

JEAN LEITE TAVARES
RÔMULO MAGNO OLIVEIRA FREITAS
(ORGANIZADORES)

CIÊNCIA APLICADA PARA USO SUSTENTÁVEL DOS RECURSOS NATURAIS



editoraifrn



JEAN LEITE TAVARES
RÔMULO MAGNO OLIVEIRA FREITAS
(ORGANIZAÇÃO)

**CIÊNCIA
APLICADA
PARA USO
SUSTENTÁVEL
DOS RECURSOS
NATURAIS**



editora**ifrn**

NATAL - RN

2022

Presidente da República
Jair Messias Bolsonaro
Ministro da Educação
Victor Godoy Veiga
Secretário de Educação Profissional e Tecnológica
Tomás Dias Sant'ana



Reitor
José Arnóbio de Araújo Filho
Pró-Reitor de Pesquisa e Inovação
Avelino Aldo de Lima Neto
Coordenadora da Editora IFRN
Gabriela Dalila Bezerra Raulino

Conselho Editorial

Avelino Aldo de Lima Neto
Ana Lúcia Sarmiento Henrique
Anderson Luiz Pinheiro de Oliveira
Annaterra Teixeira de Lima
Cláudia Battestin
Claudia Pereira de Lima Parente
Danila Kelly Pereira Neri
Denise Cristina Momo
Diogo Pereira Bezerra
Elizomar de Assis Nobre
Emanuel Neto Alves de Oliveira
Emiliana Souza Soares
Francinaide de Lima Silva Nascimento
Gabriela Dalila Bezerra Raulino
Jean Leite Tavares
José Carlos Morgado

José Everaldo Pereira
Julie Thomas
Lenina Lopes Soares Silva
Luciana Maria Araújo Rabelo
Maria da Conceição de Almeida
Maria Jalila Vieira de Figueirêdo Leite
Marcelo Nunes Coelho
Marcio Monteiro Maia
Miler Franco D Anjour
Paulo Pereira da Silva
Rebeka Caroca Seixas
Renato Samuel Barbosa de Araujo
Rodrigo Luiz Silva Pessoa
Samuel de Carvalho Lira
Sílvia Regina Pereira de Mendonça

Projeto Gráfico, Diagramação e Capa
Miguel Leite

Revisão Linguística
Rodrigo Luiz Silva Pessoa

Prefixo editorial: Editora IFRN
Linha Editorial: Acadêmica
Disponível para *download* em:
<http://memoria.ifrn.edu.br>



Contato

Endereço: Rua Dr. Nilo Bezerra Ramalho, 1692, Tirol.
CEP: 59015-300, Natal-RN.
Fone: (84) 4005-0763 | E-mail: editora@ifrn.edu.br





Os textos assinados, no que diz respeito tanto à linguagem quanto ao conteúdo, não refletem necessariamente a opinião do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte. As opiniões são de responsabilidade exclusiva dos respectivos autores. É permitida a reprodução total ou parcial desde que citada a fonte.

C569 Ciência aplicada para uso sustentável dos recursos naturais / Jean Leite Tavares, Rômulo Magno Oliveira Freitas (organizadores). – Natal : IFRN, 2022.
300 p. ; PDF

Inclui: Bibliografia.
ISBN: 978-65-86293-91-3

1. Ciência do meio ambiente. 2. Recursos naturais. 3. Sustentabilidade. I. Tavares, Jean Leite. II. Freitas, Rômulo Magno Oliveira. III. Título.

IFRN/SIBi

CDU 502/504

Divisão de Serviços Técnicos
Catalogação da publicação na fonte elaborada pela Bibliotecária
Marise Lemos Ribeiro – CRB-15/418

Esta obra foi submetida e selecionada por meio de edital específico para publicação pela Editora IFRN, tendo sido analisada por pares no processo de editoração científica.



SUMÁRIO

08 | Apresentação

10 | Capítulo 1 - Caracterização da radiação natural das areias do Rio Potengi no trecho equivalente ao Município de São Gonçalo do Amarante-RN

42 | Capítulo 2 - Concentração de radônio das areias do Rio Potengi, utilizadas na construção civil da Região Metropolitana de Natal-RN

77 | Capítulo 3 - Análise da gestão de resíduos de construção civil em Natal-RN usando a Matriz Swot

102 | Capítulo 4 - Poluição global de ambientes marinhos: Encalhes de resíduos sólidos internacionais No Litoral Do Rio Grande Do Norte, Brasil

119 | Capítulo 5 - Avaliação Da Eutrofização Do Estuário Do Rio Potengi Através Do Método Trix

146 | Capítulo 6 - Viabilidade Do Reúso De Águas Residuárias Para A Recarga Artificial De Aquífero

184 | Capítulo 7 - Avaliação Dos Riscos À Saúde Humana Associados Aos Trihalometanos Em Água Tratada

208 | Capítulo 8 - Análise Dos Recursos Da Biomassa Da Cana-De-Açúcar Na Geração De Energia Elétrica No Brasil

234 | Capítulo 9 - Energia Fotovoltaica no Brasil: Uma Oportunidade para o Desenvolvimento Sustentável

266 | Capítulo 10 - Energia Eólica: Aplicações, Impactos e Perspectivas



APRESENTAÇÃO

O Programa de Pós-Graduação em Uso Sustentável dos Recursos Naturais (PPgUSRN) da Diretoria Acadêmica de Recursos Naturais (DIAREN) do *campus* Natal - Central IFRN foi iniciado em 2015 e tem como foco principal o desenvolvimento de pesquisas e produtos técnicos e tecnológicos para o uso mais eficiente e sustentável dos recursos naturais no âmbito de um programa profissional de pós-graduação *stricto sensu*.

Os primeiros 5 anos do PPgUSRN trouxeram uma evolução nítida na qualidade das pesquisas e sua aplicabilidade. Os trabalhos que compõem a presente obra ilustram o elevado nível das pesquisas desenvolvidas no programa e seu potencial de impacto na solução de problemas sociais e ambientais.

A presente publicação, intitulada “Ciência Aplicada para Uso Sustentável dos Recursos Naturais”, traz conteúdo que ilustra a vocação do PPgUSRN para o desenvolvimento de pesquisas

aplicadas com potencial de impacto direto na sociedade. Em seus 10 capítulos, são apresentados estudos voltados para sustentabilidade do uso dos recursos naturais, enfatizando as temáticas de diagnóstico ambiental, gestão de resíduos sólidos e energias renováveis, em conformidade com os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da agenda 2030 da ONU.

Assim, essa obra constitui literatura fundamental para estudantes de graduação, pós-graduação, pesquisadores e demais profissionais das ciências ambientais que desejem se aprofundar na área.

Por fim, gostaríamos de agradecer a todos os autores pelo esforço e dedicação na elaboração da presente obra e torcemos aqui para as dificuldades atuais relacionadas ao incentivo à pesquisa científica sejam superadas e que tenhamos, nos próximos 5 anos, um ambiente cada vez mais propício para o desenvolvimento de outras pesquisas com o potencial de melhorar a qualidade de vida da população, com foco na sustentabilidade e seus diversos aspectos.

Os organizadores

CAPÍTULO I



CARACTERIZAÇÃO DA RADIAÇÃO NATURAL DAS AREIAS DO RIO POTENGI NO TRECHO EQUIVALENTE AO MUNICÍPIO DE SÃO GONÇALO DO AMARANTE-RN

OZENILDO GIL SILVA DE SOUZA

MÁRIO TAVARES CAVALCANTI DE OLIVEIRA NETO

INTRODUÇÃO

Tendo em vista que nós recebemos diariamente quantias significativas de radiação, essa exposição é algo comum, seja por fontes naturais ou artificiais.

Como principais fontes naturais, podemos citar a emissão cósmica proveniente da formação das estrelas e dos derivados de elementos constituintes da formação da crosta terrestre, os radionuclídeos (OKUNO, 2013).

Já as fontes artificiais de radiação são aquelas provenientes da manipulação antrópica, como os reatores nucleares e os aceleradores de partículas, em tubos de raios X, utilizados em hospitais e presentes em alguns tipos de alimentos.

A radiação é uma energia que se propaga de uma fonte base ou emissora através de um meio, classificada como energia em trânsito. Pode ainda se apresentar como forma de onda eletromagnética (OKUNO, 2013).

Desse modo, radiação significa a propagação de energia de um ponto a outro no espaço ou em meio material. Assim, qualquer radiação pode causar risco à saúde humana, levando em consideração o tempo e a intensidade de exposição (BELLINTANI e GILI, 2002).

Neste trabalho, estamos interessados nas fontes naturais de radiação, ou seja, nos materiais radioativos de ocorrência natural, chamados de NORM (Naturally Occuring Radioactive Material), especialmente naqueles originados dos sistemas geológicos, isto é, nos minerais e rochas.

Para Eisenbud e Gesell (1997), os radionuclídeos primordiais estão ligados à própria formação e origem da terra, ou seja, são aqueles provenientes da crosta terrestre, e existem até os dias atuais, uma vez que possuem isótopos radioativos com meia vida longa, como no caso dos elementos

K-40 (potássio) e Rb-87 (rubídio), além dos elementos importantes ambientalmente, como os das séries radioativa do urânio (U) e tório (Th), todos eles encontrados principalmente nas rochas e solos. Existem ainda os radionuclídeos secundários, um importante elemento natural causador de impactos radiológicos, que são aqueles provenientes dos produtos e do decaimento do urânio e do tório.

Os radionuclídeos primordiais como urânio, tório e potássio concentram-se principalmente nas rochas ígneas (magmáticas) ácidas, como, por exemplo, o granito, o que não acontece nas rochas básicas e ultrabásicas. Já as rochas sedimentares são caracterizadas pelo seu baixo nível de radioatividade, com exceção dos arenitos e das rochas fosfáticas, que apresentam concentrações significativamente altas de radionuclídeos naturais (ROCHA, 2012).

Estudar esses três elementos é de fundamental importância, uma vez que o urânio, o tório e o rádio são os precursores do radônio, estando distribuídos em diferentes concentrações na crosta terrestre. Essa variação nas concentrações se dá principalmente de acordo com as interferências físicas ocorridas no ambiente e com o tipo de rocha e de solo da região (NETO e ROCHA, 2010).

Estudos indicam que a presença dos radionuclídeos naturais, principalmente aqueles que

emitem radiação ionizante, pode ocasionar prejuízos para a saúde humana. Dessa forma, verifica-se a necessidade de monitorar a exposição da população sobre esses elementos, já que são encontrados em grandes quantidades no meio ambiente.

No Brasil, diversos estudos avaliam o nível de radioatividade natural em diferentes tipos de ambientes. Podemos citar os estudos de Ferreira (2013), de Cavalcante (2012) e de Oliveira (2006), que fazem a identificação dos elementos radioativos, principalmente do urânio, do tório e do potássio, além de outros, como o rádio e o radônio presentes no ambiente, em rochas graníticas da região metropolitana de Curitiba, em rochas magmáticas e sedimentares da cidade de Ribeirão Preto e em solos do estado de São Paulo, utilizando métodos da espectrometria gama para a caracterização dos elementos.

Como produto mineral, as areias formadas a partir da fragmentação de rochas por ações do vento e da água podem apresentar níveis de radioatividade, carregadas a partir da rocha-base (ou mãe) da qual é oriunda.

Um dos principais minerais com que o homem tem contato são as areias, sejam elas oriundas de depósitos aluvionares ou da zona costeira, principalmente de dunas. Essas areias são utilizadas como agregados da construção ci-

vil, na construção de casas, escolas, prédios, entre outros.

Diante de tal problemática, foi realizado um estudo sobre a temática da caracterização da radiação natural, tendo como referência empírica as areias do rio Potengi, no trecho correspondente ao município de São Gonçalo do Amarante, no estado do Rio Grande do Norte.

Para tanto, a pesquisa foi norteada pelas respectivas indagações: que fatores ambientais estão associados à presença de elementos radioativos na localidade? E quais os elementos e a concentração de radiação natural emanada pelas areias do rio Potengi?

Na tentativa de responder ao questionamento central da pesquisa, o objetivo geral desse estudo foi o de analisar os principais fatores ambientais associados à presença de elementos radioativos no recorte geográfico supracitado. De modo específico, objetivou-se identificar os principais elementos e mensurar a concentração de radiação natural emanada pelas areias, além da sua distribuição ao longo do rio Potengi.

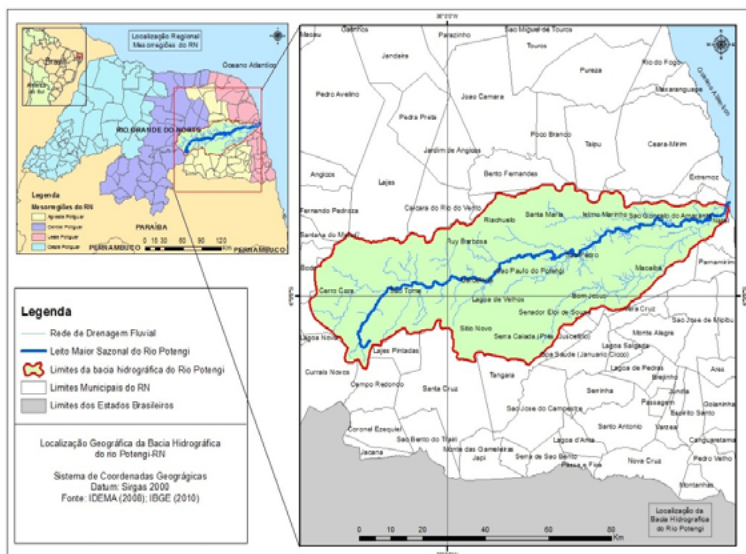
CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O rio Potengi, área objeto de estudo, é o principal rio da bacia hidrográfica homônima, lo-

calizada no estado do Rio Grande do Norte, especificamente em três mesorregiões: Central, Agreste e Leste Potiguar. A bacia contempla as microrregiões Serra de Santana, Borborema Potiguar, Agreste Potiguar, Macaíba e Natal, numa área total equivalente a 410 hectares, correspondente à parte dos municípios de Cerro Corá, Lajes Pintadas, São Tomé, Sítio Novo, Serra Caiada, Lagoa de Velhos, Barcelona, Ruy Barbosa, Riachuelo, São Paulo do Potengi, São Pedro, Santa Maria, Senador Elói de Souza, Bom Jesus, Ielmo Marinho, Macaíba, São Gonçalo do Amarante e Natal. Essa bacia faz parte de um complexo de cinco bacias hidrográficas orientadas para o litoral oriental, como as bacias dos rios Ceará-Mirim, Potengi, Trairi, Jacu e Curimataú.

O rio Potengi (leito maior sazonal) tem uma extensão de aproximadamente 176 km de extensão, desde a sua nascente, localizada na serra de Santana, na mesorregião Central Potiguar, aproximadamente no município de Cerro Corá, até sua foz, situada na cidade de Natal, na mesorregião Leste Potiguar. Assim, o rio corta diversos municípios, como a nascente Cerro Corá; passando por São Tomé, São Paulo do Potengi, Ielmo Marinho, São Gonçalo do Amarante e Macaíba; até desaguar em seu estuário, já no município de Natal (Figura 01).

Figura 01 – Localização da bacia hidrográfica do rio Potengi.



Fonte: elaboração dos autores (2021).

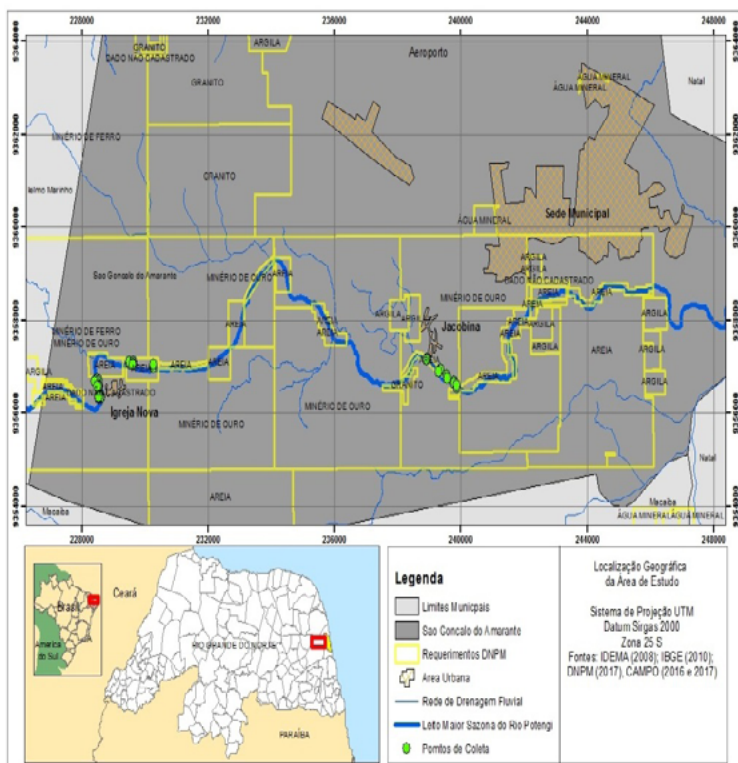
O rio Potengi apresenta-se como o terceiro rio mais importante do estado em termos de área e de abastecimento d'água, ficando atrás apenas dos rios Piranhas-Açu e Apodi-Mossoró. Assim, ele se destaca por sua localização, que corta vários municípios da região metropolitana de Natal, a região mais populosa do estado; e pela sua história, já que foi por ele onde se deu a entrada dos colonizadores do estado do então Rio Grande. Além disso, chamam atenção os seus diversos usos ao longo do tempo, pois esses vão além do

abastecimento d'água e da irrigação em áreas rurais, incluindo também exploração das areias depositadas em seu leito, principalmente para uso na construção civil.

A exploração de areias que atendem ao setor da construção civil se dá em depósitos de natureza aluvionar, que compreendem a exploração nos leitos ativos dos rios, como em planícies de inundação e em terraços fluviais. Atualmente, os principais locais de exploração de areias para a construção civil da região metropolitana de Natal se localizam nos sedimentos aluvionares de idade quaternária das bacias do rio Potengi e do rio Trairi (FERREIRA NETO, 2015).

A extração das areias no rio Potengi se dá nos municípios próximos da área consumidora, ou seja, nas proximidades da região metropolitana de Natal - RMN, principalmente nos municípios de Ielmo Marinho e São Gonçalo do Amarante. Este último, por se tratar de um município com maior extensão territorial da RMN e pela presença de grande número de requerimentos no Departamento Nacional de Produção Mineral - DNPM para exploração mineral, dentre eles: a areia, o ouro, granito, argila e minério de ferro, com destaque para o número de requerimentos para exploração de areia no leito do rio Potengi, como pode ser observado na Figura 02 abaixo.

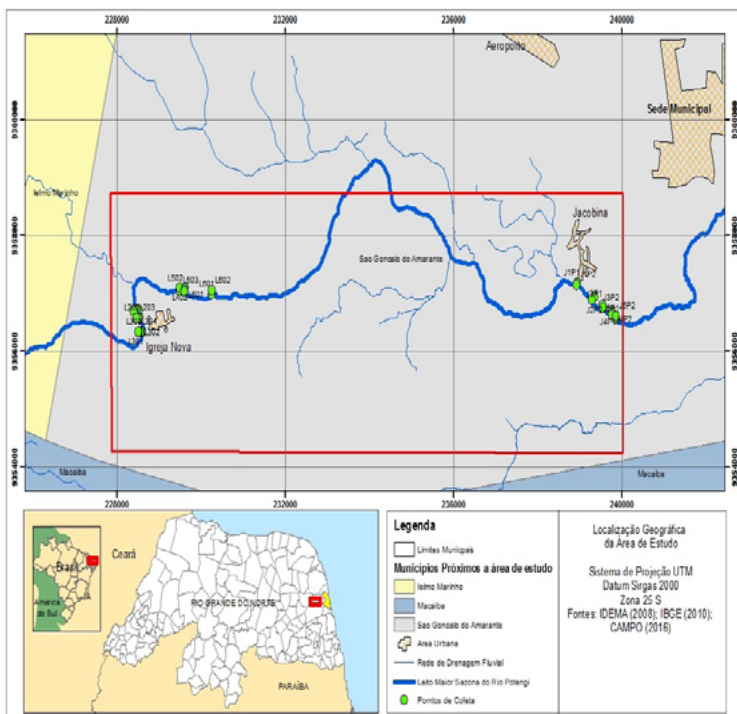
Figura 02 – Requerimentos minerais no município de São Gonçalo do Amarante-RN.



Fonte: elaboração dos autores (2021).

A partir desses dados, foi definido um recorte espacial de análise, considerando uma das regiões que apresentam um histórico de exploração de areia no leito do rio Potengi, como no caso das localidades de Igreja Nova e Jacobina, ambas pertencentes ao município de São Gonçalo do Amarante-RN (Figura 03).

Figura 03 – Localização da área de estudo no município de São Gonçalo do Amarante-RN.



Fonte: elaboração dos autores (2021).

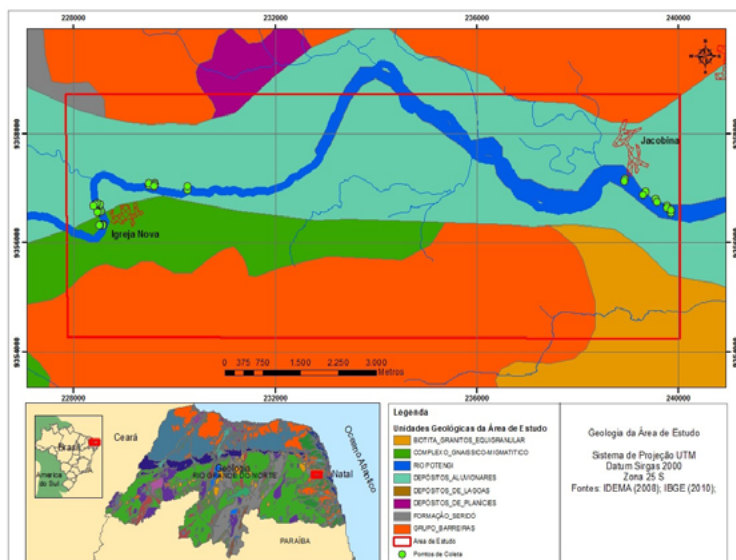
Vale destacar que as informações aqui apresentadas têm como principal referência o documento “Perfil do seu município, Rio Grande do Norte”, publicado pelo Instituto de Desenvolvimento Sustentável e Meio Ambiente do Rio Grande do Norte (IDEMA) no ano de 2013, especificamente em relação ao município de São Gonçalo do Amarante. Na tentativa de caracterizar a área de estudo com

maior detalhe, lançamos mão dos arquivos vetoriais dos aspectos do meio físico do estado, também disponibilizados pelo IDEMA, e trabalhados através do sistema de informação geográfica (SIG), no programa ArcGis 10.1, que auxiliou na confecção das figuras dos aspectos ambientais.

Geologicamente, a região que abrange o município de São Gonçalo do Amarante encontra-se inserida na província Borborema, sendo constituída pelos litotipos do Complexo Presidente Juscelino, da Formação Seridó da Suíte Natal, dos sedimentos do Grupo Barreiras e dos depósitos colúvio-eluviais e aluvionares. Na porção Oeste do município, nas áreas mais baixas e erodidas nos leitos dos principais rios, afloram rochas pertencentes ao Embasamento Cristalino, com rochas do complexo gnáissico pegmatítico (RIO GRANDE DO NORTE, 2013).

Na área de estudo, no trecho do rio Potengi correspondente às localidades de Igreja Nova e Jacobina, a geologia é constituída por características semelhantes às citadas pelos relatórios do IDEMA (2013), com destaque à presença do complexo gnáissico pegmatítico, biotita graníticos equigranulares, bem como a presença da formação Seridó e sedimentos do grupo Barreiras e os depósitos aluvionares, de lagoas e de planícies (Figura 04).

Figura 04 – Geologia da área de estudo.



Fonte: elaboração dos autores (2021).

Geomorfologicamente, essa região é diretamente ligada à geologia local, apresentando, assim, relevos formados por planícies fluviais caracterizadas pela influência da bacia hidrografia do rio Potengi, com ambientes rebaixados nas áreas próximas ao rio Potengi e a deposição de lagoas (PFALTZGRAFF, 2010).

O clima da região é caracterizado como tropical chuvoso com verão seco, apresentando período chuvoso entre os meses de fevereiro e setembro. A temperatura média anual gira em torno dos 27°C, enquanto a precipitação pluviométrica

regional varia de 1.200 a 1.700 milímetros.

A vegetação local é subdividida em quatro sistemas: vegetação de floresta subperenifolia (constituída por árvores sempre verdes, com troncos delgados e folhas largas); floresta subcaducifolia (cuja vegetação perde suas folhas no período seco); florestas de tabuleiro litorâneos (cuja vegetação sofreu intervenção antrópica, e por isso apresenta espécies de replantadas); e manguezais (sistema ecológico costeiro tropical com espécies de mangue e de campo de várzea, caracterizada como uma vegetação que ocorre ao longo das várzeas úmidas dos rios e constitui geralmente espécies herbáceas) (RIO GRANDE DO NORTE, 2013).

Em termos hidrológicos, o município de São Gonçalo do Amarante está quase totalmente inserido na bacia hidrográfica do rio Potengi: encontra-se 82,65% dentro desta bacia e 17,35% na bacia hidrográfica do rio Doce. Diante disso, é possível observar a importância do rio Potengi, que abrange toda área de estudo (RIO GRANDE DO NORTE, 2013).

Em termos populacionais, São Gonçalo do Amarante é o terceiro município mais populoso da RMN, com 87.668 habitantes, perdendo apenas para os municípios de Parnamirim e Natal, respectivamente com populações de 202.456 e 803.739 habitantes. Dos doze municípios que compõem a RMN, São Gonçalo do Amarante possui a 6ª

colocação em termos de extensão territorial (área), com uma área de 249,124 Km², ficando atrás de Ceará-Mirim, Macaíba, Ielmo Marinho, Nísia Floresta e São José do Mipibu, de acordo com o Censo Demográfico do IBGE (2010).

ABORDAGEM METODOLÓGICA

O presente trabalho adota uma metodologia de caráter empírico, por meio da qual foram adotados diversos procedimentos técnicos que contribuíssem na obtenção dos objetivos elencados. Assim, a pesquisa foi dividida em quatro fases.

A primeira trata-se da pesquisa bibliográfica em livros de leitura corrente em obras de divulgação, bem como em livros de referência de caráter informativo e remissivo, como dicionários e enciclopédias, além de publicações periódicas em revistas, coletadas principalmente do portal da Capes, Scielo, dentre outras revistas científicas. Nessa fase, foi imprescindível, também, a consulta em dissertações e teses já publicadas e aprovadas, extraídas principalmente do portal Domínio Público, bem como de bancos de dados das universidades brasileiras.

Em um segundo momento, a pesquisa de campo deu suporte para a observação direta do fenômeno estudado, com medições, para a cole-

ta de dados radiométricos (radiação natural), utilizando equipamento cintilômetro RS-125 Super-S-PEC e RS-220 Super-IDENT.

Após essa coleta, a terceira fase se deu com a distribuição dos dados no programa ArcGis 10.1, para a confecção das figuras de distribuição e concentração dos elementos radioativos.

Já a quarta e última fase se deu com a sistematização dos dados e a discussão destes.

Para a coleta de dados, pretendeu-se inicialmente obter uma quantidade de pontos de medição que indicasse a característica radiométrica das areias depositadas no leito do rio Potengi, mais especificamente nas proximidades das comunidades rurais de Igreja Nova e Jacobina, caracterizadas como locais de grande exploração mineral no município de São Gonçalo do Amarante.

Para identificação dos elementos radioativos e medição de sua concentração, lançou-se mão do método radiométrico, já que este fornece dados a partir da medição de anomalias radioativas. Para obtenção desses dados, utilizou-se o aparelho conhecido como cintilômetro para contagem de gama total, cujo alvo é a detecção dos elementos radioativos tais como K (potássio), U (urânio) e Th (tório) (NETO e ROCHA, 2010).

Desse modo, é a partir dessa medição radiométrica que se pode eleger pontos com elementos

radioativos, pela presença de U, Th e K em depósitos minerais ou em ambientes geológicos associados à tantalita, columbita, cassiterita, wolfranita, terras raras, minerais de minério de pegmatitos e granitos (NETO e ROCHA, 2010).

Os aparelhos utilizados foram o cintilômetro RS-125 Super-SPEC, pertencente ao Grupo de Pesquisa Mineral do Departamento de Recursos Naturais do Instituto Federal do Rio Grande do Norte, *campus* Natal-Central. Ainda de acordo com Neto e Rocha (2010), esse equipamento nos fornece informações quanto à concentração de urânio, tório e potássio, os dois primeiros com unidades em partes por milhão (ppm) e o último em porcentagem. Além desses valores o aparelho fornece ainda o valor da dose ambiental em nGy, (Gray), ou seja, identifica a taxa de dose radioativa, bem como o isótopo que está emitindo a radiação em CPS (*Cintilações Por Segundo*).

Outro equipamento utilizado, o cintilômetro RS-220 Super-IDENT, ao contrário do RS-125, não mede o nível de U, Th e K nos minerais e solos. Contudo, identifica a taxa de dose radioativa e qual isótopo radioativo está emitindo radiação para o ambiente.

Para auxiliar esse levantamento de dados radiométricos, foi elaborada uma planilha de campo, para facilitar as anotações dos dados obtidos a partir

dos equipamentos citados. Nessa planilha constam informações de localização (coordenadas geográficas dos pontos de coleta de dados) e dados radiométricos como os de gama total, dose radiométrica, valores de urânio (ppm), tório (ppm) e potássio (porcentagem), além da presença de isótopos.

Neto e Rocha (2010) também indicam que com o cintilômetro RS 125 é possível medir em nGy (Gray) a quantidade de energia de radiação por unidade de massa e a presença de urânio e tório em partes por milhão (ppm) e potássio em porcentagem (%). Com o RS 220, foi medida a dose equivalente em cintilômetro (Sv), na qual se pode constatar que os minerais pesados presentes na areia possuem radioatividade proveniente do urânio e do tório, o que pode se constituir como um fator de risco ambiental.

Na tentativa de obtenção de dados mais precisos referentes à dose de radiação emanada pelas areias do rio Potengi, o equipamento foi configurado com um tempo de 120 (cento e vinte) segundos, aumentando o tempo de medição e análise dos níveis de radiação naquele ambiente. Além disso, cada ponto foi georreferenciado com GPS do modelo Etrex, a fim de obter as coordenadas geográficas de cada ponto, para posteriormente realizar o mapeamento no sistema de coordenadas SIRGAS 2000, atual sistema oficial brasileiro, e

a análise de cada valor obtido.

Para a coleta das amostras e de informações radiométricas, foram definidos uma malha experimental com pontos transversais ao leito maior sazonal do rio Potengi, principal local de extração de areia para uso na construção civil da Região Metropolitana de Natal. Esses cortes transversais seguiram o sentido Leste-Oeste do rio, que se deu em duas fases distintas no período mais seco e no período mais chuvoso na região estudada (Figura 05 e 06).

Figura 05 e 06 – Medição radiométrica nas areias do rio Potengi.

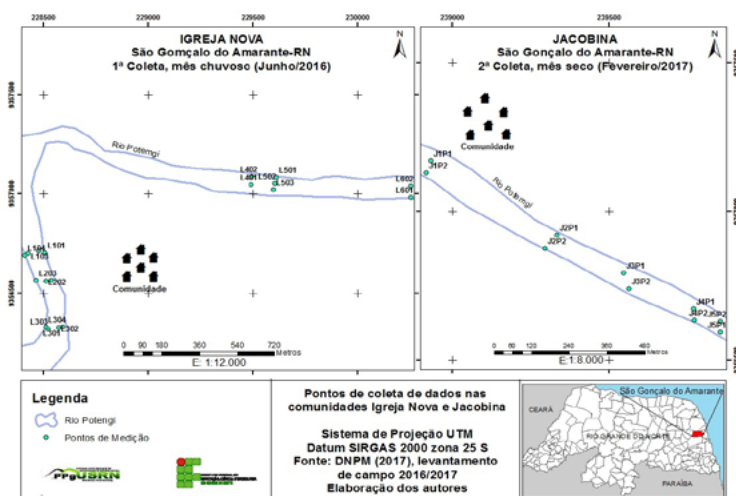


Fonte: elaboração dos autores (2021).

As coletas de campo se deram em duas etapas. A primeira ocorreu no dia 06 de junho de 2016, período de chuvas na região, em uma estação do ano definida como inverno, nas proximidades da comunidade Igreja Nova, no município de São Gonçalo do Amarante. Uma segunda coleta foi

realizada no dia 16 de fevereiro de 2017, no verão, período mais quente e seco na região, na comunidade conhecida como Jacobina, mais à jusante da área da primeira coleta (Figura 07).

Figura 07 – Pontos da primeira coleta na localidade Igreja Nova (estação chuvosa).



Fonte: elaboração dos autores (2021).

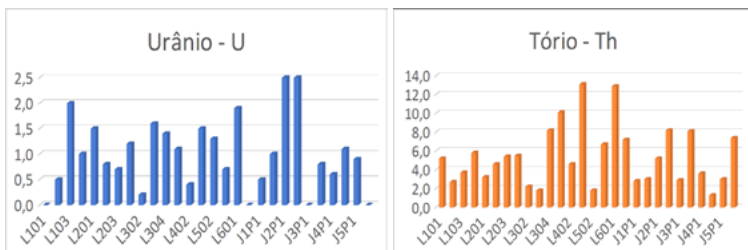
RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com os dados levantados no rio Potengi, mais especificamente nas comunidades Igreja Nova (definida como estação L) e Jacobina (Estação J), no município de São Gonçalo do Amarante, destacamos a presença de três isótopos radioativos

de urânio, tório e potássio, com valores a serem apresentados.

Foram levantadas informações em 28 pontos de medição, definidos como estação (em Igreja Nova e Jacobina). A partir das medições com o aparelho RS-220 Super-IDENT, não foram identificados outros isótopos além do Potássio-40 (K-40), sendo este o isótopo radioativo que está emitindo radiação para o ambiente. Os valores de urânio variam desde sua ausência em alguns pontos de amostragem até o valor de 2,5 ppm em outros trechos, tendo como média 1 ppm no trecho do rio estudado (Figura 08). Já em relação aos valores de tório, estes foram bem maiores, variando de 1,3 ppm a 13,1 ppm, ou seja, em média de 5,3 ppm no trecho inventariado. Já os valores de potássio foram muito baixos, variando de 0,2% a 1,3%, o que equivale a uma média de 0,7%.

Figura 08 – Gráficos com os valores de urânio e tório levantados.



Fonte: elaboração dos autores (2021).

Com base nos gráficos acima, notamos uma relação entre os diferentes períodos climáticos e os valores dos elementos radioativos de urânio e tório. Outro fator a se considerar é que os maiores valores de tório ocorrem nos pontos onde ocorre a extração de areia mecanizada, principalmente na comunidade Igreja Nova (Figura 09). Já onde a extração de areia é menor e ocorre de forma manual, os valores são menores (Figura 10). Tal fato denota que a interferência antrópica, com uso de equipamentos mais sofisticados, que utilizam combustíveis (extração mecanizada), além de degradar o ambiente local, causando erosão e desmatamento das áreas de preservação permanente - APP do rio, contribui para uma maior dose radioativa no mineral arenoso.

Figura 09 e 10 – Extração mecanizada (Igreja Nova) e extração manual (Jacobina).



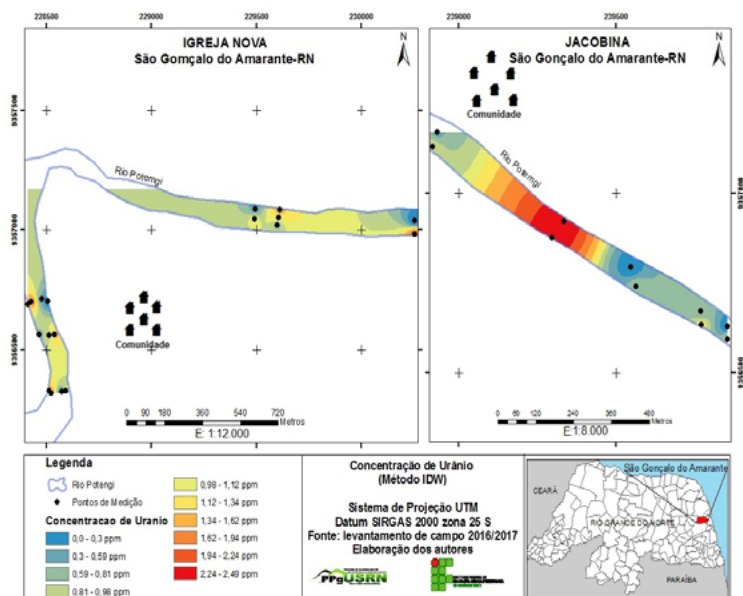
Fonte: elaboração dos autores (2021).

A concentração desses elementos se dá de forma espaçada ao longo do trecho envolvido. Tanto na comunidade Igreja Nova quanto na comunidade Jacobina, os valores de radiação natural de urânio, tório e potássio se dão em pontos próximos de locais com afloramento rochoso do complexo gnáissico pegmatítico e nas margens do rio, local onde ocorre a maior extração mineral.

TEORES DE URÂNIO (U)

A maior concentração de urânio não está atrelada à intervenção antrópica, uma vez que seus maiores valores estão dispostos na comunidade Jacobina (Figura 11), local onde foi identificada pouca exploração mineral de areia no leito do rio. Contudo, os valores maiores podem estar associados aos fatores climáticos do período da coleta de informações, ou seja, ao clima quente e seco, o que aumenta a incidência de radiação solar nas regiões próximas a linha do equador e a evaporação do corpo d'água, contribuindo na emanação de gases para o ambiente.

Figura 11 – Concentração de urânio no trecho do rio Potengi.



Fonte: elaboração dos autores (2021).

Na natureza, o urânio é encontrado na crosta terrestre, com concentração que varia de 0,008 a 8,2 ppm, principalmente em rochas e minérios, como em areias monazíticas, águas salgadas e doces (CAMARGO, 1994). Além disso, pode ser encontrado no ar, nas rochas, solos e em águas superficiais e subterrâneas. No entanto, se comparados com os valores apontados acima, os valores de urânio emitidos pelas areias do rio Potengi são baixos, já que atinge, em alguns pontos, a 2,5 ppm (maior valor obtido na comunidade Jacobina).

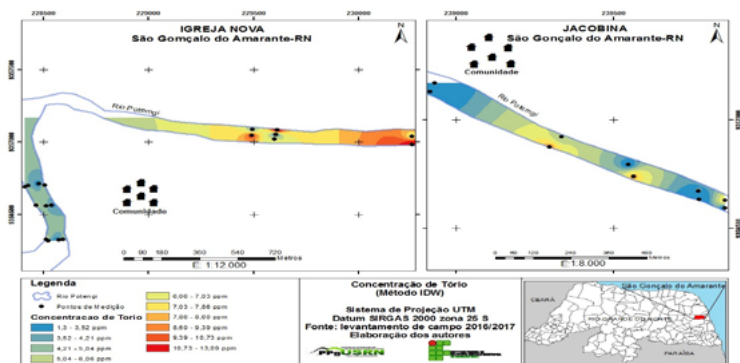
Para tanto, a presença de urânio pode estar ligada à presença de outros elementos, como o próprio tório e outros minérios de terras raras, provenientes das características de ambientes composto por rochas ígneas. Desse modo, por este elemento ser emissor de radiação alfa, pode oferecer riscos radiológicos e químicos à saúde humana e provocar doenças degenerativas, inclusive doenças no fígado e rins (QUEIROZ *et al.*, 2017).

TEORES DE TÓRIO (TH)

Na área estudada, o tório apresenta concentrações mais elevadas no período chuvoso nas areias da comunidade Igreja Nova (Figura 12), principalmente nos locais onde houve grande exploração de areia, de forma que o corpo d'água foi aflorado. Tal fato se dá devido ao Th ser de difícil dissolução no meio aquoso, o que corrobora para uma maior concentração no período de chuvas.

Ainda corroborando com essas informações, Queiroz *et al.* (2017) apontam que a presença de tório no ambiente está ligada principalmente aos aspectos morfológicos do solo e que o incremento de sua concentração se dá devido ao uso e à ocupação exacerbado do solo, contribuindo para o aumento do risco ambiental.

Figura 12 – Concentração de tório no trecho do rio Potengi



Fonte: elaboração dos autores (2021)

Com isso, o tório é encontrado naturalmente na superfície terrestre, com concentração que varia de 0,01 a 21,5 ppm. Está presente principalmente em areias monazíticas, rochas e alguns minerais (CAMARGO, 1994). Assim, comparados a esses valores, os teores de tório encontrados nas areias do rio Potengi variam entre baixo e médio, tendo como maior teor pontos com 13,1 ppm.

Contudo, a concentração de tório pode ser favorecida a partir de atividades antrópicas, como a mineração e o beneficiamento de alguns produtos industriais (QUEIROZ *et al.*, 2017). Esta afirmativa corrobora com a realidade identificada no rio Potengi, onde os maiores valores de tório se dão nos trechos em que há maior exploração mineral no leito do rio.

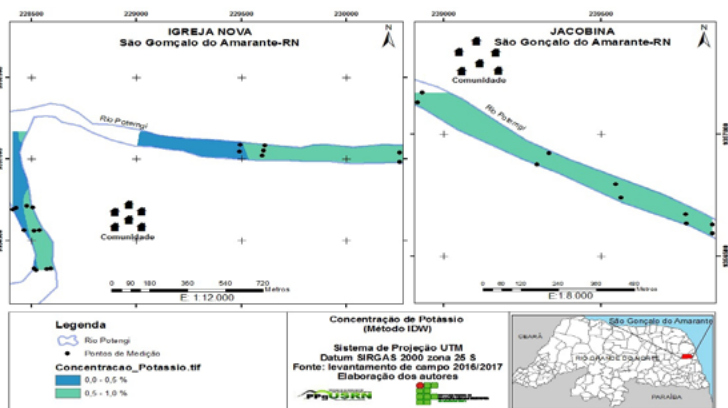
Um dos principais agravantes relacionados à

relação entre o urânio e o tório é que sua desintegração ao longo do tempo origina outro isótopo, como o radônio, que, uma vez inalado pelos seres humanos, possui características altamente cancerígenas.

TEORES DE POTÁSSIO (K)

Em relação ao potássio, apesar da sua identificação, valores com baixa concentração foram encontrados em todos os pontos de medição (Figura 13). Ao contrário do que ocorre com o urânio e o tório, o potássio pode ser encontrado em diversos tipos de rochas e solos, e é distribuído de forma ampla no ambiente. Assim, os seus níveis de concentração dependem do tipo de formação rochosa da região.

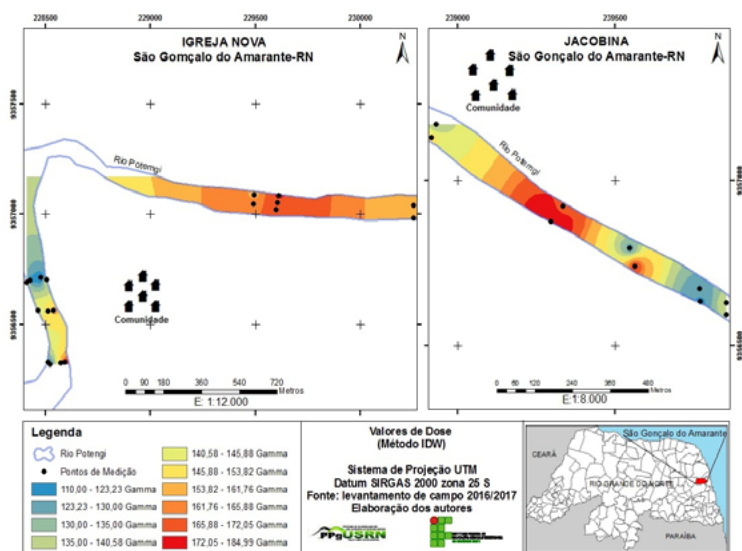
Figura 13 – Concentração de potássio no rio Potengi



Fonte: elaboração dos autores (2021)

Em relação à radiação gama emitida pelas areias do rio (Figura 14), podemos destacar que os elementos NORM apontam locais de maior emissão radioativas, seja por seu solo arenoso ou a partir da presença de afloramentos rochosos. No caso da área de estudo, os maiores teores de materiais com radiação se dão nos locais onde ocorrem interferências antrópicas no uso indiscriminado do solo, a partir do desenvolvimento da atividade de exploração mineral no leito do rio Potengi, como observado a partir dos teores de urânio e tório.

Figura 14 – Radiação gama nas areias do rio.



Fonte: elaboração dos autores (2021).

CONCLUSÕES

A análise radiométrica por meio dos equipamentos RS-125 Super-SPEC e RS-220 Super-IDENT apresentou-se como importante instrumento na identificação e mensuração de informações dos elementos responsáveis pela emissão de radiação das areias do rio Potengi.

Nas comunidades estudadas de Igreja Nova e Jacobina, os teores de urânio, tório e potássio variaram conforme a intensidade da interferência antrópica, e a presença desses elementos está atrelada a alguns fatores ambientais, como o tipo de rocha da região, a proximidade com esses corpos rochosos e a influência climática, que acabam por determinar maior ou menor concentração desses isótopos.

Vale destacar, ainda, que a presença do urânio pode estar ligada à presença de outros elementos, como o próprio tório e outros minérios de terras raras, provenientes das características de ambientes compostos por rochas ígneas. Assim, avaliamos como necessária a realização de estudos radiométricos comparativos entre diferentes tipos de rochas.

Por sua vez, a presença do tório é favorecida na área estudada a partir do desenvolvimento de atividades antrópicas, como a intensa atividade mineral, mais especificamente na exploração de areia no leito do rio Potengi.

Portanto, é necessário dar uma atenção especial a essas areias do rio Potengi, uma vez que, apesar de apresentarem baixos a médios teores de urânio e tório, o seu decaimento radioativo ao longo do tempo pode originar o gás radônio, principal fonte de radiação natural e conhecido emissor de câncer. Tendo em vista que essas areias são utilizadas na construção de casas, prédios, escolas e outros ambientes, verificamos que podem apresentar um fator de risco para a população em geral.

REFERÊNCIAS

BELLINTANI, Sandra. Aparecida; GILI, Fátima das Neves. Noções básicas de proteção radiológica. **Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares**. IPEN, 2002. Disponível em: www.engeworks.com.br/arquivos/proteção%radiologica.pdf. Acesso em: 17 out. 2015.

CAMARGO, Iara Maria Carneiro. **Determinação da concentração de isótopos naturais de urânio e tório em amostras de água**. Dissertação (Mestrado em Ciências na área Nuclear) – Comissão Nacional de Energia Nuclear. Instituto de pesquisa energética e nucleares, CDTN/IPEN, São Paulo, 1994.

EISENBUD, Merrill; GESELL, Thomas. **Environmental radioactivity**. San Diego, Califórnia, 1997.

CAVALCANTE, Fernanda. **Avaliação das doses efetivas e efetivas coletivas da radiação natural na região de Ribeirão Preto (SP)**. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto. Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, 2012.

FERREIRA, Ademar de Oliveira. **Avaliação da radioatividade natural em algumas rochas graníticas do estado do Paraná e sua utilização na construção civil**. Tese (Doutorado em Ciência na área Nuclear) – Comissão Nacional de Energia Nuclear. Instituto de pesquisa energéticas e nucleares, CDTN/IPEN, São Paulo, 2013.

FERREIRA NETO, Manoel Henrique. **Projeto materiais de construção civil da Região Metropolitana de Natal**. Recife: CPRM, 2015.

NETO, Mário Tavares de Oliveira Cavalcanti; ROCHA, Alexandre Magno Rocha da. **Noções de prospecção e pesquisa mineral para técnicos de geologia e mineração**. Natal: Editora IFRN, 2010.

OKUNO, Emico. Efeitos biológicos das radiações ionizantes: acidente radiológico de Goiânia. São Paulo-SP. **Revista Estudos Avançados**, v. 27, n. 77, 2013. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/ea/v27n77/v27n77a14.pdf>. Acesso em: 06 dez. 2016.

OLIVEIRA, Danillo Silva de. **Um estudo sobre desequilíbrio radioativo da série do urânio em amostras de solo.** Dissertação (Mestrado em Geofísica) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas – Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

OLIVEIRA, Flávia Lopes; MELLO, Edson Farias. A mineração de areia e os impactos ambientais na bacia do rio São João, RJ. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 37, n. 2, p. 374-389, junho, 2007.

PFALTZGRAFF, Pedro Augusto dos Santos. **Geodiversidade do estado do Rio Grande do Norte.** Recife: CPRM, 2010.

QUEIROZ *et al.* Estudo sobre os teores de tório, urânio e potássio nas águas superficiais e sedimento marginal do Rio Piracicaba, Minas Gerais, Brasil. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 22, n. 2, p. 371-380, mar/abr, 2017.

RIO GRANDE DO NORTE. Instituto de Desenvolvimento Sustentável e Meio Ambiente do Rio Grande do Norte (IDEMA). **Perfil do seu município – São Gonçalo do Amarante.** Coordenadoria de Estudos Socioeconômicos: Natal, 2013.

ROCHA, Edílson Accioly. **Avaliação da taxa de dose devido aos granitos ornamentais em am-**

bientes públicos e privados na cidade do Recife-Pernambuco-Brasil. Tese (Doutorado em Tecnologias Energéticas e Nucleares) – Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2012. Disponível em: <http://repositorio.ufpe.br/bitstream/handle/123456789/12452/Tese%20de%20Ed%C3%ADson%20Accioly%20Rocha%20DEN.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 06 maio 2017.

CAPÍTULO II



CONCENTRAÇÃO DE RADÔNIO DAS AREIAS DO RIO POTENGI, UTILIZADAS NA CONSTRUÇÃO CIVIL DA REGIÃO METROPOLITANA DE NATAL-RN

OZENILDO GIL SILVA DE SOUZA

MÁRIO TAVARES CAVALCANTI DE OLIVEIRA NETO

INTRODUÇÃO

Desde os primórdios, nós, seres humanos, e o ambiente em que vivemos, estamos expostos a diferentes tipos de radiação, seja ela derivada de fontes naturais ou artificiais, especialmente a radiação solar e aquelas emanadas de solos, rochas, água e ar (PETTA e CAMPOS, 2013). Uma das principais fontes de radiação natural é proveniente do radônio (Rn^{222}), que é encontrado em materiais da construção civil, tanto em agregados como em material de cantaria, mármore, granitos e cimento, como também nos solos e nas rochas (BELLINTANI e GILI, 2002).

Por outro lado, as fontes naturais de radiação são oriundas dos raios cósmicos, principalmente do sol e de radionuclídeos originados nos sistemas geológicos.

Assim, as rochas magmáticas, metamórficas e sedimentares emitem radiação e contêm urânio, e nesse caso, o urânio acaba emitindo continuamente radônio para o ambiente (FIANCO, 2011). Desse modo, a concentração de radônio é encontrada nas rochas sedimentares e nos solos, principalmente nas rochas bauxíticas, fosfáticas, bentoníticas e em sedimentos arenosos (MUJALLI, 2015).

Os radionuclídeos primordiais como urânio, tório e potássio se concentram principalmente nas rochas ígneas (magmaicas) ácidas, como, por exemplo, o granito, o que não acontece nas rochas básicas e ultrabásicas. Já as rochas sedimentares são caracterizadas pelo seu baixo de nível de radioatividade, com exceção dos arenitos e das rochas fosfáticas, que apresentam concentrações significativamente altas de radionuclídeos naturais (MUJALLI, 2015).

Por ser um gás, o radônio pode ser encontrado no ambiente humano, seja ele urbano ou rural, através do solo, de mananciais e de construções, podendo, assim, trazer prejuízos para a saúde das pessoas que têm contato com teores de radônio.

O ambiente estudado, as areias do rio Potengi, pode ser uma das principais fontes de radônio, e estas areias são transportadas para as construções de casas, prédios, escolas, dentre outros ambientes urbanos. Assim, o rio Potengi, no trecho entre os municípios de Macaíba e São Gonçalo do Amarante, encontra-se bastante assoreado, sendo utilizado como principal fonte mineral de areia para a construção civil (FERREIRA NETO, 2015).

Com base nessa contextualização, o estudo será norteado pelos seguintes questionamentos: em que medida os teores de radônio oriundo das areias do rio Potengi podem ser prejudiciais para a saúde da população? Como a técnica da câmara de ionização por eletretos pode auxiliar na identificação dos níveis de radônio nas areias que abastecem o setor da construção civil da Região Metropolitana de Natal? Em que medida os níveis de radônio das areias do rio Potengi, utilizadas na construção civil, podem ser prejudiciais para a saúde da população?

Na tentativa de responder ao questionamento central da pesquisa, o objetivo geral foi o de mapear os níveis de radônio-222 nas areias do rio Potengi, que abastecem o setor da construção civil da Região Metropolitana de Natal. De modo específico, pretendeu-se mensurar os níveis de radônio

nas areias desse ambiente, a partir da utilização da técnica da câmara de ionização por eletretos, e identificar os principais riscos que o radônio pode causar à população que utiliza esses minerais de areia em suas construções.

REFERENCIAL TEÓRICO

RADÔNIO

O radônio é um gás naturalmente radioativo, presente em todo tipo de ambiente e gerado principalmente nos solos que estão enriquecidos por urânio, tório e rádio. É um gás inerte, o que implica que ele não reage ou combina com outros elementos.

O radônio é um elemento químico de símbolo Rn e de número atômico igual a 86 (86 prótons e 86 elétrons), com massa atômica de 222,02 g/mol, e pertence à família dos gases nobres (AFONSO, 2009).

Foi descoberto em 1901 por Ernest Rutherford, que determinou, através de um experimento – considerado o primeiro com isolamento do radônio – a massa molar da “emancipação do rádio”. Recebeu esse nome por ter sido descoberto a partir do ar que circundava os raios de rádio.

Todavia, foram Willian Ramsay e Robert Whyttaw-Gray que experimentaram o isolamento do radônio em quantidades visíveis, por volta de 1910, e verificaram que esse era o gás mais denso conhecido até então, com a massa molar já citada (AFONSO, 2004).

O radônio corresponde ao isótopo ^{222}Rn . Apresenta três isótopos de curta duração e o de meia vida mais longo de 3,823 dias, derivado do urânio, que dá origem ao rádio (EPA, 2013).

Por ser um gás, o radônio pode ser encontrado no ambiente humano, através do solo, de mananciais e de construções. Vale destacar que muitas águas minerais e termais contêm grandes concentrações de radônio. Nesse sentido, as águas subterrâneas contêm mais radônio do que as superficiais, devido ao fato de estarem em um ambiente confinado, o que facilita a reposição pelo decaimento do rádio (COLE, 1993).

Desse modo, o radônio por ser um gás radioativo presente em solos e rochas, chega até a superfície através das fissuras existentes no embasamento rochoso. No entanto, como é mais denso do que o ar, o radônio tende a se concentrar nas camadas mais baixas da atmosfera, ou seja, acaba depositando seus produtos sobre a biosfera, onde estão a vegetação, os cursos d'água e o próprio solo (BROWN *et al.*, 1995).

MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE RADÔNIO

Existem alguns equipamentos que realizam testes para detecção e medição do gás radônio, e esses são de dois tipos: passivo e ativo. O que diferencia os equipamentos ativos ou passivos é o uso ou não de energia elétrica. Como exemplo de equipamentos passivos (que não utilizam energia elétrica), podemos citar: o carvão ativado, os detectores de traço alfa e a câmara de ionização de eletretos. Já os ativos (que utilizam energia elétrica) são monitores contínuos de radônio.

Destacamos que são os dispositivos ativos que medem e gravam a concentração de radônio de forma continuada. Contudo, é necessário treinamento para capacitar pessoas para o seu manuseio, já que utilizam softwares mais avançados e se tratam de equipamentos bem mais caros que os passivos. Como exemplo de equipamento ativo, podemos citar o AlphaGUARD.

Já os equipamentos passivos são mais baratos e de fácil manuseio, como no caso do método do carvão ativado, que faz testes de curta duração, com longa vida útil e razoável acurácia. No entanto, é necessário o monitoramento por laboratório para análise dos dados. O seu funcionamento é simples: o gás radônio é absorvido pelo carvão e no laboratório, por meio de contagem por cintilação por iodeto de sódio, e detecta raios

gama, provenientes do decaimento do radônio (BARBOSA, 2011).

O funcionamento da câmara de ionização por eletretos (EIC) é baseado na ionização de gases, os quais possuem uma câmara interna contendo gás e dois eletrodos. Assim, quando a radiação atravessa o volume de gás ali contido, ocorre o fenômeno físico de ionização, o qual libera íons que serão direcionados aos eletrodos cuja velocidade destes íons dependerá da tensão aplicada ao circuito. Dessa forma, a coleção das cargas elétricas geradas resulta na passagem de uma corrente elétrica proporcional à intensidade e à energia dessa radiação (BARBOSA, 2011).

A utilização de Câmaras EIC E-Perm constitui um método eficiente e de baixo custo para a medição de níveis de concentração atmosférica de radônio. Dentre os detectores de radônio que utilizam a tecnologia dos eletretos, as câmaras EIC E-Perm são reconhecidamente aquelas que guardam a melhor relação custo-benefício quando comparados os custos relativos de manutenção e instalação com a sua capacidade de prover resultados confiáveis. Isso é o que EPA concluiu após testar o desempenho das EIC E-Perm. Os custos dos programas de medição de concentrações de radônio variam com o número de testes, os quais, por sua vez, são uma função da duração das cole-

tas (modo de exposição) e da concentração de radônio no ambiente. Na maioria das situações, as EIC E-Perm apresentam menor custo efetivo por medida do que qualquer um dos outros métodos aplicáveis. (BIOMATION, 2013).

Em uma lista preparada pela Rad Elec Inc., fabricante das câmaras EIC E-Perm, o equipamento apresenta as seguintes vantagens: pode ser usado tanto para longos períodos de exposição quanto para períodos curtos de exposição; os eletretos podem ser reutilizados até que a voltagem superficial caia abaixo da tensão de operação, que é de 200 volts. Em relação às desvantagens: são sensíveis à radiação gama externa, e por isso as medidas lidas devem ser corrigidas levando em conta essa influência (veja a fórmula na seção “Cálculos empregados”); também são sensíveis a mudanças de altitude, e por isso as medidas lidas devem ser corrigidas levando em conta essa influência (veja a fórmula na seção “Cálculos empregados”); os eletretos podem sofrer danos na sua superfície por conta de toques (manuseio incorreto), contaminação e/ou impactos; as voltagens iniciais e finais devem ser medidas na mesma temperatura; não fornecem indicação de como se processam as mudanças nas concentrações do radônio durante o período da medição (KOTRAPPA, 1988).

O seu funcionamento se dá da seguinte for-

ma: é um monitor passivo de radônio constituído por um eletreto altamente estável montado dentro de uma pequena câmara fabricada em plástico condutor de eletricidade. O eletreto nada mais é do que um disco de Teflon que serve como fonte de íons e como sensor. A desintegração do radônio no interior da câmara produz pares de íons. Os íons negativos são coletados pelo eletreto (carregado positivamente), e esse fenômeno causa a diminuição da carga elétrica superficial do eletreto (KOTRAPPA, 2009).

A medição da carga perdida (ou seja, o empobrecimento da carga original do eletreto) durante o período da exposição dá uma medida da ionização integrada durante a referida exposição. A carga do eletreto é lida antes (V_i) e depois (V_f) da exposição, mediante o uso de uma leitora especial de voltagem (que não entra em contato físico com o eletreto para realizar a leitura). Essa tecnologia foi desenvolvida pela Rad Elec Inc. e denominada Leitora de Tensão Elétrica SPER (SPER Electric Voltage Reader) (KOTRAPPA, 2007).

Usando a medida da diferença entre a carga elétrica inicial e a carga elétrica final em volts ($CV = V_f - V_i$) como dado de entrada em uma fórmula apropriada, é possível determinar a atividade de radônio relativa ao período da medição, que para curta duração se dá no período de 2 a 7 dias (WHO, 2009).

ALGUNS ESTUDOS QUE UTILIZARAM O MÉTODO EIC

Na literatura, existem alguns estudos que avaliam a concentração do radônio em diferentes ambientes, como em residências e solos, utilizando o método da câmara de ionização por eletretos – EIC E-Perm em diferentes regiões do Brasil.

O estudo de Santos (2010) apresenta a distribuição da concentração de radônio em residências e outras construções na Região Metropolitana de Belo Horizonte/MG, utilizando o método EIC, com medidas de curto prazo em condições fechadas pelo período mínimo de 2 (dois) dias. Os valores encontrados apontam para uma variabilidade nos resultados atrelada aos fatores geológicos da região estudada.

O trabalho de Brito (2013) também utiliza o método do EIC, com medições de curto prazo 2,5 (dois vírgula cinco) dias ou 60 (sessenta horas) para medição da concentração de radônio em ambientes da Região Metropolitana de Salvador/BA). Os resultados obtidos apresentaram níveis de radônio toleráveis se comparados aos dados apresentados por instituições internacionais como a Agência de Proteção Ambiental (EPA) dos Estados Unidos da América.

A utilização do método apresenta algumas

vantagens, como a utilização tanto para medições de curto prazo quanto de longo prazo, além do seu fácil manuseio. Contudo, algumas desvantagens são identificadas, como a sensibilidade do eletreto a mudanças de altitude e temperatura, bem como o fato do método ser sensível à radiação gama externa, sendo necessária a correção e o cuidado para que não haja contato com o ambiente externo.

No Rio Grande do Norte, os estudos de Campos *et al.* (2013a) e Campos *et al.* (2013b) avaliam a concentração de radônio e a radioatividade natural em residências da área urbana e rural nos municípios de Lucrecia, na mesorregião Oeste Potiguar, e de Lajes Pintadas, na mesorregião Agreste Potiguar, ambos no interior do estado. As pesquisas também lançam mão do método da câmara de ionização por eletretos. No entanto, diferente dos dois primeiros estudos citados, as medições são feitas a longo prazo, por um período de 4 (quatro) meses nos períodos seco (verão) e chuvoso (inverno).

Os valores de radônio obtidos nas residências de ambos os municípios excedem os níveis estabelecidos pelas instituições internacionais como a Organização Mundial de Saúde. Tal fato traz uma preocupação para a população local, já que a presença do gás radônio está atrelada ao

tipo de solo e rocha granítica da região, que possui taxas naturais de urânio.

Em todos os estudos, é notória a importância do método EIC na identificação da concentração de radônio em diferentes ambientes, por ser um método de fácil manuseio, mas que requer uma atenção especial.

Em relação à concentração de radônio, todos os estudos apresentam preocupação quanto à presença desse gás, seja em qual for o ambiente. Isso porque ele é um importante agente carcinogênico humano, reconhecido em todo o mundo como um problema para a saúde pública. No entanto, o Brasil ainda não apresenta leis e políticas que regulamentem os níveis e o manuseio de materiais (naturais ou artificiais) que contêm níveis desse gás.

DELIMITAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Foi definido como recorte espacial de análise a região que contempla a área entre as localidades de Igreja Nova e Jacobina e apresenta um histórico de exploração de areias no leito do rio Potengi, ambas no limite territorial do município de São Gonçalo do Amarante-RN.

A exploração de areias que atendem ao setor da construção civil se dá em depósitos de na-

tureza aluvionar nos leitos ativos dos rios, como em planícies de inundação e em terraços fluviais. Atualmente, os principais locais de exploração de areias para a construção civil da Região Metropolitana de Natal são os sedimentos aluvionares de idade quaternária das bacias do rio Potengi e do rio Trairi, que se destacam como dois dos principais depósitos de areias aluvionares do estado (FERREIRA NETO, 2015).

A extração das areias no rio Potengi se dá nos municípios próximos da área consumidora, ou seja, nas proximidades da Região Metropolitana de Natal - RMN, principalmente nos municípios de São Gonçalo do Amarante e de Ielmo Marinho.

Em termos da geologia local na área de estudo, no trecho do rio Potengi correspondente às localidades de Igreja Nova e Jacobina, a geologia é constituída por características semelhantes às citadas pelos relatórios do IDEMA (2013), como, por exemplo, em relação à presença do complexo gnáissico pegmatítico, de biotita e de graníticos equigranulares, bem como a presença da formação Seridó, de sedimentos do grupo Barreiras e dos depósitos aluvionares, de lagoas e de planícies.

Desse modo, a área de estudo no rio Potengi apresenta características geológicas que sugerem

a existência de concentrações de radônio em ambientes internos, uma vez que há presença de embasamentos rochosos na região, chegando a aflorar em algumas localidades. Assim, como se sabe, as rochas graníticas apresentam teores consideráveis de radionuclídeos naturais, principalmente de urânio (NEVES e PEREIRA, 2004).

PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Os procedimentos experimentais nos auxiliam na obtenção de informações sobre a emissão de radônio das areias do leito do rio Potengi. Nesse caso, a seleção de métodos que façam a medição do radônio é fundamental para esta pesquisa.

DETECÇÃO DA RADIAÇÃO POR CÂMARA DE IONIZAÇÃO POR ELETRETOS EIC (E-PERM)

A técnica adotada para medição do radônio nas areias coletadas no leito do rio Potengi é a câmara de ionização por eletretos E-PERM (Figura 1). Esse equipamento é recomendado como responsável por medir a concentração de radônio pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA), e já foi utilizado em diversos trabalhos que têm como intuito a medição da radiação natural proveniente do radônio.

Figura 1 – Leitor SPER (Electric Voltage Reader) à esquerda. À direita, Câmara E-PERM “aberta”. No centro, recipiente de vidro para confinamento do material.



Fonte: acervo dos autores (2016).

Para medir a concentração de radônio a partir da câmara de ionização, foi necessário selecionar amostras de areia retiradas do leito do rio Potengi. Desse modo, devido à grande relação do urânio/tório e seu decaimento originando o radônio, foram selecionadas as amostras que apresentavam os maiores teores desses elementos, a partir dos pontos de medição radiométrica obtidas em campo, com a utilização do equipamento RS-125 Super-SPEC. Em seguida, das 28 amostras coletadas de areia, foram selecionadas 11 (onze) amostras com os respectivos dados de urânio e tório, o que equivale a 40% das amostras coletadas (Tabela 1):

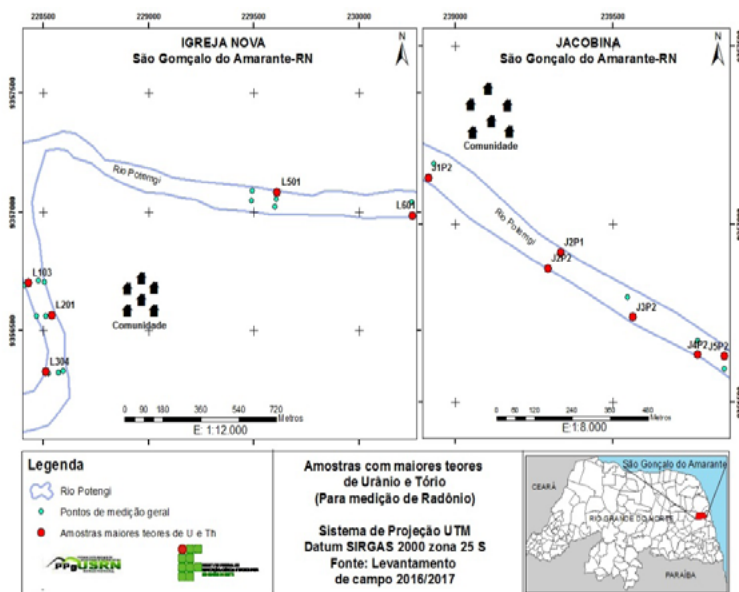
Tabela 1 – Amostras selecionadas para medição na câmara de ionização – EIC.

Pontos de medição	Valores de urânio (ppm)	Valores de tório (ppm)
L103	2,0	3,7
L201	1,5	3,2
L304	1,4	8,2
L501	1,5	13,1
L601	1,9	12,9
J1P2	1,0	3,0
J2P1	2,5	5,2
J2P2	2,5	8,2
J3P2	0,8	8,1
J4P2	1,1	1,3
J5P1	0,9	3,0

Fonte: medição de campo (RS-125 SUPER-SPEC).

As amostras selecionadas são distribuídas ao longo de todo o trecho recortado para medição dos dados radiométricos, tanto na comunidade de Igreja Nova, quanto em Jacobina (Figura 2).

Figura 2 – Amostras selecionadas para medição da concentração de radônio.



Fonte: elaboração do autor (2017).

As 11 (onze) amostras foram coletadas em duplicata, acondicionadas em sacolas plásticas e isoladas por uma fita de forma que o material não tivesse contato com o ambiente externo. Vale destacar que não foram coletadas areias dispostas na superfície, mas a coleta se deu em areias com aproximadamente 1 (um) metro de profundidade (Figura 3), no intuito de coletar matérias que não estão em contato direto com a atmosfera, o que faz com que o radônio escape com mais facilidade.

Figura 3 – Coletas de amostras de areia no leito do rio Potengi.



Fonte: acervo dos autores (2016).

Após a coleta, os materiais foram levados para o Laboratório de Radioatividade Natural – LARANA, que fica sob responsabilidade do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN. No laboratório, foi realizada a medição da concentração de radônio a partir da câmara de ionização. Com isso, foram separadas 1/3 da amostra de aproximadamente 1 kg, para facilitar seu isolamento na estufa. Depois, cada amostra foi depositada em uma estufa específica, junto com o eletreto, durante um período de 2,5 dias, ou aproximadamente 60 horas, estabelecido para leitura dos dados.

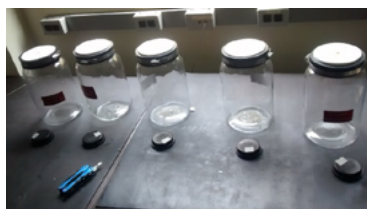
Cinco Câmaras de Ionização de Eletretos (EIC) foram distribuídas para as 5 (cinco) amostras coletadas no primeiro campo no mês de junho do ano de 2016 (período chuvoso), e mais seis amostras coletadas em fevereiro de 2017 no segundo campo (período seco).

Assim, foi criado um ambiente no laboratório onde o material arenoso pudesse ficar aprisionado sem contato com o ambiente externo. Com isso, cada amostra ficou confinada pelo período definido, com medições de curta duração dentro de câmaras para que o eletreto pudesse fazer a leitura do gás emitido por essas areias, conforme o quadro 1:

Quadro 1 – fotografias do procedimento de separação de amostras e leitura nas Câmaras de Ionização por Eletretos E-Perm no laboratório da UFRN.



a) Amostras de areia embaladas



b) Estufas de vidro (ambiente confinado)



c) Câmara de Ionização por Eletretos E-PERM



d) Amostras acondicionadas em medição

Fonte: acervo dos autores (2016).

Antes de confinar o material na câmara, foi realizada uma leitura inicial (V_i), com o leitor elétrico de voltagem SPER para cada eletreto a ser utilizado na câmara, para comparação após a medição das 60 horas (V_f).

Após fechar a câmara, tomou-se o cuidado necessário para que esta ficasse totalmente vedada, sem nenhum contato ou exposição acidental do eletreto com o ambiente externo.

O período de medição recomendado para a exposição de curto prazo é entre 2 (dois) a 7 (sete) dias (OSHA, 2010). No presente estudo, o período de exposição dos eletretos (das Câmaras E-Perm) com as areias dispostas foi de dois dias e meio (2,5 dias, ou seja, cerca de 60 horas). Desse modo, tomamos todas as precauções relativas à conservação do eletreto antes e depois da exposição, para que se pudesse apontar dados confiáveis.

Esse período de medição na Câmara seu deu com base no estudo de Brito (2013), que trabalhou com a medição das concentrações de radônio em ambientes da região metropolitana de Salvador/BA.

O uso das câmaras EIC E-Perm no presente estudo se deve a diversas situações que tornaram conveniente a sua escolha e seu uso. Entre essas situações, destacam-se a hipótese de que as areias do rio Potengi são uma zona de baixa

concentração de radônio, devido aos baixos teores de urânio mensurados ao longo das medições radiométricas.

Ainda utilizando a base de informações do laboratório de Administração de Segurança e Saúde Ocupacional (OSHA) dos Estados Unidos, as concentrações de radônio (C) relativas a cada uma das medições podem ser calculadas mediante a seguinte fórmula:

$$C = CV / (K).(d) - B$$

onde:

C = concentração média de radônio em pCi/L;

k = $1,88 + (0,006 \times (CV/2))$ é o fator de correção fornecido pelo fabricante;

CV = diferença aritmética entre a carga inicial e a carga final dadas em volts;

d = número de dias de exposição (vamos considerar 2,5 para o “experimento piloto”);

B = fator de correção relativo à radiação gama natural (geralmente de 1 pCi/L).

Contudo, essa fórmula fornece dados de radônio no ar e não no solo. No caso das areias do rio Potengi, foi necessária a adaptação e criação de um ambiente confinado (o das câmaras), para posterior análise de dados dos sedimentos coletados.

ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A partir da utilização da EIC E-Permm identificamos alguns valores de radônio nas areias do rio Potengi, conforme apresentado nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 2 – Resultados da diferença de carga (volt) das areias do rio Potengi coletadas em junho/2016 na comunidade Igreja Nova.

Amostra	Vi (volt)	Vf (volt)	Vf - Vi (volt) = CV
	Data: 06/06/16	Data: 09/06/16	
L103	330	289	41
L201	376	281	95
L304	312	160	152
L501	392	160	232
L601	332	242	90

Fonte: dados da pesquisa (2017).

Tabela 3 – Resultados da diferença de carga (volt) das areias do rio Potengi coletadas em fevereiro/2017 na comunidade Jacobina.

Amostra	Código do eletreto	Vi (volt)	Vf (volt)	Vf - Vi (volt) = CV
		Data: 21/02/17	Data: 24/02/17	
J1P2	LM4673	370	364	6
J2P1	LS4720	445	437	8

J5P1	LP1259	324	316	8
J4P2	LM4706	347	338	9
J2P2	LS5089	428	404	24
J3P2	LS4846	422	415	7

Fonte: dados da pesquisa (2017).

Ao comparar os valores da diferença entre a carga final e inicial, ou seja, os valores de CV nas duas tabelas, observamos uma discrepância entre eles, sendo o menor CV na comunidade Igreja Nova, de 41 volt, e o maior valor na comunidade Jacobina, de 24 volts. Tais dados apontam para a ocorrência de algum erro na medição ou mesmo no manuseio do equipamento, que é muito sensível, e por isso necessita de um cuidado especial para o isolamento total do material dentro da câmara, evitando o contato com o ambiente externo.

A partir disso, para obtenção de dados e informações coerentes acerca dos teores de radônio nas areias estudadas, foi realizada uma segunda coleta nos mesmos pontos da comunidade Igreja Nova e no mesmo período do ano, dessa vez em junho de 2017.

Com as novas coletas e medições do material nas câmaras de ionização, obtiveram-se os seguintes dados, apresentados na Tabela 4:

Tabela 4 – Resultados da diferença de carga (volt) das areias do rio Potengi coletadas em junho/2017 na comunidade Igreja Nova.

Amostra	Código do eletreto	Vi (volt)	Vf (volt)	Vf - Vi (volt) = CV
		Data: 027/06/17	Data: 30/06/17	
L103	LS5327	572	566	6
L201	LS5359	452	445	7
L304	LS5300	542	533	9
L501	LS5441	498	489	9
L601	LS5256	401	393	8

Fonte: dados da pesquisa (2017).

Com os novos dados, obtidos na segunda coleta nas areias da comunidade Igreja Nova, observamos que os valores de CV eram próximos aos obtidos na comunidade Jacobina, conforme apresentado na Tabela 3.

A partir de então, de posse dos novos valores, foi possível a mensuração da concentração de radônio nas areias do rio obtidas nas duas comunidades, utilizando a fórmula mencionada anteriormente. Desse modo, obtivemos as seguintes concentrações de radônio, apresentadas nas Tabelas 5 e 6.

Tabela 5 – Resultados dos cálculos das concentrações de radônio na comunidade Igreja Nova.

Amostra Igreja Nova	Vf - Vi (volt) = CV	C (pCi/L)
L103	6	0,27
L201	7	0,47
L304	9	0,88
L501	9	0,88
L601	8	0,68

Tabela 6 – Resultados dos cálculos das concentrações de radônio na comunidade Jacobina.

Amostra Jacobina	Vf - Vi (volt) = CV	C (pCi/L)
J1P2	6	0,27
J2P1	8	0,68
J5P1	8	0,68
J4P2	9	0,88
J2P2	24	3,9
J3P2	7	0,47

Fonte: dados da pesquisa (2017).

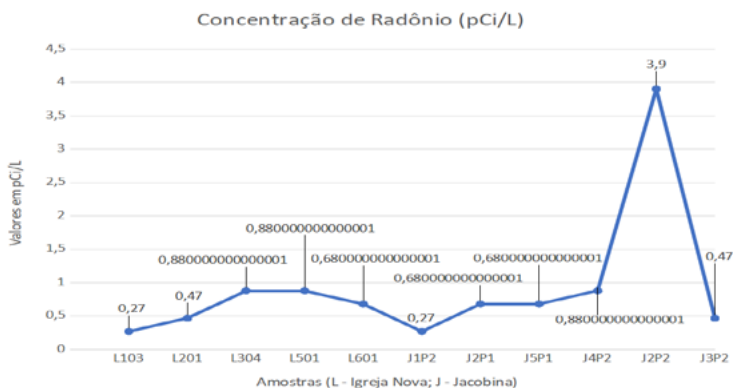
De acordo com a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA), a concentração aceitável de radônio em ambientes abertos deve ser na ordem de intervalos que variam entre 0,4 e aproximadamente 1,3 pCi/L.

Já em relação aos níveis de radônio em ambientes fechados/internos, em habitações como casas, prédios, escolas, dentre outros, esses devem ser na ordem de aproximadamente 4,0 pCi/L.

Desse modo, os valores obtidos nas areias do rio Potengi devem ser comparados com os valores de concentração de radônio em ambientes abertos, já que se trata de um ambiente deste tipo. Assim, fazendo essa comparação, observa-se que a concentração média de radônio é estimada em 0,9 pCi/L, o que indica que as concentrações estão dentro dos padrões estabelecidos pelas agências americanas.

Contudo, em alguns pontos de amostragem, apresentam-se valores de concentração abaixo dos 0,4 pCi/L (Pontos L103 e J1P2), e em apenas uma amostra a concentração extrapola os valores estabelecidos, emitindo uma concentração de 3,9 pCi/L, na comunidade Jacobina (J2P2), como podemos observar no Gráfico 1.

Gráfico 1 – Concentração de radônio das amostras de areia do rio.



Fonte: dados da pesquisa (2017).

Tal anomalia apresentada pela amostra J2P2 na comunidade Jacobina pode estar associada aos teores de urânio na localidade, considerando que, de acordo com as informações radiométricas levantadas em campo, esse mesmo local apresentou os maiores teores de urânio com 2,5 ppm e tório com 8,2 ppm da região estudada.

Outro aspecto que pode estar associado à alta concentração nesse ponto são os fatores climáticos no período de coleta dos materiais, já que estas foram feitas no período de temperaturas mais elevadas e de maior intensidade de radiação solar, o que determina maiores índices de evaporação no solo e na água. Além disso, como o radônio é um gás, teria mais facilidade de escapar para o ambiente externo do que em períodos chuvosos.

Um fator ambiental de grande relevância que influencia nos índices de radônio no ambiente é o tipo de embasamento rochoso regional. Como identificado, a área estudada apresenta características geológicas do complexo gnáissico pegmatítico, o que sugere a existência de concentrações de radônio em ambientes internos. Em alguns trechos, essa formação rochosa aflora até a superfície (Figura 4), ficando em contato com os processos de intemperismo físico, químico e biológico.

Figura 4 – Afloramentos rochosos no leito do rio Potengi.



Fonte: acervo dos autores (2016).

Alguns estudos realizados no Rio Grande do Norte, mais especificamente nos municípios de Lajes Pintadas e de Lucrécia, associam concentrações de radônio em algumas residências ao tipo de solo e rocha regional, mais especificamente, no caso das localidades, as rochas cristalinas do complexo gnáissico pegmatítico.

A partir do uso de eletretos nas residências dos municípios citados, identificou-se que os níveis de radônio excederam o limite estabelecido pela Organização Mundial de Saúde (OMS), que é de 100 Bq/m^3 . Especialmente no município de Lajes Pintadas, os níveis de radônio estão associados ao fato de a cidade estar localizada sobre afloramentos de corpos pegmatíticos, que são naturalmente enriquecidos por urânio (CAMPOS *et al.*, 2013a).

Desse modo, é necessário dar uma atenção

especial ao uso e à ocupação do solo das areias do rio Potengi. Mesmo que apresente baixas concentrações de radônio, a exposição contínua a esse gás contribui com o risco de se contrair câncer de pulmão, considerando que, de acordo com a Comissão Internacional para Proteção Radiológica, o gás radônio é um importante agente carcinógeno humano, e a exposição prolongada ao gás e aos seus produtos de decaimento radioativo pode provocar o surgimento de câncer de pulmão nos seres humanos. Além disso, como apontam Neves e Pereira (2004), a concentração de radônio oriunda do solo é um importante contribuinte na taxa de radônio que entra nas residências.

Já em relação à influência das concentrações de radônio na saúde humana, Campos *et al.* (2013b) assinalam que qualquer exposição ao gás radônio é prejudicial à saúde, independentemente de seus níveis de concentração. Dessa forma, o risco de se contrair câncer está diretamente ligado ao período de exposição ao radônio.

Portanto, o uso de areias do rio Potengi na construção civil requer uma atenção especial por parte dos órgãos reguladores e fiscalizadores, pois essas podem oferecer um fator de risco para a população, já que contêm níveis de radônio e são utilizadas na construção de casas, prédios, escolas, shoppings e outros ambientes.

CONCLUSÃO

Os resultados dos teores de gás radônio por meio das Câmaras de Ionização por Eletretos apresentaram-se como importante instrumento na mensuração de informações de radônio ao longo das areias do rio Potengi.

Nas comunidades estudadas de Igreja Nova e Jacobina, os teores de radônio variaram conforme a intensidade da interferência antrópica, e sua presença, assim como a presença do urânio e do tório, está atrelada a alguns fatores ambientais, como o tipo de rocha da região, a proximidade com esses corpos rochosos e a influência climática. Como apontam Neves e Pereira (2004), a concentração de radônio oriunda do solo é um importante contribuinte na taxa de radônio que entra nas residências.

Mesmo apresentando teores pequenos na maioria das amostras de areia do rio Potengi, conforme levantado por alguns autores ao longo desse estudo, qualquer exposição ao gás radônio é prejudicial à saúde, independentemente de seus níveis de concentração. Assim, contrair câncer está diretamente ligado ao período de exposição ao radônio.

REFERÊNCIAS

AFONSO, Júlio Carlos. Elemento químico radônio. **Revista Química Nova na Escola**, Rio de Janeiro, v. 32, n. 4, p. 267-268, nov. 2009.

BARBOSA, Laércio. **Análise da concentração de radônio 222 nas águas subterrâneas e solo de Curitiba e Região Metropolitana**. 2011. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e Informática Industrial) – Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2011.

BELLINTANI, Sandra Aparecida; GILI, Fátima das Neves. **Noções básicas de proteção radiológica**. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN, 2002. p. 57. Disponível em: www.engeworks.com.br/arquivos/proteção%radiologica.pdf. Acesso em: 17 out. 2015.

BIOMATION. **Eletrect ion chaben: decision radon fact sheet**. Disponível em: http://biomation.com/radon/fact_sheet.htm. Acesso em: 16 mai. 2016.

BRITO, Adelson Silva de. **Medição de concentrações de radônio em ambientes da Região Metropolitana de Salvador-BA**. 2013. 159 f. Dissertação (Mestrado em Saúde, Ambiente e Trabalho) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2013.

BROW, Geoff *et al.* **Os recursos físicos da terra - bloco 2 - materiais de construção e outras matérias brutas.** Tradução: Luiz Augusto Miliani Martins. Campinas, São Paulo: Editora UNICAMP, 1995.

CAMPOS, Thomas Ferreira da Costa *et al.* O gás radônio doméstico e a radioatividade natural em terrenos metamórficos: o caso do município de Lucrecia, Rio Grande do Norte. **Revista de Geologia**, v. 26, n. 2, p. 85-93, 2013a.

CAMPOS, Thomas Ferreira da Costa *et al.* O gás radônio e a radiação natural em terrenos metagraníticos e pegmatíticos: o caso do município de Lajes Pintadas, Rio Grande do Norte. **Revista de Geologia**, v. 26, n. 2, p. 45-52, 2013b.

CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear. **Diretrizes básicas de proteção**

radiológica: Norma CNEN-NN-3.01. 2006.

COLE, Leonard A. **Element of risk:** the politics of radon. Oxford University Press, New York, Originally Published. AAAS, press, 1993.

EPA, United States Environmental Protection Agency. **Radon (Rn).** Disponível em: <http://epa.gov/radon/>. Acesso em: 05 abr. 2016.

FERREIRA NETO, Manoel Henrique. **Projeto materiais de construção civil na região metropolitana de Natal**. Recife: CPRM, 2015.

FIANCO, Ana Clara Butelli. **Concentrações de radônio nas águas subterrâneas, rochas e solos de Porto Alegre-RS**. 2011. 99 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

KOTRAPPA, P. **E-PERM(R) System Manual**. Rad Elec, Inc, 2007.

KOTRAPPA, P.; STIEFF, F. Radon Exhalation Rates from Building Materials Using Electret Ion Chamber Radon Monitors in Accumulators. **Health Physics**, v. 97, n. 2, p. 163-166, 2009.

KOTRAPPA, P. An Electret Passive Environmental ^{222}Rn Monitor Based On Ionization Measurement. **Health Physics**, v. 54, n. 1, p. 47-56, 1988.

MUJALLI, Gibran Romero. **Espectrometria de raios gama e concentrações de radônio em solos da região do maciço sienítico piquiri, município de Cachoeira do Sul/Encruzilhada do Sul-RS**. 2015. 81 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

NEVES, Luís F; PEREIRA, Alcides C. Radioatividade natural e ordenamento do território: o contributo das Ciências da Terra. **Revista Geonovas**, n. 18, p.103-114, 2004.

OCCUPATIONAL SAFETY & ADMINISTRATION – OSHA. **Radon in Workplace Atmospheres; United States Department of Labor**. 2010. Disponível em: www.osha.gov/dts/sltc/methods/inorganic/id208/id208.html. Acesso em: 12 jun. 2016.

PETTA, Reinaldo Antonio; CAMPOS, Thomas Ferreira da Costa. O gás radônio e suas implicações para a saúde pública. **Revista de Geologia**, v. 26, n° 2 e 7. p. 7-18. 2013. Disponível em: www.revistadegeologia.ufc.br. Acesso em: 16 out. 2015.

RIO GRANDE DO NORTE. Instituto de Desenvolvimento Sustentável e Meio Ambiente do Rio Grande do Norte (IDEMA). **Perfil do seu município – São Gonçalo do Amarante**. Coordenadoria de Estudos Socioeconômicos, Natal, 2013.

SANTOS, Talita de Oliveira. **Distribuição da concentração de radônio em residências e outras construções da Região Metropolitana de Belo Horizonte-RMBH**. 2010. 147 f. Dissertação (Mestrado em ciências e técnicas nucleares) – Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2010.

WHO – World Health Organization. **Who Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective**". WHO Library Cataloguing-in-Publication Data, France, 2009.



ANÁLISE DA GESTÃO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL EM NATAL-RN USANDO A MATRIZ SWOT

JUVENISE TAVARES DA COSTA FREIRE

RÉGIA LÚCIA LOPES

JULIO ALEJANDRO NAVONI

INTRODUÇÃO

O crescimento de uma população, aliado ao processo de urbanização e o desenvolvimento econômico, traz melhorias no padrão de vida, provocando aumento de consumo em todos os setores. No entanto, a produção de resíduos sólidos representa uma ameaça potencial ao meio ambiente, e a construção civil é uma das principais causas desse fenômeno em escala global, ultrapassando 2 bilhões de toneladas por ano, por ser uma atividade produtiva de muita relevância na economia do Brasil e no mundo (KARAK, BHAGAT e BHATTACHARYYA, 2012).

O setor da construção civil se configura como um “termômetro” da economia brasileira, respondendo por 6,2% do Produto Interno Bruto (PIB) em 2014 e por 4,5% em 2018 (CBIC, 2019). Devido às características de sua produção, foi responsável por 44,5 milhões de toneladas dos 79 milhões de resíduos coletados no Brasil em 2019 (ABRELPE, 2020). O panorama demonstra que a quantidade de resíduos oriundos da construção civil equivale a mais da metade dos resíduos sólidos urbanos coletados.

Os valores são expressivos e não podem ser ignorados, para efeito de gestão, pois a maior parte desses resíduos não recebem qualquer tipo de tratamento, já que existem poucas unidades de processamento para eles no Brasil, conforme diagnóstico realizado pelo Sistema Nacional de Saneamento-SNIS (BRASIL, 2019). Apesar de os resíduos oriundos das atividades da construção civil terem sua maior porção por tonelada considerada como inerte, e o impacto ambiental específico menor em relação a outros resíduos, eles ocupam grandes volumes, e sua disposição ambientalmente adequada demanda grandes áreas e uma apropriada logística de transporte, condições cada vez mais precárias em grandes centros urbanos, onde concentram-se os maiores geradores (GÁLVEZ-MARTOS *et al.*, 2018).

Dados do Relatório de Gestão de Resíduos Sólidos de Natal mostram a existência de mais de seiscentos e cinquenta pontos de deposição irregular de resíduos, que, em sua quase totalidade, são oriundos de atividades de construção civil (PMN, 2018), o que os configura como um dos principais problemas na gestão dos resíduos sólidos urbanos na cidade.

Este trabalho tem como objetivo estudar a gestão dos resíduos de construção civil (RCC) no município de Natal-RN, uma vez que a cidade teve um pico de crescimento da atividade da construção civil nos últimos dez anos. Não há um plano de gestão local, embora haja legislações nacionais que determinam a responsabilidade do gerador pelo seu gerenciamento, desde o acondicionamento e a coleta até o destino final. Através de uma análise mediante matriz S.W.O.T., buscou-se identificar os avanços e desafios da gestão de RCC no município em questão. Essa abordagem metodológica visa, através da realização de entrevistas e da aplicação de questionários, assim como da análise documental de bases de dados, estabelecer as forças (*strengths*), fraquezas (*weaknesses*), oportunidades (*opportunities*) e ameaças (*threats*) existentes nos contextos interno e externo em uma organização (HELMS e NIXON, 2010).

O método SWOT¹ tem sido amplamente utilizado por consultores e empresas, privadas e públicas, para proceder uma avaliação da situação atual, tendo em vista um planejamento estratégico que vise melhorar a atuação da organização. Para tanto, foram realizadas entrevistas com os gestores da Companhia de Serviços Urbanos de Natal (URBANA), responsável pelos serviços de limpeza da cidade, englobando coleta e destinação de todas as tipologias de resíduos domiciliares e públicos; e da Secretaria de Meio Ambiente e Urbanismo (SEMURB), órgão da administração direta municipal que atua no controle urbanístico e ambiental, no licenciamento de obras públicas e privadas, e na gestão e planejamento de políticas públicas para o ordenamento da cidade no município.

A entrevista foi semiestruturada com perguntas objetivas e subjetivas formuladas para elucidar e possibilitar a identificação dos aspectos positivos e negativos da gestão, sendo feita presencialmente junto aos responsáveis dos respectivos órgãos. Os questionários incluíram aspectos relacionados à gestão de RCC, bases de dados, e cruzamento da informação. As entrevistas aconteceram no período de dezembro de 2019 a janeiro de 2020.

1 SWOT é um acrônimo de *strengths, weaknesses, opportunities* e *threats* (HILL e WESTBROOK, 1997).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A entrevista aconteceu junto com a aplicação de um questionário com perguntas objetivas e subjetivas que foram tabuladas, juntamente com as respostas, apresentadas na tabela 1. O conteúdo das respostas permitiu entender o porquê da inexistência de alguns dados, como se distribui as responsabilidades para com os RCC no município, se há compatibilidade entre os procedimentos adotados pela gestão e as políticas públicas existentes sobre o tema, se há fiscalização do cumprimento das medidas exigidas, entre outras questões relativas à problemática dos RCC no município.

Tabela 1 – Resumo das perguntas e respostas à entrevista.

1. Pergunta: Qual a responsabilidade da URBANA/SEMURB com os resíduos de construção civil (RCC) no município de Natal?

Resposta: A URBANA é uma sociedade de economia mista, criada em agosto de 1979, cuja função principal é o gerenciamento dos resíduos sólidos. A empresa assume essa responsabilidade. A SEMURB se identifica como um órgão seccional do SISNAMA e afirma que sua responsabilidade é exclusivamente de fiscalização e coibição de crime ambiental mediante denúncia, cabendo à URBANA a gestão e o gerenciamento.

2. As ações da URBANA/SEMURB estão articuladas com a PNRS ou com alguma política municipal voltada para este fim?

As ações dos órgãos gestores estão parcialmente articuladas com PNRS, isto explica o fato de não haver PMGRCC. Considerando-se sem obrigações quanto à gestão dos RCC, a SEMURB afirma sua atuação de caráter meramente administrativo, na esfera ambiental, na aplicação de multas, em casos de infração.

3. O município possui Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS), conforme recomendação da PNRS? Em caso afirmativo, ele contempla ações de gestão de RCC?

Existe o PMGIRS, porém não se encontra disponível por problemas no site da URBANA. Mesmo que estivesse acessível, ele não contempla ações para RCC. As informações indicam que em 2012 o PMGIRS foi elaborado, muito embora sem contemplar ações de RCC.

4. Caso não estejam previstas ações específicas de gestão de RCC executadas pela URBANA/ SEMURB, como elas acontecem atualmente?

A ação direta limita-se à coleta nos pontos de lixo onde há disposição irregular de RCC e a ação indireta consiste na fiscalização das empresas coletoras, em quesitos administrativos, como por exemplo, se estão em dia com as obrigações de licença. A SEMURB também afirma não haver ação, ou política, direcionada a RCC.

5. Há ação da gestão que promova a redução, reutilização e reciclagem de RCC?

Não há projeto nem programa com esse objetivo, pois a função da empresa é coletar os resíduos. Há ação da SEMURB junto aos catadores em relação aos resíduos sólidos domiciliares, porém com poucos resultados. Em relação a RCC não há nenhuma iniciativa.

6. As obras públicas cumprem alguma exigência sobre o gerenciamento de RCC?

O município não estabelece nenhuma exigência diferenciada em relação às obras públicas, elas têm as mesmas obriga-

ções e condições das obras particulares.

7. O RCC recolhido pela URBANA é oriundo de áreas de disposição irregular ou somente dos ecopontos? Há algum “disque denúncia”?

A URBANA recolhe material dos pontos de lixo e dos Ecopontos, porém, a coleta dos ecopontos representa menos que 1% do total coletado, o que demonstra a pouca utilização dessa estrutura. O restante é oriundo das áreas de descarte irregular. A empresa disponibiliza um serviço de atendimento (coleta) ao cidadão ao custo de R\$ 80,00, porém apesar do valor baixo em relação às caçambas estacionárias, que custam R\$ 300,00 em média, o veículo disponível para esse fim passa parte do mês ocioso.

8. Existe no município, ou na área metropolitana, área licenciada para descarte de RCC?

Há área licenciada em Extremoz, de responsabilidade da empresa RCC Correia, onde é depositado o entulho coletado pela URBANA, ao custo de R\$ 11,00/ton de resíduo. Há alguns anos foi desapropriada uma área nos Guarapes, no município de Natal para destinação de RCC, porque era uma área de exploração irregular de areia. Funcionou para esse fim até atingir a capacidade de suporte, no ano de 2014.

9. Atualmente, os resíduos sólidos coletados em Natal são encaminhados para o aterro sanitário. O aterro também recebe RCC?

O aterro somente recebe resíduo domiciliar porque seria inviável financeiramente para o município, pois o valor é de R\$ 75,00/ton, além de não ser permitida sua disposição em aterros de resíduos sólidos urbano ou áreas de “bota fora”, conforme a resolução CONAMA /448.

10. Há conhecimento do destino dado ao material recolhido pelas empresas credenciadas para coleta de RCC, que não trabalham com reciclagem?

A URBANA afirma que só acompanha a questão do transporte, sendo a destinação de responsabilidade da SEMURB. O credenciamento das empresas que atuam na coleta de RCC, com as caixas estacionárias, é feito pela URBANA, porém não há acompanhamento do local de disposição final. Já a SEMURB, diz não haver comprovação de onde as empresas depositam os resíduos e a secretaria não atua nessa parte. As empresas são obrigadas a apresentar comprovação, mas é acompanhada pela URBANA. A princípio, elas devem entregar nas empresas que mantêm áreas licenciadas ou encaminhar para reciclagem, pois há pelo menos três empresas atuando nesse setor.

11. Há registros da quantidade de material recolhido por essas empresas?

Não há monitoramento ou acompanhamento da quantidade de material recolhido pelas empresas credenciadas. Somente há registro do que é recolhido pela URBANA e essa, apenas cadastra o transportador. Para a SEMURB não interessam quantidades.

12. Quanto às empresas que coletam e reciclam RCC, há registros dos volumes ou quantidades coletadas?

Idem resposta anterior.

13. Ao analisar os dados de coleta dos resíduos fornecidos pela URBANA, observa-se uma redução de coleta de RCC nos últimos anos. A que se deve essa redução?

A redução de coleta de RCC deve-se à economia ou, um quantitativo maior de empresas que estão dando a destinação correta aos resíduos. Por outro lado, deve-se considerar a oscilação dos volumes de coleta ao longo do ano, devido ao clima ou a maior movimentação da economia nos últimos meses do ano, onde ocorrem mais reforma e construção.

14. Os ecopontos funcionam com o objetivo para o qual foram criados e atendem à demanda?

Os ecopontos funcionam, porém, precariamente para o fim que foram criados. Um melhor funcionamento depende de outras ações, como educação, por exemplo. Eles têm capacidade de atender a demanda, porém são subutilizados. “Não adianta ter lixeira se a população não colocar o lixo nela”, afirma o diretor da URBANA. As estruturas, apesar de viáveis, enfrentam resistência da própria população. Estudos encomendados pelo município indicam a necessidade de 80 unidades, porém, atualmente, só há 3 ecopontos em funcionamento na cidade de Natal.

15. Há dados sobre os quantitativos de material coletado nos ecopontos?

Não há registro formal, mas considerando que há em Natal atualmente, 691 pontos de lixo onde a URBANA diariamente faz coleta, o volume dos ecopontos corresponde a menos de 1% do montante geral. Nos ecopontos a coleta é feita a cada 2 dias. A coleta de RCC executada pela URBANA representa um custo mensal de aproximadamente 2 milhões de reais. A SEMURB afirma não ter interesse por esses quantitativos.

16. Há algum estudo que indique a eficiência qualitativa desta estrutura?

Há um estudo interno que indica a instalação de pelo menos 50 novos ecopontos, porém não podemos compartilhar porque não foi oficialmente publicado. Só há 3 ecopontos em Natal, quando a necessidade é de 80. Há alguns anos houve um projeto em parceria com o Banco Mundial para instalação de 50 unidades dessa estrutura com custo zero para o município, entretanto alguns vereadores fizeram oposição à ação e o projeto foi suspenso. As estruturas são viáveis, mas enfrentam resistência da população e da sociedade.

17. As usinas de reciclagem de RCC auxiliam no processo de gerenciamento de RCC? Há fiscalização sobre a atividade por elas desenvolvida? (pergunta específica para a SEMURB)

A URBANA vê estas empresas como meras executoras de contrato. Para a SEMURB elas não auxiliam e não são fisca-

lizadas porque a sede de todas elas, é fora do município de Natal.

18. As usinas de reciclagem de RCC recebem algum incentivo para o desenvolvimento desta atividade?

As duas entidades afirmam que não há incentivo às empresas, afinal o foco do poder público é o social.

19. As empresas que trabalham com coleta, transporte, destinação e reciclagem de RCC mantêm diálogo com o poder público sobre ações relativas a esse assunto?

O diálogo é restrito ao transporte, porque as empresas coletam material em Natal. Quanto à destinação final dos resíduos não compete à SEMURB qualquer diálogo.

20. Há dados sobre a produção média de RCC no município? Em caso afirmativo, quais parâmetros são utilizados para esse valor?

A URBANA tem os dados de coleta em toneladas, porém não há troca de informações entre URBANA e SEMURB sobre produção de RCC. A produção de RCC em Natal é estimada em 150 ton/dia, mas a SEMURB afirma que não lida com essas quantidades por não ser o foco de sua atividade.

21. Há registros sobre a participação das pequenas construções e/ou autoconstruções na disposição irregular de RCC ou no volume gerado?

Tudo que é coletado pela URBANA, em tese, é de pequenas construções, pois o que é disposto de forma irregular é oriundo de pequenas construções e reformas. A SEMURB não possui dados de pequenas obras, pois normalmente são irregulares.

22. Existem políticas específicas para o pequeno gerador de RCC?

A política existente para o pequeno gerador de RCC é a estação de transbordo, o Ecoponto, que recebe até 1m³ de re-

síduo/dia/proprietário. Porém, essa condição limita o direito de executar uma grande reforma ou construção. Apesar desse limite de deposição, algumas pequenas empresas tentam burlar o controle, colocando seus resíduos nos ecopontos.

23. Quanto às informações constantes no formulário de PGRCC, há socialização dessas informações com a URBANA para planejamento de ações, acompanhamento e previsão da produção de RCC?

A URBANA confirma a existência do Plano, mas reconhece que não há comunicação para socialização das informações, muito embora, a SEMURB afirmar que repassa as informações para a URBANA, com base no que o cliente fornece.

24. Os grandes geradores apresentam o Formulário de Gerenciamento de Resíduos de Construção Civil quando da regularização da obra. Qual órgão acompanha e fiscaliza a execução deste plano?

A fiscalização é de responsabilidade da SEMURB, que reconhece ser muito fraca. No ano de 2019 foi aprovada uma lei municipal que prevê cobrança de multa para infração de crime ambiental, no qual a deposição de RCC se enquadra. Está prevista a cobrança da apresentação de um ticket de comprovação de onde o material foi destinado.

25. Há alguma penalidade em caso de descumprimento do formulário de gerenciamento de RCC?

Recentemente foi aprovada uma Lei municipal que prevê penalidade com aplicação de multa para depósitos irregulares de RCC, porém é a SEMURB que tem atuado no cumprimento dessa lei.

Fonte: elaboração dos autores, com dados da URBANA e do SEMURB (2020).

Os dois órgãos envolvidos com a gestão têm conhecimento das responsabilidades legais existentes sobre os RCC e seus desdobramentos, entretanto, nem todas as ações estão alinhadas com as políticas vigentes. O município se limita à coleta dos resíduos, não havendo práticas de gestão sustentável. Do mesmo modo, não há fiscalização das medidas e das exigências estabelecidas aos geradores de RCC. A ausência de monitoramento das empresas licenciadas para coleta desses resíduos implica no desconhecimento dos números relativos à geração, um tópico essencial para planejamento estratégico, mas negligenciado pelo sistema gestor.

Esses e outros fatos identificados surgem ora como fraquezas ou fortalezas, ora como oportunidades e ameaças a serem exploradas na melhoria da gestão. A Figura 01 apresenta as considerações oriundas das respostas, nas quais os fatos identificados foram relacionados de acordo com o formato de uma matriz SWOT.

Figura 1 – Matriz SWOT.

FATORES POSITIVOS		FATORES NEGATIVOS	
AMBIENTE INTERNO	FORÇAS	<ol style="list-style-type: none"> 1. URBANA: empresa de capital misto, com maior liberdade de ação; 2. Existência de coleta regular de RCC dos pontos de lixo; 3. Mapeamento dos locais recorrentes de descarte irregular; 4. Área licenciada para deposição de RCC – aterro de inertes; 5. Existência de ecopontos; 6. Registros de alvarás de construção; 7. Exigência de formulário de PGRCC para grandes geradores. 	FRAQUEZAS
	<ol style="list-style-type: none"> 1. SEMURB não se responsabiliza por gestão nem gerenciamento; 2. Desconhecimento da destinação dada ao RCC recolhido pelas empresas credenciadas – ausência de fiscalização; 3. Ações não articuladas com a PNRS; 4. Ausência de fiscalização e de monitoramento da execução dos PGRCC; 5. Desconhecimento do PLANSAB regulamentado; 6. Ausência de política de incentivo aos 3R's; 7. Desconhecimento dos volumes RCC recolhidos; 8. Ecopontos subutilizados. 		

	OPORTUNIDADES	AMEAÇAS
AMBIENTE EXTERNO	<ol style="list-style-type: none"> 1. Contratos de obras públicas exigindo: <ol style="list-style-type: none"> a. Aquisição de material de construção reciclado; b. Encaminhar resíduos para usina de reciclagem; 2. Solicitação de comprovação de destinação adequada de RCC das empresas coletoras de entulho; 3. Monitoramento de quantidades recolhidas pelas empresas coletoras de RCC (para conhecimento da geração no município); 4. Usinas de reciclagem atuantes na região; 5. Mercado de recicláveis pouco explorado. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ausência de previsão da produção de RCC mensal ou anual; 2. Ausência de planejamento integrado entre órgãos; 3. Depósito em local inadequado de RCC pelas empresas coletoras; 4. Descumprimento do PGRCC pelos grandes geradores; 5. Obras sem regularização junto a SEMURB – pequenas construções; 6. Resistência da população ao uso dos ecopontos e à instalação de novos.

Fonte: elaboração dos autores, com dados da URBANA e do SEMURB (2020).

O retorno recebido por meio das entrevistas revelou as fragilidades presentes no sistema de gestão no âmbito interno e externo, e estas estão relacionados nas colunas à direita da Tabela 01. De forma análoga, fica nítido que há procedimentos já estabelecidos que podem ser aprimorados, além de ações que podem ser implementadas, com vistas a melhoria do processo, e estes são considerados como potencialidades existentes, estando elencados nas colunas à esquerda.

FATORES QUE INFLUENCIAM NA GESTÃO DOS RCC EM NATAL-RN

Os pontos positivos e negativos que emergiram a partir da matriz SWOT sinalizam três fatores centrais que precisam ser alcançados pela gestão, pois as fraquezas do sistema se relacionam com um dos três fatores a seguir: a) gerenciamento dos RCC por órgãos distintos sem trocas de informações; b) alinhamento das políticas locais de gestão de RCC; e c) falta de incentivo à reciclagem de RCC.

Quanto ao gerenciamento dos RCC, o que emergiu das entrevistas é que não há uma cobrança mais efetiva do órgão que fiscaliza as obras para uma compatibilização das estimativas prévias e da destinação desses resíduos, e assim não há atualização dos planos de gerenciamento e com-

provação por manifesto de transporte e destino do resíduo gerado, conforme prevê a Portaria 280 (BRASIL, 2020), tendo em vista que a construção civil é uma atividade sujeita à elaboração de plano de gerenciamento de resíduos sólidos (BRASIL, 2010). Essa prática de fiscalização pode trazer inúmeros benefícios, proporcionando um gerenciamento adequado nas obras, com fomento à diminuição na geração, na reutilização e na reciclagem desses materiais, que são diretrizes da PNRS.

Em relação aos entulhos coletados pelo município, há deficiências no que diz respeito às formas de gerenciamento tecnicamente mais adequadas, já que o encaminhamento para áreas de aterros, mesmo que estas sejam licenciadas, não é a melhor solução. Desse modo, são necessários investimentos em usinas de reciclagem e incentivos fiscais por meio de políticas públicas para que esse tipo de empreendimento seja valorizado. Da mesma forma, faz-se necessária a promoção de campanhas de educação ambiental, voltadas para a divulgação e a valorização do uso de materiais recicláveis e seus benefícios, conforme já preconiza a Lei 6.298, desde 2011, de autoria do próprio município (PMN, 2011).

Ficou evidente a necessidade de uma maior integração de informações entre os órgãos municipais que se relacionam com essa temática, a

fim de otimizar os esforços para monitoramento e fiscalização das atividades que geram resíduos e impactam o meio ambiente. Gálvez-Martos *et al.* (2018), em Hong Kong; Lu Tam (2013), na Malásia; Hassam *et al.* (2010), na Arábia Saudita; Ouda *et al.* (2017), entre outros, apresentaram em seus estudos científicos as boas práticas que foram adotadas e que trouxeram significativa melhoria à gestão de RCC, em diversas regiões do mundo, onde a preocupação com os impactos provocados pelos RCC é tratada com seriedade.

Verificou-se que há legislação a respeito da temática dos RCC, além de planos municipais que englobam metas para esse tipo de resíduos. No entanto, os gestores mostraram desconhecimento dessa legislação. O município de Natal-RN elaborou, no ano de 2015, o Plano Municipal de Saneamento Básico, que inclui o componente de resíduos sólidos (PMN, 2015) que foi aprovado por lei em 2019 (PMN, 2019). No ponto que trata da concepção de programas, projetos e ações necessárias para atingir objetivos e metas, o município estabeleceu indicadores para gerenciamento dos RCC, com meta de reciclagem de RCC coletado pela prefeitura de 19% para o ano de 2020 e de até 90% para o ano de 2035, data final do plano (PMN, 2015a). Como citado anteriormente, a legislação municipal já apontava para a reciclagem

dos entulhos da construção civil na cidade de Natal-RN, não somente para os RCC coletados pelo município (PMN 2011). Porém, o que se verifica é que não há acompanhamento para atendimento à legislação.

Em relação aos pequenos geradores, que originam os despejos e a formação de depósitos irregulares coletados pela URBANA, são necessárias ações de fiscalização, para o correto exercício das suas responsabilidades; e de divulgação, para incentivar a utilização dos ecopontos, alinhados com o sistema de limpeza pública local. Esse tipo de comunicação mais eficiente pode ser observado nos sítios eletrônicos das empresas públicas de outros municípios, tais como os de Brasília-DF, Belo Horizonte-MG e São Paulo-SP, onde estão disponíveis, sempre atualizadas, informações sobre serviços, projetos e demais questões. O município também pode incentivar a formação de cooperativas para melhoria dos pequenos transportadores, constituídos por carroças de tração animal, que se configuram como uma rede informal que se cruza com a rede formal de limpeza da cidade, interferindo de forma negativa tanto na gestão dos serviços de limpeza urbana, quanto em outras redes técnicas da cidade, tais como drenagem, saúde e transporte (LOPES e PINHEIRO, 2011).

Por fim, a legislação fomentou a criação de

usinas de reciclagem, porém se verificou a fiscalização apenas para a iniciativa privada, ainda que de forma deficiente, em relação à necessidade de contratação de serviços de coleta e destinação. As usinas de reciclagem de RCC instaladas em municípios circunvizinhos reclamam da falta de incentivo para utilização dos materiais reciclados, em obras do próprio poder público, o que diminui o interesse em investir ou ampliar os investimentos em tecnologias relacionadas a esse fim.

A partir da matriz SWOT, cada fator induz de maneira prática a uma meta a ser alcançada. Para tanto, é necessária a implementação de algumas ações tais como a) assegurar a destinação adequada de RCC; b) alinhar a gestão às políticas vigentes sobre RC; e c) Incentivar a práticas sustentáveis de manejo de RCC.

À guisa de contribuição e sem a pretensão de encerrar a discussão, presente o estudo propõe as seguintes ações, que podem ser empreendidas para o alcance das metas sugeridas, a fim de aperfeiçoar o sistema de gestão de RCC: a) monitoramento da geração de RCC por meio dos alvarás de construção; b) mapeamento e acompanhamento das áreas utilizadas para destinação dos resíduos recolhidos pelas empresas privadas; c) acompanhamento das quantidades coletadas pela URBANA e pelas empresas privadas, de entulho e RCC;

d) fiscalização do cumprimento do PGRCC; e) melhoramento dos ecopontos e instalação dos planejados no PMSB; f) estabelecimento de política que auxilie os pequenos geradores na destinação de resíduos; g) monitoramento das áreas que são rotineiramente contaminadas por deposição irregular; e h) política de incentivo à reciclagem na construção civil.

CONCLUSÕES

Diante do todo observado, a gestão municipal de RCC em Natal atende as principais exigências da Política Nacional de Resíduos Sólidos, no que diz respeito à coleta e destinação final adequadas, embora não haja implementação de incentivos à reciclagem, conforme legislação local, e pouca comunicação entre o poder público e a sociedade. Há muito o que aprimorar no modelo de gestão vigente, visando ações consistentes que apontem para redução, reutilização e reciclagem dos resíduos da construção civil, conforme preconiza a PNRS.

A utilização de aterro de inertes, a instalação de apenas três ecopontos em uma década, e a utilização, em parte, pela iniciativa privada, de usinas de reciclagem de RCC em locais circunvizinhos ainda são ações insuficientes para uma

gestão sustentável dos resíduos sólidos oriundos da construção civil no município de Natal-RN.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2020**. São Paulo: Abrelpe, 2020.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília: Presidência da República, 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 10 mar. 2021.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento – SNS. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos – 2019**. Brasília: SNS/MDR, 2020a. 244 p.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Portaria nº 280, de 29 de junho de 2020**. Brasília DF, 2020b. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-n-280-de-29-de-junho-de-2020-264244199>. Acesso em: 25 jun. 2021.

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO. **Construção Civil impulsiona os investimentos e faz o PIB crescer**. Disponível em: <https://cbic.org.br/construcao-civil-impulsiona-os-investimentos-e-faz-o-pib-crescer/>. Acesso em: 29 ago. 2019.

GÁLVEZ-MARTOS, José-Luis *et al.* Construction and demolition waste best management practice in Europe. **Resources, Conservation And Recycling**, [S./], v. 136, p. 166-178, set. 2018. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.04.016>.

HASSAN, Siti Hafizan *et al.* Waste Management Issues in the Northern Region of Malaysia. **Procedia - Social And Behavioral Sciences**, [S./], v. 42, p. 175-181, 2012. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.04.179>.

HELMS, Marilyn M.; NIXON, Judy. Exploring SWOT analysis – where are we now? A review of academic research from the last decade. **Journal Of Strategy And Management**. Bingley, p. 215-251. ago. 2010. Disponível em: <https://www-emerald.ez139.periodicos.capes.gov.br/insight/publication/issn/1755-425X/vol/3/iss/3>. Acesso em: 12 mar. 2020.

HILL, Terry; WESTBROOK, Roy. SWOT analysis: It's time for a product recall. **Long Range Planning**,

[S./], v. 30, n. 1, p.46-52, fev. 1997. Elsevier BV. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/s0024-6301\(96\)00095-7](http://dx.doi.org/10.1016/s0024-6301(96)00095-7).

KARAK, Tanmoy; BHAGAT, R. M.; BHATTACHARYYA, Pradip. Municipal Solid Waste Generation, Composition, and Management: the world scenario. **Critical Reviews In Environmental Science And Technology**, [S./], v. 42, n. 15, p. 1509-1630, ago. 2012. Informa UK Limited. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/10643389.2011.569871>.

LOPES, Régia Lúcia; PINHEIRO, Sérgio Bezerra. Redes formais e informais de coleta de resíduos sólidos na cidade de Natal-RN: interferência em outras redes urbanas. *In*: 25º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 25., 2011, Recife-PE. **Anais [...]**, Rio de Janeiro: ABES, 2011.

LU, Weisheng; TAM, Vivian W.Y. Construction waste management policies and their effectiveness in Hong Kong: a longitudinal review. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [S./], v. 23, p. 214-223, jul. 2013. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.007>.

OUDA, O. K. M. *et al.* A Case Study of Sustainable Construction Waste Management in Saudi Arabia. **Waste And Biomass Valorization**, [S./], v. 9, n. 12,

p. 2541-2555, 13 dez. 2017. Springer Science and Business Media LLC. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s12649-017-0174-9>.

PMN. PREFEITURA MUNICIPAL DE NATAL. **Lei nº. 6.298/2011**. Dispõe sobre a reciclagem de resíduos provenientes da construção civil e dá outras providências. Natal, DOM, ano XI, nº. 2132, p. 1, 2011.

PMN. PREFEITURA MUNICIPAL DE NATAL. **Plano Municipal de Saneamento Básico do Município de Natal/RN**: produto 04 – concepção de programas, projetos e ações necessárias para atingir os objetivos e metas do PMSB, e definição de ações para emergência e contingência. Natal, 2015a. 197p.

PMN. PREFEITURA MUNICIPAL DE NATAL. **Plano Municipal de Saneamento Básico do Município de Natal/RN**: produto 02 - diagnóstico da situação do saneamento Subproduto 2.2 - Diagnóstico da Situação dos Serviços de Limpeza Urbana e Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos. Natal, 2015b. 116 p.

PMN. Prefeitura Municipal do Natal. Companhia de Serviços Urbanos de Natal. **Gestão dos Resíduos Sólidos do Município de Natal 2018**. Natal, 2018. 43 p.

PMN. PREFEITURA MUNICIPAL DE NATAL. **Lei no. 6.880/2019**- Estabelece a Política Municipal de Saneamento Básico do Município de Natal, e dá outras providências. Natal, DOU n. 4035, p. 1, 2019.

CAPÍTULO IV



POLUIÇÃO GLOBAL DE AMBIENTES MARINHOS: ENCALHES DE RESÍDUOS SÓLIDOS INTERNACIONAIS NO LITORAL DO RIO GRANDE DO NORTE, BRASIL

LUCAS GABRIEL VERÍSSIMO PINHEIRO DA SILVA

ISADORA NATÁLIA ROCHA BARRETO

FELIPE SILVA DE OLIVEIRA

RÉGIA LÚCIA LOPES

JULIO ALEJANDRO NAVONI

INTRODUÇÃO

O lixo marinho é constituído por qualquer tipo de resíduo sólido, como borracha, plástico, metal e outros, e está presente no ambiente marinho por diversos fatores (COE E ROGERS, 1997). Os materiais encontrados nas zonas costeiras podem ser de resíduos domésticos, industriais, de plataformas de óleo e gás, oriundos da atividade pesqueira, todos esses destinados diretamente no mar (COE & ROGERS, 1997; NOAA, 2018). Também

são encontrados resíduos provenientes do ambiente terrestre, que compreendem o lixo proveniente da atividade turística, de aterros, de esgotos domésticos e industriais, da drenagem de rios e do escoamento superficial (NOLKAEMPER, 1997; BEZERRA, FRANZ e BORGES, 2016; ARAÚJO, COSTA e SILVA-CAVALCANTI, 2016). As áreas costeiras são extremamente diversas, variáveis, multifuncionais e oferecem um conjunto de usos, atividades e paisagens (HURTADO, 2010; BORETO e GARCÍA, 2011). Em todo o mundo, o acúmulo e a disseminação de lixo marinho nessas áreas se tornou um problema progressivo (GREGORY, 2009; KUO e HUANG, 2014), o que gera inúmeros impactos negativos, que podem ser classificados em três tipos: biológico, ecossistêmico e econômico (KUO e HUANG, 2014; HIDALGO-RUZ *et al.*, 2018).

O monitoramento de resíduos sólidos nos litorais e o conhecimento da origem desses materiais são necessários para que se possa compreender o grau de impacto no ambiente e nos ecossistemas costeiros, na saúde humana e na economia (SANTOS *et al.*, 2008). No entanto, em diversas partes do mundo, estudos vêm sendo realizados com ênfase na análise da composição, quantificação e distribuição do lixo marinho em praias arenosas (JANG *et al.*, 2014; GAMBINI *et al.*, 2019; DÍAZ-MENDOZA, ELJAIK-URZOLA e MOUTHON-BELLO, 2019; ALVA-

REZ-ZEFERINO, CRUZ-SALAS, VÁZQUEZ-MORILLAS e OJEDA-BENITEZ, 2020). No Brasil, os estudos ainda são restritos a alguns litorais (NEVES *et al.*, 2011; DIAS-FILHO *et al.* 2011; BEZERRA, FRANZ e BORGES, 2016; SOUSA, PEREIRA e JIMÉNEZ, 2016; ANDRADE-NETO *et al.*, 2016; MADUREIRA *et al.*, 2017).

Nesse sentido, o objetivo deste trabalho foi o de identificar os tipos e a origem dos resíduos sólidos encalhados nas praias dos municípios de Ceará-Mirim e Maxaranguape, Rio Grande do Norte.

O estudo foi realizado no litoral dos municípios de Ceará-Mirim e Maxaranguape, localizados na microrregião do leste nordeste do estado do Rio Grande do Norte, pertencente à mesorregião do leste potiguar, onde são desenvolvidas atividades pela Associação de Proteção e Conservação Ambiental Cabo de São Roque (APC Cabo de São Roque), uma organização não governamental, sem fins lucrativos, que desenvolve ações de pesquisa, educação e conservação em prol das tartarugas marinhas.

A área de estudo envolveu sete praias arenosas, compreendendo uma extensão de 32 km de linha de costa: Jacumã, Porto-Mirim, Muriú, Barra de Maxaranguape, Cabo de São Roque, Caraúbas e Maracajaú. A coleta dos materiais ocorreu nos anos de 2019 a 2021, concomitantemente com as atividades de monitoramento reprodutivo e não reprodutivo realizado na região. O monitoramen-

to dos resíduos marinhos envolveu exclusivamente aqueles resíduos sólidos de origem estrangeira.

Após as visualizações, o material era registrado fotograficamente com a localização a partir do suporte do aplicativo Open Camera, onde eram gravadas informações de data e hora, coordenadas de localização e texto personalizado. Posteriormente, os resíduos eram coletados, identificados e destinados de maneira adequada. Esses resíduos foram separados por tipologia (papel, plástico, metal e vidros) e identificados quanto à origem do resíduo, por meio da tradução dos rótulos mediante o uso do aplicativo do Google Tradutor, obtendo-se as descrições contidas nas embalagens coletadas de nacionalidade e tipo de conteúdo. As análises descritivas das informações obtidas foram realizadas utilizando o *software* Microsoft Excel, para confecção de tabelas e gráficos.

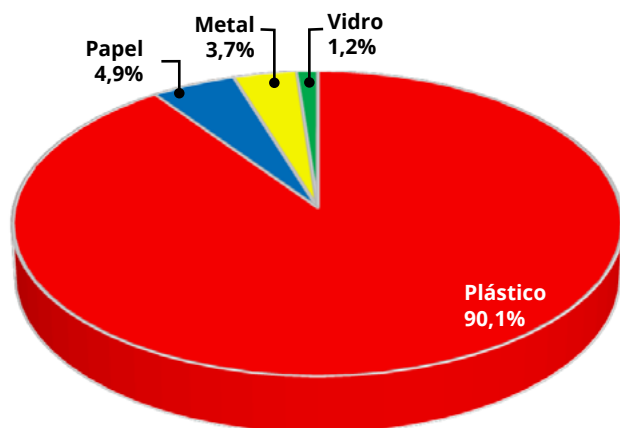
RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em geral, foram visualizadas duas fontes de resíduos encaixados nas praias do litoral pesquisado: resíduos de fontes locais, normalmente deixados por banhistas e moradores; e os de origem estrangeira, possivelmente provenientes das correntes marinhas, da dinâmica de ondas e correntes junto à costa, e de descartes irregulares de

embarcações. Jang *et al.* (2014), ao avaliarem os resíduos plásticos encontrados em seis praias na Coreia, também concluíram que 56% deles tinham origem oceânica e 44% origem terrestre.

Neste estudo, foram coletadas no total 81 unidades de resíduos sólidos nas praias, tratando-se de diversos produtos e materiais. Do total de resíduos coletados, há uma expressiva quantidade de embalagens plásticas, como mostrado na Figura 1, seguindo-se das demais tipologias, como papel, metal e vidro.

Figura 1 – Resíduos sólidos identificados por categoria.



Fonte: elaboração dos autores (2021).

Dentre os resíduos plásticos coletados, predominaram as embalagens de alimentos, produtos

de limpeza e garrafas de óleo. Além disso, outros produtos utilizados no cotidiano das pessoas também foram observados, entre eles caixas de suco e vinho, *spray* de limpeza e inseticidas. Apenas uma garrafa PET sem rótulo foi coletada nos materiais, o que impossibilitou a identificação precisa de sua origem, porém, esse resíduo abrigava diversas embalagens bem conservadas em seu interior, como verifica-se na Figura 2, e todas de origem chinesa.

Figura 2 – A) Garrafa PET sem rótulo; B) Macarrão instantâneo encontrado dentro da garrafa; C) Embalagem de temperos encontrados dentro da garrafa; D) Embalagens de cigarros com origem Chinesa.



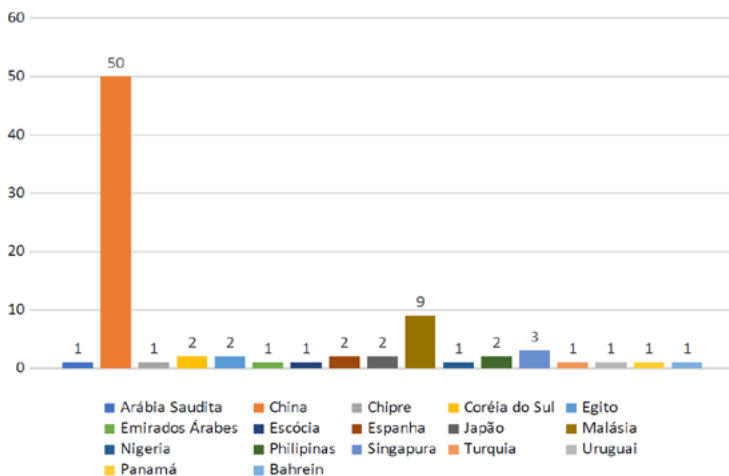
Fonte: elaboração dos autores (2021).

Estudos realizados por Andrade-Neto *et al.* (2016) e Gambini *et al.* (2019), entre outros, tam-

bém identificaram um alto percentual de plásticos nas suas pesquisas com identificação de descartes de resíduos em praias.

Com relação à procedência do material, foram identificados 17 países através dos resíduos encalhados nas praias dos municípios de Ceará-Mirim e Maxaranguape (Gráfico 2), sendo a China com maior abundância de resíduos (61,7%), seguida da Malásia (11,1%), de Singapura (3,7%), da Coreia do Sul, do Egito, da Espanha, do Japão e das Filipinas, todas com 2,5 %, e Arábia Saudita, Chipre, Emirados Árabes, Escócia, Nigéria, Turquia, Uruguai e Bahrein, cada um com apenas 1,2%.

Gráfico 1 – Quantidade de resíduos sólidos por países identificados.



Fonte: elaboração dos autores (2021).

O problema dos resíduos sólidos não se restringe apenas ao Brasil, e esta realidade se deve a práticas locais e globais (ACUÑA, 2017; NOAA, 2018). A ausência de um sistema regular de coleta de lixo persiste nas populações dos continentes asiáticos, africano e latino-americano, fato que expõe a falta de políticas públicas que garantam a saúde da população e a conservação do meio ambiente. Além da concentração de resíduos gerados nacionalmente, anualmente milhares de toneladas de resíduos gerados são oriundos de países desenvolvidos europeus, dos Estados Unidos, do Canadá e do Japão, sendo eles considerados referências mundiais no tratamento de seus resíduos (NASCIMENTO *et al.*, 2017).

Corroborando com o índice elevado de materiais encontrados da China, a garrafa PET da marca Nongfu Spring, que produz água mineral (Figura 3), contribuiu com um número expressivo de garrafas coletadas, chegando a representar 68% do total de resíduos chineses identificados. Nesse total, foram encontrados dois fardos lacrados, porém com garrafas vazias, contendo 12 garrafas cada, caracterizando um possível não abastecimento da água.

Figura 3 – Garrafas de água mineral da marca “Nongfu Spring”.



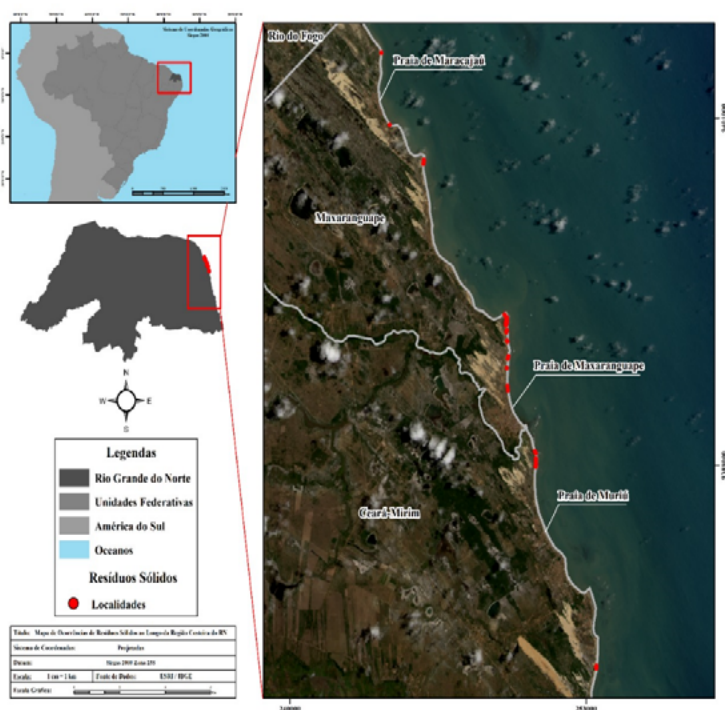
Fonte: elaboração dos autores (2021).

A predominância de resíduos plásticos encontrados tem relação com a sua utilização cotidiana, disseminada em todo o mundo. Os resíduos de plástico se decompõem de forma lenta e podem levar mais de 400 anos para sua total degradação, sendo um material de baixa densidade e assim são transportados com facilidade pelas correntes costeiras e pela ação dos ventos a longas distâncias, se acumulando nas praias (MOORE *et al.*, 2001; SANTOS *et al.*, 2008).

O transporte de resíduos plásticos pelos oceanos torna vulneráveis todos os animais marinhos, visto que, quando esses resíduos de grandes dimensões se fragmentam, afetam diretamente aves, tartarugas e mamíferos, devido à ingestão proposital ou acidental desse material (VAN TRUONG e BEIPING, 2019). Atualmente, cerca de 90% de quase todas as espécies de aves marinhas têm plástico em seu corpo (HONG *et al.* 2013; JAMBECK *et al.*, 2015).

Os resultados obtidos apontaram para a maior concentração de lixo e material coletado na Praia Cabo de São Roque. Por se tratar de uma praia sem movimentação turística, com pouca exploração de banhistas e de moradores, infere-se que todos os materiais foram provenientes das correntes marinhas (Figura 4).

Figura 4 – Demarcação espacial da localização do ponto de coleta dos resíduos sólidos internacionais.



Fonte: elaboração dos autores (2021).

Esse fato causa preocupação por se tratar de uma praia com abundância de ninhos de tartarugas marinhas e, quando as fêmeas migram para as áreas de reprodução, geralmente procuram praias desertas para a postura, que ocorre à noite. Além disso, essas espécies distribuem-se amplamente entre as bacias oceânicas, com registros desde o Ártico até a Tasmânia (MEYLAN e DONNELLY, 1999). Portanto, a ampla distribuição das tartarugas marinhas correlacionadas com a diversidade de lixo internacional que chega na Praia Cabo de São Roque torna essas espécies totalmente vulneráveis para ingestão desses materiais, os quais liberam toxinas que influenciam na taxa de nascimento dos filhotes, além de provocar obstáculos para o percurso de caminhada ao mar dos filhotes recém-nascidos.

CONCLUSÃO

O presente estudo aborda a problemática da poluição ambiental marinha a partir de uma perspectiva global, descrevendo a ocorrência de lixo de origem internacional nas praias do litoral norte do estado do Rio Grande do Norte, onde existe uma atividade reprodutiva de tartarugas de espécies marinhas em risco de extinção.

De acordo com a busca na literatura empreen-

dida por nós, o presente trabalho é o primeiro realizado na região dirigido a descrever a globalização da poluição em ambientes marinhos, salientando como a saúde ambiental encontra-se deteriorada, e expondo um fator potencial para explicar as alterações nas atividades reprodutivas e não reprodutivas de tartarugas marinhas monitoradas na região.

REFERÊNCIAS

ACUÑA, S. Basuras en playas: tendencias e influencias en la acumulación de residuos en zonas costeras a través de experiencias en ciencia ciudadana. **Ecologistas en Acción**. 2017. Disponível em: <http://www.ecologistasenaccion.org/article35098.html>. Acesso em: 25 jun. 2021.

ALVAREZ-ZEFERINO, Juan Carlos *et al.* Method for quantifying and characterization of microplastics in sand beaches. **Revista internacional de contaminación ambiental**, v. 36, n. 1, p. 151-164, 2020.

ANDRADE-NETO, G. F. *et al.* O papel das correntes costeiras na distribuição de lixo na praia de Jauá, litoral norte, estado da Bahia. *In*: II Congresso Ibero Americano de Gestão Integrada de Áreas Litorais. **Anais [...]**, Florianópolis-SC, 2016.

ARAÚJO, M. C.; COSTA, M. F.; SILVA-CAVALCANTI,

J. S. Praias turísticas: uso versus poluição por lixo. *In*: II Congresso Ibero Americano de Gestão Integrada de Áreas Litorais. **Anais** [...]. Florianópolis-SC, 2016.

BEZERRA, D. B.; FRANZ, B.; BORGES, A. C. Poluição da orla da Baía de Guanabara por lixo flutuante no manguezal de Magé. *In*: II Congresso Ibero Americano de Gestão Integrada de Áreas Litorais. **Anais** [...] Florianópolis-SC, 2016.

BORETO, C.M; GARCÍA, L.C. Cuantificación y clasificación de residuos sólidos en playas turísticas. **Evaluación entres playas de santa Marta**, Colombia, 2011. Disponível em: <http://globalgarbage.org/praias/downloads/XIV-COLACMAR-2011/1802.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2021.

COE, J.M; ROGERS, D.B. Marine Debris: sources, impacts and solutions. **Nova York: Springer-Verlag**, 431 p., 1997.

DE SOUSA, R, C.; PEREIRA, C.C.; JIMÉNEZ; J. A. Estuarine Beaches of the Amazon coast: Environmental and Recreational Characterization. **Journal of Coastal Research**, n. 75 (10075), p. 705-709, 2016. DOI: <https://doi.org/10.2112/SI75-141.1>

DIAS-FILHO, M. J. O.; ARAUJO, M. C. B.; SILVA-CALCANTI, J. S.; SILVA, A. C. M. Contaminação da praia de Boa Viagem (Pernambuco-Brasil) por lixo

marinho: relação com o uso da praia. **Arquivos de Ciência do Mar**, 2011, v 44, n. 1, p. 33-39.

DÍAZ-MENDOZA, C.; ELJAIEK-URZOLA, M.; MOUTHON-BELLO, J. Análisis de la variación de los residuos sólidos identificados en playas turísticas en cartagena de indias y su incidencia en la generación de microplásticos. *In*: VIII Simposio Iberoamericano en Ingeniería de Residuos. **Anais [...]**, Asunción, Paraguay, 2019. p. 313-320.

DO NASCIMENTO, C. M. T.; DA CRUZ, M. L. B. Resíduos sólidos: presença e ameaça no espaço geográfico. **GeoTextos**, v. 13, n. 2, 2017.

GAMBINI, R.; PALMA, Y.; RICRA, O.; VIVAS, G.; VÉLEZ-AZAÑERO, A. Quantification and characterization of solid waste at san pedro de lurín beach, Lima, Peru. **The Biologist (Lima)**, p. 197-205, 2019.

GREGORY, M. Environmental implications of plasticdebrisinmarinesettings entanglement, ingestion, smothering, hangers-on, hitch-hiking and alien invasions. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological sciences**, v. 364, n. 1526, p. 2013-2025, 2009.

HIDALGO-RUZ, V. *et al.* Spatio-temporal variation of anthropogenic marine debris on Chilean beaches. **Marine Pollution Bulletin**, v. 126, p. 516-524, 2018.

HONG, S. *et al.* Impacts of marine debris on wild animals in the coastal area of Korea. **Marine Pollution Bulletin**, v. 66, n. 1-2, p. 117-124, 2013.

HURTADO, Y. **Determinación de un modelo de medición de capacidad de carga en playas turísticas de uso intensivo, como herramienta para el manejo integrado costero. Aplicación en la playa El Rodadero-Colombia.** Mestrado em Manejo Integrado Costero, Universidad del Magdalena. Santa Marta, Colombia, 2010.

JAMBECK J. R. *et al.* Plastic waste inputs from land into the ocean. **Science**, v. 347, p. 768–771, 2015.

JANG, Y. *et al.* Sources of plastic marine debris on beaches of Korea: more from the ocean than the land. **Ocean Science Journal**, v. 49, n. 2, p. 151-162, 2014.

KUO, F.; HUANG, H. Strategy for mitigation of marine debris: analysis of sources and composition of marine debris in northern Taiwan. **Marine Pollution Bulletin**, v. 83, n. 1, p. 70-78, 2014.

MADUREIRA, E. A. L. *et al.* Análise da composição, distribuição e origem do lixo nas praias oceânicas de dois rios e Lopes Mendes na Ilha Grande (Angra dos Reis, RJ). **Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento**, v. 1, p. 3015-3020, 2017.

MEYLAN, A. B.; DONNELLY, M. Status justification for listing the hawksbill turtle (*Eretmochelys imbricata*) as critically endangered on the 1996 IUCN Red List of Threatened Animals. **Chelonian Conservation and Biology**, v. 3, n. 2, p. 200-224, 1999.

MOORE, C.J.; MOORE, S.L.; LEECASTER, M.K. & WEISBERG, S.B. A comparison of plastic and plankton in the North Pacific central gyre. **Marine pollution Bulletin**, v. 42, n. 12, p. 1297-1300, 2001.

NEVES, R. C. *et al.* Análise qualitativa da distribuição de lixo na praia da Barrinha (Vila Velha-ES). **Revista de Gestão Costeira Integrada-Journal of Integrated Coastal Zone Management**, v. 11, n. 1, p. 57-64, 2011.

NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration. **Ocean pollution**. 2018. Disponível em: <http://www.noaa.gov/resource-collections/ocean-pollution>. Acesso em: 20 jun. 2021.

NOLLKAEMPER, A. Legal regulation of upland discharges of marine debris: from local to global controls and back. *In*: Coe, J.M. & Rogers, D.B. (org.), **Marine debris**. Springer-Verlag, New York, 1997, p. 293-305. ISBN: 0387947590.

SANTOS, I.R.; WALLNER-KERSANACH, M.; BAPTISTA

NETO, J. A. **Poluição marinha por resíduos sólidos**. p. 309-330, 2008.

SANTOS, R. G.; ANDRADES, R.; BOLDRINI, M. A.; MARTINS, A. S. Debris ingestion by juvenile marine turtles: an underestimated problem. **Marine Pollution Bulletin**, v. 93, p. 37-43, 2015.

VAN TRUONG, N.; BEIPING, C. Plastic marine debris: sources, impacts and management. **International Journal of Environmental Studies**, v. 76, n. 6, p. 953-973, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1080/0207233.2019.1662211>



AVALIAÇÃO DA EUTROFIZAÇÃO DO ESTUÁRIO DO RIO POTENGI ATRAVÉS DO MÉTODO TRIX

MARIA LIBÂNIA CARLOS DOS SANTOS

JULIO ALEJANDRO NAVONI

LUCIANA DE CASTRO MEDEIROS

JEAN LEITE TAVARES

INTRODUÇÃO

Os impactos antropogênicos ao longo do tempo nos recursos hídricos em decorrência do crescimento urbano desordenado às suas margens e da ausência de saneamento ambiental, o qual inclui o descarte de efluentes domésticos, industriais ou agrícolas, têm aumentado a preocupação mundial com a qualidade dos ecossistemas aquáticos (TUCCI, 2017). Diante dessa premissa, o Plano Nacional de Recursos Hídricos tem como objetivo garantir os padrões de qualidade de água às futuras gerações e seus usos.

Na resolução CONAMA n357, prevê o uso e os limites tanto das variáveis ambientais quanto de parâmetros orgânicos e inorgânicos permitidos para o descarte nos corpos aquáticos. Além disso, O PNRH trata da integração da gestão das bacias hidrográficas com as zonas costeiras e estuarinas.

Tão relevantes quanto os biosistemas de água doce, sejam eles lênticos ou lóticos, os estuários possuem importância socioeconômica e ecológica (DUARTE, 1997). Segundo Villas (2014), os estuários são corpos de água parcialmente fechados, com zonas de transição entre os ecossistemas dulcícolas e marinhos. Este ecônomo tem como peculiaridade as condições físicas e químicas muito variáveis no tempo e no espaço, uma vez que a água do mar entra nele por uma ou por várias conexões livres com o oceano aberto ou com qualquer outro corpo de água salino costeiro, resultando em uma mistura das correntes de descarga fluvial com o oceano adjacente e produzindo um gradiente de salinidade hídrica (PERILHO, 1995; FUNFII, 2007; TUNDISI, 2008).

Nesse sentido, Bertoldi (2014) considera que características físico-químicas como elevada concentração de matéria orgânica, potencial redox, nutrientes dissolvidos e salinidade favore-

cem o desenvolvimento de empreendimentos aquícolas, de industriais salineiras, e, por consequência, de áreas urbanizadas. Além disso, os estuários possuem importância sanitária, já que favorecem a condução de efluentes até o mar, devido à sua hidrodinâmica (DUARTE, 1997). Por conseguinte, impactos devido ao descarte de efluentes e à poluição por resíduos químicos contribuem com a hipernutrição e eutrofização do corpo aquático (BARBIERI *et al.*, 2014).

A principal consequência da poluição dos recursos hídricos é a eutrofização, ocasionada pelo aumento das concentrações de nutrientes nitrogenados e fosfatados. De acordo com Glibet (2017), a eutrofização é um processo que está associado não apenas ao crescimento da comunidade primária, mas a mudanças na biodiversidade, além da redução da concentração de oxigênio dissolvido, da diminuição da transparência e do aumento da cor e da turbidez (VOLLENWEIDER, 1981; VON-PERLING, 1996; ESTEVES, 1998).

Diante disso, por anos vêm sendo propostos e utilizados índices com o intuito de mensurar o grau de eutrofização de um corpo aquático, valendo-se de variáveis limnológicas físicas, químicas e biológicas. No entanto, os índices propostos por Calson (1977), OECD (1982) e

Lamparelli (2004) não atendem à hidrodinâmica dos estuários. À vista disso, Vollenmeider (1998) sugeriu o índice de trofia TRIX, que, além de utilizar as concentrações de nitrogênio e de fósforo total, inclui o oxigênio dissolvido de saturação e vem sendo aplicado em diversos trabalhos realizados em estuários.

O estuário do rio Potengi possui uma grande importância ambiental e socioeconômica, considerando que suas comunidades ribeirinhas sobrevivem da maricultura e da carcinicultura (Belarmino *et al*, 2014).

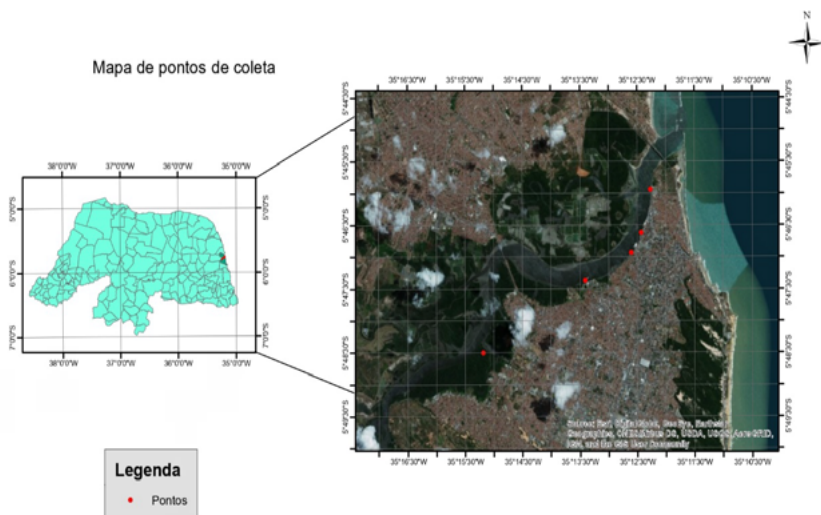
No entanto, nas últimas décadas, o crescimento urbano desordenado da cidade de Natal e a carência de saneamento, que engloba o tratamento e descarte de efluente, prejudicou a qualidade da água deste estuário (TAVARES *et al.*, 2014). Com isso, o objetivo deste trabalho é verificar o grau de trofia do estuário, com uso do TRIX correlacionando com a produção primária do fitoplâncton.

O Rio Potengi, que nasce em Cerro-Corá e encontra sua foz em Natal, a 176 km de sua nascente, perfaz uma bacia hidrográfica de 3.180km². O seu estuário pertence à Bacia Hidrográfica Potengi, localizada no município de Natal, no estado do Rio Grande do Norte, e estende-se do município de Macaíba até sua foz,

no Forte do Reis Magos.

Para este trabalho, foram escolhidos cinco pontos de coleta, sendo um deles no médio estuário (P1) e quatro no baixo estuário (P2, P3, P4, P5), conforme exibe a Tabela 01. As amostras para as análises físico-químicas e biológicas foram feitas na camada do epilímnio. O armazenamento para análises abióticas foi realizado em garrafas de 1,5L, já para os parâmetros bióticos utilizou-se garrafas de 500ml, conservadas com lugol 1%.

Figura 1 – Pontos de amostragens no estuário.



Fonte: elaboração dos autores (2019).

Tabela 1 - Identificação dos pontos de coleta

Pontos	Identificação	Setorização do estuário	Coordenadas (UTM)	
			latitude	longitude
P1	A montante da ponte velha	Médio estuário	5°45'37.45" S	35°14'48.83"O
P2	Dique da base Naval	Baixo estuário	5°47'21.67" S	35°13'24.35"O
P3	Enfrente a pedra do Rosário	Baixo estuário	5°46'56.14" S	35°12'36.13"O
P4	Capitania dos portos	Baixo estuário	5°46'37.45" S	35°12'25.29"O
P5	Em frente ao iate clube	Baixo estuário	5°45'56.39" S	35°12'15.61"O

Fonte: elaboração dos autores (2019).

O município de Natal possui suas maiores precipitações pluviométricas nos meses de março a agosto, e baixas precipitações de setembro a fevereiro. A variação de temperatura é de 22° C a 30° C. Este estudo foi realizado no período de maior pluviosidade, isto é, entre maio e agosto de 2019, reunindo o total de 40 amostras, nas marés de quadratura e sizígia, durante as marés baixa e alta. O nível da maré alta variou entre 1,8 m e 2,4m, e o de maré baixa entre 0,0 m e 0,6 m.

Para esta pesquisa, foram analisadas variáveis bióticas, abióticas e biológicas, com seus respectivos métodos, conforme a Tabela 2 mostra.

Tabela 2 – Parâmetros analisados

Variáveis ambientais	unidade	Métodos	Referências
BIOLÓGICOS			
Clorofila A	ug/l	Extração por cetona	APHA
Fitoplâncton	ind/ml	Câmara de Utermohl	
QUÍMICA			
Fosfato	mg/ P	Ácido ascórbico	APHA
Fósforo total	mg/l de P	Ácido ascórbico	APHA
Oxigênio dissolvido (OD)	mg/deO ₂	Winkler	APHA
Nitrogênio amoniacal	mg/de N	Kjeldahl	APHA
Nitrito	mg/de N	NED	APHA
Nitrato	mg/de N	ultravioleta	APHA
pH	-	phmetro	APHA
Salinidade	%		APHA

Fonte: elaboração dos autores (2019).

CÁLCULO DO TRIX

O cálculo do índice do estado trófico utilizado neste trabalho foi proposto por Vollenweider *et al.* (1998).

$$\text{TRIX} = \frac{[\text{Log}(\text{Cl}^{\text{a}} \cdot \text{Abs}(100 - \% \text{Osat}) \cdot \text{NID FID}) \cdot k]}{m}$$

- TRIX: índice do estado trófico;
- Cl^a: concentração da clorofila A em mg/m³;

- Abs(100-%Osat): desvio absoluto a partir do valor máximo de saturação do oxigênio dissolvido;
- NID: concentração de nitrogênio inorgânico dissolvido em mg/m³;
- FID: concentração de fósforo inorgânico dissolvido em mg/ m³;
- k = fator referente à soma dos limites inferiores das variáveis adotadas para o cálculo do TRIX;
- m = fator referente à soma das diferenças entre os valores máximos e mínimos de cada variável do TRIX dividida por 10.

Tabela 03 – Estado de trofia

Trix	Estado trófico	características
<2	ultra-oligotrófico	Muito pobremente produtivo e estado trófico muito baixo
2-4	oligotrófico	Pobremente produtivo e estado trófico baixo
4-5	mesotrófico	Moderadamente produtivo e estado trófico mediano
5-6	meso-trofico	Moderadamente a altamente produtivo e alto estado trófico
6-8	eutrófico	Altamente produtivo e maior estado trófico

Fonte: elaboração dos autores (2019).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

VARIÁVEIS LIMNOLÓGICAS

As análises estatísticas mostradas nas Tabelas 4 e 5 indicam os valores máximos, mínimos e a média de cada ponto durante as marés alta e baixa. Dessa forma, o médio e o baixo estuários apresentaram salinidade crescente, com máxima de 34,85% na maré alta no ponto 5 e menor valor de 27,76 % no ponto 1 na maré baixa, sendo esse classificado como euhalino. O potencial hidrogeniônico apresentou teor alcalino durante as variações da maré em todos os pontos monitorados, apresentando valores crescentes de acordo com a salinidade. O valor mínimo apresentado foi o de 7,9 na maré baixa, enquanto o máximo foi o de 8,23 na maré alta, o que demonstra a grande influência das águas marinhas nos pontos monitorados, como foi visualizado por Rodrigues (2010)

Tabela 4 – Valores máximos, mínimos e médios da variáveis limnológicas na maré alta.

Maré Alta		OD (mg\m³)	Salinidade ‰	pH	NID (mg\m³)	FID (mg\m³)	Clorofila A (mg\m³)
Ponto 01	Máximo	95	32	8,11	412	617	8020
	Mínimo	40	29,81	7,9	114	85	2130
	Média	69,5	30,69	8,02	259	259	3975
	Desvio padrão	25,87	1,25	0,09	250,2	250,2	2756
Ponto 02	Máximo	81	34,30	8,60	247	277	10700
	Mínimo	45	30,78	8,41	70	133	1060
	Média	62,68	32,68	8,26	148,7	186	4550
	Desvio padrão	16,44	1,70	1,16	74,60	76,37	4565
Ponto 03	Máximo	82,33	34,50	8,57	257	280	13360
	Mínimo	47,31	32,54	8,10	70	177	1060
	Média	61,66	33,58	8,30	163	216	5072
	Desvio padrão	15,56	0,81	0,28	76,38	45,81	5599
Ponto 04	Máximo	74,75	33,80	8,57	288	240	21380
	Mínimo	45	32,60	8,00	203	159	2130
	Média	59,47	33,24	8,32	74	202	7087
	Desvio padrão	13,93	0,57	0,29	98,97	40,91	9531
Ponto 05	Máximo	82,27	34,85	8,31	301	150	5340
	Mínimo	43,10	33,33	8,05	70	47	2130
	Média	59,93	34,00	8,20	198	87	3120
	Desvio padrão	17,83	0,57	0,11	127,84	47,57	1436

Fonte: elaboração dos autores (2019).

Os compostos fosfatados e nitrogenados apresentaram valores maiores no Ponto 1 em ambas as marés. No entanto, de acordo com a Figura 1, no mês de julho, o ponto 3, onde ocorre descarte de efluentes, apresentou valores maiores nas duas fases da maré em relação aos demais pontos. Os menores valores foram detectados no Ponto 5, onde detectou-se maior salinidade. Valores inferiores de NID e FID em pontos com salinidade alta foram visualizados por Otsuka (2014) no estuário do rio Botafogo e por Santos (2007) na plataforma continental do Amazonas.

Tabela 5 – Valores máximos, mínimos e médios das variáveis limnológicas na maré baixa.

Maré Baixa		OD (mg\m ³)	Salinidade	pH	NID (mg\ m ³)	FID (mg\ m ³)	Clorofila A (mg\m ³)
Ponto 01	Máximo	90	30,60	8,56	822	348	2940
	Mínimo	37	27,76	7,94	108	181	3200
	Média	67,90	28,90	8,25	400	253	1350
	Desvio padrão	25,34	1,29	0,32	275,1	70,80	11174
Ponto 02	Máximo	68,80	31,54	8,50	348	305	13210
	Mínimo	41	29,58	8,10	99	123	2670
	Média	55,70	30,70	8,16	246	219,7	5437
	Desvio padrão	12,28	0,95	0,21	243,6	77,27	51,87

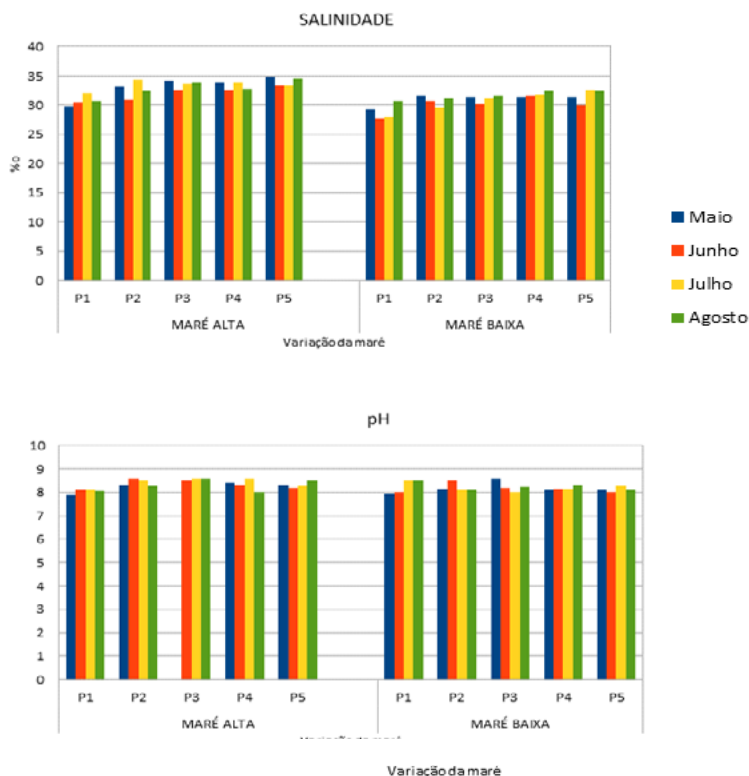
Ponto 03	Máximo	81,5	31,64	8,22	420	326	16630
	Mínimo	45	30,19	8,06	162	215	2130
	Média	60,85	31,11	8,12	306	275,5	13872
	Desvio padrão	17	0,50	0,10	236,6	49,23	8213
Ponto 04	Máximo	65,30	32,48	8,40	338	300	32070
	Mínimo	41	31,50	8,14	70	118	2130
	Média	57,80	31,60	8,26	264	244	1063
	Desvio padrão	12,57	0,50	0,12	256,9	36,41	14357
Ponto 05	Máximo	57,80	32,60	8,28	398	197	8200
	Mínimo	40,70	30,03	8,08	190	128	2670
	Média	57,80	31,62	8,11	279	168	5387
	Desvio padrão	18,77	0,92	0,11	109,0	29,50	2258

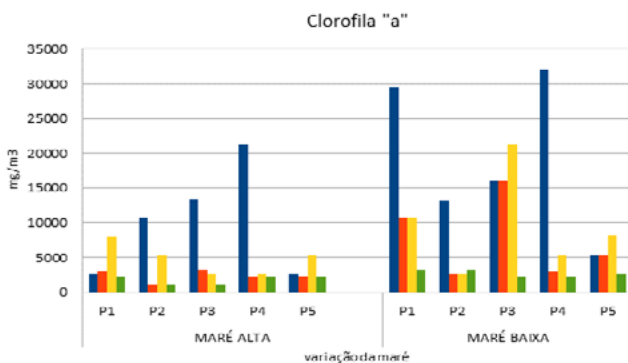
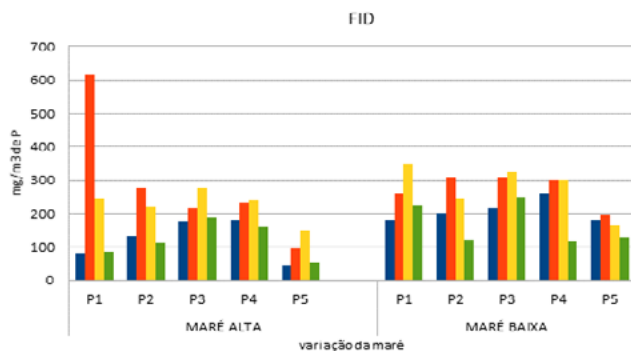
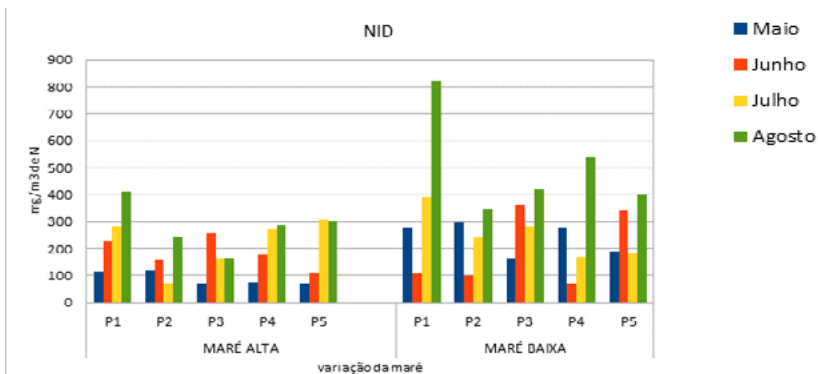
Fonte: elaboração dos autores (2019).

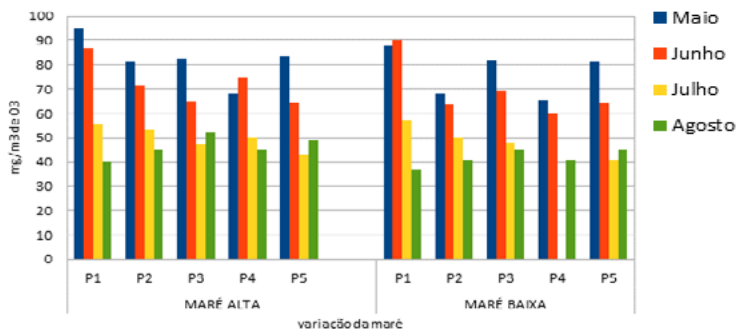
Para Borba (2018), as concentrações de oxigênio de saturação na coluna d'água indicam uma possível poluição química, física ou biológica. As concentrações de oxigênio são importantes para o ecossistema aquático, pois o elemento faz parte dos processos bioquímicos e biológicos. Além disso, suas baixas concentrações são um indicador de poluição (NORIEGA,2005). Assim como os nutrientes, o oxigênio de saturação apresentou valores variáveis ao longo do estuário: os maiores valores verificados foram no ponto 4 nas duas fases da maré, e os menores valores foram registrados durante a maré baixa com percentual de 47%

e com níveis altos na maré alta de 95%. Essas oscilações dos níveis de oxigênio estão relacionadas com a penetração e a mistura das águas marinhas (SILVA, 2009). Sendo assim, de acordo com Macêdo (1978), o estuário foi classificado como de baixa saturação, e, com isso, como semipoluído. Resultados semelhante foram descritos por Silva (2009) no estuário do rio Formoso-PE.

Figura 3 – Variação dos parâmetros bióticos e abióticos.







Fonte: elaboração dos autores (2019).

A clorofila A apresentou concentrações maiores nos meses de maio e julho. De acordo com Aquino (2012), as variações pluviométricas favorecem o desenvolvimento do fitoplâncton, e, conseqüentemente, valores altos desse tipo de clorofila, o que pode ser observado por Fernandes (2017) no estuário do rio Apodi-Mossoró, por Ot-suka (2014) no estuário do rio Botafogo e por Souza *et al.* (2009) no estuário do rio Cachoeira.

VALOR DO TRIX E GÊNEROS DO FITOPLÂNCTON

A produção primária dos ecossistemas aquáticos é representada pela comunidade fito-planctônica. No entanto, as ações antropogênicas, como o descarte de efluentes domésticos e industriais, elevam as concentrações de nutrientes e favorecem a alteração do fitoplâncton e a qualidade

do corpo aquático (ERGÜL, AKSAN e İPŞIROĞLU, 2018; GONG *et al.*, 2018). Dessa forma, a variação dos níveis de trofia está diretamente ligada à composição dos gêneros de fitoplâncton.

O estuário do rio Potengi recebe descarte de efluentes dos municípios de São Gonçalo do Amarante e outros, de forma difusa, provenientes de Natal. Além disso, nele ocorre o descarte do efluente final da Estação de Tratamento de Esgoto Central Dom Nivaldo. No presente estudo, as zonas do médio e baixo estuário apresentaram valores médios de mesotrófico e eutrofizado, como mostra a Figura 4.

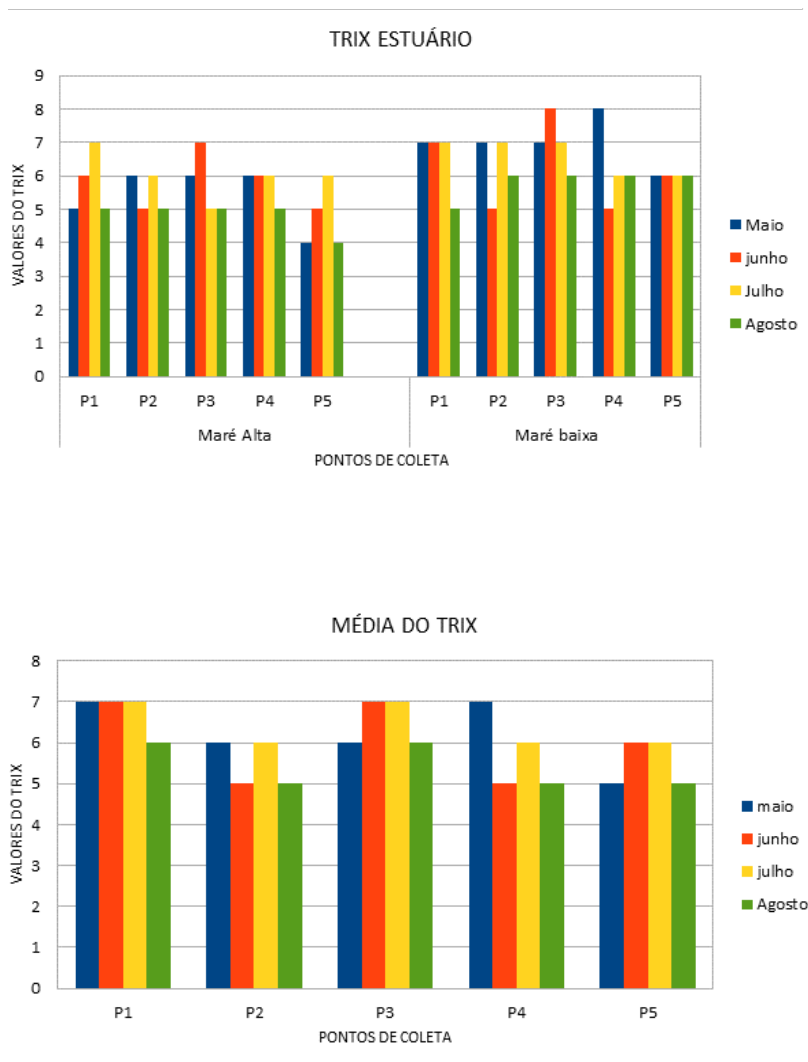
O Estuário apresentou 65% das amostras como eutrofizadas. Corroborando com esta classificação no grau de trofia, Tavares *et al.* (2014), em seu estudo, também classificaram a zona do médio e baixo estuário como mesotrófico e eutrófico. As altas concentrações de nutrientes e temperaturas do corpo aquático contribuem para a floração de grupos do fitoplâncton como o dinoflagelado. A predominância deste grupo foi observada no mês de junho, principalmente no Ponto 1, com valores de 22×10^3 ind/ml, em que as concentrações de compostos fosfatados e nitrogenados foram elevadas, como mostra a Figura 03.

Estes compostos são importantes para o

metabolismo dos organismos aquáticos (MARQUES, 2017). Sendo assim, uma exorbitante concentração de nutrientes e de matéria orgânica pode favorecer a proliferação de dinoflagelados, que têm como consequência a maré vermelha (SOUZA *et al.*, 2007). Resultado similar foi verificado por Souza *et al.* (2009) na zona do baixo estuário na Estação de Tratamento de Ilheús, onde ocorreu a proliferação de diatomáceas e dinoflagelados.

Para Buzancic (2016), a floração de dinoflagelados é favorecida pelas concentrações elevadas de FID, o que corrobora com a razão de NID:FID do mês de junho, quando os níveis de FID foram de 600mg/m³ e NID de 200mg/m³ no Ponto 1. Sendo assim, as altas concentrações de nutrientes provenientes dos descartes dos efluentes no estuário contribuíram para o desenvolvimento dos dinoflagelados, quando o TRIX apresentou grau eutrofizado. Deste grupo de fitoplâncton, ocorreu a predominância do gênero *Gymnodinium*. O mesmo resultado foi encontrado por Ergül, Aksan e İpşiroğlu (2018). Para Uribe e Ruiz (2001) e Rath *et al.* (2018), além das altas concentrações de nutrientes, a temperatura e a salinidade também favorecem a floração deste microrganismo.

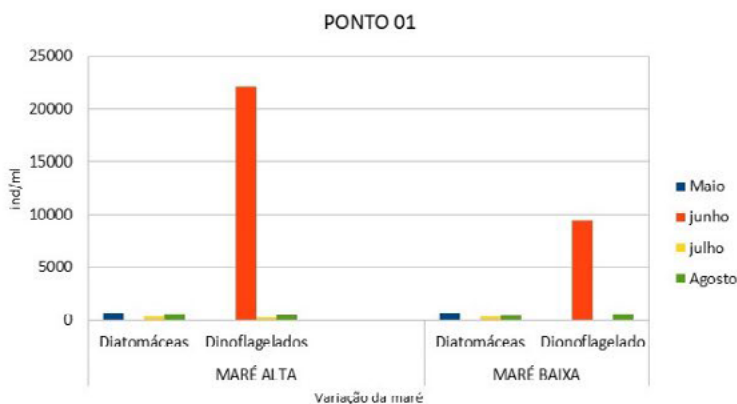
Figura 4 - Valores do TRIX.



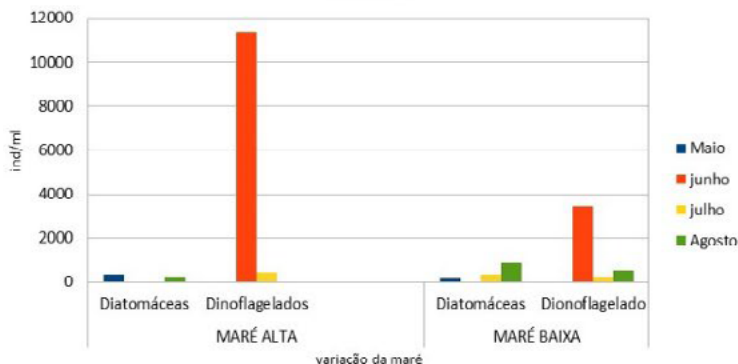
Fonte: elaboração dos autores (2019).

As diatomáceas apareceram em todos os pontos durante o período de estudo, e não houve predominância de nenhum gênero em específico. O Ponto 4 apresentou a maior concentração de diatomáceas no mês de agosto, quando o TRIX foi classificado como mesotrófico e os níveis de NID foram elevados, como mostram as Figuras 3 e 5. Antagonicamente aos dinoflagelados, as diatomáceas se desenvolvem melhor quando as concentrações de NID são maiores que as de FID (BUZAN-CIC, 2016). Para Procopiak *et al.* (2019), este grupo do fitoplâncton é o mais representativo em regiões estuarinas, e é considerado um dos principais grupos de produtores do ecossistema estuarino.

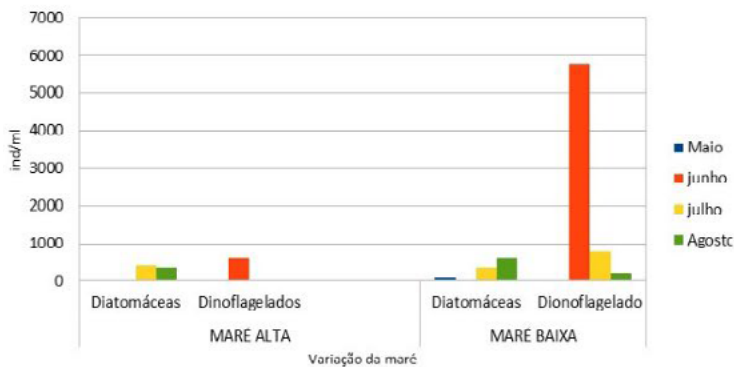
Figura 5 – Principais grupos encontrados no estuário.



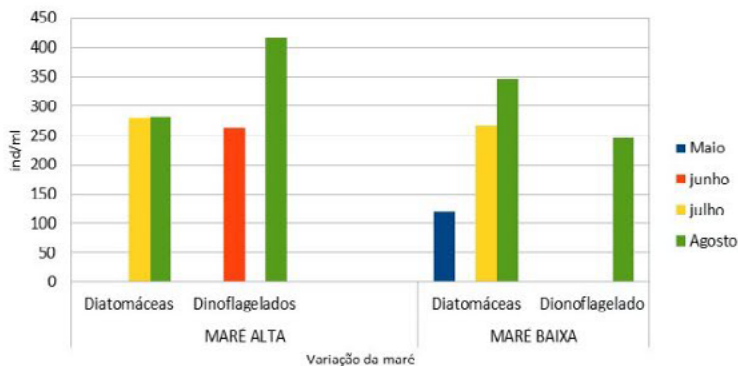
PONTO 02

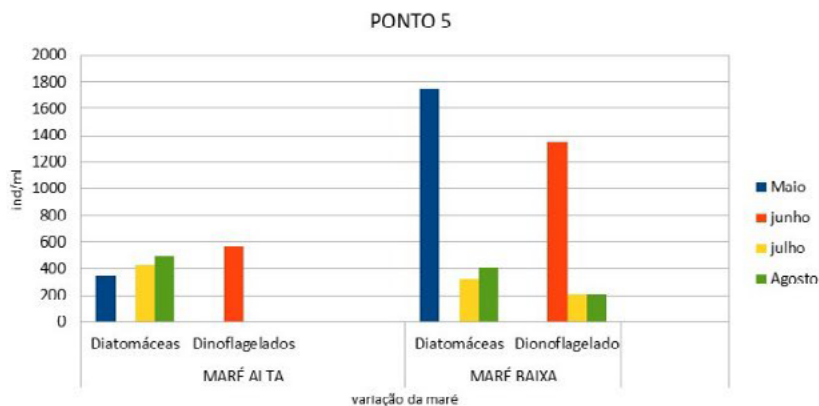


PONTO 03



PONTO 04





Fonte: elaboração dos autores (2019).

CONCLUSÃO

Com base nos parâmetros analisados, o estuário do Potengi apresentou estado trófico variando de mesotrófico para eutrófico, o que contribuiu para o desenvolvimento de dinoflagelados potencialmente tóxicos, como o *Gymnodinium*. As diatomáceas, por sua vez, apresentaram maiores concentrações quando o estuário foi classificado como mesotrófico. Dessa forma, foi possível verificar que o TRIX associado à comunidade fitoplancônica é uma ferramenta útil para avaliar a qualidade de água do estuário.

REFERÊNCIAS

AQUINO, Eveline Pinheiro *et al.* Biomassa fitoplanctônica e fatores ambientais em um estuário tropical do Brasil. **Tropical Oceanography**, Recife, v. 40, n. 1 p. 17-28, 2012.

ERGÜL, Halim Aytekin; AKSAN, Serdar; İPŞİROĞLU, Merve. Assessmente of the consecutive harmful dinoflagellate blooms during 2015 inthe izmit Bay (the Mamara Sea). **Acta Oceanologica Sinica.**, v. 37, n. 8. p. 91-101, 2018.

BARBIERI, Edison; MARQUEZ, Hécio Luiz de Almeida; CAMPOLIM, Marcos Buher; SALVARANI, Patricia Ishisaki. Avaliação dos Impactos ambientais e socioeconômicos da aquicultura na região estuária-lagunar de Cananéia, São Paulo, Brasil. **Revista Gestão Costeira Integrada**, p. 386-398, mai 2014.

BELARMINO, Pedro Henrique P. *et al.* Resíduos sólidos em manguezal no rio Potengi (Natal, RN, Brasil): relação com a localização e usos. *Revista de Gestão Costeira Integrada – Journal of Integrated Coastal Zone Management*, v. 14, n. 3, p.447-457, 2014.

BERLOLDI, Larissa. **Avaliação do estado trófico de um sistema estuarino tropical a partir do índice trófico trix**. Dissertação (Mestrado em Oceanografia Ambiental) – Universidade Federal do Es-

pírito Santo, Aracruz, 2014, 92p.

BORBA, Juliana Marques Coelho. **Estudo das relações entre a comunidade fitoplanctônica e variáveis ambientais nas águas estuarinas do Rio Anil, São Luis - Maranhão.** 2018. 114p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Oceanografia) – Universidade Estadual do Maranhão, São Luís, 2018.

BRASIL. **Resolução CONAMA nº 357**, de 17 de março de 2005. Da classificação de águas, doces, salobras e salinas do Território Nacional.

BUZANCIC, Mia *et. al.* Eutrophication influence on phytoplankton community composition in three bays on the eastern Adriatic coast. **Oceanologia**, v. 58, p.302-316, 2016.

CARLSON, R. E. A trophic state index for lakes. **Limnology and Oceanography**, v. 22, n. 2, p. 361-369, 1977.

DE SOUZA, Marcelo Friederichs Landim *et al.* Distribuição de nutrientes dissolvidos e clorofila-a no Estuário do Rio Cachoeira, Nordeste do Brasil. *Atlântica (Rio Grande)*, v. 31, n. 1, p. 107-121, 2009.

DUARTE, António A.L. Sampaio; VIEIRA, José M. Pereira. **Caracterização dos ambientes estuarinos:**

mistura em estuários. 1997.

ESTEVES, Francisco de Assis. **Fundamentos de Limnologia**. Interciência, 2008.

FERNANDES, Rogério Taygra *et al.* Composição da Comunidade fitoplânctônica no estuário do rio Apodi-Mossoró, semiárido- brasileiro. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento sustentável**, Pombal, PB, v.12, n. 2, p. 325-337, 2017.

GONG, Weida; PAERL, Hans; MARCHETTI, Adrian. Eukaryotic phytoplankton community spatiotemporal dynamics as identified through gene expression within a eutrophic estuary. **Environmental Microbiology**, v.20, n. 3, p. 1095–1111, 2018.

LAMPARELLI, Marta Condé. **Graus de trofia e corpos d'água do estado de São Paulo: avaliação dos métodos de monitoramento**. 2004. 238p. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade de São Paulo. São Paulo, 2004.

MACEDO S.J.; KOENING, M.L. **Áreas estuarinas do estado de Pernambuco**. Recife: CPRH, 1987, 350 p.

NORIEGA, Carlos Delgado *et al.* Distribuição Espacial da biomassa fitoplanctônica e sua relação com os sais nutrientes, no sistema Estuarino de Barra das Jangadas (Pernambuco-Brasil). **Arquivos de Ciên-**

cias do Mar, Fortaleza, v. 38, n. 1-2, p. 5-18, 2005.

OECD. Organisation for Economic Co-operation and Development. **Eutrophication of water, monitoring, assessment na control**. Paris, França: OECD, 1982. 154 p.

OTSUKA, Amanda Yumi *et al.* Condições ambientais do estuário do rio Botafogo (Itamaracá- Pernambuco-Brasil): clorofila "a" e algumas variáveis ambientais. **Tropical oceanography**, Recife, v.42, n.3, p 111-127, 2014.

PACZKOWSKA, Joanna *et al.* Drivers of phytoplankton production and community structure in nutrient-poor estuaries receiving terrestrial organic inflow. **Marine Environmental Research**, v. 151, p. 1-10, 2019.

RATH, Aseem R.; MITBAVKAR, Smita; ANIL, Arga Chandrashekar. Phytoplankton community structure in relation to environmental factors from the New Mangalore Port Waters along the southwest coast of Índia. **Environmental monitoring and assessment**, v. 190, n. 8, p. 1-24, 2018.

RODRIGUES, Eliesé Idalino; CUTRIM, Marcelo, Valério Jansen. Relação entre as variáveis **físicas, químicas e** fitoplantônicas de três áreas estuarinas da costa Norte do Brasil- São José de Ribamar, Ce-

dral e Cajapió, MA. **Arquivos de Ciências do Mar**, v. 43, n. 2, p. 45-54. Fortaleza, 2010.

SANTOS, Maria de Lourdes Souza *et al.* Estudos das diferentes formas de fósforo nas águas da plataforma continental do Amazonas. **Química Nova**, v. 30, n. 3, p. 569-573, 2007.

SILVA, Tathiane Galdino dos *et al.* Dinâmica da Biomassa Fitoplanctônica e variáveis ambientais em um estuário tropicais (Bacia do Pina, Recife, PE). **Revista Brasileira de Engenharia de Pesca**, v. 4, n. 1, p. 95-109, 2009.

TAVARES, Jean Leite; CALADO, André Luis Araújo; FONTES, Roberto Fioravanti Carelli. Estudos iniciais para uso do índice trix para análise do nível de eutrofização no coestúrio do Rio Potengi - Natal - RN - Brasil. **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: investigación, desarrollo y práctica**, v. 7, n. 3, p. 297-308, 2014.

TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. Indicador de Sustentabilidade Hídrica Urbana. **Revista Gestão de Água da América Latina**, v. 14, p. 1-12, 2017.

TUNDISI, José Galizia; TUNDISI, Takako Matsumura. **Limnologia**. Oficina de textos, 2008.

URIBE, Juan Carlos; RUIZ, Milena. *Gymnodinium*

brown tide in the Magellanic fjords, southern Chile. **Revista de Biología Marina y Oceanografía**, v. 36, n. 2, p. 155-164, 2001.

VILLAS, Federico *et al.* Estuary. **Encyclopedia of Planetary Landforms**, New York, 2014.

VOLLENWEIDER, R. A. *et al.* Characterization of the trophic conditions of marine coastal waters with special reference to the nw adriatic sea: proposal for a trophic scale, turbidity and generalized water quality index. **Environmetrics**: The official journal of the International Environmetrics Society, v. 9, n. 3, p. 329-357, 1998.

VON-PERLING; Marcos. **Introdução à qualidades das água e tratamentos do efluentes**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 1996.

CAPÍTULO VI



VIABILIDADE DO REÚSO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS PARA A RECARGA ARTIFICIAL DE AQUÍFERO

TEÔNIA CASADO DA SILVA

JEAN LEITE TAVARES

INTRODUÇÃO

Em todo o mundo, há um crescente interesse pelo reúso de água em áreas urbanas, visto que suas reservas de água doce estão se aproximando do limite de suprimento, devido ao aumento da demanda, tornando o reúso potável (direto ou indireto) uma alternativa viável para prolongar a vida útil das fontes de abastecimento (METCALF e EDDY, 2016). Não somente locais com histórico de estresse hídrico, como Israel e África do Sul, mas países como Estados Unidos, Espanha e Alemanha também utilizam largamente o reúso de água para complementar a disponibilidade hídrica, obedecendo aos critérios de regulação estabelecidos

(ALCALDE-SANZ e GAWLIK, 2017).

Há uma diversidade de modalidades de reúso, resumidamente classificadas em potável e não-potável. Dentre essas alternativas, a recarga artificial de aquíferos (RAA) tem se mostrado uma opção atraente para o armazenamento de água nos processos de reutilização, pois também pode oferecer uma barreira de tratamento adicional, através do solo, para melhorar a qualidade da água recarregada e atenuar as variações sazonais da oferta e da demanda de água (LEVANTESI *et al.*, 2010).

Os autores Telles e Costa (2010) enquadram o reúso através de RAA dentro da modalidade de reúso urbano para fins potáveis, a qual exige que o esgoto utilizado seja de origem essencialmente doméstica, haja vista que efluentes industriais podem conter contaminantes de difícil remoção, onerando os custos do tratamento, além de gerar grande risco à saúde dos consumidores.

O reúso urbano para fins potáveis é subdividido em:

- a. **reúso potável direto:** o esgoto tratado é direcionado para uma estação de tratamento de água e, em seguida, para a rede de distribuição;
- b. **reúso potável indireto:** quando o esgoto tratado é lançado num corpo hídrico (su-

perficial ou subterrâneo), para diluição e redução das cargas poluidoras, posterior captação, potabilização e distribuição.

O reúso potável direto é praticado numa escala reduzida, devido aos riscos sanitários associados, a necessidade de tecnologias de alto custo e à baixa aceitação pública. Já o reúso potável indireto é amplamente utilizado, a exemplo do que ocorre nos Estados Unidos e em Israel, que praticam a recarga de aquíferos com esgoto tratado para o fornecimento de água potável (HESPANHOL, 2002; TELLES e COSTA, 2010).

Em Natal, capital do Rio Grande do Norte, o crescimento populacional tem provocado o aumento da demanda por água, sobrecarregando os corpos d'água responsáveis pelo abastecimento da cidade, principalmente do aquífero Dunas/Barreiras, que é responsável por abastecer cerca de 30% do sistema norte da cidade e 70% do sistema sul, assim considerados em relação às margens do rio Potengi (CAERN, 2018).

Diante dessa crescente demanda, é comum a busca por mananciais em bacias vizinhas, importando água através de um sistema adutor, prática adotada há mais de 2 mil anos por antigas civilizações, como a romana. Tal prática resolve precariamente o problema de uma cidade, em detrimento daquela que fornece (CALIJURI e CUNHA, 2013).

Além disso, deve-se considerar os altos custos de implantação dessas longas adutoras e o elevado consumo de energia elétrica para o bombeamento da água.

A adoção do reúso através da RAA mostra-se uma alternativa interessante, visto que, além de aumentar a disponibilidade de água para captação e potabilidade, possibilita diminuir o descarte de efluentes em rios e lagos, atenuar a intrusão salina e prevenir a subsidência do solo (VANDENBOHEDE *et al.*, 2013).

A recarga do aquífero Dunas/Barreiras em Natal é composta pela infiltração das águas da chuva, perdas das tubulações de abastecimento de água e infiltração de esgoto oriundo de fossas e sumidouros, também denominada recarga urbana. Apenas 39,8% da cidade possui rede coletora de esgoto em operação, logo, são adotadas soluções individuais de esgotamento, como fossas sépticas ou rudimentares e sumidouros, que, aliados ao solo arenoso e permeável, facilitam a infiltração do esgoto no subsolo (ANA, 2012; MINISTÉRIO DAS CIDADES, 2018).

Com a ampliação do sistema de esgotamento sanitário (SES) para toda a cidade, cujas obras estão em andamento, espera-se uma melhoria na qualidade da água subterrânea, que apresenta elevados níveis de nitrato. Contudo, haverá também

uma redução significativa no volume de recarga urbana, o que pode afetar o volume de água disponível para captação, ocasionar a depleção local das cargas hidráulicas, causar subsidência do solo e favorecer a intrusão salina (ANA, 2012).

Logo, RAA é uma demanda potencial para o reúso dos esgotos tratados em Natal-RN, podendo contribuir positivamente com a disponibilidade hídrica da cidade, restando necessário estudar sua viabilidade ambiental, garantindo a manutenção quanti e qualitativa de água disponível para captação.

Para esse estudo, considerou-se o efluente da estação de tratamento de esgoto (ETE) Jundiáí/Guarapes, projetada para tratar até 1.260 L/s, através de reatores UASB associados a lodos ativados, com desinfecção por radiação ultravioleta (UV) e pós-tratamento para remoção de nutrientes. Para tanto, importa saber em que medida o efluente tratado na ETE Jundiáí/Guarapes pode ser reutilizado para RAA em Natal-RN, considerando-se a viabilidade ambiental e econômica.

RECARGA ARTIFICIAL DE AQUÍFERO

Os aquíferos são naturalmente alimentados através de zonas ou áreas de recarga em variados níveis, ou diretamente através de precipitações.

Porém, para aumentar a disponibilidade hídrica, a engenharia de recursos hídricos desenvolveu a recarga artificial de aquíferos (HESPANHOL, 2002).

A RAA pode se dar pela infiltração de águas de mananciais que receberam contribuição de esgoto ou pela infiltração direta de efluentes tratados, podendo ser feita pelo processo de infiltração-percolação ou injeção direta (TELLES e COSTA, 2010).

A recarga de aquífero é a utilizada para aumentar a disponibilidade hídrica de aquíferos, estabilizar ou elevar os níveis de aquíferos regulando variações sazonais, compensar a superexploração, controlar a intrusão salina, diluir aquíferos salinos ou poluídos e controlar ou evitar a subsidência do solo (HESPANHOL, 2002; BRASIL, 2013).

Existe uma diversidade de métodos de RAA, basicamente classificados como superficial ou profundo. Os métodos de recarga em superfície consistem na infiltração de água através de uma ampla superfície de contato entre água e solo, geralmente utilizados em aquíferos freáticos e que possuem alta permeabilidade. Os métodos de recarga em profundidade compreendem a utilização de furos ou poços para realizar a introdução de água no aquífero, e são mais utilizados em aquíferos profundos e confinados (DIAMANTINO, 2005).

TRATAMENTO SOLO AQUÍFERO (TSA)

O principal processo de infiltração é o Tratamento Solo Aquífero (TSA), amplamente utilizado por promover uma barreira adicional para contaminantes presentes na água de infiltração (SHARMA e KENNEDY, 2017). O TSA é um processo de tratamento avançado, natural e sustentável, regido pela biodegradação, inicialmente aeróbica e depois anóxica, ocorrendo tanto na zona vadosa, como na zona saturada (AMY e DREWES, 2007).

O TSA é um tratamento que, além de promover a remoção de patógenos, nitrogênio, matéria orgânica e diversos micropoluentes orgânicos, também contribui para a melhor aceitação do reúso potável, já que ainda existe uma rejeição pelos usuários quanto ao uso de águas residuárias para fins potáveis (SHARMA e KENNEDY, 2017). Aliado a isso, o TSA é atrativo por ser um sistema sustentável e que minimiza os custos de operação, devido ao baixo consumo de energia.

INJEÇÃO DIRETA

A recarga de aquífero por meio de injeção direta é feita através de poços que se estendem através da camada insaturada até o aquífero. A água é bombeada diretamente nos poços, garantindo altas taxas de recarga. Envolve custos eleva-

dos para a construção do poço, a operação com bombeamento e quanto aos níveis de tratamento necessários antes da injeção no aquífero, devido à necessidade de proteção da qualidade de água (HESPANHOL, 2002).

A utilização da injeção direta é indicada quando a zona não saturada apresenta camadas impermeáveis, os aquíferos são confinados ou há pouca disponibilidade de área para infiltração (BARBOSA e MATTOS, 2008).

DIRETRIZES PARA RECARGA DE AQUÍFERO

A Resolução nº 153, de 17 de dezembro de 2013, do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), que trata da recarga artificial de aquíferos no território brasileiro, não define quais os parâmetros e seus respectivos valores máximos admissíveis para recarga de aquífero, limitando-se a estabelecer que a recarga artificial não poderá causar alteração da qualidade das águas subterrâneas a ponto de provocar restrição aos usos preponderantes (BRASIL, 2013).

Em face da inexistência de legislação federal e estadual que defina parâmetros e diretrizes para RAA, o programa INTERAGUAS – que visa propor um plano de ações para instituir uma política de reúso de efluente sanitário tratado no Brasil –

recomenda que para definição da viabilidade de projetos de reúso deverão ser adotadas as diretrizes CONAMA nº 396/2008 e CONAMA nº 430/2011 (BRASIL, 2018). Isso deixa uma lacuna para estudos e pesquisas nessa área, além de dificultar a realização de projetos de reúso, já que os parâmetros das resoluções CONAMA não foram estabelecidos visando o reúso e suas diversas modalidades.

Vários países possuem suas diretrizes bem definidas, pois já realizam o reúso potável indireto há diversas décadas. Dentre esses países, foram escolhidas as diretrizes adotadas pelos Estados Unidos e Israel para fazer um comparativo entre os parâmetros qualitativos adotados para a RAA.

Nos Estados Unidos, a agência de proteção ambiental Environmental Protection Agency (EPA), responsável pela definição das diretrizes para reúso de água, reúne experiências de diversos estados que regulamentam a prática em seu território, no guia intitulado "Guidelines for Water Reuse". Na categoria de reúso potável indireto, o guia reúne experiências de 9 estados (Arizona, Califórnia, Flórida, Havaí, Massachusetts, Pensilvânia, Utah, Virgínia e Washington) que possuem regulação para recarga de aquífero com água recuperada e, a partir disso, sugere as diretrizes para o reúso potável indireto em todo o país, e para demais países que não possuem diretrizes estabelecidas (USEPA, 2012).

Tabela 1 – Comparativo entre os parâmetros para recarga de aquífero.

Parâmetro	Israel*	USEPA**
Coliformes totais (UFC/100mL)	9,8 x 10 ⁵	0,0
E. Coli (UFC/100mL)	8,6 x 10 ⁴	-
Cloro residual (mg/L)	-	1,0
pH	-	6,5 – 8,5
Turbidez (NTU)	-	<2,0
DBO (mg/L)	5,2	30,0
DQO (mg/L)	-	
SS (mg/L)	5,0	30,0
COT (mg/L)	-	<2,0
COD (mg/L)	40,0	-
Nitrato (mg/L)	3,0	-

*Planta Shafdan.

**Parâmetros para RAA por infiltração em aquíferos potáveis.

Fonte: adaptado de RAYS *et al.* (2017) e USEPA (2012).

A Organização Mundial de Saúde e países como Austrália, Portugal e Canadá não possuem parâmetros definidos para recarga, mas recomendam a análise caso a caso, com estudos sobre a qualidade do efluente tratado, da água nativa do aquífero e das características do solo local.

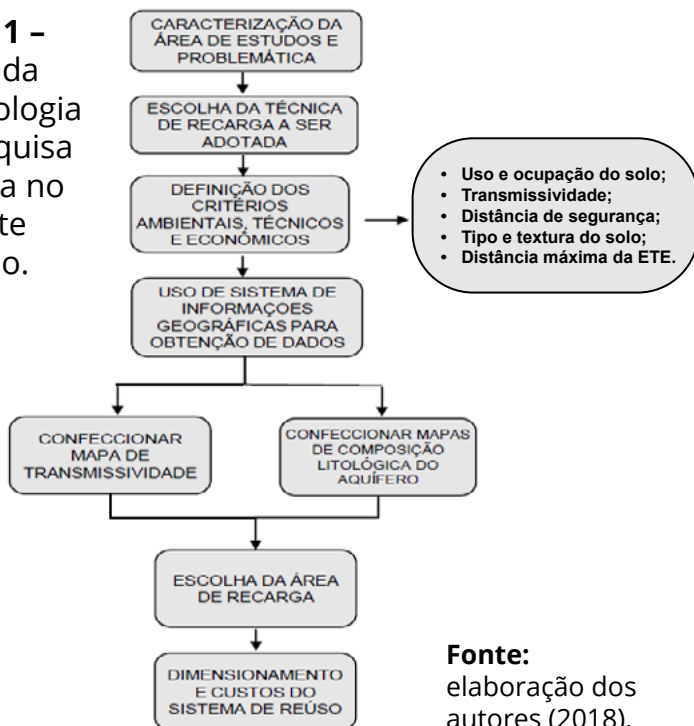
METODOLOGIA

Para atender aos objetivos propostos nes-

te trabalho, a pesquisa foi desenvolvida nas seguintes etapas:

- Caracterização da área de estudo;
- Definição da técnica de recarga a ser adotada;
- Definição dos critérios ambientais, técnicos e econômicos para escolha de área adequada à implantação de lagoas de infiltração;
- Mapeamento e análise locacional para identificação de áreas disponíveis para implantação de lagoas de infiltração de ART;
- Viabilidade ambiental;
- Análise de viabilidade econômica.

Figura 1 – Etapas da metodologia de pesquisa adotada no presente trabalho.



ÁREA DE ESTUDO

Natal é uma cidade litorânea, localizada entre as coordenadas 5°47'42" de latitude sul e 35°12'34" de longitude oeste, limitando-se ao norte com o município de Extremoz, ao sul com Parnamirim, à leste com o Oceano Atlântico e a oeste com os municípios de São Gonçalo do Amarante, Macaíba e Parnamirim (IDEMA, 2013). Apresenta área territorial de 167,2 km², população de 803.739 habitantes em 2010 e densidade demográfica de 4.805hab/km² (IBGE, 2010).

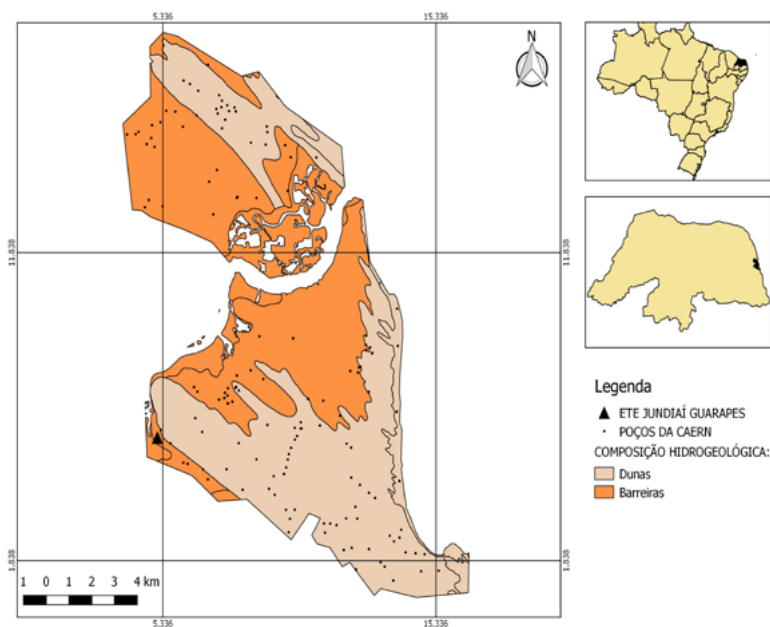
O município encontra-se com 31,2% do seu território inserido na Bacia Hidrográfica do rio Potengi, 23,4% na Bacia Hidrográfica do rio Doce, 15,3% na Bacia Hidrográfica do rio Pirangi e 30,1% na Faixa Litorânea Leste de Escoamento Difuso (IDEMA, 2013).

O Sistema Aquífero Barreiras ocorre em toda extensão do município de Natal, compreendendo uma superfície de 114 km², e espessuras variando de 60 a 116 m (RIGHETTO e ROCHA, 2005). Na zona sul de Natal, a parte superior dos perfis de poços é dominada por sedimentos argilo-arenosos e areno-argilosos, enquanto a parte inferior é composta por arenitos finos a grosseiros (ANA, 2012).

A composição hidrogeológica do aquífero em Natal (Figura 2) revela a presença de duas uni-

dades hidráulicas, Dunas e Barreiras, de grande conexão hidráulica, formando o Sistema Aquífero Dunas/Barreiras, em geral, do tipo livre, com as dunas promovendo a função de transferir as águas de infiltração aos estratos inferiores do Barreiras (MELO, 1995).

Figura 2 – Composição hidrogeológica do aquífero em Natal-RN



Fonte: elaboração dos autores (2019).

A cidade de Natal passa por um processo de crescimento urbano, apresentando uma taxa de crescimento de 40,7% entre 1991 e 2013 (ANUÁ-

RIO NATAL, 2014). Consequentemente, a demanda por serviços como abastecimento de água e esgotamento sanitário aumentam proporcionalmente, porém a infraestrutura disponível para coleta e tratamento de esgoto não atende satisfatoriamente à população da capital do estado, apresentando um índice de coleta de apenas 39,8%, dos quais cerca 72,8% passa por tratamento adequando antes da disposição no meio ambiente (MINISTÉRIO DAS CIDADES, 2018).

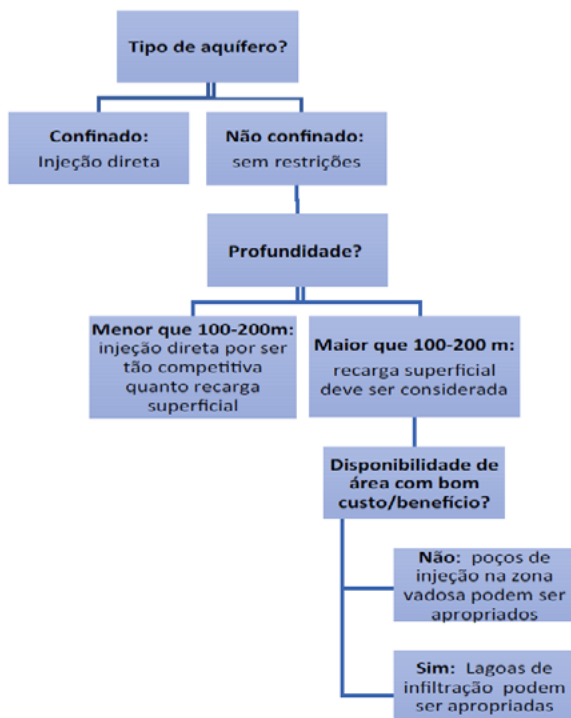
Com o objetivo de ampliar a cobertura com coleta e tratamento adequado para toda a cidade, foram projetados dois sistemas de tratamento: a ETE Jaguaribe, que atenderá a Zona Norte, e a ETE Jundiaí/Guarapes, que atenderá parte da Zona Sul e toda Zona Oeste, cujas obras estão em andamento.

O presente estudo aplica-se ao sistema sul de Natal-RN, onde será construída a ETE Jundiaí/Guarapes, projetada para tratar 1.260 L/s e atender a uma população de aproximadamente 688 mil habitantes num horizonte de 20 anos. A tecnologia de tratamento projetada utiliza reatores UASB associados a lodos ativados (filtro biológico aerado, câmara anóxica e decantador secundário), desinfecção por radiação ultravioleta (UV) e pós-tratamento para remoção de nutrientes por meio de flotação por ar dissolvido.

DEFINIÇÃO DA TÉCNICA DE RECARGA

A seleção da melhor técnica para RAA depende de muitas variáveis. Para auxiliar nessa escolha, a USEPA criou uma árvore simplificada que direciona para a técnica mais apropriada, de acordo com algumas características do aquífero e da área (Figura 3). Porém, se um aquífero não confinado está sendo considerado, não há restrições quanto à escolha do método de recarga, sendo necessária também a consideração de outros fatores que justifiquem a escolha, tais como a disponibilidade de área e o respectivo custo-benefício (USEPA, 2012).

Figura 3 -
Orientação
para escolha
da técnica
de recarga.



Fonte: adaptado
de USEPA (2012).

CRITÉRIOS PARA ESCOLHA DE ÁREA PARA RECARGA ARTIFICIAL DE AQUÍFERO

Para a análise locacional, foram adotados critérios técnicos, ambientais e econômicos que orientaram a escolha de área com condições adequadas para a implantação de lagoa de infiltração de ART. A partir dos critérios definidos, foi utilizada ferramenta de geoprocessamento para mapear áreas com maior adequabilidade para a instalação de lagoas de infiltração.

Os critérios de restrições utilizados nesta pesquisa foram adaptados de Silva (2017). São eles:

- Critérios ambientais: para evitar contaminação por infiltração de ART, deve ser considerada uma distância de segurança de 100 m relativamente a captações de água para consumo humano; deve ser considerada uma distância de 200 m relativamente a aglomerados populacionais, para proteger estas áreas de possíveis contaminações;
- Critério técnico: uso ou ocupação do solo, para avaliar o potencial uso do solo; textura do solo: as zonas não saturadas não devem conter camadas de argila e outros solos que possam restringir o movimento descendente da água. Para evitar o entupimento dos solos e para assegurar o tratamento da água resi-

dual, o solo deve ter uma fração baixa de argila (<10% de argila); tipo de solo: o solo para infiltração de água residual tratada não deve ter rocha no topo, uma vez que grande parte da melhoria da qualidade da água reutilizada ocorre no primeiro metro de solo; profundidade do aquífero: o aquífero deverá ser suficientemente profundo e transmissivo para prevenir aumentos excessivos de água no solo devido à infiltração.

- Critério econômico: de modo a diminuir os custos de transporte de ART desde a ETE até a área de recarga, deve existir uma distância máxima de 8,0 km.

MAPEAMENTO E ANÁLISE LOCACIONAL PARA IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS DISPONÍVEIS PARA IMPLANTAÇÃO DE LAGOAS DE INFILTRAÇÃO DE ART

Para atender aos critérios anteriormente estabelecidos, foi necessário o uso de ferramentas de geoprocessamento. Para elaboração de figuras temáticas, utilizou-se o programa Quantum GIS – QGIS 2.18.24, com *shapefiles* oriundos do banco de dados da Agência Nacional de Águas (ANA), e a ferramenta de figuras *online* OpenStreetMap. Foram utilizados *shapefiles* da composição hidrogeológica do aquífero Dunas/Barrei-

ras, zonas de concentração de nitrato, zonas de transmissividade, cadastro de poços e nascentes na Região Metropolitana de Natal (RMN) e localização da ETE.

A partir do mapeamento das áreas próximas à ETE, foi possível identificar quais atendem aos critérios estabelecidos, respeitando as características do solo, a proximidade de fontes de captação de água para abastecimento público e a distância economicamente viável para implantação de adutora de reúso.

VIABILIDADE AMBIENTAL

A viabilidade ambiental expressa a adequabilidade das atividades antrópicas sobre o meio ambiente quanto aos padrões de qualidade estabelecidos, considerando a capacidade do meio em assimilar um determinado nível de alterações (impactos) provocadas por estas atividades (MONTAÑO e SOUZA, 2008).

Dessa forma, em face da inexistência de legislação federal e estadual que defina os parâmetros para recarga de aquífero, para definição da viabilidade foi considerada a Resolução nº 153/2013 – CNRH, visando a orientação sobre a manutenção quanti e qualitativa de água disponível para captação.

ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA

Previamente, foi realizado o dimensionamento dos componentes do sistema de reúso para, em seguida, estimar os respectivos valores e custos de implantação e operação.

Os principais custos envolvidos na implantação do SAT com bacia de infiltração são de a) transporte da ETE para área do SAT, b) área disponível, c) custos de O & M do bombeamento e d) manutenção da bacia (SHARMA e KENNEDY, 2017).

Para o estudo de viabilidade econômica, foi considerado o Valor Presente Líquido (VPL). Também conhecido como método do valor atual, o VPL é um método econômico-financeiro que possibilita calcular os custos de investimento e de operação de um projeto a um valor presente, possibilitando comparar os custos a valor atual de diversos cenários para saber qual é economicamente viável (GOMES, 2010).

Para o estudo de viabilidade econômica, foram considerados dois cenários. O primeiro é o sistema de reúso proposto neste trabalho, e o segundo é onde se teria o desenvolvimento de uma nova fonte de abastecimento para complementar o abastecimento de Natal, numa situação em que o aquífero não poderia mais suprir a demanda da

cidade. Em seguida, foi feito o comparativo entre os cenários para identificar qual era o mais viável economicamente.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A técnica de recarga mais indicada para a área em estudo é a de superfície através de lagoas de infiltração, tendo em vista que o aquífero Dunas/Barreiras é do tipo livre em quase sua totalidade, com profundidades que variam de 60 a 116 m, e com disponibilidade de área com custo-benefício para sua implantação (RIGHETTO e ROCHA, 2005). Além disso, essa é uma técnica que promove tratamento adicional através da passagem pelo solo, o que promove melhoria na qualidade da água infiltrada.

Para avaliar a viabilidade ambiental do reúso de águas residuárias da ETE Jundiá/Guarapes na RAA em Natal-RN, considera-se o que estabelece a Resolução nº 153/2013 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), que trata da RAA no território brasileiro, mais especificamente o art. 8º: “a recarga artificial não poderá causar alteração da qualidade das águas subterâneas que provoque restrição aos usos preponderantes” (BRASIL, 2013). Dessa forma, almeja-se que a recarga artificial com água de reúso não

altere a qualidade da água do aquífero Dunas/Barreiras, principalmente por este ser uma importante fonte de água para o abastecimento da capital potiguar.

A legislação brasileira não estabelece parâmetros qualitativos e seus respectivos valores máximos permissíveis para a implementação da RAA, o que dificulta a determinação objetiva de técnicas ambientalmente viáveis. A ausência de regulamentação para a recarga artificial de aquífero faz com que os órgãos de controle não tenham embasamento legal para aprovar projetos que utilizem essa prática, ou, quando o fazem, os parâmetros utilizados não são corretamente adequados à RAA.

No caso da cidade em estudo, como já há o reúso não planejado, devido à infiltração de volume significativo de esgoto no solo e, consequentemente, há alteração da qualidade da água subterrânea, principalmente no que se refere às concentrações de nitrato e presença de coliformes, acredita-se que a adoção do reúso potável indireto planejado, através da RAA com esgoto tratado, pode contribuir positivamente com a qualidade ambiental do aquífero, tendo em vista a capacidade de remoção de diversos poluentes, conforme Tabela 2.

Tabela 2 – Eficiência do TSA em remoção de poluentes de um efluente terciário.

Poluentes	Remoção
Metais pesados	20-100%
TSS	90-100%
Turbidez	50-100%
Bactérias	2.4-3.0 Log
Vírus	0.4-4.0 Log
Nitrato	0-22%
Micro poluentes orgânicos	10-100%

Fonte: adaptado de SHARMA e KENNEDY (2017).

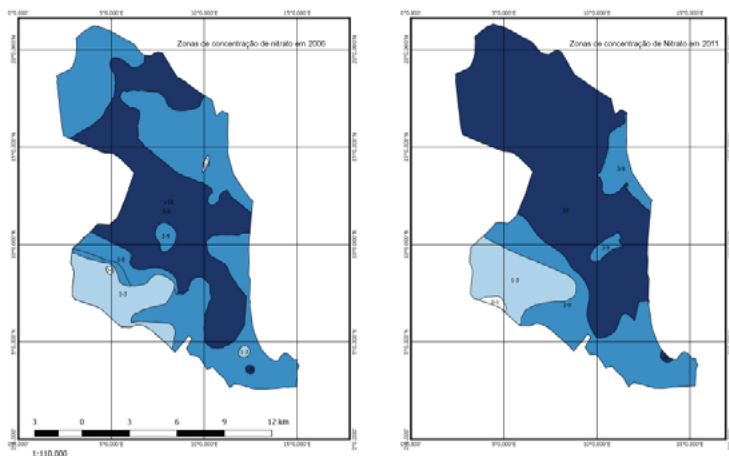
Nas últimas décadas, vários trabalhos se dedicaram a estudar a presença de nitrato nas águas subterrâneas em Natal-RN. Os resultados mostram que houve um crescimento significativo de presença do nitrato em concentrações superiores

a 10,0 mg/L, limite estabelecido pela Portaria de Consolidação Nº 5 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2017). A Agência Nacional de Águas fez uma compilação dos dados de alguns desses estudos e montou um banco de dados com informações georreferenciadas sobre as águas subterrâneas da RMN. A partir desse banco de dados foi possível elaborar a Figura 3, que retrata o avanço de zonas de concentração de nitrato em toda cidade, no período entre 2006 e 2011 (ANA, 2012).

Além disso, resultados do monitoramento de qualidade da água subterrânea de Natal mostram que os resultados para coliformes totais e termotolerantes em todos os poços monitorados estão em desconformidade com a resolução CONAMA 396/2008, logo é necessário buscar soluções que contribuam para melhor qualidade dessa água (PROGRAMA ÁGUA AZUL, 2016).

A ETE Jundiáí/Guarapes foi projetada para tratar o efluente a nível terciário, com pós-tratamento físico-químico para remoção de nutrientes, o que irá reduzir o aporte de carga poluidora, haja vista que a parcela da recarga urbana representada pela infiltração dos efluentes de fossas e sumidouros será eliminada e substituída pela infiltração de ART através da técnica TSA, que promove remoção de microrganismos, nutrientes, matéria orgânica e micropoluentes.

Figura 3 – Zonas de concentração de nitrato nas águas subterrâneas de Natal entre 2006 e 2011.



Fonte: elaboração dos autores (2019).

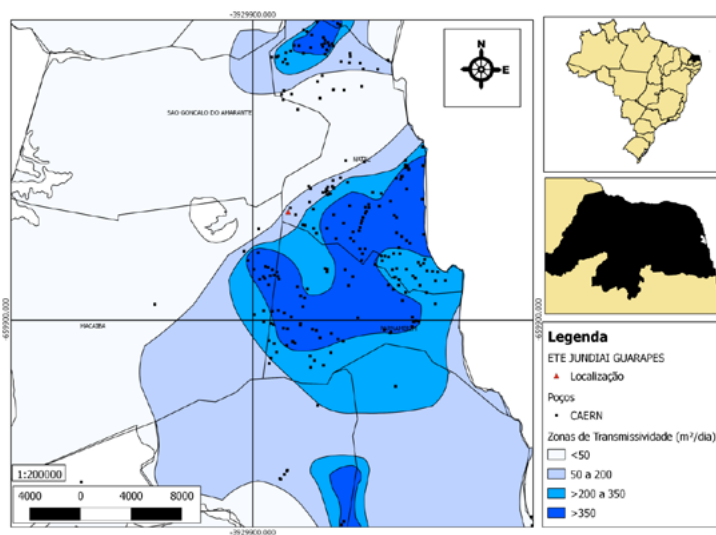
Para a infiltração em solos arenosos permeáveis, que possuam nível freático superior a 5m, aplicando-se taxas de infiltração entre 0,2 e 1 m/dia, a concentração final de matéria orgânica, nitrogênio amoniacal, nitritos, nitratos, SST, metais pesados e carga bacteriológica será reduzida significativamente (ASANO *et al.*, 2007). Essas condições retratam uma área com características semelhantes ao aquífero em estudo, todavia é fundamental a realização de testes de infiltração e análise qualitativa do infiltrado para garantir a segurança da recarga com ART.

O mapeamento auxiliou a escolha de áreas com características adequadas para realizar a RAA,

segundo os critérios ambientais, técnicos e econômico definidos na metodologia.

A Figura 4 foi elaborada com o objetivo de identificar as áreas com elevadas taxas de transmissividade no aquífero, o que auxilia a escolha da área com capacidade de transmitir todo o volume de água, evitando o seu acúmulo no solo. Conforme Figura 3, a localização de ETE Jundiáí/Guarapes é próxima à divisa com as cidades de Macaíba e Parnamirim, o que torna possível a utilização de áreas nesses municípios para instalação de lagoas de infiltração.

Figura 4 – Zonas de transmissividade do aquífero Dunas/Barreiras na Região Metropolitana de Natal.



Fonte: elaboração dos autores (2019).

No programa QGis, após o mapeamento da composição hidrogeológica e das zonas de transmissividade do aquífero Dunas/Barreiras, foi inserida a camada do OpenStreetMap, ferramenta de figuras *online* com uma grande diversidade de informações locais, inclusive de uso e ocupação do solo, para auxiliar a escolha da área mais adequada para a recarga.

Primeiramente, delimitou-se um círculo com raio de 8,0 km, definido como critério de viabilidade econômica, considerando a ETE Jundiaí/Guarapes o centro dessa área (Figura 4). Feito isso, foi possível observar detalhadamente o uso e a ocupação do solo – que, em sua grande parte, está densamente ocupado. Verificou-se também a existência de Áreas de Proteção Ambiental (Cordões Dunares do Guarapes, Parque da Cidade e vale do rio Pitimbu) ao leste da ETE; o rio Potengi ao norte; e ao sul área militar de uso da Marinha, restando uma área a sudoeste da ETE, com baixa ocupação e favorável à construção de lagoas de infiltração, conforme Figura 5.

A área de interesse delimitada dentro do círculo pertence ao município de Macaíba e apresenta baixa ocupação residencial, com alta disponibilidade de áreas inutilizadas e ambientalmente degradadas. Dentro da área delimitada pelo círculo, é necessário considerar uma distância de

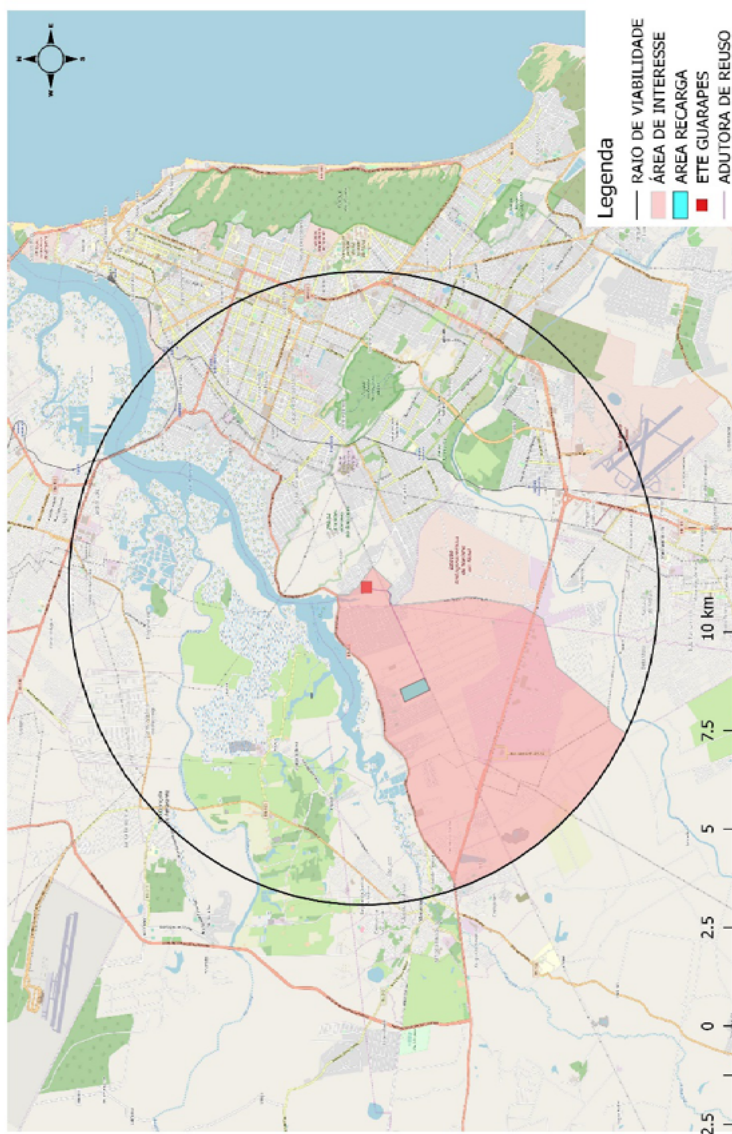
100 m de captações de água para consumo humano, e 200 m de aglomerados populacionais, para proteger essas áreas de possíveis riscos de contaminação.

Quanto ao uso ou a ocupação do solo, foi observada a disponibilidade de áreas sem uso econômico e onde não seria necessário realizar a remoção de comunidades e famílias.

Quanto às características do solo, observou-se que a textura arenosa do solo, com baixa fração de argila, sem rocha no topo e com profundidade superior a 10 m favorece a infiltração de efluente no solo, promovendo melhoria da qualidade da água reutilizada.

A recarga urbana em Natal é da ordem de $111,5 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$, da qual cerca de $43,4 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$ é proveniente de fossas e sumidouros existentes nas áreas sem esgotamento sanitário, o que representa 38,8% da recarga urbana do aquífero (ANA, 2012). O volume anual de esgoto que será tratado na ETE Jundiaí/Guarapes será da ordem de $39,7 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$, representando 35,6% da recarga urbana.

Figura 5 – Uso e ocupação do solo próximo a ETE Jundiáí/Guarapes.



Fonte: elaboração dos autores (2019).

Para a análise de viabilidade econômica, foi calculado o valor presente dos dois cenários propostos, conforme Tabelas 3 e 4.

Tabela 3 – Valor presente para cenário com adutora de reúso e TSA.

Ano	Despesa de implantação	Despesas com energia elétrica	Valor presente (VP)
0	R\$ 8.401.722,58		R\$ 8.401.722,58
1		R\$ 584.990,97	R\$ 522.313,37
2		R\$ 602.540,70	R\$ 480.341,76
3		R\$ 620.616,92	R\$ 441.742,87
4		R\$ 639.235,43	R\$ 406.245,67
5		R\$ 658.412,49	R\$ 373.600,93
6		R\$ 678.164,87	R\$ 343.579,43
7		R\$ 698.509,82	R\$ 315.970,37
8		R\$ 719.465,11	R\$ 290.579,89
9		R\$ 741.049,06	R\$ 267.229,72
10		R\$ 763.280,54	R\$ 245.755,90
Total			R\$ 12.089.082,50

Fonte: elaboração dos autores (2019).

Tabela 4 – Valor presente para cenário com adutora de água.

Ano	Despesa de implantação	Despesas com energia elétrica	Valor presente (VP)
0	R\$279.812.000,00		R\$ 279.812.000,00
1		R\$ 5.887.664,87	R\$ 5.256.843,63
2		R\$ 6.064.294,81	R\$ 4.834.418,70
3		R\$ 6.246.223,66	R\$ 4.445.938,62
4		R\$ 6.433.610,37	R\$ 4.088.675,70
5		R\$ 6.626.618,68	R\$ 3.760.121,40
6		R\$ 6.825.417,24	R\$ 3.457.968,79
7		R\$ 7.030.179,76	R\$ 3.180.096,30
8		R\$ 7.241.085,15	R\$ 2.924.552,84
9		R\$ 7.458.317,70	R\$ 2.689.544,13
10		R\$ 7.682.067,23	R\$ 2.473.420,05
Total			R\$ 316.923.580,17

Fonte: elaboração dos autores (2019).

A partir do valor presente, temos a análise dos custos totais de investimento e operação em relação ao volume (m³) transportado pelos sistemas em 10 anos de operação, conforme Tabela 5.

Tabela 5 – Relação de custos de investimento a valor presente por volume.

Cenário	Custo (R\$/m³)
Adutora de água	1,12
Sistema de reuso	0,18

Fonte: elaboração dos autores (2019).

Como esperado, a prática de transportar água de bacias cada vez mais distantes tem um custo elevado, em comparação ao gerenciamento e recarga das fontes locais. Em um ambiente de escassez hídrica, os custos associados ao incremento de novas fontes de abastecimento tornam-se superiores aos custos com a gestão, manutenção e preservação da fonte existente.

Além dos custos já citados, futuramente deverá ser considerada a cobrança pelo uso da água que, conforme a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), tem por objetivo reconhecer a água como um bem dotado de valor econômico, incentivar o seu uso de maneira racional e obter recursos para o financiamento dos programas e intervenções existentes nos planos de recursos hídricos (BRASIL, 1997).

Os valores arrecadados com a cobrança pelo uso de recursos hídricos poderão ser utiliza-

dos para o financiamento de estudos, programas, projetos e obras incluídos nos Planos de Recursos Hídricos, assim como ser aplicados a fundo perdido em projetos e obras que alterem, de modo considerado benéfico à coletividade, a qualidade, a quantidade e o regime de vazão de um corpo de água (BRASIL, 1997).

A cobrança pela captação de água bruta já é praticada em alguns estados brasileiros, e a sua implantação no Rio Grande do Norte está em discussão. No Ceará, através de lei recentemente aprovada, é feita a cobrança de tarifa em diferentes categorias, mas pode-se citar, como exemplo, a captação de água na região metropolitana de Fortaleza, que é de R\$ 187,52/1.000 m³ (CAERÁ, 1997). Dessa forma, é necessário pensar novas alternativas que promovam o uso sustentável das reservas de água, minimizando os custos e maximizando os benefícios.

CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

O reúso potável indireto é uma alternativa atraente diante de situações de estresse hídrico. Entretanto, a prática deve ser regulamentada, para que ofereça o menor risco possível, já que a RAA não é exequível sem algum grau de risco, os quais devem ser avaliados diante dos benefícios

que a recarga trará e face aos riscos decorrentes da não tomada de medidas, como o rebaixamento do lençol freático, a intrusão de cunha salina e a perda da capacidade de suprimento de água para o sistema de abastecimento público.

Diante da necessidade de suprir a recarga urbana do aquífero Dunas/Barreiras, é necessária a implementação de técnica ambientalmente adequada e economicamente viável. Por isso, o estudo de viabilidade ambiental e econômica é fundamental para comprovar que a recarga artificial de aquífero com ART é uma técnica ambiental e economicamente sustentável, e assim despertar e impulsionar o interesse pela aplicação local dessa técnica, já amplamente difundida em vários países.

Através da utilização de SIG, foi possível identificar áreas com características adequadas à implantação de sistema de infiltração de ART para recarga artificial de aquífero na cidade de Macaíba, pertencente à Região Metropolitana de Natal. Complementarmente, são necessários estudos de caracterização do solo local e estudos em bancada e escala piloto para verificação da capacidade de remoção de poluentes na zona insaturada do solo.

Também é necessário o desenvolvimento de novo estudo que verifique se a localização das bacias de infiltração proporciona uma distância suficiente para um tempo de detenção no aquífero

que permita promover a autodepuração. Considerando que no Estudo de Impacto Ambiental da ETE há a previsão de sistema de monitoramento de qualidade das águas subterrâneas, sendo possível aferir se a recarga com ART não irá causar impacto negativo na qualidade da água subterrânea.

Face às simplificações dos cálculos, faz-se necessário um estudo mais detalhado do perfil estratigráfico local, a fim de conhecer a composição das camadas e os respectivos valores de permeabilidade, verificar a adequabilidade dos parâmetros utilizados no dimensionamento das lagoas de infiltração, e se há risco de retenção de água entre essas camadas, o que inviabilizaria a descarga de ART nessa área.

REFERÊNCIAS

ALCALDE-SANZ, L.; GAWLIK, B. M. Minimum quality requirements for water reuse in agricultural irrigation and aquifer recharge. **Towards a legal instrument on water reuse at EU level**, 2017.

AMY, G.; DREWES, J. Soil Aquifer Treatment (SAT) as a Natural and Sustainable Wastewater Reclamation/Reuse Technology: Fate of Wastewater Effluent Organic Matter (EfOM) and Trace Organic Compounds. **Environmental Monitoring and Assessment**, v.129, n. 1, p.19-26, 2007.

ANA (Agência Nacional de Águas). **Estudos hidrogeológicos para a orientação do manejo das águas subterrâneas da região metropolitana de Natal (RMN)**, v. 2. Brasília: ANA, 2012.

ANUÁRIO NATAL 2014. Prefeitura Municipal de Natal.2014. Disponível em: <https://www2.natal.rn.gov.br/semurb/paginas/ctd-102.html>. Acesso em: 22 nov. 2021.

BARBOSA, C. M. S; MATTOS, A. Conceitos e diretrizes para recarga artificial de aquíferos. *In: XV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas*. 2009.

BRASIL. MINISTÉRIO DAS CIDADES. **Elaboração de Proposta do plano de ações para Instituir uma Política de Reúso de Efluente Sanitário Tratado no Brasil**. 2018. Disponível em: https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosSNSA/interaguas/reuso/produto6_plano_de_acoes_e_politica_de_reuso.pdf. Acesso em: 22 nov. 2021.

COMPANHIA DE ÁGUAS E ESGOTOS DO RIO GRANDE DO NORTE (CAERN). **Relatório Anual 2018** - Qualidade da Água Natal/RN - Zona Norte. Disponível em: <http://www.adcon.rn.gov.br/ACERVO/caern/DOC/DOC000000000172761.PDF>. Acesso em: 14 maio 2018.

HESPANHOL, I. Potencial de Reuso de Água no Brasil Agricultura, Industria, Municípios, Recarga de Aqüíferos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 7, n. 4. out./dez. 2002, p. 75-95.

IDEMA. Instituto de Desenvolvimento Sustentável e Meio Ambiente do Rio Grande do Norte. **Perfil do seu município**: Natal. 2009. 23 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Características da população e dos domicílios: resultados do universo. **Censo Demográfico 2010**. Rio de Janeiro: IBGE, 2011.

LEVANTESI, Caterina *et al.* Quantification of pathogenic microorganisms and microbial indicators in three wastewater reclamation and managed aquifer recharge facilities in Europe. **Science of the Total Environment**, v. 408, n. 21, p. 4923-4930, 2010.

MELO, J. G. **Avaliação dos Riscos de Contaminação e Proteção das Águas Subterrâneas de Natal/RN**. UFRN/CAERN: 232p, 1995.

METCALF, Leonard; EDDY, Harrison P. **Tratamento de efluentes e recuperação de recursos**. McGraw Hill Brasil, 2015.

MINISTÉRIO DAS CIDADES. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental – SNSA. Sistema Nacional

de Informações sobre Saneamento: **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos** 2016. Brasília: SNSA/MCIDADES, 2018. 220 p.

PROGRAMA ÁGUA AZUL. 2016. **RELATÓRIO TÉCNICO MONITORAMENTO DA QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS SEGUNDA CAMPANHA/2016**. Disponível em: http://www.programaaguaazul.ct.ufrn.br/relatorios/aguas_subterraneas/RelatorioAguasSubterraneasPrimeiraCampanha2016.pdf. Acesso em: 22 nov. 2021.

RIGHETTO, A. M; ROCHA, M. A. Exploração Sustentada do Aquífero Dunas/Barreiras na Cidade de Natal, RN. **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n.2, p. 27-38, abr/jun 2005.

SHARMA, S. K.; KENNEDY, M. D. Soil aquifer treatment for wastewater treatment and reuse. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 119, p. 671-677, 2017.

SILVA, Flora *et al.* Caracterização de solos residuais para infiltração de efluente de estação de tratamento de esgoto. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 22, p. 95-102, 2016.

TELLES, D. D.; COSTA, R. H. P. **Reúso da água**: conceitos, teoria e práticas, 2 ed. São Paulo: Blucher, 2010.

U.S. Environmental Protection Agency (USEPA). 2012. **Guidelines for Water Reuse**. EPA/600/R-12/618. Environmental Protection Agency. Washington, D.C., 2012.

VANDENBOHEDE, Alexander *et al.* Hydrogeochemical transport modeling of the infiltration of tertiary treated wastewater in a dune area, Belgium. **Hydrogeology Journal**, v. 21, n. 6, p. 1307-1321, 2013.

CAPÍTULO VII



AVALIAÇÃO DOS RISCOS À SAÚDE HUMANA ASSOCIADOS AOS TRIHALOMETANOS EM ÁGUA TRATADA

LUCIANA DE CASTRO MEDEIROS

JULIO ALEJANDRO NAVONI

ANDRÉ LUIS CALADO ARAUJO

EMILY CINTIA TOSSI DE ARAÚJO COSTA

VIVIANE SOUZA DO AMARAL

INTRODUÇÃO

A gestão e o gerenciamento de riscos associados ao consumo de água potável estão se tornando cada vez mais importante em todo o mundo. Dessa forma, um sistema de tratamento de água eficaz, seguro e confiável é fundamental para a saúde pública, bem como para um desenvolvimento socioeconômico sustentável (LINDHE *et al.*, 2011).

Ao analisar os riscos atrelados ao uso de sistemas de abastecimento de água potável, al-

guns autores apontam para uma abordagem mais ampla, incluindo todo o sistema de tratamento e distribuição (HRUDEY et al., 2006; BARTRAM et al., 2009; NASCIMENTO et al., 2016; SORLINI et al., 2017). Esses autores defendem a utilização de Planos de Segurança da Água, nos quais a avaliação dos riscos é feita pela classificação de perigos usando uma matriz de risco, na qual se utiliza uma escala de probabilidade e consequências dos riscos determinados. Esta metodologia qualitativa (ou semi-quantitativa) pode oferecer uma forma simples e fácil de visualizar os resultados, porém tem algumas limitações, como não ser capaz de detectar a natureza dos riscos nem as interações complexas entre componentes e eventos (BURGMAN, 2005; COX, 2008; LINDHE et al., 2009; LINDHE et al., 2011).

Outra abordagem alternativa envolve a avaliação de risco quantitativa dirigida a definir, em termos probabilísticos, a ocorrência de problemas sanitários. Por exemplo, Lindhe *et al.* (2009) apresentaram um método quantitativo de árvore de falhas, na qual identificam causas potenciais de falhas que causam riscos, para analisar sistemas completos de água potável, com procedimentos para análise de sensibilidade e incerteza. Esse método permite comparar o nível de risco a níveis aceitáveis em termos absolutos e estimar

quantitativamente o efeito das medidas de redução de risco. Dessa forma, as avaliações de risco quantitativas são ferramentas necessárias a fim de complementar e/ou suportar análises de risco em sistema de abastecimento público e nos Planos de Segurança da Água (PSA) (BURGMAN, 2005; COX, 2008; LINDHE *et al.*, 2009).

Para avaliar a exposição e, em última etapa, o risco, os indicadores de exposição são usados para medir uma determinada substância no ambiente e/ou biomarcadores de exposição que oferecem, em alguns casos, informação precisa (NAVONI *et al.*, 2014), uma vez que outros indicadores, como os de efeito, podem ser incluídos, porém os de exposição são mais específicos, pois permitem analisar danos em instâncias subclínicas ou de suscetibilidade associada à exposição (interação entre genes e ambiente), como a presença de um polimorfismo genético específico de uma enzima metabólica (NAVONI *et al.*, 2014; OLMOS *et al.*, 2014). Uma abordagem indireta e amplamente utilizada é a de avaliar o grau de exposição a um determinado tóxico e extrapolar os potenciais efeitos sanitários em situações determinadas de exposição, baseando-se em evidências científicas relacionadas à toxicidade dos compostos envolvidos na avaliação toxicológica, através da exposição oral, dérmica e inalatória (JO *et al.*, 1990; WEISEL *et*

al., 1999; CAYLAK, 2012; KUMARI *et al.*, 2015).

Portanto, os sistemas de abastecimento público devem ser projetados e geridos a fim de garantir a segurança da água para o consumo humano, de modo que a presença de patógenos e substâncias químicas não represente riscos à saúde pública, impactos ambientais e na qualidade de vida dos consumidores, uma vez que a água é o principal vetor de disseminação de patógenos e tóxicos (JALBA *et al.*, 2010; WHO, 2011; BRASIL, 2013; SANCHES *et al.*, 2015; SORLINI *et al.*, 2017). Essa situação pode se agravar em regiões de escassez hídrica, nas quais há a desigual distribuição territorial e as exigências incessantes de consumo, principalmente nos sistemas produtivos, já que não há água suficiente disponível em algumas regiões (PINHEIRO *et al.*, 2018).

No tratamento de água potável, a desinfecção da água é um processo importante para eliminação e/ou neutralização de patógenos. Contudo, os desinfetantes químicos, como o cloro, reagem com a matéria orgânica presente nas águas e produzem subprodutos da desinfecção (SPD). Dentre os SPD, os principais são os trihalometanos (THM), que são potencialmente tóxicos e carcinogênicos, podendo gerar riscos à saúde humana (RICHARSON *et al.*, 2007; MEDEIROS *et al.*, 2019).

Os THM são compostos voláteis, de forma

que os indivíduos podem ser expostos a eles não só através das vias orais, mas também por inalação e absorção dérmica durante o contato com a água (NIEUWENHUIJSEN *et al.*, 2009). Entretanto, avaliações de risco dos trihalometanos na água de consumo humano mostraram que a rota de exposição oral contribui mais para a absorção e elevação dos riscos dos THM (CAYLAK, 2012; PAN *et al.*, 2014; KUMARI *et al.*, 2015).

Nesse contexto, este estudo propõe avaliar o risco carcinogênico e não carcinogênico como consequência da exposição aos trihalometanos após o tratamento de potabilização da água para abastecimento público.

A fim de avaliar essa exposição, foi realizado um estudo na rede de distribuição de água tratada da Estação de Tratamento de Água (ETA) da Lagoa de Extremoz, localizada no município de Extremoz, na região metropolitana da cidade de Natal, estado do Rio Grande do Norte, nordeste do Brasil.

O sistema da distribuição da ETA Extremoz abastece 60% da população da zona norte de Natal, sendo os outros 40% da água distribuída provenientes de aquíferos subterrâneos que têm a sua água misturada à água tratada na ETA (OLIVEIRA, 2018). A ETA Extremoz trata uma vazão de aproximadamente 650 L/s, funcionando por filtração direta, apesar de ter sido projetada para atuar

com o tratamento do tipo convencional. As etapas de pré-oxidação (adição de cloro), coagulação (adição de hidroxicloreto de alumínio), filtração direta rápida e desinfecção (adição de cloro) têm a função de clarificação, remoção de matéria orgânica e inativação de patógenos da água.

AVALIAÇÃO DE RISCO PARA A SAÚDE HUMANA

A distribuição de água para população abastecida pela ETA Extremoz é heterogênea, dessa forma, os dados de concentração dos THM foram ponderados pelo abastecimento diário em dois pontos diferentes na rede de distribuição: água tratada no início da rede (IR) – primeiro ponto de coleta da Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande de Norte (CAERN), que sai do reservatório R8 de distribuição no Bairro Lagoa Azul; e água tratada no fim de rede (FR) – um dos últimos pontos de coleta da rede, no Bairro da Redinha. Em seguida, essas concentrações foram comparadas considerando os limites permitidos pelas legislações nacionais e internacionais. Esses pontos de coleta não têm interferência de mistura com água subterrânea.

A análise de THM e seus componentes utiliza a metodologia de Cromatografia em Fase Gasosa/Espectrometria Massa (GC/MS), adotada pela

USEPA 8260B (USEPA, 1996). Os limites de detecção são menores de 1,5 µg/L para todos os compostos trihalometados.

Em uma primeira instância, foi determinado o nível de exposição para cada composto, considerando as distintas vias de exposição. Desse modo, foram estimados os riscos não carcinogênicos e carcinogênicos das substâncias halogenadas acima dos limites permitidos em legislação, considerando a via de exposição, a população potencialmente exposta, a magnitude, a duração e a frequência da exposição, tendo como base o estilo e o comportamento dos produtos químicos contaminados e da população local (USEPA, 2002; IBGE, 2017).

Os THMs são compostos orgânicos voláteis, cujos riscos à saúde decorrentes das exposições inalatória e dérmica durante atividades internas regulares não podem ser ignorados. Assim, a ingestão, a inalação e a exposição ao contato dérmico foram consideradas.

Os estimadores de risco foram calculados utilizando o programa RAIS. Estimativas de ingestão diária crônica (CDI) para diferentes vias foram calculadas seguindo as equações descritas a seguir (USEPA, 2002; CAYLAK, 2012; PAN *et al.*, 2014):

$$CDI_{\text{ingestão}} = \frac{C_{\text{w}} \times I_{\text{R}} \times E_{\text{F}} \times C_{\text{F}}}{B_{\text{W}} \times A_{\text{T}}} \quad (1)$$

- $CDI_{\text{ingestão}}$ = dose diária crônica por ingestão (mg/kg dia);
- C_w = concentração do químico na água potável ($\mu\text{g/L}$);
- IR = taxa de ingestão de água (L/dia);
- EF = frequência de exposição (dias/ano);
- ED = duração da exposição (anos);
- BW = peso corporal (kg);
- AT = tempo médio;
- $CF1$ = fator de conversão de μg para mg (0.001).

Pela via dérmica, o CDI para água potável pode ser estimado através da seguinte equação:

$$CDI_{\text{dérmica}} = \frac{C_w \times S_A \times K_p \times E_B \times E_F \times E_D \times C F_1 \times C F_2}{B W \times A T (2)}$$

- $CDI_{\text{dérmico}}$ = dose diária crônica por contato dérmico (mg/kg dia);
- C_w = concentração do químico na água potável ($\mu\text{g/L}$);
- S_A = área da pele exposta a água (cm^2);
- K_p = coeficiente de permeabilidade dérmica (cm/hr);
- E_B = tempo de duração de exposição durante o banho (hora/banho);
- E_F = frequência de exposição (dias/ano);

- ED = duração da exposição (anos); BW = peso corporal (kg);
- AT = tempo médio;
- CF1 = fator de conversão de μg para mg (0.001);
- CF2 = fator de conversão de unidade ($\text{L}/1.000 \text{ cm}^3$) (0,001).

Já pela via inalatória, o CDI para água potável pode ser estimado da seguinte forma:

$$\text{CDI}_{\text{inalatória}} = \frac{\text{Car} \times \text{R} \times \text{t} \times \text{F} \times \text{EF} \times \text{ED} \times \text{CF1}}{\text{BW} \times \text{AT}} \quad (3)$$

- $\text{CDI}_{\text{inalatório}}$ = dose diária crônica por contato inalatório (mg/kg dia);
- Car = concentração do químico no ar atmosférico de contato ($\mu\text{g}/\text{cm}^3$);
- R = quantidade de ar inalado (cm^3/min);
- t = tempo do banho (min);
- F = frequência de banho (dias);
- EF = frequência de exposição (dias/ano);
- ED = duração da exposição (anos);
- BW = peso corporal (kg);
- AT = tempo médio;
- CF1 = fator de conversão de μg para mg (0.001).

Após as determinações acima, foram calculados para cada substância tóxica acima do limite

permitido o Quociente de Risco (HQ) e o Índice de Perigo (HI). O HQ foi calculado pela razão da CDI pela dose de referência de ingestão, dérmica e/ou inalatória, conforme demonstrado a seguir:

$$HQ_{(1,2,3)} = \frac{CDI}{RfD}$$

- RfD = dose de referência do contaminante.

Esses valores são obtidos na USEPA (2002) ou no banco de dados Risk Assessment Information System (RAIS).

Se os valores de HQ excederem 1, há uma preocupação com efeitos não carcinogênicos para humanos. No entanto, para avaliar o potencial efeito de uma substância por várias vias de exposição, usa-se o Índice de Perigo (HI), no qual se soma todos os quocientes de riscos. Dessa forma, se o HI for maior que 1, há a indicação de um potencial efeito danoso à saúde humana (CAYLAK, 2012).

$$HI = HQ_{\text{ingestão}} + HQ_{\text{dérmica}} + HQ_{\text{inalatório}}$$

Já o Risco Carcinogênico (CR) é calculado pela exposição do contaminante e, geralmente, segue a equação abaixo:

$$CR = DI \times SF$$

- DI = dose diária crônica por exposição (mg/kg dia);
- SF = fator de inclinação carcinogênico do contaminante (mg/kg/day)⁻¹.

Observação: CR com valores maiores que $1,00E^{-05}$ indica que há potencial risco carcinogênico.

Para realização dos cálculos, foram utilizados valores de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros de exposição para via oral, dérmica e inalatória.

Parâmetros	Valor
Taxa de ingestão (IR)	2 L/dia
Frequência de exposição (EF)	350 dia/ano
Duração da exposição (ED)	26 anos
Peso corporal (BW)	80 kg
Tempo médio de vida de uma pessoa (AT)	26.600 dias
Área de superfície da pele (SA)	19652 cm ²
Tempo de exposição durante o banho (EB)	0,67077 hora
Quantidade de ar inalado (R)	20 m ³ /dia
Tempo do banho (t)	0,67077 hora

Fonte: elaboração dos autores (2019).

Os resultados das concentrações de THM na rede de distribuição da ETA Extremoz mostraram elevados níveis de THM total, em 10 vezes acima do permitido em legislação, principalmente o clorofórmio. Em vários estudos, esta é a espécie de THM mais predominante em água tratada (FUJIE *et al.*, 1990; BAYTAK *et al.*, 2008; HRUDEY, 2009; KUMARI *et al.*, 2015). O bromodiclorometano ficou um pouco acima do permitido pela WHO (2011), e o dibromoclorometano ficou abaixo do limite permitido. O estudo de Oliveira (2017) na rede de distribuição da ETA Extremoz também detectou concentrações de THM total 7 vezes acima do permitido. A autora também detectou maiores concentrações de clorofórmio (80% dos THMt), seguido de diclorobromometano, dibromoclorometano e bromofórmio. Esta última espécie não foi detectada no presente estudo, provavelmente pela diferença do limite de quantificação da metodologia utilizada (Tabela 2).

Tabela 2 - Detecção de substâncias tóxicas nas amostras do início e do final da rede de distribuição da ETA Extremoz.

Parâmetros	VR	AMOSTRAS				valor <i>p</i>
		IR	DP	FR	DP	
TCM ($\mu\text{g.L}^{-1}$)	300*	959,67	1273,78	1082,14	1287,15	N.S.
BDCM ($\mu\text{g.L}^{-1}$)	60*	58,94	20,16	68,80	28,83	N.S.
DBCM ($\mu\text{g.L}^{-1}$)	100*	15,52	6,53	16,30	8,26	N.S.
TBM ($\mu\text{g.L}^{-1}$)	100*	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	N.S.
THMt ($\mu\text{g.L}^{-1}$)	100**	1034,12	1280,47	1167,24	1284,66	N.S.

<LOD = menor que o limite de detecção.

* Valor de referência de acordo com WHO (2011).

** Valores de referência de acordo com a Portaria de Consolidação nº5, de 28 de setembro de 2018.

Fonte: elaboração dos autores (2019).

Diante dos resultados da água na rede de distribuição, obteve-se que os THM têm interesse toxicológico acima dos limiares considerados, fazendo diferenciação entre seus compostos, os quais foram incluídos na avaliação de risco quantitativa nas vias de exposição inalatória, dérmica e oral, quando possível.

Após os cálculos realizados quantificando o perigo em cada via de exposição, o risco não carcinogênico e o risco carcinogênico calculado de cada espécie de trihalometanos e a soma dos trihalometanos totais, obteve-se os índices multi-exposição

no início da rede e no final da rede de distribuição da água tratada da Lagoa de Extremoz (Tabela 3).

Tabela 3 – Quociente de Perigo (HQ) em cada via de exposição, Índice de Perigo (HI) e Risco Carcinogênico (RC) de cada espécie de THM e os THMt nos dois pontos amostrais da rede de distribuição da água tratada da Lagoa de Extremoz.

	Amostras							
	IR				FR			
	HQ _{ig}	HQ _d	HQ _{in}	HI	HQ _{ig}	HQ _d	HQ _{in}	HI
TCM	3,32	0,286	4,71	8,31	3,74	0,322	5,31	9,37
BDCM	0,102	0,00688	-	0,109	0,119	0,00803	-	0,127
DCBM	0,0268	0,00173	-	0,0286	0,0282	0,00182	-	0,03
THMt	3,45	0,294	4,71	8,45	3,89	0,332	5,31	9,53
RC total	0,00442				0,005			

TCM = clorofórmio; BDCM = bromodictlorometano; DCBM = dibromoclorometano; THMt = trihalometanos totais; HI = índice de perigo; RC = risco carcinogênico; HQ_{ig} = quociente de perigo da ingestão; HQ_d = quociente de perigo do contato dérmico; HQ_{in} = quociente de perigo da inalação.

Fonte: elaboração dos autores (2019).

Os resultados constataram que a exposição de água contendo THM, principalmente clorofórmio, tem um elevado potencial de efeito danoso à saúde humana, uma vez que o HI ficou de 8 a 9 vezes acima do valor permitido, em ambos os pontos

amostrais (CAYLAK, 2012; RAIS, 2018) (Tabela 3).

As formas bromadas de THM contribuíram pouco para esses índices, pois as suas concentrações foram dentro do limite permitido em legislação. Kumari *et al.* (2015) também obtiveram que o clorofórmio foi o composto que teve maior impacto no risco à saúde analisado em cinco plantas de tratamento de água na Índia. No entanto, esses autores concluíram que a ingestão foi a via que mais contribuiu para o elevado risco da água. Por outro lado, estudos apontaram que os THM presentes em água potável não apresentaram riscos significativos à saúde da população pelas vias oral (LÓPEZ-ROLDÁN *et al.*, 2016) e dérmica (CAYLAK, 2012), entretanto a via inalatória não foi considerada.

O presente estudo mostrou que as vias inalatória e oral foram as mais significativas para o risco à saúde da população. Esse fato pode estar relacionado à quantidade de água utilizada para outros fins, por exemplo, no banho, e a elevada concentração de clorofórmio, uma vez que é a única espécie de THM que tem risco inalatório, devido à sua característica de fácil volatilização (RAIS, 2018).

O risco carcinogênico (RC) da água tratada que é consumida pela população abastecida pela ETA Extremoz também foi 400 a 500 vezes acima

do permitido ($<1,00E^{-05}$) (CAYLAK, 2012; RAIS, 2018), indicando que há um elevado risco carcinogênico na água de distribuição para a população da zona norte da cidade de Natal pelas vias de exposição pelos THMs.

O risco carcinogênico pode ser definido como a probabilidade de um indivíduo desenvolver câncer em sua vida útil pela exposição a um potencial carcinógeno. Dessa forma, o RC dos THMs está diretamente ligado à forma de exposição, à quantidade e à frequência de exposição de cada composto.

Kumari *et al.* (2015) apresentaram um resultado compatível com o presente estudo, no qual o clorofórmio foi a espécie que mais impactou no risco carcinogênico, porém pela rota oral. Por outro lado, Pan *et al.* (2014) obtiveram um risco carcinogênico de THMs em água tratada na China abaixo do limite da WHO (10^{-6}), entretanto os autores não consideraram os valores de clorofórmio. Nesse mesmo sentido, Caylak (2012) obteve menores valores de clorofórmio em água potável de onze cidades da Turquia, no entanto, as concentrações de BDCM e DCBM foram elevadas e o risco carcinogênico dessas amostras foram um pouco acima do limite.

A avaliação do risco carcinogênico da exposição aos químicos ambientais, como no caso dos

THMs, tem sido discutida e avaliada pelos cientistas, gestores e legisladores (WHO, 2000). Estudos epidemiológicos em humanos já têm boas evidências da relação entre a exposição dos THMs em água potável e câncer de bexiga e colorretal, além de problemas reprodutivos (RICHARDSON *et al.*, 2007; NIEUWEWENHUIJSEN *et al.*, 2009; VILLANUEVA *et al.*, 2017).

Dessa forma, a avaliação quantitativa dos riscos carcinogênicos para os THMs reflete um cenário toxicológico mais realista, pois considera a concentração real, a forma de exposição e o modo de ação de cada composto halogenado na saúde humana. Assim, há uma melhor compreensão sanitária dos THMs relacionados às incertezas remanescentes em relação aos seus potenciais riscos à saúde quando comparadas as análises com modelos experimentais laboratoriais (MEDEIROS *et al.*, 2019).

CONCLUSÃO

As metodologias de avaliação e gestão de risco, aliadas às boas práticas de operação e manutenção dos sistemas de abastecimento de água, visam a proteção da saúde pública, atuando como precursores dos incidentes de qualidade da água.

A avaliação quantitativa de risco à saúde humana e risco carcinogênico são ferramentas importantes para compreender de forma realista a vulnerabilidade de exposição de uma população a uma determinada substância nociva. Contudo, estudos epidemiológicos e análises laboratoriais devem ser utilizados para complementar o conhecimento quanto ao impacto de tais substâncias na saúde da população.

Diante do exposto, conclui-se que os trihalometanos são substâncias que causam risco não carcinogênico e carcinogênico à população exposta, principalmente o clorofórmio, pois este, devido à sua característica volátil, contribui para a exposição inalatória, assim como a oral, sendo essas as vias de exposição com maiores riscos de contaminação humana. Há, portanto, uma necessidade imediata de monitoramento e medidas a fim de mitigar a exposição da população abastecida, para diminuir ou eliminar a exposição e/ou formação dessas concentrações de THM.

REFERÊNCIAS

BARTRAM, J. *et al.* **Water Safety Plan Manual: Step-By-Step Risk Management for Drinking-Water Suppliers.** Geneva: World Health Organization, 2009.

BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde. Departamento de Vigilância em Saúde Ambiental e Saúde do Trabalhador. **Plano de segurança da água: garantindo a qualidade e promovendo a saúde: um olhar do SUS**. Brasília: Ministério da Saúde, 2013. 60 p.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria de Consolidação Nº 5, de 28 de setembro de 2018**. Consolidação das normas sobre ações e os serviços de saúde do Sistema Único de Saúde. Diário Oficial da República Federativa do Brasil. Brasília: Ministério da Saúde, 2017. 360 p.

BURGMAN, M.A. **Risks and Decisions for Conservation and Environmental Management**. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.

CAYLAK, E. Health Risk Assessment for Trace Metals, Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Trihalomethanes in Drinking Water of Cankiri, Turkey. **E-Journal of Chemistry**, v. 9, n. 4, 2012. p. 1976-1991.

COX, A.L. What's wrong with risk matrices? **Risk Analysis**, v. 28, n. 2, 2008. p. 497-512.

DE CASTRO MEDEIROS, L. *et al.* Toxicological aspects of trihalomethanes: a systematic review. **En-**

Environmental Science and Pollution Research, v. 26, n. 6, 2019. p. 5316-5332.

HRUDEY, S. E.; HRUDEY, E.J.; POLLARD, S.J.T. Risk management for assuring safe drinking water. **Environment International**, v. 32, 2006. p. 948-957.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Tábua completa de mortalidade para o Brasil – 2016**: Breve análise da evolução da mortalidade no Brasil. Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: ftp://ftp.ibge.gov.br/Tabuas_Completas_de_Mortalidade/Tabuas_Completas_de_Mortalidade_2016/tabua_de_mortalidade_2016_analise.pdf. Acesso em: 10 out. 2018.

JALBA, D. I. *et al.* Safe drinking water: Critical components of effective inter-agency relationships. **Environment International**, v.36, n. 1, 2010. p. 51-59.

JO, W.K.; WEISEL, C.P.; LIOY, P.J. Routes of chloroform exposures and body burden from showering with chlorinated tap water. **Risk Analysis**, v. 10, 1990. p. 575-580.

KUMARI, M.; GUPTA, S.K.; MISHRA, B.K. Multi-exposure cancer and non-cancer risk assessment of trihalomethanes in drinking water supplies – A

case study of Eastern region of India. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 113, 2015. p. 433-438.

LÓPEZ-ROLDÁN, R. *et al.* Assessment of the water chemical quality improvement based on human health risk indexes: Application to a drinking water treatment plant incorporating membrane technologies. **Science of the Total Environment**, v. 540, 2016. p. 334-343.

LEAVENS, T. L. *et al.* Disposition of Bromodichloromethane in Humans Following Oral and Dermal Exposure. **Toxicological Sciences**, v. 99, n. 2, 2007. p. 432-445.

LINDHE, A. *et al.* Cost-effectiveness analysis of risk-reduction measures to reach water safety targets. **Water Research**, v. 45, n. 1, 2011. p. 241-253.

LINDHE, A. *et al.* Fault tree analysis for integrated and probabilistic risk analysis of drinking water systems. **Water Research**, v. 43, n. 6, 2009. p. 1641-1653.

NASCIMENTO, R.S. *et al.* Changes simulation in a conventional ETA midsize to safe water production. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, n.2, 2016. p. 439-450.

NAVONI, J.A. *et al.* Human health risk assessment with spatial analysis: Study of a population chronically exposed to arsenic through drinking water from Argentina. **Science of the Total Environment**, v. 499, 2014. p. 166-174.

NIEUWENHUIJSEN, M. J. *et al.* The epidemiology and possible mechanisms of disinfection by-products in drinking water. **Philosophical Transactions of the Royal Society A**, v. 367, n. 1904, 2009. p. 4043-4076.

OLMOS, V. *et al.* Influence of the level of arsenic (As) exposure and the presence of T860C polymorphism in human As urinary metabolic profile. **Human & Experimental Toxicology**, v. 34, n. 2, 2015. p. 170-178.

PAN, S. *et al.* Cancer risk assessment on trihalomethanes and haloacetic acids in drinking water of China using disability-adjusted life years. **Journal of Hazardous Materials**, v. 280, 2014. p. 288-294.

PINHEIRO, L. G. *et al.* Avaliação da sustentabilidade do processo de dessalinização de água no semiárido potiguar: Estudo da comunidade Caatinga Grande. **Sociedade e Natureza**, v. 30, n.1, 2018. p.132-157.

RICHARDSON, S. D. *et al.* Occurrence, genotoxicity, and carcinogenicity of regulated and 935 emerging disinfection by-products in drinking water: A review and roadmap for 936 research. **Mutation Research**, v. 636, p. 178–242, 2007.

SORLINI, S. *et al.* Water Safety Plan for drinking water risk management: the case study of Mortara (Pavia, Italy). **Revista Ambiente & Água**, v. 12, n. 4, 2017. p. 513-526.

SANCHES, S. M. *et al.* Chemical and microbiological analysis of public school water in Uberaba Municipality. **Revista Ambiente & Água**, v. 10, n. 3, 2015. p. 530-541.

USEPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **National Primary Drinking Water Regulation**. [Stage 1 and 2 Disinfectants and Disinfection Byproducts Rules](#). Ohio, 2009.

USEPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **EPA 8260B**: VOLATILE ORGANIC COMPOUNDS BY GAS CHROMATOGRAPHY/ MASS SPECTROMETRY (GC/MS). Ohio, rev.2, dez. 1996. CDROOM.

USEPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **EPA 816-R-02-014**: Filter Backwash Recycling Rule Technical Guidance Manual. Ohio, dez 2002.

USEPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Risk Assessment Guidance for Superfund**. Volume I: Human Health Evaluation Manual (Part A), Washington,DC: US Environmental Protection Agency, 1989.

VILLANUEVA, C. M. *et al.* Colorectal Cancer and Long-Term Exposure to Trihalomethanes in Drinking Water: A Multicenter Case-Control Study in Spain and Italy. **Environmental Health Perspectives**, v. 125, n. 1, 2017.

WEISEL, C.P. *et al.* Exposure estimates to disinfection by-products of chlorinated drinking water. **Environmental Health Perspectives**, v. 107, 1999. p. 103-110.

WHO – WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Environmental health criteria 216**: disinfectants and disinfectant by-products. Geneva: WHO, 2000.

_____. **Guidelines for drinking-water quality**. 4. ed. Geneva: WHO, 2011.

RAIS - **The Risk Assessment Information System**. Disponível em: <https://rais.ornl.gov/index.html>. Acesso em: 22 de novembro de 2021.

CAPÍTULO VIII



ANÁLISE DOS RECURSOS DA BIOMASSA DA CANA-DE-AÇÚCAR NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL

FRANCIDALVA VIEIRA ALVES DE ASSIS

JULLYANE DOS SANTOS DE LUCENA SATURNINO

MAGNO MIRANDA GOMES

RENATA DOS SANTOS DE OLIVEIRA

JOÃO TEIXEIRA DE CARVALHO NETO

RÔMULO MAGNO OLIVEIRA FREITAS

INTRODUÇÃO

Os debates relacionados aos problemas ambientais estão cada vez mais em evidência. Por isso, buscam-se alternativas para minimizar os impactos negativos gerados ao meio ambiente. Com isso, as fontes de energia renováveis tornaram-se alternativas de suma importância para toda sociedade, por possuírem os benefícios que contribuem com a preservação e a conservação ambiental, tendo como finalidade a minimização das

emissões dos agentes poluidores, como os gases de efeito estufa.

Diante das constantes ameaças e do avanço das práticas do desmatamento, das caças predatórias, da exploração da biodiversidade e da contaminação dos recursos naturais de forma sistemática, tendo como foco alimentar o ciclo mercadológico e manter ativo o desenvolvimento econômico, faz-se necessária a adoção de medidas para mitigar essas ações, ressaltando a importância da sustentabilidade e do bem-estar social, o qual se faz imprescindível à satisfação das necessidades humanas.

A sustentabilidade está associada diretamente ao meio ambiente e a tudo o que o envolve, visando tanto a sua continuidade quanto o atendimento das necessidades da geração presente e das futuras, de tal forma que o capital natural seja mantido e enriquecido em sua capacidade de regeneração, reprodução e coevolução, onde deve-se utilizar os recursos naturais de forma inteligente para que eles sejam preservados (BOFF, 2012).

Dessa forma, pensar em alternativas que associem a disponibilidade dos recursos naturais para corroborar com as necessidades e os anseios da sociedade, além de estudar e analisar a viabilidade técnica e potencial das fontes alternativas para produção de energia elétrica, tornou-se uma possível alternativa para minimizar os impactos

gerados, diante de uma demanda crescente impulsionada pelo processo do consumismo. De acordo com Cechin (2010, p. 180) “desenvolvimento requer energia. E é ela que conecta os desafios da sustentabilidade ambiental com as dimensões social e econômica do desenvolvimento”.

Nesse sentido, diversos estudos de viabilidade técnica e econômica foram realizados, dentre eles o Atlas da Eficiência Energética Brasil (AEEB, 2020), que tem como objetivo monitorar o progresso da eficiência energética do Brasil, apresentando indicadores sobre a evolução do consumo e fontes alternativas de energias renováveis, entre eles o uso de biomassa.

A biomassa é composta por material orgânico favorável para gerar energia química no seu interior. Para isso, pode-se utilizar espécies das vegetações terrestres e aquáticas e os resíduos de caráter orgânicos de origem doméstica ou industrial, resíduos agrícolas e os esterco de origem animal (VIDAL e HORA, 2009; TAVARES e TAVARES, 2014).

Já os autores Genovese, Udaeta e Galvão (2006) definem biomassa como toda a matéria orgânica de origem vegetal ou animal que poderão ser convertidas em energia, como madeira, resíduos urbanos e florestais, grãos, talos, óleos vegetais e lodo de tratamento biológico de efluentes.

A diversidade da biomassa tornou-se atrativa, compondo o Balanço Energético Nacional (BEN, 2020). Além disso, foram promovidas parcerias entre instituições financeiras para alavancar o setor, a exemplo dos programas de financiamentos realizados pelo Banco do Nordeste, de acordo com a Cartilha de Financiamento à Micro e à Minigeração Distribuída de Energia Elétrica (2018). Nesse sentido, também foram realizados estudos estratégicos para ampliar a diversidade energética ao longo prazo, conforme informa o documento “Papel da Biomassa na Expansão da Geração de Energia Elétrica” (2018), que compõe o Plano Nacional de Energia 2050 (2020).

Segundo esses estudos técnicos, foram realizadas projeções até o ano 2050, apresentando as perspectivas tecnológicas para a utilização dos recursos renováveis. Dentre essas análises, a da extração da energia renovável através da utilização da biomassa, com destaque para a utilização do bagaço da cana-de-açúcar para exploração de energia elétrica.

De acordo com Tolmasquim (2016), o bagaço da cana-de-açúcar assumiu um papel importante entre as opções do uso da biomassa, assim como a sua utilização na produção de biocombustíveis, mais especificamente do etanol, tendo em vista a abundância do seu cultivo em diversas regiões

brasileiras. As características naturais, como solos de excelentes fertilidades, a exemplo do solo de massapê no Nordeste e o solo de terra roxa na região Sudeste, e as precipitações que ocorrem nos meses da estação chuvosa, no período de maio a agosto, permitem o desenvolvimento do plantio, de acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2020), e, dessa forma contribuem para o aumento da produtividade da cana-de-açúcar em ambas as regiões.

Nota-se que existe uma carência de informações sobre o potencial do uso sustentável da biomassa de bagaço da cana-de-açúcar na geração de energia elétrica. Dessa maneira, busca-se compreender de que forma a biomassa do bagaço da cana-de-açúcar poderá contribuir para geração de energia elétrica na matriz energética brasileira, como fonte complementar. Dentro desse cenário, objetiva-se analisar os aspectos favoráveis e desfavoráveis dos recursos da cana-de-açúcar na produção energética no Brasil.

A metodologia utilizada para realização deste trabalho deu-se através de uma revisão de literatura de caráter exploratório, buscando informações para definir o escopo do estudo e permitir conhecer o cenário da pesquisa, de acordo com Gil (2019). Para isso, foram analisadas publicações científicas, sob responsabilidade de autores

como Moura (2006) e Tavares (2014); documentos de instituições governamentais, como Companhia Nacional de Abastecimento e Balanço Energético Nacional; entre outros. Através deste estudo, buscou-se relacionar os aspectos da sustentabilidade no uso do bagaço da cana-de-açúcar, tendo como base os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), com destaque para o objetivo 7, que se refere à energia acessível e limpa.

CONCEPÇÕES NORTEADORAS DA PESQUISA

CONCEPÇÕES SOBRE A BIODIVERSIDADE

A biodiversidade é compreendida como uma forma abrangente que circunda boa parte dos elementos da natureza. Nesse sentido, o Fundo Mundial para a Natureza (WWF, 2021), uma organização da sociedade civil brasileira apartidária e sem fins lucrativos, apresenta um conceito, afirmando que a biodiversidade, também, pode ser compreendida como diversidade biológica, que envolve a variabilidade das riquezas dos elementos que estão presentes no mundo natural. Sendo assim, a biodiversidade compreende a flora, a fauna e todos os microrganismos que exercem uma relação cinegética de trocas, servindo também

como fonte de alimentos e como matéria-prima para produção industrial de produtos utilizados pela sociedade.

É importante ressaltar que o Brasil ocupa uma região considerável da América do Sul, tendo em vista que possui uma grande parte da diversidade do globo terrestre. As terras brasileiras compreendem 6 biomas terrestres e 3 ecossistemas marinhos, e nela se encontram 116.000 espécies de animais e 46.000 espécies de vegetais conhecidos. Com isso, é possível afirmar que o Brasil tem uma gigantesca biodiversidade, em seus diferentes biomas terrestres (florestas tropicais, pantanal, cerrado, caatinga e pampa). Cada bioma representa uma complexidade de sistemas e de biotas, cada uma com suas peculiaridades e relevância para o sistema de relações simbióticas e para perpetuação e diversidade das espécies (MMA, 2021).

O território brasileiro possui a maior biodiversidade do planeta. Essa riqueza é distribuída pelos biomas, que, ao longo dos anos, apresentaram perdas significativas de cobertura vegetal nativa. Esse rápido processo de devastação, onde se observa a extinção de espécies e a redução das populações animais e vegetais provoca perdas significativas aos ecossistemas, gerando assim um dos fatores que comprometem a biodiversidade

(MUYLAERT *et. al*, 2018; TABARELLI *et. al*, 2018).

Nesse sentido, aspectos relacionados à poluição, à introdução de espécies exóticas, às práticas da biopirataria, às alterações do clima, À devastação de *habitats*, associados ao crescimento urbano desordenado, têm promovido danos significativos para o meio ambiente, a exemplo do que ocorreu com a Mata Atlântica, atualmente com menos de 16% de cobertura de vegetação nativa, e que vem sofrendo grandes alterações nos ciclos ecossistêmicos (MUYLAERT *et. al*, 2018; TABARELLI *et. al*, 2018).

O Relatório Anual do Desmatamento no Brasil (2019) mostrou que a perda de vegetação nativa foi detectada em todos os biomas do país naquele ano, em ao menos 1.218.708 hectares (ha), o equivale a 12.187 km², ou a oito vezes o município de São Paulo. Desse montante, a maior parte (mais de 60%) está na Amazônia, com 770 mil hectares devastados; seguida do Cerrado, que perdeu 408.6 mil ha; do Pantanal, com uma perda de 16.500 mil ha; da Caatinga, com 12,1 mil ha; da Mata Atlântica, com 10,6 mil ha; e do Pampa, com 642 ha.

Diante desse quadro, faz-se necessária a implementação de políticas públicas e práticas, as quais permitam que a biodiversidade seja explorada de maneira sustentável, visando a preservação do meio ambiente e garantindo o desenvolvimen-

to das populações que vivem no local. Para que isso aconteça, deve-se contar com a participação de toda sociedade, nos âmbitos do Estado, das instituições, das empresas, das ONGs etc.

O Ministério do Meio Ambiente (MMA), através do Decreto nº 4.339, de 22 de agosto de 2002, criou um importante instrumento para gestão da biodiversidade: a Política Nacional da Biodiversidade (PNB), que tem como objetivo geral:

a promoção, de forma integrada, da conservação da biodiversidade e da utilização sustentável de seus componentes, com a repartição justa e equitativa dos benefícios derivados da utilização dos recursos genéticos, de componentes do patrimônio genético e dos conhecimentos tradicionais associados a esses recursos (BRASIL, 2002a).

Dessa forma, a PNB integra a Agenda 2030, a qual é caracterizada pela Organização das Nações Unidas (ONU) como “um plano de ação global que visa proteger o planeta e busca fortalecer a paz universal” (ONU, 2015). O plano estabelece 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), os quais são integrados e equilibram as três dimensões do desenvolvimento sustentável: econômica, social e ambiental. Os ODS estabelecem uma lista de tarefas para que todas as pessoas possam cumprir as metas até 2030.

Merece destaque o objetivo 7, que trata es-

pecificamente da energia acessível e limpa, e em suas ações e metas pretende assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia para todos. O item ressalta que até 2030 é necessário “expandir a infraestrutura e modernizar a tecnologia para o fornecimento de serviços de energia modernos e sustentáveis para todos os países em desenvolvimento” (ONU, 2015).

Nesse sentido, as preocupações em desenvolver técnicas para ampliar as fontes renováveis torna-se uma preocupação global, estimulando soluções locais. Dessa forma, o uso sustentável dos recursos renováveis na produção de energia torna-se uma alternativa para substituir as energias não-renováveis que causam danos ao planeta.

O uso de energias limpas possibilita atender às necessidades da sociedade, tendo em vista que essas são provenientes de matérias naturais e renováveis, como o sol, o vento e a água, os quais são abundantes na natureza, possuem a capacidade de se regenerar e reduzem o impacto ambiental. Entre as energias alternativas renováveis mais utilizadas estão a hídrica, a solar, a eólica, a geotérmica, a maremotriz e a biomassa. O Brasil possui condições favoráveis para o desenvolvimento e a utilização dessas fontes de energia, além de contar com uma das matrizes energéticas mais limpas do mundo (SANTANA *et al.*, 2020).

CONCEPÇÕES SOBRE A DIVERSIDADE DAS MATRIZES ENERGÉTICAS

A Matriz Energética do Brasil apresenta um quadro onde 54% da matriz é composta por energia gerada por fontes não renováveis, e 34,3% da fonte de energia se concentra no petróleo e seus derivados. Porém, a segunda maior participação no cenário brasileiro tem origem energética no derivado da cana-de-açúcar (18,0%), seguida de fonte hidráulica (12,4%) e de fontes diversas de caráter renovável (7%), compostas por maremotriz, eólicas, solares e fotovoltaicas, que juntas correspondem a 45,8% de todas as fontes de energia identificadas na Matriz Energética do Brasil.

Os estudos da EPE (2018) concluem que a Matriz Energética é bem mais sustentável se comparada a Matriz Energética Mundial. O cenário dessa comparação revela que as fontes energéticas no Brasil vêm se diversificando e ganhando espaço em território nacional, processo fruto das parcerias realizadas entre o público e o privado, da pesquisa e do desenvolvimento, em que estão analisadas as potencialidades locais e as aplicações de tecnologias para reaproveitamento de resíduos para produção energética, como é o caso da biomassa que compõe 18,0% da Matriz Energé-

tica Brasileira proveniente do bagaço da cana.

Sobre a composição da Matriz Elétrica, os estudos do EPE (2018) analisam a energia elétrica utilizada para o funcionamento dos equipamentos e dispositivos domésticos e foram realizados nos níveis mundial e nacional. A composição da Matriz Elétrica Mundial é formada por energias não renováveis (74,10%) e renováveis (25,90%). Embora a energia elétrica proveniente da fonte de biomassa seja uma alternativa energética promissora, historicamente tem sido pouco expressiva na matriz energética mundial e tendo uma presença ainda tímida na diversidade das fontes que compõem a Matriz Elétrica Mundial.

Já a Matriz Elétrica do Brasil traz uma configuração de predominância bem mais renovável do que a Matriz Elétrica Mundial, com 82,9% de fontes renováveis de geração de energética. É importante ressaltar que a energia hidráulica tem uma maior participação nesta matriz, reflexo das decisões políticas que centralizaram os investimentos nas construções de hidroelétricas. Outro detalhe interessante é a participação crescente das fontes energéticas eólicas (8,6%), fruto de programas de incentivos que ocorrem na região nordeste, já que esta é uma área propícia para instalação dos aerogeradores, em função do seu posicionamento geográfico e da qualidade dos ventos alísios que circu-

lam na faixa litorânea desta região (APEB, 2001).

A participação da energia elétrica extraída da biomassa tem um aspecto favorável por possuir uma diversidade de fontes geradoras, o que possibilita um crescimento e um potencial de relevância ao longo dos próximos anos. Diante dessas peculiaridades, as indústrias que atuam no ramo da produção de açúcar e de etanol visualizam a biomassa como alternativa de investimento, devido à possibilidade de reutilização de seus resíduos na produção energética (ANEEL, 2008b).

BIOMASSA - PROVENIENTE DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR

Com o crescente aumento da demanda por energia, fez-se necessário o desenvolvimento de alternativas mais sustentáveis, que conseguissem suprir as necessidades da sociedade sem agredir o meio ambiente. Dentro desse cenário, a biomassa é uma fonte de energia renovável, que pode vir dos rejeitos agrícolas, industriais e animais. A Agência Nacional de Energia Elétrica define biomassa como “todo recurso renovável oriundo de matéria orgânica (de origem animal ou vegetal) que pode ser utilizada na produção de energia” (ANEEL, 2008a).

A biomassa pode ser classificada de acordo com sua origem, como agrícola (dos grãos de ar-

roz, da soja, do bagaço de cana-de-açúcar, entre outras), florestal (madeira), proveniente dos rejeitos líquidos e sólidos, urbanos ou industriais.

Conforme mencionado anteriormente, a biomassa provém de diversos tipos de materiais orgânicos de origem animal ou vegetal que possuem um grande potencial de aproveitamento. Para geração de bioenergia, ela constitui uma fonte de energia renovável e que contribui para reduzir os danos causados pelos combustíveis fósseis (ANEEL, 2008b).

Percebe-se ao longo dos anos uma crescente preocupação referente à utilização dos recursos sustentáveis no planeta. Na década de 70, mais precisamente em 1972, ocorreu a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano, em Estocolmo (Suécia), na qual foi evidenciada a necessidade de desenvolver mecanismos para reduzir os impactos ambientais. Sendo assim, despertou-se o interesse no desenvolvimento de novas fontes de energia alternativas, visando reduzir o consumo desenfreado dos combustíveis fósseis que tanto agredem o meio ambiente (ONU, 2021).

GERAÇÃO DE ENERGIA PROVENIENTE DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR

É importante compreender o funcionamento do processo de geração de energia proveniente do

bagaço da cana-de-açúcar. Para isso, é necessário que ocorra a transformação do bagaço para que o processo de cogeração seja realizado, por meio da queima do bagaço (fornalha), gerando a energia térmica em forma de vapor (caldeira) e a energia elétrica (turbina e gerador). O vapor tem a função de promover o funcionamento de uma turbina ligada ao gerador, e assim é produzida a energia elétrica proveniente do bagaço da cana-de-açúcar (CARDOSO, 2011).

Nesse cenário de produção energética proveniente do bagaço da cana-de-açúcar, o Brasil vem apresentando uma importante contribuição. De acordo com o Balanço Energético Nacional (BEN, 2020), a biomassa faz parte da matriz energética brasileira, e a energia proveniente dela quase dobrou dos anos de 2010 (7.927 MW) a 2017 (14.505 MW). Esses resultados estão associados ao fato do Brasil ser o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, tendo grande importância para o agronegócio brasileiro na produção do açúcar e do etanol (CONAB, 2020).

Dessa forma, o Nordeste brasileiro tem um destaque significativo na produção da cana-de-açúcar, o que por sua vez gera uma grande quantidade de biomassa com potencial de uso na geração de energia. Nessa região, as condições climáticas constituem fator importante para deter-

minação do rendimento médio da cultura, sendo os estados de Alagoas, Pernambuco e Rio Grande do Norte os que possuem longa tradição na produção de cana-de-açúcar (CONAB, 2020). Assim, é possível destacar a importância dessas unidades federativas na produção da cana-de-açúcar e, conseqüentemente, na geração de biomassa.

Diante do exposto, quanto maior a produção de cana-de-açúcar, maior será a quantidade de bagaço utilizado para produção de energia. Por outro lado, a procura por maiores produções pode provocar a exploração de maiores áreas, o que pode comprometer a biodiversidade local. Por isso, as empresas estão realizando grandes investimentos em pesquisa para ampliar e desenvolver a variedade genética e aumentar a produtividade (UNUCA, 2016), o que contribuirá de maneira significativa para as ideias de sustentabilidade e desenvolvimento sustentável.

DISCUSSÃO

O Brasil é reconhecido pela sua grande extensão territorial, que por sua vez apresenta uma grande variedade de solos e climas, o que contribui para a produção da cana-de-açúcar e, conseqüentemente, para o aproveitamento dos resíduos para geração de energia.

Diante do exposto e das pesquisas realizadas, verificou-se que as fontes de energias renováveis, eólica, solar e biomassa, colocam-se como fontes de grande importância para os próximos anos, e devem acompanhar o crescimento na produtividade e consumo, tendo em vista a necessidade de reduzir o uso dos combustíveis fósseis e os impactos ao meio ambiente.

O Brasil vem se destacando no cenário da produção de cana-de-açúcar, para fabricação do açúcar, etanol e do uso da biomassa. Nesse cenário, a utilização do bagaço da cana é uma opção, tendo em vista que é uma prática sustentável, renovável e ecologicamente correta, além de ter grande potencial na geração de eletricidade, podendo contribuir como fonte complementar de abastecimento elétrico no país.

Percebe-se que existem várias vantagens na geração de energia a partir do bagaço da cana-de-açúcar, entre elas a geração de emprego e renda na região e menos impactos ao meio ambiente, visto que ela substitui os combustíveis fósseis. Partindo desses pressupostos, o uso da biomassa como fonte geradora de energia elétrica torna-se viável, pelos simples fatos de utilizar a biomassa de diversos recursos de origem animal e vegetal.

Outra vantagem importante é que essa atividade econômica se adapta bem às condições climá-

ticas e ao solo de boa fertilidade, contribuindo para um bom desempenho na colheita. Por outro lado, as colheitas são sazonais, o que significa que, em algum período, haverá uma redução da biomassa e conseqüentemente uma menor disponibilidade de matéria-prima para a produção de energia.

Um outro fator negativo é que a cana-de-açúcar ameaça o bioma de Mata Atlântica, que se localiza na faixa litorânea do Rio Grande do Norte até o Rio Grande do Sul e vem sendo substituída pela cana-de-açúcar, com aumento da área plantada dessa cultura, e do desmatamento de Mata Atlântica.

A região Nordeste possui algumas características importantes para produção de energias renováveis, entre elas uma grande quantidade de radiação solar, o que contribui para o desenvolvimento de energia do mesmo tipo. Possui um extenso litoral, que recebe constantemente ventos oriundos do mar, o que favorece a produção de energia eólica. Além disso, essa região apresenta uma grande produção de cana-de-açúcar, e conseqüentemente grande geração de biomassa.

CONCLUSÃO

Através da revisão de literatura empreendida, ficou evidente que as fontes de energias renováveis estão ganhando cada vez mais notoriedade,

tendo em vista a necessidade de mudar os hábitos de consumo associados aos combustíveis fósseis. Dessa forma, nota-se que o Brasil está desenvolvendo diversos mecanismos a fim de diversificar as fontes geradoras de energia.

A biomassa é uma fonte de energia renovável que tem a capacidade de reduzir o consumo de combustíveis fósseis e minimizar os impactos negativos ao meio ambiente no Brasil, contribuindo para redução do agravamento do efeito estufa.

Diante desse cenário de investimentos e busca de novas fontes geradoras de energia limpa, o Brasil e a região Nordeste, mais especificamente, têm tido um destaque especial, visto que apresentam condições climáticas e solo favoráveis para o plantio da cana-de-açúcar, o que contribui para o aumento da produtividade. Destaca-se, aqui, a biomassa, oriunda do bagaço da cana-de-açúcar, como uma alternativa de energia renovável com potencial para complementar a geração de energia de outras fontes.

Percebe-se que a biomassa tem vantagem em relação às outras fontes de energia, como a solar e a eólica, tendo em vista que poderá ser utilizada a qualquer momento, independente das intempéries climáticas. Portanto, é de suma importância o desenvolvimento de estudos sobre as fontes de energias limpas, para aumentar equitativamente

a disponibilidade delas para todas as regiões do Brasil. Ressalta-se, ainda, que é indispensável a realização de pesquisas, de novos investimentos e de estudos de viabilidade socioeconômica e ambiental das fontes alternativas para a geração de energia elétrica.

REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. 3ª edição. Brasília: 2008a. Disponível em: https://www.aneel.gov.br/documents/656835/14876406/2008_AtlasEnergiaEletricaBrasil3ed/297ceb2e-16b7-514d-5f19-16cef60679fb. Acesso em: 09 abr. 2021.

Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Biomassa**. Diagrama esquemático dos processos de conversão energética da biomassa. Brasília: 2008b. Disponível em: [http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/05-Biomassa\(2\).pdf](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/05-Biomassa(2).pdf). Acesso em: 09 abr. 2021.

BANCO DO NORDESTE. **Cartilha de Financiamento à Micro e à Minigeração Distribuída de Energia Elétrica**. 2018. Disponível em: https://www.bnb.gov.br/documents/3539268/4236758/Cartilha_FNE_SOL_PJ_V18.pdf/98ba9300-91d7-d49e-2019-e998ab1ec527. Acesso em: 27 jun. 2021.

BOFF, L. **Sustentabilidade: o que é o que não é**. 5. ed. Petrópolis: Vozes, 2016.

BRASIL. **Decreto n. 4.339 de 22 de agosto de 2002a**. Institui princípios e diretrizes para a implementação da Política Nacional da Biodiversidade. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/2002/decreto-4339-22-agosto-2002-481345-norma-pe.html>. Acesso em: 05 abr. 2021.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Plano Nacional de Energia 2050**. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME-EPE, 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-563/Relatorio%20Final%20do%20PNE%202050.pdf>. Acesso em: 27 jun. 2021.

BRASIL. **Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002b**. Dispõe sobre a expansão da oferta de energia elétrica emergencial, recomposição tarifária extraordinária, cria o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa). Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/documents/656877/14486448/lei200210438.pdf/112a82ee-a44e-4198-8cf4-8e-157538fff2?version=1.0>. Acesso em: 05 abr. 2021.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Biodiversidade**. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/>

pt-br/assuntos/biodiversidade. Brasília, DF, MMA. Disponível em: Acesso em: 05 abr. 2021.

CARDOSO, Tiago Fiori. **Cogeração de energia através do bagaço de cana-de-açúcar: revisão de literatura**. Dissertação (Mestrado em Gestão de Produção Sucoenergética) – Centro de Ciências Agrárias Programa de Pós-Graduação em Gestão de Produção Sucoenergética, Universidade Federal de São Carlos, São Paulo, 2011.

CECHIN, Andrei. **A natureza como limite da economia: a contribuição de Nicholas Georgescu-Roegen**. São Paulo: Editora Senac, 2010.

Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito (CRESESB). **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro (2001)**. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=publicacoes&task=livro&cid=1>. Acesso em: 01 abr. 2021.

Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB). Observatório Agrícola. **Acompanhamento de Safra Brasileira: cana-de-açúcar primeira safra. Agosto 2020**. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana>. Acesso em: 05 abr. 2021.

DE LARA MUYLAERT, Renata *et. al.* Uma nota sobre os limites territoriais da Mata Atlântica. **Oecologia Australis**, p. 302-311, 2018.

Empresa de Pesquisa Energética (EPE). **Papel da biomassa na expansão da geração de energia elétrica 2018**. Documento de apoio ao PNE 2050. 2018. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/publicacoesarquivos/publicacao-227/topico-457/biomassa%20e%20expans%3%a3o%20de%20energia.pdf>. Acesso em: 27 jun. 2021.

Empresa de Pesquisa Energética (EPE). **Matriz Energética e Elétrica**. 2018b. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2018>. Acesso em: 10 abr. de 2021.

Empresa de Pesquisa Energética (EPE). **Atlas da eficiência energética Brasil 2020**: relatório de indicadores. 2020. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-556/Atlas%20consolidado_08_03_2021.pdf. Acesso em: 05 abr. 2021.

Fundo Mundial para a Natureza (WWF). **O que é biodiversidade?** Disponível em: https://www.wwf.org.br/natureza_brasileira/questoes_ambientais/biodiversidade/. Acesso em: 08 de abr. 2021.

GREENPEACE. **Biodiversidade**. Disponível em: ht-

[tps://www.greenpeace.org/brasil/tag/biodiversidade/](https://www.greenpeace.org/brasil/tag/biodiversidade/). Acesso em: 27 jun. 2021.

GENOVESE, Alex Leão; UDEATA, Miguel Edgar Morelas; GALVÃO, Luiz Cláudio Galvão. **Aspectos energéticos da biomassa como recurso no Brasil e no mundo**. 2006. Disponível em: http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MS-C0000000022006000100021&script=sci_arttext&lng=pt. Acesso em: 13 mar. de 2021.

GIL, Antonio Carlos. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. São Paulo: Atlas, 2019.

MOURA, Flávio dos Reis. **Detecção de clusters espaciais via algoritmo Scan multi-objetivo**. 2006. Dissertação (Mestrado em Estatística) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

Organização das Nações Unidas (ONU). **A ONU e o meio ambiente**.

Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/91223-onu-e-o-meio-ambiente>. Acesso em: 07 fev. 2021.

Relatório Anual do Desmatamento no Brasil (2019). **Desmatamento**. Disponível em: <https://acervo.socioambiental.org/sites/default/files/documents/prov76.pdf>. Acesso em: 28 jun. 2021.

SANTANA, Julie Catherine Siqueira *et.al.* O uso e produção da energia limpa como método de preservação ambiental sustentável. **Epitaya E-books**, v.1 n. 12 (2020), p. 99-111. Disponível em: <https://portal.epitaya.com.br/index.php/ebooks/article/view/53>. Acesso em: 27 jun.2021.

TABARELLI, Marcelo *et al.* Caatinga: legado, trajetória e desafios rumo à sustentabilidade. **Ciência e Cultura**. São Paulo, v. 70, n. 4, p. 25-29, out. 2018. DOI: <https://dx.doi.org/10.21800/2317-66602018000400009>. Acesso em: 16 fev. 2021.

TAVARES, Silvio Roberto de Lucena (org.). **Biocombustíveis sólidos**: fonte energética alternativa visando à recuperação de áreas degradadas e à conservação do Bioma Caatinga. Brasília: Embrapa, Natal: Editora do IFRN, 2014. p. 293-328. Disponível em: <https://memoria.ifrn.edu.br/bitstream/handle/1044/1091/Bicombustiveis%20Solidos%20-%20Silvio%20Tavares.pdf?sequence=1>. Acesso em 16 fev. 2021.

TOLMASQUIM, Mauricio Tiomno (coord.). **Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica**. EPE: Rio de Janeiro, 2016.

União da Indústria de Cana de Açúcar (UNICA). **UNICADATA**. São Paulo, 2018. Disponível em: <http://>

www.unica.com.br/. Acesso em: 26 mar. 2021.

UNITED NATIONS. **Transforming our world: the 2030 agenda for sustainable development.** ONU, 2015. Disponível em: <https://sdgs.un.org/2030agenda>. Acesso em: 09 abr. 2021.

Vidal, André Carvalho Foster; Hora, André Barros da. **Perspectivas do setor de biomassa de madeira para a geração de energia.** O Banco Nacional do Desenvolvimento (BND). Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/2523>. Acesso em: 27 jun. 2021.

CAPÍTULO IX



ENERGIA FOTOVOLTAICA NO BRASIL: UMA OPORTUNIDADE PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

ELAINE DENISE BANDEIRA

MARIA CLARA ABDON DA CUNHA

WERYKA PRESTON LEITE BATISTA DA COSTA

JOÃO TEIXEIRA DE CARVALHO NETO

RÔMULO MAGNO OLIVEIRA FREITAS

INTRODUÇÃO

A biodiversidade é considerada fornecedora de matéria-prima para inúmeros setores da economia, sendo um importante elemento estratégico. Apesar da destruição e degradação desse patrimônio, as empresas se utilizam de estratégias de modelos sustentáveis de uso dos recursos com a finalidade de esse ser um diferencial para obter vantagens competitivas. Nesse contexto, a busca por fontes renováveis de energia visa buscar o equilíbrio e reduzir os impactos provocados pelas

matrizes energéticas não renováveis.

O mundo possui uma matriz energética composta, principalmente, por fontes não renováveis a partir de combustíveis fósseis como carvão, petróleo e gás natural dentro das termelétricas. As fontes renováveis como solar, eólica e geotérmica, por exemplo, juntas correspondem a apenas 2% da matriz energética mundial, e, se somadas à participação da energia hidráulica e da biomassa, totalizam aproximadamente 14% (OECD, 2020).

O Brasil é a maior matriz energética renovável do mundo, já que grande parte da sua energia elétrica vem das hidrelétricas (59,8%), seguida pelas energias de origem eólica (9,4%), biomassa (8,3%) e solar fotovoltaica centralizada (1,7%), de acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR).

O crescimento econômico brasileiro tem demandado maior consumo de energia, elevando a intensidade energética em torno de 2% ao ano – crescimento consistente com o aumento do PIB. Essa demanda tem sido atendida com a ampliação das fontes térmicas não renováveis e com o processo de carbonização da matriz elétrica, que em 2015 chegaram a responder por quase 26% da oferta interna de energia devido à grave estiagem ocorrida nesse período. Esse fato aumentou as

emissões de carbono de 82 para 137 kg CO₂/MWh.

A energia fotovoltaica é apresentada como líder da geração renovável mundial, em estimativas realizadas até o ano de 2040, de acordo com a Agência Internacional de Energia Elétrica (International Energy Agency, ou IEA). No ano de 2020, países como a China, Japão, EUA, Alemanha e Índia são apresentados na lista dos países com maior potência acumulada de energia solar, com destaque para a China, com a potência acumulada de 175 GW.

A crise no sistema de abastecimento energético no Brasil, ocorrida entre os anos 2001 e 2002, acabou expondo as necessidades de buscar soluções alternativas, renováveis e limpas, para suprir as demandas para o fornecimento de eletricidade. Diante desse contexto, torna-se importante a geração de inovações para poder atender à necessidade por novas práticas e tecnologias, como também o estímulo à incorporação da variável ambiental por todo o setor produtivo (FERRO *et al.*, 2006).

Neste trabalho, foram analisados os aspectos sustentáveis atrelados à tecnologia solar fotovoltaica, por meio de revisão bibliográfica, trazendo à luz o contexto histórico e o atual, o funcionamento, a aplicabilidade, as inovações e a usabilidade no Brasil, com enfoque em novas técnicas,

além do potencial do país e a utilização da tecnologia no semiárido brasileiro.

ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA: O SISTEMA E SUA TECNOLOGIA

FUNCIONAMENTO

A geração de energia fotovoltaica ocorre com a conversão direta da luz em eletricidade através do efeito fotovoltaico. Assim, caracteriza-se pelo aparecimento de uma diferença de potencial nas extremidades de um semicondutor devido à absorção de luz.

As placas solares são constituídas por células. As células disponíveis no mercado atualmente são de silício cristalino (monocristalino e policristalino) e silício amorfo, sendo as de silício monocristalino as de maior eficiência de conversão fotovoltaica. O silício é um dos elementos mais abundantes na crosta terrestre e um material semicondutor usado para diversas finalidades. O silício cristalino tem um arranjo atômico que proporciona a formação de um sólido em uma rede cristalina. A essa rede podem ser acrescentadas percentagens de outros elementos para produzir células de comportamentos negativos e positivos e permitir a transferência de elétrons em um pro-

cesso chamado de dopagem, resultando em fotocondutividade (GOMES, 2009).

A Resolução Normativa Nº 482 de 2012 da ANEEL, que regulamenta o sistema de compensação de energia elétrica no Brasil, possibilitou ao consumidor gerar energia elétrica utilizando alguma fonte de energia renovável, podendo fornecer o excedente para a concessionária de energia da mesma região, através da configuração de microgeração e minigeração (MACHADO e MIRANDA, 2014). De acordo com a ANEEL, a microgeração compreende uma central geradora de energia com potência instalada menor ou igual a 75 kW; e a minigeração é a central geradora com potência instalada superior a 75 kW e inferior a 3 MW, quando sua fonte é hídrica, e menor ou igual a 5 MW para as demais fontes renováveis ou cogeração qualificada conectada à rede de distribuição.

Nesse contexto, buscando o aproveitamento dos recursos naturais e o desenvolvimento tecnológico, os sistemas fotovoltaicos podem ser divididos em sistemas isolados (*off-grid*/não conectados à rede) e sistemas conectados à rede (*on-grid*/autônomos). Nos sistemas *off-grid*, é necessária a colocação do inversor de energia solar para que ocorra a mudança da energia de corrente contínua para a corrente alternada. Após a transformação dessa energia, ela vai para o quadro de luz e é dis-

tribuída, ocasionando a redução da quantidade de energia comprada na rede da concessionária (PE-REIRA, 2017). E com o sistema de compensação, conforme Carvalho (2019), o excedente ou sistema *on-grid* vai para a rede elétrica convencional, gerando créditos para o produtor/consumidor.

De acordo com a ABSOLAR (2020), no Brasil, os estados de Minas Gerais, São Paulo e Rio Grande do sul apresentaram destaque na geração distribuída da energia fotovoltaica. Já nos primeiros meses de 2021, esse *ranking* foi liderado pelos referidos estados.

No *ranking* municipal de potência instalada, merecem destaque as cidades de Uberlândia-MG, Cuiabá-MS e Rio de Janeiro-RJ, com cerca de 49,5, 44,4 e 41,08 megawatts, respectivamente. De acordo com ABSOLAR, em 05 de abril de 2021, aparecem as cidades de Brasília-DF, Cuiabá-MT e Uberlândia-MG como destaque do *ranking* municipal do corrente ano.

No Brasil, mais de 8,4 GW de energia estão em operação desde 2012, movimentando mais de R\$12,2 bilhões em arrecadação de tributos e mais de 254 mil novos empregos. A evolução da produção de energia brasileira é destaque no *ranking* mundial, saltando da 16ª posição mundial no ano de 2017 para a 9ª posição no ano de 2020. Foram mais de 44 bilhões de reais investidos no setor pri-

vado, com um quantitativo de CO₂ evitado de mais de 8,3 milhões de toneladas. De todas as instalações de minigeração e microgeração distribuídas no Brasil, 99,9% são da fonte solar fotovoltaica, com 438.035 sistemas solares fotovoltaicos conectados à rede e 546.927 unidades consumidoras recebendo créditos pelo sistema de compensação de energia elétrica (ABSOLAR, 2020).

EVOLUÇÃO E PROJEÇÕES

O nascimento da primeira célula solar moderna ocorreu em 1953, quando Calvin Fuller desenvolveu um processo de dopagem apresentada formalmente em 1954 na reunião anual da National Academy of Sciences, em Washington. No ano seguinte ocorreu a primeira aplicação da célula de silício como fonte de alimentação de uma rede telefônica na Geórgia. No mês de setembro do ano 2004, na Alemanha, foi inaugurado o maior sistema fotovoltaico do mundo, conectado à rede elétrica, com potência de 5 MW pico, apresentando eficiência da ordem dos 16% e composto por 33.500 módulos (CRESESB, 2016).

No ano de 2020, segundo a ABSOLAR (2020), o Brasil ultrapassou a marca histórica de 6 GW de potência operacional da fonte solar fo-

tovoltaica em usinas de grande porte e sistemas médios e pequenos instalados em telhados, fachadas e terrenos. No primeiro semestre desse mesmo ano, mesmo com queda das atividades econômicas provocada pelas medidas de isolamento social em meio à pandemia causada pelo novo coronavírus (SARS-CoV-2), o país ultrapassou em 30,6% os dados históricos atingidos no final do ano de 2019. A energia solar fotovoltaica foi responsável pela geração de mais de 41 mil empregos e adicionou 1381 megawatts (MW) em capacidade instalada, agregando aos cofres públicos cerca de R\$25 bilhões em tributos durante esse mesmo período. Houve uma evolução da fonte solar fotovoltaica já em 2020, de 58% de geração distribuída e 42% de geração centralizada. A projeção para 2021 é de 12.566 MW, sendo 34% de geração centralizada e 66% de geração distribuída, de acordo com a ANEL/ABSOLAR (2021).

De acordo com o Blog Solar, em matéria publicada no ano de 2016, a capacidade instalada da tecnologia fotovoltaica passou a conquistar espaço significativo, sendo a geração de energia solar mundial representada por cerca de 70% da matriz energética em países como Alemanha, China, Japão, Itália e EUA.

A energia solar fotovoltaica, de acordo com

a International Energy Agency (IEA), representará mais de 10% da matriz energética mundial até 2050, com projeção de mais de 60% correspondendo à geração distribuída (instalações residenciais, comerciais e industriais).

Para 2021, conforme a ABSOLAR (2020), o mundo poderá contar com uma nova capacidade instalada de energia solar fotovoltaica, chegando até 209 GW. As projeções para o Brasil no ano de 2021 é de que o setor gere cerca de 147 mil novos postos de trabalho, com um investimento no setor em torno de R\$ 22 bilhões ao redor do país e R\$17,2 bilhões destinados à geração distribuída. Assim, contará com um acréscimo de 5,09 GW em potência instalada de energia solar fotovoltaica, representando um aumento de 68% em relação ao acumulado até o fim de 2020.

Conforme o Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE 2019-2029), divulgado pelo Ministério de Minas e Energia (MME), nos próximos anos a capacidade de placas solares instaladas no Brasil tenderá a crescer cerca de quatro vezes, saltando de 2 GW para 11 GW no segmento de geração distribuída. O país apresenta um dos maiores índices de irradiação do mundo, sem grandes variações de radiação solar ao longo do dia, já que a maior parte do seu território se encontra próximo à linha do Equador.

BENEFÍCIOS AO MEIO AMBIENTE E SUSTENTABILIDADE

A eficiência energética está associada à produtividade, à proteção do meio ambiente e ao desenvolvimento sustentável. Nesse sentido, ações de eficiência energética podem ser vistas como uma forma de produção de energia descentralizada, tendo como consequência o aumento da mesma. Isso porque tais ações podem contribuir para a redução de emissão de CO₂ e outros gases que agravam o efeito estufa. O benefício associado à preservação do meio ambiente está relacionado ao fato de se evitar a construção de novas usinas hidrelétricas, de maneira a diminuir o alagamento de grandes áreas, modificando, com isso, a fauna e a flora (BORGES *et al.*, 2011).

De acordo com a ABSOLAR, até o mês de abril de 2021, evitou-se a emissão de mais de 8,3 milhões de toneladas de CO₂, contribuindo, dessa forma, para a busca pelo equilíbrio com o meio ambiente, em consonância com os 17 objetivos para o desenvolvimento sustentável descritos na Agenda 2030 da ONU. A energia solar é uma das soluções viáveis para a conquista dos objetivos 14 e 15, que tratam da vida debaixo da água e da vida sobre a terra, respectivamente. A utilização da energia solar atua de forma a mitigar os impactos gerados

pelas construções das hidrelétricas e apresenta menos impactos provocados pelas derrubadas de florestas, relocação de populações, áreas submersas, entre outros. Atende, ainda, aos objetivos 7 e 12, quando figura como uma alternativa de energia acessível e limpa, buscando consumo e produção responsáveis.

Além disso, a utilização dos sistemas fotovoltaicos contribui de forma a combater as mudanças climáticas e seus impactos, já que sua utilização libera menos poluentes que ocasionam o efeito estufa, com seu funcionamento e geração de energia atuando a partir do próprio sol. Dessa forma, corrobora também para o atingimento do ODS 13, da Agenda 2030 da ONU. Nesse sentido, é importante considerar que, no Acordo de Paris, o Brasil assumiu metas para diminuição do aquecimento solar, com o objetivo de adotar até 45% de energias renováveis em sua matriz energética até 2030.

EXEMPLOS DE USO SUSTENTÁVEL DA ENERGIA FOTOVOLTAICA

A energia solar fotovoltaica vem se tornando uma importante fonte de eletricidade, principalmente no atendimento de áreas distantes dos centros distribuidores de energia elétrica. Nesse sentido, em pesquisa realizada por Alvarenga (2014), foram apresentados os conceitos básicos

de energia solar fotovoltaica e o dimensionamento de um sistema fotovoltaico para o bombeamento de água de uma planta de irrigação de um cultivo de alface em casa de vegetação.

Em unidades de conservação da Amazônia, através do Projeto Resex Produtoras de Energia Limpa, em parceria entre o ICMBio e o WWF-Brasil, foram implantados 20 sistemas solares utilizados para o bombeamento de água, refrigeração e uso da despoldadeira no processamento e conservação do açaí. Além disso, uma escola foi contemplada e com isso pôde ter aulas noturnas, com iluminação adequada, ventiladores e *internet*, além de economizar com combustível, que era a fonte de energia antiga (ICMBio, 2019). Em execução durante a pandemia, integrando o programa das Resex produtoras de energia limpa, uma mini rede solar fotovoltaica de 30KW, em Vila Limoeira (Resex Médio Purus), proporcionou o surgimento da primeira comunidade 100% solar no sul da Amazônia, funcionando com um sistema *off-grid*, contando com mais 10 sistemas para bombeamento de água por meio da energia solar, naquela região.

Com o intuito de promover o uso de uma energia limpa, de acordo com o Movimento Tapajós Vivo e informações publicadas pelo Tapajós de Fato (2020), o Projeto Tapajós Solar vem desenvolvendo na região oeste paraense a implementação

de instalação em comunidades na região da Flona Tapajós. O projeto tem o anelo de evitar a implantação das barragens do Jatobá, Chorão e São Luiz do Tapajós no curso do rio Tapajós e em alusão ao Movimento Tapajós Vivo, o qual defende o rio e a sobrevivência das comunidades que estão às margens dele. Há outros projetos com o mesmo princípio na região, aproveitando toda a capacidade e incidência solar existente naquela região e ainda capacitando a comunidade por meio do programa “Eletricista do Sol”, no qual a comunidade é instruída para fazer a instalação e manutenção dos sistemas, já prevendo a aplicação da tecnologia nas comunidades, como exemplo existente na Reserva Extrativista Tapajós-Arapiuns.

Outro exemplo de inovação, ainda na região do Tapajós, vem de um convênio firmado entre a Fundação Banco do Brasil (FBB) e a Associação Comunitária de Moradores e Produtores Agroextrativistas de Surucuí. Na iniciativa, os moradores das Reservas Extrativistas Tapajós Arapiuns, do município de Santarém, no oeste do Pará, passaram a utilizar a luz solar em um triciclo para transportar seus produtos (frutas e produtos beneficiados a partir da mandioca e da maniva), diante das condições naturais da região, onde os moradores da Resex Tapajós Arapiuns têm unicamente o rio Tapajós como ligação com o município de Santarém, a uma distância

de mais de seis horas. A farinha de mandioca é o primeiro produto que vem sendo beneficiado. Após capacitação, as famílias passaram a seguir padrões de higiene e qualidade na produção, e com o ensacamento na agroindústria puderam aumentar o valor de venda do produto beneficiado. Atualmente, 14 famílias produzem cerca de 100 quilos por semana e contribuem para o cumprimento do Objetivo do Desenvolvimento Sustentável.

Outro exemplo vem por meio do Decreto no 9.357/2018, que trata do Programa Luz para Todos. O programa possibilitou mudança na realidade de cerca de 22 mil famílias tradicionais que não tinham acesso à energia elétrica. Com o novo formato do programa, a essas comunidades que vivem nas unidades de conservação sob gestão do ICMBio foi possível a instalação dos sistemas fotovoltaicos (incluindo as comunidades isoladas), bem como a instalação de 2.334 unidades consumidoras em residências, igrejas, escolas e centros comunitários (ICMBio, 2019).

Há também a utilização em programas habitacionais do Governo Federal, como o Minha Casa Minha Vida, com incentivos para o atendimento dos aspectos sociais e ambientais por meio de projetos que visem a diminuição de gastos de energia elétrica convencional e passem a utilizar fontes que aproveitem os potenciais solarimétri-

cos do país. A energia fotovoltaica tem sido uma alternativa para o aquecimento da água fria de uso doméstico, que apresenta gastos em torno de 24% da energia elétrica consumida no país e tem aumentado a demanda total energética do Sistema Interligado Nacional (SIN).

Essas políticas públicas são fundamentais para a melhoria na qualidade de vida das pessoas, já que a iluminação residencial é uma das aplicações mais disseminadas, além de possuir diversos usos, como refrigeração, iluminação pública, telefones de emergência, bombeamento de água, sistemas para aparelhos eletroeletrônicos e eletrodomésticos, cerca eletrificada, sinalização marítima, de torres e estradas, refrigeração móvel e ferrovias (DEMANBORO *et al.*, 2006).

Uma outra aplicação do sistema solar fotovoltaico para mitigar problemas sociais e econômicos é por meio de placas flutuantes em regiões que sofrem fortes secas, a exemplo do semiárido brasileiro. É comum serem criados corpos artificiais como açudes e represas em regiões semiáridas para abastecimento de água da população devido à irregularidade pluviométrica enfrentada anualmente. Esses corpos hídricos não estão isentos da evapotranspiração que ocorre devido aos fatores naturais (radiação solar incidente, velocidade do vento, temperatura, relevo das margens, umidade

relativa do ar, pressão atmosférica), o que favorece a redução de seus níveis de água. A instalação de placas solares flutuantes nesses reservatórios permite o resfriamento das placas, cuja eficiência é reduzida devido às altas temperaturas e à maior taxa de incidência solar, e contribui para redução da evapotranspiração, proporcionando economia de água. A economia gerada pelos sistemas flutuantes representa uma capacidade de abastecimento de água para a população suprir suas necessidades por quase um ano (LOPES, 2020).

EVOLUÇÃO DA TECNOLOGIA FOTOVOLTAICA E SUAS INOVAÇÕES

A EVOLUÇÃO DAS EFICIÊNCIAS DAS TECNOLOGIAS FOTOVOLTAICAS

Atualmente, existem três gerações de tecnologia ligadas aos sistemas fotovoltaicos. A primeira geração abrange células baseadas em pastilhas de silício cristalino e possui maior representatividade no mercado mundial (cerca de 84%), além de ser a que apresenta as maiores eficiências de conversão (BUHLER *et al.*, 2018).

A segunda geração corresponde a tecnologias de película fina, como telureto de cádmio (CdTe), di-seleneto de cobre índio gálio (CIGS), silí-

cio amorfo (a-Si) e células de junção única de arsenieto de gálio (GaAs). A eficiência de módulos comerciais de silício amorfo encontra-se na faixa de 5% a 8%, sendo o recorde mundial para uma célula de 10,2%. Uma vez que módulos de filmes finos empregam muito menos material na sua fabricação, essa tecnologia apresenta um alto potencial de redução de custos (GRESN *et al.*, 2017).

Embora ainda esteja em seus estágios iniciais de desenvolvimento, a terceira geração usa as tecnologias de células emergentes de materiais orgânicos. Além disso, abrange as células de multi-junção, que por absorverem uma faixa ampla do espectro solar correspondem às células com as maiores eficiências entre todos os dispositivos fotovoltaicos (BUHLER *et al.*, 2018). Essa geração possui como principal objetivo o aumento da eficiência de conversão, a redução no custo de fabricação e a adesão de características diferenciais nas células e módulos para usos específicos, como em *Building Integrated Photovoltaics*, conhecida pela sigla BIPV (GROSSIORD, 2012).

INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS E PATENTES

Em relação às inovações, podemos destacar um estudo feito por pesquisadores da Universidade de Michigan, com a criação de um tipo de cé-

lula transparente, desenvolvida com uma elevada capacidade de absorção dos raios do sol, tão eficiente quanto a versão mais comum dos painéis solares. Feita por moléculas orgânicas, absorve partículas invisíveis de luz solar, captando ondas no campo ultravioleta e infravermelho, e em seguida converte essas ondas em eletricidade, devido a pequenos filamentos de células fotovoltaicas presentes no seu interior. Aparece como uma tecnologia avançada, que proporciona um caminho promissor para o uso da energia solar barata e acessível (PORTAL SOLAR, 2017).

Outro tipo de inovação tecnológica, dessa vez no Brasil, é a telha solar fotovoltaica, que está sendo fabricada pela empresa Eternit e foi apresentada na Intersolar South America. A novidade brasileira obteve o certificado do Inmetro para a comercialização. Essa é a primeira telha de concreto capaz de gerar energia, sem a necessidade de painéis adicionais, produz 9,16 watts e tem dimensão de 36,5 por 47,5 mm. Dessa forma, ela garante uma capacidade de produção média mensal por volta de 1,15 kilowatts hora por mês (kwh/mês). Além de estar sendo testada na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), a telha já está sendo produzida para projetos-piloto na fábrica Tégula Solar, em Atibaia, interior de São Paulo (SOUSA, 2020).

Segundo Shubbak (2019), 95% dos pedidos

de patentes de energia solar fotovoltaica foram feitos por inventores de sete países. Esses países são Japão (49%), Coréia (17%), China (14%), EUA (6%), Alemanha e Taiwan (4% para cada) e França (1%), sendo que a maioria das empresas trabalha com células de filme fino de silício cristalino, bem como encapsulamento de painel e estruturas de suporte. Em 2006, houve um maior crescimento impulsionado conjuntamente pela China, Coréia e Japão, elevando os pedidos de patentes ao nível de 9.000 pedidos por ano em 2011. Nesse contexto, Japão, Coréia e Taiwan detêm as principais patentes de painéis fotovoltaicos *per capita* de 434, 305,7 e 167,8 respectivamente, seguidos pela Alemanha (56,3), Suíça, França e EUA (cerca de 25 cada). Por outro lado, a China vem em décimo lugar com 14,4 patentes de painéis fotovoltaicos *per capita*. Nos últimos anos, o caso da China parece ser proeminente, pois experimentou o maior crescimento (taxa média anual acima de 40% desde 1997). Embora a maior quantidade de pedidos de patentes depositados por países seja do Leste Asiático, o potencial de negócios internacionais de suas patentes ainda está muito aquém de suas contrapartes ocidentais.

Já os processos de patente estão relacionados à solução de problemas técnicos, aos processos de desenvolvimento e às descobertas das patentes. Foram originalmente criados como instrumento de

proteção legal que legitima direitos aos inventores por tempo de até 20 anos para produção, venda e comercialização das suas invenções, impedindo que sejam utilizadas sem permissão ou aprovação prévia dos detentores da patente.

Há ainda a definição de famílias de patentes e pedidos prioritários, conforme o manual de estatística de patentes da OCDE (Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico). Uma família de patentes é definida como um grupo de pedidos de patentes depositados em vários países (autoridades de patentes) para proteger a mesma invenção. Além disso, há a classificação em grupos, de acordo com a Classificação Internacional de Patentes-IPC, que é usada por mais de noventa países e está em vigor desde 1986, a qual estabelece a hierarquia e símbolos para a classificação, variando de acordo com as áreas de tecnologia que pertencem à inovação.

Um exemplo de patente na área de sistemas fotovoltaicos é um projeto de inovação tecnológica denominado Crab (caranguejo, em inglês), idealizado por pesquisadores do Instituto Federal do Rio Grande do Norte. Trata-se de um modelo de veículo adaptado para facilitar o acesso de cadeirantes à praia, cuja cobertura para evitar exposição do usuário ao sol é constituída de um painel solar (FEIRA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PFRH-IFRN, 2014).

CONCLUSÃO

Devido à grande capacidade de equilíbrio ambiental, a diversidade biológica é reconhecida como um dos elementos primordiais para o desenvolvimento e bem-estar da humanidade. Nesse contexto, a manutenção, a disponibilidade e o uso dos recursos no meio ambiente terão a premissa de possibilitar a exploração adequada atual, levando em consideração as gerações futuras.

A busca e a implementação de energias renováveis objetivam reduzir impactos ao meio ambiente, diversificando a matriz energética, diminuindo os impactos sociais e ambientais e beneficiando as comunidades. No Brasil, a energia solar fotovoltaica vem se desenvolvendo e atingindo 3.293 MW (1,8%) na matriz energética brasileira. Verifica-se um aumento de instalações, mesmo durante o período da pandemia, o que revela aspectos positivos tanto para a economia dos usuários que implementam o sistema, quanto para o meio ambiente, contribuindo para a preservação da biodiversidade. Apresentamos, ainda, os aspectos históricos, a evolução, as inovações e exemplos de vários projetos que utilizam a energia solar fotovoltaica e a busca por inovações tecnológicas que envolvam a energia solar fotovoltaica.

Diante do caráter pouco difundido que o tópico estudado possui, percebeu-se uma produção

de literatura científica ainda escassa. No entanto, a demanda por pesquisas nesse contexto continuará crescente, e serão necessários esforços multidisciplinares, com a interação entre as instituições de pesquisa, a fim de definir métodos e estratégias a serem aplicados no semiárido brasileiro e em outras regiões do país.

REFERÊNCIAS

ALBIERO, D. *et al.* Sistema Híbrido Renovável de Geração de Energia Elétrica para o Semiárido. **Conexões-Ciência e Tecnologia**, v. 11, n. 1, p. 43-48, 2017.

ALVARENGA, A. C.; FERREIRA, V. H.; FORTES, M. Z. Energia solar fotovoltaica: uma aplicação na irrigação da agricultura familiar. **Sinergia**, São Paulo, v. 15, n. 4, p. 311-318, out/dez. 2014.

Anais da 4ª Feira de Ciência e Tecnologia do PFRH-IFRN. **Feira de Ciência e Tecnologia do PFRH-IFRN**, 2015. ISBN 987-85-87637-03-1.

Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR). **Energia solar fotovoltaica no Brasil**. Infográfico ABSOLAR nº 25. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/wp-content/uploads/2021/02/2020.11.24%20Infogr%C3%A1fico%20ABSOLAR%20n%C2%BA%2025.pdf>. Acesso

em: 12 abr. 2021.

Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR). **Energia solar fotovoltaica no Brasil**. Infográfico ABSOLAR nº 35. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>. Acesso em 12 abr. 2021.

Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR). **Fonte solar fotovoltaica assume 7ª posição na matriz elétrica brasileira e ultrapassa nucleares**. 2019. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/noticia/fonte-solar-fotovoltaica-assume-7a-posicao-na-matriz-eletrica-brasileira-e-ultrapassa-nucleares/>. Acesso em: 13 fev. 2021.

BARBOSA, R. R. *et al.* Energia solar fotovoltaica no semiárido: potencial, cenário atual e perspectivas. **Anais II CONIDIS**. Campina Grande: Realize Editora, 2017. Disponível em: <<https://www.editorarealize.com.br/index.php/artigo/visualizar/33479>>. Acesso em: 04 abr. 2021.

BORGES, Z. **A matriz elétrica no Estado do Pará e seu posicionamento na promoção do desenvolvimento sustentável**. Planejamento e políticas públicas, v. 2, n. 35, 2011. Disponível em: <https://desafios2.ipea.gov.br/ppp/index.php/PPP/article/view/201>. Acesso em: 13 fev. 2021.

BOUHIND, Carlos. **Por que o meio ambiente é beneficiado quando você adota energia solar?**

Dusol Engenharia, 10 jun. 2019. Disponível em: <https://www.dusolengenharia.com.br/post/por-que-o-meio-ambiente-e-beneficiado-quando-voce-adota-energia-solar/>. Acesso em: 03 abr. 2021.

BUHLER, A. J., SANTOS, F. H. dos, GABE, I. J. Uma revisão sobre as tecnologias fotovoltaicas atuais. **VII Congresso Brasileiro de Energia Solar**, Gramado, 17 a 20 de abril de 2018.

CARVALHO, J. H C. N. **As inovações tecnológicas dos sistemas de geração fotovoltaica com a abordagem da análise sistemática**. Cacoal, RO, 2018. Disponível em: <http://ri.unir.br/jspui/handle/123456789/2364>. Acesso em: 22 mar. 2021.

CORAZZA, R. I. **Inovação tecnológica e demandas ambientais: notas sobre o caso da indústria brasileira de papel e celulose**. 1996. (Mestrado) DPCT, IG, Unicamp. Campinas, SP.

CRESTANI, M. S. (ed.) Covid-19: os impactos atuais e o futuro próximo do setor. **Fotovolt**, ano 5, nº 28, p. 42-47. São Paulo: Aranda Editora, maio 2020. Disponível em: https://www.arandanet.com.br/assets/pdfs/revistas/fotovolt/fotovolt_maio2020.pdf. Acesso em: 03 abr. 2021.

DA SILVA, A. *et al.* Energia fotovoltaica no brasil: uma revisão de literatura. **PI -Pesquisa e Inovação**, v. 1, n. 1, p. 100-115, jan./jun. 2019.

DA SILVA CARVALHO, Rodrigo; ROYER, Marcia Regina; ZANATTA, Shalimar Calegari. A produção da energia elétrica fotovoltaica: um possível caminho para a sustentabilidade. **Bio-grafia**, p. 1224-1234, 2019. Disponível em: <https://revistas.pedagogica.edu.co/index.php/bio-grafia/article/view/11070/7862>. Acesso em: 12 de fev. de 2021.

DE QUEIROZ CARVALHO, Marcia Marques. **Alternativas arquitetônicas para o aumento da eficiência no uso de energia elétrica por edifícios comerciais**. 2011. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro.

DEMANBORO, A. C. *et al.* A sustentabilidade através de empreendimentos energéticos descentralizados. Proceedings of the 6. **Encontro de Energia no Meio Rural**, 2006. Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP. Faculdade de Engenharia Civil Arq. Urb. – FEC/DRH – NIPE. Área de Recursos Hídricos, Energéticos e Ambientais. Grupo de Planejamento Energético e Sistemas Elétricos - GPES.

ENERGIA SOLAR SHOP. **Projeto leva energia solar a 34 famílias da aldeia Arapiranga na Resec, em**

Santarém-PA. [S.l.], [S.d.]. Disponível em: <https://www.energiasolarshop.com.br/post/projeto-leva-energia-solar-a-34-fam%C3%ADlias-da-aldeia-arapiranga-na-resex-em-santar%C3%A9m>. Acesso em: 14 abr. 2021.

FERRO, Ana Flávia Portilho; BONACELLI, Maria Beatriz Machado; ASSAD, Ana Lúcia Delgado. Oportunidades tecnológicas e estratégias concorrenciais de gestão ambiental: o uso sustentável da biodiversidade brasileira. **Gestão & Produção**, v. 13, p. 489-501, 2006. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-530X2006000300011>.

GREEN, M. A. *et al.* Solar cell efficiency tables (version 50). **Progress in photovoltaics: research and applications**, v. 25, n. 7, p. 668-676. DOI: <https://doi.org/10.1002/pip.2909>.

GOMES, L.P. Células Solares de Silício micro/nanocristalino. **Ciência e Tecnologia dos Materiais**, v. 21, n. 1-2, p. 27-33, 2009.

GROSSIORD, Nadia *et al.* Degradation mechanisms in organic photovoltaic devices. **Organic Electronics**, v. 13, n. 3, p. 432-456, 2012.

ICMBio EM FOCO. **Uso Sustentável e Conservação da Biodiversidade**. Brasília: Icmbio, v. 1, 7 maio 2019. Mensal. Disponível em: <https://www.>

icmbio.gov.br/portal/images/stories/comunicacao/downloads/icmbioemfoco especialusosustentavel.pdf. Acesso em: 16 fev. 2021.

JÚNIOR, J. M. da S. *et al.* Considerações sobre as tendências climáticas na produção de energia fotovoltaica em regiões semiáridas. **Anais CONADIS**. Campina Grande: Realize Editora, 2018. Disponível em: <<https://editorarealize.com.br/artigo/visualizar/50606>>. Acesso em: 25 fev. 2021.

LACERDA, R. T. de O.; ENSSLIN, L.; ENSSLIN, S. R. Uma análise bibliométrica da literatura sobre estratégia e avaliação de desempenho. **Revista Gestão e Produção**, São Carlos, v. 19, 2012.

LOPES, M. P. C. **Usinas fotovoltaicas flutuantes como alternativa para a geração de energia e redução da evaporação em açudes do semiárido brasileiro**. Rio de Janeiro, RJ, mar. 2020.

MACHADO, C.T.; MIRANDA, F. S. **Energia Solar Fotovoltaica: Uma breve revisão**. **Revista Virtual de Química**, v. 7, n. 1, p. 126-143, 2015.

MEYER, Rodolfo; SAUAIA, Rodrigo; KOLOSZUK, Ronaldo. **A força da energia solar em tempos de pandemia**. Absolar, São Paulo, 10 ago. 2020. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/artigos/a-forca-da-energia-solar-em-tempos-de-pande>

mia/. Acesso em: 03 abr. 2021.

PAIS, P. S. M. **Demanda de Energia Elétrica no Brasil no Período Pós Racionamento**. Dissertação de Mestrado em Economia Aplicada – Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2012.

PEREIRA, E. B. *et al.* **Atlas brasileiro de energia solar**. 2.ed. São José dos Campos: INPE, 2017. 80p. DOI: <http://doi.org/10.34024/978851700089>.

PEREIRA, L.; MESQUITA, O. dos S.; IANO, Y. Energia solar fotovoltaica visando sustentabilidade. *In: 2017 BRAZILIAN TECHNOLOGY SYMPOSIUM*, v. 1, Campinas. Disponível em: <https://www.lcv.fee.unicamp.br/images/BTSym-17/Papers/73846.pdf>. Acesso em: 12 fev. 2021.

PEREIRA, N. L. **Energia solar: uma perspectiva de sustentabilidade e viabilidade econômica**. TCC (Graduação) – Curso de Tecnologia em Gestão Ambiental, IFMG, Cuiabá/MG, 2016. Disponível em: http://tga.blv.ifmt.edu.br/media/filer_public/d8/35/d835273a-2326-4e0c-8f73-a7bb5cb3b72b/nilson_leite_pereira__energia_solar_uma_pespectiva_de_sustentabilidade_e_viabilidade_economica.pdf. Acesso em: 13 fev. 2021.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro, v.

1, p. 47-499, 2014.

PORTAL SOLAR. **História e origem da energia solar**. 03 nov. 2016. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/energia-solar/historia-origem-da-energia-solar.html>. Acesso em: 12 fev. 2021.

PORTAL SOLAR. **Energia Solar Fotovoltaica: a revolução energética já começou no Brasil**. 10 nov. 2016. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/energia-solar/energia-solar-fotovoltaica-a-revolucao-energetica-ja-comecou-no-brasil.html>. Acesso em: 26 jun. 2021.

PORTAL SOLAR. **Célula fotovoltaica transparente pode transformar janela em painel solar**. 2017. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/energia-solar/celula-fotovoltaica-transparente-pode-transformar-janela-em-painel-solar.html>. Acesso em: 18 fev. 2021.

PORTAL SOLAR. **Em 2021, uma nova capacidade solar fotovoltaica de até 209GW poderá ser instalada no mundo**. 02 mar. 2021. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/energia-solar/em-2021-uma-nova-capacidade-solar-fotovoltaica-de-ate-209-gw-podera-ser-instalada-no-mundo.html>. Acesso em: 03 abr. 2021.

PORTER, M. E.; VAN DER LINDE, C. Verde e Competitivo: Acabando com o Impasse. *In*: PORTER, M. E. **Competição**: estratégias competitivas essenciais. 3 ed. Rio de Janeiro: Editora Campus, 1995. p. 371-397.

POPOVICI, C. G. *et al.* Efficiency improvement of photovoltaic panels by using air cooled heat sinks. **Energy Procedia**, v. 85, p. 425-432, 2015.

REIS, PEDRO. **Os 20 maiores parques solares fotovoltaicos do mundo**. Portal Energia, 12 abr. 2020. Disponível em: <https://www.portal-energia.com/maiores-parques-solares-fotovoltaicos-mundo-147890/>. Acesso em: 03 abr. 2021.

SANTOS, Sérgio dos *et al.* **Expansão da energia solar fotovoltaica no Brasil: impactos ambientais e políticas públicas**. O setor elétrico, jun. 2016. Disponível em: <https://www.asetoreletrico.com.br/expansao-da-energia-solar-fotovoltaica-no-brasil-impactos-ambientais-e-politicas-publicas/>. Acesso em: 03 abr. 2021.

SANTTO, R. S. **Segurança e Confiabilidade em sistemas fotovoltaicos**. O setor elétrico, 2011. Disponível em: <https://www.asetoreletrico.com.br/seguranca-e-confiabilidade-em-sistemas-fotovoltaicos/>. Acesso em: 24 mar. 2021.

SCARABELOT, L. T.; RANPINELLI, G. A.; RAMBO, C. R. Avaliação do sistema de compensação de geração distribuída com sistemas fotovoltaicos em unidades prosumidores residenciais. **Brazilian Journal of Business**, v. 1, n. 3, p. 1252 -1268, jul./set. 2019.

SHUBBAK, M. H., 2019. Advances in solar photovoltaics: Technology review and patent trends. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 115, 2019.

SKOPLAKI, E.; PALYVOS, J. A. On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations. **Solar energy**, v. 83, n. 5, p. 614-624, 2009.

SOUSA, M. **1ª telha solar do Brasil começa a ser produzida**. 2020. Disponível em: <https://ciclovivo.com.br/inovacao/tecnologia/1a-telha-solar-do-brasil-comeca-a-ser-produzida/>. Acesso em: 24 mar. 2021.

OECD. Statistics report: Monthly OECD Electricity Statistic. 2020. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/de75ce40-0bb2-420e-86ed-63535bb05eec/mes.pdf>. Acesso em: 24 mar. 2021.

TAPAJÓS DE FATO. **Comunidades da Flona Tapajós são contempladas com energia solar**. 27

nov. 2020. Disponível em: <https://www.tapajosdefato.com.br/noticia/160/comunidades-da-flona-do-tapajos-sao-contempladas-com-energia-solar>. Acesso em: 14 abr. 2021.

Geração de Energia Solar no Brasil pode quadruplicar até 2029. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/energia-solar/energia-solar-deve-quadruplicar-no-brasil-ate-2029.html#:~:text=As%20estimativas%20constam%20do%20Plano,crescimento%20da%20demanda%20no%20pa%C3%ADs>. Acesso em 22 nov. 2021.

CAPÍTULO X



ENERGIA EÓLICA: APLICAÇÕES, IMPACTOS E PERSPECTIVAS

LUÍZA ARNAUD LOPES NUNES

VICTOR MATHEUS DE MORAIS MENDES

SYLVIA KALINE DO VALE XAVIER

MANOEL DE OLIVEIRA FREITAS JUNIOR

JOÃO TEIXEIRA DE CARVALHO NETO

RÔMULO MAGNO OLIVEIRA FREITAS

INTRODUÇÃO

O conceito de desenvolvimento sustentável surgiu na Assembleia Geral da ONU de 1983, em relatório intitulado “Nosso Futuro Comum”, que define o desenvolvimento sustentável como aquele capaz de suprir as necessidades da geração atual sem comprometer as necessidades das gerações futuras (SIMAS e PACCA, 2013). Logo, observa-se uma preocupação cada vez maior da população em relação ao desenvolvimento sustentável, às mudanças climáticas e aos esforços para a

redução de gases de efeito estufa (GEE).

Uma das problemáticas abordadas no cunho da sustentabilidade foi a demanda excessiva pela geração de energia. Ao passo que se verifica uma tendência de crescimento e melhoria na qualidade de vida dos países emergentes, cresce também a preocupação com os aspectos do planejamento de políticas voltadas para a produção de energia elétrica (NASCIMENTO, MENDONÇA e CUNHA, 2012).

O elevado crescimento da demanda energética em todo o mundo, devido aos altos padrões de consumo social, tem levantado algumas preocupações quanto ao suprimento de energia necessário para o desenvolvimento econômico, social e do ponto de vista ambiental, o que está relacionado aos custos para atender esse aumento no consumo de energia (MARTINS, GUARNIERI e PEREIRA, 2008). Assim, os países têm procurado alternativas de geração de energia elétrica, através de fontes renováveis de energia.

Embora sejam responsáveis por uma proporção relativamente pequena do consumo global, fontes de energia renovável têm o potencial de atender a todas as necessidades humanas em relação à geração de energia (EDENHOFER *et al.*, 2011). Além disso, as energias renováveis, como um todo, podem ser produzidas por diferentes

fontes e geram menos impacto ambiental, além de não emitirem gases de efeito estufa (GEE). Dentre as inúmeras possibilidades de energias renováveis, as fontes eólicas vêm se destacando como uma das mais interessantes, tanto em termos de produção, quanto em níveis de segurança de fornecimento elétrico e sustentabilidade ambiental (GWEC, 2008; EWEA, 2010).

O Brasil é um país privilegiado no aspecto energético, pois possui diversas condições naturais que permitem uma geração e aproveitamento das mais variadas fontes renováveis de energia, como a hidráulica, a eólica, a solar e a biomassa (PINTO, MARTINS e PEREIRA, 2017). A energia elétrica gerada no Brasil é produzida no âmbito do Sistema Interligado Nacional (SIN), que de maneira geral é um sistema de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica de todo o território brasileiro, interligando todas as regiões (TRALDI, 2018). A matriz elétrica do Brasil tem como base o uso de energias renováveis, com maior fonte de geração através das hidrelétricas, devido às características naturais do seu relevo, da hidrografia e do clima, além de possuir abundantes reservas de recursos hídricos.

No Brasil, a capacidade de energia eólica instalada ainda é pequena quando comparada a de países que lideram o *ranking* desse tipo de ge-

ração de energia. Porém, cada vez mais as políticas de incentivo estão produzindo resultados e gerando um crescimento nessa produção (MARTINS *et al.*, 2008). O Plano Decenal Brasileiro de Expansão de Energia prevê uma capacidade eólica instalada no país de 22,4 GW até 2023. Além disso, espera-se uma redução nas emissões de dióxido de carbono de aproximadamente 5,8% até o ano de 2030 (BONDARIK, PILATTI e HORST, 2018).

No que diz respeito ao potencial eólico brasileiro, pode-se considerar que o país é favorecido na sua geografia em relação à corrente dos ventos, pois apresenta uma presença de ventos duas vezes maior que a média mundial, principalmente na região Nordeste. De acordo com dados do Atlas do Potencial Eólico Brasileiro (2008), desenvolvido pela Agência Nacional de Energia Elétrica, tanto na região litorânea, quanto no Seridó Ocidental nordestino, a velocidade média dos ventos apresenta uma variação entre 7,0 e 11,0 m/s a uma altura de 120 metros, condição favorável ao desenvolvimento da energia eólica (BARBOSA e CÂNDIDO, 2018). Dessa forma, os estados nordestinos lideram o *ranking* em quantidade de parques eólicos instalados no Brasil (SILVA e ABREU-HARBICH, 2017).

Levando em consideração a relevância que esse tema apresenta para a sociedade, devido à crescente necessidade pela renovação das fontes

de energia, a criação de políticas que incentivam a produção e geração de energia através de fontes renováveis e a busca pela sustentabilidade como um todo, este trabalho teve como principal objetivo a produção de uma revisão bibliográfica voltada para a produção de energia eólica no Brasil, analisando dados históricos, desafios e benefícios, bem como impactos ambientais e socioeconômicos. Para tal, foram considerados trabalhos pertinentes ao tema, com dados relevantes a serem considerados.

APLICAÇÕES, IMPACTOS E PERSPECTIVAS DA ENERGIA EÓLICA

ENERGIA EÓLICA: DEFINIÇÕES E APLICAÇÕES

O princípio da utilização humana da energia eólica foi apresentado por Tong (2010) em sua obra, provendo como exemplos as navegações em veleiros, moinhos, pipas, e até mesmo no derretimento de metais através de pistões movidos pelo vento.

A tecnologia de produção de energia eólica que conhecemos atualmente começou a ser desenvolvida após a Segunda Guerra Mundial. O dinamarquês Johannes Juul desenvolveu uma turbina que gerou, entre 1956 e 1967, 2,2 mi-

Ihões de kWh (JACKSON e OLIVER, 1996). Concomitantemente, o alemão Hütter desenvolveu uma nova abordagem, conhecida como turbina de Hütter, notória por sua alta eficiência (ACKERMAN e SÖDER, 2000). Apesar disso, foi somente após a crise do petróleo de 1973 que as fontes de energia renovável começaram a ser utilizadas, o que gerou um significativo interesse em relação à energia eólica, que passou a competir com outros recursos energéticos (ŞAHIN, 2004).

Atualmente, a energia eólica define-se como aquela gerada através de turbinas movidas por grandes lâminas rotativas e se encontra no grupo de fontes de energia renováveis (GASPARATOS *et al.*, 2017). O seu funcionamento parte do princípio da conversão da energia cinética de translação em energia cinética de rotação, usando a força aerodinâmica das pás do rotor e transformando-a em eletricidade (RIBEIRO, 2020). Para produzir a energia elétrica, são utilizadas turbinas eólicas (aerogeradores), compostas basicamente por uma torre, um conjunto de pás acoplado a um rotor e uma nacelle que abriga diversos equipamentos, como gerador elétrico, multiplicador (quando aplicável), dispositivos de medição da velocidade e direção dos ventos, componentes responsáveis pela rotação da nacelle para melhor aproveitamento do vento para a realização de trabalhos mecânicos (ALVES, 2006; LAGE e PROCESSI, 2013).

ENERGIA EÓLICA NO BRASIL

O potencial energético de um país depende, dentre outras coisas, da existência e do conhecimento relacionado aos seus recursos naturais e suas respectivas formas de aproveitamento e condições de recuperação (BERMANN, 2001).

Alves (2010) aponta para o fato de que fontes renováveis constituem uma porção significativa da energia consumida no Brasil, o que torna o país detentor de uma das matrizes energéticas mais limpas do mundo. Além disso, o interesse de profissionais e entidades brasileiras pela energia eólica foi demonstrado através da criação da Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEE) (ALVES, 2010).

No Brasil, a movimentação do mercado de energia elétrica através da geração eólica se iniciou em 2002, quando, no âmbito do Ministério de Minas e Energia (MME), fundou-se o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA). Entretanto, de acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), um processo mais acelerado de expansão da fonte eólica na matriz elétrica brasileira foi iniciado somente em 2014, com incremento anual acima de 1 GWM. A partir disso, incrementos anuais acima desse patamar estão sendo realizados no país, alcançando uma capacidade superior a 14.000 MW, distribuí-

dos entre cerca de 600 usinas eólicas operantes.

Atualmente, de acordo com estimativas da ABEEólica (2020), o potencial *onshore* brasileiro gira em torno de 500GW. Fatores como a variação da velocidade, a rugosidade, a altura e a presença de obstáculos no terreno brasileiro contribuem para a movimentação das massas de ar (CRESESB, 2008). Isso resulta, de acordo com a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE, 2020), em uma presença duas vezes superior à média mundial, bem como uma volatilidade de apenas 5%, o que favorece o Brasil em relação à previsibilidade do volume da produção. Em março de 2021, o país superou os 10% da potência instalada e fiscalizada, totalizando 17.525 MW em 699 unidades geradoras verificadas pela ANEEL. A fonte eólica representou 87% da potência acrescida (593,61 MW) no primeiro trimestre de 2021, resultando em um valor cinco vezes maior do que o alcançado no mesmo período em 2020, que foi de 117,18 MW (ANEEL, 2021).

ENERGIA EÓLICA NO NORDESTE

No território brasileiro, duas regiões se destacam como grandes potenciais de produção de energia: Norte e Nordeste – com destaque para sua costa litorânea –, as quais apresentam vanta-

gens importantes para serem grandes opções de investimento na geração de energia (ALVES, 2006).

Há uma perspectiva do incremento paulatino da geração de energia eólica no Nordeste. Como apontam Bezerra e Santos (2017), ao contrário do que ocorre na região Norte, o potencial hidrelétrico economicamente viável no Nordeste encontra-se próximo do seu esgotamento, comprometendo a expansão dessa fonte de geração elétrica na região. O Plano Decenal de Expansão de Energia 2024, elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2015), contribui para essa narrativa, visto que o estudo não apresenta nenhuma previsão de projeto de hidrelétrica para o Nordeste até o ano de 2024. Em contrapartida, a região apresenta um enorme potencial eólico. Pereira (2016) aponta para um potencial de 309 GW na produção *onshore* nordestina. O Operador Nacional de Sistema Elétrico (2021) apontou recordes batidos no primeiro trimestre de 2021 na região, quando sua geração média bateu a marca de 9.257 MW médios, ou seja, o equivalente a 80,9% do consumo elétrico do Nordeste, enquanto a geração instantânea marcou um pico de 10.565 MW.

Atualmente, a energia eólica produzida no Nordeste corresponde a cerca de 86% da produção eólica total do país. Oito dos nove estados des-

sa região possuem projetos eólicos, com destaque para o Rio Grande do Norte (4.020 MW) e para a Bahia (3.770 MW), que lideram o *ranking* em quantidade de parques eólicos instalados no Brasil, seguidos do Ceará e do Rio Grande do Sul (dos líderes do *ranking*, é o único que não pertence à região Nordeste, mas já ultrapassa 14 GW de capacidade instalada total, sendo pouco mais de 12,4 GW interligados ao SIN, segundo dados de agosto de 2018) (BEZERRA, 2019; OLIVEIRA, 2019).

OS IMPACTOS DA ENERGIA EÓLICA

IMPACTOS AMBIENTAIS

De forma geral, a produção de energia eólica passa pela operacionalização de projetos elaborados para as regiões nas quais serão implantados, com equidade e em todas as dimensões sustentáveis: social, cultural, ecológica, ambiental, territorial, econômica, e em relação a políticas nacional e internacional (SACHS, 2008).

Dentre as inúmeras vantagens que acompanham o uso da energia eólica, a conservação natural certamente pode ser mencionada como uma delas (KENNEDY, 2005; WANG, LU e QIAO, 2012; XUE *et al.*, 2015; MILLSTEIN *et al.*, 2017). Ainda assim, embora a energia eólica seja reconheci-

damente uma fonte limpa e renovável de energia, há também um lado negativo a ser considerado, que causa impactos ambientais não desprezíveis, como morte de animais e destruição de parte da vegetação nativa. Observa-se, por exemplo, que durante a fase de implantação dos parques eólicos são gerados impactos ambientais decorrentes da atividade de construção civil, que são incorporados pelo ambiente (DE OLIVEIRA e MACIEL, 2018).

Outro aspecto abordado por Pinto *et al.* (2017) se refere ao argumento de que os aerogeradores podem causar o aumento da mortalidade de aves, contudo, a ocorrência disso diz respeito principalmente aos primeiros empreendimentos de instalação de parques eólicos, para os quais não ocorriam estudos prévios relativos às rotas de migração dos pássaros. Alguns estudos realizados nesses locais apontam que a taxa geral de mortalidade possui uma relação diretamente proporcional ao volume de migração local, e que fatores mais específicos, como sazonalidade e condições climáticas, podem influenciar nessa mortandade, principalmente em áreas que são usadas como rotas migratórias (FALAVIGNA, 2019).

Castro (2009) aponta também para a problemática do ruído produzido pelas turbinas. Segundo o autor, há dois tipos de ruído atrelados à estrutura das turbinas: mecânico, ligado à caixa de velocidade

des e ao gerador e motores auxiliares; e aerodinâmico, causado pelo movimento das pás no ar. Mesmo com a existência de turbinas de baixo ruído no mercado, a existência do zumbido é praticamente inevitável, especialmente em baixas velocidades do vento, visto que em altas velocidades o som do vento se sobrepõe ao das turbinas (CASTRO, 2009).

Ademais, no Brasil, questionamentos quanto ao impacto visual vêm sendo levantados por ambientalistas e pesquisadores, em razão do número significativo de empreendimentos instalados ou em instalação em dunas de areias e outros pontos de grande interesse turístico (PINTO *et al.*, 2017).

No cenário da região Nordeste do Brasil, onde parte dos parques eólicos estão localizados em dunas, os impactos ambientais também são considerados. Dunas possuem características dinâmicas que produzem movimentação ao longo dos dias, meses e anos. Com a implantação de parques eólicos, essa migração natural pode ser alterada ou, na pior condição, parar de acontecer, ocasionando diversos problemas ambientais (MEIRELES, 2011).

IMPACTOS SOCIOECONÔMICOS

No âmbito socioeconômico, a existência de parques eólicos também apresenta impactos positivos e negativos. De forma favorável, Hille,

Althammer e Diederich (2020) indicam um forte crescimento da capacidade produtiva, acompanhado por uma redução significativa nos custos de produção de eletricidade a partir de tecnologias dessa energia renovável. Por exemplo, instalações de energia solar e eólica *onshore* em localizações privilegiadas nivelaram os custos de eletricidade, o que lhes permitiu competir com energia proveniente de combustíveis fósseis (DIEDERICH, 2016).

Incentivos governamentais certamente possuem um papel relevante nesse avanço, através da adoção de uma regulamentação mais rigorosa de tecnologias baseadas em carbono, por exemplo, na forma de impostos ou sistemas de licenças de emissão negociáveis e subsídios maciços para o desenvolvimento e difusão de tecnologias alternativas de geração de energia (RENNINGS, 2000; JAFFE, NEWELL e STAVINS, 2005).

Por outro lado, parques eólicos podem causar uma desvalorização monetária da região, atingindo a economia local com a redução do valor dos imóveis e redução da atividade turística (PINTO *et al.*, 2017), em função da poluição sonora e visual. Em função desses impactos, um dos desafios pontuados por Aitken (2010) em relação à implantação de parques eólicos diz respeito à dificuldade que mesmo os desenvolvedores mais bem-intencionados podem encontrar para ganhar a confiança das

comunidades locais. Segundo o autor, decisões importantes a serem debatidas com comunidades situadas nas proximidades das áreas de instalação de usinas podem gerar conflitos de interesse.

Tomando como base os pontos mencionados, percebe-se parte do que consiste em um desafio para o setor. Ainda assim, vale ressaltar que os impactos negativos apresentados durante as instalações e o funcionamento de parques eólicos são mínimos, se comparados àqueles trazidos por fontes não-renováveis de energia (MOHSIN *et al.*, 2021).

INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS NA PRODUÇÃO DE ENERGIA EÓLICA

Nwankwo, Ukhurebor e Aigbe (2020) apresentam a inovação tecnológica como uma resposta importante para uma adaptação operacional e realista para a mitigação dos impactos apresentados pela atividade humana. Os autores pontuam que aspectos como menor impacto ambiental, eficiência energética, redução de custos e aumento da demanda energética são importantes para motivar a pesquisa e o desenvolvimento das inovações tecnológicas do setor energético.

Além disso, o processo de inovação conduz o desenvolvimento econômico no mundo atual, onde as novas tecnologias substituem as antigas,

introduzindo novos produtos, novos métodos de produção e geração, ou seja, o desenvolvimento ocorre por meio da inovação tecnológica (BOFF e BOFF, 2017). Ressalta-se, também, que alcançar a competitividade econômica é um requisito obrigatório para que uma tecnologia alcance a implantação e a comercialização estável (JAMASB e POLLIT, 2015; HU, SKEA e HANNON, 2018).

Sendo assim, as inovações acabam se tornando imprescindíveis para o desenvolvimento do setor eólico, principalmente para o Brasil, pois contribuem para reduzir os custos com os equipamentos e instalações, assim como diminuir a dependência tecnológica do país em relação aos países desenvolvidos (DEUS e ISSBERNER, 2014).

A energia eólica vem se destacando como uma fonte promissora de energia, e a necessidade de encontrar opções tecnológicas tem direcionado as empresas para o desenvolvimento dessas inovações, o que envolve uma infinidade de iniciativas que podem e devem coexistir. Essas iniciativas compreendem políticas de investimento público, com a transferência de recursos e também de encargos públicos para o setor privado (BOFF e BOFF, 2017).

Levando em consideração a eficiência das fontes de energia renováveis eólica e solar, que dependem da natureza e não são constantes durante

todo o dia, surgiu a ideia de fazer uma combinação de duas ou mais fontes de energia renovável associadas à rede de distribuição ou em sistemas isolados (*off-grid*). Conhecidos como sistemas híbridos de energias renováveis (HRES), são sistemas mais confiáveis, com menor risco de interrupção na geração, e normalmente apresentam equipamentos como aerogeradores, turbinas hidráulicas, módulos fotovoltaicos, banco de baterias, controladores de carga, inversores de tensão e retificadores (MENDONÇA e BORNIA, 2019).

Um exemplo da importância na inovação em energia eólica para o Brasil se relaciona às turbinas dos aerogeradores, pois se tratava de uma tecnologia importada e que era inapropriada para a captação dos ventos no país. De acordo com o Atlas da Energia Elétrica do Brasil (ANEEL, 2008), a incidência dos ventos no território nacional é duas vezes maior e mais forte do que a média mundial, o que sustenta a importância do desenvolvimento da indústria eólica no Brasil e conseqüentemente estimula as inovações de acordo com as condições ambientais do país (DEUS e ISSBERNER, 2014).

De acordo com dados da Associação Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI), no ano de 2017 o Brasil possuía 6 montadoras de aerogeradores, e a única montadora de origem brasileira

na situação era a WEG. A empresa produz dois modelos de aerogeradores, AGW 110 / 2.1 e AGW 110 / 2.2, com diâmetro do rotor de 110 m, altura do cubo variando de 80 m, 95 m ou 120 m e potência média entre 2100 kW e 2200 kW (RIBEIRO, 2020).

A empresa Vestas, sediada em Itaitinga-CE, produziu um novo aerogerador, o V150-4.2, pensado para as condições específicas de vento local, com 150 m de diâmetro do rotor e altura do cubo de 120 m (RIBEIRO, 2020). Esse moderno aerogerador foi instalado em 2020 no complexo Eólico Echo 3, no estado do Rio Grande do Norte, sendo o primeiro a utilizar essa tecnologia (ECHOENERGIA, 2020). Com o avanço da tecnologia, a produção das instalações, dos equipamentos no Brasil e o aumento no tamanho das turbinas, os custos da geração de energia se reduzem (RIBEIRO, 2020).

Para se instalar uma turbina eólica, é necessário fazer estudos das condições e da frequência do vento no local. Para isso, são utilizadas torres anemométricas, por um determinado período, para medição dos ventos. Porém, para instalação de turbinas eólicas em alto mar, essa forma de medição não é a mais recomendada, por isso tem-se desenvolvido novas formas de medição dos ventos, como a tecnologia LIDAR (Light Detection and Ranging), que realiza uma medição remota dos ventos através de *lasers* de banda do infravermel-

lho. Esses equipamentos permitem uma medição com precisão da velocidade e direção dos ventos na altura das turbinas eólicas (NASSIF, 2017).

ENERGIA EÓLICA OFFSHORE

Com o crescimento da população e a expansão urbana para áreas litorâneas, o espaço vem se tornando cada vez mais escasso. Como a instalação de turbinas eólicas e conseqüentemente de parques eólicos requer grandes áreas, a energia eólica *offshore* vem se tornando uma alternativa cada vez mais atrativa e com um grande potencial energético. A energia eólica *offshore* é o uso de turbinas eólicas instaladas em corpos hídricos (lagos, baías, mares, reservatórios) para geração de eletricidade (NASSIF, 2017).

Um dos pontos mais favoráveis à eólica *offshore* (em alto mar) são os ventos mais intensos presentes nesses ambientes, que geram uma maior produtividade de energia, sobrepondo-se aos custos de instalação e operação. Há também o fato de poderem ser instaladas próximas das áreas de costa, reduzindo os custos com a transmissão (NASSIF, 2017). Além disso, o aproveitamento *offshore* permite o uso de turbinas de maior porte, e o maior FC das turbinas gera uma maior produtividade (CASTRO *et al.*, 2018).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho apresentou uma revisão bibliográfica voltada para os atuais impactos e perspectivas encontrados durante a produção de energia eólica. De forma geral, pode-se perceber um aumento significativo da contribuição eólica para a matriz energética brasileira, com destaque para a região Nordeste. Em função da sua disposição geográfica, essa região apresenta condições extremamente propícias para o desenvolvimento de parques eólicos.

Ainda assim, os impactos causados por esses parques devem ser considerados. Ainda que impactos positivos também possam ser observados, fica evidente, na visão de diversos autores, a necessidade de entender e mitigar a degradação ambiental e socioeconômica, a partir de esforços conjuntos.

Certamente, a partir da inovação tecnológica, o desenvolvimento do processo de geração de energia eólica trará benefícios gerais para o país, através de incentivos público-privados em P&D, que impulsionam novos empregos e uma redução no custo de instalação e manutenção dos parques eólicos, produzindo mais energia limpa.

REFERÊNCIAS

BDI. Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial. **Atualização do Mapeamento da Cadeia Produtiva da Indústria Eólica no Brasil**. 2018 Disponível em: http://inteligencia.abdi.com.br/wp-content/uploads/2017/08/2018-08-07_ABDI_relatorio_6-1_atualizacao-do-mapeamento-da-cadeia-produtiva-da-industria-eolica-no-brasil-WEB.pdf. Acesso em: 05 mar. 2021.

ABEEólica. Associação brasileira de energia eólica. **Eólica: energia para um futuro inovador**. São Paulo, 2020. Disponível em: <Http://abeeolica.org.br/energia-eolica-o-setor/>. Acesso em: 05 mar. 2021.

ACKERMANN, Thomas; SÖDER, Lennart. Wind energy technology and current status: a review. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 4, n. 4, 2000. p. 315-374.

AITKEN, Mhairi. Wind power and community benefits: Challenges and opportunities. **Energy policy**, v. 38, n. 10, 2010. p. 6066-6075.

ALBRECHT, Rogéria Fernandes; OHIRA, Maria Lourdes Blatt. Bases de dados: metodologia para seleção e coleta de documentos. **Revista ACB**, v. 5, n. 5, 2000. p. 131-144.

ALBUQUERQUE, Cristhian Carla Bueno de et al. Panorama da energia eólica sob a perspectiva dos impactos ambientais no Brasil. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 6, n. 14, p. 697-712, 2019.

ALVES, Jose Jakson Amancio. Análise regional da energia eólica no Brasil. **Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional**, v. 6, n. 1, 2010.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. 3. ed. Brasília: Aneel, 2008.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Banco de informações de geração**. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/> Acesso em: 15 mar 2021.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Matriz energética cresce 383,66 MW em março e 682,61 MW no primeiro trimestre de 2021**. 2021. Disponível em: <https://abre.ai/aneelprimeirotrimestrede202>. Acesso em: 05 mar. 2021.

BARBOSA, Amanda de Paula Aguiar; CÂNDIDO, Gesinaldo Ataíde Cândido. Sustentabilidade municipal e empreendimentos eólicos: uma análise comparativa de municípios com investimentos na geração de energia eólica no estado da Paraíba. **Sociedade & Natureza**, v. 30, n. 2, 2018. p. 68-95.

BERMANN, Célio. **Energia no Brasil: para quê? Para quem?: crise e alternativa para um país sustentável.** Editora Livraria da Física, 2002.

BEZERRA, Francisco Diniz. Energia eólica no Nordeste. **Caderno Setorial ETENE**, ano 4, n. 66, 2019. Disponível em: https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/379/3/2019_CDS_66.pdf. Acesso em: 20 nov. 2021.

BEZERRA, Francisco Diniz; SANTOS, Lucas Sousa dos. Potencialidades de energia eólica no Nordeste. **Caderno Setorial ETENE**, ano 2, n. 5, 2017. Disponível em: https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/347/3/2017_CDS_05.pdf. Acesso em: 20 nov. 2021.

BOFF, Salete Oro; BOFF, Vilmar Antonio. Inovação tecnológica em energias renováveis no Brasil como imperativo da solidariedade intergeracional. **Revista de Direito Econômico e Socioambiental**, v. 8, n. 2, 2017. p. 282-302.

BONDARIK, Roberto; PILATTI, Luiz Alberto; HORST, Diogo José. Uma visão geral sobre o potencial de geração de energias renováveis no Brasil. **Inter-ciência**, v. 43, n. 10, p. 680-688, 2018.

CASTRO, Nivalde de; LIMA, Antônio; HIDD, Gabriel; VARDIERO, Pedro. **Perspectivas da Energia Eóli-**

ca offshore. Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: http://www.gesel.ie.ufrj.br/app/webroot/files/publications/19_castro184.pdf. Acesso em: 20 nov. 2021.

CASTRO, Rui M. G. **Introdução à energia eólica.** Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, 2009.

CCEE. Câmara de comercialização de energia elétrica. **Informações sobre o mercado brasileiro de comercialização de energia elétrica.** São Paulo, 2020. Disponível em: https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/onde-atuamos/fontes?_adf.ctrl-state=12r2i7qq1q_51&_afloop=215109884766028#!. Acesso em: 05 mar. 2021.

CRESESB. Centro de referências para energias solar e eólica Sergio de S. Brito. **Tutorial de energia eólica.** Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: www.cresesb.cepel.br/index.php?Section=com_content&lang=pt&catid=3. Acesso em: 06 mar 2021.

DE OLIVEIRA, Vinicius Meressiev Melo; MACIEL, Ana Beatriz Câmara; REIS, Leci Martins Menezes. Poluição sonora: um estudo de caso do Parque Eólico Asa Branca II, localizado no Município de Parazinho-RN. **Boletim de Geografia**, v. 36, n. 1, p. 112-130, 2018.

DEUS, Cássia Costa Rocha Daniel de; ISSBERNER, Liz-Rejane. Mapeamento das tendências de pesquisa no setor eólico brasileiro. *In: Encontro Nacional de Pesquisa em Ciência da Informação*, UFMG, 2014.

DIEDERICH, Henning. **Environmental Policy and Renewable Energy Equipment Exports**. Heidelberg: Springer, 2016.

ECHOENERGIA. **Complexo Eólico Echo 3**: Rio Grande do Norte. São Paulo, 2020. Disponível em: <https://www.echoenergia.com.br/nossos-ativos/complexo-eolico-echo-3/>. Acesso em: 05 abr. 2021.

EDENHOFER, Ottmar *et al.* IPCC special report on renewable energy sources and climate change mitigation. **Prepared By Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change**, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2011.

EPE. Empresa de pesquisa energética. **Plano decenal de expansão de energia 2024**. Brasília: MME/EPE, 2015. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt>. Acesso em: 07 mar 2021.

EWEA. **Powering Europe**: wind energy and the electricity grid. Brussels: EWEA, 2010.

FALAVIGNA, Tamara Justo. **Avifauna nos parques**

eólicos do extremo sul do Brasil. Tese (Doutorado em Biologia) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos. 2019. Disponível em: <http://www.repositorio.jesuita.org.br/handle/UNISINOS/9133>. Acesso em: 15 mar. 2021.

GASPARATOS, Alexandros *et al.* Renewable energy and biodiversity: Implications for transitioning to a Green Economy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 70, p. 161-184, 2017.

Global Wind Atlas. **Wind speed at 100m - Brazil.** 2021. Disponível em: <https://globalwindatlas.info/>. Acesso em: 28 jun. 2021.

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL – GWEC. **Global wind energy outlook 2008.** Brussels: GWEC, 2008.

HILLE, Erik, ALTHAMMER, Wilhelm, & DIEDERICH, Henning. Environmental regulation and innovation in renewable energy technologies: Does the policy instrument matter?. **Technological Forecasting and Social Change**, V.153, e.119921, 2020. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.119921>

HU, Rui; SKEA, Jim; HANNON, Matthew J. Measuring the energy innovation process: An indicator framework and a case study of wind energy in China. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 127, p. 227-244, 2018.

JACKSON, Thomas; OLIVER, M. Wind energy comes of age: Paul Gipe John Wiley, New York, 1995. **Energy Policy**, v. 24, n. 5, p. 491-492, 1996.

JAFFE, Adam B.; NEWELL, Richard G.; STAVINS, Robert N. A tale of two market failures: Technology and environmental policy. **Ecological economics**, v. 54, n. 2-3, p. 164-174, 2005.

JAMASB, Tooraj; POLLITT, Michael G. Why and how to subsidise energy R+ D: Lessons from the collapse and recovery of electricity innovation in the UK. **Energy Policy**, v. 83, p. 197-205, 2015.

KENNEDY, Scott. Wind power planning: assessing long-term costs and benefits. **Energy Policy**, v. 33, n. 13, p. 1661-1675, 2005.

LAGE, Elisa Salmão; PROCESSI, Lucas Duarte. **Panorama do setor de energia eólica**. Banco Nacional de Desenvolvimento Social. 2013. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/2926/1/RB%2039%20Panorama%20do%20setor%20de%20energia%20e-%c3%b3lica_P.pdf. Acesso em: 28 jun. 2021

MARTINS, Fernando Ramos; GUARNIERI, Ricardo André; PEREIRA, Enio Bueno. O aproveitamento da energia eólica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 30, n. 1, p. 1304.1-1304.13, 2008.

MENDONÇA, Anny Key de Souza; BORNIA, Antonio Cezar. Oportunidades para a difusão da energia eólica e solar em sistemas isolados no Brasil: barreiras e facilidades evidenciados na literatura. **Mix Sustentável**, v. 5, n. 3, p. 81-92, 2019.

MILLSTEIN, Dev et al. The climate and air-quality benefits of wind and solar power in the United States. **Nature Energy**, v. 2, n. 9, p. 1-10, 2017.

MOHSIN, Muhammad *et al.* Assessing the impact of transition from nonrenewable to renewable energy consumption on economic growth-environmental nexus from developing Asian economies. **Journal of environmental management**, v. 284, 2021.

NASCIMENTO, Thiago Cavalcante; MENDONÇA, Andréa Torres Barros Batinga; CUNHA, Sieglinde Kindl. Inovação e sustentabilidade na produção de energia: o caso do sistema setorial de energia eólica no Brasil. **Cadernos EBAPE.BR**, v. 10, n. 3, pp. 630-651, 2012. Doi: <https://doi.org/10.1590/S1679-39512012000300010>

NASSIF, Felipe de Barros. **A tecnologia LIDAR aplicada a medições eólicas sobre corpos hídricos e oceano**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

NWANKWO, Wilson; UKHUREBOR, Kingsley E.; AIGBE, Uyiosa Osagie. Climate change and innovation technology: a review. **Renewable energy**, v. 20, p. 23, 2020.

OLIVEIRA, Claudeirton de Carvalho. **Análise do potencial eólico na região nordeste do Brasil e sua evolução na participação da matriz elétrica nacional**. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Bacharelado em Ciência e Tecnologia) – Universidade Federal do Semiárido, 2019.

ONS. Operador Nacional do Sistema Elétrico **Semana de recordes de geração solar e eólica no nordeste**. 2021. Disponível em: <http://www.ons.org.br/Paginas/Noticias/20210904-semana-de-recordes-solar-eolica-no-nordeste.aspx>. Acesso em: 05 mar. 2021.

PEREIRA, E. B. Segurança Energética: perspectivas no enfrentamento às mudanças climáticas globais. Conferência Internacional do INCT para Mudanças Climáticas. 2016.

PINTO, Lucía Iracema Chipponelli; MARTINS, Fernando Ramos; PEREIRA, Enio Bueno. O mercado brasileiro da energia eólica, impactos sociais e ambientais. **Revista Ambiente & Água**, v. 12, n. 6, p. 1082-1100, 2017.

RENNINGS, Klaus. Redefining innovation—eco-innovation research and the contribution from ecological economics. **Ecological economics**, v. 32, n. 2, p. 319-332, 2000.

RIBEIRO, Paula Faria. **Desenvolvimento da indústria eólica no Brasil nos últimos 20 anos**. Monografia (Graduação em Engenharia de Produção) –Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto 2020.

SACHS, Ignacy. **Desenvolvimento: includente, sustentável, sustentado**. Rio de Janeiro: Garamond, 2008, 151 p.

ŞAHİN, Ahmet Duran. Progress and recent trends in wind energy. **Progress in energy and combustion science**, v. 30, n. 5, p. 501-543, 2004.

SIMAS, Moana; PACCA, Sergio. Energia eólica, geração de empregos e desenvolvimento sustentável. **Estudos avançados**, v. 27, n. 77, p. 99-116, 2013.

TONG, Wei. **Wind power generation and wind turbine design**. WIT press, 2010.

WANG, Caixia; LU, Zongxiang; QIAO, Ying. A consideration of the wind power benefits in day-

ahead scheduling of wind-coal intensive power systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 28, n. 1, p. 236-245, 2012.

XUE, Bing *et al.* A life cycle co-benefits assessment of wind power in China. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 41, p. 338-346, 2015.





Tipografias utilizadas:
Open Sans

Todos os direitos são reservados à Editora IFRN, não podendo ser comercializado em período de contrato de cessão de direitos autorais.

A Editora do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN) já publicou livros em todas as áreas do conhecimento, ultrapassando a marca de 150 títulos. Atualmente, a edição de suas obras está direcionada a cinco linhas editoriais, quais sejam: acadêmica, técnico-científica, de apoio didático-pedagógico, artístico-literária ou cultural potiguar.

Ao articular-se à função social do IFRN, a Editora destaca seu compromisso com a formação humana integral, o exercício da cidadania, a produção e a socialização do conhecimento.

Nesse sentido, a EDITORA IFRN visa promover a publicação da produção de servidores e estudantes deste Instituto, bem como da comunidade externa, nas várias áreas do saber, abrangendo edição, difusão e distribuição dos seus produtos editoriais, buscando, sempre, consolidar a sua política editorial, que prioriza a qualidade.



CIÊNCIA APLICADA PARA USO SUSTENTÁVEL DOS RECURSOS NATURAIS

Os capítulos 1 e 2 analisam os fatores ambientais associados à presença de elementos radioativos nas areias do rio Potengi, no trecho correspondente ao município de São Gonçalo do Amarante-RN. Os Capítulos 3 e 4 abordam a questão da gestão dos resíduos sólidos com foco na construção civil da região metropolitana do Natal e nos impactos dos resíduos sólidos marinhos na costa leste do Estado. Os Capítulos 5, 6 e 7 focam na gestão integrada dos recursos hídricos na região metropolitana do Natal com análises sobre o estado atual de eutrofização do estuário do rio Potengi, a possibilidade do reúso de efluentes para a recarga do aquífero na região metropolitana do Natal e nos riscos à saúde humana associados à presença de trihalometanos na água tratada consumida pela população na região metropolitana do Natal. Os capítulos 8, 9 e 10 abordam as novas formas de produção de energia com foco na geração de energia por biomassa, energia solar e eólica, importantes elementos para o desenvolvimento sustentável do Rio Grande do Norte.



ISBN: 978-65-86293-91-3



9 786586 293913