externo

O problema mais importante da poluição do ar externo é o aquecimento global, que gera muitas mudanças na atmosfera, na terra e nas fontes de água em todo o mundo. Os gases do efeito estufa (GEEs) são considerados contribuintes diretos para o aquecimento global, sendo os principais gases o dióxido de carbono, metano, óxido nitroso e gases fluorados. O problema da emissão de GEE é agravado pelas crescentes atividades humanas. A maioria dos gases do efeito estufa tem efeitos persistentes de longo prazo no clima devido à sua tendência de permanecer na atmosfera por centenas de anos (METZ et al., 2007).

Muitas tecnologias de controle e tratamento foram desenvolvidas para eliminar e monitorar a emissão desses gases e assim, extinguir seus riscos ao homem e ao meio ambiente. A nanotecnologia é uma tecnologia de tratamento bem habilitada para controlar e remediar a poluição do ar de várias maneiras, aproveitando as propriedades dos nanomateriais e aplicando-os como adsorventes, catalisadores, membranas e sensores (ZHAO, 2009).

- Poluição do ar interno

A poluição do ar interior tornou-se recentemente uma grande preocupação devido aos seus efeitos diretos na saúde humana (ASHMORE;DIMITROULOPOULOU, 2009; SOLOMON et al., 2008). Entre os poluentes do ar interno estão os compostos orgânicos voláteis (COVs), que se acredita serem a principal causa do aumento da asma infantil, hipersensibilidade atópica, além de outras séries de sintomas, como dores de cabeça, náusea, coriza, faringite, enfisema e câncer de pulmão (LEE et al, 2010). Portanto, se faz necessário um avanço nos métodos eficazes para controlar e erradicar a emissão desses COVs (HAUPTMANN et al., 2004).

5.2.1 Principais tratamentos existentes para o ar utilizando a nanotecnologia

Existem várias nanopartículas que podem ser utilizadas no tratamento do ar. A Tabela 3 mostra exemplos desses nanomateriais utilizados para tratar diferentes tipos de poluentes atmosféricos.

Tabela 3: Principais nanomateriais utilizados no tratamento do ar.

Nanopartículas	Poluentes alvo
Nanopartícula de sílica	Chumbo atmosférico
Nanotubo de carbono alinhado	Aerossóis
Nanopartículas de óxido de zinco e hidróxido de zircônio	Óxido de nitrogênio e óxido de enxofre
Nanotubos de carbono em forma de chifre	Dióxido de carbono, metano, monóxido de carbono, nitrogênio
Nanopartículas de dióxido de titânio	Dióxido de enxofre
Catalisadores de nanopartículas de rutênio	Óxido de nitrogênio

Elaborado a partir de Ibrahim et al. (2016).

5.2.1.1 Tratamentos para a poluição do ar externo

Os gráficos da Figura 1 representam as principais fontes de emissão dos gases do efeito estufa e quais são os principais gases que causam esse efeito, respectivamente.

O dióxido de carbono representa 75% dos Gases de Efeito Estufa (GEEs) no ambiente (Figura 1); assim, várias técnicas têm sido propostas para controlar sua emissão, seja por separação ou captura, como filtração, absorção em líquidos, adsorção em sólidos ou uma combinação desses processos (CHEUNG et al., 2013).

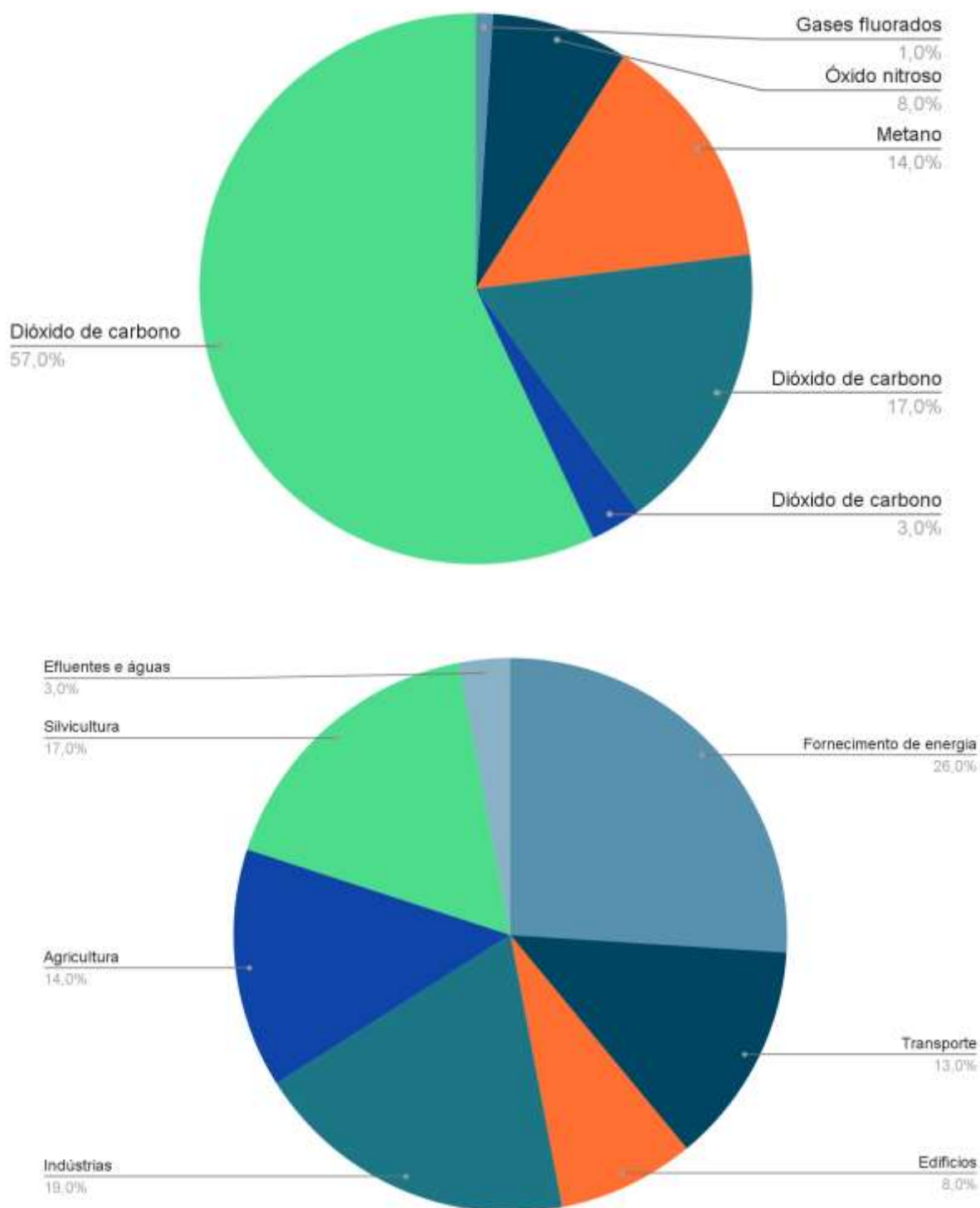


Figura 1: Gráficos representativos da emissão de GEEs no ambiente. Elaborados a partir de Ibrahim et al (2016).

A adsorção em nanomateriais provou ser um processo mais eficiente e econômico devido à alta área superficial dos nanomateriais que pode aumentar significativamente a capacidade de adsorção, bem como a disponibilidade de nanomateriais e sua capacidade de serem regenerados. Os adsorventes sólidos para a captura de dióxido de carbono podem ser divididos em três classes: (1) os adsorventes de alta temperatura ($>400\text{ }^{\circ}\text{C}$), (2) os adsorventes de temperatura intermediária ($200 - 400\text{ }^{\circ}\text{C}$) e (3) os adsorventes de baixa temperatura ($<200\text{ }^{\circ}\text{C}$) (UPENDAR et al, 2012).

Nano-adsorventes à base de cálcio (Ca) são usados para capturar dióxido de carbono em alta temperatura com base na reação de carbonatação reversível de óxidos de cálcio (CaO). A séria desvantagem do uso de adsorventes de alta temperatura reside na sua capacidade de agregar facilmente, levando a um problema de sinterização⁸ durante os ciclos de carbonatação/calцинаção. (ABANADES; ALVAREZ, 2003).

Como resultado, o revestimento superficial dos nano-adsorventes à base de cálcio é usado para evitar sua agregação e, conseqüentemente, evitar o problema de sinterização. Há relatos de que o nanocarbonato de cálcio revestido com dióxido de titânio (TiO₂) pode impedir a sinterização do nanocarbonato de cálcio e capturar efetivamente o dióxido de carbono usando a técnica de fase de adsorção (WANG et al, 2013).

Ademais, as nanopartículas tratadas com metais alcalinos (Li, Na, K, Cs, Fr) mostraram capacidade de capturar dióxido de carbono em alta temperatura, por exemplo, pré-tratamento com ácido cítrico nanométrico de cinzas de casca de arroz (CRHA) à base de orto-silicato de lítio (Os adsorventes CRHA-Li₄SiO₄) exibiram um caráter resistente à sinterização e capturaram dióxido de carbono (CO₂) a 700°C (WANG et al, 2014).

Além disso, os nanotubos alcalinos, por exemplo, titanato de potássio (K-Ti-NT) e titanato de sódio (Na-TiNT), têm sido usados para capturar dióxido de carbono em baixa temperatura (abaixo de 200°C). Outro exemplo de adsorventes de baixa temperatura de CO₂ são os materiais à base de carbono (CNMs). Estes são amplamente utilizados devido à sua alta superfície e alta capacidade de modificação da estrutura dos poros e funcionalização da superfície (UPENDAR et al., 2012).

Os nanotubos de carbono funcionalizados (CNTs) têm sido usados com sucesso para capturar CO₂ e melhorar o desempenho de adsorção na presença de umidade, o que diminui a

⁸ Sinterização pode ser definida como um processo físico, termicamente ativado, que faz com que um conjunto de partículas de determinado material, inicialmente em contato mútuo, adquira resistência mecânica

capacidade de adsorção devido às moléculas de água competindo com o CO_2 pelos sítios de adsorção ativos (JANCHEN et al., 2007).

Existem estudos que apontam que a funcionalização de nanotubos de carbono por 3-aminopropil trietoxissilano (CNTs-APTS) enxertam a superfície dos CNTs com grupos amina abundantes que fornecem numerosos sítios químicos para adsorção de CO_2 , o que faz com que os CNTs absorvam mais gases CO_2 em baixa faixa de temperatura (20 - 100°C). Sendo assim, foi sugerido que existem duas razões possíveis para o aumento da capacidade de adsorção (CNTs - APTS) na presença de umidade, elas são: (1) o gás CO_2 pode se dissolver na água adsorvida na superfície de (CNTs - APTS) e (2) a reação entre o CO_2 e os grupos amino da superfície forma íons carbonato que podem sofrer reação adicional com CO_2 e água para formar bicarbonato (HCO_3^-) (ou os próprios grupos amino também podem reagir diretamente com CO_2 e H_2O para formar HCO_3^-) (SU et al, 2009).

Como outra ilustração do papel da nanotecnologia no tratamento de GEE, muitos processos catalíticos têm sido dedicados à conversão ou decomposição de metano (CH_4) e óxidos nitrosos (NO_x). Por exemplo, nanopartículas de níquel metálico foram empregadas como catalisadores na decomposição térmica de metano para produzir hidrogênio (WANG; LUA, 2012), e TiO_2 revestido com rede de aço inoxidável foi eficientemente usado para degradação fotocatalítica de (CH_4) (MERAJIN et al., 2013).

Por outro lado, nanotubos de titanato (TNTs) e seus derivados têm sido amplamente utilizados para a oxidação fotocatalítica de NO_x . Muitos estudos tentaram obter os parâmetros que afetam a taxa de decaimento e a eficiência de remoção de NO_x . Por exemplo, um estudo recente provou que a área de superfície, a quantidade de cristalino e o teor de sódio remanescente dos TNTs aumentaram com a lavagem em pH 3-5 e, conseqüentemente, aumentaram a eficiência de remoção de NO e NO_2 (NGUYEN; BAI, 2015).

Além disso, TiO_2 modificado com diferentes cargas de prata foi usado para a decomposição fotocatalítica de (N_2O) em nitrogênio e oxigênio (OBALOVÁ et al., 2013). A prata depositada na superfície do TiO_2 provoca uma diminuição na taxa de recombinação de elétrons (KOCÍ et al., 2012).

Além dos GEEs, o dióxido de enxofre é uma das emissões industriais que mais está ligada a diversos problemas ambientais, podendo trazer sérios riscos à saúde humana. Os nanomateriais têm sido usados para eliminar a liberação de SO_2 para o meio ambiente, seja pela dessulfuração

do combustível fóssil (SALEH et al., 2015) ou pela sua remoção diretamente da fonte de emissão por várias tecnologias, como processos de adsorção (WU et al, 2011) e oxidações catalíticas (KOUTSOPOULOS et al., 2006; RODRIGUEZ et al., 2010).

A remoção de SO_2 ocasionalmente leva a algumas mudanças na morfologia ou características dos materiais utilizados. Por exemplo, durante a aplicação de carvão ativado com nanopartículas de ferro depositadas como adsorvente, a formação de grupos fracamente ácidos na superfície adsorvente foi envolvida com o processo de adsorção de SO_2 que aumenta a acidez da superfície (ARCIBAR-OROZCO et al., 2013). Além disso, foi comprovado que o processo de adsorção de SO_2 pode levar a mudanças claras no magnetismo ao usar nanopartículas magnéticas (MNPs). Por exemplo, a adsorção de SO_2 na superfície de MNPs CoFe_2O_4 leva a uma diminuição em sua saturação e magnetização remanescente em aproximadamente 20% e uma diminuição em sua coercividade em aproximadamente 9% (GLOVER et al., 2012).

5.2.1.2 Tratamentos para a poluição do ar interno

O produto químico carbonílico mais abundante no ar é o formaldeído (HCHO), que é um precursor bem conhecido na fabricação de materiais mais complexos, como fenol formaldeído e resinas de uréia-formaldeído, que são amplamente utilizados como produtos de ligação de madeira e espuma isolante. Vários métodos são utilizados para a remoção do formaldeído, incluindo sua decomposição pela qual são utilizados fotocatalisadores e adsorção física por materiais porosos, bem como a adsorção química que é considerada um dos métodos mais eficazes onde a reemissão é excluída devido à forte ligação química (NUASAEN et al, 2014).

No entanto, o HCHO impõe grandes desafios para sua remoção. Por exemplo, os métodos fotoquímicos convencionais usando fotocatalisadores não são apropriados para a remoção interna de HCHO devido à necessidade de irradiação de luz UV e ao risco de formação de ozônio prejudicial. Além disso, os compostos de hidrocarbonetos podem gerar subprodutos cancerígenos através de cadeias de reações fotoquímicas secundárias (MIYAWAKI et al., 2012).

Como resultado, muitas tentativas foram realizadas para melhorar a remoção do formaldeído, por exemplo, a produção de uma membrana de nanofibra de carbono (CNF) à base de poliácridonitrila eletrofiada (PAN) com microporosidade adaptada e grupos funcionais contendo nitrogênio como locais de adsorção (LEE et al., 2010).

Uma quantidade notável de formaldeído foi adsorvida na superfície do poro da nanofibra

de carbono ativada por PAN (ACNF), mesmo em baixa concentração. No entanto, a umidade do ar reduziu o tempo de vida da membrana de nanofibra para metade. Como resultado, catalisadores de óxido de manganês (MnOx) foram depositados nos PAN-ACNFs. A combinação de MnOx com PAN-ACNF proporcionou um desempenho superior de remoção de formaldeído em condições secas e extremamente úmidas através da aplicação de um processo de remoção em duas etapas, composto pela adsorção de formaldeído nos microporos do PAN-ACNFs seguida da decomposição oxidativa por nanopartículas de MnOx sem qualquer irradiação de luz UV (MIYAWAKI et al., 2012).

Um exemplo adicional de poluentes do ar interno que recebeu atenção social e científica são os bioaerossóis (aerossóis de origem biológica, como vírus, bactérias e fungos) que podem se espalhar rapidamente com o fluxo de ar e causar inúmeras doenças, incluindo infecções e alergias (STARK et al, 2003).

A tecnologia de filtragem de ar utilizando materiais antimicrobianos como nanopartículas de prata, nanopartículas de cobre, CNTs e produtos naturais é considerada a técnica mais aplicada e eficaz para remover bioaerossóis por meio de processos de ventilação. Vários estudos expuseram que as nanopartículas de prata podem remover com sucesso bioaerossóis bacterianos durante o processo de filtração do ar. Vários fatores afetam a atividade antimicrobiana de nanopartículas de prata, como espécies bacterianas, concentração, umidade relativa (UR), distribuição de tamanho e tempo de exposição (LEE; YUN; BAE, 2008; LEE et al., 2010).

Da mesma forma, a eficiência de inativação dos CNTs depende da concentração de carga e do tamanho dos poros da membrana, e é baixa para nanotubos de carbono de parede simples (SWCNTs) em comparação com nanotubos de carbono de paredes múltiplas (MWCNTs) (JUNG et al., 2011).

Apesar dos esforços para melhorar a qualidade do ar interno, a exposição humana a filtros baseados em nanomateriais em ambientes internos pode levar a uma variedade de efeitos adversos à saúde, incluindo inflamação e necrose peribrônquica, irritação da pele e inflamação da mucosa (LAM et al., 2004; WARHEIT et al., 2007).

Em comparação com alguns materiais antimicrobianos, como nanopartículas de prata, nanotubos de carbono e óxidos metálicos, os produtos naturais antimicrobianos são tipicamente considerados menos tóxicos ao homem e recentemente têm sido usados para melhorar a qualidade

do ar interno. Por exemplo, óleos essenciais extraídos de produtos naturais apresentam taxas de redução aceitáveis na inativação bacteriana; portanto, eles foram aplicados em sistemas de ventilação de ambientes internos contaminados (a título de exemplo, um filtro antimicrobiano revestido com óleo de melaleuca inativa 99% do aerossol bacteriano de sua superfície em 2 a 8 minutos) (PIBIRI et al., 2006; PYANKOV et al., 2008).

Algumas das nanopartículas naturais (como a *Sophora flavescens*) foram depositadas na superfície do meio filtrante usando um processo de aerossol, mas perderam sua forma esférica e coalesceram em filtros de fibra sob condições úmidas (HWANG et al., 2012). Como consequência, o método de eletropulverização, acionado por campos elétricos de alta intensidade, é usado para gerar as nanopartículas do produto natural a fim de aumentar sua estabilidade morfológica e eventualmente aumentar a eficiência do filtro produzido para remoção de bioaerossóis (JUNG et al., 2013).

Assim, a implementação de filtros gerados a partir da eletropulverização de produtos naturais pode ser uma nova tecnologia promissora para o controle da qualidade do ar.

5.3 NANOTECNOLOGIA NA PREVENÇÃO DA POLUIÇÃO DO SOLO

Atualmente, a poluição do solo por metais pesados representa uma das principais questões ambientais. De acordo com diversos estudos científicos sobre o meio ambiente, os metais pesados são considerados substâncias potencialmente nocivas liberadas principalmente pela atividade humana, apresentando risco tanto ao meio ambiente quanto à saúde humana (WEISSMANNOVÁ; PAVLOVSKÝ, 2017).

A crescente contaminação por metais pesados em componentes ambientais leva ao aumento do risco global à saúde humana e ecológica; a contaminação do solo por compostos tóxicos resulta na degradação ou perda de algumas funções do solo globalmente. A mobilização e dispersão generalizada de poluentes para a atmosfera, solo e água é um dos impactos negativos mais significativos das atividades humanas no ecossistema (DRISCOLL et al., 2013; HOU et al., 2017).

Os metais pesados são acumulados no solo principalmente devido à deposição atmosférica seca e úmida de várias fontes. A principal e mais importante origem dos metais pesados está relacionada às emissões industriais (química, mineração, siderurgia, metalurgia, construção e

indústria eletrônica, etc.), a queima de combustíveis, gestão e transporte de resíduos (tráfego de automóveis e queima de combustível). A crescente produção de resíduos de vários materiais potencialmente perigosos, como resíduos domésticos, industriais, resíduos de incineração, uso de fertilizantes e agroquímicos, etc. contribui para a poluição de solos urbanos e causa um crescimento na quantidade de metais pesados no solo (GUILLÉN et al., 2011; PASTOR; HERNÁNDEZ, 2012; WANG et al., 2012; HU et al., 2013; GONÇALVES et al., 2014; LI et al., 2015; WU et al., 2015).

Devido ao fato de que as atividades de metais pesados no solo são comandadas por reações de sorção-dessorção com outros constituintes do solo (SINGH; MA; HARRIS, 2001), uma ampla gama de agentes de correção tem sido utilizada para manipular a biodisponibilidade de metais pesados e impedir sua difusão no solo, através da indução de vários processos de sorção, como: adsorção para superfícies minerais, formação de complexos estáveis com ligantes orgânicos, precipitação superficial e troca iônica (KUMPIENE et al., 2008).

Existem dois tipos de agentes de correção: (1) agentes mobilizadores, que aumentam a biodisponibilidade e mobilidade de metais pesados, assim aumentando sua remoção através da ingestão de plantas e lavagem do solo (ou seja, processo de fitoextração), e (2) agentes de correção imobilizantes que diminuem a biodisponibilidade e mobilidade de metais pesados e reduzem sua transferência para a cadeia alimentar, impedindo sua lixiviação para as águas subterrâneas (fitoestabilização) (ROBINSON et al., 2009).

Ambos os processos de fitoextração e fitoestabilização fazem parte da técnica de fitorremediação (Figura 2) que é empregada para tratar solos contaminados (BOLAN et al., 2014).

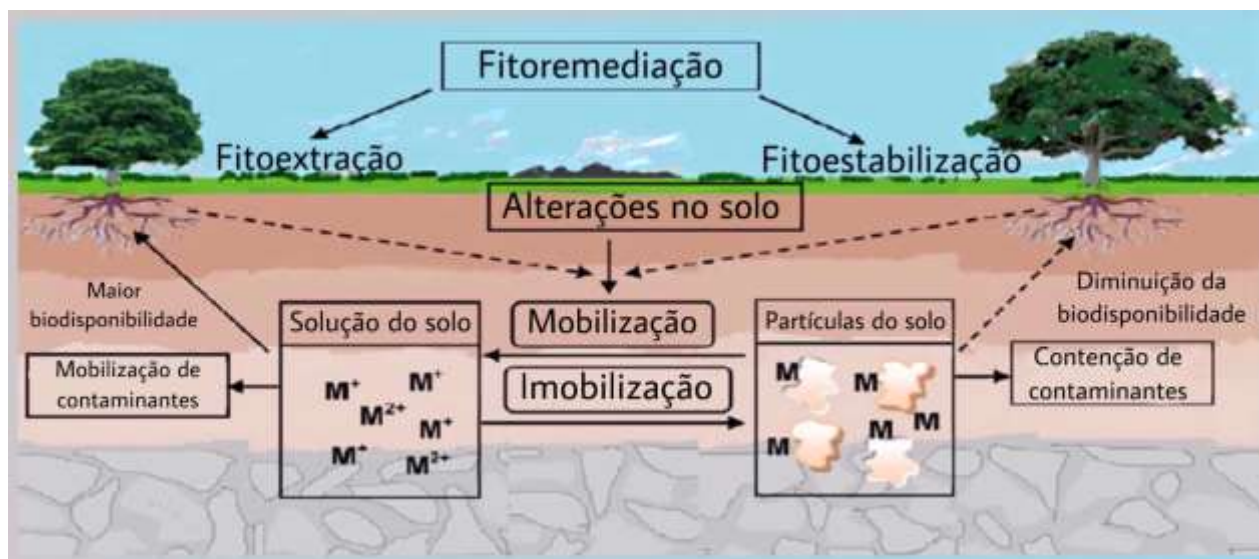


Figura 2: Esquema representativo da fitorremediação do solo. Elaborado a partir de Ibrahim et al. (2016) e Bolan et al. (2014).

Nos últimos anos, partículas em nanoescala ganharam um grande interesse para imobilização de metais pesados no solo e águas subterrâneas. Dois requisitos essenciais devem ser atendidos ao usar nanopartículas como agentes de correção, incluindo: (1) eles devem ser entregues às zonas contaminadas e, (2) ao remover a pressão de injeção externa, as nanopartículas entregues devem permanecer dentro do domínio confinado (ou seja, sob condições naturais de águas subterrâneas), onde as nanopartículas entregues funcionarão como um sumidouro imóvel para capturar metais solúveis (AN; ZHAO, 2012).

No entanto, a rápida tendência das nanopartículas de se juntarem em agregados de escala micro a milimétrica resulta na perda de suas características distintas, como alta área de superfície específica e capacidade de entrega do solo. Com o objetivo de superar esses problemas, polímeros orgânicos como amido (HE; ZHAO, 2005) e carboximetilcelulose (CMC) (HE; ZHAO, 2007) são frequentemente fixados nas nanopartículas como estabilizadores para evitar sua aglomeração através de mecanismos de estabilização eletrostática e para melhorar a estabilidade física, mobilidade no solo e maior superfície específica.

Existe ainda uma investigação sobre a eficácia de nanopartículas de magnetita estabilizadas com amido para sorção e imobilização aprimoradas in situ de arsenato, As (V); os

resultados indicaram que o As (V) lixiviável em água foi bastante reduzido, assim como a toxicidade característica do processo de lixiviação (TCLP) a lixiviabilidade de As (V) diminuiu. (LIANG; ZHAO, 2014).

5.3.1 Principais tratamentos existentes para o solo utilizando a nanotecnologia

Nos tratamentos existentes para a remediação do solo, os compostos fosfatados podem ser usados como agentes eficazes para a imobilização *in situ* de metais pesados em solos contaminados, como demonstrado pela imobilização de chumbo (Pb) onde o fosfato era comumente aplicado ao solo tanto em suas formas solúveis como ácido fosfórico ou formas sólidas como fosfato de cálcio e rochas fosfáticas naturais (YANG et al., 2001).

Portanto, um novo tipo de nanopartículas de fosfato foi sintetizado usando CMC como estabilizador para aumentar a taxa de dispersão do fosfato e imobilizar o chumbo no solo. Foi sugerido que os grupos carboxila e hidroxila nas moléculas de celulose desempenhavam um papel importante na inibição da aglomeração de nanopartículas e também na produção de um composto de fosfato de chumbo estável, que é amplamente reconhecido como piromorfito (LIU; ZHAO, 2013).

As nanopartículas de ferro zerovalente (nZVI) também são amplamente utilizadas para imobilização redutiva *in situ* de metais pesados no solo. A principal desvantagem das nanopartículas de ZVI preparadas usando métodos tradicionais é sua capacidade de aglomerar-se ou reagir rapidamente com o meio a sua volta, resultando na perda de sua reatividade e mobilidade no solo. As partículas aglomeradas de ZVI estão frequentemente na escala de microns; portanto, não são transportáveis ou entregues em solos, sendo assim não são aplicáveis para tratamentos *in situ*. Consequentemente, várias estratégias de estabilização de partículas de ZVI foram relatadas, incluindo modificação de nZVI com vários tipos de revestimentos orgânicos, como amido (REYHANITABAR et al., 2012), polivinilpirrolidona (PVP), (FANG et al., 2011) e CMC de sódio (HE; ZHAO, 2007). O cloreto de cetilpiridínio também tem sido usado para controlar a aglomeração de nanopartículas de ZVI (CHEN; HSU; LI, 2004).

Outro problema que está limitando as aplicações da engenharia de materiais à base de ferro é o fator custo, devido à grande quantidade de reagentes químicos como sulfato ferroso e cloreto ferroso que são consumidos durante as tecnologias convencionais de preparação de materiais (FANG et al., 2011).

Com a intenção de reduzir o custo, pesquisadores prepararam com sucesso ferro zerovalente em nanoescala estabilizado por CMC a partir de licor residual de decapagem de aço para remover cromo hexavalente, Cr(VI), de solo contaminado, e os resultados revelaram que a lixiviação de Cr (VI), por TCLP foi reduzida em 100%. (WANG et al., 2014). Além disso, a Tabela 4 mostra alguns nanomateriais utilizados para remover diferentes tipos de contaminantes do solo.

Tabela 4: Principais nanomateriais utilizados no tratamento do solo.

Nanopartículas	Poluentes alvo
Sulfeto de ferro	Mercurio
Nano-ferro emulsificado	Tricloroetileno
Ferro zerovalente em nanoescala	Cromo hexavalente
Fosfato de ferro (vivianita)	Cobre e Chumbo
Hidroxiapatita nanocristalina	Cádmio e Chumbo

Elaborado a partir de Ibrahim et al. (2016).

No entanto, a técnica de imobilização para remediar o solo contaminado impõe muitos problemas. Em primeiro lugar, apesar dos fosfatos solúveis e sólidos serem relatados como altamente eficazes para a estabilização *in situ* de metais pesados em escala laboratorial, adicionar grandes quantidades de ácido fosfórico muito solúvel ou sais de fosfato na subsuperfície tem uma limitação, não apenas pelo custo dos materiais, mas também pelos problemas de contaminação secundária que surgem devido à alta solubilidade do fosfato que pode levar à contaminação das águas subterrâneas e superficiais na área afetada pela entrada excessiva de nutrientes (eutrofização) (PARK et al., 2011).

Em segundo lugar, estudos afirmaram que o estabilizador CMC é vulnerável à hidrólise e, uma vez decomposto, sua capacidade estabilizadora de partículas cessa e os precipitados

residuais acabam no solo (XU; ZHAO, 2007).

Por fim, alguns pesquisadores investigaram a ecotoxicidade do cromo imobilizado por nanopartículas de ZVI estabilizadas por CMC preparadas a partir de resíduos de decapagem de aço. Os resultados sugeriram que tal remediação exerceu um efeito inibitório sobre o crescimento das plantas, o que pode estar relacionado às propriedades físico-químicas específicas do nZVI. Existem vários mecanismos possíveis pelos quais o nZVI pode aumentar a absorção de ferro pelas plantas; uma possibilidade é que eles penetrem o revestimento da semente e sejam assimilados pelo embrião da semente (WANG et al., 2014).

Outra maneira esperada para o nZVI entrar na planta é através das células epidérmicas da raiz por endocitose (SLOMBERG; SCHOENFISCH, 2012). Além disso, foi confirmado que os nanotubos de carbono também são capazes de penetrar no revestimento da semente enquanto suportam e permitem a absorção de água dentro das mesmas (KHODAKOVSKAYA et al., 2009).

Na Figura 3 a seguir é apresentado um esquema representativo das principais nanopartículas utilizadas no tratamento da poluição da água, ar e solo.

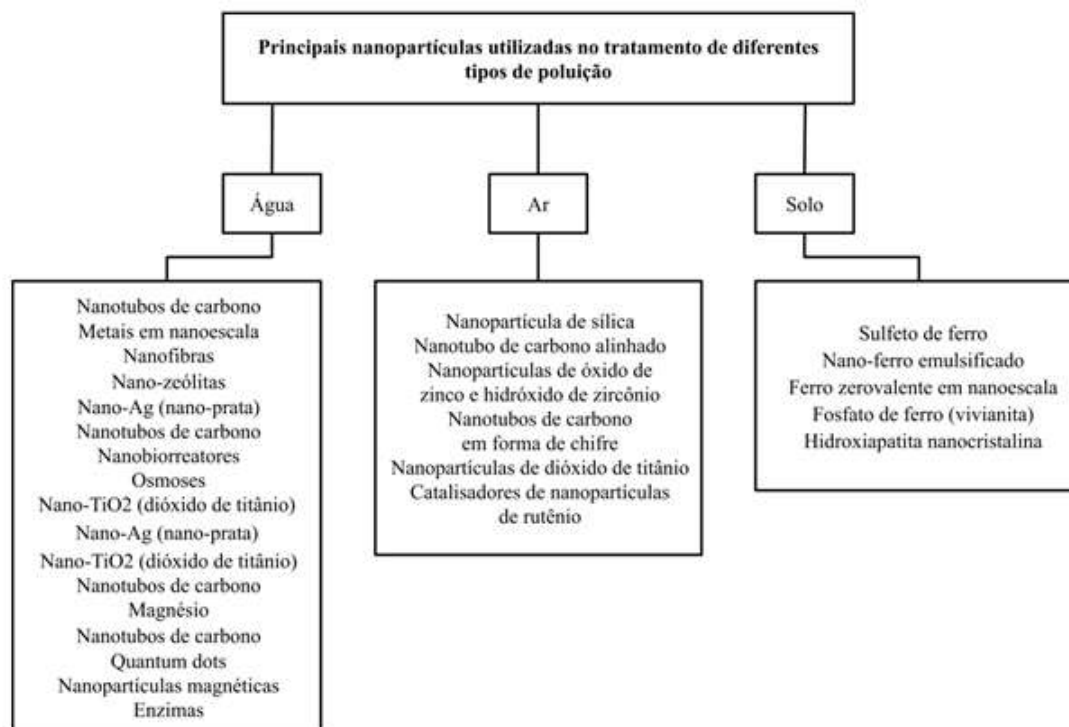


Figura 3: Esquema representativo das principais nanopartículas utilizadas no tratamento da poluição da água, ar e solo.

6. VANTAGENS E DESVANTAGENS DO USO DA NANOTECNOLOGIA PARA A DESPOLUIÇÃO DO MEIO AMBIENTE

Os estudos relacionados à nanotecnologia, desde a sua descoberta, vêm sendo cada vez mais aprofundados levando à construção de diversos sistemas de utilidade humana e ambiental, criando assim diversas aplicações com esta tecnologia, indo além da área ambiental, promovendo avanços em áreas variadas, como a médica, eletrônica e biotecnológica (FLORES; ENGELMANN, 2009).

Algumas de suas aplicações atuais envolvem, por exemplo, aumentar a capacidade de armazenamento e processamento de dados dos computadores, criar novos mecanismos para a produção de medicamentos, criar materiais mais leves, baratos e mais resistentes, na economia de energia, proteção ao meio ambiente, além de um menor uso de matérias primas escassas (CADIOLI; SALLA, 2015).

No entanto, estudos não controlados com a disposição de diferentes produtos no mercado podem trazer consequências, ainda imensuráveis, devido à falta de conhecimento específico sobre suas causas e efeitos. Por esses motivos, faz-se necessário o desenvolvimento de estudos a respeito dos possíveis efeitos ou até mesmo danos causados ao meio ambiente e às pessoas. Devido à grande quantidade de trabalho na área de nanotecnologia e nanomateriais, faz-se necessário um levantamento sobre a segurança e toxicidade destes produtos e procedimentos, especialmente quando se trata da manipulação dos nanossistemas para veiculação *in vivo*⁹ (JAIN, 2005).

6.1 PRINCIPAIS VANTAGENS DO USO DA NANOTECNOLOGIA

A nanotecnologia promove a produção de diversos materiais que são de extrema importância dentro da área industrial. Suas aplicações podem se dar na medicina e saúde, tecnologia de informação, produção e armazenamento de energia, ciência dos materiais, indústria alimentícia, água e meio ambiente, cosméticos, instrumentos, medicamentos, células-combustível e exploração espacial (MARTINS; BRAGA, 2009).

Ela ainda oferece a possibilidade de introdução de tecnologias mais eficientes e mais saudáveis para o meio ambiente do que aquelas usadas atualmente (ELCOCK, 2007), além de um potencial para produzir bens de consumo com maior rendimento de materiais, menor produção de

⁹ *In vivo* (em latim: dentro do vivo) significa "que ocorre ou tem lugar dentro de um organismo ou em tecido vivo."

resíduos e fontes de poluição química reduzidas (ZHANG, 2003).

Na área de prevenção da poluição ou dos danos indiretos ao meio ambiente, por exemplo, destaca-se o uso de nanomateriais catalíticos, que maximizam a eficiência e seletividade dos processos industriais, uma vez que promovem um maior aproveitamento das matérias primas, reduzindo o consumo de energia e produzindo menos resíduos indesejados. Outra forma de prevenção ambiental é através do tratamento ou remediação da poluição utilizando nanopartículas, isso porque a grande área superficial dessas partículas lhes confere, em muitos casos, excelentes propriedades de adsorção de metais e substâncias orgânicas (BATISTA et al., 2009).

A etapa subsequente de coleta das partículas e remoção de poluentes pode ser facilitada, por exemplo, pelo uso de nanopartículas magnéticas (YE et al., 2006).

As propriedades redox ou semicondutoras das nanopartículas podem ser aproveitadas em processos de tratamento de efluentes industriais, e de águas e solos contaminados com base na degradação química ou fotoquímica de poluentes orgânicos (QUINA, 2004).

As nanopartículas magnéticas têm um enorme potencial para aplicações em diversos campos tecnológicos. Nos últimos anos, vários métodos foram propostos para a separação de metais de efluentes usando nanopartículas magnéticas (NGOMSIK et al., 2005). As nanopartículas superparamagnéticas lipofílicas, por possuírem uma longa cadeia carbônica, podem interagir com substâncias hidrofóbicas. Essa interação é de grande importância ambiental, pois possibilita remover os poluentes do meio ambiente por meio de um campo magnético, dessa forma facilitando a remediação ambiental (NETTO et al., 2004).

Um outro benefício consagrado pela nanotecnologia é a fabricação de nanosensores e nanocatalisadores cada vez menores e mais sensíveis (RAMOS et al., 2009). Um exemplo prático disso seria a utilização de sensores de gás baseados em nanotecnologia que monitoram a poluição em várias estações terrestres. O sensor é portátil e oferece as concentrações de poluição do solo de forma instantânea e precisa, podendo ser facilmente implementado para divulgar os dados de poluição em tempo real para um servidor da *web* que fornece uma perspectiva topológica dos locais monitorados (VASEASHTA et al., 2007).

A utilização de nanomateriais na descontaminação ambiental se deve à alta reatividade química que esses materiais apresentam. O fotocatalisador TiO_2 , principalmente em sua forma de dióxido de titânio (anatase), é o nanomaterial mais estudado para a fotodegradação de compostos

orgânicos (PASCHOALINO et al, 2010).

O ferro em nanoescala zero-valente também tem sido identificado como um produto de recuperação ambiental de interesse, já que é atóxico, abundante e tem menos custo, mostrando-se útil para a redução ou transformação de vários tipos de compostos orgânicos e inorgânicos que contaminam o ambiente (JOO, 2006).

Dentro dessas perspectivas, a nanotecnologia se posiciona como prioridade para a revitalização e recuperação do meio ambiente. Anteriormente, foram publicadas as dez aplicações mais importantes da nanotecnologia, seriam elas: produção, armazenamento e conversão de energia; aumento da produtividade agrícola; remediação e tratamento da água; mapeamento e diagnóstico de doenças; sistemas para liberação de moléculas ativas; armazenamento e processamento de alimentos; controle e remediação dos efeitos da poluição do ar; construção; monitoramento da saúde e detecção e controle de pragas e seus vetores (TOMA, 2005).

6.2 PRINCIPAIS DESVANTAGENS DO USO DA NANOTECNOLOGIA

Não há dúvidas de que a nanotecnologia oferece uma perspectiva de grandes avanços que permitem melhorar a nossa qualidade de vida e ajudar a preservar o meio ambiente. No entanto, como qualquer campo da tecnologia que utiliza intensivamente novos materiais, ela traz consigo riscos ao meio ambiente e à saúde humana (QUINA, 2004).

De acordo com um relatório da seguradora Swiss Re (SWISS RE, 2004), as nanopartículas com propriedades coloidais podem ser ideais para transportar materiais tóxicos a longas distâncias, como contaminantes hidrofóbicos e metais pesados. O principal atributo dessas nanopartículas é sua fácil dispersão, dificultando sua remoção com técnicas convencionais de filtração (FARIA et al., 2013).

Além disso, o tempo de residência das nanopartículas e seus agregados no ar pode ser diferente de partículas maiores e das taxas de oxidação e dissolução, que são altamente dependentes da área de superfície, podendo aumentar drasticamente à medida que diminuem o tamanho da partícula (GUZMÁN et al., 2006).

Por esse motivo, apesar dos benefícios provenientes da aplicação de técnicas nanotecnológicas, existe uma preocupação quanto à liberação indiscriminada dessas nanopartículas no meio ambiente, pois em curto prazo, não se pode avaliar com precisão os

efeitos adversos que podem ocorrer. A principal preocupação com a liberação desses novos produtos também está fortemente relacionada ao fato de apresentarem alto grau de citotoxicidade quando dispostos no meio ambiente (PASCHOALINO et al., 2010).

Outros nanomateriais que podem apresentar riscos ambientais são os nanomateriais à base de carbono, como fulerenos, nanotubos de carbono de parede simples ou múltipla e as nanopartículas e nanofibras de carbono. Sabe-se que nanopartículas provenientes da queima de combustível de aeronaves, as quais são constituídas principalmente por nanofibras de carbono, podem ter um efeito direto sobre fenômenos que ocorrem na estratosfera, podendo alterar o clima devido à absorção/reflexão da radiação solar, o ciclo de formação das nuvens e o processo de destruição de ozônio pela inclusão de uma área superficial ativa adicional (PASCHOALINO et al., 2010).

Em áreas ambientais, os nanotubos de carbono podem ser biodisponíveis para os organismos. Suas propriedades indicam um possível acúmulo na cadeia alimentar e um longo tempo de degradação. Em organismos biológicos, sua absorção, distribuição, metabolismo, excreção e toxicidade dependem das características físicas e químicas influenciadas pelas condições ambientais externas durante a produção, uso e descarte dos nanotubos de carbono (HELLAND et al., 2007). Portanto, é impossível negar que essas novas tecnologias ocasionam o aparecimento de novos riscos que afetam diretamente os sistemas orgânicos e fatores climáticos (SILVA, 2007).

Apesar da nanotecnologia estar presente atualmente em quase todos os aspectos de nossas vidas de forma impossível de ignorá-la ou contê-la, resta à sociedade exigir uma inspeção mais minuciosa dessas inovações, a partir da criação de legislações para essas novas tecnologias, visando, a proteção do meio ambiente e, conseqüentemente, o nosso próprio bem estar. Dados toxicológicos e de biodegradação sobre nanopartículas são escassos atualmente, mesmo existindo produtos comerciais no mercado. Os critérios utilizados para determinar a toxicidade das substâncias na escala macro não trazem certezas quando colocados visando a nanotecnologia. Dessa forma, não existem métodos confiáveis para determinar as diferenças entre propriedades encontradas na "macroescala" e na "nanoescala". Muitos dos riscos específicos associados à nanotecnologia podem vir a ser inexistentes. No entanto, como essa tecnologia emergente interage com o ser humano e o meio ambiente, pode dar origem a conseqüências não desejadas (MAHAJAN; ROOP, 2006).

Esses novos produtos e tecnologias ainda não possuem um acúmulo histórico de informações que os assegure em relação às consequências que poderão advir de sua liberação no meio ambiente (ANTUNES, 2006).

É de conhecimento geral que existem diversos produtos que utilizam da nanotecnologia no mercado e que não passaram por uma avaliação profunda de seus riscos. É importante ressaltar que no Brasil ainda não existem leis e dispositivos capazes de prevenir ou mesmo abordar as peculiaridades dessa nova revolução tecnológica. As normas legais que permitem, por exemplo, a comercialização de determinado produto da nanotecnologia para agricultura não diferem das normas e critérios técnicos para outros produtos, pois a lei não faz distinção entre a regulamentação legal da nanotecnologia e outras tecnologias (BERGER FILHO, 2009).

Devido ao grande número de sistemas de nanopartículas e nanomateriais, um dos desafios é sua categorização e priorização para fins de avaliação de risco. Portanto, a legislação existente precisa ser modificada para se tornar mais adequada a nanotecnologia e as metodologias de avaliação de risco, que também terão que ser adaptadas para incorporar aglomeração, tamanho das partículas, forma e reatividade superficial nos critérios de avaliação (DA SILVA, 2008).

Nesse âmbito, há uma série de leis já existentes, sendo elas: Lei de Controle de Substâncias Tóxicas; Lei de Segurança e Saúde Ocupacional; e as principais leis ambientais: Lei do Ar Limpo, Lei da Água Limpa e Lei da Conservação de Recursos. Essas leis fornecem uma base legal para a revisão e regulamentação dos materiais nanotecnológicos utilizados atualmente. No entanto, todas essas leis fornecem uma base pouco consistente para identificar e proteger a população contra os potenciais riscos da nanotecnologia, tendo em vista que não foram criadas com tal propósito (DAVIES, 2006).

7. CONCLUSÃO

O desenvolvimento da presente pesquisa possibilitou uma compreensão de como a poluição é um assunto extremamente importante não só por afetar as nossas vidas, mas também a vida de todo o planeta, além de como ela está presente em nosso cotidiano. Para mais, também permitiu explorar o campo da nanotecnologia como alternativa para o tratamento de alguns tipos de poluição ambiental, como a da água, do ar e do solo, explorando as vantagens e possíveis desvantagens de seu uso.

Em consonância com os exemplos destacados nessa revisão de literatura, percebe-se que a nanotecnologia tem um grande potencial como forma de despoluição do meio ambiente e seus recursos. Para exemplo disso, temos o uso de diversos tipos de nanopartículas na remediação de vários recursos naturais de nosso planeta.

Dada a importância do tema, torna-se necessário o desenvolvimento de formas para agilizar e arcar com os custos dos processos de tratamento da poluição do meio ambiente, podendo se utilizar a nanotecnologia como sendo um desses tratamentos, permitindo assim uma melhor condição de vida para todos.

Nesse sentido, a utilização da nanotecnologia permite que a poluição do meio ambiente seja tratada de forma eficiente. Em trabalhos futuros, poderia ser proposta a utilização da nanotecnologia como fonte de pesquisa mais frequente, devido ao seu enorme potencial para melhorar nossas vidas e a do nosso planeta.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL-HAMDI, A.M.; SILLANPÄÄ, M; DUTTA, J. Photocatalytic degradation of phenol by iodine doped tin oxide nanoparticles under UV and sunlight irradiation. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 618, 2015. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925838814019756> Acesso em: 31 de Outubro de 2022.

AN, B; ZHAO, D. Immobilization of As(III) in soil and groundwater using a new class of polysaccharide stabilized Fe - Mn oxide nanoparticles. *Journal of Hazardous Materials*, v. 211 - 212, 2012. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389411013021> Acesso em: 30 de Outubro de 2022.

ANDREESCU, S; NJAGI, J; ISPAS, C; RAVALLI, M.T. JEM spotlight: applications of advanced nanomaterials for environmental monitoring. *J. Environ. Monit.*, 2009. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2009/em/b811063h> Acesso em: 13 de Outubro de 2022.

ARCIBAR-OROZCO, J.A.; RANGEL-MENDEZ, J.R.; BANDOSZ, T.J. Reactive adsorption of SO₂ on activated carbons with deposited iron nano-particles. *Journal of Hazardous Materials*, v. 246 - 247, 2013. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389412011661> Acesso em: 28 de Outubro de 2022.

ASHMORE, M.R.; DIMITROULOPOULOU, C. Personal exposure of children to air pollution. *Atmospheric Environment*, v. 43, n. 1, 2009. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1352231008008534#!> Acesso em: 18 de Outubro de 2022.

AUFFAN, M; ROSE, J; PROUX, O; BORSCHNECK, D; MASION, A; CHAURAND, P; HAZEMANN, J.L.; CHANEAC, C; JOLIVET, J.P.; WIESNER, M.R.; VAN GEEN, A; BOTTERO, J.Y. Enhanced Adsorption of Arsenic onto Maghemites Nanoparticles: As(III) as a Probe of the Surface Structure and Heterogeneity. *Langmuir*, 2008. Disponível em:

<https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/la702998x> Acesso em: 01 de Novembro de 2022.

BAI, L; WANG, J; MA, X; LU, M. Air Pollution Forecasts: An Overview. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 2018. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29673227/> Acesso em: 26 de Outubro de 2022.

BAIK, J.M.; KIM, M.H.; LARSON, C; YAVUZ, C.T.; STUCKY, G.D.; WODTKE, A.M.; MOSKOVITS, M. Pd-sensitized single vanadium oxide nano-wires: highly responsive hydrogen sensing based on the metal-insulator transition. *Nano Lett*, 2009. Disponível em:

<https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/nl902020t> Acesso em: 02 de Outubro de 2022.

BALA, G.P.; RÂJNOVEANU, R.M.; TUDORACHE, E; MOTISAN, R; OANCEA, C. Air pollution exposure-the (in)visible risk factor for respiratory diseases. *Environ Sci Pollut Res Int*,

2021. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33660184/> Acesso em: 17 de Novembro de 2022.

BALAMURUGAN, R; SUNDARRAJAN, S; RAMAKRISHNA, S. Recent trends in nanofibrous membranes and their suitability for air and water filtrations. *Membranes*, 2011. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2077-0375/1/3/232> Acesso em: 23 de Outubro de 2022.

BARDOS, P; BONE, B; CERNÍK, M; ELLIOTT, D. W; JONES, S; MERLY, C. Nanoremediation and International environmental restoration markets. *Remediation Journal*, v. 25, 83-94, 2015. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/rem.21426> Acesso em: 28 de Setembro de 2022.

BATISTA, R. S.; SOUZA, R. R. M.; SILVA, L. M.; SILVA, C. A.; PRADO, H. J. P.; RÔÇAS, G. Nanotecnologia e ensino de ciências à luz do enfoque CTS: uma viagem a Lilliput. *Ciências e Ideias, Nilópolis*, v.1, n.1, p. 76-86, 2009. Acesso em: 13 de Outubro de 2022.

BEHESHTIAN, J; BAEI, M.T.; BAGHERI, Z; PEYGHAN, A.A. AIN nanotube as a potential electronic sensor for nitrogen dioxide. *Microelectronics Journal*, v. 43, n. 7, 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0026269212000912> Acesso em: 20 de Setembro de 2022.

BERGAMASCO, R; MATEUS, G; SANTOS, T; SILVA, M. Revista UNINGÁ. APLICAÇÃO DA NANOTECNOLOGIA NO TRATAMENTO DE ÁGUA: UMA REVISÃO, *Maringá*, v. 34, n. 2, 2019. Disponível em: <http://revista.uninga.br/index.php/uningareviews/article/view/2526/2149>. Acesso em: 31 de Março 2022.

BERGER FILHO, A. G. Nanotecnologia e o princípio da precaução na sociedade de risco. *Revista Âmbito Jurídico*, 2009. Disponível em: [11nq.com/D9q8p](http://www.11nq.com/D9q8p) Acesso em: 16 de Outubro de 2022.

BERNARDO, P; DRIOLI, E; GOLEMME, G. Membrane gas separation: a review/state of the art. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2009. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ie8019032> Acesso em: 25 de Outubro de 2022.

BITENCOURT, D; PEDROTTI, R; SANTOS, L. A problemática dos resíduos sólidos urbanos. *Interfaces Científicas - Saúde e Ambiente*, Aracaju, v.2 n.1, p. 25-36, 2013. Disponível em: www.periodicos.set.edu.br. Acesso em: 23 de Agosto de 2022.

BOLAN, N; KUNHIKRISHNAN, A; THANGARAJAN, R; KUMPIENE, J; PARK, J; MAKINO, T; KIRKHAM, M.B.; SCHECKEL, K. Remediation of heavy metal(loid)s contaminated soils - to mobilize or to immobilize? *Journal of Hazardous Materials*, v. 266, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389413009485> Acesso em: 31 de Outubro de 2022.

BRASIL. Agência Nacional de Águas, ANA. Ministério do Desenvolvimento Regional, MDR. BRASÍLIA – DF. ANA, 2019. Manual de usos consuntivos da água no Brasil. Disponível em:

file:///C:/Users/user/Downloads/ANA_Manual_de_Usos_Consuntivos_da_Agua_no_Brasil.pdf
Acesso em: 16 de Agosto de 2022.

BUONOMENNA, M.G. Membrane processes for a sustainable industrial growth. RSC Advances, n. 17, 2013. Disponível em:
<https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2012/ra/c2ra22580h/unauth> Acesso em: 03 de Novembro de 2022.

CADIOLI, L. P; SALLA, L. Nanotecnologia: um estudo sobre seu histórico, definição e principais aplicações desta inovadora tecnologia, 2015. Disponível em:
<https://www.revista.pgsskroton.com/index.php/rcext/article/view/2403> Acesso em: 05 de Outubro de 2022.

CHEN, T.M.; KUSCHNER, W.G.; GOKHALE, J; SHOFER, S. Outdoor Air Pollution: Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide, and Carbon Monoxide Health Effects. The American Journal of the Medical Sciences, v. 333, n. 4, 2007. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0002962915325933> Acesso em: 10 de Novembro de 2022.

CHEUNG, O; BACSIK, Z; LIU, Q; MACE, A; HEDIN, N. Adsorption kinetics for CO₂ on highly selective zeolites NaKA and nano-NaKA. Applied Energy, v. 112, 2013. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261913000263> Acesso em: 25 de Outubro de 2022.

CHONG, M.N.; JIN, B; CHOW, C.W.K.; SAINT, C. Recent developments in photocatalytic water treatment technology: a review. Water Research, v. 44, n. 10, 2010. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043135410001739> Acesso em: 12 de Outubro de 2022.

CHRONOPOULOS, D; KAROUSIS, N; ZHAO, S; WANG, Q; SHINOHARA, H; TAGMATARCHIS, N. Photocatalytic application of nanosized CdS immobilized onto functionalized MWCNTs. Dalton Transactions, n. 20, 2014. Disponível em:
<https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2013/dt/c3dt53338g/unauth> Acesso em: 03 de Novembro de 2022.

COLMENARES, J. C; LUQUE, R; CAMPELO, J. M; COLMENARES, F; KARPINSKI, Z; ROMERO, A. A. Nanostructured photocatalysts and their applications in the photocatalytic transformation of lignocellulosic biomass: an overview. Materials, v. 2, Dezembro, 2009. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5513578/> Acesso em: 30 de Setembro de 2022.

COMNINELLIS, C; KAPALKA, A; MALATO, S; PARSONS, S.A.; POULIOS, I; MANTZAVINOS, D. Advanced oxidation processes for water treatment: advances and trends for R&D. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 2008. Disponível em:
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/jctb.1873> Acesso em: 12 de Outubro de 2022.

DALY, A; ZANNETTI, P. An introduction to air pollution - definitions, classifications, and

history, 2007. Disponível em: <http://w.envirocomp.org/j/books/chapters/1aap.pdf> Acesso em: 27 de Outubro de 2022.

DA SILVA, D.; TOMA, H. Nanotecnologia Para Todos. 1o. ed. [s.l.] Ensinano, 2018. Disponível em: https://storage.googleapis.com/ebook-ensinano/Cartilha-Nanotecnologia_v5. Acesso em: 16 de Março de 2022.

DERISIO, J. C. Introdução ao controle de poluição ambiental. 4ª ed., Oficina de Textos, 2012. Disponível em: https://www.google.com.br/books/edition/Introdu%C3%A7%C3%A3o_ao_controle_de_polui%C3%A7%C3%A3o_a/dw-PDAAAQBAJ?hl=pt-BR&gbpv=0. Acesso em: 13 de Agosto de 2022.

DRISCOLL, C.T.; MASON, R.P.; CHAN, H.M.; JACOB, D.J.; PIRRONE, N. Mercury as a global pollutant: sources, pathways, and effects. *Environmental Science and Technology*, 2013. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/es305071v> Acesso em: 29 de Outubro de 2022.

ELCOCK, D. Potential Impacts of Nanotechnology on Energy Transmission Applications and Needs. Oak Ridge: U.S. Department of Energy, 2007. Disponível em: <https://www.osti.gov/biblio/924389> Acesso em: 10 de Outubro de 2022.

ENGATES, K; SHIPLEY, H. Adsorption of Pb, Cd, Cu, Zn, and Ni to titanium dioxide nanoparticles: effect of particle size, solid concentration, and exhaustion. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 18, 2011. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-010-0382-3> Acesso em: 29 de Outubro de 2022.

FANG, Z; QIU, X; CHEN, J; QIU, X. Debromination of polybrominated diphenyl ethers by Ni/Fe bimetallic nanoparticles: influencing factors, kinetics, and mechanism. *Journal of Hazardous Materials*, v. 185, n. 2 - 3, 2011a. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389410012744> Acesso em: 07 de Outubro de 2022.

FANG, Z; QIU, X; CHEN, J; QIU, X. Degradation of the polybrominated diphenyl ethers by nanoscale zero-valent metallic particles prepared from steel pickling waste liquor. *Desalination*, v. 267, n. 1, 2011b. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0011916410006521> Acesso em: 07 de Outubro de 2022.

FARIA, E. M.; ELEAMEN, G; SILVA, A.E.; MENDONÇA, E; OLIVEIRA, E. Nanotecnologia e meio ambiente: uma análise sobre os riscos e benefícios dessa tecnologia em um contexto atual. *Revista de Biologia e Farmácia*, v. 9, n. 1, 2013. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Elisangela-Kretschmar/publication/237079445_Nanotecnologia_e_meio_ambiente_Uma_analise_sobre_os_riscos_e_beneficios_dessa_tecnologia_em_um_contexto_atual/links/55be10e808aed621de11fa61/Nanotecnologia-e-meio-ambiente-Uma-analise-sobre-os-riscos-e-beneficios-dessa-tecnologia-em-um-contexto-atual.pdf Acesso em: 04 de Novembro de 2022.

FLORES, A. S; ENGELMANN, W. Direitos humanos e nanotecnologias: o fascínio da criatividade em espaços cada vez menores. *Direitos culturais*, 2009. Disponível em: <https://core.ac.uk/outputs/322639940> Acesso em: 05 de Outubro de 2022.

FOLADORI, G; SILVEIRA, S. Nanotecnologia e água no Brasil. *Acta Scientiarum. Human and Social Sciences - Maringá*, v. 38, n. 2, p. 153-161, Julho-Dezembro, 2016. Disponível em: <https://tratamentodeagua.com.br/artigo/nanotecnologia-e-agua-no-brasil/> Acesso em: 30 de Setembro de 2022.

FUJISHIMA, A; ZHANG, X; TRYK, D.A. TiO₂ photocatalysis and related surface phenomena. *Surface Science Reports*, v. 63, n. 12, 2008. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167572908000757> Acesso em: 14 de Outubro de 2022.

GAYA, U.I.; ABDULLAH, A.H. Heterogeneous photocatalytic degradation of organic contaminants over titanium dioxide: a review of fundamentals, progress and problems. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, v. 9, n. 1, 2008b. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1389556708000300> Acesso em: 26 de Outubro de 2022.

GEREZ, V; RONDANO, K; PASQUALI, C. A simple manifold flow injection analysis for determining phosphorus in the presence of arsenate. *Journal of Water Chemistry and Technology*, v. 36, 2014. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.3103/S1063455X14010032> Acesso em: 18 de Outubro de 2022.

GLOVER, T.G.; SABO, D; VAUGHAN, L.A.; ROSSIN, J.A.; ZHANG, Z.J. Adsorption of sulfur dioxide by CoFe₂O₄ spinel ferrite nanoparticles and corresponding changes in magnetism. *Langmuir*, 2012. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/la3003417> Acesso em: 30 de Outubro de 2022.

GONÇALVES JR, A.C.; NACKE, H; SCHWANTES, D; COELHO, G.F. Heavy metal contamination in Brazilian agricultural soils due to application of fertilizers, c. 4, 2014. Environmental risk assessment of soil contamination. Disponível em: <https://abrir.link/JLouh> Acesso em: 27 de Setembro de 2022.

GOVINDHAN, M; ADHIKARI, B.R.; CHEN, A. Nanomaterials-based electrochemical detection of chemical contaminants. *RSC Adv*, 2014. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2014/ra/c4ra10399h> Acesso em: 23 de Outubro de 2022.

GREßLER, S; NENTWICH, M. Nano and environment – Part II: Hazard potentials and risks. *NanoTrust Dossiers*, n. 27, Março, 2012. Disponível em: https://web.archive.org/web/20220119175607id_/http://epub.oeaw.ac.at/0xc1aa5576_0x002acc9d.pdf Acesso em: 02 de Outubro de 2022.

GRENNFELT, P; ENGLERYD, A; FORSIUS, M; HOV, O; RODHE, H; COWLING, E. Acid rain and air pollution: 50 years of progress in environmental science and policy. *Ambio*, 2020.

Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31542884/> Acesso em: 19 de Outubro de 2022.

GUILLÉN, M.T.; DELGADO, J; ALBANESE, S; NIETO, J.M.; LIMA, A; DE VIVO, B. Environmental geochemical mapping of Huelva municipality soils (SW Spain) as a tool to determine background and baseline values. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 109, n. 1 - 3, 2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0375674211000276> Acesso em: 25 de Outubro de 2022.

HE, F; ZHAO, D. Manipulating the size and dispersibility of zerovalent iron nanoparticles by use of carboxymethyl cellulose stabilizers. *Environ. Sci. Technol.*, 2007. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es0705543> Acesso em: 28 de Outubro de 2022.

HELLAND, A.; WICK, P.; KOEHLER, A.; SCHMID, K.; SOM, C. Reviewing the environmental and human health knowledge base of carbon nanotubes. *Ciência e Saúde Coletiva*, v. 115, n. 8, 2007. Disponível em: <https://ehp.niehs.nih.gov/doi/full/10.1289/ehp.9652> Acesso em: 20 de Outubro de 2022.

HOSSAIN, F; PERALES-PEREZ, O.J.; HWANG, S; ROMÁN, F. Antimicrobial nanomaterials as water disinfectant: applications, limitations and future perspectives. *Science of The Total Environment*, v. 466 - 467, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969713009236> Acesso em: 19 de Outubro de 2022.

HOU, D; O'CONNOR, D; NATHANAIL, P; TIAN, L; MA, Y. Integrated GIS and multivariate statistical analysis for regional scale assessment of heavy metal soil contamination: a critical review. *Environmental Pollution*, v. 231, p. 1, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0269749117313945> Acesso em: 30 de Outubro de 2022.

HU, Y; LIU, X; BAI, J; SHIH, K; ZENG, E.Y.; CHENG, H. Assessing heavy metal pollution in the surface soils of a region that had undergone three decades of intense industrialization and urbanization. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 20, 2013. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-013-1668-z> Acesso em: 18 de Outubro de 2022.

HWANG, G.B.; LEE, J.E.; NHO, C.W.; LEE, B.U.; LEE, S.J.; JUNG, J.H.; BAE, G.N. Short-term effect of humid airflow on antimicrobial air filters using *Sophora flavescens* nanoparticles. *Science of The Total Environment*, v. 421 - 422, 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969712001416> Acesso em: 29 de Outubro de 2022.

IBRAHIM, R.K.; HAYYAN, M; ALSAADI, M.A.; HAYYAN, A; IBRAHIM, S. Environmental application of nanotechnology: air, soil, and water. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 23, 2016. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-016-6457-z> Acesso em: 31 de Outubro de 2022.

ISHIBASHI, M; IZUMI, Y; SAKAI, M; ANDO, T; FUKUSAKI, E; BAMBA, T. High-Throughput simultaneous analysis of pesticides by supercritical fluid chromatography coupled

with high-resolution mass spectrometry. *J. Agric. Food Chem.* 2015. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/jf5056248> Acesso em: 12 de Outubro de 2022.

ISSAKHOV, A; ALIMBEK, A; ZHANDAULET, Y. The assessment of water pollution by chemical reaction products from the activities of industrial facilities: Numerical study. *Journal of Cleaner Production*, v. 282, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652620352835> Acesso em: 22 de Outubro de 2022.

JANA, S; MITRA, B.C.; BERA, P; SIKDAR, M; MONDAL, A. Photocatalytic activity of galvanically synthesized nanostructure SnO₂ thin films. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 602, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925838814005520> Acesso em: 20 de Outubro de 2022.

JANCHEN, J; MÖHLMANN, D.T.F.; STACH, H. Water and carbon dioxide sorption properties of natural zeolites and clay minerals at martian surface temperature and pressure conditions. *Studies in Surface Science and Catalysis*, v. 170, 2007. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167299107811086> Acesso em: 25 de Outubro de 2022.

JOO, S. H. *Nanotechnology for environmental remediation*, 2006. Acesso em: 10 de Outubro de 2022.

JUNG, J.H.; HWANG, G.B.; LEE, J.E.; BAE, G.N. Preparation of airborne Ag/CNT hybrid nanoparticles using an aerosol process and their application to antimicrobial air filtration. *Langmuir*, 2011. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/la201851r> Acesso em: 29 de Outubro de 2022.

JUNG, J.H.; LEE, J.E.; BAE, G.N. Use of electrosprayed *Sophora flavescens* natural-product nanoparticles for antimicrobial air filtration. *Journal of Aerosol Science*, v. 57, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0021850212001681> Acesso em: 24 de Outubro de 2022.

JUREWICZ, J; DZIEWIRSKA, E; RADWAN, M; HANKE, W. Air pollution from natural and anthropic sources and male fertility. *Reprod Biol Endocrinol*, 2018. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30579357/> Acesso em: 01 de Novembro de 2022.

KANG, S; MAUTER, M.S.; ELIMELECH, M. Physicochemical Determinants of Multiwalled Carbon Nanotube Bacterial Cytotoxicity. *Environmental Science & Technology*, 2008. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es8010173> Acesso em: 23 de Outubro de 2022.

KARCI, A. Degradation of chlorophenols and alkylphenol ethoxylates, two representative textile chemicals, in water by advanced oxidation processes: the state of the art on transformation products and toxicity. *Chemosphere*, v. 99, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653513014355> Acesso em: 29 de Outubro de 2022.

KARN, B; KUIKEN, T; OTTO, M. Nanotechnology and in situ remediation: a review of the benefits and potential risks. *Environmental Health Perspectives*, v. 117, n. 12, 2009. Disponível em: <https://ehp.niehs.nih.gov/doi/10.1289/ehp.0900793> Acesso em: 22 de Setembro de 2022.

KAUR, J; SINGHAL, S. Facile synthesis of ZnO and transition metal doped ZnO nanoparticles for the photocatalytic degradation of Methyl Orange. *Ceramics International*, v. 40, n. 5, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272884213017045> Acesso em: 10 de Outubro de 2022.

KHODAKOVSKAYA, M; DERVISHI, E; MAHMOOD, M; XU, Y; LI, Z; WATANABE, F; BIRIS, A.S. Carbon nanotubes are able to penetrate plant seed coat and dramatically affect seed germination and plant growth. *ACS Nano*, 2009. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/nn900887m> Acesso em: 14 de Outubro de 2022.

KILIANOVÁ, M; PRUCEK, R; FILIP, J; KOLAŘÍK, J; KVÍTEK, L; PANÁČEK, A; TUČEK, J; ZBORIL, R. Remarkable efficiency of ultrafine superparamagnetic iron(III) oxide nanoparticles toward arsenate removal from aqueous environment. *Chemosphere*, v. 93, n. 11, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653513011879> Acesso em: 18 de Outubro de 2022.

KOČÍ, K; KREJČÍKOVÁ, S; ŠOLCOVÁ, O; OBALOVÁ, L. Photocatalytic decomposition of N₂O on Ag-TiO₂. *Catalysis Today*, v. 191, n. 1, 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0920586112000673> Acesso em: 15 de Outubro de 2022.

KUMPIENE, J; LAGERKVIST, A; MAURICE, C. Stabilization of As, Cr, Cu, Pb and Zn in soil using amendments - a review. *Waste Management*, v. 28, n. 1, 2008. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X07000165> Acesso em: 22 de Outubro de 2022.

LEAD, J.R.; BATLEY, G.E.; ALVAREZ, P.J.J.; CROTEAU, M.N.; HANDY, R.D.; MCLAUGHLIN, M.J.; JUDY, J.D.; SCHIRMER, K. Nanomaterials in the environment: Behavior, fate, bioavailability, and effects. *Environmental Toxicology and Chemistry*, v. 37, n. 8, 2018. Disponível em: <https://setac.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/etc.4147> Acesso em: 22 de Outubro de 2022.

LEE, B.U.; YUN, S.H.; BAE, G.N. Inactivation of *S. epidermidis*, *B. subtilis*, and *E. coli* bacteria bioaerosols deposited on a filter utilizing airborne silver nanoparticles. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, v. 18, n. 1, 2008a. Disponível em: <https://koreascience.kr/article/JAKO200832642389343.page> Acesso em: 12 de Outubro de 2022.

LEE, B; JUNG, J; BAE, G.N.; YUN, S. Effect of relative humidity and variation of particle number size distribution on the inactivation effectiveness of airborne silver nanoparticles against bacteria bioaerosols deposited on a filter. *Journal of Aerosol Science*, v. 41, n. 5, 2010a. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0021850210000364> Acesso em: 20 de Setembro de 2022.

- LEE, K.J.; SHIRATORI, N; LEE, G.H.; MIYAWAKI, J; MOCHIDA, I; YOON, S.H.; JANG, J. Activated carbon nanofiber produced from electrospun polyacrylonitrile nanofiber as a highly efficient formaldehyde adsorbent. *Carbon*, v. 48, n. 15, 2010b. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0008622310005373> Acesso em: 23 de Outubro de 2022.
- LEE, Y.G.; LEE, P.H.; CHOI, S.M.; AN, M.H.; JANG, A.S. Effects of Air Pollutants on Airway Diseases. *Int J Environ Res Public Health*, 2021. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34574829/> Acesso em: 27 de Outubro de 2022.
- LIANG, Q; ZHAO, D. Immobilization of arsenate in a sandy loam soil using starch-stabilized magnetite nanoparticles. *Journal of Hazardous Materials*, v. 271, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389414000867> Acesso em: 21 de Outubro de 2022.
- LI, J; JIA, C; LU, Y; TANG, S; SHIM, H. Multivariate analysis of heavy metal leaching from urban soils following simulated acid rain. *Microchemical Journal*, v. 122, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0026265X15000764> Acesso em: 19 de Outubro de 2022.
- LIMA, V.C.; LIMA, M.R.; MELO, V.F. O solo no meio ambiente: abordagem para professores do Ensino Fundamental e Médio e alunos do Ensino Médio. Universidade Federal do Paraná, 2007. Disponível em: <https://www.acervodigital.ufpr.br/handle/1884/67899> Acesso em: 22 de Outubro de 2022.
- LIM, S.Y.; SHEN, W; GAO, Z. Carbon quantum dots and their applications, *Chem. Soc. Rev.*, n. 44, 2015. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2014/cs/c4cs00269e> Acesso em: 25 de Novembro de 2022.
- LI, Q; MAHENDRA, S; LYON, D.Y.; BRUNET, L; LIGA, M.V.; LI, D; ALVAREZ, P.J.J. Antimicrobial nanomaterials for water disinfection and microbial control: potential applications and implications. *Water Research*, v. 42, n. 18, 2008. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043135408003333> Acesso em: 16 de Outubro de 2022.
- LISBOA, H. Controle da poluição atmosférica, 2014. Disponível em: <http://repositorio.asc.es.edu.br/handle/123456789/418>. Acesso em: 16 de Agosto de 2022.
- LIU, G; HAN, J; ZHOU, X; HUANG, L; ZHANG, F; WANG, X; DING, C; ZHENG, X; HAN, H; LI, C. Enhancement of visible-light-driven O₂ evolution from water oxidation on WO₃ treated with hydrogen. *Journal of Catalysis*, v. 307, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0021951713002406> Acesso em: 29 de Outubro de 2022.
- LIU, R; ZHAO, D. Synthesis and characterization of a new class of stabilized apatite nanoparticles and applying the particles to in situ Pb immobilization in a fire-range soil. *Chemosphere*, v. 91, n. 5, 2013. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653512015354> Acesso em: 06 de Outubro de 2022.

LIU, S; ZENG, T.H.; HOFMANN, M; BURCOMBE, E; WEI, J; JIANG, R; KONG, J; CHEN, Y. Antibacterial Activity of Graphite, Graphite Oxide, Graphene Oxide, and Reduced Graphene Oxide: Membrane and Oxidative Stress. *ACS Nano*, 2011. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/nn202451x> Acesso em: 11 de Outubro de 2022.

LUPAN, O; CHAI, G; CHOW, L. Novel hydrogen gas sensor based on single ZnO nanorod. *Microelectronic Engineering*, v. 85, n. 11, 2008. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167931708003183> Acesso em: 27 de Outubro de 2022.

MALATO, S; FERNÁNDEZ-IBÁÑEZ, P; MALDONADO, M.I.; BLANCO, J; GERNJAK, W. Decontamination and disinfection of water by solar photocatalysis: recent overview and trends. *Catalysis Today*, v. 147, n. 1, 2009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0920586109003344> Acesso em: 16 de Outubro de 2022.

MARTINS, P. R.; BRAGA, R. Nanotecnologia: promessas e dilemas da revolução invisível, 2007. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Paulo-Martins-48/publication/268266306_NANOTECNOLOGIA_PROMESSAS_E_DILEMAS_DA_REVOLUCAO_INVISIVEL/links/54bcd7cc0cf24e50e9409a12/NANOTECNOLOGIA-PROMESSAS-E-DILEMAS-DA-REVOLUCAO-INVISIVEL.pdf Acesso em: 12 de Outubro de 2022.

MAYNARD, A. Nanoparticle safety - A perspective from the United States. In R. E. Hester, & R. M. Harrison (Eds.), *Nanotechnology: consequences for human health and the environment* (p. 118-131), 2007. Cambridge, UK: RSC Publishing. Disponível em: [http://library.navoij-uni.uz/files/hester%20r.e.,%20harrison%20r.%20-%20nanotechnology-%20consequences%20for%20human%20health%20and%20the%20environment%20\(2007\)\(381s\).pdf#page=132](http://library.navoij-uni.uz/files/hester%20r.e.,%20harrison%20r.%20-%20nanotechnology-%20consequences%20for%20human%20health%20and%20the%20environment%20(2007)(381s).pdf#page=132) Acesso em: 29 de Setembro de 2022.

MERAJIN, M; SHARIFNIA, S; HOSSEINI, S.N.; YAZDANPOUR, N. Photocatalytic conversion of greenhouse gases (CO₂ and CH₄) to high value products using TiO₂ nanoparticles supported on stainless steel webnet. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, v. 44, n. 2, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1876107012001770> Acesso em: 23 de Outubro de 2022.

METZ, B; DAVIDSON, O; BOSCH, P; DAVE, R; MEYER, L. The fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar4/wg3/> Acesso em: 20 de Outubro de 2022.

MIYAWAKI, J; LEE, G.H.; YEH, J; SHIRATORI, N; SHIMOHARA, T; MOCHIDA, I; YOON, S.H. Development of carbon-supported hybrid catalyst for clean removal of formaldehyde indoors. *Catalysis Today*, v. 185, n. 1, 2012. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S092058611100719X> Acesso em: 26 de Outubro de 2022.

NGUYEN, N.H.; BAI, H. Effect of washing pH on the properties of titanate nanotubes and its activity for photocatalytic oxidation of NO and NO₂. *Applied Surface Science*, v. 355, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169433215016852> Acesso em: 22 de Outubro de 2022.

NUASAEN, S; OPAPRAKASIT, P; TANGBORIBOONRAT, P. Hollow latex particles functionalized with chitosan for the removal of formaldehyde from indoor air. *Carbohydrate Polymers*, v. 101, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S014486171300951X> Acesso em: 25 de Outubro de 2022.

OBALOVÁ, L; RELI, M; LANG, J; MATĚJKA, V; KUKUTSCHOVÁ, J; LACNÝ, Z; KOCÍ, K. Photocatalytic decomposition of nitrous oxide using TiO₂ and Ag-TiO₂ nanocomposite thin films. *Catalysis Today*, v. 209, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0920586112008231> Acesso em: 14 de Outubro de 2022.

OECD Organization for Economic Co-operation and Development. *Fostering nanotechnology to address global challenges: water*, 2011 Disponível em: https://www.academia.edu/10063718/Fostering_Nanotechnology_to_Address_Global_Challenges_Water_ORGANISATION_FOR_ECONOMIC_CO_OPERATION_AND_DEVELOPMENT. Acesso em: 30 de Setembro de 2022.

PARANÁ. Secretaria de Estado da Educação do Paraná (Seed-PR), 2018. *Nanotecnologia no cotidiano?* Disponível em: <http://www.educadores.diaadia.pr.gov.br/modules/noticias/article.php?storyid=2503&tit=Nanotecnologia-no-cotidiano>. Acesso em 04 mar 2022.

PARK, J.H.; BOLAN, N; MEGHARAJ, M; NAIDU, R. Comparative value of phosphate sources on the immobilization of lead, and leaching of lead and phosphorus in lead contaminated soils. *Science of The Total Environment*, v. 409, n. 4, 2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S004896971001209X> Acesso em: 26 de Outubro de 2022.

PASCHOALINO, P. M.; MARCONE, S. P. G.; JARDIM, F. W. Os nanomateriais e a questão ambiental. *Quím. nova*, v. 33, n. 2, 2010. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/J4kFgpGnQKH7yJ4w65JPhRq/?lang=pt> Acesso em: 10 de Outubro de 2022.

PASTOR, J; HERNÁNDEZ, A.J. Heavy metals, salts and organic residues in old solid urban waste landfills and surface waters in their discharge areas: determinants for restoring their impact. *Journal of Environmental Management*, v. 95, 2012. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479711002453> Acesso em: 29 de Outubro de 2022.

PENDERGAST, M. M.; HOEK, E. M. V. A review of water treatment membrane nanotechnologies. *Energy & Environmental Science*, 2011. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2011/ee/c0ee00541j>. Acesso em: 27 de Setembro de 2022.

PENG, H; FENG, S; ZHANG, X; LI, Y; ZHANG, X. Adsorption of norfloxacin onto titanium oxide: effect of drug carrier and dissolved humic acid. *Science of The Total Environment*, v. 438, 2012a. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969712011291> Acesso em: 22 de Outubro de 2022.

PEREIRA, S. S.; CURI, R. C. Meio Ambiente, Impacto Ambiental e Desenvolvimento Sustentável: Conceituações Teóricas sobre o Despertar da Consciência Ambiental. *Revista de Administração, Contabilidade e Sustentabilidade*, v. 2, n. 4, p.35-57, 2012. Acesso em: 18 de Junho de 2022.

PROCKOP, L.D.; CHICHKOVA, R.I. Carbon monoxide intoxication: An updated review. *Journal of the Neurological Sciences*, v. 262, n. 1 - 2, 2007. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022510X0700456X> Acesso em: 15 de Novembro de 2022.

PYANKOV, O.V.; AGRANOVSKI, I.E.; HUANG, R; MULLINS, B.J. Removal of biological aerosols by oil coated filters. *Clean Soil Air Water*, 2008. Disponível em: <https://onlineibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/clen.200700191> Acesso em: 20 de Outubro de 2022.

QU, X; ALVAREZ, P. J. J.; LI, Q. Applications of nanotechnology in water and wastewater treatment. *Water Research*, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043135413001772>. Acesso em: 29 de Setembro de 2022.

RAHAMAN, M.S.; VECITIS, C.D.; ELIMELECH, M. Electrochemical Carbon-Nanotube Filter Performance toward Virus Removal and Inactivation in the Presence of Natural Organic Matter. *Environmental Science & Technology*, 2012. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es203607d> Acesso em: 31 de Outubro de 2022.

RAMOS, S. F.; MARTINS, R.; DULLEY, R. D.; ASSUMPÇÃO, R.; NOGUEIRA, E. A; JUNIOR, S. N.; BARBOSA, M. Z.; LACERDA, A. L. S. Reflexões acerca das nanotecnologias e as novas densidades técnicas-científicas-informacionais na agricultura. *Estudios Sociales*, v. 17, n. 34, 2009. Disponível em: <https://www.scielo.org.mx/pdf/estsoc/v17n34/v17n34a13.pdf> Acesso em: 07 de Outubro de 2022.

REYHANITABAR, A.; ALIDOKHT, L; KHATAEE, A.R.; OUSTAN, S. Application of stabilized Fe⁰ nanoparticles for remediation of Cr (VI)-spiked soil. *European Journal of Soil*, v.

63, n. 5, 2012. Disponível em:

<https://bsssjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1365-2389.2012.01447.x> Acesso em: 03 de Outubro de 2022.

RIBEIRO, H. Poluição, um veneno silencioso para a saúde humana, *Rev. Ciência Elem.*, 2019. Disponível em: <https://rce.casadasciencias.org/rceapp/art/2019/069/> Acesso em: 20 de Setembro de 2022.

RICHARDSON, S.D.; PLEWA, M.J.; WAGNER, E.D.; SCHOENY, R; DEMARINI, D.M. Occurrence, genotoxicity, and carcinogenicity of regulated and emerging disinfection by-products in drinking water: a review and roadmap for research. *Mutation Research/Reviews in Mutation Research*, v. 636, n. 1 - 3, 2007. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S138357420700035X> Acesso em: 02 de Novembro de 2022.

ROBINSON, B.H.; BANUELOS, G; CONESA, H.M.; EVANGELOU, M.W.H.; SCHULIN, R. The phytomanagement of trace elements in soil. *Critical Reviews in Plant Sciences*, v. 28, n. 4, 2009. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07352680903035424> Acesso em: 31 de Outubro de 2022.

RODRIGUEZ, J.A.; LIU, P; PEREZ, M; LIU, G; HRBEK, J. Destruction of SO₂ on Au and Cu nanoparticles dispersed on MgO(100) and CeO₂(111). *J. Phys. Chem. A.*, 2010. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/jp905761s> Acesso em: 27 de Outubro de 2022.

RUTALA, W.A.; WEBER, D.J. Guideline for disinfection and sterilization in healthcare facilities, 2008. Centers for Disease Control (US). Disponível em: <https://stacks.cdc.gov/view/cdc/47378> Acesso em: 03 de Novembro de 2022

SALEH, T.A.; SHUAIB, T.D.; DANMALIKI, G.I.; AL-DAOUS, M.A. Carbon-based nanomaterials for desulfurization: classification, preparation, and evaluation. Applying nanotechnology to the desulfurization process in petroleum engineering. p. 154, 2015. Disponível em: <https://www.igi-global.com/chapter/carbon-based-nanomaterials-for-desulfurization/139160> Acesso em: 27 de Setembro de 2022.

SÁNCHEZ-HERNÁNDEZ, L; HERNÁNDEZ-DOMÍNGUEZ, D; BERNAL, J; NEUSUB, C; MARTIN, M.T.; BERNAL, J.L. Capillary electrophoresis–mass spectrometry as a new approach to analyze neonicotinoid insecticides. *Journal of Chromatography A*, v. 1359, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0021967314010978> Acesso em: 03 de Novembro de 2022.

SCHULZ, P. Há mais história lá embaixo - um convite para rever uma palestra, 2018. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbef/a/Rf769Jnw7JBYkwGwzbSgNTx/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 16 de Março de 2022.

SHANKARAN, D.R.; GOBI, K.V.; MIURA, N. Recent advancements in surface plasmon resonance immunosensors for detection of small molecules of biomedical, food and

environmental interest. *Sensors and Actuators B: Chemical*, v. 121, n. 1, 2007. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925400506006368> Acesso em: 06 de Novembro de 2022.

SHINTANI, H. Toxic compounds analysis with high performance liquid chromatography detected by electro chemical detector (ECD). *International Journal of Clinical Pharmacology & Toxicology*, 2014. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/144773506.pdf> Acesso em: 17 de Setembro de 2022.

SHI, Z.H.; FANG, N.F.; WU, F.Z.; WANG, L.; YUE, B.J.; WU, G.L. Soil erosion processes and sediment sorting associated with transport mechanisms on steep slopes. *Journal of Hydrology*, v. 454 - 455, 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169412004751> Acesso em: 30 de Outubro de 2022.

SIERRA-VARGAS, M.P.; TERAN, L.M. Air pollution: impact and prevention. *Respirology*, 2012. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22726103/> Acesso em: 30 de Outubro de 2022.

SILVA, T. E. Efetividade do direito ambiental diante das inovações tecnológicas do século XXI. *Interfaces*, 2007. Disponível em: <http://www3.sp.senac.br/hotsites/blogs/InterfacEHS/wp-content/uploads/2013/07/2007-art-6portugues.pdf> Acesso em: 12 de Outubro de 2022.

SINGH, A; AGRAWAL, M. Acid rain and its ecological consequences. *Journal of Environmental Biology*, 2008. Disponível em: http://www.jeb.co.in/journal_issues/200801_jan08/paper_02.pdf Acesso em: 02 de Novembro de 2022.

SLOMBERG, D.L.; SCHOENFISCH, M.H. Silica nanoparticle phytotoxicity to *Arabidopsis thaliana*. *Environ. Sci. Technol.*, 2012. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es300949f> Acesso em: 22 de Outubro de 2022.

SOLOMON, S.J.; SCHADE, G.W; KUTTIPURATH, J; LADSTÄTTER-WEISSENMAYER, A; BURROWS, J. VOC concentrations in an indoor workplace environment of a university building. *Indoor and Built Environment*, v. 17, n. 3, 2008. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/1420326X08090822> Acesso em: 15 de Outubro de 2022.

SU, F; LU, C; CNEN, W; BAI, H; FENG HWANG, J. Capture of CO₂ from flue gas via multiwalled carbon nanotubes. *Science of The Total Environment*, v. 407, n. 8, 2009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969709000229> Acesso em: 23 de Outubro de 2022.

SU, S; WU, W; GAO, J; LU, J; FAN, C. Nanomaterials-based sensors for applications in environmental monitoring. *Journal of Materials Chemistry*, n. 35, 2012. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2012/jm/c2jm33284a/unauth> Acesso em: 10 de Outubro de 2022.

TFOUNI, S.A.; VITORINO, S.H.; TOLEDO, M.C. Efeito do processamento na contaminação de cana-de-açúcar e derivados por hidrocarbonetos policíclicos aromáticos. *Food Sci. Technol*, 2007. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/cta/a/kDZtsGXbkHrqJ4FJWBH6jXd/?lang=pt&format=html> Acesso em: 18 de Novembro de 2022.

THERON, J; WALKER, J; CLOETE, T. Nanotechnology and water treatment: applications and emerging opportunities. *Critical Reviews in Microbiology*, v. 34, n. 1, 2008. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10408410701710442> Acesso em: 01 de Novembro de 2022.

THERON, J; CLOETE, T; DE KWAADSTENIET, M. Current molecular and emerging nanobiotechnology approaches for the detection of microbial pathogens. *Critical Reviews in Microbiology*, v. 36, n. 4, 2010. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.3109/1040841X.2010.489892> Acesso em: 14 de Outubro de 2022.

TRANCHIDA, P.Q.; FRANCHINA, F.A.; DUGO, P; MONDELLO, L. Comprehensive two-dimensional gas chromatography- mass spectrometry: recent evolution and current trends. *Mass Spectrometry Reviews*, 2015. Disponível em: <https://analyticalsciencejournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/mas.21443> Acesso em: 15 de Outubro de 2022.

UPADHYAY, R.K.; SHARMA, M; SINGH, D.K.; AMRITPHALE, S.S.; CHANDRA, N. Photo degradation of synthetic dyes using cadmium sulfide nanoparticles synthesized in the presence of different capping agents. *Separation and Purification Technology*, v. 88, 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1383586611007064> Acesso em: 15 de Outubro de 2022.

UPENDAR, K; SRI HARI KUMAR, A; LINGAIAH, N; RAMA RAO, K.S.; SAI PRASAD, P.S. Low-temperature CO₂ adsorption on alkali metal titanate nanotubes. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, v. 10, 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1750583612001430> Acesso em: 23 de Outubro de 2022.

VALLERO, D.A. *Fundamentals of Air Pollution*, fourth edition, 2008. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5464081/mod_book/chapter/23386/Fundamentals%20of%20Air%20Pollution.pdf Acesso em: 11 de Outubro de 2022.

VASEASHTA, A.; VACLAVIKOVA, M.; VASEASHTA, S.; GALLIOS, G.; ROY, P.; PUMMAKARNCHANA, O. Nanostructures in environmental pollution detection, monitoring, and remediation. *Science and Technology of Advanced Materials*, v. 8, n. 1-2, 2007. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1016/j.stam.2006.11.003/meta> Acesso em: 14 de Outubro de 2022.

VATANPOUR, V; MADAENI, S.S.; KHATAEE, A.R.; SALEHI, E; ZINADINI, S;

MONFARED, H.A. TiO₂ embedded mixed matrix PES nanocomposite membranes: influence of different sizes and types of nanoparticles on antifouling and performance. *Desalination*, v. 292, 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0011916412000938> Acesso em: 24 de Outubro de 2022.

VECITIS, C.D.; SCHNOOR, M.H.; RAHAMAN, M.S.; SCHIFFMAN, J.D.; ELIMELECH, M. Electrochemical Multiwalled Carbon Nanotube Filter for Viral and Bacterial Removal and Inactivation. *Environmental Science & Technology*, 2011. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es2000062> Acesso em: 30 de Outubro de 2022.

VECITIS, C.D.; ZODROW, K.R.; KANG, S; ELIMELECH, M. Electronic-Structure-Dependent Bacterial Cytotoxicity of Single-Walled Carbon Nanotubes. *ACS Nano*, 2010. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/nn101558x> Acesso em: 28 de Outubro de 2022.

VIANNA, A. POLUIÇÃO AMBIENTAL, UM PROBLEMA DE URBANIZAÇÃO E CRESCIMENTO DESORDENADO DAS CIDADES. *Revista SUSTINERE*, v. 3, n. 1, p. 22-42, 2015. Disponível em: <https://www.e-publicacoes.uerj.br/index.php/sustinere/article/view/17325> Acesso em: 10 de Setembro de 2022.

WANG, A; JING, H. Tunable catalytic activities and selectivities of metal ion doped TiO₂ nanoparticles - oxidation of organic compounds. *Dalton Transactions*, n. 3, 2014. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2013/dt/c3dt51987b/unauth> Acesso em: 12 de Outubro de 2022.

WANG, H; LUA, A. Development of metallic nickel nanoparticle catalyst for the decomposition of methane into hydrogen and carbon nanofibers. 2012. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/jp306519t> Acesso em: 26 de Outubro de 2022.

WANG, J.L.; XU, L.J. Advanced oxidation processes for wastewater treatment: formation of hydroxyl radical and application. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, v. 42, n. 3, 2012. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10643389.2010.507698> Acesso em: 31 de Outubro de 2022.

WANG, K; ZHAO, P; GUO, X; LI, Y; HAN, D; CHAO, Y. Enhancement of reactivity in Li₄SiO₄-based sorbents from the nano-sized rice husk ash for high-temperature CO₂ capture. *Energy Conversion and Management*, v. 81, 2014a. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890414001733> Acesso em: 26 de Outubro de 2022.

WANG, Y; FANG, Z; LIANG, B; TSANG, E.P. Immobilization and phytotoxicity of chromium in contaminated soil remediated by CMC-stabilized nZVI. *Journal of Hazardous Materials*, v. 275, 2014b. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389414003252> Acesso em: 13 de Outubro de 2022.

WANG, Y; FANG, Z; LIANG, B; TSANG, E.P. Remediation of hexavalent chromium contaminated soil by stabilized nanoscale zero-valent iron prepared from steel pickling waste liquor. *Chemical Engineering Journal*, v. 247, 2014c. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S138589471400285X> Acesso em: 16 de Outubro de 2022.

WANG, Y; SIKORA, S; KIM, H; DUBEY, B; TOWNSEND, T. Mobilization of iron and arsenic from soil by construction and demolition debris landfill leachate. *Waste Management*, v. 32, n. 5, 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X11005411> Acesso em: 17 de Outubro de 2022.

WANG, Y; ZHU, Y; WU, S. A new nano CaO-based CO₂ adsorbent prepared using an adsorption phase technique. *Chemical Engineering Journal*, v. 218, 2013c. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1385894712015896> Acesso em: 24 de Outubro de 2022.

WARHEIT, D.B.; WEBB, T.R.; REED, K.L.; FRERICHS, S; SAYES, C.M. Pulmonary toxicity study in rats with three forms of ultrafine-TiO₂ particles: differential responses related to surface properties. *Toxicology*, v. 230, n. 1, 2007. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0300483X06006457> Acesso em: 30 de Outubro de 2022.

WEISSMANNOVÁ, H.D.; PAVLOVSKÝ, J. Indices of soil contamination by heavy metals – methodology of calculation for pollution assessment (minireview). *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 189, n. 616, 2017. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10661-017-6340-5> Acesso em: 31 de Outubro de 2022.

WHO. World Health Organization. Regional Office for Europe. Health effects of particulate matter: policy implications for countries in eastern Europe, Caucasus and central Asia, 2013. Disponível em: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/344854> Acesso em: 15 de Setembro de 2022.

WU, C.M.; BALTRUSAITIS, J; GILLAN, E.G.; GRASSIAN, V.H. Sulfur dioxide adsorption on ZnO nanoparticles and nanorods. *J Phys Chem C*, 2011. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/jp201986j> Acesso em: 20 de Outubro de 2022.

WU, Q; LEUNG, J.Y.S.; GENG, X; CHEN, S; HUANG, X; LI, H; HUANG, Z; ZHU, L; CHEN, J; LU, Y. Heavy metal contamination of soil and water in the vicinity of an abandoned e-waste recycling site: implications for dissemination of heavy metals. *Science of The Total Environment*, v. 506 - 507, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969714015836> Acesso em: 09 de Outubro de 2022.

XIN, X; WEI, Q; YANG, J; YAN, L; FENG, R; CHEN, G; DU, B; LI, H. Highly efficient removal of heavy metal ions by amine-functionalized mesoporous Fe₃O₄ nanoparticles. *Chemical Engineering Journal*, v. 184, 2012. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1385894712000198> Acesso em: 20 de Outubro de 2022.

XIU, Z.M.; MA, J; ALVAREZ, P.J.J. Differential Effect of Common Ligands and Molecular Oxygen on Antimicrobial Activity of Silver Nanoparticles versus Silver Ions. *Environmental Science & Technology*, 2011. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es201918f> Acesso em: 24 de Outubro de 2022.

XU, Y; ZHAO, D. Reductive immobilization of chromate in water and soil using stabilized iron nanoparticles. *Water Research*, v. 41, n. 10, 2007. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043135407001315> Acesso em: 04 de Outubro de 2022.

YANG, H.L.; LIN, J.C.T.; HUANG, C. Application of nanosilver surface modification to RO membrane and spacer for mitigating biofouling in seawater desalination. *Water Research*, v. 43, n. 15, 2009a. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043135409003650> Acesso em: 08 de Outubro de 2022.

YASSITEPE, E; YATMAZ, H.C.; OZTURK, C; OZTURK, K; DURAN, C. Photocatalytic efficiency of ZnO plates in degradation of azo dye solutions. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, v. 198, n. 1, 2008. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1010603008000658> Acesso em: 28 de Outubro de 2022.

ZHANG, S; SAEBFAR, H. Chemical Information Call-in Candidate: Nano Zinc Oxide. San Francisco, California. Setembro, 2010. Disponível em: http://www.dtsc.ca.gov/TechnologyDevelopment/Nanotechnology/upload/Nano_Zinc_Oxide.pdf Acesso em: 03 de Outubro de 2022.

ZHAO, J. Turning to Nanotechnology for Pollution Control: Applications of Nanoparticles. *Dartmouth undergraduate journal of science*, 2009. Disponível em: <https://sites.dartmouth.edu/dujs/2009/02/22/turning-to-nanotechnology-for-pollution-control-applications-of-nanoparticles/> Acesso em: 19 de Outubro de 2022.

ZHAO, W; WANG, Z; SHEN, X; LI, J; XU, C; GAN, Z. Hydrogen generation via photoelectrocatalytic water splitting using a tungsten trioxide catalyst under visible light irradiation. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 37, n. 1, 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319911007877> Acesso em: 22 de Outubro de 2022.

ZHOU, R; HU, G; YU, R; PAN, C; WANG, Z.L. Piezotronic effect enhanced detection of flammable/toxic gases by ZnO micro/nanowire sensors. *Nano Energy*, v. 12, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2211285515000464> Acesso em: 01 de Novembro de 2022.

Também foram consultadas para a realização deste trabalho as seguintes referências:

ABANADES, J.C.; ALVAREZ, D. Conversion limits in the reaction of CO₂ with Lime. *Energy Fuels*, 2003. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ef020152a> Acesso em 15 de Outubro de 2022.

ABNT. NBR 10004:2004. Resíduos sólidos – Classificação. Disponível em: <https://analiticaqmcresiduos.paginas.ufsc.br/files/2014/07/Nbr-10004-2004-Classificacao-De-Residuos-Solidos.pdf>. Acesso em: 17 de Agosto de 2022.

ANTUNES, P. B. *Direito Ambiental*. Rio de Janeiro: Lumen Juris, 2006. Disponível em: <https://www.lexml.gov.br/urn/urn:lex:br:redede.virtual.bibliotecas:livro:2006;000757610> Acesso em: 20 de Outubro de 2022.

AUGUGLIARO, V; LITTER, M; PALMISANO, L; SORIA, J. The combination of heterogeneous photocatalysis with chemical and physical operations: a tool for improving the photoprocess performance. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, v. 7, n. 4, 2006. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1389556707000044> Acesso em: 30 de Outubro de 2022.

BAHNEMANN, D. Photocatalytic water treatment: solar energy applications. *Solar Energy*, v. 77, n. 5, 2004. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038092X04001665> Acesso em: 27 de Outubro de 2022.

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, 1998. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167701298000207> Acesso em: 15 de Outubro de 2022.

BARREIRA, L. P.; PHILIPPI-JUNIOR, A. A problemática dos resíduos de embalagens de agrotóxicos no Brasil. XXVIII Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Cancún: Aidis, 2002. Disponível em: http://cleberfolgado.com.br/wp-content/uploads/2020/05/65.-Artigo-Problematica_dos_residuos_de_embalagens.pdf Acesso em: 16 de Setembro de 2022.

BOUBEL, R.W.; FOX, D.L.; TURNER, B; STERN, A.C. *Fundamentals of air pollution*, third edition, 1994. Disponível em: https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=pfEkBQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=air+pollution&ots=lsAcX4EwS6&sig=7jjW19NWKmV78rUUMbGmQ2D_8UY#v=onepage&q=air%20pollution&f=false Acesso em: 25 de Outubro de 2022.

CHAVES. *Boletim da UFMG*, 2005. Disponível em: <https://www.ufmg.br/boletim/bo11490/segunda.shtml>. Acesso em 04 de Março de 2022.

CHEN, S.S.; HSU, H.D.; LI, C.W. A new method to produce nanoscale

iron for nitrate removal. *Journal of Nanoparticle Research*, v. 6, 2004. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11051-004-6672-2> Acesso em: 10 de Outubro de 2022.

COLVIN, V. L. The potential environmental impact of engineered nanomaterials. *Nature Biotechnology*, 2003. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/nbt875> Acesso em: 29 de Setembro de 2022.

DA SILVA, M. B. Nanotecnologia: considerações interdisciplinares sobre processos técnicos, sociais, éticos e de investigação. *Impulso*, 2003. Disponível em: <https://docplayer.com.br/5722642-Nanotecnologia-consideracoes-interdisciplinares-sobre-processos-tecnicos-sociais-eticos-e-de-investigacao.html> Acesso em: 17 de Outubro de 2022.

DAVIES, J. C. *Managing the Effects of Nanotechnology*, 2006. Woodrow Wilson. Disponível em: <https://www.pewtrusts.org/en/research-and-analysis/reports/2006/01/11/managing-the-effects-of-nanotechnology> Acesso em: 12 de Outubro de 2022.

FILHO, J.B.G. *Poluição do Ar. Aspectos Técnicos e Econômicos do Meio Ambiente*. Artigos-ECP, 1989. Disponível em: www.consultoriaambiental.com.br. Acesso em: 06 de Setembro de 2022.

GOI, A; TRAPIDO, M. Hydrogen peroxide photolysis, Fenton reagent and photo-Fenton for the degradation of nitrophenols: a comparative study. *Chemosphere*, v. 46, n. 6, 2002. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S004565350100203X> Acesso em: 29 de Outubro de 2022.

GUZMÁN, K. A.; TAYLOR, M. R.; BANFIELD, J. F. Environmental risks of nanotechnology: National nanotechnology initiative funding, 2000-2004. *Environ. Sci. Technol*, 2006. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/es0515708> Acesso em: 15 de Outubro de 2022.

HAUPTMANN, M; LUBIN, J.H.; STEWART, P; HAYES, R; BLAIR, A. Mortality from solid cancers among workers in formaldehyde industries. *American Journal of Epidemiology*, v. 159, n. 12, 2004. Disponível em: <https://academic.oup.com/aje/article/159/12/1117/86113?login=false> Acesso em: 26 de Outubro de 2022.

HE, F; ZHAO, D. Preparation and characterization of a new class of starch-stabilized bimetallic nanoparticles for degradation of chlorinated hydrocarbons in water. *Environ. Sci. Technol.*, 2005. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es048743y> Acesso em: 28 de Outubro de 2022.

HOMOLA, J; PILIARIK, M. *Surface plasmon resonance (SPR) sensors*. Springer Series on Chemical Sensors and Biosensors, v. 4, 2006. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/5346_014 Acesso em: 02 de Novembro de 2022.

HUANG, Z; MANESS, P.C.; BLAKE, D.M.; WOLFRUM, E.J.; SMOLINSKI, S.L.; JACOBY, W.A. Bactericidal mode of titanium dioxide photocatalysis. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, v. 130, n. 2 - 3, 2000. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1010603099002051> Acesso em: 24 de Outubro de 2022.

JAIN, K. The role of nanobiotechnology in drug discovery. *Drug Discovery Today*, v. 10, n. 21, p. 1435-1442, 2005. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359644605035737> Acesso em: 07 de Outubro de 2022.

KOUTSOPOULOS, S; JOHANNESSEN, T; ERIKSEN, K.M.; FEHRMANN, R. Titania-supported Pt and Pt-Pd nanoparticle catalysts for the oxidation of sulfur dioxide. *Journal of Catalysis*, v. 238, n. 1, 2006. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0021951705004859> Acesso em: 24 de Outubro de 2022.

KUDO, T; NAKAMURA, Y; RUIKE, A. Development of rectangular column structured titanium oxide photocatalysts anchored on silica sheets by a wet process. *Research on Chemical Intermediates*, v. 29, 2003. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1163/156856703322539663> Acesso em: 30 de Outubro de 2022.

LAM, C.W.; JAMES, J.T.; McCLUSKEY, R; HUNTER, R.L. Pulmonary toxicity of single-wall carbon nanotubes in mice 7 and 90 days after intratracheal instillation. *Toxicological Sciences*, v. 77, n. 1, 2004. Disponível em: <https://academic.oup.com/toxsci/article/77/1/126/1711749?login=false> Acesso em: 30 de Outubro de 2022.

LONGO, E. Nanotecnologia. In: 56ª Reunião Anual da SBPC, 2002, Cuiabá, Anais. Disponível em: http://www.sbpcnet.org.br/livro/56ra/banco_conf_simp/textos/ElsonLongo.htm. Acesso em 04 de Março de 2022.

MAHAJAN, E. F.; ROOP, L. Nanotechnology legislation: Contradictory intent? US federal legislation on integrating societal concerns into nanotechnology research and development. *Science And Public Policy*, v. 33, n. 1, 2006. Disponível em: <https://academic.oup.com/spp/article-abstract/33/1/5/1642239?login=false> Acesso em: 14 de Outubro de 2022.

NASS, D. P. O Conceito de Poluição. *Revista Eletrônica de Ciências*. Número 13, 2002. Disponível em: http://www.cdcc.usp.br/ciencia/artigos/art_13/poluicao.html. Acesso em 10 de Agosto de 2022.

NETTO, C. G. C. M.; NAKAMURA, M.; ALEXIOU, A. D. P.; TOMA, H. E. Nanopartículas superparamagnéticas lipofílicas. 29ª Reunião da Sociedade brasileira de química, 2004. Disponível em: <http://sec.s bq.org.br/cdrom/29ra/resumos/T0636-1.pdf> Acesso em: 20 de Outubro de 2022.

NGOMSIK, A. F.; BEE, A.; DRAYE, M.; COTE, G.; CABUIL, V. Magnetic nano- and microparticles for metal removal and environmental applications: a review. *Comptes Rendus*

Chimie, v. 8, n. 6-7, 2005. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1631074805000081> Acesso em: 10 de Outubro de 2022.

OBERDÖRSTER, G; OBERDÖRSTER, E; OBERDÖRSTER, J. Nanotoxicology: an emerging discipline evolving from studies of ultrafine particles. *Environmental Health Perspectives*, v. 113, 2005. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1257642/> Acesso em: 02 de Outubro de 2022.

PERA-TITUS, M; GARCÍA-MOLINA, V; BANOS, M.A.; GIMÉNEZ, J; ESPLUGAS, S. Degradation of chlorophenols by means of advanced oxidation processes: a general review. *Applied Catalysis B: Environmental*, v. 47, n. 4, 2004. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926337303004533> Acesso em: 24 de Outubro de 2022.

PEREIRA, R. S. Identificação e caracterização das fontes de poluição em sistemas hídricos. *Revista Eletrônica de Recursos Hídricos. IPH-UFRGS*. v. 1, n. 1. p. 20 - 36. 2004. Disponível em: <file:///C:/Users/usu%C3%A1rio/Downloads/TCC/Polui%C3%A7%C3%A3o%20A%20gua/polui%20ao%20agua.pdf>. Acesso em: 02 de setembro de 2022.

PIBIRI, M.C.; GOEL, A; VAHEKENI, N; ROULET, C.A. Indoor air purification and ventilation systems sanitation with essential oils. *International Journal of Aromatherapy*, v. 16, n. 3 - 4, 2006. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0962456206000580> Acesso em: 31 de Outubro de 2022.

QUIM, F. NANOTECNOLOGIA E O MEIO AMBIENTE: PERSPECTIVAS E RISCOS. *Nova*, v. 27, n. 6, 2004. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/5zZPsK4RdkjGGfFrhWsLbjd/?lang=pt> Acesso em: 30 de Setembro de 2022.

QUINA, F. H. Nanotecnologia e o meio ambiente: perspectivas e riscos. *Quím. Nova*, v. 27, n. 6, 2004. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/5zZPsK4RdkjGGfFrhWsLbjd/?lang=pt> Acesso em: 12 de Outubro de 2022.

SAVAGE, N; DIALLO, M.S. Nanomaterials and water purification: opportunities and challenges. *Journal of Nanoparticle Research*, v. 7, 2005. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11051-005-7523-5> Acesso em: 11 de Outubro de 2022.

SAVITCHCHEVA, O; OKABE, S. Alternative indicators of fecal pollution: relations with pathogens and conventional indicators, current methodologies for direct pathogen monitoring and future application perspectives. *Water Research*, v. 40, n. 13, 2006. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S004313540600265X> Acesso em: 03 de Novembro de 2022.

SHORTLE, J.S.; ABLER, D.G. *Environmental Policies for Agricultural Pollution Control*, 2001. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=b7zM9uJv-NUC&oi=fnd&pg=PA1&dq=water+pollution+caused+by+agriculture+activity&ots=xxdL5xsE4>

Q&sig=SxE2jXn0a4_SiGCm8SGrD_R9BtM#v=onepage&q=water%20pollution%20caused%20by%20agriculture%20activity&f=false Acesso em: 29 de Setembro de 2022.

SINGH, S.P.; MA, L.Q.; HARRIS, W.G. Heavy metal interactions with phosphatic clay: sorption and desorption behaviour. *Journal of Environmental Quality*, 2001. Disponível em: <https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2134/jeq2001.1961> Acesso em: 23 de Outubro de 2022.

STARK, P.C.; BURGE, H.A.; RYAN, L.M.; MILTON, D.K.; GOLD, D.R. Fungal levels in the home and lower respiratory tract illnesses in the first year of life. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, v. 168, n. 2, 2003. Disponível em: <https://www.atsjournals.org/doi/full/10.1164/rccm.200207-730OC> Acesso em: 27 de Outubro de 2022.

Swiss Reinsurance Company. Nanotechnology: Small matter, many unknowns, 2004. Disponível em: <https://www.nanowerk.com/nanotechnology/reports/reportpdf/report93.pdf> Acesso em: 10 de Novembro de 2022.

TOMA, E. H. Interfaces e organização da pesquisa no Brasil: da química à nanotecnologia. *Quím nova*, v. 28, 2005. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/LwbShCVkz4VxvR6dP78kn3j/?lang=pt> Acesso em: 15 de Outubro de 2022.

ULBRICHT, M. Advanced functional polymer membranes. *Polymer*, v. 47, n. 7, 2006. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032386106001303> Acesso em: 22 de Outubro de 2022.

WEST, J.L.; HUBBELL, J.A. Polymeric Biomaterials with Degradation Sites for Proteases Involved in Cell Migration. *Macromolecules*, 1999. Disponível em: <https://journal.materialsscience.net/wp-content/uploads/2019/03/west1999.pdf> Acesso em: 14 de Outubro de 2022.

YANG, J; MOSBY, D.E.; CASTEEL, S.W.; BLANCHARD, R.W. Lead immobilization using phosphoric acid in a smelter-contaminated urban soil. *Environ. Sci. Technol.*, 2001. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es001770d> Acesso em: 11 de Outubro de 2022.

YE, X. R.; DARIO, C.; WANG, C.; TALBOT, J. B.; JIN, S. Room temperature solvent-free synthesis of monodisperse magnetite nanocrystals. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2006. Disponível em: <http://www.daraio.caltech.edu/publications/Daniel%20Solvent-free.pdf> Acesso em: 12 de Outubro de 2022.

YOUNG, P; LU, Y.J.; TERRILL, R; LI, J. High-sensitivity NO₂ detection with carbon nanotube-gold nanoparticle composite films. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, v. 5, n. 9, 2005. Disponível em: <https://www.ingentaconnect.com/contentone/asp/jnn/2005/00000005/00000009/art00020> Acesso em: 05 de Outubro de 2022.

ZHANG, W.X. Nanoscale iron particles for environmental remediation: an overview. *Journal of Nanoparticle Research*, v. 5, 2003. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1025520116015> Acesso em: 22 de Outubro de 2022.