Editorial

Prof. Ms. Ragnar Orlando Hammarstrom [1]

[1] Diretor do Instituto Federal de São Paulo, Itapetininga, ragnarorlando@gmail.com

Itapetininga 30/04/2015

Com cinco anos de atividades, o Campus Itapetininga do IFSP se orgulha imensamente de apresentar ao universo acadêmico a Revista Hipótese, cujos primeiros números estão voltados especificamente ao Meio Ambiente, tema que atualmente ocupa o centro das atenções em todo o planeta. Concebida por diversos servidores capacitados do IFSP, a revista Hipótese se destina a todos, nas diferentes áreas que, com certeza se interessam ou se interessarão por esse empolgante e relevante tema da atualidade. Desejando, portanto, a todos uma excelente leitura e proveitosos estudos.

No primeiro **dossiê temático** da Revista Hipótese, com foco na **Pesquisa Ambiental: olhares multidisciplinares**, apresentamos sete artigos, assinados por pesquisadores do IFSP Itapetininga e São Roque, da ESALQ/USP de Piracicaba, do Instituto de Geografia e Ordenamento do Território da Universidade de Lisboa, Instituto Politécnico de Tomar, Portugal, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Universidade Federal de São Carlos e, da Universidade Estadual Paulista. Essa diversidade geográfica demonstra vocação da nossa Revista para a troca de conhecimentos em nível internacional.

No primeiro artigo, o Prof. Dr. Ivan Fortunato apresenta uma reflexão sobre a transcrição de sua palestra de abertura proferida por conta do I Congresso de Pesquisas Ambientais, o CPeA, organizado pelo Núcleo de

Estudos Transdisciplinares em Ensino, Ciência, Cultura e Ambiente, o NuTECCA, em parceria com a Coordenação de Pesquisa & Inovação do Instituto Ferderal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, campus Itapetininga, ocorrido nos dias 22 e 23 de abril de 2015. O propósito de sua argumentação foi o de ressaltar, a necessidade e a importância de Pesquisas Ambientais, coletivamente.

No segundo artigo, o Prof. Dr. Fernando Santiago dos Santos apresenta as ações realizadas pelo herbário IFSR, localizado nas dependências do laboratório de botânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, campus São Roque, demonstrando que o herbário IFSR e coleções complementares, além do Laboratório de Ensino de Botânica (associado ao herbário) tem cumprido, dentro de suas limitações de espaço e de volume, as demandas de investigação científica e educacional, sendo que a ampliação do espaço e das atividades contribuiria para um melhor aproveitamento de suas funções.

No terceiro artigo, Flávio Henrique Mendes e colaboradores buscaram correlacionar a verticalização e a estreiteza das ruas de Lisboa/Portugal com a presença de sombras de elevados edifícios, por meio da classificação supervisionada de imagem de satélite de alta resolução (pancromática de 0,5 m e multiespectral de 2 m). Os resultados obtidos comprovaram esse efeito, mostrando o chamado "efeito chapéu", com muitos edifícios altos na parte central e, à medida que se aproxima da periferia, as alturas tendem a diminuir. O valor encontrado para Lisboa, em imagem de 29 de junho de 2010 (verão no hemisfério norte), às 11h46, indicou 1,3% de sombra no perímetro urbano, sendo que a freguesia da Misericórdia teve mais sombras projetadas de edifícios (7,8%), enquanto Belém, pelo contrário, teve menos áreas sombreadas (0,5%). Assim, pode-se considerar a sombra como forte indicativo de verticalização, sendo de extrema importância para o planejamento urbano, que deve garantir acesso ao sol, ventilação e conforto a todos os habitantes.

No quarto artigo, o Prof. Dr. Jorge Mascarenhas e colaboradores apresentam a caraterização do edificado Bairro do Alto da Cova da Moura (zona Metropolitana de Lisboa), com características singulares, habitualmente identificado como um local socialmente problemático e de grande anarquia construtiva, resultante de auto construção, mas que encerra um grande potencial em termos culturais e dinâmica social. Apesar da descaraterização construtiva, e da vulnerabilidade do edificado, sobretudo à ação dos sismos, é inegável que este bairro pode constituir um bom contributo para o entendimento da sustentabilidade à escala europeia, sendo um importante património a preservar.

No quinto artigo, o Prof. Dr. Ricardo Costanzi e colaboradores abordam o tratamento de efluentes industriais, apresentando o desenvolvimento de um sistema alagado construído (SAC) híbrido em escala de bancada para tratamento do efluente de uma indústria de laticínios localizada em Londrina, PR. O sistema foi operado durante 90 dias com foco na avaliação da eficiência de remoção de nutrientes e matéria orgânica. O sistema trabalhou com ciclos de 24 horas com uma carga de aplicação de DQO de 3,0 Kg.d-1. A eficiência de remoção para a DQO variou de 79 até 97 %, para o NTK variou de 81 a 100% e para P-total variou de 73% a 100%. A análise estatística indicou que o SAC de fluxo vertical tem pouca eficiência de remoção, porém diminui a variabilidade e aumenta a confiabilidade do sistema.

No sexto artigo, Thales Augusto de Miranda Medeiros e colaboradores tiveram como objetivo avaliar as respostas indicadoras de distúrbios de Brachiaria brizantha (A. Rich.) Stapf, Impatiens walleriana Hook. f. e Pteris vittata L. quando expostas ao benzeno. Para avaliar os distúrbios foram efetuados ensaios de injeção direta e nebulização de benzeno sobre as espécies. Brachiaria brizantha e P. vittata apresentaram intenso acúmulo do peróxido de hidrogênio e morte celular nas folhas, já I. walleriana foi a espécie que comportou-se de maneira oposta, possivelmente, por apresentar um eficiente sistema antioxidante. As três espécies apresentaram efeitos fitotóxicos, como alteração na densidade estomática e no

tamanho dos estômatos. As características micromorfológicas interferem na sensibilidade e resistência do vegetal, sendo que I. walleriana mostrou-se sensível a nebulização de benzeno e B. brizantha e P. vittata foram mais resistentes, pois evitaram a absorção do benzeno na atmosfera.

No último artigo do dossiê, Fernando Henrique Machado visou fazer uma análise dos pontos positivos e negativos do uso de sistemas de captação de água de chuva. A metodologia utilizada consistiu na revisão bibliográfica acerca do tema em periódicos científicos e em empresas fabricantes de componentes para captação de água de chuva. Ao final do estudo, conclui-se que o sistema de captação de água de chuva é uma técnica que deve ser encorajada, porém existem problemas quanto à qualidade da água armazenada, principalmente problemas com contaminação de origem biológica.

Na seção **Palavra Aberta e Inspirações**, um espaço da Revista Hipótese destinado a entrevistas, resenhas, textos de opinião etc., o estudante Luis Felipe Massarico Cardoso apresenta versão em português da peça Copenhagem, a partir da obra de Michael Frayn que circulou de maneira informal como um acompanhamento para a representação da obra no Teatro General San Martín na cidade de Buenos Ayres no ano de 2002. A tradução desta peça foi pensada e realizada com o intuito da disseminação da ciência através da cultura para o povo de língua portuguesa, visto que muitos alunos relatam durante as aulas e conversas informais, a dificuldade de se entender o conteúdo da física com palavras rebuscadas e com a formalidade mostrada em livros.

A revista Hipótese nasce, neste momento, com o mesmo e grandioso desafio que nosso campus teve a cinco anos atrás: levar o desenvolvimento acadêmico e consequentemente social de toda sua região com várias atividades entre as principais; cursos técnicos, Licenciaturas, pós-graduação Lato senso palestras, workshops, congressos de iniciação Científica, Parque do Conhecimento, Café Filosófico, Mostra de trabalhos de TCCs, vários cursos de extensão, várias

linhas de pesquisas de professores mestres e doutores e um novo curso stricto senso em Tecnologia e Meio Ambiente.

Porque precisamos de Pesquisas Ambientais

Why we need environmental research

Prof. Dr. Ivan Fortunato[1]

[1] Núcleo de Estudos Transdisciplinares em Ensino, Ciência, Cultura e Ambiente (NuTECCA), Instituto Federal de São Paulo, Itapetininga, ivanfrt@yahoo.com.br.

Submetido em 23/04/2015
Revisado em 30/04/2015
Aprovado em 01/05/2015

Resumo: Este texto foi originado a partir de reflexão sobre a transcrição da palestra de abertura do I Congresso de Pesquisas Ambientais, o CPeA, organizado pelo Núcleo de Estudos Transdisciplinares em Ensino, Ciência, Cultura e Ambiente, o NuTECCA, em parceria com a Coordenação de Pesquisa & Inovação do Instituto Ferderal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, campus Itapetininga, ocorrido nos dias 22 e 23 de abril de 2015. O propósito desta fala foi o de ressaltar, a necessidade e a importância de Pesquisas Ambientais, coletivamente.
Palavras chave: Meio-ambiente. Pesquisas. Ciência. Desenvolvimento.

Abstract: This text originated from reflection on the transcription of the opening lecture of the I Congress of Environmental Research, the CPeA (in Portuguese), organized by the Transdisciplinary Research Group on Education, Science, Culture and Environment, the NuTECCA (in Portuguese), together with the Coordination for Research & Innovation of the Federal Institute of Education, Science and Technology of São Paulo, campus Itapetininga, held on 22 and 23 April 2015. The purpose of this speech was to explain the need and the importance of Environmental Research, collectively.
Keywords: Environment. Research. Science. Development.

Porque precisamos de Pesquisas Ambientais

> We now see, far more than Marsh ever did, how malign, even catastrophic, our environmental impingement can be. Shrinking in revulsion from horrific scenarios, many idealize nature devoid of human impress, yearn for a world unimpacted by our species. It is an idle dream. Aspects of our impact may be altered or moderated, but impact we are bound to have, its effects ever more extensive […] Yet even the best intentions do not ensure good environmental management[1] (Lowenthal, 2000, p. 16).

Estamos inaugurando um Congresso. Pretensiosamente, o primeiro de muitos, imaginando que, em uma década, quando estivermos celebrando o 10º aniversário deste Evento, a próxima geração de pesquisadores irá revisar os trabalhos aqui apresentados como fonte de informação. Deseja-se, ainda, que estejam rindo de nossas conclusões, demonstrando o quão arcaico éramos... Ilusão, claro. Provável e paradoxalmente, em dez anos, teremos avançado muito em termos de tecnologia e ciência, porém pouco contribuindo para a redução de impactos ambientais negativos. Esse prognóstico tem fundamento histórico, delatado pelo geógrafo David Lowenthal e aqui transcrito na epígrafe: foi necessário algo em torno de um século e meio para que a sociedade conseguisse compreender o pensamento sobre o Homem e a Natureza de George Perkins Marsh, publicado na década de 1864.

Neste momento, e mesmo em um congresso cheio de pesquisadores interessados em meio-ambiente, acredito que este nome tenha soado como uma novidade para alguns; ou mesmo muitos. Para testar tal hipótese, pergunto: quem foi George P. Marsh, e por que devemos fazer como Lowenthal e relembrá-lo durante um congresso de ambientalistas? E aguardo alguma tentativa de resposta da audiência, procurando comprovar empiricamente tal hipótese...

[1] Tradução livre: Vemos agora, muito mais do que Marsh, como maligno e catastrófico nosso impacto ambiental pode ser. Encolhendo em repulsa a partir de cenários horríveis, muitos idealizam a natureza desprovida de impressões humanas, ou seja, anseiam por um mundo não-imapctado por nossa espécie. É um sonho tolo. Aspectos do nosso impacto podem ser alterados ou moderados, mas algum impacto somos obrigados a ter, com efeitos cada vez mais intensos [...] No entanto, mesmo as melhores intenções não garantem uma boa gestão ambiental

Eis o que posso comentar sobre Marsh, a partir de sua bibliografia contada por Davis (1906) e da menção ao seu nome em vários verbetes publicados em duas enciclopédias de geografia humana (Kitchin & Thrift, 2009; Warf, 2009): George Perkins Marsh foi um intelectual norte-americano que viveu no século XIX, entre os anos de 1801 e 1882, graduado em direito e professor de história e filosofia, que foi eleito ao congresso, tendo discursado várias vezes, por exemplo, contra a escravidão e a guerra civil. Marsh também foi embaixador em países como Turquia, Grécia e Itália, lugares onde pode observar os impactos destrutivos do desflorestamento e demais danos antrópicos causados à natureza, especialmente em nome do progresso e do bem-estar.

Diante o observado, tornou-se manifestante pioneiro sobre a salvaguarda da natureza, deixando como legado a obra escrita no começo dos anos 1860 sob o nome "O Homem e a Natureza", com subtítulo bastante provocativo "ou como a geografia física é modificada pela ação humana", sendo este revisado na edição da década de 1870, então reescrito como "a Terra modificada pela ação humana". Nesse livro, Marsh buscava alertar a sociedade, por meio de estudos científicos, a respeito da fragilidade da natureza diante das seculares intervenções ambientais realizadas pelo ser humano. Aparentemente, intelectuais e líderes da época foram influenciados por suas palavras, que serviram de lastro para criação de notórios parques de preservação ambiental nos Estados Unidos da América, tais como o Yosemite, em 1890, e o Yellowstone, em 1872 (este, possivelmente reconhecido pelo público geral como o lar dos saudosos Zé Colmeia e Catatau ou, talvez, por abrigar inúmeros gêiseres). Ações concretas escassas e possivelmente tomadas por impulso.

Mesmo que se possa olhar para trás e considerar o trabalho de Marsh como uma espécie de primeira manifestação de um ambientalista, denunciando o que hoje todos sabemos sobre o esgotamento dos recursos naturais, foram necessários, apesar dos Parques, 100 anos de "negligência humana" para que suas ideias de preservação e conservação da natureza finalmente se tornassem parte da agenda

social, e outros 50 para que as preocupações com aquecimento global, secas, enchentes, geração de energia, poluição atmosférica etc. se tornassem reais e urgentes. Os trabalhos deste nosso primeiro – e ainda incipiente – Congresso ratificam esses dois predicados que qualificam a situação ambiental contemporânea, pois termos como "crise", "contaminação" e "conscientização" ainda vigoram dentre as principais palavras chaves das pesquisas apresentadas.

Assim, revisitamos, *en passant*, as ideias de Marsh – tão antigas e ao mesmo tempo tão contemporâneas – para esclarecer a razão do título desta fala ser uma afirmação e não uma interrogação. Isso porque o ambiente é uma das variáveis que sempre esteve presente na existência da humanidade, sendo uma das únicas que perpassa e ultrapassa a vida em si. No entanto, foi somente no último quartil do século passado que este se tornou evidentemente relevante – para a pesquisa, inclusive. Com isso, pretende-se afirmar que a necessidade de pesquisas ambientais é intrinsecamente inesgotável, mesmo que aquilo que hoje tendemos a nomear de "recursos naturais" o sejam, porque enquanto o ser humano habitar este planeta, existirá alguma forma de habitat a qual denominaremos meio-ambiente. Afirmação óbvia e enfadonha. Concordo. Provavelmente tão ululante quanto às premonições de Marsh...

Cabe, cá e já, reapresentar uma tipologia que, embora não seja inédita, é recente, atual e pretensiosamente perene para este conceito que une a todos os pesquisadores participantes (sejam estes presentes ou remotos) deste primeiro Congresso de Pesquisas Ambientais, o CPeA, que é o meio-ambiente. Tal definição não foi repentinamente cunhada, mas lentamente talhada ao longo de cinco anos submerso em pesquisas e projetos, inicialmente em educação ambiental, mas posteriormente cosidas junto com a sociologia, a ciência política, a comunicação midiática, a geografia... Um dia, os trabalhos de Humberto Maturana (2002; 2001) foram lidos. Este autor explica que a neutralidade do mundo – nomeada como objetividade – existe apenas para alimentar a vaidade da ciência, devendo esta neutralidade ser colocada entre parênteses, pois toda objetividade somente existe a

partir de uma subjetividade. Essa tese ajudou a esclarecer que o meio-ambiente também deveria ser colocado entre parênteses, sendo que, retomando o que escrevi há pouco tempo, "colocar o meio-ambiente entre parênteses é expressar a inter-relação entre os atributos naturais e construídos, incluindo o próprio ser humano" (Fortunato, 2014, p. 388).

Tomando essas ideias como pressuposto, portanto, afirma-se que o ambiente pode e deve ser sempre relativizado. Isso é axiomático, pois, dada sua complexidade, nunca (?) podemos ou poderemos compreender **O** ambiente, mas somente **UM** ambiente, a partir de um olhar de pesquisador que isola determinada quantidade de categorias para análise, possui um arcabouço teórico e faz uso de metodologias preferidas, mas não absolutas. Com isso, faz-se necessário pluralizar a definição de (meio-ambiente), qualificando como (meio-ambientes) e não mais permitindo compreensões reducionistas que equivalem às pesquisas ambientais somente a estudos de preservação e conservação da fauna, da flora, dos sistemas ecológicos e da água, desconsiderando, muitas vezes, fatores essenciais e fundamentais à vida humana, tais como geração de renda e empregos, produção de roupas e alimentos, saneamento e higiene e assim por diante.

Os pesquisadores e suas pesquisas reunidas pelo CPeA validam essa possibilidade de (meio-ambientes). Isso se evidencia pelos diferentes programas de pós-graduação que submeteram suas pesquisas ambientais, oriundos de São Paulo Capital e interior, do Paraná, de Roraima, do Rio Grande do Sul, e até mesmo de Portugal, das Ciências Humanas, Naturais e Exatas, abordando diversos objetos ambientais, tais como a verticalização edilícia, conflitos em unidades de conservação, herbário, saneamento e saúde, captação de água de chuva, inseticida biológico, estiagem, tratamento de efluentes, contaminação da água e do solo, modelos de produção industrial, umidade do ar, sustentabilidade, dentre outros. Trabalhos de revisão de literatura, de amostragem, de análises químicas, de grupos de controle, de aplicação de questionários, estudos de casos, enfim métodos quantitativos e qualitativos dos mais variados.

Constata-se, portanto, que toda essa diversidade – objetos, objetivos, metodologias, referenciais, área de formação e de pós-graduação, locação etc. – complexifica ainda mais o que se entende por "Pesquisas Ambientais". Não obstante, quanto maior o desafio e quanto mais obstáculos se apresentam, maior qualificação se requer de nossas pesquisas, tornando-se necessário o aprofundamento crítico, metodológico e interdisciplinar. Ou seja, realizar nossas pesquisas com toda seriedade inerente ao método científico e ao mesmo tempo cientes de que estamos sempre – SEMPRE – realizando recortes por meio de metodologias validadas pela comunidade acadêmica, mas que nossos recortes JAMAIS são absolutos e, de alguma forma, interagem e interferem com o ambiente. Talvez, aí sim, em dez anos teremos avançado bastante em termos do que é banalizado sobre meio-ambiente, não permitindo mais constatações ingênuas relacionando as pesquisas ambientais somente ao que é natural, à conservação ecológica ou, o que ainda é muito comum, a questões de "conscientização" sobre o uso parcimonioso de água tratada e de energia elétrica na casa-escola-trabalho, das espécies em extinção, da reciclagem ou da Floresta Amazônica como "pulmão do mundo".

Não obstante, nada disso é inédito. Há muito tempo, diversos trabalhos acadêmicos tem criticado esta redução pueril – romântica, até – das questões relacionadas ao meio-ambiente. Vimos, por exemplo, Cechin e Veiga (2010) mencionando um "otimismo ingênuo", que credita todas as esperanças de um ambiente efetivamente equilibrado e saudável aos avanços da ciência e da tecnologia, sendo estas capazes de mitigar todos os efeitos negativos já causados ao meio-ambiente.

Otimismo este que é míope, não enxergando os limites da ciência e da tecnologia, e ingênuo, pois fica no faz-de-conta que problemas como água potável, geração de energia, produção de alimentos, tratamento de resíduos, lixo, renda, emprego, habitação, segurança etc. são fenômenos absolutos que não estão conectados por meio de uma complexa rede envolvendo os atributos biofísico-

químicos, os de informação e os de capital. Apenas como amostra de um olhar mais complexo, podemos citar Cechin e Veiga (2010, p. 41) e o seu eloquente alerta sobre um refrão muito importante e retumbante das causas ambientais contemporâneas, que é o esgotamento dos recursos naturais: "os resíduos do processo econômico estão se revelando um problema anterior à escassez de recursos devido a seu acúmulo e visibilidade na superfície". Ou seja, parece que o acúmulo e os efeitos negativos de lixo são mais preocupantes que o fim do petróleo, por exemplo. Mas pouco se aborda sobre o lixo, exceto em campanhas de reciclagem...

Com isso, parece que precisamos de algo parecido com um "realismo analítico", observando, anotando e refletindo sobre toda essa complexidade que encadeia a vida. Essa ideia de um "realismo analítico" ratifica e apenas adjetiva as oposições recentemente apresentadas por Rodrigo Nunes (2015) a respeito do ambientalismo romântico – este, que apenas critica, fora de contexto, os efeitos mais perversos do progresso humano. Para este autor:

> Primeiro, o sentimentalismo e a falta de visão de conjunto: os apelos emotivos em que supostas catástrofes são apresentadas fora do contexto dos empregos que geram, dos investimentos que atraem, de seu peso na balança comercial. Segundo, o utopismo ingênuo, que age como se realmente pudéssemos dar-nos ao luxo de frear a economia por causa de uma tribo distante, uma espécie rara ou uma bela paisagem. De bom coração, mas incapaz de apreender a complexidade do mundo, o irrealismo ambientalista seria o exato contrário da realista "ciência" econômica: enquanto esta nos ensina que não há almoço grátis, aquele parece acreditar que energia e dinheiro podem vir do nada, e sonha com um mundo onde os omeletes se façam sem quebrar os ovos (Nunes, 2015, p. 3).

Todo esse sentimentalismo, de alguma forma, me remeteu aos prognósticos de Dr. Seuss (1971) imortalizados na fábula "The Lorax". Trata-se de um conto infantil, denunciando ingenuamente o progresso que destrói a natureza. Quem protagoniza a história é um rapaz cujo nome é algo do tipo "Era uma vez" (Once-ler), que sai de casa em busca de um sonho: tornar-se rico. Ao se deparar com uma bela floresta de *Trúfulas*, o empreendedor logo descobre matéria-prima ótima para

um produto, caricaturado na história, como "algo que todo mundo precisa e quer comprar". Em resumo, Once-ler acaba com a floresta porque é ambicioso e todo mundo compra seu produto porque todo mundo compra. Ao final, não há mais floresta. Até que algum tempo mais tarde, um garoto – possivelmente representando aqueles que irão "salvar o mundo", ou seja, "as gerações futuras" – ouve atentamente à história de vida de Once-ler, recebe a última semente de *Trúfula* que sobrou em todo o mundo, e é instruído a não repetir seus erros que levaram ao fim da natureza. O garoto é "aquele que se importa", planta e rega a sementinha esperando por uma nova oportunidade de viver em harmonia com as plantas, com os animais, com o rio, o arco-íris e os pôneis.

Esse é o final feliz da história, pois a floresta só tinha acabado porque o ser humano é ganancioso.

Este conto foi publicado há quase meio século, mas suas ideias ainda teimam em rondar a agenda social, como vimos no artigo de Nunes (2015) publicado no primeiro quartil deste ano. Pesquisadores do meio-ambiente, muitas vezes, ainda são vistos, dentro da própria área inclusive, como o "garotinho que se importa", denunciando desastres ecológicos fora de contexto. Daí, nos restam dois contundentes desafios. O primeiro, é lembrar que não há, mesmo, "almoço grátis" e que há sempre perdas e ganhos ambientais para alimentar a população, pois precisamos gerar empregos, produzir alimentos e água potável, roupas, moradia, saneamento, escolas, hospitais, entretenimento etc. para manutenção do que chamamos de qualidade de vida. O segundo, é compreender que a moral dessa história do Dr. Seuss (e tantas outras por aí[2]) é enganosa: ela termina no final feliz sem explicar como as gerações-futuras-que-se-importam farão para manter-se sem, evidentemente, colocar a nova e linda floresta em risco de se transformar em pasto para gado, armários, uma represa, ou mesma convertida em produtos que "todo mundo precisa e quer comprar".

[2] Outra obra bonitinha foi analisada no artigo "o desafio da educação frente ao paradoxo ambiental" (Fortunato, 2014).

Com isso, queremos ressaltar que vivemos, constantemente, este paradoxo ambiental. E quanto mais as coisas se aceleram, se amplificam e se complexificam, mais e mais se evidenciam as necessidades de Pesquisas Ambientais promovidas por "pessoas que se importam" de todas as áreas do conhecimento, investigando as mais diversas nuances possíveis. Eis, portanto, Porque Precisamos de Pesquisas Ambientais.

Referências

CECHIN, A.; VEIGA, J. E. da. O fundamento central da economia ecológica. in: MAY, Peter H. (org) **Economia do meio ambiente**: teoria e prática. 2a. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010, p. 33-48.

DAVIS, W. M. **Biographical memoir of George Perkins Marsh, 1801- 1882**. Read before the National Academy of Sciences in April 18, 1906.

FORTUNATO, I. Meio-ambiente ou (meio-ambiente): o desafio da educação frente ao paradoxo ambiental. **ETD** - Educação Temática Digital, Campinas, SP, v. 16, n. 3, p. 386-394, set./dez. 2014.

KITCHIN, R.; THRIFT, N. (ed.) **International Encyclopedia of Human Geography**. Oxford: Elsevier, 2009.

LOWENTHAL, D. Nature and morality from George Perkins Marsh to the millennium. **Journal of Historical Geography**, United Kingdom, v. 26, n. 1, p. 3-27, 2000.

MATURANA, H. **Emoções e linguagem na educação e na política**. Tradução de José Fernando Campos Forte. Belo Horizonte: Ed. UFMG, 2002.

MATURANA, H. **Cognição, ciência e vida cotidiana**. Tradução Cristina Magro e Victor Paredes. Belo Horizonte: Ed. UFMG, 2001.

NUNES, R. O realismo talvez não seja o que você imagina: a natureza também não dá almoço grátis. **Folha de São Paulo**, Caderno Ilustríssima, p. 3, 10 de março de 2015.

SEUSS, T. **The Lorax.** New York: Random House, 1971.

WARF, B. (ed.) **Encyclopedia of Human Geography**. Thousands Oaks, California: SAGE Publications, Inc., 2006.

O herbário IFSR e sua importância científica e educacional

The IFSR herbarium and its scientific and educational significance

Prof. Dr. Fernando Santiago dos Santos[1]

[1] Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Roque, fernandosrq@gmail.com

Submetido em 28/03/2015
Revisado em 10/04/2015
Aprovado em 12/04/2015

Resumo: Herbários são coleções botânicas com diversas funções, entre as quais a científica e a didática. Os materiais biológicos desidratados (exsicatas) e aqueles conservados em outros meios constituem testemunho da flora dos locais investigados. O trabalho apresenta as ações realizadas pelo herbário IFSR, localizado nas dependências do laboratório de botânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, *campus* São Roque. As exsicatas depositadas no herbário foram levantadas quanto à sua classificação em grupos (cinco), famílias botânicas (71), gêneros (153) e espécies (178). Trabalhos de pesquisa e de aplicação didática/educacional foram comentados. O herbário IFSR e coleções complementares (micoteca e carpoteca), além do Laboratório de Ensino de Botânica (associado ao herbário) tem cumprido, dentro de suas limitações de espaço e de volume, as demandas de investigação científica e educacional. A ampliação do espaço e das atividades contribuiria para um melhor aproveitamento de suas funções.
Palavras-chave: Herbário. IFSP campus São Roque. Pesquisa. Educação.

Abstract: Herbaria are botanical collections that serve various functions, namely scientific and didactic. Dehydrated biological materials (exsiccates), and those conserved with other media, are testimony of the investigated areas flora. The present paper presents activities carried out at the Herbarium IFSR, located within the botany laboratory facilities at Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, *campus* São Roque. Exsiccates at the herbarium comprise five groups, 71 botanical families, 153 genera and 178 species. Research work and didactic/educational application tasks were commented. The Herbarium IFSR and its complimentary collections (fungorium and carpotheque), besides the Botany Teaching Laboratory (associated with the herbarium) have reached the scientific and educational demands, despite its limitations of space and quantity. Spatial and activity amplification would enhance better use of its functions.
Key-words: Herbarium. IFSP campus São Roque. Research. Education.

Introdução

Herbários são coleções biológicas de plantas, fungos, fungos liquenizados e algas pluricelulares com finalidades diversas, entre as quais, em destaque, a científica e a educacional (Bridson & Forman, 1992). Tais coleções são essenciais para o estudo de taxonomia botânica, distribuição geográfica e estabilização nomenclatural dos grupos botânicos (Morales, 2012). Dependendo do tipo de material depositado, os herbários podem receber diferentes denominações: xiloteca (coleção de madeiras), carpoteca (coleção de frutos/sementes), micoteca (coleção de fungos e fungos liquenizados), entre outras (Quesada *et al.,* 1998; Rolins, 1965).

Os espécimes coletados são inicialmente prensados e levados à estufa de secagem, permanecendo nela por cinco a sete dias, dependendo do material, sob temperatura média de 40-45ºC. Após ter sido desidratado, o material é retirado da prensa, costurado em cartolina e catalogado em pastas de acordo com padrões de classificação por grupos botânicos; nesta fase, o material já é denominado exsicata. Normalmente, duas ou três exsicatas do mesmo material coletado são incorporadas à coleção biológica para que possa haver, eventualmente, empréstimo de material, permuta com outros herbários, doações etc. (Lot & Chiang, 1986). Na parte inferior direita de cada exsicata, uma etiqueta de identificação traz dados sobre a classificação do material (família botânica, nomes genérico e específico), local de coleta, data, coletor e outras observações pertinentes.

Os herbários documentam a riqueza florística de determinada região e são importantes centros de informações acerca de distribuição e diversidade; desta forma, pesquisadores podem utiliza-los para obter dados, comparar informações e traçar estratégias de manejo. A anotação correta e adequada dos dados do material é indispensável para estas atividades (Cotton, 1996). Do ponto de vista educacional, estas coleções biológicas podem ser utilizadas como ferramentas para o trabalho em educação ambiental, conservação da biodiversidade em nível local ou regional, compreensão contextualizada de termos botânicos e ampliação dos conteúdos

normalmente trabalhos nos cronogramas curriculares da educação básica (Cascino, 2002; Kinoshita *et al.,* 2006; Moreno, 2007).

Este trabalho apresenta os resultados de um levantamento realizado de novembro de 2014 a março de 2015 no Herbário do Instituto Federal de São Roque (Herbário IFSR) com o intuito de responder às seguintes questões: a) De que forma o herbário IFSR vem contribuindo para conhecimentos científicos, especificamente os relacionados à botânica?; b) O herbário IFSR atende a demandas educacionais relativas ao aprendizado de botânica?

O herbário IFSR: localização, estrutura e coleções

Fundado em 2011 e localizado no laboratório de botânica do *campus* São Roque do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, o herbário IFSR é reconhecido na Rede Brasileira de Herbários e a Sociedade Botânica do Brasil (Santos & Moraes, 2012). Possui, além da coleção de exsicatas de algas pluricelulares, criptógamas vasculares (pteridófitas), gimnospermas e angiospermas, uma micoteca e uma carpoteca. Agregado ao herbário IFSR há, ainda, o Laboratório de Ensino de Botânica (LEB), espaço destinado a desenvolver e armazenar materiais didáticos subsidiários ao ensino de botânica.

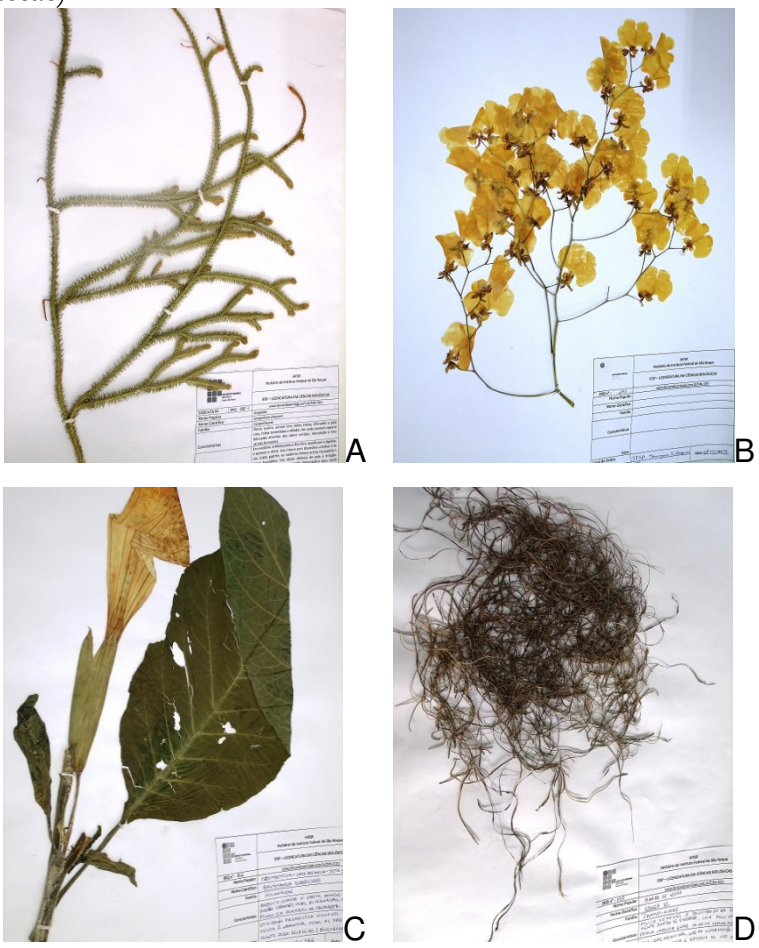
Os espécimes coletados e incorporados às coleções do herbário IFSR são identificados utilizando-se diferentes referenciais. Plantas criptogâmicas e espermatofíticas são identificadas de acordo com o sítio eletrônico *The International Plants Name Index* (http://www.ipni.org/index.html) e organizadas em pastas seguindo-se o proposto por Cronquist (1981) e endossado por Barroso e colaboradores (1978), a despeito de existir uma proposta de classificação das Angiospermas segundo *Angiosperm Phylogeny Group* (APG, 2009). Macroalgas (algas multicelulares) são catalogadas de acordo com Bicudo e Menezes (2010). Fungos e fungos liquenizados são identificados com base em Petersen (2012), Maia e Carvalho Junior (2010) e Laessoe (2013).

Até março de 2015, 452 exsicatas (Figura 1) encontravam-se devidamente armazenadas nos armários do herbário IFSR. Este material inclui cinco grupos vegetais, 71 famílias botânicas, 153 gêneros e 178 espécies (Tabela 1). Na carpoteca, havia 178 espécimes, muitos ainda não identificados e, na micoteca, 45 espécimes (fungos basidiomicetos e fungos liquenizados), muitos ainda não identificados.

Tabela 01: Relação de grupos vegetais, famílias botânicas, gêneros e espécies de exsicatas depositadas no herbário IFSR.

Grupos Vegetais	nº. de famílias	nº. de gêneros	nº. de espécies
Algas multicelulares	2	2	2
Fungos liquenizados	1	1	1
Pteridófitas	10	16	18
Gimnospermas	4	4	4
Angiospermas	54	130	153

Figura 1. Exemplos de exsicatas do herbário IFSR digitalizadas: A = *Lycopodium clavatum* (Lycopodiaceae); B = *Oncidium* sp (Orchidaceae); C = *Brugmansia suaveolens* (Solanaceae); D = *Usnea* sp (Parmeliaceae).



O herbário IFSR: conhecimento científico

O herbário IFSR foi a primeira coleção biológica instituída no *campus* São Roque do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo. Assim, ele constitui um marco no histórico da consolidação de pesquisa científica no *campus,* particularmente para os cursos superiores de Tecnologia em Gestão Ambiental e Licenciatura em Ciências Biológicas, cujos estudantes, envolvidos em diversas ações e projetos – entre eles, destacam-se o Sistema Agroflorestal (Moura *et al.,* 2014; Pereira *et al.,* 2014) e o arboreto de plantas nativas (Santos, 2015a).

Os materiais depositados no herbário IFSR são utilizados pela comunidade acadêmica do *campus* e por profissionais de outras instituições ligados às áreas botânicas (fenologia, taxonomia etc.) desde sua fundação. O interesse em utilizar os materiais para conhecimento da flora presente na região de São Roque (região metropolitana de Sorocaba, SP) e comparação com outros materiais é um dos mais importantes fatores que levam profissionais a analisar os materiais.

Os trabalhos de Santos (2013) e Venancio e Miura (2013) utilizaram dados diretamente relacionados aos materiais constantes do herbário IFSR e conjuntos associados (carpoteca, principalmente). Embora ainda incipientes, tais produções científicas atestam a importância desta coleção e sua contribuição acadêmica.

A indeterminação taxonômica de alguns materiais da carpoteca e da micoteca apontam, também, para a necessidade de investigações científicas nestas áreas. Neste sentido, iniciações científicas institucionais ou voluntárias constituem atividades que podem suprir essa demanda. Vale mencionar a publicação do material de Santos (2015b), em colaboração com uma estudante de iniciação científica institucional do curso de Licenciatura em Ciências Biológicas, na qual seus autores utilizaram materiais identificados a partir de exsicatas depositadas no herbário IFSR.

O herbário IFSR: subsídios para o ensino e aprendizagem de botânica

As exsicatas depositadas no herbário IFSR e as coleções agregadas (carpoteca e micoteca) têm sido utilizadas com frequência por docentes dos cursos superiores de Tecnologia em Gestão Ambiental e Licenciatura em Ciências Biológicas do *campus* São Roque do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo em aulas teórico-práticas, demonstrações etc. Análogo a um museu, o herbário fornece momentos de observação de materiais que podem subsidiar conteúdos trabalhados formalmente em sala de aula, de maneira menos formal (Becerra, 1986; Cabrera, 2004).

A experiência de coleta, prensagem, desidratação e montagem de exsicatas pode servir, também, como um elemento de agregação de habilidades e competências não somente aos estudantes das áreas ambientais e biológicas, mas a qualquer pessoa interessada em aprender a construir uma coleção biológica (DRIVER, 1988).

O Laboratório de Ensino de Botânica - LEB (Santos, 2012), instalado nas adjacências do herbário IFSR, exerce atividades de pesquisa, confecção e utilização de materiais didáticos aplicados diretamente aos grupos vegetais depositados no herbário IFSR, carpoteca e micoteca. Estas atividades são importantes para o desenvolvimento e construção de conhecimento baseado em experimentação, pesquisa e envolvimento de saberes prévios (Scribner & Cole, 1982).

Os conteúdos tradicionalmente abordados no ensino de botânica são, muitas vezes, reportados como sendo de difícil trato: excesso de nomes, memorização pura e simples de nomes, falta de contextualização etc., sendo, assim, elementos que contribuem negativamente para a efetivação de um ensino de botânica apropriado (Santos, 2009). Este tipo de lacuna está sendo sanada, de forma constante e paulatina, pelo uso das coleções biológicas como o herbário IFSR e atividades relacionadas ao LEB.

Considerações finais

Ainda há muito a ser feito para que o herbário IFSR aumente sua atuação como órgão de pesquisa científica de maior alcance. Esforços têm sido dispensados no sentido de divulgar suas ações, e a disponibilidade de visitas para observações ou aplicação dos conteúdos nos processos de ensino e aprendizagem de botânica é um ponto favorável.

Devido ao número ainda reduzido de material, o herbário IFSR não realizou empréstimos ou permutas de exsicatas com outros herbários, embora faça parte da Rede Nacional de Herbários. Espera-se que as instalações do laboratório de botânica, atualmente um pouco acanhadas para as diversas ações realizadas, sejam ampliadas para atender de forma mais adequada às possíveis demandas, comentadas neste trabalho, que se fazem presentes em coleções biológicas.

Referências

ANGIOSPERM PHYLOGENY WEBSITE, version 12, 2009. Disponível em: <http://migre.me/pvXIS />; acesso em: 20 mar. 2015.

BARROSO, G. M.; GUIMARÃES, E. F.; ICHASO, C. L. F.; COSTA, C. G.; PEIXOTO, A. L. **Sistemática de angiospermas do Brasil.** Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1978 (vol. 1).

BECERRA, E. Colaboración museo-escuela. Una propuesta para discutir. **Revista de Investigación Educacional IUPC,** v. 14, n. 29, p. 1-22, 1986.

BICUDO, C. E. M.; MENEZES, M. Introdução: As algas do Brasil. In: FORZZA, R. C. (Org.). **Catálogo de plantas e fungos do Brasil**. Rio de Janeiro: Andrea Jakobsson Estúdio/Instituto de Pesquisa Jardim Botânico do Rio de Janeiro/Instituto de pesquisas Jardim Botânico do Rio de Janeiro, 2010 (Vol. 1).

BRIDSON, D.; FORMAN, L. **The herbarium handbook**. Londres: Royal Botanical Garden, 1992.

CABRERA, A. Posibilidades pedagógicas de la experiencia museográfica. **Correo del Maestro**, v. 93, p. 1-8, 2004.

CASCINO, F. **Educação ambiental**: princípios, história, formação de professores. São Paulo: SENAC, 2002.

COTTON, C. M. **Ethnobotany**: Principles and Application. London: J. Willey & Sons, 1996.

CRONQUIST, A. **An Integrated System of Classification of Flowering Plants**. New York: Columbia Univ. Press, 1981.

DRIVER, R. Un enfoque constructivista para el desarrollo del currículo en ciencias. **Enseñanza de las Ciencias,** v. 6, n. 2, p. 109-120, 1988.

KINOSHITA, L. S. *et al*. (Orgs.). **A botânica no ensino básico**: relatos de uma experiência transformadora. São Carlos, SP: Rima, 2006.

LAESSOE, T. **Mushrooms**: How to identify and gather wild mushrooms and other fungi. Londres: Dorling Kindersley, 2013.

LOT, A.; CHIANG, F. **Manual de Herbario**. Ciudad de México, México: Consejo Nacional de la Flora de México, 1986.

MAIA, L. C.; CARVALHO JUNIOR, A. A. Introdução: os fungos do Brasil. In: FORZZA, R. C. (Org.). **Catálogo de plantas e fungos do Brasil**. Rio de Janeiro: Andrea Jakobsson Estúdio/Instituto de Pesquisa Jardim Botânico do Rio de Janeiro/ Instituto de pesquisas Jardim Botânico do Rio de Janeiro, 2010 (Vol. 1).

MORALES, C. O. El Herbario USJ de Costa Rica: trayectoria y contribuciones. **Rev. biol. trop**, San José, v. 60, n. 4, dez. 2012.

MORENO, E. J. The herbarium as a resource for the learning of Botany. **Acta Botánica Venezuelica**, v. 30, n. 2, Caracas, p. 415-427, 2007.

MOURA, S. L.; PEREIRA, L. de S. Q.; PARON, M. E.; GOMES, G. A. C. Ações realizadas pela rede de pessoas integrantes do Centro Vocacional Tecnológico em Agroecologia de São Paulo no IFSP campus São Roque: experiências do trabalho em rede. **Scientia Vitae**, vol. 1, n. 3, ano 1, jan. 2014, p. 82-86. Disponível em: <www.revistaifspsr.com/>; acesso em: 15 mar. 2015.

PEREIRA, L. de S. Q; PARON, M. E.; GOMES, G. A. C. O manejo de sistema agroflorestal para a recuperação da área degrada ao entorno da nascente do IFSP campus São Roque. **Scientia Vitae**, vol. 2, n. 5, ano 2, jul. 2014, p. 15-20. Disponível em: <www.revistaifspsr.com/>; acesso em: 15 fev. 2015.

PETERSEN, J. H. **The Kingdom of Fungi**. Dinamarca: Gyldendal, 2012.

QUESADA, C.; BAENA, L.; LINARES, E.; MORALES, C. Los Herbarios como centros de documentación para el estudio y conservación de la biodiversidad. **Anales y Resumenes**. Encuentro Medioambiental Almeriense, Universidad de Almeria, España, 1998.
ROLLINS, R. C. The role of the university herbarium in research and teaching. **Taxon**, v. 14, n. 1, p. 115-120, 1965.

SANTOS, F. S. dos. A botânica no ensino médio: será que é preciso apenas memorizar nomes de plantas? In: SILVA, C. C. (Org.). **Estudos de história e filosofia das ciências:** subsídios para aplicação no Ensino. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2009.

_____. **Laboratório de ensino de botânica.** 2012. Disponível em: <http://migre.me/pvXKh>; acesso em: 20 fev. 2015.

_____. Checklist of trees at the Sao Roque campus, Federal Institute of Sao Paulo. **Scientia Vitae**, vol. 1, n. 1, jun. 2013, p. 52-61. Disponível em: <www.revistaifspsr.com/>; acesso em: 21 mar. 2015.

_____. **Arboreto de nativas do Campus São Roque**. 2015ª. Disponível em: <http://migre.me/pvXLy >; acesso em 25 mar. 2015.

_____ (Org.). **Laminário de botânica para as aulas práticas de Botânica I e Botânica II do curso de Licenciatura em Ciências Biológicas do IFSP campus São Roque** (preparo de lâminas e fotografias: CHAGAS, Bianca Roberta Catani). São Roque, SP: Edição do autor, 2015b. Disponível em: < http://migre.me/pvXMe >; acesso em 25 mar. 2015.

SANTOS, F. S. dos; MORAES, R. Herbarium IFSR: development, organization, and purposes of use of the first biological collection at IFSP campus Sao Roque. In: SANTOS, F. S. dos; SOTO, F. R. M. (Orgs.). Produção Científica da Educação Profissional e Tecnológica do IFSP campus São Roque: construindo e divulgando o conhecimento técnico-científico para a sociedade. **Anais e Resumos**. I Jornada de Produção Científica da Educação Profissional e Tecnológica; IV Ciclo de Palestras Tecnológicas (Cipatec). São Roque, SP, arquivo PDF, 72 p., 2012, p. 45.

SCRIBNER, S.; COLE, M. Consecuencias cognitivas de la educación formal e informal. **Infancia y Aprendizaje,** v. 17, p. 3-18, 1982.

VENÂNCIO, R. S. da S; MIURA, R. Y. H. Análise da germinação de quatro espécies nativas: caporoca (*Rapanea ferruginea* (Ruiz & Pav.) Mez.), juçara (*Euterpe edulis* Mart.), leiteiro (*Peschiera fuchsiaefolia* Miers) e tamboril (*Enterolobium contortisiliquum* (Vell.) Morong). **Scientia Vitae**, vol. 1, n. 2, ano 1, out-dez. 2013, p. 3-11. Disponível em: <www.revistaifspsr.com/>; acesso em: 24 mar. 2015.

A sombra de edifícios como índice de verticalização das cidades

Buildings shade as cities verticalization index

Flávio Henrique Mendes[1]
Prof. Dr. Demóstenes Ferreira da Silva Filho[1]
Prof. Dr. António Manuel Saraiva Lopes[2]

[1] ESALQ/USP, friquemendes@usp.br
[2] Instituto de Geografia e Ordenamento do Território, Universidade de Lisboa

Submetido em 10/03/2015
Aprovado em 08/04/2015

Resumo: Esta pesquisa teve como objetivo correlacionar a verticalização e a estreiteza das ruas de Lisboa/Portugal com a presença de sombras de elevados edifícios, por meio da classificação supervisionada de imagem de satélite de alta resolução (pancromática de 0,5 m e multiespectral de 2 m). Os resultados obtidos comprovaram esse efeito, mostrando o chamado "efeito chapéu", com muitos edifícios altos na parte central e, à medida que se aproxima da periferia, as alturas tendem a diminuir. O valor encontrado para Lisboa, em imagem de 29 de junho de 2010 (verão no hemisfério norte), às 11h46, indicou 1,3% de sombra no perímetro urbano, sendo que a freguesia da Misericórdia teve mais sombras projetadas de edifícios (7,8%), enquanto Belém, pelo contrário, teve menos áreas sombreadas (0,5%). Assim, pode-se considerar a sombra como forte indicativo de verticalização, sendo de extrema importância para o planejamento urbano, que deve garantir acesso ao sol, ventilação e conforto a todos os habitantes.
Palavras-chave: centro urbano, efeito chapéu, classificação supervisionada, planejamento da cidade.

Abstract: This research aimed to correlate the verticalization of Lisbon/Portugal with the presence of shadows from high buildings or narrow streets, by means of a supervised classification within a high-resolution satellite image (0.5-m panchromatic and 2-m multispectral). The obtained results proved to be useful for this purpose, showing the hat effect, with a lot of buildings in a central part and a decreasing of vertical features to the periphery. From an image of June 29th 2010 (Summer in the Northern Hemisphere), from 11:46 a.m., the value found in Lisbon, was 1.3% of shadowing in the urban area, with the central city parish of Misericórdia, with more projected shadows of buildings (7.8%), while the Belém neighborhood, in the opposite, with only 0.5%. Therefore, we can consider the presence of shadows as a good indicator of verticalization, being a very important indicator for the urban planning, who needs to ensure the solar access, ventilation and comfort for all inhabitants.
Keywords: urban center, hat effect, supervised classification, urban planning.

Introdução

A tecnologia computacional tem avançado muito ultimamente, sobretudo no desenvolvimento de *softwares*, os quais podem ser utilizados para o planejamento urbano das cidades, na qual se destacam, dentre os gratuitos e livres: (i) Google Earth, capaz de apresentar um modelo 3D da Terra, a partir de mosaico de imagens de satélite; (ii) ENVI-met (Bruse & Fleer, 1998), capaz de realizar simulações microclimáticas da interação entre superfície – vegetação – atmosfera; (iii) MultiSpec (Landgrebe & Biehl, 2001), para tratamento de dados de imagens multiespectrais, com ênfase em treinamento de classes e classificação e (iv) Quantum GIS, lançado em 2002, pertencente ao grupo dos Sistemas de Informações Geográficas. As imagens de satélite, sobretudo de alta resolução, apesar de serem pagas, são peças fundamentais que permitem a checagem das atuais condições da área de estudo.

O geoprocessamento pode ser entendido como um conjunto de técnicas computacionais que atua sobre bases de dados georreferenciados, com larga aplicação em questões ambientais (Xavier-da-Silva & Zaidan, 2004), cujos produtos finais são mapas temáticos qualita/quantitativos sobre a distribuição espacial de uma determinada grandeza (Assad & Sano, 1998).

É certo que quando as edificações não atingem condições ideais de iluminação natural, isto se torna possível por meio de sistemas artificiais, contudo, demanda maior gasto energético. A insolação, a luz, os ventos, a temperatura externa e a umidade são recursos naturais muito influenciados pelo entorno que o circunda (Brandão, 2004). Akbari e Rosenfeld (1997), nas cidades da Califórnia, verificaram aumento no consumo de energia da ordem de 2 a 4% por grau de aumento na temperatura, ao passo que Santamouris (1997), no verão de Atenas, concluiu que o consumo para refrigeração do ar da periferia para o centro chega a dobrar.

Segundo a norma alemã DIN 5034 (1979), que determina níveis de iluminância requeridos para os ambientes construídos, a luz natural possui

qualidade muito superior à artificial: aquela requer apenas 60% de iluminância perante esta. Ademais, cabe à variabilidade da luz natural a regulação dos processos biológicos, representando, assim, motivo primordial para sua valorização (Hopkinson, Petherbridge & Longmore, 1975).

Como critério de adensamento e verticalização, é comum o uso do conceito de envelope solar, que surgiu em 1980, com Knowles e Berry, correspondente ao maior volume que uma edificação pode ocupar num determinado terreno sem que esta prejudique o acesso ao sol e à luz natural na vizinhança. A ventilação também pode ser modificada devido à verticalização, ao alterar as direções dos ventos e a turbulência, podendo, inclusive, criar zonas de aceleração de vento em *canyons* urbanos.

Para analisar o comportamento térmico do *design* urbano, a relação entre altura do prédio e distância entre eles (H/W) é muito utilizada. Quanto menor o valor, mais "aberta" é a área. Oke (2007) estratificou esses valores, onde, por exemplo, se H/W>2, corresponde a altas construções, representadas pelas torres do centro comercial, com aproximadamente 90% de solo impermeável.

Vista a relevância do planejamento das cidades, o objetivo da pesquisa foi mapear a quantidade de sombras promovidas pelas diferentes alturas dos edifícios, podendo inferir áreas de maior urbanização a partir de imagem de satélite.

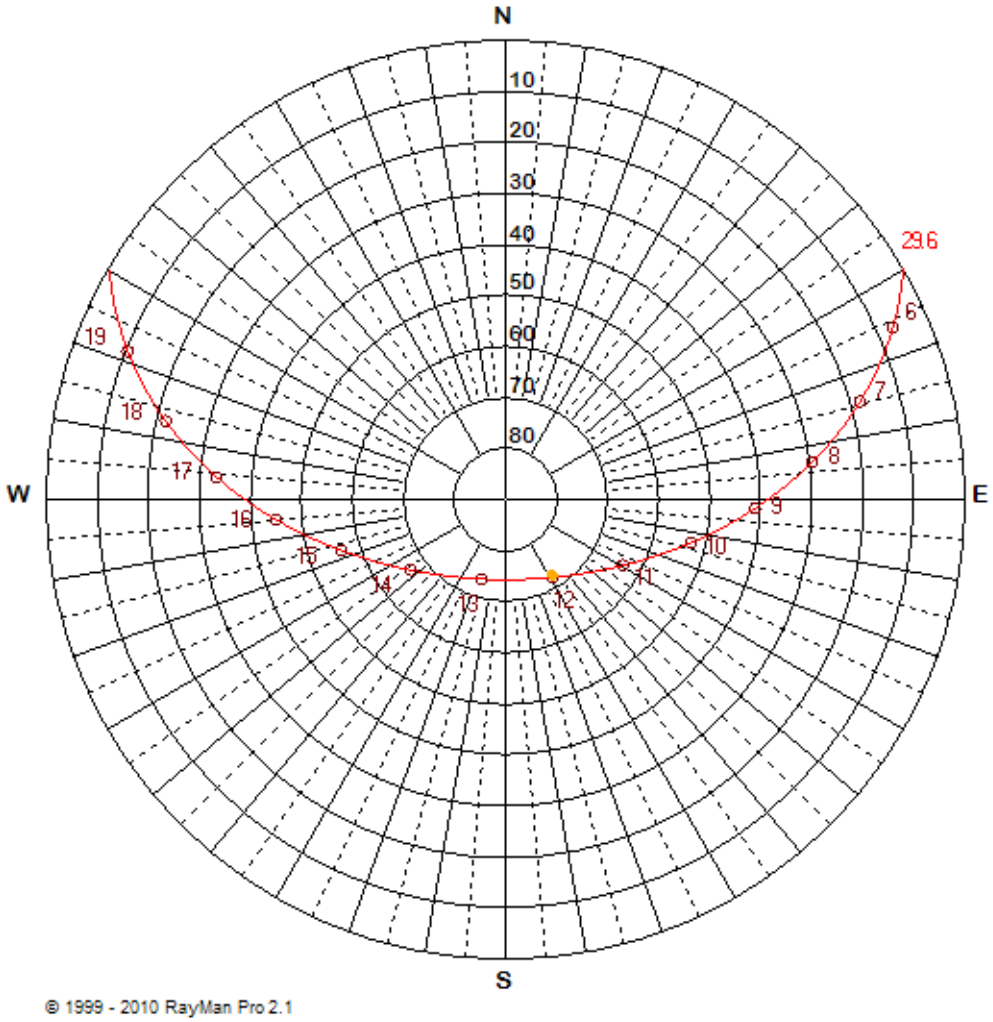
Material e Métodos

A área de estudo foi Lisboa, capital lusitana, situada nas coordenadas geográficas 38°43' norte e 9°09' oeste, cujo clima é o tipo mediterrânico (Csa, segundo a classificação climática de Köppen-Geiger), com inverno chuvoso e verão quente e seco; a precipitação anual média é de 726 mm (IPMA, 2012) e a população estimada é de 547.733 habitantes (INE, 2011), embora a designada "Grande Lisboa" (AML – Área Metropolitana de Lisboa) exceda os 2 milhões de habitantes.

A imagem utilizada foi de alta resolução, pertencente ao satélite WorldView-2, lançado em 2008 pela DigitalGlobe, possuindo 50 cm de resolução

espacial (pancromática) e 2 m (multiespectral), composto por 8 bandas multiespectrais, pertencente ao dia 29 de junho de 2010 (verão no hemisfério norte – Figura 01), tirada às 11h46, cujos limites geográficos adotados foram provenientes do CAOP 2014 (Carta Administrativa Oficial de Portugal), desconsiderando os limites que avançavam sobre o rio Tejo ("água"), uma vez que os limites oficiais extrapolavam em direção ao rio.

Figura 01: Diagrama solar correspondente ao dia da imagem utilizada (29 de Junho de 2010).



Elaborado com recurso do *software* Rayman (Matzarakis, 2007).

Desenvolvido na Universidade de Purdue, Indiana (EUA), por David Landgrebe e Larry Biehl da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computadores, ITaP (Information Technology at Purdue) e LARS (Laboratory for Applications of Remote Sensing), o MultiSpec foi o programa utilizado na análise de dados de imagens multiespectrais. Ele é portátil (não precisa de instalação), pequeno (5,76 MB), com interface agradável, processa bem em sistemas Windows 64 bits (ele é 32 bits) e também existem versões para MAC, tendo sido desenvolvido originalmente para esse sistema.

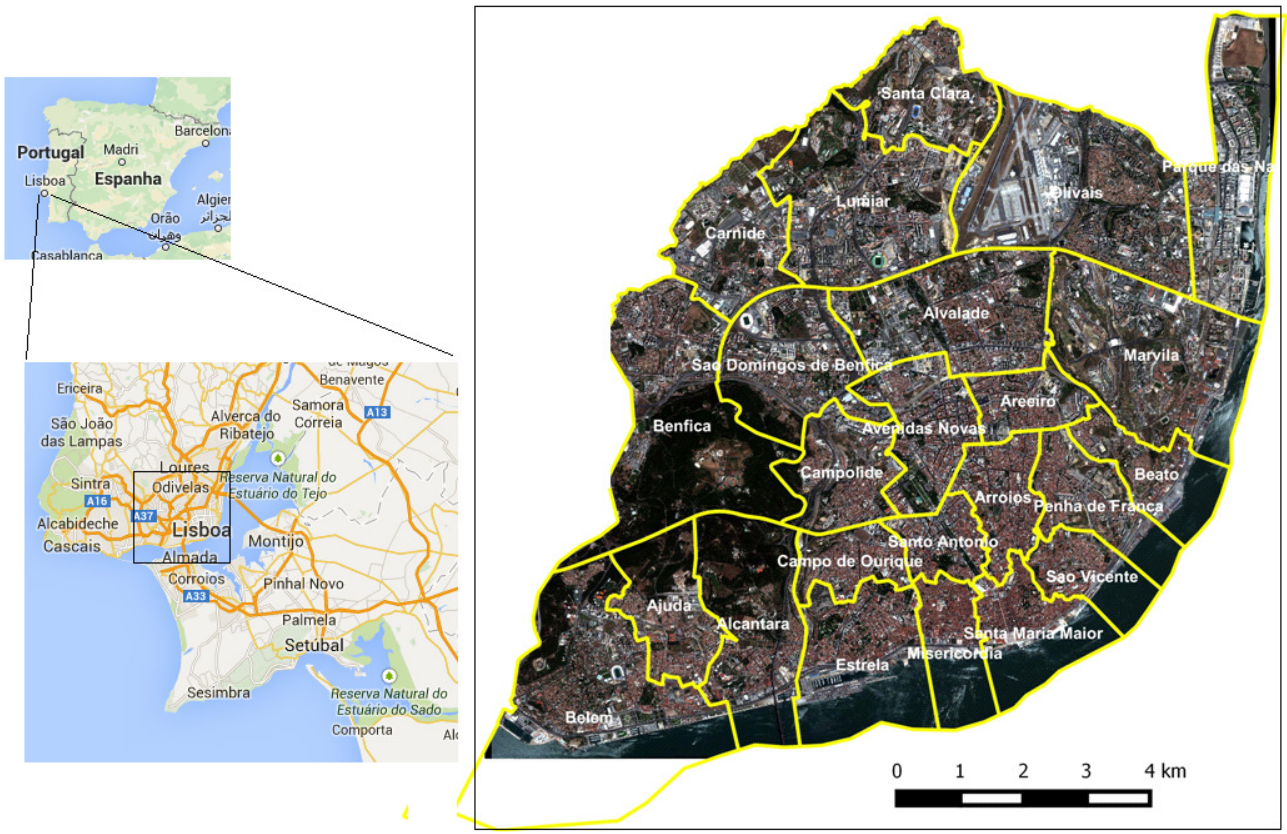
Para iniciar a classificação supervisionada, foi necessário criar um novo projeto e em seguida, criadas classes de uso do solo e as delimitações dos campos de teste e de treinamento. Foram consideradas oito classes, a saber: copa de árvore, relvado, asfalto, sombra, telha cerâmica, telha clara, concreto/pedra portuguesa e solo exposto/vegetação rala. A classe piscina, por ser extremamente rara e não aparecer na maioria das freguesias (correspondente ao termo "bairros", no Brasil) foi omitida. Por comparação, o *software* estimou a quantidade e a porcentagem de cada classe, seguida da estatística do índice kappa. Fez-se a classificação supervisionada para cada uma das 24 freguesias do perímetro urbano da cidade de Lisboa, com o algoritmo ECHO *Classifier* e, posteriormente, para a cidade toda, originando uma tabela com a quantidade das respectivas classes e um mapa temático.

Em sequência, os valores obtidos da classificação supervisionada foram inseridos na tabela de atributos do Quantum GIS v. 2.6 (Brighton), de modo a elaborar, em escala de cinza, um mapa graduado de porcentagens de sombra oriundas da verticalização da cidade.

Resultados e Discussão

A Figura 2 mostra os limites territoriais de Lisboa e a nova divisão das freguesias de Lisboa (CAOP, 2014).

Figura 02: Lisboa no contexto da Península Ibérica e na AML (área de Lisboa: 100,05 km²).



Fontes: Google Maps, imagem de alta resolução do satélite WorldView-2 e CAOP (Carta Administrativa Oficial de Portugal, 2014).

Por meio do Quantum Gis, uma vez o *shapefile* das freguesias sobreposto na imagem de alta resolução, fez-se um recorte para cada localidade e, com auxílio de programa MultiSpec, quantificou-se porcentagem de sombra projetada dos edifícios, baseado nas classes de uso do solo (Tabela 01).

Tabela 01: Quantificação de sombras projetadas para cada freguesia em Lisboa/Portugal.

Freguesia	Sombra (%)
Misericórdia	7,8
Arroios	5,2
Santa Maria Maior	4,0
Santo Antônio	4,0
Avenidas Novas	3,7
São Domingos de Benfica	3,0
Areeiro	2,4
São Vicente	1,8
Campo de Ourique	1,8
Penha de França	1,8
Beato	1,7
Estrela	1,6
Alcântara	1,6
Campolide	1,5
Santa Clara	1,5
Parque das Nações	1,4
Alvalade	1,1
Carnide	1,1
Benfica	0,9
Marvila	0,9
Olivais	0,7
Ajuda	0,6
Lumiar	0,6
Belém	0,5
Lisboa (cidade)	1,3

O índice kappa, capaz de avaliar a acurácia da classificação supervisionada, variou de 98,5% a 99,9%, indicando ótima classificação, onde é desejável valor acima de 80%.

É importante destacar que a sombra para Lisboa foi realizada através dos limites urbanos da cidade e não simplesmente fazendo-se a média entre os valores

das freguesias, visto que as elas diferem entre si quanto ao tamanho de suas áreas. Desse modo, obteve-se 1,3% de áreas com sombra para esta altura do ano. Individualmente, a maior porcentagem foi verificada na freguesia da Misericórdia, com 7,8% e a menor, em Belém, com 0,5% (Figura 03).

Figura 03: sombras nas freguesias com menor (Belém) e maior (Misericórdia) verticalização, nessa ordem.

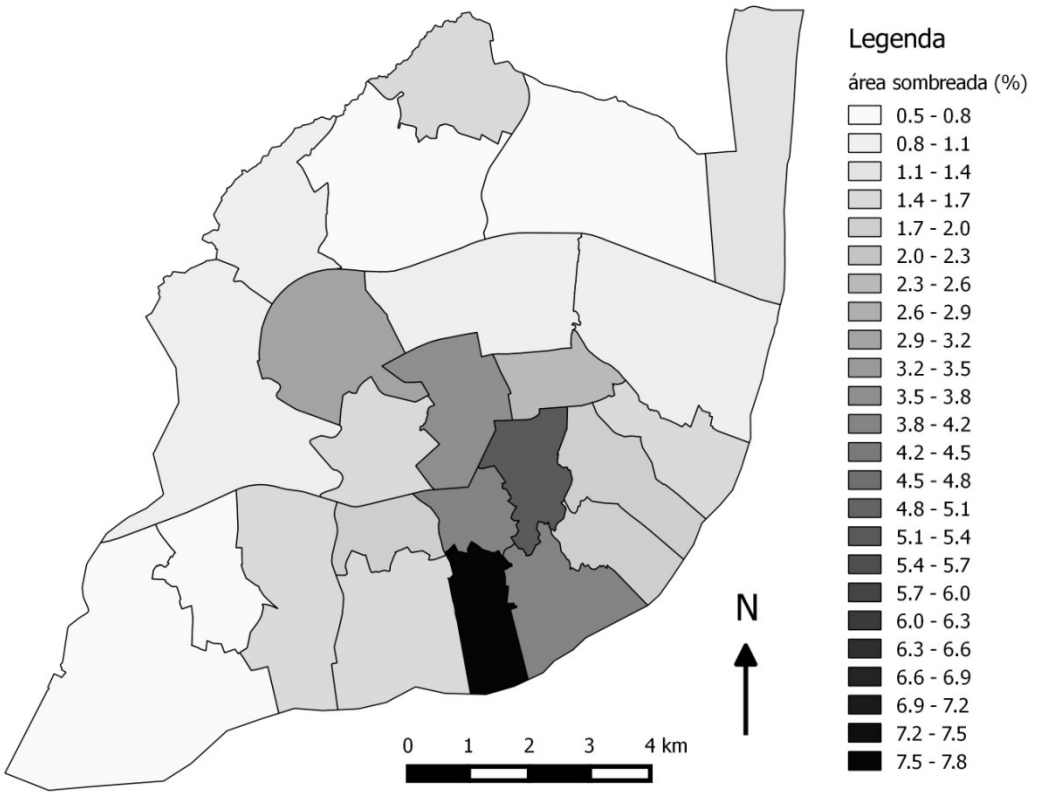


Elaborado pelos autores.

Deve-se frisar que a parte sul das freguesias encontra-se em branco devido à presença do rio Tejo, cujos limites do CAOP extrapolavam em direção ao rio. Para os cômputos das porcentagens, essa classe foi excluída (sempre que presente) e os cálculos, refeitos.

A Figura 04, elaborada com o *software* Quantum GIS, mostra a classificação dos sombreamentos numa em escala graduada de níveis de cinza das freguesias com maior porcentagem.

Figura 04: Mapa temático da quantidade de sombra de edifícios, em porcentagens, em cada uma das 24 freguesias de Lisboa.



Elaborado com *software* Quantum GIS

Conforme se nota no mapa temático acima, pôde-se pressupor o grau de urbanização da cidade, baseado na quantidade de edifícios presentes no local, os quais produziram mais sombra na imagem de satélite, refletindo o "efeito chapéu", ou seja, tem-se um centro comercial/residencial com muitos prédios altos e, à medida que se afasta em direção à periferia, as alturas médias tendem a diminuir.

Conclusão

As freguesias da Misericórdia (7,8%), Arroios (5,2%), Santa Maria Maior (4,0%), Santo Antônio (4,0%) e Avenidas Novas (3,7%) foram as que mais apresentaram sombra de edificações, estando localizados na parte dos grandes centros comerciais de Lisboa, enquanto que Belém (0,5%), Ajuda (0,6%), Lumiar

(0,6%), Olivais (0,7%), Benfica (0,9%) e Marvila (0,9%), situados predominantemente nas periferias, tiveram os menores valores.

Os mapas graduados em escalas de cinza foram bem representativos quanto à localização espacial da verticalização. Essas informações são de extrema importância para o planejamento urbano, a fim de mapear zonas de elevado grau de adensamento e poder, assim, planejar infraestrutura adequada.

Quanto maior a latitude da área de estudo, mais fácil tende a ser a verificação das sombras das zonas mais urbanizadas, na qual o horário em que a imagem foi tirada também influencia. Em locais próximos à linha do Equador, cujas imagens retiradas ao meio-dia, em virtude da posição do sol a pino, é mais complicada a verificação das projeções de sombra dos edifícios.

Recomenda-se que futuras pesquisas comparem imagens de locais de diferentes latitudes e épocas do ano, como verão e inverno. Aqui foi estudada uma imagem do solstício de verão no hemisfério norte. Em imagens de inverno são esperados dias mais curtos devido à maior inclinação do sol e, consequentemente, a projeção das sombras dos edifícios será mais acentuada.

Referências

AKBARI, H.; ROSENFELD, A. H. Cool buildings and cool communities, In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON BUILDINGS AND THE ENVIRONMENT, 2, 1997, Paris. **Proceedings...** Paris: CSTB, 1997, v. 2, p. 301-308.

ASSAD, E. D.; SANO, E. E. **Sistema de informações geográficas**: aplicações na agricultura. 2.ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 1998. 434 p.

BRANDÃO, R. S. **Acesso ao sol e à luz natural:** avaliação do impacto de novas edificações no desempenho térmico, luminoso e energético do seu entorno. 2004. 156f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

BRUSE, M; FLEER, H. Simulating surface–plant–air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. **Environmental Modelling & Software**, v. 13, p. 373–384, 1998.

DEUTSCHES INSTITUT FUR NORMUNG, DIN 5034: Daylight in interiors, Part 1-2. Berlin, 1979.

HOPKINSON, R. G.; PETHERBRIDGE, P.; LONGMORE, J. **Iluminação Natural**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1975. 776 p.

INE. INSTITUTO NACIONAL DE ESTATÍSTICA. **Censos 2011**. Disponível em: <http://www.cm-lisboa.pt/municipio/demografia>. Acesso em: 3 mar. 2015.

IPMA. INSTITUTO PORTUGUÊS DO MAR E DA ATMOSFERA. Disponível em: <http://www.ipma.pt/pt/educativa/tempo.clima/index.jsp?page=clima.pt.xml>. Acesso em: 3 mar. 2015.

KNOWLES, R. L.; BERRY, R. D. **Solar envelope concepts**: moderate density building applications: final report. Golden: Solar Energy Information Data Bank, 1980. 135 p.

LANDGREBE, D.; BIEHL, L. **MultiSpec Manual**. 2001. Disponível em: <https://engineering.purdue.edu/~biehl/Wetlands/MultiSpec_Tutorial.pdf>. Acesso em: 11 dez. 2014.

MATZARAKIS, A.; RUTZ, F.; MAYER, H. Modeling radiation fluxes in simple and complex environments-application of the RayMan model. **International Journal of Biometeorology**, v. 51, n. 4, p. 323–334, 2007.

OKE, T. R. Siting and Exposure of Meteorological Instruments at Urban Sites. In: BORREGO, C.; NORMAN, A. L. (Ed.). **Air Pollution Modeling and its Application XVII.** Springer, 2007. p. 615 – 631.

SANTAMOURIS, M. Energy and indoor climate in urban enviroments: recent trends. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 4, 1997, Salvador. **Anais...** Salvador: ENCAC, 1997, p. 15-24.

XAVIER-DA-SILVA, J.; ZAIDAN, R. T. **Geoprocessamento & Análise Ambiental**: Aplicações. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2004. 115 p.

Vulnerabilidade de edifícios de auto-construção: o caso do bairro da Cova da Moura

Self-constructed buildings vulnerability: the case of Cova da Moura district

Prof. Dr. Jorge Mascarenhas[1]
Profa. Dra. Lurdes Belgas[1]
Prof. Dr. Fernando G. Branco[2]

[1] Instituto Politécnico de Tomar, Portugal, jmascarenhas@ipt.pt
[2] Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Portugal.

Submetido em 02/02/2015
Aprovado em 08/04/2015

Resumo: Na zona Metropolitana de Lisboa existe um aglomerado urbano – o Bairro do Alto da Cova da Moura, com características singulares, habitualmente identificado como um local socialmente problemático e de grande anarquia construtiva, resultante de auto construção, mas que encerra um grande potencial em termos culturais e dinâmica social. Apesar da descaraterização construtiva, e da vulnerabilidade do edificado, sobretudo à ação dos sismos, é inegável que este bairro pode constituir um bom contributo para o entendimento da sustentabilidade à escala europeia, sendo um importante património a preservar. Neste artigo, apresenta-se a caraterização do edificado deste bairro bem como um conjunto de anomalias construtivas que conduzem à vulnerabilidade dos edifícios.
Palavras chave: Anomalias. Auto-construção. Cova da Moura. Cultura luso-africana. Património.

Abstract: In the metropolitan area of Lisbon there is an urban cluster - Bairro Alto da Cova da Moura, with unique characteristics, usually identified as a place socially problematic and with great building anarchy that resulted of the self built, but with a vast potential in cultural and social dynamics.Despite the constructive uncharacterized, and the vulnerability of the building, especially against the action of earthquakes, is no doubt that this neighborhood can be an good contribution to the understanding of sustainability at a European level, representing an important heritage to preserve.In this paper, is presented the characterization of the buildings of this neighborhood as well as a set of construction anomalies, which lead to the vulnerability of these buildings.
Keywords: Anomalies. Self-built. Cova da Moura. Portuguese and African culture. Heritage.

Caraterização e anomalias do edificado do bairro da Cova da Moura

O Bairro da Cova da Moura situa-se no concelho da Amadora, na zona da grande Lisboa. Abrange uma área de cerca de 16,5 hectares, e está delimitado pelo IC 19, um importante eixo rodoviário e pela Linha de Sintra, um importante eixo ferroviário. Nele residem cerca de cinco mil pessoas.

A toponímia do bairro não está, de todo, relacionada com a sua implantação, pois se situa num pequeno planalto de origem vulcânica, mas crê-se que a designação se deve à existência de uma depressão causada por uma pedreira desativada, que ali existiria.

Este bairro (figura 01), que teve um grande crescimento nos anos 70 do século passado, é fruto da necessidade urgente de dar resposta a um arrendamento precário da emigração legal e de um grande contingente de emigração clandestina, que era mão-de-obra necessária para dar resposta à grande expansão da construção civil para habitação, resultante da especulação do setor imobiliário na zona da grande Lisboa, face à forte desvalorização do escudo e também da necessidade de alojamento, a baixo custo, para milhares de pessoas vindas das ex-colónias portuguesas (Rodrigues, 2009).

Figura 01: O Bairro da Cova da Moura



Fonte: Google.

No seu apogeu por volta de 1998, cerca de metade da comunidade da Cova da Moura era constituída por indivíduos de origem africana: 27.75% - Cabo Verde; 12,73 – Angola, 3,39 – São Tomé e Príncipe, 1,92% da Guiné-Bissau e 0,73% de Moçambique (Godinho, 2010)

O Bairro da Cova da Moura, habitualmente identificado como um local problemático é, no entanto, um aglomerado urbano com grande potencial em termos culturais, manifestado pelas atividades de música e dança tradicionais de diferentes origens, pela riqueza e diversidade gastronómica, mas sobretudo pela vivência de valores, evidenciada pelos laços comunitários gerados pela dinâmica da existência de uma cultura africana muito enraizada, pode constituir um importante contributo cultural para a atratividade do turismo.

Curiosamente este bairro vem de encontro aos objetivos de sustentabilidade, que tanto se procura para os aglomerados urbanos, no cumprimento das estratégias europeias.

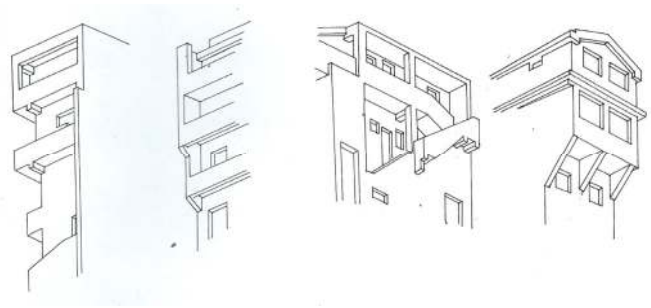
Contrariamente à maioria dos aglomerados urbanos em Portugal, este bairro apresenta uma grande vitalidade, uma vez que a taxa de natalidade é superior à média, em simultâneo aproxima-se dos valores de sustentabilidade que se preconizam para as cidades europeias, isto é, apresenta baixo metabolismo urbano, é praticamente autossuficiente em produtos de primeira necessidade, tem baixos consumos de energia, deslocações prioritariamente pedonais e baixa produção de resíduos.

Neste bairro está enraizado um forte sentido de comunidade, com códigos e hábitos culturais que constituem uma mais-valia para o bairro e que faz com que os moradores tenham muita vontade de aí permanecerem, mostrando sempre muita disponibilidade para participarem e auto organizarem-se em iniciativas que valorizem, promovam e dignifiquem o bairro. Daí uma forte relutância a propostas que visam a alteração formal e espacial do bairro (Santos, 2008).

Os edifícios têm um profundo cunho pessoal e resquícios da cultura africana, resultando do imaginário e da experiência de quem os constrói. Os

edifícios estão em constante evolução consoante as necessidades e o crescimento do agregado familiar, ou as condições financeiras dos seus proprietários ou promotores. Verifica-se, nomeadamente, o acrescento de pisos, por vezes em balanço, sobre as estruturas existentes, cujo acesso é feito por escadas construídas pelo exterior (Figura 02), pois as construções iniciais estavam desprovidas de espaço para a circulação vertical de ligação ou de acesso ao piso superior.

Figura 02: Crescimento em altura com volumes assimétricos e várias consolas

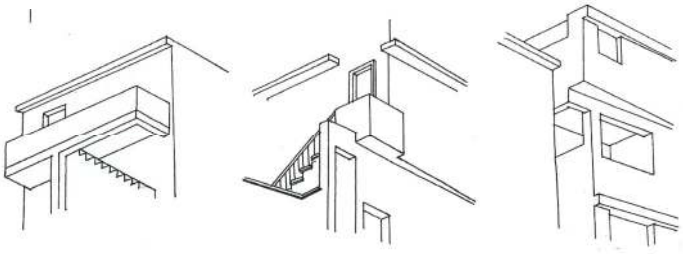


Elaboração dos autores.

Estes acrescentos dão origem a surpreendentes irregularidades estruturais, conferindo aos edifícios um aspeto caricato (Figuras 03 e 04).

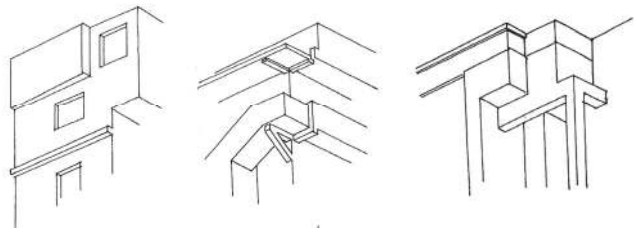
Estas irregularidades não devem ser lidas de forma negativa, mas por se terem consolidado ao longo do tempo, devem ser encaradas como fazendo parte de um património da arquitetura popular suburbana do final do séc. XX, importante pela mixigenação de duas culturas: a africana e a portuguesa.

Figura 03: Acrescentos graduais que resultam numa falta de rigor no alinhamento vertical da estrutura



Elaboração dos autores.

Figura 04: Acrescentos informais na estrutura dos pisos



Elaboração dos autores.

Constantemente somos surpreendidos por volumes arquitetónicos fora do habitual, superfícies com diversos acabamentos e cores o que não deixa de tornar o bairro num conjunto pitoresco, aliado ao facto de as pessoas trazerem ou estenderem as atividades domésticas para o espaço público frente às suas casas, como cozinhar, lavar roupa ou conviver e até mesmo cultivarem plantas proveitosas encostadas às fachadas (Antunes, 2010; Fernandes, 2013).

No entanto, o edificado do Bairro da Cova da Moura apresenta diversas fragilidades em termos condições de salubridade e conforto, de segurança contra incêndio, bem como de segurança estrutural sobretudo às ações horizontais.

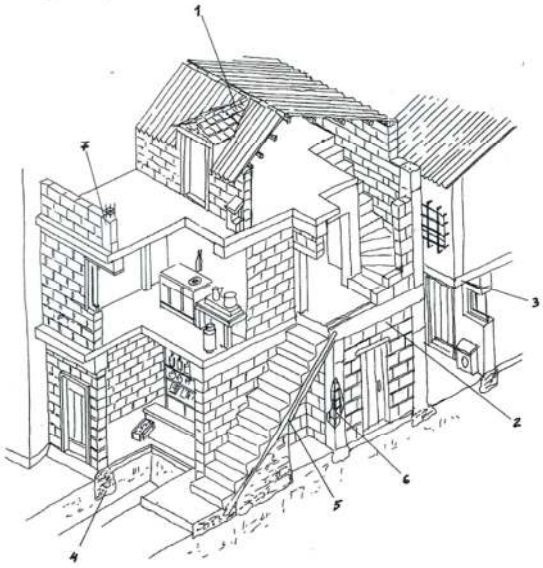
Os edifícios são, na sua generalidade, resultantes de autoconstrução sem a observância das boas práticas de construção, sem planeamento nem projeto. A qualidade construtiva dos edifícios é reduzida pois existe um evidente desvio dos processos construtivos convencionais e dos regulamentos. A coexistência de edifícios em estágios de construção diferentes é comum (Lnec, 2008).

A construção destes edifícios foi realizada com base nos conhecimentos empíricos rudimentares dos moradores, alguns deles trabalhadores da construção civil, recorrendo ao uso de materiais de refugo e a materiais sobrantes do seu lugar de trabalho.

As paredes dos edifícios são executadas em sistema de alvenaria simples, nem sempre confinada na parte superior (Fig. 5 - **2**). Existem consolas com balanço significativo, realizadas com laje aligeirada (Fig. 5.- **3**). As fundações, do que se pode observar, são pouco profundas e sem lintel de travamento (Fig. 5.- **4**). As

escadas são muitas vezes construídas sobre vigotas pré-fabricadas (Fig. 5.- **5**). Os elementos de betão armado, betonados em várias fases, têm armaduras e recobrimento insuficiente. Os edifícios têm maioritariamente coberturas inclinadas, existindo outros com coberturas planas e outros em que coexistem os dois tipos de coberturas. Têm variados tipos de revestimentos, nomeadamente chapas metálicas de zinco, plásticas, de fibrocimento e telhas cerâmicas estando as construções, por vezes, inacabadas (Figura 05).

Figura 05: Tipologia dos edifícios do Bairro da Cova da Moura



Elaboração dos autores.

A densa malha urbana, com intensificação da construção e desordenamento da mesma, a proximidade excessiva de alguns edifícios, que preenchem todos os interstícios, e a contiguidade de ruas estreitas fazem com que alguns edifícios sejam deficitários em iluminação natural e ventilação, o que favorece a insalubridade dos mesmos, bem como constituem fatores que minimizam as condições de segurança e podem favorecer a fácil propagação de um incêndio.

Anomalias resultantes de soluções construtivas desajustadas à tipologia dos edifícios, bem como sucessivas alterações introduzidas às soluções iniciais, nomeadamente pelo acrescento de pisos, muitos deles salientes da fachada fazem com que, em muitos casos, possa estar comprometida a segurança estrutural,

principalmente no que se refere a solicitações horizontais. Neste artigo são abordadas apenas as questões relativas à segurança estrutural dos edifícios do bairro.

Ainda que se localize numa zona de forte sismicidade, como é a região de Lisboa, convém referir que o Bairro da Cova da Moura se situa numa antiga colina de origem vulcânica, conhecida pela maior estabilidade do basalto à ação dos sismos. A título de exemplo refira-se que o Aqueduto das Águas Livres, que possui o maior conjunto em altura, de arcos de alvenaria e que se situa nas proximidades do bairro, nada sofreu com o terramoto de 1755, que arrasou a cidade de Lisboa. Salienta-se ainda que muitos dos bairros antigos, típicos de Lisboa, apresentam elevada vulnerabilidade ao sismo e ao fogo

São diversas as anomalias encontradas nestas construções que deverão merecer a atenção das entidades responsáveis no sentido de serem implementadas medidas que as tornem mais seguras.

Na época em que o bairro foi construído o sistema mais comum para a execução de pavimentos era a utilização de lajes aligeiradas de vigotas de betão pré-esforçado e abobadilha cerâmica. Num ambiente de grande escassez de recursos, este tipo de construção oferece algumas vantagens: não necessita de cofragem; poupa muito betão com a utilização dos elementos cerâmicos; a construção torna-se mais leve; a armadura a aplicar em obra é muito simplificada, pois a vigotas já vêm feitas de fábrica, bastando a aplicação de malha eletrosoldada.

Aparentemente este sistema é simples de executar, embora necessite de conhecimentos de engenharia pois, caso contrário, os efeitos podem ser adversos, especialmente em caso de sismo.

As principais anomalias que se podem observar nos edifícios resultam da opção da forma de construir, da deficiente execução, e do incorreto emprego dos materiais, aumentando a vulnerabilidades destes edifícios, perante a ocorrência de eventuais sismos.

Como anomalias resultantes da forma de construir, encontram-se vários exemplos, nomeadamente a execução de alvenarias sobre a laje, colocadas pelo lado interior dos elementos estruturais periféricos, não alinhadas com esses elementos, o que pode provocar flexões nas lajes (Figura 06).

Esta flexão é superior pelo fato de as extremidades das vigotas não estarem embebidas nas vigas de betão armado e ainda devido ao fato de as abobadilhas que estão colocadas sob o alinhamento das paredes não terem sido maciçadas.

Nota-se ao longo de todo o bairro que a construção dos edifícios é feita aplicando a laje sobre as paredes de alvenaria coroadas por vigas (como se tratasse de um "tampo de mesa").

Deste modo, as vigotas ultrapassam o alinhamento das paredes exteriores, ficando em balanço. A construção por cima do "tampo de mesa" de forma independente provoca o. Surgimento de cunhais sem pilares e paredes superiores sem qualquer alinhamento com o exterior (Figura 07).

Figura 06: Paredes não alinhadas com os elementos estruturais

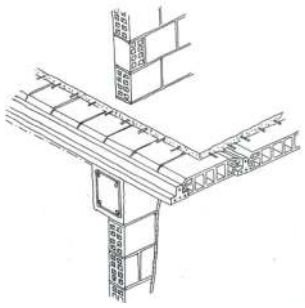
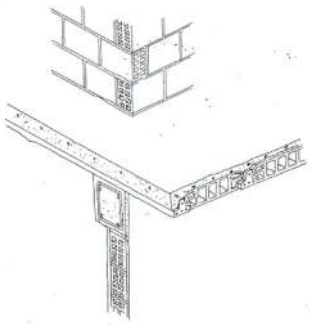


Figura 07: Lajes em balanço



Elaboração dos autores.

Existem exemplos que demonstram um desconhecimento da noção de as vigotas serem elementos tensionados, encontrando-se situações em que existe o risco de rotura por excessiva compressão. Quando se colocam vigotas a funcionar como consola, com as sobrecargas da parede na extremidade, faz-se aumentar o

esforço de compressão sobre as vigotas (ver Figura 08). Por falta de conhecimentos técnicos, observam-se situações em que não foram maciçados os elementos cerâmicos no alinhamento da parede.

A execução de lajes de cobertura era muitas vezes realizada colocando as vigotas paralelemente ao beirado e não perpendicularmente como é usual (Figura 09). Esta opção fica possivelmente a dever-se a um melhor ajustamento do comprimento da vigota a uma das dimensões do compartimento a cobrir. Como se sabe, as vigotas não estão preparadas para trabalhar lateralmente.

Figura 08: Lajes aligeiradas aplicada vigas na em consola

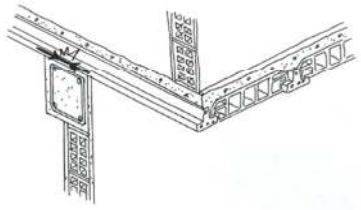
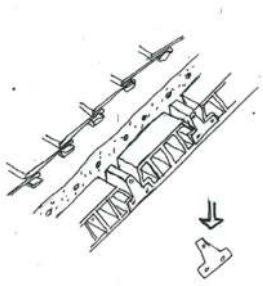


Figura 09: Colocação incorreta das cobertura



Elaboração dos autores.

Outra anomalia neste âmbito resulta da falta de conhecimento de que a camada de compressão deve estar francamente ligada às vigotas e às abobadilhas. Nestes edifícios verifica-se que não existe qualquer espaçamento na junta entre a parte superior da vigota e a parte superior da abobadilha, para além do facto de as abobadilhas terem uma altura "rasante" às vigotas (Fig. 10). Tudo isto pode provocar a delaminação do betão acima da abobadilha e consequente fragilidade da laje (Figura 11) (Mascarenhas, 2009).

Figura 10: Deficiente solidarização da abobadilha

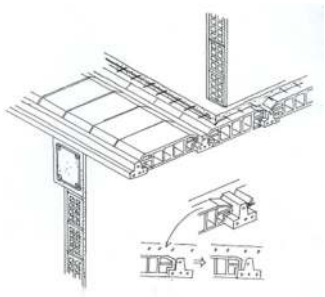
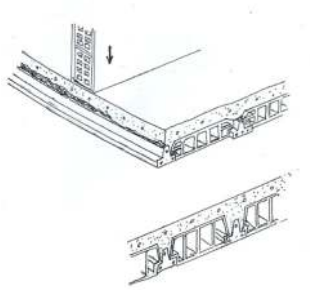


Figura 11: Delaminação do betão



Elaboração dos autores.

Como anomalias resultantes do incorreto emprego dos materiais verifica-se que, com o acrescento de pisos nas habitações, muitas escadas de acesso foram improvisadas com recurso a vigotas, cujas extremidades são precariamente inseridas nos elementos de betão adjacentes (Figura 12). Note-se que a espessura da camada de compressão do betão na parte inferior dos espelhos, quase não existe.

Na época em que o bairro foi erguido, o preço do varão de aço para betão era pouco acessível. Verifica-se que, nestas construções, os varões utilizados são do tipo liso, mas tal facto poderia ter sido minimizado, dobrando o ferro nas extremidades, o que na generalidade das construções não se verificou (Figura13).

Figura 12: Escadas executadas com recurso a vigotas

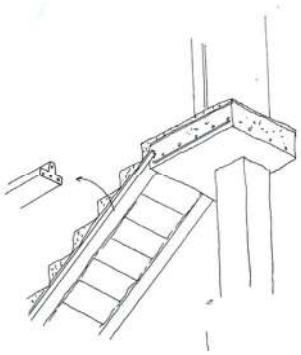
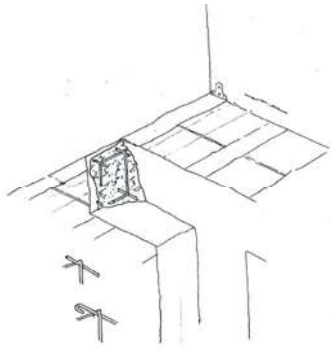


Figura 13: Inexistência de amarração dos varões nas extremidades



Elaboração dos autores.

São ainda visíveis casos em que as extremidades das vigotas se apresentam degradadas, face à falta de cuidado com que possivelmente foram manuseadas e aplicadas em obra. As extremidades das vigotas assumem um papel muito importante, pois na fase de fabrico quando são cortadas, na extremidade o aço, por ter uma tensão nula, aumenta de diâmetro provocando a ancoragem do varão ao betão.

Verifica-se ainda que as betonagens foram realizadas com um betão de fraca qualidade, manifestada pela existência de zonas em que é visível o excesso de agregados face à quantidade de pasta de cimento, e com deficiente compactação que se nota pelos chochos e vazios encontrados nos elementos estruturais e pela segregação do betão (Figura 14).

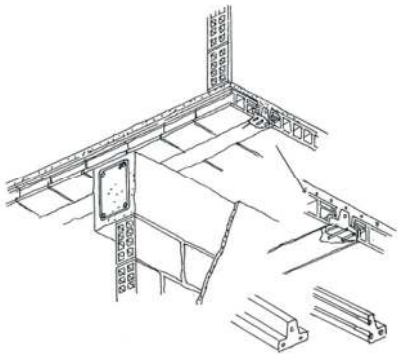
Em muitos casos verifica-se que os topos das lajes apresentam os septos das abobadilhas completamente abertos permitindo, durante anos, a entrada da água e a sua infiltração no interior dos elementos estruturais, provocando alguma degradação (Figura 15).

Figura 14: Deficiências de betonagem do topo das lajes



Elaboração dos autores.

Figura 15: Falta de preenchimento



Face ao exposto, prevê-se um mau desempenho face à ação de eventuais sismos por parte destes edifícios.

Uma das razões dessa vulnerabilidade ter a ver com o facto de as lajes aligeiradas simplesmente assentarem sobre as vigas, e as vigotas não estarem

embebidas nas mesmas. Em caso de sismo, poderá verificar-se o deslizamento da laje sobe a viga (Figura 16).

Acresce o fato de que as lajes não possuírem contraventamento (tarugos). A ausência destes elementos pode provocar o esmagamento das abobadilhas quando sujeitas a ações horizontais (Figura 17).

Figura 16: Possibilidade de deslizamento da laje

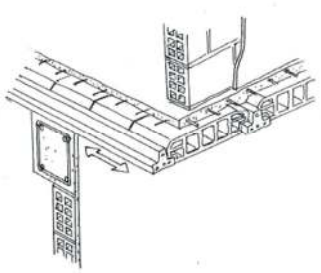
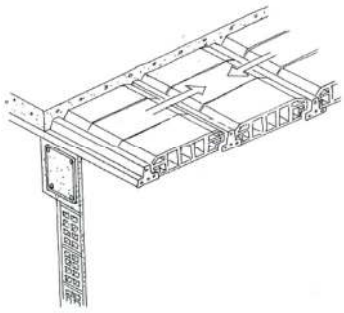


Figura 17: Ausência de tarugos



Elaboração dos autores.

Durante um sismo há grande probabilidade de ocorrência de um incêndio. Estas lajes, pelo fato de não terem qualquer revestimento na face inferior, por exemplo estuque, encontram-se desprotegidas. Esta proteção é fundamental, uma vez que os varões de pré-esforço são muito vulneráveis às altas temperaturas.

Conclusão

Os edifícios do Bairro da Cova da Mora, são testemunho de uma forma de auto construção com poucos recursos, apresentam algumas deficiências estruturais identificadas ao longo deste artigo, muitas das quais resultantes do processo construtivo e evolutivo dos edifícios.

A consolidação deste núcleo urbano, com forte cultura de origem africana, de que esta forma de construir é o reflexo, deverá ser encarada com pressupostos diferentes que conduzam à sua preservação.

As anomalias identificadas poderão ser minimizadas, pois não se podem dissociar as anomalias observadas neste bairro das muitas que se encontram noutros bairros antigos, nos quais a vulnerabilidade do seu edificado é ainda maior e até pouco conhecida.

Na atual conjuntura económica, em vez de se optar por uma intervenção radical de renovação urbana, como se perspectiva, poderia ser mais sensata a opção por uma reabilitação cuidada que, com pouco recursos, conseguisse melhorar as condições deficientes do bairro, tornando-o mais seguro e com melhor qualidade de vida para os seus habitantes, uma vez que este bairro tem padrões de sustentabilidade superiores aos encontrados em várias zonas da capital.

Referências

ANTUNES, R. M**. Espaço Comum para a Cova da Moura**, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Arquitetura da Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2010.

FERNANDES; N. S. S. **Qualificação Urbana como valorização da imagem da cidade – Contributo do espaço público para a inserção sócio-urbanística**, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Arquitetura da Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2013.

GODINHO, M. A.S. **Cova da Moura – Bairro histórico em evolução**, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 2010

LNEC, **Colaboração do LNEC na análise das condições de habitabilidade do edificado do Bairro da Cova da Moura**. Avaliação das necessidades de reabilitação do edificado. Relatório 366/2008, DED/NAU, Lisboa, 2008. ("in" http://migre.me/pvYTt). Consultado em 8 de Julho de 2014.

MASCARENHAS, J. **Sistemas de Construção**. Vol XI – O betão armado, cofragens de edifícios. Livros Horizonte, Lisboa.2009.

RODRIGUES, E. E.S. P. **Cova da Moura: por dentro e por fora.** Dissertação de Mestrado, Faculdade de Psicologia e de Ciências da Educação da Universidade do Porto, Porto, 2009.

SANTOS, C**, A. G. A (re) qualificação sócio-urbanística do Bairro Alto da Cova da Moura: os diferentes olhares institucionais.** Dissertação de Mestrado, ISCTE-IUL, Lisboa, 2008

Remoção de nutrientes e matéria orgânica de efluente de laticínio por sistema alagado construído híbrido em Londrina - Paraná

Removal of nutrients and organic matter from dairy effluent by flooded built hybrid system in Londrina - Paraná

Mariane Libório Cardoso[1]
Aline Hanny Peralta[1]
Danielle Martins Cassiano de Oliveira[1]
Prof. Dr. Ricardo Nagamine Costanzi[1]

[1] Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, ricardocostanzi@gmail.com

Submetido em 10/03/2015
Revisado em 09/04/2015
Aprovado em 24/04/2015

Resumo: O tratamento de efluentes industriais é de suma importância para evitar a poluição dos corpos hídricos. Efluentes de laticínios podem ser considerados altamente poluentes, pois possuem carga elevada de matéria orgânica e nutrientes. Este artigo apresenta o desenvolvimento de um sistema alagado construído (SAC) híbrido em escala de bancada para tratamento do efluente de uma indústria de laticínios localizada em Londrina, PR. O sistema foi operado durante 90 dias com foco na avaliação da eficiência de remoção de nutrientes e matéria orgânica. O sistema trabalhou com ciclos de 24 horas com uma carga de aplicação de DQO de 3,0 $Kg.d^{-1}$. A eficiência de remoção para a DQO variou de 79 até 97 %, para o NTK variou de 81 a 100% e para P-total variou de 73% a 100%. A análise estatística indicou que o SAC de fluxo vertical tem pouca eficiência de remoção, porém diminui a variabilidade e aumenta a confiabilidade do sistema.

Palavras-chave: sistema alagado construído, nutrientes eutrofizantes, matéria orgânica, efluente de laticínios.

Abstract: The treatment of industrial wastewater is of paramount importance to prevent pollution of water bodies. Wastewater from dairy industries are highly polluting because they have high load of organic matter and nutrients. This paper presents the development of a hybrid constructed wetland system in bench scale for the treatment of wastewater from a dairy industry located in Londrina, PR. The system was operated for 90 days with focus on the evaluation of the nutrient and organic matter removal efficiency. The system worked with 24 hour cycles with an organic load (COD) of 3.0 $Kg.d^{-1}$. The removal efficiency of COD was in the range of 79 – 97%; the removal efficiency of NKT was in the range of 81 – 100% and the removal efficiency of COD of phosphorus was in the range of 73% – 100%. Statistical tests showed that vertical flow wetland showed little removal efficiency, but it decreases the variability and increases system reliability.

Key-words: constructed wetlands system, eutrophying nutrients, organic matter, dairy effluent.

Introdução

A qualidade dos recursos hídricos tem sido muito discutida no Brasil, principalmente, devido à escassez de água na região Sudeste. Tundisi (2008) apresenta vários fatores associados a esse problema, dentre eles destaca-se a associação entre o aumento da demanda de água com a falta de gestão hídrica que permita uma abordagem sistêmica, integrada e preditiva.

Desta forma, o tratamento de efluentes industriais é de suma importância no aspecto de preservação da qualidade de água. Pois dependendo da qualidade do efluente, o corpo receptor não tem a capacidade de se autodepurar. Efluentes de indústrias de laticínios têm alto potencial poluidor, pois a carga de matéria orgânica de seus derivados é muito alta e há excesso de nutrientes provindos de detergentes e produtos químicos das limpezas dos equipamentos em indústrias alimentícias. (Gomes, 2006)

O tratamento biológico é o mais adequado para tratar esse tipo de efluente, pois degrada a matéria orgânica e remove os nutrientes, como nitrogênio e fósforo. SAC(s) vem sendo amplamente estudados para diversos tipos de águas residuárias, por serem de fácil manutenção, ter baixo custo de implantação comparado a tratamentos convencionais e serem capaz de remover nutrientes eutrofizantes, além da matéria orgânica (Abrahão, 2006; Matos, Abrahão & Pereira, 2011). O bom desempenho do SAC é devido a processos físicos-químicos e biológicos que ocorrem no sistema pelas interações entre o efluente com a planta, os microrganismos presentes, o meio suporte e o ambiente.

Segundo Begosso (2009), para aumentar a eficiência dos processos que ocorrem no sistema, pode-se acoplar dois ou mais SAC(s) de fluxos diferentes, visando melhorar a qualidade do efluente por processos distintos e complementares.

As principais vantagens associadas a este tipo de sistema de tratamento são: a redução de odores provenientes do efluente, a necessidade de espaços menores quando comparado a tratamentos convencionais e o menor custo na operação e

manutenção desses sistemas. (Wallace, 2010). Por esse fato, objetivou-se estudar a eficiência de um sistema híbrido de sistemas alagados construídos na remoção de matéria orgânica e nutrientes de uma indústria de laticínios.

Método

O experimento foi realizado na Universidade Tecnológica Federal do Paraná - *Campus* Londrina, sendo realizado no período de 90 dias (novembro de 2014 a fevereiro de 2015). O sistema foi confeccionado com duas caixas de polipropileno de dimensões de 0,36 x 0,20 x 0,26 m. Cada caixa foi conectada em série (adaptado de Begosso, 2009), sendo a primeira um SAC de fluxo horizontal contendo como substrato brita no 0 (malha de 12mm) com a espécie vegetal *Cyperus papyrus nanus* (mini papiro ou papiro anão) plantada; o segundo SAC de fluxo vertical contendo areia média (de 0,42 mm a 1,2 mm) com a espécie vegetal *Heliconia psittacorum* (helicônia-papagaio).

As caixas foram envolvidas com papel alumínio para evitar a proliferação de algas e os sistemas foram interligados por tubulações. O dimensionamento do sistema foi associado a uma taxa média de aplicação de DQO – Demanda Química de Oxigênio (Kadlec & Wallace, 2009).

O sistema foi alimentado em ciclos de 24 horas com volume de 8 Litros de efluente clarificado do sistema de flotação por ar dissolvido de indústria de laticínio localizada na cidade de Londrina, Paraná.

Neste local são produzidos leite do tipo UHT (*Ultra High Temperature*), leite pasteurizado, bebida láctea pasteurizada, queijo tipo mussarela, leite em pó, soro de leite e leite concentrado. O descarte de soro não é realizado na estação de tratamento de efluentes (ETE) da indústria devido à alta carga orgânica característico desse resíduo.

As análises das variáveis foram realizadas no Laboratório de Saneamento e no Laboratório de Tecnologias de Conversão de Energia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – *Campus* Londrina de acordo com o *Standard*

Methods for The Examination of Water and Wastewater (APHA, 2012) em conformidade com o quadro 01.

Quadro 01: Metodologias de análise

Análise	Referência	Interferências
Demanda Química de Oxigênio (DQO) ($mg.L^{-1}$)	Método 5220 A	Passível de interferências com o Cloreto.
Nitrogênio Total *Kjeldahl* (NTK) ($mg.L^{-1}$)	Método 4500-Norg B	Grandes concentrações de sais podem elevar a temperatura de digestão acima de 400ºC, com pirólise do Nitrogênio.
Fósforo Total (P-total) ($mg.L^{-1}$)	Método 4500-P A	Arsenatos reagem com o molibdato produzindo uma cor similar ao azul.

Fonte: APHA (2012)

Para avaliar diferenças significativas entre as eficiências global, intermediária e final dos SAC(s) de fluxo horizontal e vertical foi utilizado o teste estatístico de análise de variância ANOVA e pós-teste de Kruskal-Wallis, com significância $p<0,005$. Este teste também avaliou a importância do sistema em série para a remoção de nutrientes e matéria orgânica com o SAC de fluxo vertical. As análises estatísticas foram realizadas com o auxílio do *software* BioEstat versão 5.0.

Resultados e Discussão

O SAC foi utilizado como tratamento secundário do efluente da Indústria de laticínios basicamente composto: de água; de produtos químicos (ácidos e alcalinos) utilizados no procedimento de limpeza e desinfecção de superfície e equipamentos (Forni, 2007), de resíduos da produção de leite e de algum vazamento ocorrido no processo, com possibilidade de aumento de resíduos de gordura.

O sistema de tratamento da indústria (flotação por ar dissolvido seguido de sistema de lodos ativados) apresentava problemas, principalmente quanto à remoção de nutrientes para atendimento a Resolução CONAMA 357 (Brasil, 2005).

O uso de SAC híbrido neste estudo visou avaliar a possibilidade de implantação na ETE da indústria de laticínios como um sistema de tratamento complementar ou como substituição do sistema de lodos ativados para minimizar o consumo energético e aumentar a eficiência de remoção de nutrientes.

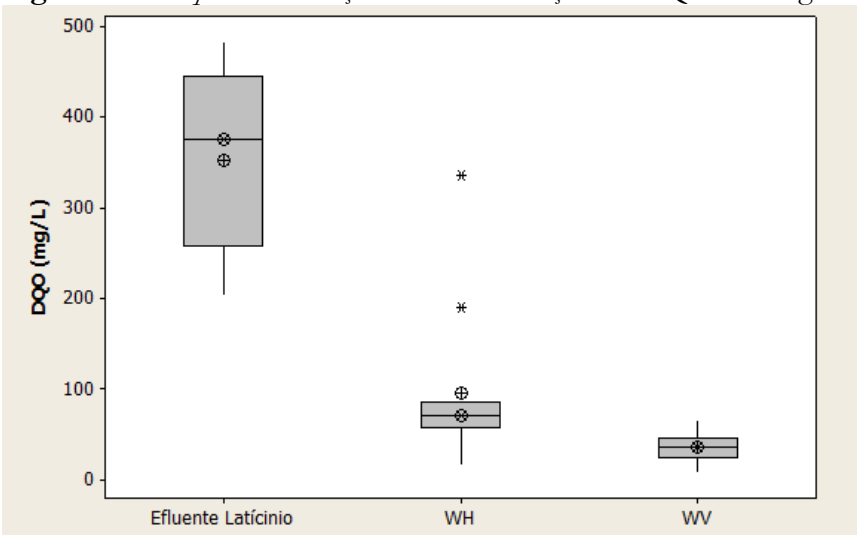
As variáveis DQO, NTK e P-total foram avaliadas na entrada, após o SAC horizontal e no final do sistema (após o SAC vertical) durante o tempo de aproximadamente 90 dias.

Remoção de Demanda Química de Oxigênio (DQO)

A concentração de matéria orgânica medida na forma de Demanda Química de Oxigênio variou de 200 a 460 $mg.L^{-1}$ na entrada do sistema de SAC, dependendo das características operacionais que foi gerado pelo efluente coletado na indústria de laticínios.

O efluente de laticínio possui uma variabilidade relativamente pequena na sua composição, com coeficiente de variação para a DQO igual a 0,27 e média de concentração de 375±100 $mg.L^{-1}$. Na figura 01 podem ser observadas as variações de DQO para o efluente bruto (efluente de laticínio), SAC horizontal (WH) e SAC vertical (WV).

Figura 01: *Box plot* da variação da concentração de DQO ao longo do sistema.



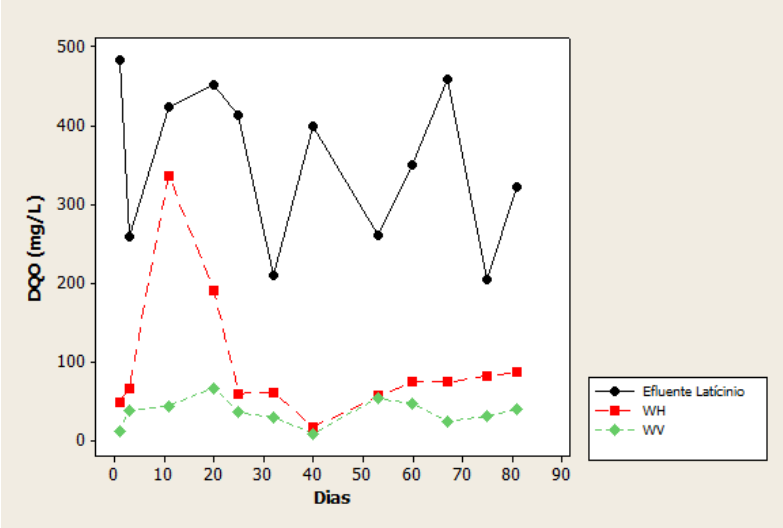
Elaborado pelos autores.

O sistema de fluxo horizontal apresentou variabilidade maior que a do efluente com coeficiente de variação igual a 1,23 e média igual a 70±86 $mg.L^{-1}$. Porém, em duas semanas amostrais, a concentração da amostra tratada no SAC horizontal extrapolou a sua variabilidade normal, provavelmente pelo arraste de material orgânico.

Nesses casos, o sistema de fluxo vertical regularizou e diminuiu a variabilidade das concentrações de DQO finais. O SAC vertical apresentou um coeficiente de variação para DQO muito menor do que o horizontal com coeficiente de variação igual a 0,45 e média igual 37±16 $mg.L^{-1}$.

Na figura 02 podem ser observadas as variações de DQO ao longo do tempo para o efluente bruto (efluente de laticínio), SAC horizontal (WH) e SAC vertical (WV).

Figura 02: Gráfico de concentração de DQO nas amostras de entrada, intermediária e saída.



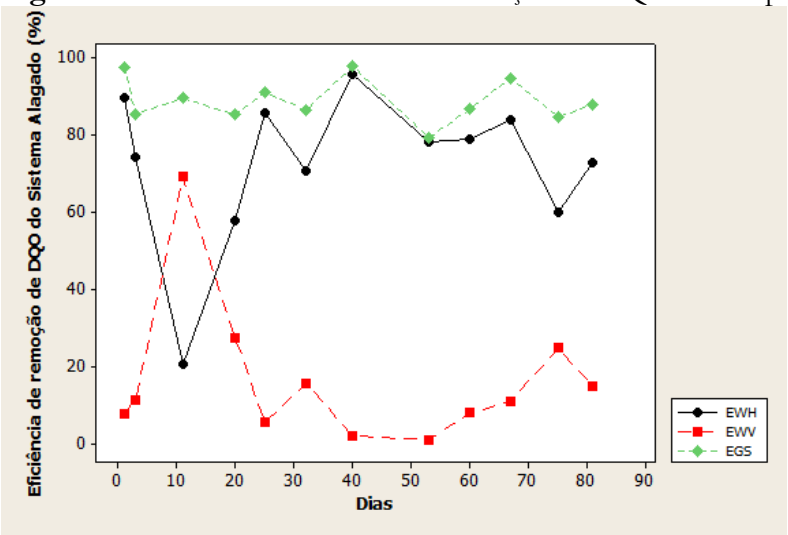
Elaborado pelos autores.

Durante o período de tratamento, a eficiência de remoção do sistema apresentou valores de DQO menores que 67 $mg.L^{-1}$, porém entre os dias 15 e 30, o SAC de fluxo horizontal apresentou valores de DQO superiores a este valor, ressaltando a importância do sistema híbrido, ou seja, associado ao SAC vertical.

O SAC de fluxo vertical apresentou valores relativamente baixos de DQO, com o menor valor correspondente a 8 $mg.L^{-1}$. Nota-se que a remoção de DQO ocorre principalmente no primeiro SAC de fluxo horizontal. O SAC de fluxo vertical tem a função destacada como complemento para diminuição da variabilidade de DQO.

Na figura 03 é expressa a eficiência global do sistema e a contribuição dos SACs horizontal (EWH) e vertical (EWV) para obtenção desta eficiência total. Observa-se que a eficiência global (EGS) nos 90 dias variou entre 73,1 a 97,7%.

Figura 03: Gráfico da eficiência de remoção de DQO nas etapas do sistema.



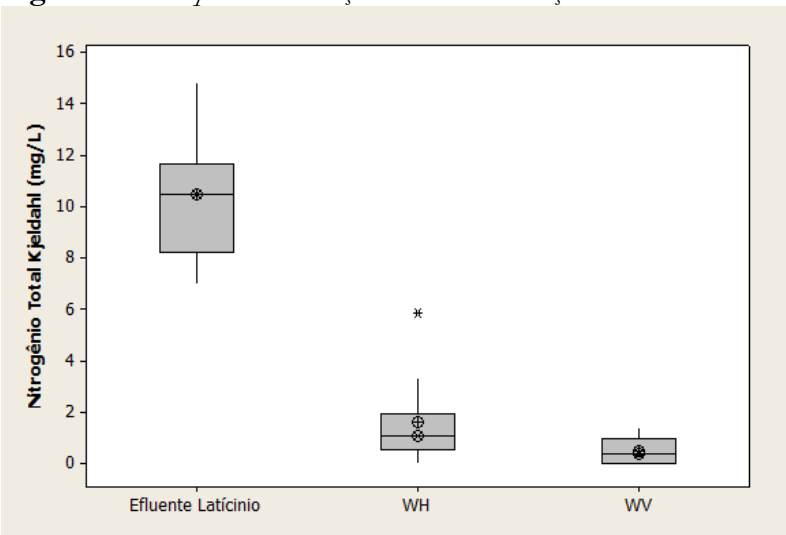
Elaborado pelos autores.

A contribuição global da eficiência do SAC horizontal para o sistema variou entre 20,5 a 96%, porém a maioria dos valores foi predominantemente maior que 60%. Em contrapartida, a contribuição do SAC vertical para a eficiência global apresentou valores entre 4,4 a 86,9%, sendo que a maioria dos valores permaneceu menor que 30%.

Remoção de Nitrogênio (NTK)

A figura 04 representa a variação da concentração do NTK durante os 90 dias do experimento. O efluente de entrada apresentou baixa variabilidade com valor de 0,23 e concentrações entre 7 a 15 mg.L^{-1}. A concentração média de NTK foi de 11±10 mg.L^{-1}.

Figura 04: *Box plot* da variação da concentração de NTK ao longo do sistema.



Elaborado pelos autores.

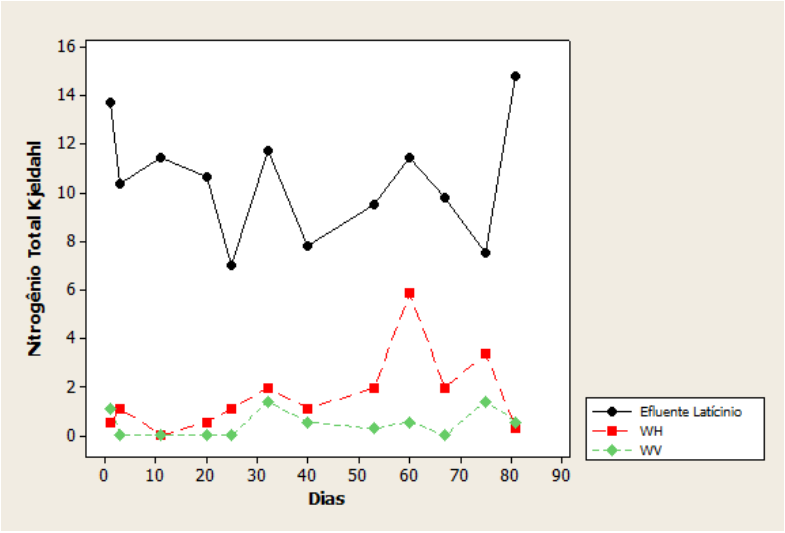
As amostras do efluente intermediário apresentaram um coeficiente de variação alto com valor de 1,44, devido a uma amostra com concentração mais elevada de 6 mg.L^{-1}. Porém o valor médio de NTK no SAC horizontal foi de 1,12±1,62 mg.L^{-1}. O SAC de fluxo vertical apresentou valor de concentração médio de 0,42±0,55 mg.L^{-1}.

O *Box plot* da concentração de NTK ao longo do sistema de tratamento por SAC de fluxo horizontal e vertical indica comportamento semelhante ao da DQO, ou seja, apresentam valores de máximo e mínimo distantes da média e no SAC horizontal a variabilidade aumenta.

A concentração de NTK do efluente da indústria de laticínios variou de acordo com as características do efluente coletado. Na figura 05, observa-se que a remoção de NTK intermediária (SAC fluxo horizontal) e de saída (SAC fluxo

vertical) variaram em conformidade com a concentração de entrada em pontos de pico.

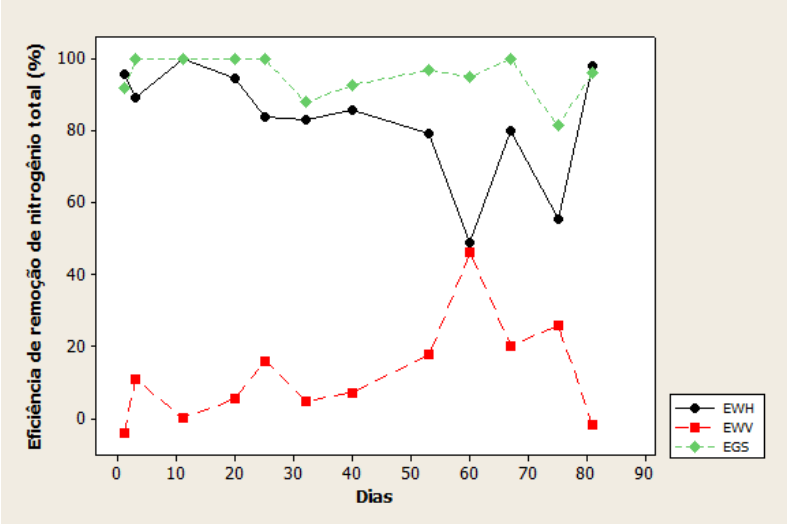
Figura 05: Gráfico da variação na concentração de NTK nas amostras de entrada, intermediária e saída.



Elaborado pelos autores.

A eficiência do SAC híbrido conectado em série pode ser considerada elevada para a remoção de NTK, com a eficiência global variando de 81,5 a 100% (figura 06).

Figura 06: Gráfico da eficiência de remoção de NTK nas etapas do sistema.



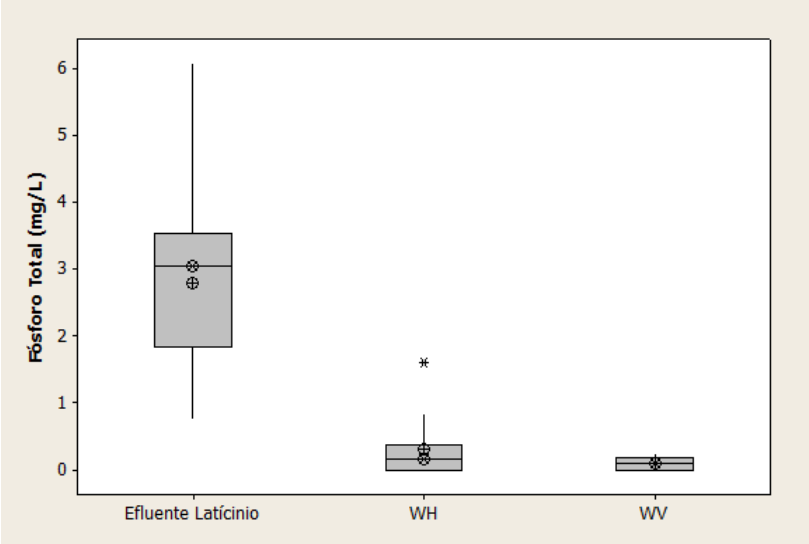
Elaborado pelos autores.

Mendonça *et. al.* (2012) retrata uma remoção menor para um sistema de fluxo horizontal tratando efluente de laticínio, com a eficiência entre 46 a 79%. Já Silva (2010) obteve uma eficiência de remoção de NTK similar ao sistema híbrido estudado, com um sistema de fluxo subsuperficial horizontal a eficiência foi de 88,56%. Novamente a eficiência de remoção do SAC de fluxo horizontal foi maior que a do SAC vertical.

Remoção de Fósforo (P-total)

No efluente de laticínio as concentrações de P-total tiveram grande variação (figura 07). As concentrações de P-total na entrada variaram de 0,75 a 6,10 $mg.L^{-1}$, sendo a concentração média de 3,06±1,46 $mg.L^{-1}$. O coeficiente de variação na entrada foi baixo com valor de 0,48.

Figura 07: *Box plot* da variação da concentração de P-total ao longo do sistema.



Elaborado pelos autores.

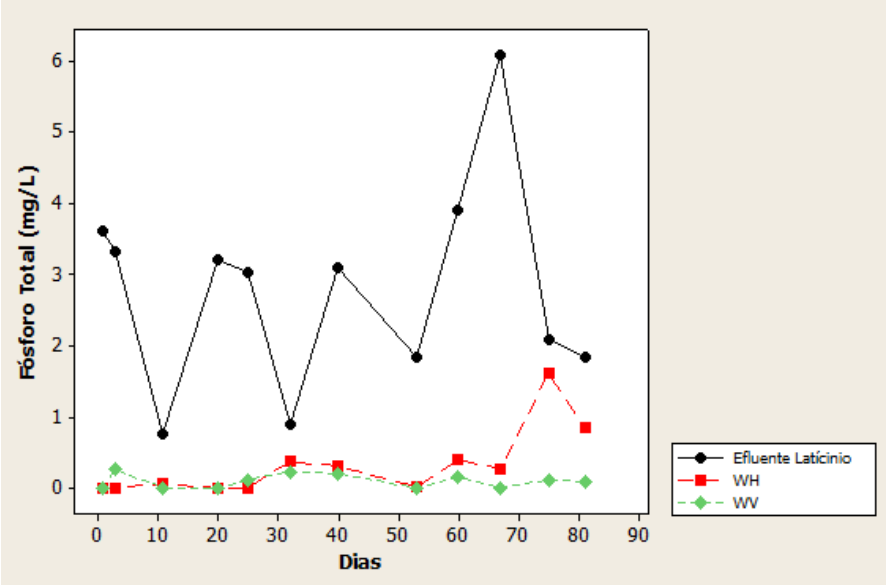
No SAC horizontal a concentração variou de 0 a 1,61 $mg.L^{-1}$ e a variabilidade desse ponto do sistema foi de 1,49. A concentração média foi de 0,16±0,48 $mg.L^{-1}$.

Na saída do SAC vertical a concentração teve uma variação menor comparada ao SAC horizontal, de 0 a 0,26 $mg.L^{-1}$, com o valor médio de 0,1±0,1 $mg.L^{-1}$. O coeficiente de variação nesse ponto para P-total foi de 1,02.

A variação na concentração de P-total no sistema ocorreu de forma similar a DQO e ao NTK.

Os valores de concentração de P-total no efluente de latícinios alcançaram valores de até 6 $mg.L^{-1}$ (figura 08). Porém, como nutriente limitante da eutrofização de corpos hídricos, sua remoção é de suma importância no tratamento de efluentes. Assim, o SAC de fluxo horizontal e vertical removeram significativamente o P-total presente neste tipo de efluente visando atender padrões estabelecidos pela Resolução CONAMA 357 (BRASIL, 2005) que determina uma concentração de 0,02 $mg.L^{-1}$ de fósforo total como padrão de qualidade de corpos hídricos.

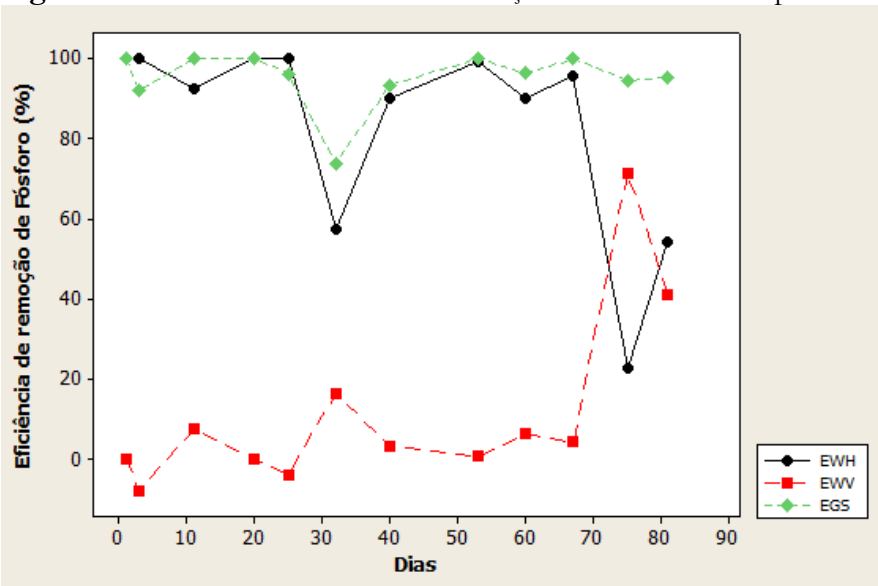
Figura 08: Gráfico da variação de concentração de P-total nas amostras de entrada, intermediária e saída.



Elaborado pelos autores.

A remoção de P-total apresentado na figura 09 indica que a melhor eficiência de remoção prevaleceu no SAC horizontal, com a eficiência global de até 100% quando considerado o SAC híbrido. Mendonça *et al.* (2012) apresentou eficiência média na remoção do fósforo de 34,3%.

Figura 09: Gráfico da eficiência de remoção de P-total nas etapas do sistema.



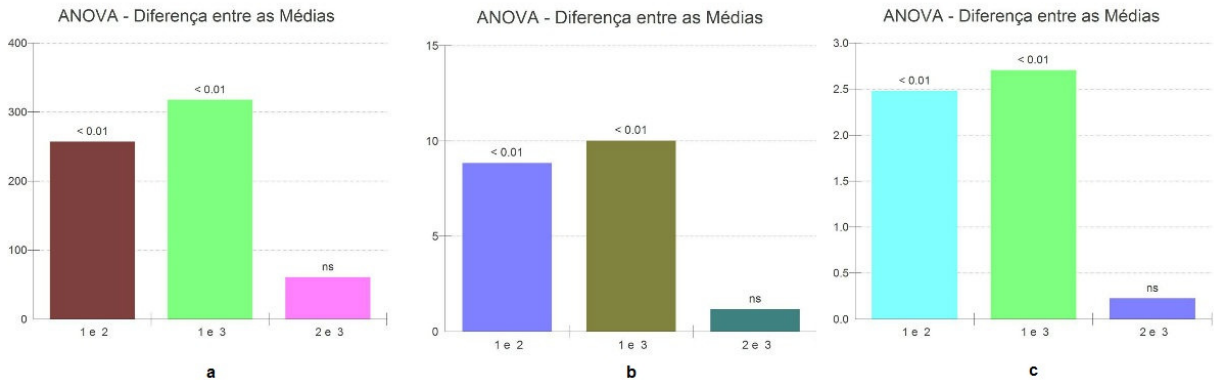
Elaborado pelos autores.

A remoção de nutrientes e de matéria orgânica do efluente de laticínio tratado por sistema alagado construído de fluxo horizontal seguido de um fluxo vertical apresentou resultados de remoção de DQO e nutrientes elevadas durante os 90 dias em que o experimento foi operado. Este sistema alcançou eficiências máximas próximas a 100% nas remoções de DQO, NTK e P-total.

Comparação da eficiência de remoção da DQO, NTK e P-TOTAL

Para verificar a diferença entre a remoção da DQO, NTK e P-total, aplicou-se a análise de variância pelo teste de Kruskal-Wallis, pois as médias eram desiguais o que indica a necessidade de teste não-paramétrico. Na figura 10 pode-se observar a semelhança no comportamento de remoção dos 3 fatores, sendo que 1 representa o efluente da indústria de laticínio, 2 o SAC de fluxo horizontal e 3 o SAC de fluxo vertical.

Figura 10: a) Diferença da eficiência de remoção de DQO no sistema; b) Diferença da remoção de NTK no sistema e c) Diferença de remoção de P-total no sistema.



Elaborado pelos autores.

Entre 1 e 2 e 1 e 3, o valor de p é menor que 0,05, ou seja, existe diferença significativa entre as concentrações das amostras. Já a comparação entre 2 e 3 indica que não há diferença significativa nas amostras coletadas no ponto intermediário (SAC de fluxo horizontal) e na saída do sistema (SAC de fluxo vertical). Nesse caso, estatisticamente, o fluxo vertical seria desnecessário para o sistema global.

As análises estatísticas indicaram que não houve diferença significativa entre as remoções de nutrientes e matéria orgânica entre o SAC de fluxo horizontal e o SAC de fluxo vertical, ou seja, o SAC horizontal que utiliza brita zero como substrato e onde foi cultivada a espécie *Cyperus papyrus nanus*, foi responsável por remover a maioria dos contaminantes do efluente e seu papel no tratamento global foi predominante. Já o SAC de fluxo vertical, composto de areia com a espécie *Heliconia psittacorum* apresentou valores de remoção auxiliar não significativa.

Porém, ao avaliar as variações do sistema, observa-se que a presença do SAC vertical é importante como fator de segurança e confiabilidade do SAC híbrido, pois a variação dos valores de DQO, NTK e P-total no SAC vertical são menores que no SAC horizontal. Desta forma, valores extremos pontuais no SAC horizontal podem ser regularizados e minimizados no SAC vertical.

Conclusão

Este trabalho apresentou como principais conclusões:

- A inexistência de diferença significativa entre os valores de DQO, NTK e P-total após a remoção ocorrida no SAC horizontal com os valores apresentados no SAC vertical;

- O sistema de SAC horizontal seguido de SAC vertical apresentou valores de remoção de DQO, NTK e P-total elevados, comparado a outros estudos similares, o que promove possibilidade de tratamento por SAC híbrido no tratamento de efluentes de indústrias de laticínios visando minimizar o descarte de nutrientes em corpos hídricos*;*

- A análise do sistema indicou que apesar da baixa eficiência de remoção global do SAC de fluxo vertical, este compartimento é importante no sistema híbrido para diminuir a variabilidade e aumentar a confiabilidade do processo de tratamento.

- As espécies de plantas utilizadas foram eficientes na remoção de nutrientes e matéria orgânica, além de necessitarem de pouca manutenção durante o período do estudo.

Referências

ABRAHÃO, S. S. **Tratamento de água residuária de laticínios em sistemas alagados construídos cultivados com forrageiras.** 2006. 110f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006.

AMERICAN Public Health Association. **Standard Methods For The Examination of Water and Wastewater.** 22 ed. Washington: APHA, 2012.

BEGOSSO, L**. Determinação de parâmetros de projeto e critérios para dimensionamento e configuração de *wetlands* construídas para tratamento de água cinza.** Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2009.

BRASIL. Resolução CONAMA Nº 357 de 17 de março de 2005. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil.** Poder Executivo, Brasília, DF, 18 mar. 2005. Nº 053, p. 58-63.

FORNI, R. **Projeto mecânico de um sistema de higienização CIP (Cleaning in Place).** 2007. 114f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade de São Paulo Escola Politécnica, São Paulo, 2007.

GOMES, A. L. **Análise técnico-econômica de filtro anaeróbio utilizado para o tratamento de efluentes líquidos de uma indústria de laticínios: estudo de caso.** 2006. 117f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte, 2006.

KADLEC, R. H.; WALLACE, S. D. **Treatment Wetlands.** 2. Ed., 2009.

MATOS, A. T.; ABRAHÃO, S. S.; PEREIRA, O. G. Desempenho agronômico de capim napier (*pennisetum purpureum*) cultivado em sistemas alagados construídos**. Engenharia na agricultura**, Viçosa - MG, v.19, n.5, p. 469-477 p, setembro / outubro. 2011. Disponível em: < http://migre.me/pDvmN >. Acesso em: 01 de outubro de 2014.

MENDONÇA, H. V.; RIBEIRO, C. B. M.; BORGES, A. C.; BASTOS, R. R. Remoção de nitrogênio e fósforo de águas residuárias de laticínios por sistemas alagados construídos operando em bateladas. **Revista Ambi-Agua**, Taubaté, v. 7, n. 2, p. 75-87, 2012. Disponível em: <http://migre.me/pDvk9 >. Acesso em: 15 de outubro de 2014.

SILVA, A. C. F. M**. Tratamento de resíduos líquidos de laticínios em Reator Anaeróbio Compartimentado seguido de Leitos Cultivados**. 2010. 166f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Agrícola, UNICAMP, Campinas/SP, 2010.

TUNDISI, J. G. Recursos hídricos no futuro: problemas e soluções. **Revista Estudos Avançados.** São Paulo, v. 22, n. 63, 2008.

WALLACE, S. D. Application of Constructed Wetlands for Industrial Wastewater Treatment. In: 12th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control: Venice, **Anais eletrônicos**… Italy, 2010. Disponível em: <http://migre.me/pDvlv >. Acesso em: 20 de Outubro de 2014.

Alterações histoquímicas e micromorfológicas em folhas de plantas expostas ao benzeno

Histochemical and micromorphological changes in leaves of plants exposed to benzene

Ms. Thales Augusto de Miranda Medeiros[1]
Profa. Dra. Valquíria de Campos[2]
Profa. Dra. Letícia Silva Souto[1]

[1] Universidade Federal de São Carlos, tammedeiros@ufscar.br
[2] Universidade Estadual Paulista

Submetido em 09/03/2015
Revisado em 01/04/2015
Aprovado em 15/04/2015

Resumo: O meio mais afetado pela contaminação antrópica é o solo. A evaporação de derivados de petróleo é um importante processo de impacto negativo sobre o ambiente. O objetivo foi avaliar as respostas indicadoras de distúrbios de *Brachiaria brizantha* (A. Rich.) Stapf, *Impatiens walleriana* Hook. f. e *Pteris vittata* L. quando expostas ao benzeno. Para avaliar os distúrbios foram efetuados ensaios de injeção direta e nebulização de benzeno sobre as espécies. *Brachiaria brizantha* e *P. vittata* apresentaram intenso acúmulo do peróxido de hidrogênio e morte celular nas folhas, já *I. walleriana* foi a espécie que comportou-se de maneira oposta, possivelmente, por apresentar um eficiente sistema antioxidante. As três espécies apresentaram efeitos fitotóxicos, como alteração na densidade estomática e no tamanho dos estômatos. As características micromorfológicas interferem na sensibilidade e resistência do vegetal, sendo que *I. walleriana* mostrou-se sensível a nebulização de benzeno e *B. brizantha* e *P. vittata* foram mais resistentes, pois evitaram a absorção do benzeno na atmosfera.
Palavras-chave: Análise foliar. *Impatiens walleriana*. *Brachiaria brizantha*. *Pteris vittata*.

Resumen/abstract: The environment most directly affected by human contamination is the soil. Evaporation of oil derived is also an important negative impact on the environment. The aim was to evaluate the indicator responses disorders of *Brachiaria brizantha* (A. Rich.) Stapf, *Impatiens walleriana* Hook. F. and *Pteris vittata* L. when exposed to benzene. To assess to disorders were made direct injection testes and benzene mist on the species. *Brachiaria brizantha* and *P. vittata* showed intense accumulation of hydrogen peroxide and cell death in the leaves, as *I. walleriana* was the species that behaved in the opposite way, possibly by having an efficient antioxidant system. The three species showed phytotoxic effects, such as changes in stomatal density and stomatal size. The micromorphological characteristics influence the sensitivity and plant resistance, and I. walleriana was sensitive to benzene misting and *B. brizantha* and *P. vittata* were more resistant because it avoided the benzene absorption in the atmosphere.
Key-words: Leaf analysis. *Impatiens walleriana*. *Brachiaria brizantha*. *Pteris vittata*.

Introdução

Em um derramamento de gasolina as atenções para a contaminação do aquífero freático voltam-se para a presença de hidrocarbonetos monoaromáticos como o benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos (BTEX). No Brasil, a migração de BTEX para zona saturada tem sido potencializada em razão da adição de 20 a 25% de etanol na gasolina (Courseuil et al., 1998), que por ser um composto oxigenado, totalmente solúvel em água e também em fase líquida não aquosa, ou seja, solúvel também em substância lipofílica, influencia na magnitude e extensão da solubilidade de hidrocarbonetos tóxicos (cosolvência) em uma contaminação de petróleo (Kaipper, 2003). Os hidrocarbonetos aromáticos apresentam elevada mobilidade em sistemas solo-água representada pelo menor coeficiente de partição entre octanol-água (K_{ow}), que implica em lenta absorção no solo, e consequentemente, um transporte preferencial via água (Courseuil et al., 1998). As perdas de combustíveis e derivados de petróleo por evaporação também trazem grande preocupação e representam não só prejuízo econômico, mas impacto negativo sobre o ambiente. Dentre os compostos presentes no BTEX, o benzeno é reconhecidamente o mais tóxico e, por isso, pode ser apontado como o agente mais preocupante no tocante à saúde pública (Niosh, 2006). Uma das estratégias de gerenciamento muito empregada na recuperação de locais contaminados por derivados de petróleo é a remediação *in situ*. O uso de plantas como agentes despoluidores tem despertado interesse crescente (Burken & Schnoor, 1996; Moreno & Courseuil, 2001; Campos & Pires, 2004).

Assim o objetivo desse trabalho foi analisar as respostas indicadoras de distúrbios, de processos adaptativos ou de mortalidade de *Impatiens walleriana* Hook. f., *Brachiaria brizantha* (A. Rich.) Stapf e *Pteris vittata* L., espécies que já apresentaram indícios de potencial fitorremediador. Campos et al. (2014) verificaram que *Impatiens walleriana* e *Brachiaria brizantha* absorvem e translocam grande quantidade de benzeno para parte aérea da planta, e que *Pteris vittata* restringe a absorção de benzeno e o acumula, principalmente, nas raízes.

Material e Métodos

As espécies vegetais usadas pertencem a grupos taxonômicos distintos, *Pteris vittata* (samambaia), *Brachiaria brizantha* (Monocotiledônea) e *Impatiens walleriana* (Eudicotiledônea). As plantas foram obtidas através de germinação *in vivo* e *in vitro* (*P.* vittata), semeadura (*B. brizantha*) e propagação vegetativa (*I. walleriana*). Após seu estabelecimento foram transplantadas para vasos de plásticos ou de cimento, contendo Latossolo Vermelho distrófico (LVd).

Foram realizadas duas etapas experimentais. Na primeira etapa realizaram-se ensaios de injeção direta de solução de benzeno (20 mg L^{-1}) no solo, próximo ao sistema radicular, com três indivíduos de cada espécie para cada tratamento. Para esta fase utilizou-se de delineamento experimental inteiramente casual, com três repetições com contaminação de benzeno, além de série controle. O experimento foi realizado a temperatura de 25 °C, durante um período de dez dias. O fotoperíodo foi mantido por 16 horas diárias com iluminação proporcionada por lâmpadas fluorescentes de 40 W simulando luz do dia. Para compreender as alterações histoquímicas, nos tecidos foliares, causadas pelo benzeno, verificou-se o acúmulo de peróxido de hidrogênio e indicação e morte celular.

Na segunda etapa foram realizados ensaios de aspersão, com três indivíduos de cada espécie para cada tratamento. As plantas foram submetidas à nebulização com solução aquosa de benzeno, em concentração de 20 mg L^{-1} e de 1600 mg L^{-1}. O nevoeiro foi aplicado no interior da câmara de nebulização e teve duração de 10, 30 e 60 dias. As plantas do tratamento controle foram submetidas ao nevoeiro, utilizando-se apenas água deionizada. As alterações visíveis na superfície foliar ou a morte dos indivíduos foram registradas, diariamente, através de anotações e imagens fotográficas. Ao término da simulação foram efetuadas coletas de amostras foliares para análise micromorfológica.

As coletas das folhas foram realizadas no dia seguinte a última aspersão e injeção de benzeno no solo.

Para avaliação dos danos na superfície foliar e densidade estomática, as amostras foram fixadas em solução aquosa de glutaraldeído 2,5% com tampão fosfato 0,1 M (pH 7,2), pós-fixadas em tetróxido de ósmio 1%, desidratadas em série etílica e secas ao ponto crítico. A superfície foliar foi recoberta com ouro, em metalizador Sputter-Coating Emitec K550 e analisada em microscópio eletrônico de varredura FEI, modelo Quanta 250. A análise de imagem foi efetuada através da utilização do software ImageJ.

Após a injeção de benzeno no solo, folhas foram coletadas para análise histoquímica para detecção da presença de peróxido de hidrogênio (H_2O_2) e de morte celular. Existem evidências na literatura da participação de peróxido de hidrogênio em resposta ao estresse ambiental (Soares & Machado, 2007). Para o acúmulo de peróxido de hidrogênio foi coletada uma folha por individuo, dos três indivíduos por espécie usados para cada tratamento. De cada folha foi retirado dois fragmentos com cerca de 1 cm^2, totalizando seis fragmentos de cada espécie para cada tratamento. As amostras foram então imersas em solução de 1mg mL^{-1} de 3,3' - diaminobenzidina (DAB)-HCl, (pH 5,6 ajustado com hidróxido de sódio) e incubados em câmara escura por oito horas. Em seguida, os fragmentos foram clarificados em álcool a 95% (Faoro et al., 2001) e montados em glicerina 50%. As células que apresentaram acúmulo de peróxido de hidrogênio adquiriram a coloração marrom.

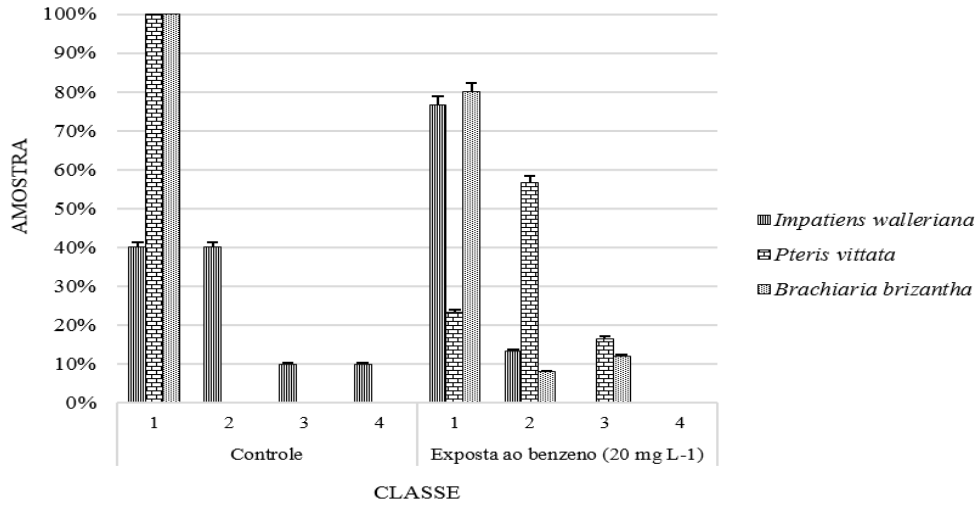
Na determinação da morte celular também foi coletada uma folha por individuo, da qual foi retirado dois fragmentos com cerca de 1 cm^2, totalizando seis fragmentos de cada espécie para cada tratamento. Os fragmentos foram fervidos por um minuto em mistura de ácido lático, fenol, glicerina e água contendo 20 mg mL^{-1} de azul de Evans (1:1:1:1) (Iriti et al., 2003). Logo após, os mesmos foram clarificados por 24 horas em solução aquosa de 2,5 g mL^{-1} de cloral hidratado (Iriti et al., 2003), e montados em glicerina 50%. As células mortas foram evidenciadas pela coloração azul, em contraste com as células sadias que se apresentaram transparentes.

As amostras em ambos os testes foram analisadas em microscópio de campo claro equipado com sistema de captura de imagens. Foi realizada uma contagem das células com reação positiva aos testes por fragmento, totalizando seis contagens por espécie e por tratamento. A área da contagem foi de aproximadamente 0,2 mm^2. O número de células que apresentaram reação positiva aos testes foram enquadrados em 4 classes: classe 1 (1-5 células), classe 2 (6-10 células), classe 3 (11-15 células) e classe 4 (16-20 células), metodologia essa proposta por Pedroso (2009).

Resultados e Discussão

A análise histoquímica permite identificar alterações que ocorrem nos tecidos das plantas antes do aparecimento de injúrias visíveis. Todas as três espécies apresentaram acúmulo de peróxido de hidrogênio nos tecidos foliares, quando expostas ao benzeno através da contaminação no solo. Contudo, este acúmulo ocorreu em diferentes intensidades, conforme mostra a Figura 1.

Figura 01**:** Porcentagem de amostras enquadradas em cada classe, nas três espécies vegetais, de células que apresentaram acúmulo de peróxido de hidrogênio (classe 1 = 1 - 5 células; classe 2 = 6 - 10 células; classe 3 = 11 - 15 células e classe 4 = 16 - 20 células).



As três espécies apresentaram acúmulo H_2O_2 em todas plantas do tratamento controle, sendo que todas as amostras foram enquadradas na classe 1 (1 - 5 células) para *P. vittata* e *B brizantha*. Em *I. walleriana* houve distribuição nas

quatro classes, onde 80% das amostras foram classificadas igualmente nas classes 1 e 2, e 20% das amostras foram distribuídas nas classes 3 e 4.

Em *P. vittata* exposta ao benzeno, o acúmulo foi maior, uma vez que as amostras foram enquadradas, predominantemente, na classe 2 (57%) e cerca de 17% na classe 3 (11 - 15 células), reduzindo para 23% o número de amostras na classe 1. *Brachiaria brizantha* também mostrou um acúmulo maior nas plantas expostas ao contaminante, com 80% das amostras enquadradas na classe 1 e 20% das amostras enquadradas na classe 2 (8%) e classe 3 (12%). *Impatiens walleriana* apresentou 77% das amostras na classe I e 13% na classe 2.

A presença de H_2O_2, no tratamento controle, se justifica em decorrência do metabolismo regular das plantas (Apel & Hirt, 2004). Entretanto, em condições normais a produção de espécies reativas de oxigênio (EROs) na célula é baixa, mas quando a planta é submetida a um estresse ambiental há um aumento na geração de EROs, como se observa-se nesta pesquisa, onde o aumento de peróxido de hidrogênio, na contaminação com benzeno, é um indicativo de perturbação da homeostase celular (Foyer & Noctor, 2005).

Neste estudo foi verificado somente a presença de peróxido de hidrogênio e não das outras espécies reativas de oxigênio, entretanto podemos supor que o benzeno induziu a produção de radicais superóxido ($O_2^{\cdot}$), e que a enzima superóxido dismutase (SOD) converteu estes radicais em peróxido de hidrogênio. Este seria um mecanismo de defesa das plantas, pois o H_2O_2 é menos reativo que o radical superóxido e, portanto, menos danoso à planta (Ferreira & Matsubara, 1997). Este comportamento foi observado em diversos estudos, onde a adição de peróxido de hidrogênio ou mesmo sua produção endógena, induziu a expressão de genes referentes à superóxido dismutase, catalase, ascorbato peroxidase e outras enzimas antioxidantes (Soares e Machado, 2007). Contudo, a atividade da SOD sozinha não é suficiente para manter a homeostase celular, pois altas concentrações de peróxido de hidrogênio podem causar danos às células ou mesmo, na presença

de ferro ou cobre (Fe^{2+} ou Cu^{+}), produzir radicais hidroxila ($OH^{\bullet}$) que são altamente reativos, causando a peroxidação proteica e lipídica (Pedroso, 2009).

Brachiaria brizantha, apesar de apresentar uma menor intensidade no acúmulo de peróxido de hidrogênio quando comparado com *P. vittata*, reage de maneira mais sensível a contaminação, pois apresenta sintomas visíveis e morte quando é exposta por dez dias ao benzeno (Campos et al., 2014). A grande quantidade de benzeno absorvido pela raiz e translocado para parte aérea, verificado no estudo de Campos et al. (2014), pode justificar um possível aumento nas moléculas do radical superóxido, intensificando as perturbações nas estruturas celulares, uma vez que o O_2^- pode causar peroxidação de lipídeos no ambiente celular e nas membranas celulares (Breusegem et al., 2001).

Além disto, a atividade da enzima SOD pode ter sido menos intensa nesta espécie, explicando a menor quantidade de células com H_2O_2, ou seja, houve uma menor conversão do radical superóxido em peróxido de hidrogênio, podendo também justificar os danos visíveis na planta, pois uma maior quantidade de radical superóxido causaria mais danos às células ou mesmo poderia produzir radicais hidroxila, que são mais reativos.

Segundo Srivastava et al. (2006) as enzimas-chave dentro do mecanismo de defesa antioxidante são SOD, CAT e APx, pois estas enzimas determinam diretamente a concentração das EROs. Entretanto, os mecanismos antioxidantes enzimáticos em *B. brizantha*, provavelmente, não reagiram suficientemente para converter o que foi produzido de H_2O_2 em água e gás oxigênio, através das enzimas catalase e/ou ascorbato peroxidase. Segundo Patra et al. (2004) a atividade da enzima catalase pode ser influenciada por diversos fatores como o tipo de contaminante, concentração, tempo de exposição e espécie vegetal, sendo que a atividade desta enzima pode sofrer grandes variações.

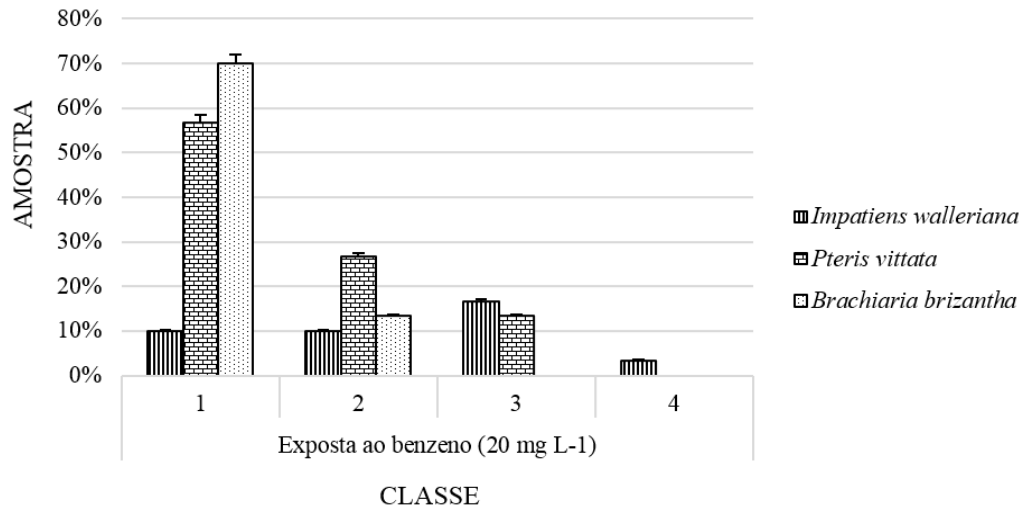
Dentre as três espécies, *I. walleriana* foi a que apresentou menor acúmulo de peróxido de hidrogênio, mesmo sendo capaz de absorver grande quantidade de benzeno e translocar para parte aérea como constatado por Campos et al. (2014).

Isto indica um equilíbrio entre o processo de produção e remoção das espécies reativas de oxigênio (Pergo, Ishii-Iwamoto, 2011). O peróxido de hidrogênio e o radical superóxido podem induzir genes diferentes, em conjunto ou separadamente, e em baixas concentrações, EROs induzem genes de defesa e resposta adaptativa (Soares e Machado, 2007). Esta espécie vegetal, possivelmente, possui um eficiente mecanismo antioxidante, que pode ter sido ativado, indiretamente, pelo benzeno ou pelas EROs levando a uma ação sincrônica entre superóxido dismutase (SOD) e outras enzimas antioxidantes, como catalase (CAT) e ascorbato peroxidase (APx), convertendo o H_2O_2 em água e gás oxigênio (Gratão et al., 2005). A ação combinada de catalase e superóxido dismutase reduz a ação tóxica e altamente reativa dos radicais hidroxil (Scandalios, 1993), evitando danos maiores às células.

Impatiens walleriana e *P. vittata* não apresentaram nenhuma indicação de morte celular nas folhas do tratamento controle, já *B. brizantha* apresentou azul intenso nas células-guarda de alguns estômatos, em uma das amostras, provavelmente em decorrência de um processo natural de morte celular.

Em todas as espécies, a morte celular foi maior no tratamento com 20 mg L^{-1} de benzeno (Figura 2).

Figura 02: Porcentagem de amostras enquadradas em cada classe, nas três espécies vegetais, de células que apresentaram morte celular (classe 1 = 1 - 5 células; classe 2 = 6 - 10 células; classe 3 = 11 - 15 células e classe 4 = 16 - 20 células).



Impatiens walleriana, dentre as três espécies, apresentou menor quantidade de amostras com células mortas no tratamento com benzeno, possivelmente em decorrência da menor quantidade de peróxido de hidrogênio produzida e por um provável eficiente sistema antioxidante da espécie. Contudo, houve enquadramento nas classes 2, 3 e 4. A morte celular foi detectada principalmente nas células-guarda dos estômatos. Houve também reação positiva para morte celular em algumas células da epiderme, mas em menor quantidade. A detecção de morte celular nas células-guarda dos estômatos, pode ser um indicativo do contato direto do contaminante com estas células, corroborando com a ideia de Campos et al. (2014) de que a planta metaboliza e volatiliza o benzeno, eliminando-o através dos estômatos.

Além disto, a baixa quantidade de células mortas, mesmo acumulando grande quantidade de benzeno na parte aérea (Campos et al., 2014), indica um sinal de resistência da planta, uma vez que a espécie vegetal reduziu os efeitos danosos que os metabólitos deste poluente podem gerar e sobreviveu à exposição.

Brachiaria brizantha e *P. vittata* apresentaram maior número de células com morte celular por área analisada, sendo qu2e *P. vittata* teve morte celular mais intensa que *B. brizantha*, pois apresentou uma porcentagem maior de amostras na classe 2 e 3.

Segundo Campos et al. (2014) *P. vittata*, dentre as três espécies, é a que menos transloca o benzeno para parte aérea da planta, contudo mesmo em baixa quantidade houve produção de peróxido de hidrogênio em um número maior de células, quando se compara com o controle e com as outras espécies. Segundo Soares e Machado (2007) o peróxido de hidrogênio é nocivo quando acumulado. Isto justifica o maior número de células mortas nesta espécie, pois segundo Levine et al. (1994) o H_2O_2 atua como um sinalizador de morte celular e para Breusegem et al. (2001) em altas concentrações, as EROs levam a um programa de morte celular controlado geneticamente. Contudo, a planta não apresentou sintomas

visíveis nos dez dias de exposição ao benzeno, pois provavelmente é necessário um período maior para que as injúrias visíveis surjam.

Segundo Kabata-Pendias e Pendias (1986) espécies vegetais podem adaptar-se a poluentes químicos, mas em muitos casos são observados sintomas visíveis como clorose, manchas e necrose em parte das folhas. Na contaminação, por aspersão de benzeno na concentração mínima (20 mg L^{-1}), algumas folhas jovens e maduras de *I. walleriana* apresentaram clorose, necrose e abscisão. Observou-se que a partir do 35º dia de contaminação, algumas folhas apresentaram necroses de formas e tamanhos irregulares, mas sem queda das folhas. Assim a planta sobreviveu aos 60 dias de contaminação. Na nebulização com a concentração máxima (1600 mg L^{-1}) de benzeno, observou-se os mesmos sintomas da concentração mínima, porém os danos ocorreram em um tempo mais curto. Para Godoi et al. (2010) quanto maior a concentração de BTEX, menor é o teor de clorofila total foliar. No 50º dia de contaminação todas as folhas sofreram clorose e/ou necrose, seguido pela queda da folha e morte da planta.

Pteris vittata, na nebulização com concentração mínima de benzeno, não apresentou sintomas visíveis. Um fato a considerar é a condição ruderal da espécie, bastante adaptada ao meio urbano. No decorrer das contaminações na concentração mínima e máxima, algumas folhas iniciaram a emergência e o processo de expansão, sendo que estas folhas não apresentaram nenhum sinal de danos visíveis, entretanto, foi possível observar uma sinuosidade dos folíolos e uma aparência mais fina e translucida destes. Na concentração máxima, algumas folhas necrosaram e folíolos apresentaram pontos de necrose.

Brachiaria brizantha, por sua vez, não apresentou queda de suas folhas e nem injúrias foliares visíveis, como também observado por Fornasiero (2001). Pôde-se observar um crescimento do vegetal, porém com enfraquecimento da planta, uma vez que as folhas apresentaram um aspecto mais frágil com lâmina foliar mais fina, menor e menos áspera quando comparada com o tratamento controle. Algumas folhas mais velhas, presentes na base, apresentaram clorose e posterior

ressecamento. Na exposição à saturação de benzeno as características dos danos são muito parecidas com a concentração mínima.

A fitotoxidade do benzeno depende de diversos fatores como a espécie estudada, o estádio de desenvolvimento e a concentração do contaminante (Pita-Barbosa et al., 2009). As três espécies reagiram diferentemente quando expostas as diferentes concentrações do poluente, sendo que na concentração a 1600 mg L^{-1} de benzeno, os sintomas visíveis foram mais intensos. *Impatiens walleriana* foi a espécie menos tolerante a aspersão de benzeno, quando exposta à concentração máxima, pois apresentou maior número de injúrias em suas folhas e morte da planta. As espécies mais resistentes à nebulização com o contaminante foram *P. vittata* e *B. brizantha*, uma vez que, apresentaram poucas perturbações visíveis, quando expostas a concentração mínima e máxima.

Segundo Sriprapat e Thiravetyan (2013) a captura do benzeno pelas plantas ocorre em maior quantidade através dos estômatos, mas existem outras vias não estomáticas, como a cutícula. Assim, a área do estômato pode influenciar fortemente as habilidades de captura dos contaminantes voláteis, mas para Cornejo et al. (1999) é necessário considerar também as características micromorfológicas das folhas, como a morfologia dos estômatos e sua abundância, pois estas características também interferem na absorção do poluente pela planta. Na maioria das plantas, os estômatos abrem durante o dia e fecham a noite, mas este processo pode ser influenciado por diversos fatores como a intensidade e qualidade da luz, umidade do solo, concentração interna de CO_2, temperatura e umidade relativa do ar (Machado & Lagôa, 1994).

Impatiens walleriana, B. brizantha e *P. vittata* demostraram um comportamento parecido quando expostas à concentração de 20 mg L^{-1} de benzeno, pois continuaram desenvolvendo-se, com o surgimento de novas folhas, possivelmente indicando que a concentração utilizada estaria dentro do limite de tolerância destas espécies, pois o longo período de exposição não levou à morte dos indivíduos. No trabalho realizado por Treesubsuntorn (2012) a parte aérea das plantas estudas

continuaram a desenvolver-se durante a aspersão com 20 mg L^{-1} de benzeno. Entretanto, na concentração máxima somente *B. brizantha* e *P. vittata* continuaram desenvolvendo-se, indicando mecanismos de tolerância a altas concentrações do contaminante.

Brachiaria brizantha e *I. walleriana*, no tratamento controle, apresentaram seus estômatos abertos quando coletadas no período da manhã, mesmo período das contaminações. O grau de condutância estomática variou entre as duas espécies (Tabela 1), sendo que a média das aberturas estomáticas de *B. brizantha* foi maior que a média das aberturas dos estômatos de *I. walleriana*. Isto ocorre devido as dimensões dos estômatos de *B. brizantha* serem maiores. Porém, quando comparadas as duas espécies através da área relativa das aberturas estomáticas, que consiste na soma das aberturas estomáticas de todos os estômatos em relação a um milímetro quadrado de área, verifica-se que *I. walleriana* possui uma área relativa de abertura dos estômatos maior que *B. brizantha*. *Pteris vittata* não apresentou nenhum estômato aberto no momento da coleta das amostras no tratamento controle. Esta característica pode justificar a baixa quantidade de injúrias aparentes nas folhas desta espécie, pois durante as contaminações com benzeno os estômatos provavelmente estavam fechados. O que pode explicar as necroses em algumas folhas é a captura do benzeno através da cutícula, entretanto, os mecanismos de penetração do benzeno na cutícula cerosa ainda são incertos, mas estudos sugerem que a cera pode ser um adsorvente de benzeno (Ugrekhelidze et al., 1997).

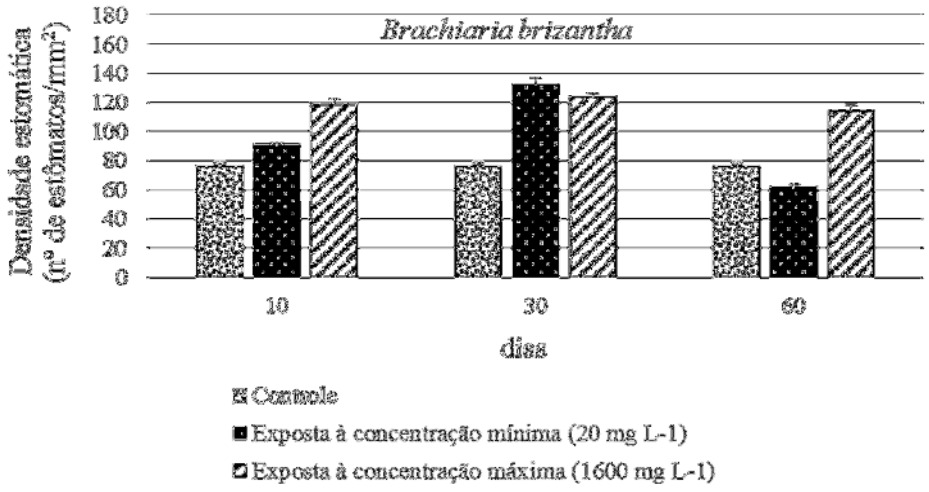
Tabela 1: Valores de área das aberturas estomáticas de *B. brizantha* (adaxial) e *I. walleriana* (abaxial) no tratamento controle.

Espécie	Aumento	Soma das áreas das aberturas estomáticas (µm²)	Área total da eletromicrografia (mm²)	Área relativa das aberturas estomáticas (µm²/mm²)
Brachiaria brizantha	300x	230,0	0,21	1091,35
Impatiens walleriana	500x	112,4	0,08	1486,51

Apesar de *I. walleriana* possuir uma maior área relativa de abertura dos estômatos, *B. brizantha* possui um número de estômatos por folha muito superior, devido sua característica anfiestomática, sendo assim, *B. brizantha* teria um potencial para absorver, através dos estômatos, uma grande quantidade de benzeno. Esta espécie, aparentemente, é altamente resistente a aspersão de benzeno nas folhas, pois mesmo na concentração máxima (1600 mg L^{-1}) por 60 dias os indivíduos não morreram. É provável que a espécie possua mecanismos internos que minimizem os danos fisiológicos do benzeno na planta, como por exemplo, uma maior compactação do mesofilo foliar, evitando a difusão do contaminante aéreo.

As dimensões e frequência dos estômatos interferem na quantidade de poluentes gasosos absorvida pela planta e, consequentemente, nos possíveis efeitos causados pela poluição (Alves et al., 2001). Na Figura 4, 5 e 6 estão organizados, respectivamente, os valores de densidade estomática de *B. brizantha*, *I. walleriana* e *P. vittata* na concentração mínima e máxima nos três períodos estabelecidos.

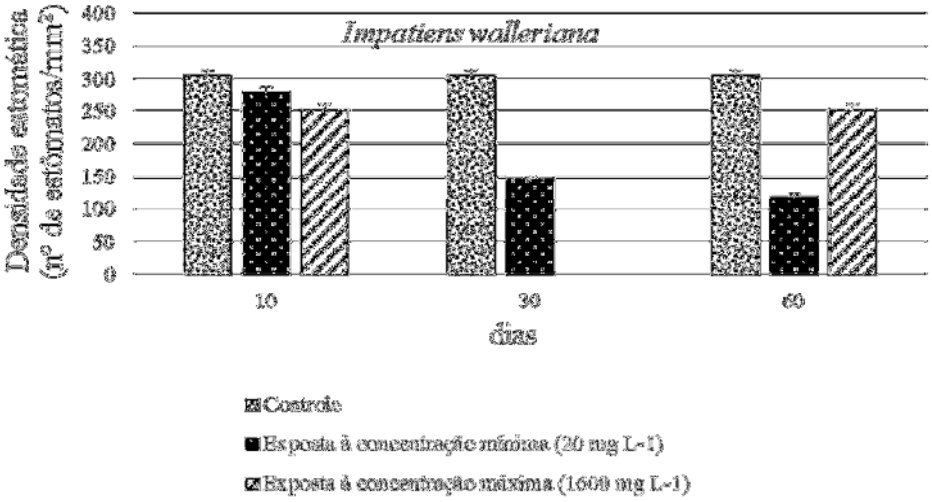
Figura 04: Visualização a partir de gráfico de barras, da densidade estomática da face adaxial de *B. brizantha*, a partir de eletromicrografia de varredura (300x), exposta ao tratamento controle e às concentrações mínima e máxima de benzeno, respectivamente, 20 mg L^{-1} e 1600 mg L^{-1} por 10, 30 e 60 dias.



Brachiaria brizantha na concentração mínima apresentou nos 10, 30 e 60 dias, respectivamente, 90,16, 132,86 e 61,69 estômatos/mm^2. Na concentração máxima

de benzeno os valores de densidade estomática foram mais elevados quando comparados com o controle (75,92 estômatos/mm^2) apresentando 118,63, 123,37 e 113,88 estômatos/mm^2. A média das densidades estomáticas na concentração máxima (118,63 estômatos/mm^2) foi significativamente maior que na concentração mínima (94,90 estômatos/mm^2).

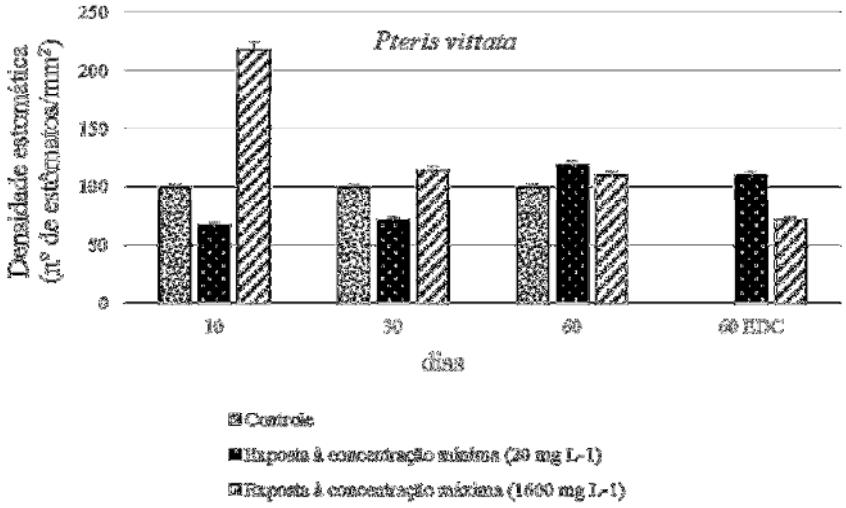
Figura 05: Visualização a partir de gráfico de barras, da densidade estomática da face abaxial de I. *walleriana*, a partir de eletromicrografia de varredura (500x), exposta ao tratamento controle e às concentrações mínima e máxima de benzeno, respectivamente, 20 mg L^{-1} e 1600 mg L^{-1} por 10, 30 e 60 dias. Na concentração máxima no período de 60 dias a folha foi exposta por 50 dias, pois a partir deste período todas as folhas sofreram abscisão.



A densidade estomática de *I. walleriana*, exposta a 20 mg L^{-1} de benzeno, apresentou uma redução gradual com valores de 277,73, 145,64 e 119,03 estômatos/mm^2, respectivamente, para 10, 30 e 60 dias.

Na concentração máxima a densidade estomática aos 10 e 50 dias apresentaram os mesmos valores (251,28 estômatos/mm^2) com uma diminuição em relação ao tratamento controle (304,18 estômatos/mm^2).

Figura 06: Visualização a partir de gráfico de barras, da densidade estomática da face abaxial de P. vittata, a partir de eletromicrografia de varredura (300x), exposta ao tratamento controle e às concentrações mínima e máxima de benzeno, respectivamente, 20 mg L^{-1} e 1600 mg L^{-1} por 10, 30 e 60 dias. No eixo x é apresentado 60 EDC que corresponde às folhas que emergiram durante a contaminação de 60 dias.



Pteris vittata na concentração máxima apresentou valores de densidade estomática (218,27; 113,88; 109,14 estômatos/mm^2 para 10, 30 e 60 dias) superior ao controle (99,65 estômatos/mm^2), já na concentração mínima os valores foram 66,43; 71,18; 118,63 estômatos/mm^2 para 10, 30 e 60 dias.

As folhas que emergiram durante a contaminação nos 60 dias de experimento quando comparadas ao tratamento controle (99,65 estômatos/mm^2), observa-se um leve aumento na densidade estomática das plantas expostas a 20 mg L^{-1} de benzeno (109,14 estômatos/mm^2) e uma grande redução na densidade das plantas expostas a 1600 mg L^{-1} de benzeno (71,18 estômatos/mm^2).

Diversos fatores ambientais podem ser responsáveis por diferenças na quantidade de estômatos, como a luminosidade, a umidade, a temperatura e exposição a contaminantes (Lee et al., 1988), sendo que a densidade é uma característica determinada pelo conjunto de fatores ao qual o vegetal está exposto. Possivelmente o fator principal que afetou a densidade estomática foi a concentração do contaminante, pois em alta concentração de benzeno a planta reagiu com a drástica redução do número de estômatos. Conforme Larcher (2000), isso pode estar relacionado a uma tentativa do vegetal em diminuir a incorporação

do poluente. Já na concentração mínima a densidade estomática apresentou pouca variação com o tratamento controle, indicando que a aspersão de benzeno a 20 mg L^{-1} não interfere a ponto de alterar significativamente a densidade estomática, e a baixa concentração de benzeno não é letal para esta espécie.

A densidade estomática de *I. walleriana*, exposta a 20 mg L^{-1} de benzeno, apresentou uma redução gradual no decorrer dos 60 dias, e deduz-se que mesmo em baixas concentrações o benzeno causa danos aos estômatos desta espécie, e quanto mais prolongado for o período de exposição ao contaminante, mais estômatos são danificados e a densidade estomática é reduzida. Por outro lado, esta diminuição no número de estômatos pode ter reduzido a absorção do benzeno e evitado danos maiores ao mesofilo foliar, o que poderia levar a morte do indivíduo (Larcher, 2000). Entretanto, a redução da densidade estomática diminui a eficiência nas trocas gasosas e, consequentemente, reduz a assimilação de carbono, comprometendo a capacidade fotossintética da planta (Santos, 2012).

Na concentração máxima a planta não alterou significativamente sua densidade estomática, podendo provavelmente ter sido, juntamente com o alto teor de benzeno, o fator que levou a morte do indivíduo no 50º dia de contaminação, pois o maior número de estômatos facilitou a entrada de benzeno no mesofilo foliar, causando danos irreversíveis as células clorofilianas, levando a morte da planta.

Brachiaria brizantha quando exposta à concentração mínima, apresentou um aumento em sua densidade estomática no 10º e 30º dia, contudo houve um decréscimo no número de estômatos quando a planta atingiu os 60 dias de exposição ao benzeno. Isso provavelmente ocorreu, pois o prolongado período de exposição intensificou os danos às células estomáticas. O mesmo ocorreu com a densidade estomática das folhas de *B. brizantha* expostas ao tratamento na concentração máxima de benzeno.

O movimento estomático é o meio mais rápido de que a planta dispõe para ajustar-se às variações ambientais a que os órgãos fotossintéticos são submetidos, e

com um número maior de estômatos a planta possui um controle maior da interação planta-ar (Passioura, 1982).

De maneira geral verificou-se uma redução na área dos estômatos de *B. brizantha* em ambas as concentrações com benzeno em relação ao tratamento controle. No tratamento controle os estômatos apresentaram uma área de 230,6 μm^2, já quando a planta foi exposta à concentração mínima de benzeno (20 mg L^{-1}) por 10, 30 e 60 dias, a área dos estômatos foram, respectivamente, 180,1 μm^2, 159,1 μm^2 e 97,25 μm^2. Já na concentração máxima (1600 mg L^{-1}) não se obteve um padrão decrescente de valores, mas em todos períodos os valores de área estavam abaixo do resultado encontrado no tratamento controle.

A área dos estômatos de *I. walleriana* nos dois tratamentos com benzeno, em todos os períodos, apresentou considerável aumento quando comparada com os estômatos do tratamento controle (24,6 μm^2), sendo que a média dos três períodos na concentração mínima foi 59,16 μm^2 e na concentração máxima de 37,5 μm^2.

Pteris vittata dentre as três espécies é a que possui os estômatos de maiores dimensões. No tratamento controle os estômatos apresentaram uma área de 806,33 μm^2. Já as plantas expostas ao tratamento com benzeno tiveram uma redução na área dos estômatos nas concentrações mínima (608,64 μm^2) e máxima (578,79 μm^2), em todos os períodos.

Estudo realizado por Alves et al. (2001), onde uma espécie vegetal foi exposta a poluentes aéreos na cidade de São Paulo, verificou uma redução no tamanho dos estômatos das plantas expostas ao ambiente poluído, quando comparada com plantas-controle. Este mesmo autor diz que existe uma tendência geral para caracteres anatômicos mensuráveis que relaciona a diminuição no tamanho com o aumento na frequência do caráter, e isto foi observado para *B. brizantha* e *P. vittata*, onde houve um aumento na densidade estomática com a redução no tamanho dos estômatos.

A redução no tamanho dos estômatos pode influenciar na abertura estomática, tornando-a menor, e isto pode ser verificado nas Tabelas 2, 3 e 4. Este fato é favorável para plantas expostas a poluentes, pois esta é uma maneira de diminuir a absorção do contaminante e evitar danos as folhas.

Tabela 02: Caracterização da abertura dos estômatos, da face adaxial, de *B. brizantha* no tratamento controle

Espécie/Tratamento	Aumento	Área (µm²)	Perímetro (µm)	Diâmetro Maior (µm)	Diâmetro Menor (µm)
Bb/controle	3000x	23,30	55,40	27,10	0,60

Tabela 03: Caracterização da abertura dos estômatos, da face adaxial, de *B. brizantha* após os três períodos de contaminação na concentração mínima (20 mg L^{-1})

Espécie/Período de exposição (dias)	Aumento	Área (µm²)	Perímetro (µm)	Diâmetro Maior (µm)	Diâmetro Menor (µm)
Bb/10	3000x	18,70	38,60	19,90	0,70
Bb/30	3000x	18,10	43,20	21,30	0,60
Bb/60	3000x	0,96	6,58	18,00	0,20

Tabela 04: Caracterização da abertura dos estômatos, da face adaxial, de *B. brizantha* após os três períodos de contaminação na concentração máxima (1600 mg L^{-1})

Espécie/Período de exposição (dias)	Aumento	Área (µm²)	Perímetro (µm)	Diâmetro Maior (µm)	Diâmetro Menor (µm)
***Bb*/10**	3000x	17,15	37,1	18,05	0,65
***Bb*/30**	3000x	17,35	51,3	24,75	0,2
***Bb*/60**	3000x	17,60	43,00	20,70	0,6

A área de abertura dos estômatos de *I. walleriana* nos dois tratamentos com benzeno, concentração mínima (18,13 µm², 5,5 µm² e 4,7 µm²) e concentração máxima (6,1 µm², 5,95 µm² e 0,33 µm²), respectivamente, 10, 30 e 60 dias, teve considerável aumento quando comparada com os estômatos do tratamento controle (3,08 µm²). Entretanto, não foi possível estabelecer um padrão dos valores da área de abertura dos estômatos, pois tiveram grande variação entre si no mesmo tratamento. A maior área estomática corrobora com os sintomas observados, pois o aumento no tamanho dos estômatos permitiu que a condutância estomática

também aumentasse, o que intensificou a captação do benzeno através dos estômatos e justifica a maior intensidade de sintomas visíveis nesta espécie.

Na concentração mínima, a condutância estomática, também teve um leve aumento, quando comparada com o controle. Contudo, isto não levou à morte do indivíduo, pois possivelmente a concentração de 20 mg L^{-1} de benzeno não é letal para esta espécie quando exposta por um período de até 60 dias.

Pteris vittata apesar de possuir grandes estômatos, a espécie comportou-se de maneira a evitar danos mais intensos, que poderiam levar a morte da planta.

Não foi possível quantificar a abertura dos estômatos em todos os tratamentos e períodos, somente na concentração máxima (1600 mg L^{-1}), nos três períodos (10, 30 e 60 dias), os estômatos apresentaram abertura do ostíolo com área de, respectivamente, 4,0 μm^2, 20,4 μm^2 e 13,83 μm^2. Isto justifica a maior intensidade de danos visíveis nas folhas de *P. vittata* na concentração máxima.

Como foi verificado neste estudo, as espécies comportaram-se de maneira diferente em relação as características estomáticas, ou seja, houve aumento na densidade estomática em *B. brizantha* e *P. vittata* e uma redução na frequência dos estômatos em *I. walleriana*. Estudos realizados por Sharma (1989) e Matyssek et al. (1993) mostraram uma diminuição na densidade estomática das espécies estudadas, já Evans et al. (1996) e Pääkköen et al (1997) registraram um aumento na densidade dos estômatos nas plantas expostas a poluentes atmosféricos.

Fahn e Cutler (1992) afirmam que plantas xeromórficas apresentam estômatos menores e densidades estomáticas maiores. Segundo Balaganskaya e Kudrjavtseva (1998), o aumento do grau de xeromorfismo em um vegetal pode ser em decorrência de um poluente. *Brachiaria brizantha* e *P. vittata*, de maneira geral, apresentaram aumento na densidade estomática e redução no tamanho dos estômatos. Para Larcher (2000) o aumento da densidade estomática e redução no tamanho dos estômatos, representa uma forma de maximizar a eficiência no fechamento dos estômatos, um importante recurso para plantas sob estresse de contaminantes no ar.

Segundo Godoi et al. (2010) quanto maior a concentração de poluentes orgânicos voláteis, como benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos, menores são os teores de clorofila e espessura do parênquima clorofiliano. A partir disto, pode-se deduzir que *B. brizantha* e *P. vittata* tiveram uma compactação do mesofilo, o que dificultaria a difusão do poluente nos tecidos foliares (Alves, 2008) e reduziria os danos visíveis nas folhas. Para Eleftheriou (1987) a compactação do mesofilo seria uma estratégia de adaptação ambiental quando o vegetal se encontra sob condições atmosféricas desfavoráveis.

Conclusão

Através dos experimentos de injeção de benzeno no solo *B. brizantha* apresentou aumento das espécies reativas de oxigênio mais danosas às células, intensificando a morte celular. *Pteris vittata* priorizou o acúmulo de peróxido de hidrogênio, retardando os sintomas visíveis, entretanto este acúmulo induziu o aumento de morte celular. *Impatiens walleriana* apresentou pouco acúmulo de peróxido de hidrogênio e morte celular, provavelmente, por possuir eficiente sistema antioxidante.

Nos experimentos com aspersão de benzeno na parte aérea das plantas, *B. brizantha* e *P. vittata*, apresentaram aumento da densidade estomática e redução no tamanho dos estômatos, estas características conferem a planta um maior controle da interação planta-ar em ambientes poluídos e correspondem a características de plantas xeromórficas, que possuem um mesofilo mais compacto e que dificulta a difusão do contaminante, justificando o menor número de injúrias visíveis nestas espécies. *Impatiens walleriana* comportou-se de maneira diferente, apresentando redução da densidade estomática e aumento no tamanho dos estômatos, podendo justificar os sintomas visíveis mais intensos nesta espécie.

Agradecimento

Essa pesquisa foi financiada pelo CNPq (Processo n° 470012/2012-9) e pela FAPESP (processos n° 2012/05595-0, 2012/05982-3, 2012/08337-1, 2012/24832-2 and 2012/24832-2). Colaboração do Dr. Isaac Jamil Sayeg, da Universidade de São Paulo, USP, Instituto de Geociências, pela colaboração em microscopia eletrônica de varredura.

Referências

ALVES, E.S. et al. Estudo anatômico foliar do clone híbrido 4430 de *Tradescantia*: alterações decorrentes da poluição aérea urbana. **Revista Brasileira de Botânica**, v. 24, n. 4, p. 567-576, dez. 2001.

ALVES, E.S.; MOURA, B.B.; DOMINGOS, M. Structural Analysis of *Tillandsia usneoides* L. Exposed to Air Pollutants in São Paulo City–Brazil. **Qualitative Water Air Soil Pollut**, v. 189, p. 61-68, 2008.

APEL, K.; HIRT, H. Reactive oxygen species: metabolism, oxidative stress, and signal transduction. **Annual Review of Plant Biology**, v. 55, p. 373-399, 2004.

BREUSEGEM, F.V. et al. The role of active oxygen species in plant signal transduction. **Plant Science**, v 161, p. 405-414, 2001.

BURKEN, J.G.; SCHNOOR, J.L. Phytoremediation: plant uptake of atrazine and role of root exudates. **J Environ Engin**, v. 122, p. 958-963, 1996.

CAMPOS, V.; PIRES, M.A.F. Phytoremoval of arsenic from soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 35, n. 15-16, p. 2137-2146, 2004.

CAMPOS, V. et al. Assessment of the Removal Capacity, Tolerance, and Anatomical Adaptation of Different Plant Species to Benzene Contamination. **Water Air Soil Pollut**, v. 225, p. 2033, 2014.

CORNEJO, J.J. Studies on the decontamination of air by plants. **Ecotoxicology**, v. 8, n. 4, p. 311-320, ago. 1999.

COURSEUIL, H.X. et al. **The influence of the gasoline oxygenate ethanol on aerobic and anaerobic BTX biodegradation**. Water Research, v. 32, p. 2065-2072, 1998.

ELEFTHERIOU, E.P. A comparative study of the leaf anatomy of olive trees growing in the city and the country. **Environ Exp Bot**, v. 27, p. 105-115, 1987.

EVANS, L.S.; ADAMSKI, J.H.; RENFRO, J.R. Relationships between cellular injury, visible injury of leaves, and ozone exposure levels for several dicotyledonous plant species at Great Smoky Mountains National Park**. Environmental and Experimental Botany**, v. 36, p. 229-237, 1996.

FAHN, A.; CUTLER, D. **Xerophytes**. Berlin: Gebrüder Borntraeger, 1992. p. 176.

FAORO, F. et al. **Chitosan-elicited resistance to plant viruses:** a histochemical and cytochemical study. In: MUZZARELLI R.A.A. (ed.). Chitin Enzymology. Atec: Grottamare, 2001. p. 57-62.

FORNASIERO, R.B. Phytotoxic effects of fluorides. **Plant Science**, v. 161, p. 979-985, 2001.

FOYER, C.H.; NOCTOR, G. Redox homeostasis and antioxidante signaling: a metabolic interface between stress perception and physiological responses. **The Plant Cell**, v. 17, n. 17, p. 1866-1875, jun. 2005.

GODOI, A.F.L. et al. Poluição e a densidade de vegetação**:** BTEX em algumas áreas públicas de Curitiba - PR, Brasil. **Quím. Nova**, v.33, n. 4, p. 827-833, 2010.

GRATÃO, P.L. Making the life of heavy metal-stressed plants a little easier. **Functional Plant Biology**, v. 32, n. 6, p. 481-494, fev. 2005.

IRITI, M. et al. Benzothiadiazole-induced resistance modulates ozone tolerance. **Journal of Agricultural Food Chemistry**, v. 51, p. 4308-4314, 2003.

KABATA-PENDIAS, A.; PENDIAS, H. **Trace Elements in Soils and Plants.** United States: Library of Congress Card, 1986. p. 315.

KAIPPER, A.I.B. **Influência do etanol na solubilidade de hidrocarbonetos aromáticos em aquíferos contaminados por óleo diesel**. 179p. Tese. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis (SC), 2003.

BALAGANSKAYA, E.D.; KUDRJAVTSEVA, O.V. Change of the morphological structure of leaves of Vaccinium vitisidaea caused by heavy metal pollution. **Chemosphere**, v.36, p. 721-726, 1998.

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos: RIMA, 2000. p. 530.

LEE, N.; WETZSTEIN, H.Y.; SOMMER, H.E. Quantum flux density effects on anatomy and surface morphology of *in vitro* and *in vivo* developed sweetgum leaves. **JASHS**, v. 113, p. 167-171, 1988.

LEVINE, A. et al. H_2O_2 from the oxidative burst orchestrates the plant hypersensitive disease resistance response. **Cell**, v. 79, p. 583-593, 1994.

MACHADO, E.C.; LAGÔA, A.M.M.A. Trocas gasosas e conduância estomática em três espécies de gramíneas. **Bragantia**, v. 53, n. 2, p. 141-149, 1994.

MATYSSEK, R. et al. Whole-plant growth and leaf formation in ozonated hybrid poplar (*Populus x euramericana*). **Environmental Pollution**, v. 81, p. 207-212, 1993.

MORENO, F.N.; COURSEUIL, H.X. Fitorremediação de aquíferos contaminados por benzeno e etanol. **Wat Res**, v. 35, n. 12, p. 3013-3017, 2001.

NIOSH: **National Institute for Occupational Safety and Health**. NIOSH Carcinogen List, 2006. Disponível em: http://migre.me/pvKRs. Acessado em 05 abr. 2013.

PÄÄKKÖEN, E.; HOLOPAINEN, T.; KÄRENLAMPI, L. Differences in growth, leaf senescence and injury, and stomatal density in birch (*Betula pendula* Roth.) in relation to ambient levels of ozone in Finland. **Environ Pollut**, v. 96, p. 117-127, 1997.

PASSIOURA, J.B. Water in the soil-plant-atmosphere continuum. In: Lange, O.L; Nobel, P.S.; Osmond, C.B.; Ziegler, H. (eds.). **Physiological plant ecology II:** Water relations and carbon assimilation. Berlin: Springer-Verlag, 1982. p. 5-33.

PATRA, M. et al. Comparison of Mercury, lead and arsenic with respect to genotoxic effects on plants systems and the development of genetic tolerance. **Environmental and Experimental Botany**, v. 52, n 1. p. 199-223, fev. 2004.

PEDROSO, A.N.V. **Alterações estruturais, ultraestruturais e histoquímicas em folhas de *Nicotiana tabacum* "Bel-W3" (Solanaceae)**. 88 p. Tese - Instituto de Botânica da Secretaria do Meio Ambiente, São Paulo (SP), 2009.

PERGO, E.M.; ISHII-IWAMOTO, E.L. Changes in energy metabolism and antioxidant defense systems during seed germination of the weed species *Ipomoea triloba* L. and the responses to allelochemicals. **Journal of Chemical Ecology**, v. 37, n. 5, p. 500-513, mai. 2011.

PITA-BARBOSA, A. et al. Efeitos fitotóxicos do fluoreto na morfoanatomia foliar de *Brachiaria brizantha* (Hochst. ex A. Rich.) Stapf e *Brachiaria decumbens* Stapf (Poaceae). **Acta bot bras**, v. 24, n. 4, p. 1027-1033, 2009.

SANTOS, A.P.M. **Biomonitoramento vegetal da qualidade do ar em Ribeirão Preto – SP**. 162 p. Tese - Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto (SP), 2012.

SCANDALIOS, J.G. Oxygen stress and superoxide dismutases. **Plant Physiology**, v. 101, n. 1, p. 7-12, jan. 1993.

SHARMA, K.G. (1989). Cuticular and morphological dynamics in *Salix nigra* L. and *Quercus alba* L. in relation to air pollution. In: Bucher, J.B; Bucher-Wallin, I. (eds.). **Air pollution and Forest Decline**. Birmensdorf: Proceedings of the 14th International meeting for specialists in air pollution effects on forest ecosystems, IUFRO. p. 527–529.

SOARES, M.A.S.; MACHADO, O.L.T. Defesa de plantas: Sinalização química e espécies reativas de oxigênio. **Revista Trópica**, v. 1, p. 9-19, 2007.

SRIPRAPAT, W.; THIRAVETYAN, P. Phytoremediation of BTEX from indoor air by Zamioculcas zamiifolia. **Water Air Soil Pollution**, v. 224, p. 1484, 2013.

SRIVASTAVA, M. et al. Antioxidant responses of hyper-accumulator and sensitive fern species to arsenic. **J Exp Bot**, v. 56, n. 415, p. 1335-1342, mai. 2005.

TREESUBSUNTORN, C.; THIRAVETYAN, P. Removal of benzene from indoor air by *Dracaena sanderiana*: effect ofwax and stomata. **Atmos Environ**, v. 57, p. 317-321, 2012.

UGREKHELIDZE, D.; KORTE, F.; KVESITADZ, G. Uptake and transformation of benzene and toluene by plant leaves. **Ecotoxicol Environ Saf**, v. 37, p. 24-29, 1997.

Análise dos pontos positivos e negativos de sistemas de captação de água de chuva

Analysis of the strengths and weaknesses of rainwater catchment systems

Prof. Ms. Fernando Henrique Machado[1]

[1] Programa de pós-graduação em Ciências Ambientais, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Sorocaba, fernando.machado@posgrad.sorocaba.unesp.br

Submetido em 28/03/2015
Revisado em 08/04/2015
Aprovado em 26/04/2015

Resumo: Houve um declínio no aproveitamento de água de chuva a partir da metade do século XX devido ao grande entusiasmo pela construção de barragens, aproveitamento intenso de águas subterrâneas e uso de grandes sistemas de abastecimento de água. Entretanto, a captação de água de chuva vem ganhando destaque por ser uma forte aliada para a conservação dos recursos hídricos, principalmente no contexto atual marcado por uma expressiva escassez hídrica. Nesse contexto, o presente estudo visou fazer uma análise dos pontos positivos e negativos do uso de sistemas de captação de água de chuva. A metodologia utilizada consistiu na revisão bibliográfica acerca do tema em periódicos científicos e em empresas fabricantes de componentes para captação de água de chuva. Ao final do estudo, conclui-se que o sistema de captação de água de chuva é uma técnica que deve ser encorajada, porém existem problemas quanto à qualidade da água armazenada, principalmente problemas com contaminação de origem biológica.
Palavras chave: Recursos Hídricos. Precipitação Escassez hídrica. Água de chuva.

Abstract: There was a decline in rainwater harvesting from the mid-twentieth century due to the great enthusiasm for the construction of dams, greater use of groundwater and use of large water supply systems. However, rain water harvesting emerges now as a strong ally for conservation of water resources, especially in the current context characterized by a significant water scarcity. In this context, this study aimed to analyze the pros and cons of using rainwater harvesting systems. The methodology consisted of a literature review on the topic in scientific journals and components manufacturing companies for rainwater harvesting. At the end of this study was concluded that the rainwater harvesting system is a technique that should be encouraged, but there are problems regarding the quality of stored water, especially problems with contamination of biological origin.
Keywords: Water resources. Rainfall. Water scarcity. Rainwater.

Introdução

A utilização indiscriminada dos recursos hídricos pelo homem ao longo dos anos tem sido uma das principais condicionantes para a escassez hídrica no mundo. A água doce está se tornando cada vez mais um bem precioso e dotado de alto valor econômico, mas a cada dia que se passa a disponibilidade da mesma diminui devido principalmente à poluição dos mananciais e desperdícios. O aumento da demanda por água ocasiona um desafio a ser enfrentado nos dias de hoje, principalmente pelo fato da demanda crescer constantemente e a oferta de água doce ser menor que a procura em determinadas regiões. Diante dessa situação, percebe-se a necessidade de um eficiente gerenciamento dos recursos hídricos, bem como o uso de técnicas de conservação e reuso de água para que se tenha planejamento, políticas adequadas e instrumentos de gestão eficientes que visem, antes de tudo, a proteção das bacias hidrográficas e o uso racional deste recurso.

Diante das diversas técnicas de conservação de água existe a captação de água de chuva, tecnologia da qual "tem sido utilizada desde as primeiras organizações humanas e seu uso é fomentado por governos e instituições ao redor do mundo" (Palhares e Guidoni, 2012, p. 245). Tal técnica também tem sido cada vez mais utilizada em edifícios para mitigar a escassez de água e o aumento dos preços de abastecimento de água das companhias de saneamento (Vieira *et al.* 2014). Tal técnica consiste basicamente na captação de água precipitada em telhados ou áreas de coleta específicas, sua canalização e seu armazenamento em reservatórios para seu posterior uso. A água da chuva é geralmente excelente para vários usos, inclusive para beber, exceto em locais com forte poluição atmosférica, industrializados ou densamente povoados. Contudo, a contaminação atmosférica da água da chuva normalmente é limitada a zonas urbanas e industriais fortemente poluídas e, mesmo nestes locais, a água de chuva pode ainda ser utilizada para fins não potáveis.

Com base nesse cenário, foi abordado neste estudo os Sistemas de Captação de Água de Chuva - SCAC onde foi apresentado um breve histórico

sobre sua utilização por diferentes países, os componentes acessórios que podem ser utilizados no sistema, os riscos de contaminação que o sistema possui e o que se deve fazer para garantir uma boa qualidade da água de chuva armazenada. Sucintamente, o objetivo deste estudo foi elaborar um levantamento e análise dos pontos positivos e negativos de sistemas de captação de água de chuva como fonte de água para fins potáveis e não potáveis.

Metodologia

Foi utilizada uma pesquisa exploratória com objetivo de fazer um levantamento bibliográfico a nível nacional e internacional amplo para proporcionar maior familiaridade com o assunto em questão, com vista a torná-lo mais explícito tendo como fonte de informação dados secundários. Foram utilizados neste estudo livros, artigos publicados em *home pages* de associações de captação de água de chuva e de universidades que estudam o assunto bem como consulta à base de periódicos científicos. O tratamento dos dados foi realizado de forma interpretativa, que segundo Severino (1982, p. 92), num sentido estrito, "é tomar uma posição própria a respeito das idéias enunciadas". Parâmetros para análise foram utilizados, considerando quais informações seriam mais úteis e enriquecedoras ao estudo, interpretando-as de forma crítica e analítica.

Revisão da literatura

Breve histórico da captação de água de chuva

Tomaz (2007) relata que o aproveitamento de água de chuva é tão antigo que não se sabe quando começou. Silva (1984, p. 12) relata que "há milênios diferentes povos (africanos, asiáticos, europeus, americanos) têm desenvolvido variadas técnicas de captação e armazenamento de água de chuva para consumo familiar". Conforme Gonçalves (2006), o manejo e o aproveitamento da água de chuva tem sido uma prática exercida por diferentes civilizações e culturas ao longo do tempo. Passando pelo Oriente, Oriente Médio, Europa, e pelos Incas, Maias e

Astecas na América Latina, relatos de dispositivos de coleta e armazenamento de água de chuva remontam a sistemas construídos e operados há mais de 2.000 anos.

De acordo com Krishna (2005), há evidências arqueológicas que atestam o uso de captação de água de chuva desde 4.000 anos atrás no estado americano do Texas. Na China, o conceito do uso da técnica data de mais de 6.000 anos. Segundo Krishna (2005), ruínas de cisternas construídas em 2.000 a.C. para armazenar água de chuva escoada de ladeiras para propósitos agrícola e doméstico ainda se encontram parcialmente de pé em Israel. Tomaz (1998 *apud* May 2004) descreve que em uma das inscrições mais antigas do mundo, a Pedra Moabita, encontrada no Oriente Médio por volta de 850 a.C, o rei Mesha sugeria a construção de uma cisterna em cada casa da cidade de Qarhoh para aproveitamento da água de chuva. A Pedra Moabita é de basalto negro e tem a determinação gravada para a cidade de Qarhoh com os seguintes dizeres do rei: para que cada um de vós faça uma cisterna para si mesmo, na sua casa (Tomaz, 2007). Yosef e Asmamaw (2015) destacam também que a captação de água de chuva tem sido utilizado na Etiópia desde os tempos da civilização Aksumite, por volta de 560 a.C até o presente.

Segundo Ghanayem (2001), no Brasil a instalação mais antiga foi construída pelos norte-americanos em 1943, na ilha de Fernando de Noronha, sendo que hoje a técnica esta sendo muito difundida nessa região do país, principalmente nas áreas rurais de Pernambuco. Conforme May (2004), no México as inscrições mais antigas de captação de água de chuva são datadas na época dos Astecas e dos Maias. Gnadlinger (2000) relata que no século X, ao sul da cidade Oxkutzcab-México situada ao pé do monte Puuc, a agricultura era baseada na captação de água de chuva. As pessoas viviam nas encostas e a água de chuva escoada do monte era armazenada em cisternas de 20.000 a 45.000 litros, chamadas de *Chultuns*.

De acordo com Silva (2006), na África e no Sudão até mesmo as árvores de grande porte eram utilizadas para armazenar água de chuva durante o período chuvoso através de buracos feitos em seu interior que eram seladas posteriormente com barro, podendo conter volumes de 1.200 a 4.000 litros que eram utilizados

para consumo humano durante longos períodos de seca. Ademais, Noers e Ben-Adcher (1982) já destacavam no início da década de 80, depois de revisarem mais de 170 artigos publicados sobre o tema entre 1970 e 1980, uma consciência da necessidade crescente do aproveitamento de água de chuva e o reconhecimento do seu potencial.

Sistemas de captação de água de chuva

Phillips (2005) define um sistema de captação de água de chuva como um processo de interceptação de águas precipitadas e escoadas de uma superfície como telhados, áreas de estacionamentos ou mesmo superfícies de terra, seu armazenamento e seu posterior uso benéfico. As partes que compõe os sistemas de captação de água de chuva variam muito de acordo com a necessidade, condições locais e com o propósito a que se dará o uso da água captada (uso potável ou não potável). Segundo Vishwanath (2006), os componentes típicos de sistemas de captação de água de chuva incluem: área de coleta; sistema de transporte e; sistema de armazenamento, dos quais são descritos a seguir:

Área de coleta: Qualquer superfície pode agir como uma área de coleta, desde que apresente impermeabilidade favorável. Vishwanath (2006) considera que os telhados são favorecidos pelo grande coeficiente de *runoff* gerado por eles e que são relativamente menos propícios a contaminação quando comparado a outras áreas pavimentadas que podem ter algum tráfego de veículos, pessoas ou animais. O uso do próprio solo como área de captação pode ser utilizado em regiões onde os telhados das casas podem limitar a eficiência do reservatório devido à pequena área de coleta de água de chuva que os mesmos oferecem.

Sistema de transporte: O sistema de transporte é composto pela tubulação que irá conduzir a água até seu armazenamento. Segundo Vishwanath (2006), o sistema de transporte pode atuar como área de coleta, como no caso de calhas que, além de receber água dos telhados, também podem receber água da chuva diretamente sem a mesma ter sido primeiramente interceptada pelo telhado. As

tubulações precisam ser projetadas adequadamente para atender o sistema em dias de chuvas severas bem como não perder água durante o processo de transporte.

Sistema de armazenamento: O sistema de armazenamento compreende o local onde a água de chuva é armazenada, sendo utilizados diferentes tipos de materiais para fazer os reservatórios. Conforme Soil (2005), os reservatórios podem ser colocados sobre o solo, parcialmente enterrados ou enterrados no solo. Para maximizar a eficiência do sistema os reservatórios devem ser localizados o mais próximo do ponto de consumo, facilitando o uso da água e reduzindo ou eliminando o uso de bombas elétricas, contribuindo assim com a redução de energia elétrica (Soil, 2005).

Possíveis fontes de contaminação do SCAC

De acordo com Helmreich e Horn (2009), a água da chuva pode ser contaminada por bactérias e produtos químicos perigosos e, por isso, necessitam de tratamento antes do uso, principalmente quando for para uso humano. A filtração lenta e a tecnologia solar são métodos para reduzir a poluição. Tecnologias de membranas também é uma técnica viável de desinfecção para o fornecimento de água potável. Muitas fontes de contaminação podem afetar e prejudicar um SCAC e, consequentemente, a água captada. Um sistema bem planejado e operado é essencial para garantir que todo o processo de captação da água ocorra de forma eficiente e livre de impurezas indesejáveis. Seja o SCAC implantado em áreas urbanas ou rurais, o sistema está sujeito a sofrer contaminações, principalmente de origem biológica. Nesse aspecto, Silva et al. (2012, p. 394) destaca que:

> vários estudos focaram a qualidade microbiológica da água de chuva, com resultados que, muitas vezes, apontam a presença de indicadores de contaminação fecal e, consequentemente, a classificam como inadequada para o consumo humano se utilizada sem tratamento prévio (Silva et al., 2012, p. 394).

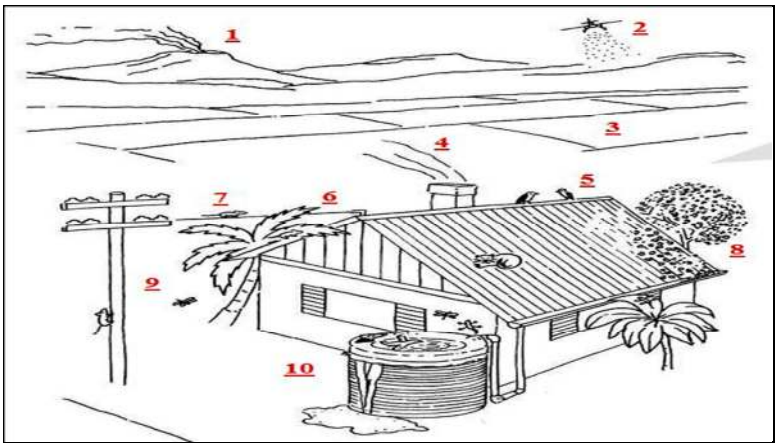
No que tange os contaminantes atmosféricos, em áreas urbanas o risco de contaminação é maior devido as grandes emissões de poluentes oriundas do tráfico

de veículos e indústrias, no meio rural também pode ocorrer principalmente pela dispersão causada na aplicação de defensivos agrícolas e poeiras vindas do tráfico de veículos das estradas rurais que, em grande parte, não são providas de pavimentação. Destaca-se também que as deposições de poluentes atmosféricos podem ter como destino final à superfície de captação do SCAC e que consequentemente tais poluentes podem chegar dentro do reservatório de água de chuva se nenhuma medida for tomada. Algumas medidas que podem ser adotadas para impedir que tais contaminantes cheguem no reservatório são abordadas no decorrer deste trabalho.

De acordo com Vasudevan et al. (2001), muitas formas de controle de mosquitos e suas larvas podem ser usadas. Uma pequena quantidade de querosene doméstico pode ser utilizado (5 ml para 1.000 L), mas pode dar um gosto desagradável a água. O controle biológico utilizando peixes dentro do reservatório para consumirem as larvas dos mosquitos também é utilizado com algum sucesso.

Na Figura 01 são enumeradas as possíveis fontes de contaminação de origem física, química e biológica que podem afetar adversamente um SCAC implantado em uma área rural. Cabe salientar que os riscos de contaminação em sistemas implantados em áreas urbanas não diferem significativamente dos sistemas implantados em áreas rurais.

Figura 01: Riscos de contaminação de um SCAC



Fonte: Adaptado de Macomber (2001).

Tendo como referência a Figura 1 e com base nas observações de Macomber (2001) e Vasudevan (2001) foram enumerados e discutidos a seguir os principais pontos de contaminações que um SCAC pode vir a ter:

1) Os vulcões lançam grande quantidade de material particulado que podem ser aerotransportados e levados até à superfície de captação de água de chuva. Equiparado com os vulcões, os veículos automotores e indústrias que não atendem padrões de emissões atmosféricas podem também gerar grande quantidade de material particulado e óxidos de enxofre. Logo, deve-se estar atento quanto à qualidade dessa água captada em regiões próximas a áreas industriais, principalmente quando se destinar à água para consumo humano direto;

2) O uso de defensivos agrícolas é uma prática corriqueira utilizada para proteger as plantações. A aspersão dos produtos químicos incorretamente (seja por aviões, bombas manuais individuais ou instaladas em tratores) gera grande dispersão de contaminantes que podem ser aerotransportados até um SCAC. Deve-se estar atento quando um sistema de captação é instalado próximo a essa fonte de contaminantes para não contaminar a água armazenada;

3) O preparo do solo para cultivo, bem como uma estrada não pavimentada com grande fluxo de veículos pode gerar grande quantidade de material particulado em suspensão que possivelmente é levado pelas correntes de ar para a superfície de captação;

4) A fuligem e material particulado vindo de chaminés é outra fonte de contaminação. Parte do material emitido das chaminés pode depositar no telhado e se o sistema não for provido de algum filtro, pode prejudicar a qualidade de água da chuva armazenada;

5) Os pequenos animais como pássaros, ratos e gatos são comumente encontrados nos telhados de muitas casas. As excretas destes animais possuem grande quantidade de bactérias, das quais muitas patogênicas, sendo um grande risco de contaminação da água;

6) Árvores ou arbustos que ficam encostados na área de captação atuam como uma ponte de passagem para animais, isso colabora para o aumento do número de contaminantes no telhado que também podem ser levados para o reservatório.

7) Os ratos são especialistas em subir em árvores e fios, por isso deve-se ter atenção e um controle eficiente para que roedores não tenham acesso ao SCAC, pois os mesmos são fontes de doenças;

8) As árvores presentes perto da superfície de captação geram grande quantidade de folhas e/ou frutos que podem entupir as calhas do sistema de captação, bem como aumentar a quantidade de matéria orgânica presente na água captada;

9) É preciso ter cuidado para que não haja pontos de água acumulados e que o reservatório esteja devidamente tampado para que eles não depositem suas larvas. Vasudevan (2001) relata que os 3 principais grupos de mosquitos associados as doenças são os do gênero *Aedes* (transmissor da dengue e febre amarela), *Anopheles* (transmissor da malária) e *Culex* (transmissor da filaríase) e que os mesmos podem ser encontrados em reservatórios contendo água de chuva, especialmente em regiões tropicais.

Componentes acessórios do SCAC

Conforme Sautchuk *et al* (2004), sistemas mais complexos podem apresentar sistema de pressurização (para abastecimento direto dos pontos de consumo) ou sistema de recalque, filtros separadores de sólidos e líquido e tubulação para entrada de água de outra fonte para eventual suprimento do sistema. Usam-se também sistemas de desinfecção como pastilhas de cloro e dispositivos de descarte da primeira água da chuva (*first flush*) que pode conter contaminantes nocivos à saúde humana. Alguns desses componentes são tratados a seguir.

Dispositivo de descarte inicial

Quando a chuva começa a cair, ela leva alguns minutos para limpar a atmosfera onde as gotículas de água passam, limpando-a, implicando na deposição

úmida de vários contaminantes gasosos, partículas e aerossóis presentes no ar. E ainda arrastam bem do telhado e das calhas detritos e outras substâncias nocivas que ali depositaram e que podem ser indesejadamente carreados para o reservatório do SCAC. Essa água oriunda do momento inicial da precipitação é chamada de first flush, que é traduzido por muitos atores como "primeira leva" e também às vezes de "leva podre", não havendo um consenso.

Percebe-se que a fonte principal de contaminação em qualquer SCAC reside nos detritos e contaminantes biológicos e/ou químicos que são lavados da superfície do telhado e das calhas ou provenientes do ar poluído da região, durante o primeiro momento da chuva.

A única função de um dispositivo de descarte inicial é de remover essa leva inicial e assim manter elementos indesejáveis fora de um reservatório de armazenamento da água de chuva. Fisicamente, pode ser descrita como um aparelho inserido no tubo de descida da calha, em algum lugar entre a saída da calha e a entrada do reservatório de armazenamento.

Segundo Silva (2006), um dispositivo *first flush* pode ser manual, operado pelo proprietário do sistema de captação, apenas retirando a conexão do tubo da calha; ou automático, com a construção ou adoção de um aparato de desvio, podendo ou não haver o aproveitamento da água descartada. Silva (2006, p. 23) ressalta que "devido à baixa qualidade microbiológica, o uso da água desviada deve ser apenas para fins que não se destinem diretamente ao contato humano, por exemplo, a irrigação de jardins".

Andrade (2004) considera que mesmo no período de chuvas constantes, entre uma chuva e outra acumula sujeira no telhado, mas nesse caso, as primeiras águas de alguns minutos de cada chuva são suficientes para lavar a área de captação. Segundo Andrade (2004), é necessário cerca de 1 a 2 litros por m^2 de água de chuva para limpar o telhado.

A ABNT através da NBR 15527 recomenda que, na falta de dados, seja descartado os 2 mm da precipitação inicial e que o dispositivo de descarte seja

preferencialmente automático, o que evita o usuário do SCAC de esquecer de descartar a primeira precipitação e facilitar ainda a operação do sistema durante a chuva. Cabe salientar que a NBR 15527 é recomendada para a captação de água de chuva para fins não potáveis.

Um dispositivo automático para desvio das primeiras águas de cada chuva é uma barreira física de proteção sanitária de reservatórios de importância comparável à cobertura, tampa e tomada de água por tubulação (Andrade, 2004).

Tipos de dispositivos de descarte inicial

De acordo com Vidacovich (2004), existem dois tipos principais de descarte da primeira água de chuva que geralmente são usados em SCAC, dos quais são:

- Os recipientes de volume fixo: A maneira como trabalham esses dispositivos é que eles se enchem até o nível máximo, quando a chuva começa a cair, sem levar em conta a intensidade da chuva. Depois a água de chuva adicional é encaminhada para o reservatório de armazenamento. Eles funcionam baseados na teoria de que, se forem dimensionados corretamente (por exemplo: uma capacidade 0,4 litros para cada m^2), então a água de chuva que é enviada ao reservatório de armazenamento estará essencialmente livre de contaminantes e detritos.
- Válvulas de descarte inicial: Estes dispositivos, ao contrário dos recipientes de volume fixo, são influenciados pelo fluxo da água de chuva. Tais dispositivos possuem uma válvula regulável na parte inferior onde ocorre a saída da água de primeira leva através da regulagem do fluxo de saída. Quando a intensidade de chuva é baixa e conseqüentemente não lava o telhado e a calha satisfatoriamente, a válvula descarta essa água (a saída de água é maior do que a entrada). Quando a intensidade da chuva é alta o suficiente para lavar o telhado, a válvula não consegue descartar a água (a entrada de água é maior que a saída) e a câmara começa a encher e uma bola de vedação flutuante obstrui o orifício de entrada. Doravante, a água de

chuva é encaminhada para o reservatório de armazenamento.

Dispositivos de filtragem

O papel dos filtros é separar a água da chuva de impurezas (i. e., folhas, galhos, insetos, partículas diversas...). Existe hoje no mercado nacional e internacional diferentes tipo de filtros e a escolha do melhor tipo depende de diversos fatores, como o tipo de contaminação que está sujeito a ocorrer no sistema e qual será o tipo de uso da água captada. Os filtros podem ser instalados no tubo de descida (pré-filtro) ou dentro do próprio reservatório de água de chuva (filtros flutuantes).

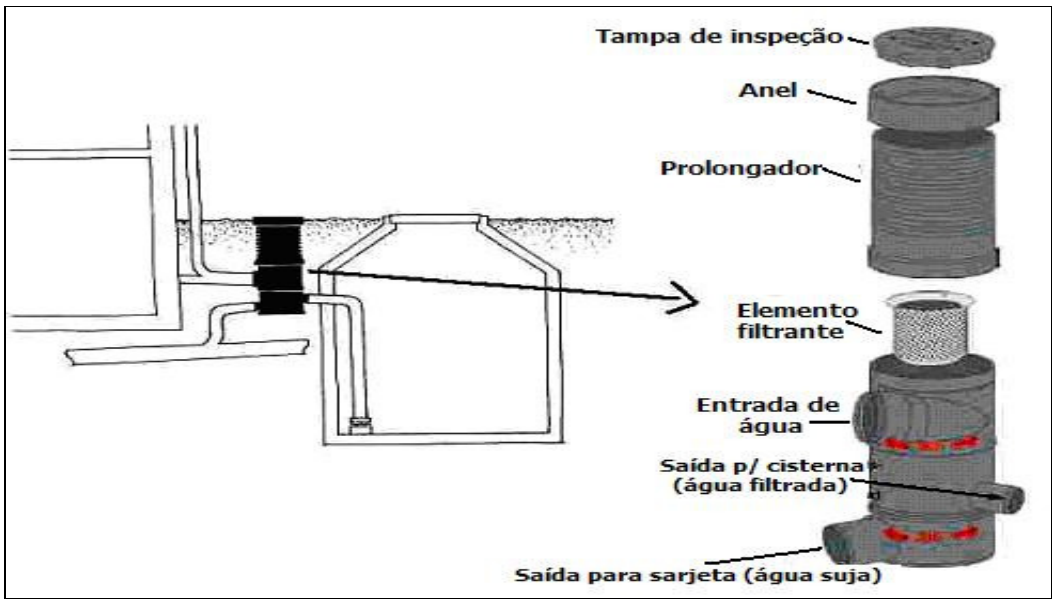
Há diferentes tipos de pré-filtros para SCAC. De um lado, há os filtros de descida que separam a água da sujeira e são instalados diretamente em cada tubo de descida da água de chuva. Seu uso contrasta com o de outro tipo de filtro, denominado de filtro centralizado, por ser inserido após a unificação dos tubos de descida individuais.

Segundo a empresa Aqua Stock (2006b), nestes filtros centralizados a água é separada das impurezas girando em movimento de vórtice e passando por uma malha ou tecido vertical (filtros vortex) ou passando por uma malha ou tecido em posição inclinada (filtros de volume). Ambos os tipos de filtros são desenhados para levar a sujeira para um tubo de drenagem automaticamente, por isso são chamados também de auto-limpantes. Os filtros clássicos do tipo peneira ou grade, em contraste, tem de ser limpos manualmente em intervalos regulares de tempo. Estes filtros podem ser encontrados com fornecedores especializados em captação de água de chuva.

Pré-filtro vortex: Os filtros tipo vortex são instalados no ponto de união da tubulação que drena a água de chuva de diversos condutores verticais. De acordo com a empresa Aqua Stock (2006a), tais filtros utilizam um princípio original de filtragem – de tensão superficial – que garante grande eficiência, separando a água de chuva de impurezas como folhas, galhos, insetos e musgo, com mínima perda de

água e exigência de manutenção mínima. Na Figura 02 a seguir é ilustrado um modelo de filtro vortex:

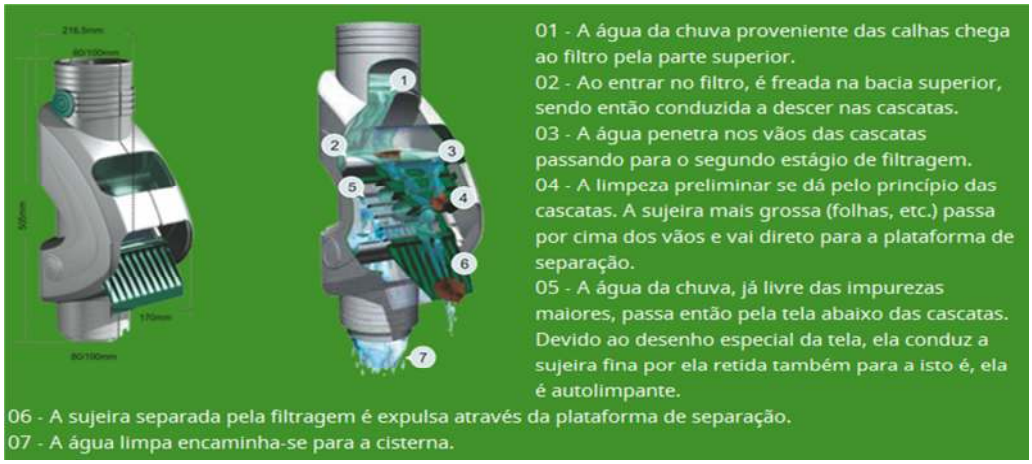
Figura 02: Pré-filtro Vortex da Wisy modelo WFF 100



Fonte: Adaptado de Aqua Stock (2006b).

Pré-filtro de volume: O pré-filtro de volume, que também pode ser utilizado unicamente em um tubo de descida, tem como o propósito a remoção de detritos; Ele separa a água de chuva de impurezas oriunda dos telhados e calhas que possam vir a entrar na tubulação. Na Figura 03 a seguir é ilustrado um exemplo de pré-filtro de volume onde os detritos são retidos e descartados pela frente do filtro através de uma malha inclinada. A partir daí a água de chuva livre de tais impurezas continua descendo pelo tubo de descida até chegar ao reservatório. Cabe salientar que somente o uso deste filtro não purifica a água, logo a água de chuva deve ser preferencialmente usada para fins não potáveis caso não receba posteriormente um tratamento específico para torná-la potável.

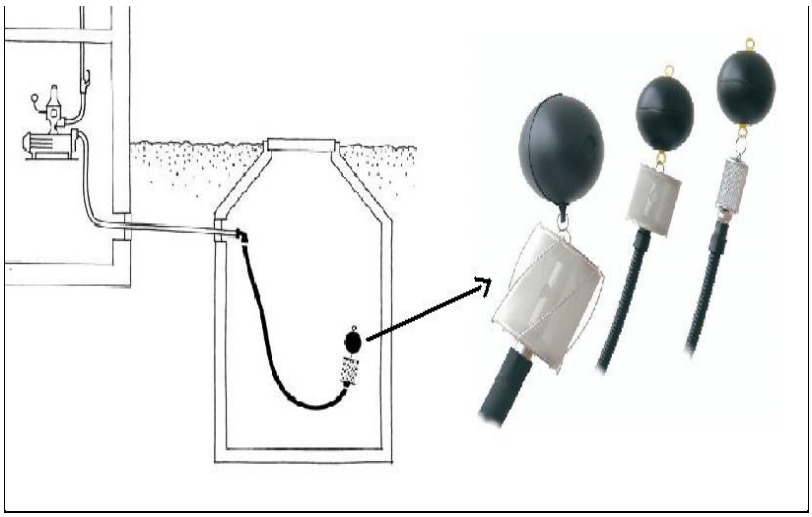
Figura 03: Funcionamento do pré filtro 3P Rainus



Fonte: Acqua Save (2015).

Filtro flutuante: Os filtros flutuantes de sucção são instalados na tomada de água da bomba que faz a captação da água do reservatório para alimentar os pontos de consumo. Filtram impurezas que porventura ainda estejam no reservatório, garantindo a qualidade da água e evitando problemas com a bomba. Podem ser usados independentes do uso de pré-filtros e possuem a vantagem de não sugar a água armazenada no fundo do reservatório que, possivelmente, pode possui material particulado sedimentado. Na Figura 04 a seguir é ilustrado o filtro flutuante.

Figura 04: Filtro flutuante



Fonte: Adaptado de Aqua Stock (2006b).

Resultados e discussões

Pontos positivos e negativos de um SCAC

Com base no entendimento dos diversos autores consultados, levantou-se que a captação de água de chuva apresenta diversos pontos benéficos, assim como diversos pontos adversos. Em relação aos pontos positivos, chegou-se a 28 pontos, já em relação aos pontos negativos, chegou-se a 17 pontos. No Quadro 01 é apresentado esse levantamento.

Quadro 01: Levantamento dos pontos positivos e negativos de SCAC

Positivos	Negativos
1) Alta qualidade físico-química da água de chuva (UNATSABAR, 2001); **2)** Livre de impurezas que podem causar incrustações nos encanamentos e equipamentos (Rupp, 1998); **3)** Por não ser uma água dura, requer menos detergente/sabão na lavagem de roupas e limpezas em geral, logo, reduz a poluição causada por estes produtos (LILI, 2006); **4)** Livre de ferro e manganês que pode causar manchas na lavagem de roupas (Rupp, 1998); **5)** É melhor para irrigação de jardins e plantas por não possuir desinfetantes como cloro (Rupp, 1998); **6)** A água de chuva é livre de sódio, importante para pessoas que precisam ter dietas com baixos teores desta substância (Krishna, 2005); **7)** O uso da água de chuva pode representar de 50 a 70 % do consumo total de água residencial, dependendo do *design* e performance do sistema, logo reduz a conta de água (Yoklic, 2005); **8)** Aumenta a oferta de água para consumo doméstico (Palmier, 2008); **9)** Aumenta a oferta de água para dessedentação animal (Palmier, 2008); **10)** Fonte de água para uso em laboratórios de hidráulica que consomem grandes vazões	**1)** A quantidade de água captada depende da precipitação do lugar e da área de captação (UNATSABAR, 2001); **2)** Quando a água de chuva entra em contato com o sistema de captação, dependendo do material utilizado no sistema, contaminantes podem ser liberados, que adversamente afetam a saúde humana (Hart e White, 2003); **3)** A água inicial interceptada pode conter grande número de contaminantes oriundo da atmosfera e da lavagem do telhado e calhas (Marley New Zealand Limited, 2005); **4)** O tipo e intensidade de tráfego de veículos automotores influenciam adversamente a qualidade da água de chuva que pode ser captada (Sautchuk *et al.*, 2004); **5)** Torna-se necessário o descarte da primeira água precipitada em regiões com grande concentração de indústrias e atividades agropecuárias que são fontes de emissão de poluentes que podem ser retirados da atmosfera pela chuva ou aerotransportados pelos ventos e consequentemente chegar no sistema de captação de água de chuva (GSA, 1999); **6)** Considerando que a captação de água de chuva envolve a interceptação e armazenamento de água torna-se um fator de risco se não manejo adequadamente, pois podem ocasionar a proliferação de vetores de

de água para fins experimentais (Palmier, 2008);

11) Contribui para a economia dos recursos hídricos de qualidade superior e para prevenir a escassez da água potável nos sistemas de distribuição municipais (Bezerra *et al.*, 2010);

12) Proporciona a recarga dos aquíferos quando utilizada vala de infiltração de água de chuva no terreno (May, 2004);

13) Reduz a erosão dos solos (Palmier, 2008);

14) Técnicas de captação de água de chuva em áreas agrícolas podem favorecer a umidade do solo, o melhoramento do escoamento superficial, a recarga de águas subterrâneas e o aumento da produção agrícola (Salem *et al.* 2014; Yosef e Asmamaw, 2015);

15) Diminui o risco de inundações urbanas devido à diminuição da água de chuva escoada de cada lote (May, 2004);

16) Suplementa outras fontes de água quando estas de tornam escassas ou impróprias para consumo (Rupp, 1998);

17) Consegue-se, mesmo com o baixo índice pluviométrico típico de regiões semiáridas, uma quantidade de água capaz de suprir as necessidades básicas de uma família, para beber e cozinhar, durante o período de maior escassez (Silva, 2006).

18) Vários estudos demostram que os SCAC podem ajudar comunidades que tem difícil acesso à água, garantindo assim a segurança alimentar da população rural a nível doméstico (Kahinda e Taigbenu, 2011);

19) Útil em tempos de emergências ou catástrofes (Rupp, 1998);

20) Minimiza o risco em áreas sujeitas às secas (Palmier, 2008);

21) Restaura a produtividade de áreas agrícolas em regiões semiáridas e aumenta a produtividade da agricultura de sequeiro (Palmier, 2008);

doenças como a dengue, febre amarela, malária e encefalite que são transmitidos por mosquitos que precisam de água reservada para completar seu ciclo de vida (Vasudevan *et al*, 2001);

7) A água de chuva captada e armazenada em tanques domésticos apresenta possibilidade de conter microrganismos de uma ou várias fontes. Análises desta água na Austrália têm mostrado que a presença de coliformes é bastante comum (Cunliffe, 1998);

8) A formação de barros e depósitos nas calhas e tanques por falta de limpeza e/ou uso favorece o crescimento e desenvolvimento de bactérias, das quais, muitas patógenas (Cunliffe, 1998);

9) A água de chuva é ligeiramente ácida e possui baixo teor de minerais dissolvidos, como tal, ela é relativamente agressiva. A água de chuva pode dissolver metais pesados e outras impurezas dos materiais que fazem parte do sistema de captação de água de chuva (WHO, 2007);

10) A ausência de minerais na água de chuva significa que a mesma tem um gosto particular ou falta de gosto, o que pode acarretar rejeição do consumo desta por parte de pessoas que estão acostumadas a consumirem águas ricas em minerais (WHO, 2007);

11) Águas de chuva armazenadas em cisternas geralmente atendem os padrões de potabilidade da OMS para os parâmetros físico-químicos, porém frequentemente não atendem aos padrões de potabilidade nos critérios de qualidade microbiológica (Andrade, 2004; Luna et al. 2011; Silva *et al.*, 2012);

12) A água de chuva não contém flúor. Se a água de chuva é usada exclusivamente para beber, torna-se importante à adição de flúor na água para ajudar a prevenir a cárie dentária, o que acarreta em custos e necessidade de pessoas capacitadas para realizar tal

22) Ajuda no combate a desertificação por meio do reflorestamento e cultivo de frutas (Palmier, 2008); **23)** Sistema independente do abastecimento público convencional, portanto ideal para comunidades dispersas (UNATSABAR, 2001); **24)** A proteção sanitária de cisternas rurais para abastecimento doméstico é relativamente simples. Basicamente requer o desvio das primeiras águas das chuvas, cobertura do tanque, tomada de água por tubulação e um manejo adequado, que depende de informação suficiente aos usuários (Andrade, 2004); **25)** Razões promocionais: Melhora a imagem da empresa quanto ao uso de uma tecnologia ambientalmente correta (UKRHA, 2007); **26)** Não requer energia elétrica para operação na maioria dos sistemas (UNATSABAR, 2001); **27)** Fácil manutenção e operação (UNATSABAR, 2001); **28)** Tecnologia simples, por isso oferece muitos benefícios potenciais (Rupp, 1998).	procedimento (GSA, 1999); **13)** Alto custo inicial que pode impedir sua implantação por parte de famílias de baixos recursos financeiros (UNATSABAR, 2001); **14)** A literatura mostra que o período de retorno médio de investimento desses sistemas é de aproximadamente 10 anos (Chilton *et al.*, 1999); **15)** A falta de um conhecimento hidrológico adequado é um fator limitante para o desenvolvimento e implantação de projetos confiáveis de captação de água de chuva (Palmier, 2008); **16)** Embora manuais que descrevem a maior parte das técnicas tenham sido publicados recentemente, normalmente não são apresentados guias para selecionar a técnica mais adequada a ser implantada em uma dada região (Palmier, 2008); **17)** A maior parte das atividades referentes à implantação dessas técnicas são executadas de maneira relativamente isolada e/ou sem uma coordenação interinstitucional, multidisciplinar e intersetorial (Palmier, 2008).

Com base no Quadro 01 pode-se observar que, apesar de distintos, muitos dos pontos positivos e negativos levantados possuem aspectos similares que podem ser agrupados.

Nesse sentido, no que concerne os pontos positivos, pode-se destacar 8 agrupamentos e seus respectivos aspectos. i) Os aspectos de qualidade de água são mencionados nos itens 1 ao 16, dos quais estão relacionados ao potencial uso da água de chuva captada para diferentes fins devido a sua qualidade. ii) Os itens 7 a 11 destacam os aspectos de economia de água que os SCAC podem trazer. iii) Os itens 12 a 14 podem ser relacionados às questões inerentes a proteção ambiental, visto que os autores citados abordam a importância dos sistemas para a proteção ambiental. iv) Similar a este último, no item 15 é destacado o aspecto de prevenção

de desastres, visto que os SCAC podem diminuir os picos de enchentes, principalmente em cenários com chuvas torrenciais em áreas altamente impermeabilizadas. v) Aspectos de segurança hídrica são destacados nos itens 16 a 23, visto que os SCAC podem ser úteis em situações emergenciais e/ou de escassez hídrica. vi) No item 24 são abordados aspectos sanitários necessários na operação do sistema. vii) No item 25 é abordado aspectos relacionados ao *marketing* ambiental que podem ser utilizados por empresas que utilizam os SCAC. vii) Por fim, nos itens 26 a 28 podem estar relacionados à simplicidade e benefícios do sistema.

Em relação aos pontos negativos, foi observado 2 agrupamentos e seus respectivos aspectos, dos quais: i) Dos itens 1 ao 12 estão todos relacionados a aspectos de qualidade da água, sanitários e de saúde pública. Sendo assim, destaca-se que vários autores chamam a atenção para a importância do controle sanitário do sistema em todas as etapas de captação da água de chuva a fim de que a água não traga riscos para a população que a consome, seja para fins potáveis ou não potáveis. ii) Nos itens 13 ao 17 podem ser relacionados aos aspectos econômicos, técnicos e institucionais relacionados a implantação de um SCAC. Sendo assim, deve ser destacado que o retorno financeiro pode ser demorado, porém em situações de escassez hídrica ou para ser utilizado em regiões semiáridas pode ser a única opção e os aspectos econômicos deixam de ser prioridade. Aspectos técnicos também foram relatados nestes itens, principalmente devido à falta de conhecimento hidrológico e articulação interinstitucional necessários na implantação de um SCAC.

Análise dos contrapontos do SCAC

De acordo com Gould e Nissen (1999), nenhuma fonte de água alternativa é 100% segura. Ainda de acordo com os autores, a questão que deve ser analisada é a determinação do nível aceitável de risco, baseada nas condições socioeconômicas de uma sociedade em face das fontes de água disponíveis. Logo, percebe-se que a

utilização de SCAC em áreas que não possuem fontes de fácil acesso ou com qualidade insatisfatória, o uso da captação de água de chuva torna-se, na maioria das vezes, a melhor fonte de água para consumo. Nesse sentido, Jiang *et al.* (2013) destacam que tal técnica tem sido amplamente utilizado para uso doméstico e produção agrícola principalmente em regiões áridas e semiáridas e que possuem a vantagem de ter operação relativamente simples, alta adaptação, baixo custo consumir menos energia.

Como apontado por diversos autores, como Mirbagheri (1997), Gould e Nissen (1999), May (2004) e Vivacqua (2005), a contaminação da água de chuva é fortemente influenciada por ações antrópicas. A urbanização associada com um alto nível de atividades econômicas das sociedades modernas em pequenos espaços como as cidades, produz uma alta concentração de poluentes atmosféricos que, em contato com a água precipitada, podem contaminá-la. Esses fatos afetam a qualidade da água de chuva para algumas aplicações. Mesmo em áreas rurais, o manejo inadequado do sistema, o uso intensivo de aspersões de pesticidas, herbicidas ou inseticidas nas proximidades do SCAC podem tornar a água imprópria para o uso, contudo, técnicas de descarte da primeira leva de chuva vem demonstrando que a qualidade da água melhora satisfatoriamente depois que ela é desviada por um dispositivo *first flush*, mas mesmo utilizando deste artifício, a água ainda não atende padrões de qualidade para uso potável se não passar por um processo adequado de tratamento.

May (2004) considera que a viabilidade do sistema para fins não potáveis depende basicamente de três fatores: precipitação, área de coleta e demanda. Se esses fatores forem elevados, o prazo de recuperação do investimento é curto, como por exemplo, a utilização de água de chuva em postos de gasolina, em lavanderias e indústrias. Embora esse período possa parecer longo e inviável economicamente, a decisão de construir um SCAC em residências com pequena área de captação ou localizadas em climas áridos e semiáridos, não será tomada com o objetivo maior de economizar dinheiro e sim com o objetivo de garantir

uma fonte de água e o futuro da sustentabilidade hídrica, promovendo assim a conservação da água.

Considerações finais

Os benefícios do uso de SCAC podem ser inúmeros, mas o que merece destaque é a economia de água potável em áreas urbanas que o sistema pode proporcionar devido a destinar a água de chuva captada para fins não potáveis. Porém, um grande problema que pode ser causado pelo aumento do uso de SCAC, principalmente em regiões com índice pluviométrico favorável, é o uso abusivo da água da chuva, principalmente pela mesma não ser tarifada, acarretando em um aumento da geração de efluentes líquidos.

A implantação de um SCAC no Brasil ainda é oneroso e consequentemente não acessível para famílias de baixa renda que vivem em lugares isolados adquirirem um sistema apropriado sem ajuda financeira do governo ou organizações não governamentais. Um fato questionável é que a qualidade da água de chuva armazenada em cisternas de placas no semiárido brasileiro ainda não atende padrões de qualidade, porém, às vezes, a água de chuva é a única fonte mais próxima e/ou a que possui melhor qualidade frente às outras disponíveis.

Além disso, no que se refere à qualidade da água consumida no meio urbano, constatam-se esforços das autoridades em implementar ações que visem a fornecer à população uma água com boa qualidade, enquanto no meio rural, de um modo geral, essas ações praticamente inexistem. Esse fato é relevante porque essas populações rurais, como as do semiárido brasileiro, ao utilizarem a água de chuva em condições inadequadas para consumo humano direto estarão expostas ao risco de contraírem inúmeras doenças de veiculação hídrica. Encarregar o próprio consumidor de controlar a qualidade da água de um SCAC torna-se um fator de risco ou até mesmo uma postura incorreta, uma vez que o seu conhecimento quanto aos riscos que a água pode oferecer à saúde é praticamente inexistente, devido a se tratar, na maioria das vezes, de pessoas leigas.

Em suma, qualquer que seja a solução técnica de abastecimento adotada, a mesma deverá propiciar à população beneficiária uma disponibilidade adequada de água em termos quantitativos e qualitativos, além de garantir a proteção e conservação dos recursos hídricos e ter como objetivo geral o de assegurar a melhoria da qualidade de vida.

Referências

ACQUA SAVE. **3P Rainus**. Sistemas jardinagem (Técnico), [catálogo on line], 2014. Disponível em: < http://www.acquasave.com.br/index.php/sistemas-jardinagem-tecnico>. Acesso em: 02 de nov. 2014.

ANDRADE, C. O. de. Proteção sanitária das cisternas rurais. In: **XI Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**. 2004, Natal, Brasil. Anais... Natal: ABES/APESB/APRH. 2004.

AQUA STOCK - SOLUÇÕES EM APROVEITAMENTO DE ÁGUA DE CHUVA. **Teste da revista belga Test Achats**. São Paulo, 2006a.

AQUA STOCK - SOLUÇÕES EM APROVEITAMENTO DE ÁGUA DE CHUVA. **Tecnologia para o reaproveitamento de água de chuva: catálogo de produtos**. São Paulo, 2006b.

BEZERRA, S. M. C.; CHRISTAN, P.; TEIXEIRA, C. A.; FARAHBAKHSH, K. Dimensionamento de reservatório para aproveitamento de água de chuva: comparação entre métodos da ABNT NBR 15527: 2007 e Decreto Municipal 293/2006 de Curitiba, PR. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 10, n.4, 2010.

BOERS, Th.M.; BEN-ASHER, J., A review of rainwater harvesting. **Agricultural Water Management**, vol. 5, n. 2, July 1982.

CHILTON, J. C. *et al*. Case study of a rainwater recovery system in a commercial building with large roof. **Urban Water**, v. 1, n. 4, p. 345-354, 1999.

CUNLIFFE, D. A. **Guidance on the use of rainwater tanks**. Series: National Environmental Health Forum Monographs. Water Series n° 3. Australia: Openbook Publishers, 1998

GHANAYEM, M. Enrivonmental considerations with respect to rainwater harvesting. Applied Research Institute Jerusalem. In: **Rainwater International Systems**, Manheim, Palestine, 2001. 11 p.

GNADLINGER, J. Colheita de água de chuva em áreas rurais. In: **2º Fórum Mundial da Água**. Haia, Holanda, 16 a 22 de março de 2000.

GONÇALVES, R. F. (coord.). **Uso racional da água em edificações**. Projeto PROSAB - Rio de Janeiro: ABES, 2006. 352 p.

GOULD, J.; NISSEN, E. P. **Rainwater catchment systems for domestic supply: design, construction and implementation**. London: ITDG Publishing, 1999.
GSA – GOVERNMENT OF SOUTH AUSTRALIA. **Rainwater tanks: their selection, use and maintenance**. Australia: Department for Environment Heritage and Aboriginal Affairs, 1999.

HART, C.; WHITE, D. **Best management practices for rainwater catchment systems in Alasca: applications for domestic water use**. A publication of the Cold Climate Housing Research Center. Alaska, February 2003.

HELMREICH, B.; HORN, H. Opportunities in rainwater harvesting, **Desalination**, vol. 248, Issues 1–3, 2009.

JIANG, Z.; LI, X.; MA, Y. Water and energy conservation of rainwater harvesting system in the loess plateau of china. **Journal of Integrative Agriculture**, vol. 12, n. 8, 2013.

KAHINDA, J. M.; TAIGBENU, A. E. Rainwater harvesting in South Africa: challenges and opportunities, **Physics and Chemistry of the Earth**, Parts A/B/C, vol. 36, Issues 14–15, 2011.

KRISHNA, H. J. **The Texas manual on rainwater harvesting**. 3nd ed. Texas Water Development Board. Austin - Texas, 2005. 88 p.

LILI – LOW IMPACT LIVING INITIATIVE. **Rainwater harvesting**. Redfield Community, Winslow, 2006.

LUNA, C. F., BRITO, A. M.; COSTA, A. M.; LAPA, T. M.; FLINT, J. A.; MARCYNUK, P.. Impacto do uso da água de cisternas na ocorrência de episódios diarréicos na população rural do agreste central de Pernambuco, Brasil. **Rev. Bras. Saude Mater. Infant.**, Recife , v. 11, n. 3, 2011.

MACOMBER, P. S. H. **Guidelines on rainwater catchment systems for Havaii**. Havaii: University of Havaii at Manoa, 2001. 51 p.

MARLEY NEW ZEALAND LIMITED. **Rain harvesting products: safer solutions for the collection, storage and distribution of rain water**. New Zealand, 2005.

MAY, S. **Estudo da viabilidade do aproveitamento de água de chuva para consumo não potável em edificações**. 2004. 159 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Curso de mestrado do Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

MIRBAGUERI, S. A. Sources of pollution for rainwater in catchment systems, and environmental quality problems. In: **International Rainwater Catchment Systems Conference**, 1997.

PALHARES, J. C. P.; GUIDONI, A. L. Qualidade da água de chuva armazenada em cisterna utilizada na dessedentação de suínos e bovinos de corte. **Revista Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**: v. 7, n. 1, 2012.

PALMIER, L. R. **Captação de água de chuva em áreas urbanas e rurais**. Palestra apresentada na Secretária Adjunta de Meio Ambiente da Prefeitura de Belo Horizonte (Apresentação disponibilizada em formato digital). Belo Horizonte, 18 de Junho de 2008.

PHILLIPS, A. A. **Water harvesting: guidance manual**. Tucson – Arizona, 2005. 35 p.

RUPP, G. Mont Guide: **Rainwater havesting system for montana**. Montana: Montana State University, 1998.

SALEM, H. M.; VALERO, C.; MUÑOZ, M. A.; RODRÍGUEZ, M.; BARREIRO, P. Effect of reservoir tillage on rainwater harvesting and soil erosion control under a developed rainfall simulator, **CATENA**, vol. 113, 2014.

SAUTCHUK, C. A.; LANDI, F. D. N.; MIERZWA, J. C.; VIVACQUA, M. C. R.; SILVA, M. C. C.; LANDI, P. D. N.; SCHMIDT, W. **Conservação e reúso de água: manual de orientações para o setor industrial**. v. 1. São Paulo: Fiesp/Ciesp, 2004. 92 p.

SILVA, A. S.; PORTO, E. R.; LIMA, L. T. de.; GOMES, P. C. F. **Captação e conservação de água de chuva para consumo humano: cisternas rurais – dimensionamento, construção e manejo**. EMBRAPA-CPATSA/SUDENE - Projeto Sertanejo - Circular técnica n° 12. Petrolina: Polikromia do Nordeste, 1984. 103 p.

SILVA, C. V. **Qualidade da água da chuva para consumo humano armazenado em cisternas de placa: estudo de caso: Araçuaí, MG**. 2006. 117 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio ambiente e Recursos Hídricos) - Curso de mestrado do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

SILVA, C. V.; HELLER, L; CARNEIRO, M. Cisternas para armazenamento de água de chuva e efeito na diarreia infantil: um estudo na área rural do semiárido de Minas Gerais. **Eng. Sanit. Ambient.**, Rio de Janeiro , v. 17, n. 4, 2012 .

SOIL, T. J. **Collecting and utilizing rainfall runoff: a homeowner's manual of ideas for harvesting rainwater**. USA: Water Conservation District, 2005. 27 p.

TOMAZ, P. Aproveitamento de água de chuva de telhados em áreas urbanas para fins não potáveis: diretrizes básicas para um projeto. In: 6° **Simpósio Brasileiro de Captação e Manejo de Água de Chuva**. Belo Horizonte, MG, 09-12 de julho de 2007. 1 CD-ROM.

UKRHA – THE UK RAINWATER HARVESTING ASSOCIATION. **Industry fact sheet: rainwater harvesting – general considerations**. UK, 2007.

UNATSABAR - UNIDAD DE APOYO TÉCNICO EN SANEAMIENTO BÁSICO RURAL. **Guía de diseño para captacion del agua de lluvia**. Lima-Peru, 2001. 18 p.

VASUDEVAN, P. ; PATHAK, N. ; MITTAL, P. K. **Domestic rainwater harvesting and insect vectores: a literature review**. Indian Institute of Technology. Delhi – India, 2001.

VIDACOVICH, K. **Dispositivos para descarte inicial das chuvas: comparações entre modelos**. Artigo Técnico, Fevereiro de 2004.

VIEIRA, A. S.; BEAL, C. D.; GHISI, E.; STEWART, R. A. Energy intensity of rainwater harvesting systems: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 34, 2014.

VISHWANATH, S. **Rainwater harvesting for large site developments**. Rain Water Club, 2006.

VIVACQUA, M. C. R. **Qualidade da Água do Escoamento Superficial Urbano: revisão visando o uso local**. 2005. 185 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária. São Paulo, 2005.

WHO - WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Water, sanitation and health: rainwater harvesting**. 2007.

YOKLIC, M. R. **Research in progress: cold climate rainwater harvesting systems**. Tucson – Arizona: University of Arizona, 2005.

YOSEF, B. A.; ASMAMAW, D. K. Rainwater harvesting: an option for dry land agriculture in arid and semi-arid Ethiopia. **International Journal of Water Rresources and Environmental Engineering**, vol. 7, n. 2, 2015.

Versão brasileira da peça de teatro Copenhagen (de Michael Frayn) para fins didáticos

Brazilian version of the Copenhagen theater piece (by Michael Frayn) for teaching purposes

Luis Felipe Massarico Cardoso[1]

[1] Núcleo de Estudos Transdisciplinares em Ensino, Ciência, Cultura e Ambiente (NuTECCA), Instituto Federal de São Paulo, Itapetininga, fe.philos@hotmail.com.

Submetido em 31/01/2015
Revisado em 24/04/2015
Aprovado em 04/05/2015

Resumo: Michael Frayn, após pesquisar em inúmeras fontes, escreveu esta história na forma de teatro, onde tentou retratar o que teria se passado naquela conversa sombria, ocorrida na noite de 1941 em Copenhagen, entre Bohr, Margrethe e Heisenberg. A tradução desta peça, do espanhol para o português, foi pensada e realizada com o intuito da disseminação da ciência através da cultura para o povo de língua portuguesa, visto que muitos alunos relatam durante as aulas e conversas informais, a dificuldade de se entender o conteúdo da física com palavras rebuscadas e com a formalidade mostrada em livros.
Palavras chave: Teatro. Ensino de física. Física moderna.

Abstract: Michael Frayn, after researching from numerous sources, wrote this story in the form of theater, in which he tried to portray what would have passed in that gloomy conversation between Bohr, Margrethe and Heisenberg, which took place on the night of 1941 in Copenhagen. The translation of this piece, from Spanish to Portuguese, was conceived and carried out with the intention of dissemination of science through culture to the people of Portuguese language, since many students report, during classes and informal conversations, the difficulty of understanding the physical content with flowery words and formality shown in books.
Keywords: Theater. Physics teaching. Modern physics.

Apresentação

Bohr e Heisenberg:, amigos de longa data se encontram depois de mortos. Heisenberg: era considerado um membro da família Bohr desde sua chegada em 1921; "juntos" criaram a interpretação de Copenhagen, de onde surgiram contribuições esplêndidas para a mecânica quântica. A fundação dessa nova área dá reviravolta no mundo da física. Bohr e Margrethe, judeus. Heisenberg, alemão. 1939 explode a Segunda Grande Guerra. Alemães perseguem judeus, físicos judeus fogem para outros países. Físicos alemães, liderados por Heisenberg iniciam o projeto de um programa nuclear alemão. Ele em 1941 procura Bohr em Copenhagen. O que aconteceu de tão drástico que pôs fim a uma amizade de anos, que rompeu os laços familiares desses personagens? Qual o conteúdo que teve a conversa? Só a incerteza pode ser complementada. Michael Frayn, após pesquisar em inúmeras fontes, escreveu esta história na forma de teatro, onde tentou retratar o que teria se passado naquela conversa sombria na noite de 1941 em Copenhagen.

Apresentada na Broadway (Nova Iorque), teatro General San Martín (Buenos Ayres) e também pela equipe Arte e Ciência no Palco (São Paulo), a peça foi um sucesso em quase todas as pesquisas, referências e resenhas achadas na rede. Além do inglês, versões do livro também estão disponíveis na internet (entre venda e versões em arquivo .pdf) em francês, alemão, italiano, russo e espanhol. Um filme foi realizado com base no livro, o nome é "Copenhagen", sob direção de Howards Davies, estrelado por Stephan Rea (Niels Bohr), Daniel Craig (Werner Heisenberg) e Francesca Annis (Margreth Bohr), a adaptação televisiva tem 90 minutos.

A tradução desta peça, do espanhol (apresentado no teatro San Martín, em 2002 e disponível na internet em .pdf) para o português, foi pensada e realizada com o intuito da disseminação da ciência através da cultura para o povo de língua portuguesa, visto que muitos alunos relatam durante as aulas e conversas informais, a dificuldade de se entender o conteúdo da física com palavras rebuscadas e com a formalidade mostrada em livros. O teatro, desde a Grécia Antiga é utilizado como uma ferramenta de comunicação sobre diversos temas, sendo utilizada

primeiramente para transmitir a religião e a cultura e com essa peça, busca-se mostrar a ciência rebuscada para um público que está iniciando a busca do conhecimento, para aqueles que já tiveram contato com as teorias mais profundas do tema e para aqueles que simplesmente se simpatizam com a história da Segunda Guerra Mundial, suas relações políticas e sociais.

"COPENHAGEN"
Drama. Dois atos. 94 páginas.

PERSONAGENS
NIELS BOHR - 55 anos. Físico teórico judeu nascido na Dinamarca. Esposo de Margrethe. Um dos autores da Interpretação de Copenhagen que mudou o rumo da física teórica. Emocionalmente estável, forte sentimento paterno.
MARGRETHE NØRLUND BOHR - Entre 50 e 51 anos. Dinamarquesa, de origem judaica. Esposa de Niels Bohr, responsável pela datilografia dos trabalhos que resultaram na Interpretação de Copenhagen. Com gênio forte mas com espírito materno.
WERNER KARL HEISENBERG - 39 anos. Alemão. Conquistou a cátedra de Liepzig após publicar o Princípio da Incerteza. Juntamente com Bohr criou a Interpretação de Copenhagen. Afinidade emocional com a incerteza, filho de consideração de Niels e Margrethe.

LOCAL: Sala de estar da casa de Niels Bohr e Margrethe.
DURAÇÃO: 150 minutos (dois atos).

TEXTO ORIGINAL EM ESPANHOL: http://goo.gl/SZSmJS, primeiro acesso em 31 ago. 2014; último acesso em 30 jan. 2015.

<INÍCIO DO PRIMEIRO ATO>

Margrethe: Mas por que ele veio para Copenhague?

Bohr: Meu amor, isso importa? Quanto tempo faz que nós três já estamos mortos?

Margrethe: Algumas perguntas duram por muito tempo após a morte de seus donos. Como fantasmas a buscar as respostas que nunca encontrou em vida.

Bohr: Algumas perguntas não encontram suas respostas.

Margreth: Mas porque ele veio? O que está tentando dizer?

Bohr: No fundo creio que é muito simples: queira conversar.

Margreth: Conversar? Com o inimigo? No meio da guerra?

Bohr: Margreth, meu amor, não éramos inimigos.

Margreth: Estamos falando de 1941!

Bohr: Heisenberg: era nosso amigo!

Margreth: Heisenberg: era alemão! Nós éramos dinamarqueses! Os alemães tinham ocupado o nosso país. Eu nunca vi você tão irritado com alguém como naquela noite com Heisenberg:!

Bohr: Não quero contradizer, mas acho que eu fiquei incrivelmente tranquilo! Para ele era tão difícil quanto para nós.

Margreth: Por isso mesmo, por que fazer isso? Agora, não faz mal a ninguém, não trairemos a ninguém.

Heisenberg: Estamos todos mortos, é certo. E o mundo se lembra de mim só por duas coisas: o princípio da incerteza e por minha misteriosa visita a Niels Bohr em Copenhague em 1941. Todos entendem do se trata a incerteza! Ou assim eles pensam. Mas ninguém entende por que eu fui para Copenhagen! Eu expliquei uma e outra vez. A Bohr mesmo, e a Margreth. Aos interrogadores, oficiais de inteligência, jornalistas, historiadores! Quanto mais eu explicava mais incerto ficava. Bem, com muito gosto vou tentar de novo. Agora que estamos mortos e não faremos mal a ninguém, e não trairemos ninguém.

Margreth: Agora eu posso dizer. Nunca gostei dele!

Bohr: Não é verdade. Eu gostava muito dele quando ele veio pela primeira vez na década de vinte! E quando ele veio para a praia com a gente e as crianças? Era mais um da família!

Margreth: Tinha algo "estranho", já desde essa época!

Bohr: Mas era um físico excepcional. E quanto mais eu penso, mais me convenço de que Heisenberg: foi o melhor.

Heisenberg: Quem foi Bohr? Ele foi o primeiro, o pai de todos nós! Tudo o que fizemos foi baseado em sua grande intuição!

Bohr: Pensar que veio trabalhar comigo em 1924...

Heisenberg: Acabava de terminar meu doutorado, e Bohr era o físico atômico mais famoso do mundo!

Bohr: ...e em menos de um ano a mecânica quântica te era devedora de umas quantas coisas.

Margreth: Surgiu do trabalho que fizeram juntos.

Bohr: E um ano depois obteve o Princípio da Incerteza!

Margreth: E foi tua a complementaridade!

Bohr: A discutimos juntos!

Heisenberg: Juntos fizemos nossos melhores trabalhos.

Bohr: Funcionávamos como uma empresa!

Heisenberg: Presidente e gerente geral.

Margreth: Pai e filho.

Heisenberg: Um negócio de família!

Margreth: Ainda que tivéssemos nossos próprios filhos!

BOHR: E seguimos trabalhando juntos muito tempo depois quando já havia deixado de ser meu assistente!

Heisenberg: Depois de ter voltado para a Alemanha em 1927, para assumir o cargo de minha cátedra em Leipzig, e muito depois de ter a minha própria família.

Margreth: Então, os nazistas chegaram ao poder!

Bohr: E a vida tornou-se cada vez mais difícil! Quando explodiu a guerra, impossível. Até esse dia em 1941!

Margreth: Quando se terminou para sempre.

Bohr: Sim, por que fazer isso?

Heisenberg: Setembro de 1941. Durante anos eu tinha na memória como outubro.

Margreth: Setembro. Final de setembro.

Heisenberg: A memória é tão curiosa, na cabeça o passado se torna presente! Setembro de 1941, Copenhagen! E imediatamente aqui estou, descendo do trem noturno que vem de Berlim, com o meu colega Weizsäcker! Dois trajes civis entre todos os uniformes cinzas do exército alemão e os elegantes uniformes pretos da SS vieram com a gente. Na minha pasta estão os papéis da conferência que eu vou dar. Na minha cabeça há outra mensagem que eu devo comunicar. A conferência é de astrofísica. O assunto na minha cabeça é mais difícil. O meu colega Weizsäcker foi meu João Batista, escreveu para Bohr para avisar da minha chegada.

Margreth: Quer te ver?

Bohr: Creio que veio para isso.

Margreth: Deve ser muito importante o que quer te dizer!

Heisenberg: O encontro tem que parecer natural. Tem que ser privado.

Margreth: Espero que não esteja pensando em convidá-lo para nossa casa.

Bohr: Obviamente é o que está esperando!

Margreth: Niels! Eles ocuparam nosso país!

Bohr: Ele não é um deles.

Margreth: É um deles!

Heisenberg: A primeira coisa que fizemos foi visitar oficialmente o Instituto de Bohr de Física Teórica, e almoçamos na antiga e familiar sala de jantar do instituto. É claro que não tive a oportunidade de falar com Bohr! Onde estava? É como num sonho. Não posso pôr em foco os detalhes precisos da cena que me rodeia! Na

cabeceira da mesa é Bohr? É Rozental, é Moller, que decido que seja... O que me lembro foi uma ocasião muito desconfortável.

Bohr: Foi um desastre. Causou uma impressão muito ruim! Ele disse que era lamentável a ocupação da Dinamarca! Mas, no entanto, era perfeitamente aceitável a ocupação da Polônia. E agora tinha certeza de que a Alemanha iria ganhar a guerra.

Heisenberg: Nossos tanques estão às portas de Moscou. O que nos pode deter? Há uma só coisa que talvez. Uma só!

Bohr: É certo que ele sabe que o estão vigiando. Tem que ter cuidado com o que diz. Mas bem se poderia se cuidar com o que diz.

Margreth: Tem que se cuidar ou não o vão deixar sair do país de novo.

Heisenberg: Me pergunto se imaginam o quão difícil foi conseguir permissão para vir. Os humilhantes pedidos ao partido, os poucos recursos para "a festa", os esforços desgastantes para que nossos amigos na chancelaria usassem suas influencias.

Margreth: Como ele parece? Será que ele mudou muito?

Bohr: Um pouco mais velho.

Margreth: Eu ainda me lembro dele como um menino.

Bohr: Tem quase quarenta anos. Um professor maduro.

Margreth: Tem certeza de que quer convidá-lo para vir aqui?

Bohr: Vamos por os argumentos a favor e contra, de uma forma razoável e científica! Primeiro, Heisenberg: é um amigo.

Margreth: Primeiro, Heisenberg: é alemão!

Bohr: Um judeu branco. Assim o chamaram os nazistas! Ensinava relatividade, e diziam que era física judaica! Não podia falar de Einstein, a relatividade, mas continuou apesar de o atacarem terrivelmente.

Margreth: Todos os judeus de verdade perderam seus empregos. Ele ainda ensina!

Bohr: Ainda ensina relatividade.

Margreth: Ainda é professor em Leipzig. Não queria deixar a Alemanha.

Bohr: Ele queria estar lá para reconstruir a ciência alemã quando Hitler não estivesse mais.

Margreth: E se o estão vigiando, vão informar tudo! A quem viu. Que lhes disse. O que disseram a ele.

Heisenberg: Levo minha vigilância como uma doença infecciosa. Eu sei que também vigiam Bohr!

Margreth: E sabe que também te vigiam.

Bohr: Quem? A Gestapo?

Heisenberg: Se dará conta?

Bohr: Não tenho nada a esconder.

Margreth: Nossos compatriotas! Seria terrível para eles, se só pensassem que você está colaborando!

Bohr: Convidar um velho amigo para o jantar não é colaborar!

Margreth: Poderia parecer, não vão falar de política?

Bohr: Apenas de física. Suponho que queira falar de física.

Margreth: Creio que você também tem que supor que não somos os únicos que escutamos o que se diz nesta casa. Se querem privacidade é melhor que falem ao ar livre.

Heisenberg: Posso sugerir de irmos caminhar?

Bohr: Acho melhor nada de passeios. O que queira dizer que diga onde todos ouçam.

Margreth: Talvez queira compartilhar uma ideia nova.

Heisenberg: Então agora me vejo caminhando no crepúsculo outonal para casa dos Bohr! Seguido, suponho, pela minha sombra invisível. O que eu sinto? Medo, segurança. O medo de que um sempre produz um professor, um chefe, um pai! Muito mais medo do que eu tenho a dizer. E mais medo ainda do que poderia acontecer se eu falhar!

Margreth: Terá algo a ver com a guerra?

Bohr: Heisenberg: é um físico teórico! Não creio que alguém tenha descoberto uma maneira usar a física teórica para matar pessoas.

Margreth: Terá algo a ver com a fissão?

Bohr: Por que falar sobre fissão comigo?

Margreth: Porque está trabalhando nisso. E você é a autoridade máxima sobre este tema!

Bohr: Não há nada publicado sobre fissão!

Margreth: Mas e se os alemães estiveram desenvolvendo algum tipo de arma que se baseia na fissão nuclear?

Bohr: Meu amor, ninguém vai desenvolver uma arma baseada na fissão nuclear.

Margreth: Mas se os alemães tentassem, Heisenberg: estaria envolvido.

Bohr: Mas por quê? Na Alemanha sempre teve muitos físicos bons.

Margreth: Não mais. Quase todos eram judeus! E todos eles tiveram de fugir para os Estados Unidos e Inglaterra.

Heisenberg: Einstein, Pauli, Born... e tantos outros.

Margreth: E se Heisenberg: fora o responsável pelo trabalho?

Bohr: Margreth, não existe este trabalho! John Wheeler e eu fizemos tudo em 1939! Uma das coisas que emerge do nosso trabalho é que não há maneira de usar a fissão para produzir armas, pelo menos num futuro próximo.

Margreth: Então, por que todos seguem trabalhando no tema?

Bohr: Porque tem algo de mágico! Se dispara um nêutron no núcleo de um átomo de urânio e se divide em dois elementos distintos! Foi o que tentaram fazer os alquimistas, que um elemento se converta em outro!

Margreth: Então a que veio?

Heisenberg: Esmago as pedrinhas do caminho familiar para a porta de entrada da casa dos Bohr, e toco a campainha! Sinto medo, sim. É uma mistura tola de vaidade e algo que me faz sentir totalmente indefeso, porque dos dois bilhões de habitantes desta terra me deram esta responsabilidade impossível... A pesada porta se abre.

Bohr: Meu querido Heisenberg:!

Heisenberg: Meu querido Bohr!

Bohr: Entre, entre...

Margreth: E, claro, apenas se veem, se avivam as velhas chamas.

Heisenberg: Me sinto tão emocionado que possa me receber.

Bohr: Devemos tentar seguir nos comportando como seres humanos!

Heisenberg: Eu me dou conta o quão difícil é!

Bohr: Só pudemos apertar as mãos outro dia na hora do almoço!

Heisenberg: E Margreth, não a vejo desde...

Bohr: Desde os últimos quatro anos.

Margreth: Niels tem razão. Você parece mais velho.

Heisenberg: Teríamos nos visto em Zurique...

Bohr: Em setembro de 1939!

Heisenberg: E, lamentavelmente...

Bohr: Lamentavelmente para nós também.

Margreth: E muito mais lamentável para tantas outras pessoas.

Heisenberg: Sim, com certeza.

Bohr: Assim estão as coisas!

Heisenberg: O que eu posso dizer a vocês?

Margreth: Se é que se pode dizer algo nestas circunstâncias?

Heisenberg: Não. E seus filhos?

Margreth: Estão bem, obrigado. E Isabel? Os meninos?

Heisenberg: Muito bem! Mandam abraços!

Margreth: Apesar de tudo, tínhamos muita vontade de nos ver! Mas agora que chegou o momento estão tão ocupados evitando se olhar nos olhos que apenas se veem de canto de olho.

Heisenberg: Não sei se vocês se dão conta o quanto isso significa para mim, estar aqui de volta nesta casa. Estive muito só nos últimos anos.

Bohr: Eu posso imaginar!

Margreth: A mim quase não me vê. O observo discretamente detrás da minha cortesia enquanto segue tentando.

Heisenberg: A situação aqui tem sido difícil?

Bohr: Difícil?

Margreth: É claro! Tem que perguntar. Tem que libertar-se disso.

Bohr: Difícil... que posso dizer? No momento não se impuseram leis raciais.

Margreth: Ainda...

Bohr: Há alguns meses começaram a deportar os comunistas e outros "elementos" antialemães.

Heisenberg: Mas a vocês...?

Bohr: Não, não nos incomodaram.

Heisenberg: Estive muito preocupado.

Bohr: Muito amigável. Por enquanto nada que deva nos tirar o sono.

Margreth: Silêncio. Cumpriu o seu dever. Agora você pode levar a conversa para temas mais agradáveis.

Heisenberg: Ainda navega?

Bohr: Navegar?

Margreth: Mal começou...

Bohr: Não, não navego...

Heisenberg: O mar está...?

Bohr: Minado!

Heisenberg: Claro!

Margreth: Suponho que ele não perguntará se você continua a esquiar.

Heisenberg: E esqui?

Bohr: Esquiar? Na Dinamarca?

Heisenberg: Na Noruega. Costumava ir para a Noruega.

Bohr: Costumava, sim.

Heisenberg: Digo, como a Noruega também está...

Bohr: Ocupada? Sim. Na verdade eu acho que poderíamos tirar férias em quase qualquer lugar na Europa.

Heisenberg: Desculpe não quis dizer dessa maneira.

Bohr: É que estou um pouco suscetível...

Heisenberg: Talvez você pudesse considerar a possibilidade de ir alguma vez a Alemanha ...

Margreth: Esse menino é um idiota.

Bohr: Meu querido Heisenberg:, seria facilmente ser confundido e pensar que os cidadãos de uma pequena nação, uma pequena nação invadida, invadida caprichosa e cruelmente, por seu vizinho mais poderoso, que não tem os mesmos sentimentos de orgulho nacional, e o mesmo amor por seu país que seus conquistadores!

Margreth: Niels, o que dissemos?!

Bohr: Só falar de física, sim.

Margreth: Nada de política!

Bohr: Desculpe.

Heisenberg: Não, não, eu só queria dizer que eu ainda tenho a minha cabana de esqui. Então, se por acaso... alguma vez... por qualquer motivo...

Bohr: Talvez Margreth seja tão gentil para bordar uma estrela amarela na minha jaqueta de esqui!

Heisenberg: Sim, sim! Que estupidez!

Margreth: Silêncio novamente. Agora eu começo a sentir pena! Sentado aqui, completamente sozinho, de frente para nós dois, em um país onde o odeia. Agora o vejo mais jovem, como o cara que veio aqui pela primeira vez em 1924. Tímido e arrogante e com necessidade de que o queiram. E, sim, é triste, porque Niels o amava! Foi um pai para ele.

Heisenberg: Em que está trabalhando?

Bohr: Na fissão, quase que exclusivamente. E você?

Heisenberg: Várias coisas...

Margreth: Fissão?

Heisenberg: Às vezes, eu me sinto muito inveja de seu cíclotron.

Margreth: Por quê? Também está trabalhando sobre a fissão?

Heisenberg: Há mais de trinta nos Estados Unidos! Enquanto na Alemanha... bom... pelo menos você ainda pode ir para sua casa na praia?

Bohr: As vezes vamos sim.

Margreth: Perdão, estava para dizer que na Alemanha...

Bohr: ... não há um só cíclotron!

Heisenberg: É tão bonita a praia de nesta época do ano.

Bohr: Será que veio para levar o cíclotron? Não é por isso que você veio a Copenhague?

Heisenberg: Não vim a Copenhagen para isso.

Bohr: Desculpe! Eu não deveria tirar conclusões precipitadas.

Heisenberg: Não, nenhum de nós deve tirar conclusões precipitadas de nenhum tipo.

Bohr: Mas a falta de cíclotron na Alemanha não é seguramente um segredo militar.

Heisenberg: Não tenho ideia o que é secreto e o que não é!

Bohr: Também não é um segredo que eles não os têm. Você não pode dizer, mas eu sim. É porque os alemães se opuseram sistematicamente a física teórica. Por quê? Porque a maioria das pessoas que trabalharam nesta área eram judeus! E por que muitos eram judeus? Porque a física teórica, a física que interessava a Einstein, Schrödinger, Pauli e a nós dois, sempre foi considerado na Alemanha inferior à física experimental, e as cátedras teóricas eram as únicas que os judeus teriam acesso!

Margreth: Física! Sim?

Bohr: Isto é física!

Margreth: Também é política!

Heisenberg: Às vezes é muito difícil de separá-las! Você está em contato com os nossos amigos na Inglaterra? Com Born? Com Chadwick?

Bohr: Heisenberg:, estamos sob ocupação alemã! Alemanha está em guerra com Inglaterra.

Heisenberg: Pensei que talvez mantivesse algum contato. E com as pessoas Estados Unidos? Com eles nós não estamos em guerra.

Bohr: Que quer saber?

Heisenberg: Curiosidade...

Margreth: A única visita de fora veio da Alemanha. Seu amigo Weizsäcker nos visitou em março. Não sei por que trouxe o diretor do Instituto Alemão...

Heisenberg: O fiz com a melhor das intenções! Talvez ele não explicou que o Instituto está sob o controle da Chancelaria. Nós temos bons amigos na embaixada aqui!

Bohr: É um departamento do governo nazista

Heisenberg: Seguramente estavam tentando que os cidadãos ilustres deste país pudessem trabalhar tranquilos.

Bohr: Você está me dizendo que seus amigos na embaixada estão me protegendo?

Heisenberg: Eu que o digo, por si Weizsäcker não me assegurou, é que se sentiriam muito honrados se você pudesse aceitar um convite de vez em quando.

Bohr: Ir para coquetéis na Embaixada alemã? Para tomar café com bolos com o embaixador nazista?

Heisenberg: Talvez a alguma conferência! Aos grupos de discussão! Qualquer tipo de contato social pode ser de grande ajuda!

Bohr: Com certeza sim!

Heisenberg: E em algumas circunstâncias pode ser essencial!

Bohr: Em que circunstâncias?

Heisenberg: Eu acho que nós dois sabemos disso!

Bohr: Porque eu sou meio judeu?

Heisenberg: Todos em algum momento pode precisar de ajuda dos nossos amigos.

Bohr: Por isso veio a Copenhague? Para me convidar para assistir a deportação de meus compatriotas das janelas da embaixada alemã?

Heisenberg: Bohr, por favor! Por favor! Que outra coisa eu posso fazer? Como posso ajudar? Eu sei que é uma situação extremamente difícil para você. Eu entendo! Mas também é uma situação extremamente difícil para mim.

Bohr: Sim. Desculpa. Estou seguro de que também tem as melhores intenções.

Heisenberg: De todo modo não vim para isso.

Margreth: Talvez você devesse dizer simplesmente o quer dizer.

Heisenberg: Não gostaria de sair para caminhar como nos velhos tempos?

Bohr: Faz frio esta noite, me parece, para caminhar.

Heisenberg: Isto é tão difícil. Te lembras onde nos conhecemos?

Bohr: Claro, em Göttingen em 1922!

Heisenberg: Em uma conferência em sua honra!

Bohr: Foi uma grande honra! Eu estava ciente disso.

Heisenberg: Você foi homenageado por dois motivos! Primeiro, por ser um grande físico...

Bohr: Sim, sim.

Heisenberg: ... e em segundo lugar, porque era uma das poucas pessoas na Europa que estava disposto a lidar com a Alemanha. A primeira guerra havia terminado há quatro anos e ainda éramos tratados como leprosos. Mas nos deu a mão. Sempre inspirastes amor, você sabe disso. Aonde seja que você tenha passado, que tenha trabalhado, Aqui na Dinamarca. Na Inglaterra, nos Estados Unidos. Mas na Alemanha te adorávamos. Porque nos deu a mão.

Bohr: A Alemanha mudou!

Heisenberg: Sim! Entretanto estávamos derrotados e foi generoso.

Margreth: E agora vocês dominam!

Heisenberg: E é mais difícil de ser generoso! Mas nos destes a mão e apertamos!

Bohr: Sim... Não! Você na realidade a mordeu.

Heisenberg: Eu a mordi?

Bohr: Me mordeu a mão, sim! Eu dei-lhe a mão cerimoniosamente e amigavelmente e você a mordeu.

Heisenberg: Do que está falando?

Bohr: Se levantou e me atacou.

Heisenberg: Ah... Fiz alguns comentários.

Bohr: Era um belo dia de verão! Fileiras de físicos e matemáticos eminentes, todos dando aprovação para a minha sabedoria. De repente, salta um cachorro atrevido e me diz que meus cálculos matemáticos estavam equivocados.

Heisenberg: Estavam equivocados.

Bohr: Que idade tinhas?

Heisenberg: Vinte.

Bohr: Um ano depois da mudança do século.

Heisenberg: Não exatamente.

Bohr: Em 05 de dezembro, sim?

Heisenberg: 0,93 anos a mais do século.

Bohr: Para ser exato!

Heisenberg: Não, para ser exato, 0,928... 7... 6... 7... 1...

Margreth: E Niels decide, de repente amá-lo novamente, apesar de tudo. Por quê? O que aconteceu? Foi a lembrança daquele dia de verão em Göttingen? De qualquer forma, quando nos sentarmos para jantar, as cinzas foram acesas novamente.

Bohr: Sempre tão competitivo! Até quando jogávamos tênis de mesa. Parecia que queria me matar.

Heisenberg: Queria ganhar! Vos também queria ganhar.

Bohr: Eu queria uma partida amigável de ping-pong.

Heisenberg: Você diz isso porque você não podia ver a expressão do seu rosto.

Bohr: Podia ver a sua.

Heisenberg: E quando jogou poker na cabana de esqui? Uma vez que fez uma limpa! Você se lembra disso? Com um royal flush que não tinha! Todos

matemáticos, todos contando as cartas, estávamos 90% seguros que não tinha nada! Mas continuou a nos fazer subir e subir a aposta! Essa confiança idiota. Até que nossa fé na probabilidade matemática começou a enfraquecer e um por um fomos para o maço.

Bohr: Eu estava certo de que eu tinha um royal flush. Não vi bem as letras! Me enganei a mim mesmo.

Margreth: Pobres Niels!

Heisenberg: Pobre Niels? Ele ganhou! Nós que falimos. Era insanamente competitivo!

Bohr: Você era competitivo. Uma vez que descíamos da cabana para buscar abastecimento até nisso o convertia em uma carreira. Você se lembra? Estávamos com Weizsäcker mais alguém. Pegou um cronômetro.

Heisenberg: Pobre Weizsäcker, levou dezoito minutos!

Bohr: Você baixou em dez.

Heisenberg: Oito!

Bohr: Não me lembro o quanto fiz.

Heisenberg: Quarenta e cinco minutos.

Bohr: Obrigado!

Heisenberg: Você esquiava como fazia ciência! O que estava esperando? Provavelmente estavas realizando os cálculos das dezessete rotas possíveis diferentes!

Margreth: E eu estava lá para podê-las digitar.

Bohr: Pelo menos eu sabia onde eu estava. Na velocidade que iam estavam enfrentando a relação de incerteza! Se eles sabiam onde estavam, não sabiam o que a velocidade tinha baixado! Se sabiam a que velocidade havia baixado, não saberiam onde estavam.

Heisenberg: Eu não preciso parar para pensar.

Bohr: Justamente isso é o que poderia ser criticado em parte de seu trabalho.

Heisenberg: De qualquer forma, geralmente chegava.

Bohr: Sim, mas não te importava que destruísse no caminho. Enquanto funcionava a matemática estavas satisfeito.

Heisenberg: Se algo funciona, funciona.

Bohr: Mas a pergunta sempre é: o que significa a matemática? Em uma linguagem simples. Quais são as implicações filosóficas?

Heisenberg: Quando se desce a 70 quilômetros por hora as decisões se tomam sozinhas. De repente, em frente a um abismo, viro à esquerda ou à direita? Se eu penso, me mato! Na cabeça se dobra para os dois lados.

Bohr: Porque você insiste que é sempre mais fácil agir do que reagir. Tomar uma decisão de fazer algo que responder a ação do outro!

Heisenberg: Sim, claro! Assim como a música, essa é outra coisa que nos faz decidir. Eu toco o piano e é como abrir o caminho diante de mim, só tenho que seguir. Assim tive o meu único sucesso com as mulheres! Uma noite musical com amigos em Leipzig, um trio de piano. 1937 Estamos tocando Beethoven em Sol maior. Terminamos o concerto, e olho para cima para ver se os outros dois estão prontos para começar o final rápido! E nesse instante eu vejo uma jovem sentada a um canto da sala. Só um instante, mas com certeza já a havia levada à Cabana, nos havíamos comprometidos, nos havíamos casados, etcetera – fantasias românticas tão inúteis – e começamos com um final rápido, que foi extremamente rápido e eu não tive tempo de assustar-me! E tudo foi fácil para mim. Terminou como se tivesse esquiado. Me submeti à jovem, a acompanhei a sua casa e, sim, uma semana mais tarde a levo para minha cabana, outra semana nos comprometemos, e três meses mais tarde nos casamos. E tudo pela velocidade desse final rápido!

Bohr: Você disse que se sente sozinho! Mas você tem companhia.

Heisenberg: A música?

Bohr: Isabel!

Heisenberg: Ah, sim. Embora com os meninos e essas coisas... Eu sempre invejei como vocês dois falam sobre tudo. De seu trabalho. Seus problemas. De mim, com certeza.

Bohr: A natureza me formou como uma entidade matemática curiosa: não uma unidade e sim a metade dos dois.

Heisenberg: A matemática é muito estranha quando se aplica a pessoas. Um mais um pode ser tantas coisas...

Margreth: Silêncio. Em que pensará? Em sua vida? Na nossa?

Heisenberg: Silêncio. E é claro que eles estão pensando novamente em seus filhos.

Margreth: As mesmas memórias brilhantes. A mesma escuridão! Voltam e voltam.

Heisenberg: Seus quatro filhos vivos e dois mortos!

Margreth: Harald! Só nesse hospital.

Bohr: Está Pensando em Cristian e Harald!

Heisenberg: Os dois meninos perdidos! Harald...

Bohr: Todos esses anos sozinho, nesse hospital horrível.

Heisenberg: E Cristian! O primogênito. O filho mais velho.

Bohr: Novamente esses segundos que eu vejo todos os dias.

Heisenberg: Esses breves segundos no barco, quando o leme se trava no mar enfurecido e Cristian está caindo.

Bohr: Se eu não tivesse deixado travar o leme...

Heisenberg: Esses segundos tão longos no mar!

Bohr: Aqueles segundos intermináveis no mar.

Heisenberg: Quando você tenta alcançar a boia!

Bohr: Caso o alcançasse!

Margreth: Eu estou em nossa casa de praia! Eu olho por cima do meu trabalho! Niels está na porta me olhando em silêncio. De repente, desvia o olhar para longe e eu sei o que aconteceu.

Bohr: Tão perto, tão perto! Uma distância tão pequena!

Heisenberg: O leme se trava uma vez... e de novo ...

Margreth: Niels desvia o olhar!

Bohr: Cristian estende a mão para alcançar a boia...

Heisenberg: Mas há coisas que nem eles falam.

Bohr: Algumas coisas apenas pensamos.

Margreth: Porque não há nada a dizer.

Bohr: Bem... talvez não esteja tanto frio! Você sugeriu uma caminhada.

Heisenberg: Na realidade está muito calor.

Bohr: Não vamos demorar!

Heisenberg: No máximo uma semana.

Bohr: Quê? Como a nossa famosa primeira caminhada?

Heisenberg: Fomos para Elsinore! Me lembro muitas vezes o que você me disse estando lá.

Bohr: Você se importa meu amor? Meia hora?

Heisenberg: Talvez uma hora. Disse que não poderia ter uma impressão intocada de Elsinore, que foi afetada por saber que Hamlet tinha vivido lá. Cada canto escuro nos recordava a obscuridade dentro da alma humana...

Margreth: Assim que estão andando novamente. Bem sucedido! E se estão caminhando, estão falando! Falando de outra forma, sem dúvida. Tantas vezes eu digitei sobre o quão diferente é o comportamento das partículas quando não são observadas... Agora que começaram, uma hora que se tornará duas ou três... A primeira coisa que fizeram juntos foi irem caminhar. Depois dessa conferência em Göttingen. Niels imediatamente foi procurar o jovem atrevido que havia questionado sua matemática e levou-o para caminhar no campo. Andar, falar, conhecê-lo. E quando Heisenberg chegou aqui para trabalhar para ele, de novo saíram dar sua volta histórica pelo campo. Muito da física do século XX fez-se ao ar livre. Caminhando pelos bosques de nossa casa de campo. Descendo para a praia com os meninos. Cristian de mão a Heisenberg. E cada noite depois de jantar em Copenhague, caminhavam pelo parque atrás do Instituto, ou perto do porto. Caminhar e falar. Muito, muito antes das paredes terem ouvidos... Mas desta vez, em 1941, a caminhada tomou um rumo diferente. Dez minutos depois de sair...

voltam. Eu mal levantei da mesa vi Niels na porta. Me dei conta imediatamente da raiva que está. Não pude olhar nos seus olhos!

Bohr: Heisenberg quer dizer adeus. Ele se vai.

Margreth: Ele tão pouco me olha.

Heisenberg: Obrigado. Foi uma noite linda. Quase como nos velhos tempos. Muito amável.

Margreth: Quer uma bebida? Café?

Heisenberg: Tenho que preparar minha conferência.

Margreth: Mas, vamos nos ver antes de você ir?

Bohr: Ele tem muito a fazer.

Heisenberg: Perdoe-me se eu disse ou fez algo que...

Bohr: Sim, sim!

Heisenberg: Significou muito para mim, estar com os dois novamente. Mais do que vocês imaginam.

Margreth: Foi um prazer para nós! Abraços para Isabel e as crianças!

Bohr: Claro!

Heisenberg: Talvez quando a guerra acabar... se estivermos vivos... adeus.

Margreth: Política?

Bohr: Física! Não tem razão! Como ele pode estar certo? Se John Wheeler e eu...

Margreth: Um pouco de ar fresco, enquanto falamos, não?

Bohr: Ar fresco?

Margreth: Uma volta pelo jardim. Mais saudável do que ficar dentro de casa, eu acho.

Bohr: Oh sim!

Margreth: Para todos.

Bohr: Sim. Obrigado... Como poderá ter razão? Wheeler e eu discutimos o assunto exaustivamente em 1939!

Margreth: O que ele disse?

Bohr: Nada! Eu não sei! Eu estava bravo demais para entender.

Margreth: Tinha a ver com a fissão?

Bohr: O que acontece durante a fissão? Se dispara um nêutron a um núcleo de um átomo de urânio, se divide e libera energia!

Margreth: Uma grande quantidade de energia, não é?

Bohr: Suficiente para mover um pouco de poeira. Mas também libera dois ou mais três nêutrons cada um dos quais pode chegar a dividir outro núcleo.

Margreth: E esses núcleos divididos liberam energia por sua vez?

Bohr: E mais dois ou três nêutrons.

Heisenberg: Enquanto um esquia se desloca um pouco de neve. Esse pouco de neve moverá mais neve e se forma uma bola de neve...

Bohr: Uma cadeia de núcleos divididos, que se multiplica, através do urânio, dobrando e quadruplicando em um milionésimo de segundo de uma geração para a outro! Duas divisões para começar, em seguida, dois ao quadrado, dois ao cubo, para a quarta, a quinto, a sexta...

Heisenberg: O trovão da avalanche nas montanhas ao redor ecoa nas montanhas ao redor...

Bohr: Até mais tarde ou mais cedo, dizer após oito gerações, 280 montes de poeira haverão sido deslocadas! 280 é um número com 24 dígitos! Suficientes montes de poeira para criar uma cidade, e todos os que vivem nele.

Heisenberg: Mas há uma dificuldade.

Bohr: Felizmente há uma dificuldade! O urânio natural é composto por dois diferentes isótopos, Urânio-238 e Urânio-235. Menos de um por cento é Urânio-235 e esta pequena fração é a única parte que é fissionada por nêutrons rápidos!

Heisenberg: Esta foi a grande intuição de Bohr... Foi o que aconteceu quando estava na Princeton em 1939, andando pelo campus com Wheeler.

Bohr: Aqui estão duas dificuldades! O 238 não só não pode ser dividido por qualquer maneira por nêutrons rápidos, mas absorve-os. Assim, que ao pouco tempo que começa a reação em cadeia, não há número suficiente de nêutrons rápidos para fissionar o 235!

Heisenberg: E a cadeia para.

Bohr: Também se pode fissionar o 235 com nêutrons lentos! Mas, então, a reação em cadeia ocorre muito mais lentamente do que o urânio precisa para explodir.

Heisenberg: E mais uma vez a cadeia para.

Bohr: O que tudo isto significa é que uma reação em cadeia explosiva não ocorrerá jamais em urânio natural. Para produzir uma explosão terá que se separar 235 puro. E para que a cadeia seja longa o suficiente para produzir uma explosão importante precisaria de muitas toneladas. E é extremamente difícil poder separá-lo.

Heisenberg: Tentadoramente difícil.

Bohr: Felizmente difícil. Os cálculos mais otimistas quando estive nos Estados Unidos, em 1939, eram que para produzir um grama de Urânio-235 levaria 26.000 anos. E eu acho que até lá a guerra vai acabar. Assim, ele está errado, está errado! Ou eu estou errado? Eu terei calculado mal? Vamos ver... Qual é a taxa de absorção de nêutrons rápidos de 238? Qual é o caminho livre médio dos nêutrons lentos no 235...?

Margreth: Mas. O que Heisenberg tinha dito exatamente? Isso é o que todos querem saber, então e depois...

Bohr: É o que quiseram saber os ingleses o quanto Chadwick pode se comunicar comigo! Que disse exatamente Heisenberg?

Heisenberg: E o que, exatamente, Bohr respondeu? Essa foi a primeira coisa que perguntaram meus colegas quando voltei para a Alemanha.

Margreth: O que Neils disse a Heisenberg? O que Neils respondeu? A pessoa que mais queria saber era o próprio Heisenberg!

Bohr: Por isso voltou a Copenhague, dois anos depois de terminada a guerra em 1947.

Margreth: Desta vez escoltado por um acompanhante visível da inteligência Britânica e não por agentes invisíveis da Gestapo.

Bohr: Creio que queria várias coisas.

Margreth: Duas coisas. Pacotes de comida...

Bohr: Para sua família na Alemanha. Não tinham nada para comer.

Margreth: E para chegar a um acordo sobre o que haviam dito em 1941.

Bohr: A conversa acabou quase tão rápido quanto da vez anterior.

Margreth: Não puderam sequer chegar a um acordo sobre onde eles tinham caminhado naquela noite.

Heisenberg: Por onde caminhamos?

Bohr: Não caminhamos.

Heisenberg: Eu vejo as folhas de outono empilhadas sob as luzes da rua.

Bohr: Porque você acha que foi em outubro!

Margreth: E foi em setembro!

Bohr: Não havia folhas caídas.

Margreth: E era 1941. Não se podiam acender as lâmpadas na rua! Estávamos em guerra.

Bohr: Nós não saímos do meu escritório. Eu vejo os papeis embaixo da luminária.

Heisenberg: Estávamos lá fora! O que iria dizer era traição. Se me escutassem, seria executado.

Margreth: O que foi essa coisa misteriosa que você disse?

Heisenberg: Não tem mistério. Nunca houve mistério. Me lembro perfeitamente porque minha vida estava em jogo, e escolhi minhas palavras com muito cuidado. Simplesmente te perguntei se, como um físico, eu teria o direito moral de trabalhar na exploração da energia atômica. Sim?

Bohr: Não me lembro.

Heisenberg: Não se lembra, não, porque quase que imediatamente se irritou! Você parou secamente.

Bohr: Porque eu estava horrorizado.

HEISENBERG: Horrorizado. Bem, você se lembra disso. Você ficou parado, me olhando, horrorizado.

Bohr: Porque a dedução era óbvia. Você estava trabalhando nisso.

Heisenberg: E você se apressou a concluir que eu estava tentando dar armas nucleares a Hitler!

Bohr: E era o que você estava fazendo!

Heisenberg: Não! Um reator! Era isso o que estávamos tentando construir! Uma máquina para produzir energia! Para gerar eletricidade, para impulsionar barcos!

Bohr: Não disse nada sobre um reator!

Heisenberg: Não disse nada sobre nada! Não claramente! Não podia. Não sabia quanto eles podiam nos ouvir. O que contariam aos outros.

Bohr: Mas te perguntei se realmente estava pensando que a fissão do urânio poderia ser usado para a construção de armas!

Heisenberg: Ah! Agora se lembra!

Bohr: Sim! E claramente o que me respondestes!

Heisenberg: Disse que você sabia que sim.

Bohr: E isso é o que realmente me assustou!

Heisenberg: Porque você confiava que para produzir armas precisaria do 235 e que nunca íamos poder produzir o suficiente.

Bohr: Um reator! Sim, por ali não iria acontecer uma explosão. Se pode manter em funcionamento uma reação em cadeia em cadeia com nêutrons lentos em urânio natural.

Heisenberg: O que nós havíamos dado conta, sem, no entanto, era que, era que se alguma vez poderíamos pôr em funcionamento o reator, o 238 absorveria os nêutrons rápidos. Como você intuiu brilhantemente em 1939. E, por sua vez seria transformado por eles e se converteria em um elemento totalmente novo.

Bohr: Netúnio! Que por sua vez, se transformaria em outro elemento...

Heisenberg: Pelo menos tão possível de ser fissionado como o 235!

Margreth: Plutônio!

Heisenberg: Plutônio.

Bohr: Como não me dei conta!

Heisenberg: Se pudéssemos construir um reator seriamos capazes de construir bombas! Isso é o que me levou a Copenhague. Mas eu não poderia dizer. E, neste ponto você parou de me ouvir. A bomba já havia explodido dentro de sua cabeça. A conversa estava terminada. Nossa única chance de falar se havia ido para sempre.

Bohr: Porque já tinha entendido o ponto central. Que por um caminho ou outro viria a possibilidade de fornecer armas nucleares a Hitler.

Heisenberg: Compreendestes, pelo menos, quatro pontos centrais, todos equivocados. Você disse a Rozental. Que eu tinha tentado tirar de você o que sabia da fissão! Disse a Weisskopf que eu havia te perguntado o que você sabia do programa nuclear aliado. Chadwick entendeu que eu estava tentando te persuadir de que não havia nenhum programa alemão. Mas também parece que contastes a algumas pessoas que eu queria te recrutar para trabalhar para nós!

Bohr: Muito bem. Vamos começar do princípio. Não há homens da Gestapo nas sombras. Não há oficial da inteligência britânica. Ninguém nos observa.

Margreth: Só eu!

Bohr: Só Margreth. Vamos deixar tudo claro para ela! Você sabe que eu acredito fervorosamente que não fazemos ciência para nós, que a fazemos isso para poder explicá-la aos outros...

Heisenberg: Em linguagem simples.

Bohr: Em linguagem simples. Não é a sua posição, eu sei; você poderia facilmente descrever o que você está investigando, equações diferenciais se é possível, mas para Margreth...

Heisenberg: Em linguagem simples!

Bohr: Uma linguagem simples, está bem, então aqui estamos nós, andando pela rua mais uma vez. E desta vez eu estou totalmente calmo. Te escuto com atenção. O que quer me dizer?

Heisenberg: Não é apenas o que eu quero dizer! É toda a equipe nuclear alemã em Berlim! Não Diebner, é claro, não os nazistas; Weizsäcker, Hahn, todos eles

queriam que eu viesse aqui e discutisse com você. Todos nós o vemos como uma espécie de pai espiritual.

Margreth: O Papa. Assim o chamavam pelas costas! E agora querem que lhes dê a absolvição.

Heisenberg: Absolvição? Não!

Margreth: É o que dizem os teus colegas alemães.

Heisenberg: A absolvição é a última coisa que eu quero.

Margreth: Você disse a um historiador que haviam se expressado perfeitamente.

Heisenberg: Sim? Absolvição... É por isso que eu vim? É como tentar acordar-me de todas as diferentes explicações que disse e de tudo o que eu fiz... Mas agora a palavra absolvição aparece entre elas...

Margreth: Eu pensava que a absolvição se é concedida pelos pecados já cometidos e por seu arrependimento, não pelos pecados que querem cometer e ainda não haviam se realizado.

Heisenberg: Exatamente! Por isso eu fiquei chocado!

Bohr: Você ficou chocado?

Heisenberg: Porque me disse a absolvição! Isso é exatamente o que fizeste! Então rapidamente voltamos para a casa. Disseste algo em voz baixa sobre que todos durante uma guerra estavam obrigados a fazer o melhor possível pelo seu país. Sim?

Bohr: Deus sabe que disse! Mas agora estou aqui, muito calmo e consciente, medindo minhas palavras. Você não quer a absolvição. Entendo. Você gostaria que eu a dissesse para não fazer? Está tudo bem! Eu coloco minha mão no seu ombro. Te olho nos olhos de modo paternal e te digo: Retorna para a Alemanha, Heisenberg! Reúne seus colegas no laboratório. Suba em uma mesa e diga-lhes: "diz Niels Bohr que desde seu estudado ponto de vista, fornecer a um maníaco homicida um instrumento sofisticado de assassinato em massa é..." O que eu posso dizer? "... uma ideia interessante!" Não, nem mesmo uma ideia interessante. "... Na verdade, melhor: "uma ideia seriamente pouco interessante!" Que acontece? Todos

abandonam instantaneamente seus contadores Geiger, fecham tudo com chave e vão para casa?

Heisenberg: Não, obviamente não.

Bohr: Porque seriam presos.

Heisenberg: Se eles nos prendem ou não, não muda nada. Em vez disso, pioraria as coisas! Eu dirijo o programa de pesquisa nuclear do Instituto de Ciência. Mas há outro programa do exército, liderado por Kurt Diebner e ele é do partido nazista. Se eu não estou, simplesmente Diebner fará cuidar de meu cargo também. Minha única esperança é continuar eu, a executar o programa.

Bohr: Então não quer que eu te diga que sim e não queres que te diga não.

Heisenberg: Eu quero que escute atentamente o que eu vou lhe dizer agora e não saia correndo como um louco nas ruas.

Bohr: Muito bem. Aqui eu estou andando muito devagar e papalmente. E eu escuto atentamente enquanto você me diz que...

Heisenberg: Que as armas nucleares exigem um enorme esforço técnico.

Bohr: Certo.

Heisenberg: Isso vai exigir enormes recursos!

Bohr: Enormes recursos! Certo.

Heisenberg: Que, antes ou depois, os governos terão de perguntar aos cientistas se vale a pena comprometer esses recursos; se existe esperança de produzir estas armas a tempo para que eles usem.

Bohr: Claro, mas...

Heisenberg: Espera! Eles virão para você e para mim! Nós somos os únicos que vão aconselhar se vale a pena ir em frente ou não. Afinal de contas a decisão estará em nossas mãos, a gente goste ou não.

Bohr: E é isso que você quer me dizer?

Heisenberg: É isso o que eu quero dizer.

Bohr: É por isso que você demorou tanto para chegar até aqui? É por isso que jogou fora quase vinte anos de amizade? Simplesmente para dizer-me isso?

Heisenberg: Só para te dizer isso.

Bohr: Mas Heisenberg, isso é ainda mais misterioso! Para que me contas? O que você quer que eu faça? O governo de ocupação da Dinamarca vai vir me perguntar se deveríamos produzir armas nucleares!

Heisenberg: Não, mas mais cedo ou mais tarde, se eu puder permanecer no comando do programa, o governo alemão vai me perguntar para mim... perguntarão a mim se continuamos ou não. E eu terei que decidir o que dizer a eles!

Bohr: Então você tem uma saída mais fácil para o seu problema! Simplesmente diga a verdade que você acabou de me dizer! Que é muito difícil! E talvez desanimem! Talvez percam o interesse.

Heisenberg: Mas Bohr, aonde levará isso? Quais serão as consequências se fazer fracassar o programa alemão?

Bohr: O que posso te dizer que não possa dizer você mesmo?

Heisenberg: Eu li em um jornal de Estocolmo que os americanos estão trabalhando em uma bomba atômica.

Bohr: Ah, era isso! Era isso! Agora entendo tudo. Você acredita que eu estou em contato com os americanos?

Heisenberg: Pode ser. É possível! Se há alguém na Europa ocupada, que está em contato com eles, tem que ser você.

Bohr: Então, você só quer saber sobre o programa nuclear dos aliados...

Heisenberg: Simplesmente quero saber se existe um. Uma pista! Um indício! Acabo de trair o meu país e arriscar minha vida para alertar sobre a existência de um programa alemão.

Bohr: E agora eu que tenho que devolver o favor?

Heisenberg: Bohr, eu tenho que saber! Eu sou o único que tem que decidir! Se os aliados estão fabricando uma bomba, o que estou fazendo para o meu país? Seria fácil se equivocar e pensar que, porque o país de um é culpado, um o ama menos. Nasci na Alemanha! É onde eu me tornei quem eu sou. A Alemanha é todos os

rostos de minha infância, todas as mãos que me levantaram quando eu caí, todas as vozes que me deram incentivo e apontaram o caminho, todos os corações que falaram ao meu coração! A Alemanha é a minha mãe viúva, e meu irmão impossível. É a minha mulher! Alemanha é nossos filhos! Tenho que saber o que eu estou decidindo por eles! Mais uma derrota? Outro pesadelo como no pesadelo que fui criado? Bohr, minha infância em Munique terminou em meio à anarquia e a guerra civil. Vão passar fome mais crianças como nós passamos? Será que eles vão ter que passar as noites de inverno, como eu quando ia para a escola, rastejando atrás das linhas inimigas, no escuro, para buscar entre a neve comida para a minha família? Vão passar toda uma noite inteira, como eu fiz aos dezessete anos, com um rifle na mão, falando e falando com um prisioneiro aterrorizado que eles iam executar pela manhã?

Bohr: Mas, meu querido Heisenberg, eu não tenho nada para dizer. Eu não tenho ideia se há um programa nuclear aliado.

Heisenberg: Se está pondo em marcha contra nós, enquanto você e eu estávamos conversando nesta noite de 1941. E pode ser que estejam escolhendo algo pior do que a derrota. Porque a bomba que está sendo construída é para ser usada contra nós! A noite de Hiroshima de 06/08/1945, Oppenheimer disse que era seu único arrependimento. Que não haviam feito a bomba a tempo de ser utilizado na Alemanha!

Bohr: Se atormentou muito depois.

Heisenberg: Depois, sim. Pelo menos nós nos atormentamos antes. Talvez um deles parou para pensar por um momento que eles estavam fazendo? Fez isso Oppenheimer ou qualquer um dos seus colegas? O fez Einstein quando escreveu a Roosevelt em 1939, instigando-o a financiar pesquisas sobre a bomba? O fez você quando escapou de Copenhagen dois anos mais tarde e te unistes a equipe dos aliados?

Bohr: Meu querido Heisenberg, não estávamos fornecendo bomba a Hitler!

Heisenberg: Tão pouco estavam deixando de cair sobre a cabeça de Hitler. A estavam jogando sobre os velhos na rua, sobre suas mães e seus filhos. E se tivessem feito a tempo teria sido em meus compatriotas. Minha esposa! Meus filhos! Essa era a intenção, sim?

Bohr: Essa era a intenção.

Heisenberg: Não tinham a menor ideia do que é o que acontece quando uma bomba é lançada sobre uma cidade! Nem sequer uma bomba convencional. Nenhum de vocês tinha sofrido. Nem um só. Uma noite eu fui andando do centro de Berlim aos subúrbios depois de um grande bombardeio. A cidade inteira em chamas. Até os poços nas ruas estão queimando! São poças de fósforo fundido. Ela adere aos sapatos como uma merda de cachorro fumegante. Tenho que me desviar constantemente, como se as ruas tivessem sido contaminados por uma matilha do inferno. Você teria rido, meus sapatos estavam pegando fogo o tempo todo. Em torno de mim, eu suponho há milhares de pessoas morrendo queimadas. E tudo que eu consigo pensar é: "Como é que eu vou conseguir outro par de sapatos em um momento como este?"

Bohr: Você sabe por que os cientistas aliados trabalharam na bomba.

Heisenberg: Claro! Por medo.

Bohr: O mesmo medo que consumiu você! Porque eles tinham medo de que você estava trabalhando nela.

Heisenberg: Mas, Bohr, você poderia ter dito a eles!

Bohr: Dizer-lhes o quê?

Heisenberg: O que eu te disse em 1941! Que essa escolha estava em nossas mãos! Nas minhas e na de Oppenheimer! Que se eu posso dizer às autoridades alemãs a verdade assustadora, quando me perguntarem, ele também pode!

Bohr: É isto que você quer de mim? Não que te conte o que os americanos estão fazendo, mas que os detenha?

Heisenberg: Que você diga para pararmos juntos.

Bohr: Eu não tinha comunicação com os americanos.

Heisenberg: Mas, com os britânicos sim.

Bohr: Só mais tarde!

Heisenberg: A Gestapo interceptou a mensagem que mandastes a eles sobre nosso encontro!

Margreth: E a colocaram em suas mãos?

Heisenberg: E por que não? Eles haviam começado a confiar em mim. É o que me deu a deu a capacidade de manter a situação sob controle.

Bohr: Não é por criticar, Heisenberg, mas se este é o plano porque veio a Copenhagen é... como direi? Muito... interessante.

Heisenberg: Não é um plano. É uma esperança! Nem sequer isso. Um fio microscópico de possibilidade. Totalmente improvável. Mas vale a pena tentar, Bohr! Vale a pena tentar! Mas você já está muito zangado para entender o que eu digo.

Margreth: Não. Está com raiva porque está começando a entender! Os alemães se desfizeram da maioria de seus melhores físicos porque eram judeus. Os Estados Unidos e a Grã-Bretanha deram-lhes asilo. E isso é para os aliados uma esperança de salvação. E vocês vem uivando a Niels, implorando para convencê-los a parar. Mas como se atreve! Como se atreve!

Bohr: Margreth, meu amor, tente se expressar um pouco mais civilizadamente.

Heisenberg: Civilizadamente! Isso que teríamos que ter feito, discutir civilizadamente! Quando eu ouvi sobre Hiroshima a primeira vez, me recusei a acreditar. Desde os últimos meses da guerra, estávamos vivendo em uma mansão no meio de um campo Inglês. Sequestraram-nos os britânicos, a toda a equipe alemã que trabalhavam na pesquisa atômica. Na Alemanha, as nossas famílias estão morrendo de fome, sem saber nada sobre nós. E lá estamos nós, sentados à mesa cada noite para assistir a um excelente jantar formal, com o nosso encantador anfitrião, o oficial britânico encarregado de nós. Mas a guerra acabou e nós continuamos lá e tudo é deliciosamente civilizado. Eu toco sonatas de piano de Beethoven! O major Rittner nos lê sobre Dickens. Realmente me tem passado estas

coisas... Esperamos que nos revele qual é o sentido de tudo isso. E uma noite se passa. O ouvimos pelo rádio: vocês acabam de cometer o final pelo qual temíamos! Pelo que nós estávamos lá. Nos trancaram para que não falássemos sobre o tema até que fosse tarde demais. Quando o Major Rittner nos disse, eu me recusei a acreditar até que ouvi com meus próprios ouvidos sobre a notícia. Não tínhamos ideia de quão avançado que estavam. Ficamos acordados naquela noite, conversando, tentando entender. Estávamos todos, literalmente atordoados.

Margreth: Por que o fizeram eles? Ou por que não havia feito vocês?

Heisenberg: As duas coisas. As duas! Otto Hahn queria se matar, porque ele descobriu a fissão, e vê sangue em suas mãos! Gerlach, nosso antigo coordenador nazista também quer morrer, porque suas mãos estão tão vergonhosamente limpas! Mas vocês a fizeram! Construíram a bomba.

Bohr: Sim.

Heisenberg: E a usaram em um alvo humano!

Bohr: Em um alvo humano.

Margreth: Não está sugerindo que Niels fez algo errado por ter trabalhado em Los Alamos?

Heisenberg: Claro que não. Bohr nunca fez nada de mal em sua vida.

Margreth: A decisão havia sido tomada muito antes de Niels chegar. A bomba iam construir, estando ele ou não.

Bohr: De qualquer forma a minha contribuição foi muito pequena.

Heisenberg: Oppenheimer disse que você era o padre confessor da equipe.

Bohr: Parece ser meu papel na vida.

Heisenberg: Disse que a sua foi uma contribuição importante!

Bohr: Espiritualmente talvez, não na prática.

Heisenberg: Fermi disse que foi você quem decidiu detonar a bomba de Nagasaki.

Bohr: Propus uma ideia.

Margreth: Não quer insinuar que há algo que Niels deva explicar ou defender?

Heisenberg: Nunca ninguém lhe pediu que explicasse ou defendesse algo. Ele é um homem profundamente bom!

Bohr: Não se trata de minha bondade! Me pouparam de ter que tomar a decisão!

Heisenberg: Sim, e a mim não. Com o qual eu passei os últimos 30 anos da minha vida dando explicações e me defendendo. Quando fui para os Estados Unidos em 1949, muitos físicos nem sequer queriam me dar a mão. As mesmas mãos que haviam construída a bomba não queriam tocar a minha.

Margreth: Se achas que está clareando a história agora, você está errado!

Bohr: Margreth, eu entendo seus sentimentos...

Margreth: Não! Agora quem está irritada sou eu! É muito fácil para ele te fazer sentir culpado! Que fez ele, depois de consultá-lo? Voltar a Berlim e dizer aos nazistas que ele pode produzir bombas atômicas!

Heisenberg: Sim! Mas enfatizo a dificuldade de separar 235!

Margreth: Lhes diz do plutônio.

Heisenberg: Se o conto é para alguns soldados de baixo escalão. Eu tenho que manter viva a esperança deles!

Margreth: Porque se não eles vão buscar o outro!

Heisenberg: A Diebner! Muito provavelmente!

Margreth: Sempre há um Diebner disposto a fazer cargo de nossos crimes!

Heisenberg: É possível que Diebner tenha conseguido mais progressos do que eu.

Bohr: Diebner?

Heisenberg: É possível. Só possível.

Bohr: Não tem sequer um quarto da sua capacidade!

Heisenberg: Nem um décimo! Mas tem dez vezes mais vontade. Daria uma versão muito diferente se fora ele e não eu que se reunisse com Albert Speer, ministro de armamentos de Hitler.

Margreth: A famosa reunião com Speer!

Heisenberg: Este é um momento importante. O decisivo junho de 1942. Nove meses depois da minha viagem a Copenhagen. Hitler cancelou todas as pesquisas

não produziam resultados imediatos, e Speer é o único árbitro que decide quais programas continuam. E justo agora acabamos de obter o primeiro sinal de que a nosso reator vai funcionar. Nosso primeiro incremento de nêutrons. Não muito, de 13%, mas é um começo.

Bohr: Junho de 1942? Estão um pouco mais avançado do que Fermi, em Chicago.

Heisenberg: Mas não sabíamos. Aliás, a força aérea inglesa começou seus bombardeios de alvos civis. Arrasaram metade de Lübeck e todo o centro de Rostock e Colônia. A Alemanha precisa desesperadamente de novas armas para contra-atacar! É hora de apresentar o nosso projeto!

Margreth: Não pediram fundos para continuar?

Heisenberg: Para continuar com o reator? Claro que sim! Mas eu pedi tão pouco que não levaram o programa a sério.

Margreth: Contou que o reator vai produzir plutônio?

Heisenberg: Claro que não! Não para Speer. Eu não lhe contei que o reator vai produzir plutônio.

Bohr: Uma impressionante omissão! É certo!

Heisenberg: E o que aconteceu? Nos deu apenas o suficiente para o programa sobreviver. E esse é o fim da bomba atômica alemã. É o fim!

Margreth: No entanto continuam com o reator.

Heisenberg: Continuamos com o reator! Porque agora não corremos o risco de produzir o plutônio a tempo suficiente para fabricar uma bomba. Trabalhamos como loucos. Temos de arrastar de uma ponta a outra na Alemanha, para mantê-lo longe do bombardeio e para evitar que ele caia em mãos russas. E o instalamos em uma vila no oeste.

Bohr: Em Haigerloch?

Heisenberg: Sim. Na pousada da vila tinha uma adega no sótão. Fizemos um buraco no chão para o reator e me asseguro que esse programa continua a operar sob a meu controle até o amargo fim.

Bohr: Mas Heisenberg, com respeito, com o todo respeito, você não poderia controlar do reator. O reator iria matá-lo!

Heisenberg: Nunca chegou a uma fase crítica.

Bohr: Graças a Deus. Quando os Aliados tomaram ele, descobriram que ele não tinha hastes de controle cádmio. Não estava previsto qualquer mecanismo para absorver o excesso de nêutrons, em caso de que a reação se superaquecerá. Se chegasse a fase crítica, teria derretido e desaparecido no centro da Terra!

Heisenberg: Não, para nenhum lugar. Tivemos uma casca de cádmio.

Bohr: Casca de cádmio? O que pensaram em fazer com uma casca de cádmio?

Heisenberg: Tirar a água pesada. O moderador no que estava imerso o urânio.

Bohr: Meu querido Heisenberg, não para criticar, mas haviam enlouquecido!

Heisenberg: Quase chegamos! Tínhamos um crescimento de nêutrons espetacular! Chegamos a um crescimento de 670%. Só mais uma semana... Quinze dias a mais. Isso é tudo precisávamos!

Bohr: Só os salvou a chegada dos aliados!

Heisenberg: Quase chegou a etapa crítica! Um pouquinho mais e a reação em cadeia teria se sustentado indefinidamente. Só precisávamos de um pouco mais de urânio.

Bohr: E tinham tudo sob controle?

Heisenberg: Sob meu controle! Sim! Isso é o que importa! Sob meu controle!

Bohr: Você já não controlava o programa, Heisenberg, o programa controlava você!

Heisenberg: Duas semanas a mais, duas barras a mais de urânio e teriam sido os físicos alemães que conseguiriam a primeira reação em cadeia autossustentável!

Bohr: Exceto que Fermi, já tinha feito em Chicago dois anos antes.

Heisenberg: Não sabíamos.

Bohr: Não estavam cientes de nada naquela caverna. Especialistas aliados disseram que não tinham algo sequer para se proteger da radiação.

Heisenberg: Não tínhamos tempo para pensar nisso! Só podíamos pensar em fazer funcionar o reator!

Bohr: Eu deveria ter estado lá para cuidar de você. Sempre precisou de mim ao seu lado para te frear! Sua própria casca de cádmio.

Heisenberg: Se eu tivesse morrido pela radiação, o que eu teria perdido? Trinta anos de explicações. Trinta anos de culpa e hostilidade. Para mim você virou as costas. Às vezes eu penso que essas semanas em Haigerloch foram a última época feliz da minha vida. Estávamos livres das políticas de Berlim. Fora dos alcances das bombas. A guerra terminava. Não tínhamos nada no que pensar, exceto o reator.

Margreth: Olhe para ele! Ele está perdido como um menino! Estava jogando no bosque todo o dia, correndo de um lado para o outro. Teve coragem, teve medo. E agora chegou a noite e a única coisa que quer é ir para casa.

Heisenberg: Silêncio.

Bohr: Silêncio.

Margreth: Silêncio.

Heisenberg: E mais uma vez o leme travou e Cristian está caindo.

Bohr: Mais uma vez ele tenta alcançar a boia!

Margreth: Mais uma vez levanto meus olhos do meu trabalho e Niels está à porta, me olhando silenciosamente...

Bohr: Então Heisenberg. A que veio para Copenhague em 1941? Foi bom que nos contasse todos os medos que você tinha. Mas realmente não acreditava que eu ia contar se os norte-americanos estavam trabalhando em uma bomba.

Heisenberg: Não.

Bohr: Não esperava que eu os detivesse.

Heisenberg: Não.

Bohr: Ia voltar a trabalhar no reator mais além do que eu te dissesse.

Heisenberg: Sim.

Bohr: Então, por que você veio?

Heisenberg: O que vim?

Bohr: Conte-nos novamente. Outro rascunho. E esta vez nós ficaremos bem. Desta vez entenderemos.

Margreth: Até pode ser que você mesmo entenda.

Bohr: Depois de tudo, o funcionamento do átomo era difícil de explicar! Fizemos muitas tentativas! A cada tentativa ele se tornava mais obscuro. Mas ao final chegamos. Vamos, outro projeto, outro projeto!

Heisenberg: A que vim? E uma vez mais recorrerá essa noite de 1941. Esmago as pedrinhas do caminho familiar para a porta de entrada da casa dos Bohr, e toco a campainha! O que eu sinto? O medo, segurança, e a importância absurda e horrível de alguém que traz más notícias. Mas... sim... há algo mais. Aqui venho de novo. Quase posso ver seu rosto. Algo bom. Algo luminoso e esperançoso.

Bohr: Abro a porta...

Heisenberg: E lá está ele. Eu vejo seus olhos que se iluminam quando me veem!

Bohr: Sorrio com seu sorriso cauteloso de aluno.

Heisenberg: E sinto um momento de muito consolo.

Bohr: Um segundo de alegria tão doce.

Heisenberg: Como se voltasse para casa depois de uma longa viagem!

Bohr: Como se um filho perdido tivesse aparecido na porta.

Heisenberg: Repentinamente me livro de todos os medos, de toda obscuridade.

Bohr: Cristian está vivo! Harald ainda não nasceu.

Heisenberg: O mundo está em paz de novo.

Margreth: Olhem para eles! Todavia, pai e filho! Por um momento. Mesmo agora que estamos todos mortos.

Bohr: Por um segundo voltamos para os anos vinte!

Heisenberg: E nos falaremos e nos entenderemos como então!

Margreth: E dessas duas cabeças surgirá o futuro. Quais cidades serão destruídas e quais sobreviverão. Quem morrerá e quem viverá. Qual mundo desaparecerá e qual triunfará.

Bohr: Meu querido Heisenberg!

HEISENBERG: Meu querido Bohr**:**!

BOHR: Acontece, acontece...

<FIM DO PRIMEIRO ATO>

<INÍCIO DO SEGUNDO ATO>

Heisenberg: A primeira vez que vim a Copenhague foi bem ao começo da primavera de 1924. Março!

Bohr: Você tinha vinte e dois. Então eu deveria ter...

Heisenberg: Trinta e oito.

Bohr: Quase a mesma idade que você tinha quando você veio em 1941.

Heisenberg: O que fizemos?

Bohr: Nós colocamos as botas e a mochila.

Heisenberg: Nós tomamos a trilha até o final da conversa...

Bohr: E caminhamos!

Heisenberg: Sentido norte, a Elsinore.

Bohr: Se um caminha, fala.

Heisenberg: Caminhamos e falamos por quase 200 quilômetros.

Bohr: E depois não paramos de falar durante três anos.

Heisenberg: Compartilhamos uma garrafa de vinho no seu departamento do Instituto.

Bohr: Mas nós temos que seguir os fios até o início do labirinto. A você não importava? Espero que não.

Margreth: Que?

Bohr: Que te deixássemos em casa.

Margreth: Enquanto vocês estavam caminhando? Claro que não. Por ia me importaria? Você tinha que sair de casa. Dois filhos novos ao mesmo tempo era muito para qualquer homem tolerar.

Bohr: Dois novos filhos?

Margreth: Heisenberg.

Bohr: Sim, sim.

Margreth: E o nosso próprio filho.

Bohr: Aage?

Margreth: Ernesto!

Bohr: 1924, é claro, Ernesto.

Margreth: O quinto. Sim?

Bohr: Sim. Era março, tem razão. Não tinha mais de...

Margreth: Uma semana.

Bohr: Uma semana? Uma semana, sim. E de verdade não se importava?

Margreth: Que nada. Me contentava que você tivesse uma desculpa para sair. Você sempre saia para um passeio com seus novos assistentes.

Heisenberg: Ah, aqueles anos! Esses anos assombrosos! Esses três curtos anos!

Bohr: De 1924 a 1927.

Heisenberg: Desde que cheguei a Copenhague para trabalhar com vocês...

Bohr: Até que partisse, para se encarregar da sua cátedra em Leipzig.

Heisenberg: Três anos de uma primavera áspera, revigorante típica do norte da Europa.

Bohr: Ao final da qual tínhamos a mecânica quântica, tínhamos o princípio da incerteza...

Heisenberg: Tínhamos a teoria da complementaridade.

Bohr: Tínhamos a totalidade das interpretações do grupo de Copenhague.

Heisenberg: Novamente Europa em toda a sua glória. Um novo renascimento, com a Alemanha outra vez em seu devido lugar, no centro de tudo. E quem abriu o caminho para todos os demais?

Margreth: Vocês dois.

Heisenberg: O fizemos sim.

Bohr: O fizemos.

Margreth: E para isso que tentou voltar em 1941?

Heisenberg: Para algo que fizemos naqueles três anos... Algo que dissemos, algo que pensamos... algo referido a forma em que trabalhamos.

Bohr: Juntos.

Heisenberg: Juntos. Sim, juntos.

Margreth: Não.

Bohr: Não? O que quer dizer, não?

Margreth: Juntos não. Não fizeram nenhuma dessas coisas juntos.

Bohr: Sim, as fizemos. Claro que fizemos.

Margreth: Cada um fez seu trabalho quando estiveram separados. Primeiro terminastes de resolver a mecânica quântica em Heligoland.

Heisenberg: Bom, havia chegado o verão e eu tive a minha alergia.

Margreth: Não. Você foi sozinho a esta ilha dizendo que lá não havia nada que te distraísse.

Heisenberg: Sim. Minha cabeça começou a clarear, e eu tive uma imagem muito clara de como deveria ser física atômica. De repente, me dei conta que tínhamos de limita-la as medições que poderíamos fazer, ao que poderíamos observar. Não podemos ver os elétrons dentro do átomo...

Margreth: Como tão pouco Niels pode ver os pensamentos na sua cabeça ou você os pensamentos na de Niels.

Heisenberg: Tudo o que podemos ver são os efeitos que produzem os elétrons na luz que eles refletem...

Bohr: Mas as dificuldades que você estava tentando resolver eram aquelas que havíamos explorado juntos, comendo no departamento do Instituto ou na casa de praia.

Heisenberg: Claro. Mas eu me lembro da noite quando as matemáticas começaram pela primeira vez a se harmonizar com o Princípio da Incerteza.

Margreth: Em Heligoland.

Heisenberg: Em Heligoland.

Margreth: Sozinho.

Heisenberg: Sim. Foi terrivelmente desgastante. Mas perto das três horas da manhã consegui resolvê-lo. Parece como se estivesse olhando através da superfície dos fenômenos atômicos e eu vejo um estranho e belo mundo interior. Um mundo de estruturas puramente matemáticas. E sim, estava feliz!

Margreth: Mais feliz do quando estava conosco no inverno seguinte.

Heisenberg: Claro! Com todos os absurdos de Schrödinger?

Bohr: Absurdos? Vamos... A formulação da mecânica ondulatória de Schrödinger?

Margreth: ... disse que era nojenta!

Heisenberg: Disse que as consequências para a física eram repulsivas. Schrödinger disse que a minha matemática era repulsiva.

Bohr: Para mim, parece-me que você usou outra palavra.

Heisenberg: Você convidou Schrödinger para vir aqui...

Bohr: Para manter um debate pacífico sobre nossas diferenças.

Heisenberg: E você caiu sobre ele como um louco. O vai buscar na estação e arremete contra ele antes que pudesse baixar suas bagagens do trem. E logo seguiu contra ele desde as primeiras horas da manhã até meia noite!

Bohr: Eu a segui? Ele a seguia

Heisenberg: Por que no querias fazer a menor concessão!

Bohr: E ele muito menos!

Heisenberg: O fez ficar doente! Teve que se meter na cama para ficar longe de você!

Bohr: Teve um resfriado leve, com um pouco de febre.

Heisenberg: Margreth o teve que cuidar!

Margreth: Dei bastante de chá e bolo para não enfraquecer.

Heisenberg: Sim, enquanto que você não o deixava em paz nem mesmo na cama! Você sentou lá e o martelava com palavras!

Bohr: Muito educadamente.

Heisenberg: Você era o Papa, o Santo Ofício e a Inquisição em uma só pessoa! E então, depois de que Schrödinger se foi, fugindo de sua casa – e isso não me vou

esquecer, Bohr, eu não vou deixar você esquecer – me pus do seu lado. E você me atacou!

Bohr: Porque a essa altura você tinha enlouquecido. Você tinha-se tornado um fanático. De nenhuma maneira queria permitir a ele um lugar na mecânica quântica e na teoria ondulatória.

Heisenberg: Me traístes!

Bohr: Disse que a mecânica ondulatória de Schrödinger e sua mecânica das matrizes eram simplesmente ferramentas alternativas.

Heisenberg: Você estava aceitando algo do que sempre me acusou: "Se funcionar, funciona". Não importa o significado.

Bohr: É claro que me importa o significado. Teremos que explicá-lo a Margreth.

Margreth: A mim? Se não se podiam explicar entre vocês! Seguiam discutindo pela madrugada todas as noites! Os dois se irritavam tanto!

Bohr: Ficávamos exaustos.

Margreth: O experimento da câmara de nuvem terminou com essas discussões.

Bohr: Sim, porque um elétron se desprende do seu átomo e passa então, através de uma câmara de nuvem, sendo assim possível observar o trajeto deixado.

Heisenberg: E é um escândalo. Porque não deveria haver um rastro!

Margreth: De acordo com sua maneira de olhar a mecânica quântica.

Heisenberg: Não há um rastro! Não há órbitas! Nem rastros nem trajetórias! Só efeitos externos!

Margreth: Mas lá está o rastro. Eu mesmo o vi tão claro como o rastro que deixa um barco ao passar.

Bohr: Era um paradoxo fascinante.

Heisenberg: E a você te encantavam os paradoxos, esse é o seu problema. Você jubilava nas contradições.

Bohr: Sim, e você nunca pôde entender o encanto que há no paradoxo e a contradição. Esse é seu problema. Você vive e respira paradoxos e contradições,

mas não é capaz de ver a beleza delas, como o peixe não podem ver a beleza da água.

Heisenberg: Às vezes me sentia preso em uma espécie de inferno sem janelas. Você não se dá conta o quão agressivo você é. Dando voltas ao redor da sala, como se estivesse para devorar alguém – e eu posso adivinhar quem vai ser.

Bohr: Mas assim fazíamos a física.

Margreth: Não! Ao final você fez em por sua conta, sozinho! Você foi esquiar na Noruega.

Bohr: Tinha que me afastar de tudo isso!

Margreth: E resolvestes a complementaridade na Noruega, por sua conta! Vocês dois funcionavam bem melhor separados!

Heisenberg: Mandá-lo para longe, foi um grande alívio, como poder escapar da minha alergia em Heligoland.

Margreth: Se eu fosse a professora não deixaria vocês sentarem juntos.

Heisenberg: E foi lá quando desenvolvi o Princípio da Incerteza. Andando sozinho no escuro. Eu começo a pensar que veria você, se pudesse focar um telescópio sobre mim, lá nas montanhas da Noruega. Iria me ver junto com as luzes dos postes da rua, e logo nada, enquanto eu desaparecia na escuridão, logo me veria enquanto passo pela luz de outro poste. E é isso o que vemos na câmara de nuvem. Não um rastro contínuo e sim uma série de visões breves – uma série de colisões entre o elétron que passa e várias de moléculas de vapor de água. Ou penso em sua viagem a Leiden em 1925. Que veria Margreth dessa viagem, estando em sua casa, aqui em Copenhagen? A carta de Hamburgo, talvez. Então, uma de Leiden. Uma de Göttingen. Uma de Berlim. Porque o que vemos na câmara de nuvem nem sequer são as colisões em si mesmas, senão as gotas de água que se condensam ao redor delas. Não há rastros, não há direções precisas; só uma linha embaçada das cidades que você visitou. Não sei por que não nos ocorreu antes, estávamos muito ocupados discutindo para sequer pensar.

Bohr: Em troca parecia que você havia abandonado todo tipo de discussão. Quando voltei da Noruega me encontrei com o que você tinha feito, um rascunho do seu trabalho sobre o princípio da incerteza e que já havia mandado publicar!

Margreth: E então começa o combate.

Bohr: Meu querido Heisenberg, não é um comportamento muito franco se pôr a imprimir um primeiro rascunho antes de havê-lo discutido juntos! Essa não é a nossa maneira de trabalhar!

Heisenberg: Não! A forma que trabalhamos é que me persegue desde a primeira hora da manhã até a última hora da noite! A maneira que trabalhamos é que me deixa louco!

Bohr: Sim, porque seu relatório tem um erro fundamental.

Margreth: Aí estão em pleno combate.

Heisenberg: Eu lhe mostro a verdade estranha sobre o universo, com a que jamais havíamos deparado desde a teoria da relatividade: que nunca se pode saber tudo sobre o paradeiro de uma partícula, ou qualquer outra coisa – nem sequer de Bohr agora, enquanto dá voltas de um lado para outro da sala desse seu modo seu, tão irritante. – Eu faço em pedaços o universo objetivo que o rodeia, e tudo o que me pode dizer é que eu tenho um erro na formulação!

Bohr: E tem!

Margreth: Querem chá? Torta?

Heisenberg: Escuta-me, em meu trabalho o que estamos tentando localizar não é um elétron livre, de viagem através de uma câmara de nuvem, e sim a um elétron quando está no seu lugar, dando voltas dentro de um átomo...

Bohr: E a incerteza não surge, como você sustenta – através de seu impreciso retrocesso quando é golpeado por um fóton que avança...

Heisenberg: Linguagem simples, a linguagem simples!

Bohr: Estou falando em linguagem simples.

Heisenberg: Escuta-me...

Bohr: A linguagem da mecânica clássica.

Heisenberg: Escuta-me! Copenhague é um átomo. Margreth é o seu núcleo. Está bem a escala? Dez mil a um?

Bohr: Sim, sim.

Heisenberg: E Bohr é um elétron. Ele está vagando em algum lugar da cidade na escuridão, ninguém sabe onde. Está aqui, está lá, está em toda parte e em lugar nenhum. Eu sou um fóton. Um quantum de luz. Sou enviado dentro da escuridão para encontrar Bohr. E tenho sucesso, porque vou me chocar com ele... Mas o que aconteceu? Olha, você está desacelerando! Você desviou! Já não está fazendo exatamente o mesmo que tão irritantemente estava fazendo quando me choquei!

Bohr: Mas Heisenberg, Heisenberg**:**! Também você se desviou! Se puder ver o que aconteceu com você e com sua partícula de luz, então pode calcular o que aconteceu comigo! O problema é saber o que aconteceu com você! Porque para entender como você se vê, nós temos que tratá-lo não apenas como uma partícula, e sim como uma onda. Tenho que usar não só a tua mecânica sobre as partículas, também tenho que usar a mecânica ondulatória de Schrödinger.

Heisenberg: Já sei, o adicionei em um anexo no meu artigo.

Bohr: Todos se lembram do seu relatório, mas ninguém se lembra de seu anexo. Mas o assunto é fundamental. Partículas são coisas, completas em si mesmas. As ondas são alterações que se produzem em outras coisas.

Heisenberg: Já sei. Complementaridade. Está nos anexos.

Bohr: Você nunca aceitou absoluta e totalmente a teoria da complementaridade, verdade?

Heisenberg: Sim! Absoluta e totalmente! A defendi na Conferência de Como de 1927! Sou um defensor fiel desde então. Você me convenceu. Eu aceitei a sua crítica humildemente.

Bohr: Não antes de dizer algumas coisas profundamente ofensivas.

Heisenberg: Em um momento literalmente me fizeste chorar!

Bohr: Eu as diagnostiquei como lágrimas de frustração e raiva.

Heisenberg: Uma birra infantil?

Bohr: Eu criei meus filhos.

Heisenberg: E o que aconteceu com Margreth? Ela também teve um acesso de raiva? Descobri que a fiz chorar depois que sai, fazendo-a digitar suas intermináveis correções de sua tese sobre a complementaridade.

Bohr: Disso não me lembro.

Margreth: Eu sim.

Heisenberg: Tivemos que arrancá-lo de sua cama para Pauli em Hamburgo para que viesse de uma vez para Copenhague para negociar a paz.

Bohr: O consegui. Nós terminamos com um tratado. A incerteza e a complementaridade se ergueram como os dois pilares centrais das interpretações da Mecânica Quântica de Copenhague.

Heisenberg: Um compromisso político, naturalmente, como a maioria dos tratados.

Bohr: Vês? Em algum lugar dentro de você ainda existem reparações secretas.

Heisenberg: Que nada, funciona. Isso é o que importa. Funciona, funciona!

Bohr: Sim, funciona. Mas mais importante que isso. Porque, se dá conta do que fizemos nesses três anos, Heisenberg? Eu não quero exagerar, mas nós demos uma reviravolta no mundo! Sim, escutem, prestem atenção, todos: voltamos a colocar o homem no centro do universo. Através da história fomos continuamente deslocados. Primeiro nos convertemos em meros acessórios dos insondáveis propósitos de Deus, pequenas figuras ajoelhadas na grande catedral da criação. E assim que nos recuperamos no Renascimento, apenas o homem se tem restabelecido como a medida de todas as coisas – como dizia Protágoras – então somos deslocados outra vez pelos produtos do nosso próprio raciocínio! Somos diminuídos novamente enquanto os físicos constroem as novas catedrais grandiosas da mecânica clássica para que nós a admiraremos. Até que chegamos ao início do século XX, e de repente nos vemos forçados a nos levantar novamente de nossa prostração.

Heisenberg: Começa com Einstein.

Bohr: Começa com Einstein. Ele mostra que a medida – ou seja, a medida da qual dependem toda a possibilidade da existência da ciência – a medida, não é um evento impessoal que ocorre com a imparcialidade do universo. É um ato humano, levado a cabo desde um ponto específico no tempo e no espaço, desde o ponto de vista particular de um possível observador. E aqui, em Copenhague, naqueles três anos em meados dos anos vinte, descobrimos que não há universo objetivo determinável com precisão. Que o universo existe só como uma série de aproximações. Só dentro dos limites determinados pela nossa relação com ele. Somente através do entendimento hospedado na cabeça humana.

Margreth: Então, este homem que você colocou no centro do universo é Bohr ou Heisenberg?

Bohr: Bem, meu amor, vamos lá.

Margreth: É que não é o mesmo.

Bohr: Qualquer um dos dois. Qualquer um de nós.

Margreth: Se Heisenberg é o que está no centro do universo, então essa partícula do universo que ele não pode ver é ele mesmo. Então não tem sentido perguntar por que veio a Copenhague em 1941, ele não sabe! Não consiste nisso a teoria complementaridade. Eu digitei muito sobre isso. Se alguém está fazendo algo no qual tem que se concentrar não pode ao mesmo tempo estar pensando em fazê-lo, e se pensa em fazê-lo então na realidade não pode estar fazendo. Agora me perdoe, mas vocês nem sequer sabem por que desenvolveram o princípio da incerteza.

Bohr: Enquanto que se sois a que está no centro do universo...

Margreth: Então posso te dizer que foi porque ele queria destruir Schrödinger.

Heisenberg: Eu queria demonstrar que ele estava equivocado, claro.

Margreth: Ele estava ganhando. Quando a cátedra de Leipzig ficou vaga, ele era um dos candidatos e não você. Então, aí você publicou o seu maravilhoso princípio.

Bohr: Não é por criticar Margreth, mas tens uma tendência a reduzir tudo ao plano pessoal.

Margreth: Porque tudo é pessoal! Você acabou de nos dar uma palestra sobre isso! Quando contas a história tudo está em ordem, tudo tem um começo, um meio e fim. Mas eu estava lá! E quando lembro como era tudo e eu olho a meu redor, o que eu vejo não é um conto! É confusão e raiva, ciúmes e lágrimas e ninguém sabe o que significam as coisas e nem que caminho elas vão continuar.

Heisenberg: De todo modo, funciona, funciona.

Margreth: Sim, funciona maravilhosamente bem. Depois três meses de ter publicado seu trabalho sobre o princípio da incerteza te ofereceram a cadeira de Leipzig.

Heisenberg: Não me referia a isso.

Margreth: Sem mencionar as outras que te ofereceram.

Heisenberg: Sim, muitas.

Bohr: E várias universidades americanas.

Heisenberg: Mas não me referia a isso.

Margreth: E que idade tinha quando você assumiu a cátedra em Leipzig?

Heisenberg: Vinte e seis.

Bohr: O professor titular mais jovem da Alemanha.

Heisenberg: Quando eu digo que funciona, me refiro a Interpretação de Copenhagen. A interpretação de Copenhague funciona. E continua funcionando.

Margreth: Sim. E porque ao final os dois aceitaram a interpretação? Crê que de verdade que foi porque queriam reestabelecer o humanismo?

Bohr: É claro que não. Foi porque era a única maneira de explicar os experimentos.

Margreth: Ou foi porque agora que você tinha se tornado um professor necessitavas criar uma doutrina solidamente estabelecida para ensinar? Ou porque você querias que tuas novas ideias fossem publicamente respaldadas pelo Papa de Copenhagen? E talvez Niels decidiu apoiá-las em troca de que você aceitasse as doutrinas que ele tinha criado e o reconhecesse como a cabeça da igreja. E quer

saber a que veio para Copenhague em 1941, também vou te dizer. Tem razão, não é tão misterioso: você veio para ostentar.

Bohr: Margreth!

Margreth: Não! Quando chegou aqui em 1924, era um humilde assistente de uma nação humilhada, agradecido por ter trabalho. E agora retorna triunfante, o cientista mais importante da nação que tem conquistado grande parte da Europa. Ele veio para mostrar que estava se dando bem na vida.

Bohr: Você não pode continuar a dizer isso!

Margreth: Desculpe, mas não é por isso que você está aqui? Porque queima de desejo de que saibamos que ele é responsável por uma parte vital de qualquer investigação secreta. E que, no entanto, ele manteve uma elevada independência moral. A preserva tão claramente que até deve ser vigiado pela Gestapo. A preserva com tanto sucesso que agora também sofre um importante e maravilhoso dilema moral que deve enfrentar.

Bohr: Sim, bem, agora você está apenas dando corda para continuar atacando.

Margreth: Uma reação em cadeia. Um conta uma verdade dolorosa e isso leva a dois mais. E como francamente o admites, vai voltar para continuar fazendo exatamente o que eu fazia antes, diga o que disser Niels.

Heisenberg: É assim.

Margreth: Mas nem sonhando renunciarias a uma oportunidade tão magnífica para investigar.

Heisenberg: Não, se o posso evitar não.

Margreth: Também queres demonstrar aos nazistas o quão útil é a física teórica. Queres salvar a honra da ciência alemã. Queres estar lá para restabelecê-la com toda a sua glória quando terminar a guerra.

Heisenberg: De qualquer maneira não a conto Speer que o reator vai produzir plutônio.

Margreth: Não, porque temes o que aconteceria se os nazistas investissem grandes recursos e fracassasse em sua tentativa de dar-lhes a bomba. Por favor, não tente nos dizer que você é um herói da resistência.

Heisenberg: Nunca pretendi ser um herói.

Margreth: Seu talento reside em esquiar tão rápido que ninguém pode ver onde você está. Sempre em mais de uma posição de cada vez, como uma das suas partículas.

Heisenberg: Só posso dizer que funcionou. A diferença do que aconteceu com a maioria dos heróis da resistência. Funcionou! Eu sei o que pensam. Pensam que eu deveria ter me unido à conspiração contra Hitler, para me enforcarem como o resto.

Bohr: É claro que não!

Heisenberg: Não o dizem, porque tem algumas coisas que é melhor não falar. Mas o pensam.

Bohr: Não.

Heisenberg: O que teria alcançado? O que haveria conseguido se tivesse se jogado para salvar Cristian e tivesse se afogado também? Mas também não posso dizer.

Bohr: Só pensar.

Heisenberg: Sim. Desculpe.

Bohr: E voltar a pensar e pensar. Todos os dias.

Heisenberg: E tive que te segurar para que não te puxasse, eu sei.

Margreth: Enquanto que você se segurava a ti mesmo.

Heisenberg: Enfim, é melhor ficar no barco. É melhor manter-se vivo e jogar a boia. Sem nenhuma dúvida!

Bohr: Talvez sim. Talvez não.

Heisenberg: É melhor. É melhor.

Margreth: Realmente é incrível. Os dois racionaram o caminho para o pequeno mundo do átomo com uma precisão e delicadeza espantosa. Agora resulta que tudo

depende destes objetos imensos que carregamos sobre os ombros. E o que está acontecendo ai é...

Heisenberg: Elsinore. A escuridão dentro da alma humana.

Margreth: Elsinore, sim.

Heisenberg: Sim, talvez tenha razão Margreth. Tinha medo das consequências. Eu estava consciente que estava do lado dos vencedores ... Tantas explicações para tudo o que eu fiz! Não contei a Speer simplesmente porque não me ocorreu. E vim para Copenhagen porque sim, apenas por que me ocorreu. Um milhão de coisas que poderíamos fazer ou não todos os dias. Um milhão de decisões que são tomadas sozinhas. Por que não me matou?

Bohr: Por que não te o que...?

Heisenberg: Me matar. Assassinar-me. Aquela noite de 1941. Lá estamos, caminhando, voltando para casa, e você acaba de chegar à conclusão de que eu vou fornecer armas nucleares a Hitler. Certamente você irá tomar os cuidados necessários para que isso não aconteça.

Bohr: Assassinando-te?

Heisenberg: Estamos no meio de uma guerra. Sou um inimigo. Não há nada de estranho ou imoral matar um inimigo. Podes fazê-lo sem barulho, sem sangue, sem sofrimento. Tão limpamente quanto a um piloto que aperta um botão a três mil pés, deixando cair uma bomba sobre a terra. Simplesmente esperas que eu tenha ido embora. Sentas calmamente em sua cadeira favorita e repete em voz alta para Margreth, frente ao nosso público invisível, o que acabo de contar-te, e eu vou estar morto em muito pouco tempo.

Bohr: Meu querido Heisenberg, a ideia é certamente...

Heisenberg: Muito interessante. Tão interessante que nem sequer te ocorreu. Uma vez mais, a complementaridade. Eu sou teu inimigo; também sou seu amigo. Sou um perigo para a humanidade; também sou seu convidado. Sou uma partícula; Também sou uma onda. Temos um conjunto de obrigações para com o mundo em geral, e outro conjunto de obrigações irreconciliáveis para os nossos compatriotas,

com nossos vizinhos, nossos amigos, família, filhos. Tudo o que podemos fazer é agir e logo olhar para trás e ver o que aconteceu.

Margreth: Vou te contar outro motivo pelo que fizestes o princípio da incerteza; tens uma afinidade natural com ela.

Heisenberg: Então, deve ter sido gratificante para vocês me ver voltar derrotado em 1947. Rastejando pelo chão novamente. Com minha nação em ruínas outra vez.

Margreth: Na verdade não. Você está mostrando que no pessoal, tem saído vitorioso mais uma vez.

Heisenberg: Mendigando pacotes de comida?

Margreth: Não. Quando ficou em Göttingen sob proteção britânica, a cargo da ciência alemã do pós-guerra.

Heisenberg: No primeiro ano em Göttingen, eu dormia sobre a palha.

Margreth: Isabel me contou que depois tiveram uma casa encantadora.

Heisenberg: Os britânicos me deram.

Margreth: Seus novos pais adotivos. Que haviam confiscado de outros.

Bohr: Chega meu amor, basta.

Margreth: Não, eu engoli o meu pensamento todos esses anos. Mas é enlouquecedor que este nosso filho, tão inteligente, está constantemente implorando que lhe digamos quais são os limites de sua liberdade, para depois ir e transgredi-los! Rastejando pelo chão? O que está rastejando é meu querido e bom marido! Literalmente. Rastejando pela praia na escuridão, em 1943, fugindo de sua pátria como um ladrão na noite, para que não o assassinem. A proteção da embaixada alemã que você tanto se gaba não ia durar muito. Nos incorporaram aos inimigos do Reich.

Heisenberg: Eu os adverti em 1941. Não me escutaram. Pelo menos Bohr fugiu para a Suécia.

Margreth: Sim? E onde você está nesse meio tempo? Enfiado em uma cova como um selvagem, tratando de conjurar um espírito maligno. Ao final, tudo isso se

reduziu a primavera luminosa dos anos 20, foi isso que produziu: uma máquina mais eficiente para matar pessoas.

Bohr: Quebra meu coração cada vez que eu penso sobre isso.

Heisenberg: Quebra o coração de todos.

Margreth: E esta máquina maravilhosa ainda pode chegar a matar a cada homem, cada mulher e cada criança no planeta. E se nós somos realmente centro do universo, se nós somos realmente os únicos que mantém a sua existência, que vai acontecer?

Bohr: A escuridão. Uma escuridão total e final.

Margreth: Até as perguntas que nos assombram ao final serão extintas. Até os fantasmas morrerão.

Heisenberg: Tudo o que posso dizer é que eu não fiz. Eu não fabriquei a bomba.

Margreth: Não, e por quê? Então, eu também vou dizer. É a razão mais simples de todas. Por que não podia. Não entendias nada de física.

Heisenberg: Isso disse Goudsmit.

Margreth: E Goudsmit sabia o que dizia. Ele era um membro do teu círculo mágico.

Heisenberg: Sim, mas ele não tinha ideia do que eu compreendia ou não a respeito da bomba.

Margreth: Te procurou por toda a Europa para a inteligência dos aliados. Ele te interrogou quando foi capturado.

Heisenberg: Me culpava, é claro. Seus pais morreram em Auschwitz. Pensava que eu deveria ter feito algo para salvá-los. Não sei o que.

Margreth: Ele disse que não entendia a diferença crucial entre um reator e uma bomba.

Heisenberg: Eu a entendia muito bem. Simplesmente não contei aos outros.

Margreth: Ah.

Heisenberg: Mas compreendia.

Margreth: Secretamente.

Heisenberg: Pode verificá-lo se você não acredita em mim.

Margreth: Há evidência?

Heisenberg: Tudo foi gravado com muito cuidado.

Margreth: Há testemunhas?

Heisenberg: Testemunhas impecáveis.

Margreth: O que escreveram?

Heisenberg: Que o gravaram e transcreveram.

Margreth: Apesar de não ter contado a ninguém?

Heisenberg: Eu disse apenas para uma pessoa. Disse a Otto Hahn. Essa noite terrível em Farm Hall, quando nos deixaram sozinhos depois que ouvimos as notícias. Dei uma explicação razoável de como havia funcionado a bomba.

Margreth: Após o fato?

Heisenberg: Após o fato. Sim. Quando não importa. Falei de todas as coisas que Goudsmit disse que eu não entendia.

Bohr: A massa crítica. Isso foi o mais importante. A quantidade de material que se necessitava para estabelecer uma reação em cadeia. Disse a ele qual era a massa crítica?

Heisenberg: Dei-lhe um número, sim. Averigua-lo se não acredita em mim! Tinham microfones por todas as partes... estavam gravando tudo o que dizíamos. Tudo o que eu contei a Hahn nessa madrugada.

Bohr: Mas a massa crítica. Você deu um valor. Quanto era?

Heisenberg: Me esqueci.

Bohr: Heisenberg...

Heisenberg: Está nas gravações. Pode escutá-la.

Bohr: O valor para a bomba de Hiroshima...

Heisenberg: Era de cinquenta quilos.

Bohr: Esse foi o valor que você deu Hahn? Cinquenta quilos?

Heisenberg: Lhe disse cerca de uma tonelada.

Bohr: Uma tonelada? Mil quilos? Heisenberg, acho que finalmente estou começando a entender algo.

Heisenberg: A única coisa que estava errada.

Bohr: Estavas excedendo vinte vezes.

Heisenberg: A única coisa.

Bohr: Mas Heisenberg, suas matemáticas, suas matemáticas! Como ela poderia estar tão longe?

Heisenberg: Não estavam. Enquanto calculei a difusão obtive o resultado correto.

Bohr: Apenas a calculaste?

Heisenberg: Uma semana depois, dei-lhes uma palestra sobre isso. Está gravado! Só buscar!

Bohr: Queres dizer... que você não tinha calculado antes? Não resolvestes a equação da difusão?

Heisenberg: Não havia necessidade.

Bohr: Não havia necessidade?

Heisenberg: O cálculo já estava feito.

Bohr: Feito por quem?

Heisenberg: Por Perrin e Flugge em 1939.

Bohr: Por Perrin e Flugge? Mas, meu caro Heisenberg, isso foi para o urânio natural. Wheeler e eu demonstramos que o único que se fissionava era 235.

Heisenberg: Sua grande tese. A base de tudo o que fizemos.

Bohr: Então você teria que calcular o valor para o 235 puro.

Heisenberg: Obviamente

Bohr: E não o fez?

Heisenberg: Não o fiz.

Bohr: E por isso você estava tão confiante em que não iam poder fazer a bomba até que obtivesse o plutônio. Porque você passou toda a guerra acreditando que se precisava de uma tonelada de 235 e não uns poucos quilos. E para obter uma tonelada de 235 em um tempo possível...

Heisenberg: Teria precisado de algo como duzentos milhões de separadores. Era claramente inimaginável.

Bohr: Se te tivesse dado conta de que teria que produzir alguns quilos...

Heisenberg: Até para fazer um quilo teria exigido cerca de duzentos mil separadores.

Bohr: Mas duzentos milhões é uma coisa; duzentos mil é outra, e sua construção é possível imaginar.

Heisenberg: É possível.

Bohr: Os americanos sim a imaginaram.

Heisenberg: Por que Otto Frisch e Rudolf Peierls resolveram a equação de difusão. Eles deveriam ter vindo fazer seus cálculos para nós, em Berlim. Mas em vez disso, fizeram na Inglaterra.

Margreth: Porque eram judeus!

Bohr: E descobriram o rápido que ia ser a reação em cadeia.

Heisenberg: E assim o pouco material que seria que se ia necessitar. Mas também se equivocaram. Um pouco mais de meio quilo.

Bohr: Eles estavam errados, é claro. O faziam parecer cem vezes mais imaginável do que na realidade era.

Heisenberg: Em vez disso, eu fiz que parecesse vinte vezes menos imaginável.

Bohr: Então você poderia ter feito a bomba sem construir um reator. Você poderia ter feito com o 235 desde o princípio.

Heisenberg: Quase certamente que não.

Bohr: Mas, era possível.

Heisenberg: Poderia ser possível.

Bohr: E esse problema o tinha resolvido muito antes de chegar a Copenhague. Simplesmente por não tentar provar a equação de difusão.

Heisenberg: Que falha mais insignificante.

Bohr: Mas as consequências foram enormes.

Heisenberg: Tão grandes como para salvar a cidade. Qual cidade? Qualquer uma das cidades que nunca jogamos nossa bomba.

Bohr: Londres, suponho, se a tivessem tido a tempo. Mas, se os norte-americanos já tinham entrado na guerra, e os Aliados tinham começado a libertar a Europa, então...

Heisenberg: Quem sabe? Paris também. Amsterdam. Talvez, Copenhagen.

Bohr: Então Heisenberg, conte-nos algo muito simples: por que não o fez os cálculos?

Heisenberg: Não sei! Não sei por que eu não fiz isso! Porque não me ocorreu! Porque não o pensei! Porque supus que não valia a pena fazer!

Bohr: Supôs? Você nunca supunha as coisas! Assim foi como você chegou ao princípio da incerteza, porque rejeitava nossas suposições! Você calculava Heisenberg! Calculava tudo! A primeira coisa que você fazia com um problema era usar as matemáticas!

Heisenberg: Deveria ter estado lá para me parar.

Bohr: Sim, eu não teria deixado passar despercebido se eu estivesse lá te orientando.

Heisenberg: Apesar de que você fez exatamente a mesma suposição! Você pensou que não havia perigo exatamente pelas mesmas razões que eu! Por que não fizeste o cálculo?

Bohr: Por que não fiz o cálculo?

Heisenberg: Diga-nos porque não o calculastes e saberemos o porquê eu não o fiz!

Bohr: É óbvio por que eu não fiz!

Heisenberg: Vejamos... Continue.

Margreth: Porque ele não estava tentando fabricar uma bomba!

Heisenberg: Muito obrigado. Porque ele não tentava fabricar uma bomba. Imagino que acontecia o mesmo comigo. Porque eu não estava tentando construir uma bomba. Muito obrigado.

Bohr: Então você enganou a si mesmo, como aconteceu comigo no poker com o royal flush que eu nunca tive. Mas, nesse caso...

Heisenberg: Por que vim a Copenhague? Sim, por que vim...?

Bohr: Analisemos um rascunho a mais, certo? Um rascunho final!

Heisenberg: E mais uma vez esmago as pedrinhas do caminho familiar para a porta de entrada da casa dos Bohr e toco a tão familiar campainha. Por que vim? Eu sei perfeitamente bem. Eu sei tão bem que eu não tenho a necessidade me perguntar sobre isso. Até que mais uma vez a pesada porta se abre.

Bohr: Ele está parado no limiar da porta piscando na súbita inundação de luz que vem do interior da casa.

Heisenberg: E, de repente, as razões que estavam claras dentro da minha cabeça perdem definição. A luz cai sobre eles e se dispersam.

Bohr: Meu querido Heisenberg!

Heisenberg: Meu querido Bohr!

Bohr: Acontece, acontece...

Heisenberg: Que difícil é ver ainda aquilo que está frente aos nossos olhos. Tudo o que temos é o presente, e o presente se dissolve constantemente no passado. Bohr desaparece quando eu viro para olhar Margreth.

Margreth: Niels tem razão. Você parece mais velho.

Bohr: Entendo que você teve um problema pessoal.

Heisenberg: Margreth passou a história enquanto me viro para Bohr. E, no entanto, quanto mais difícil é enxergar o que está por trás dos nossos olhos. Aqui estou, no centro do universo, e, no entanto, a única coisa que posso ver são os dois sorrisos que não me pertencem.

Margreth: Como está Isabel? Como estão as crianças?

Heisenberg: Muito bem. Mandam lembranças... Posso sentir um terceiro sorriso na sala, muito perto de mim. Poderia ser que, de repente, vejo por um momento aquele espelho?

Margreth: Observo ambos os sorrisos na sala, um desconfortável e que tenta se animar, o outro que está se transformando de cálido para meramente educado. Eu sei também que há um terceiro sorriso no quarto, inalterado, amável – espero – e cauteloso.

Heisenberg: Você conseguiu praticar um pouco de esqui?

Bohr: Eu olho de canto de olho para a Margreth, e por um momento vejo o que ela pode ver e eu não – a mim mesmo, e o sorriso que vai desaparecendo de meu rosto enquanto o pobre Heisenberg segue cometendo erros.

Heisenberg: Eu olho para os dois que olham para mim, e por um segundo eu vejo a terceira pessoa na sala tão claramente como eu os vejo. Seu hóspede indesejável, tropeçando de uma grosseria a outra.

Bohr: Eu o vejo olhando para mim, ansioso, implorando, tentando voltar aos velhos tempos, e eu vejo que ele vê que falta alguém na sala. Me vê. Vê Margreth. Não se vê a si mesmo.

Heisenberg: Duas bilhões de pessoas no mundo, e o que tem que decidir seu destino é o único que sempre se esconde de mim.

Bohr: Você sugere uma caminhada.

Heisenberg: Te lembra de Elsinore? A escuridão no interior da alma humana...?

Bohr: E saímos. Lá fora sob as árvores outonais. Pelas ruas obscurecidas pelos possíveis bombardeios.

Heisenberg: Agora não há ninguém mais no mundo, exceto Bohr e esse outro ser invisível. Quem é esta presença que me rodeia na escuridão?

Margreth: A partícula que voa vagando pela escuridão, e ninguém sabe aonde vai. Está aqui, está lá, está em todo lugar e em nenhuma parte.

Bohr: Com aparente indiferença ele começa a fazer a pergunta que esteve preparando.

Heisenberg: Tenho o direito, como um físico moralmente correto, para trabalhar na exploração prática da energia atômica?

Margreth: O grande impacto.

Bohr: Eu me detenho. Ele se detém...

Margreth: Assim é como trabalham.

Heisenberg: Ele me olha, horrorizado.

Margreth: Agora, finalmente, sabe onde está e o que está fazendo.

Heisenberg: Ele se vira.

Margreth: E apenas começa o momento do impacto, já acabou.

Bohr: Já estamos voltando para casa, com pressa.

Margreth: Já estão os dois se escapando um do outro na escuridão.

Heisenberg: Nossa conversa terminou.

Bohr: Nossa grande sociedade também.

Heisenberg: Toda nossa amizade.

Margreth: E todo com respeito a ele se volta tão incerto quanto antes.

Bohr: A menos que... Sim... Um experimento hipotético... Suponhamos por um momento que não vou voando durante a noite. Vejamos o que acontece se em troca lembro a figura paternal que se supõe que interpreto. Se eu parar, controlar minha raiva e me virar para ele. E eu lhe perguntar o por quê.

Heisenberg: Por quê?

Bohr: Por que você está tão certo de que vai ser tão tranquilizadoramente difícil construir uma bomba com o 235? É porque você fez o cálculo?

Heisenberg: O cálculo?

Bohr: Da difusão no 235. Não. É porque não calculou. Você não tinha dado conta conscientemente de que tinha que fazer um cálculo.

Heisenberg: E, com certeza, agora sim me dou conta. Na verdade, não seria tão difícil. Vejamos... A seção eficaz de dispersão é de cerca de 6 x 10-24 cm2 e o caminho livre médio seria ... Espere...

Bohr: E de repente um mundo novo, muito diferente e muito terrível começa a tomar forma...

Margreth: Esse foi o maior e último pedido que Heisenberg te fez. O que o compreenderas quando ele não podia compreender a si mesmo. E esse foi o maior e último ato de amizade que tiveste com ele: deixá-lo no erro.

Heisenberg: Sim. Talvez eu devesse agradecê-lo.

Bohr: Talvez devesse.

Margreth: Como seja, foi o fim da história.

Bohr: Embora talvez eu também devesse agradecer alguma coisa. Naquela noite de verão em 1943, quando eu escapei no barco pesqueiro e navios de carga chegaram da Alemanha...

Margreth: E o que isso tem a ver com Heisenberg?

Bohr: Quando os navios chegaram naquela quarta-feira havia oito mil judeus na Dinamarca que seriam presos e jogados em seus porões. No dia seguinte, na véspera do Ano Novo judaico, quando a SS começou a caçá-los, apenas assim se encontrava um judeu.

Margreth: Eles haviam sido escondidos em igrejas e hospitais, e nas casas dos vizinhos e em casas de campo.

Bohr: E como isso foi possível? Porque alguém na embaixada alemã nos tinha dado uma data.

Heisenberg: Georg Duckwitz, seu especialista de navegação.

Bohr: Um de seus homens?

Heisenberg: Um dos meus amigos.

Bohr: Foi um informante incrível. Avisou-nos no dia anterior da chegada dos cargueiros – o mesmo dia que Hitler deu a ordem – ele nos deu a hora exata em que a SS ia atuar.

Margreth: Foi a resistência que os tirou de seus esconderijos e os passou de contrabando para a Suécia.

Bohr: Que um punhado de nós conseguisse escapar dos barcos de patrulha alemães num barco de pesca já seria bastante incrível. Mas uma armada completa

conseguir passar com mais de oito mil pessoas a bordo, foi como se o mar vermelho se abrisse.

Margreth: Eu pensei que aquela noite não tivesse barcos de patrulha alemães...

Bohr: Não. De repente, toda a esquadra tinha sido declarada não apta para sair ao mar por razões de segurança.

Heisenberg: Como conseguiram, não posso imaginar.

Bohr: Então, talvez eu devesse te agradecer.

Heisenberg: Por quê?

Bohr: Por minha vida. Para todas as nossas vidas.

Heisenberg: A essa altura, não tinha nada a ver comigo. Desculpe dizer.

Bohr: Mas logo depois que eu saí, voltou para Copenhagen.

Heisenberg: Para me certificar que nossa gente não se apoderasse do Instituto na tua ausência.

Bohr: Também nunca lhe agradeci por isso.

Heisenberg: Sabia que me ofereceram seu cíclotron?

Bohr: O poderia ter usado para separar um pouco do 235.

Heisenberg: Enquanto isso, você ia da Suécia para Los Alamos.

Bohr: Para jogar minha pequena parte na morte de centenas de milhares de pessoas.

Margreth: Niels, não fez nada mal!

Bohr: Não?

Heisenberg: Claro que não. Foi um homem bom, do começo ao fim, e ninguém poderá dizer o contrário. Enquanto que eu...

Bohr: Enquanto que você, meu querido Heisenberg, nunca fez isso para contribuir para a morte de uma só pessoa em sua vida.

Margreth: Bem, sim.

Heisenberg: Sim?

Margreth: Uma. Essa história que nos contou. Aquele pobre homem que vigiaste toda a noite, quando você era um menino em Munique, enquanto ele esperava ser fuzilado pela manhã.

Heisenberg: Não, quando chegaram pela manhã eu os convenci para que o deixassem ir.

Bohr: Heisenberg tenho que dizer que se a gente vai medir estritamente na finalidade de quantidades observáveis...

Heisenberg: Então nós necessitaríamos de uma nova e estranha ética quântica. Haveria um lugar para mim no céu. E outro para esse homem da SS eu encontrei a caminho de casa a partir de Haigerloch. Esse foi o fim da minha guerra. As tropas aliadas nos estavam cercando; não havia mais nada que pudéssemos fazer. Isabel e os meninos se refugiaram em uma pequena cidade na Baviera, então fui para vê-los antes que me capturassem. Tive que ir de bicicleta – a essa altura não havia trens ou outros transportes – e teria que viajar de noite e dormir sob arbustos de dia, porque de dia o céu estava cheio de aviões aliados, varrendo as ruas à procura de qualquer coisa que se movesse. Foi isso o que eu tinha escolhido para o meu país? Escombros intermináveis? Será essa fumaça perpétua no céu? Esses rostos famintos? Foi minha responsabilidade? E todas essas pessoas desesperadas pelas calçadas. Os mais desesperados de todos eram os da SS. Bando de fanáticos com nada a perder, vagueando por ai, atirando em desertores, pendurando-os nas árvores nas laterais da rua. Na segunda noite, de repente, lá estava ele, esse casaco preto horrível e familiar que surgiu da escuridão na minha frente! Em seus lábios enquanto eu parava, essa palavra terrível e familiar: "Desertor", disse ele. Ele parece tão exausto quanto eu. Eu entrego a ordem de viagem que eu mesmo escrevi. Mas há pouca luz para ler e está cansado demais para ler. Em vez disso, ele começa a abrir seu coldre. Vai atirar, porque dá menos trabalho. E de repente eu estou pensando com grande rapidez e claridade, que é como esquiar ou naquela noite em Heligoland ou a outra do parque atrás do Instituto. Vem à mente cigarros americanos que eu tenho no meu bolso. E já está na minha mão, eu o ofereço. A

solução mais desesperada que eu já tentei. Eu espero. No pacote existem apenas duas palavras muito simples, mas com grandes letras: Lucky Strike, golpe de sorte. Fechou o coldre e pegou os cigarros... Funcionou, funcionou! Como todas as outras soluções e todos os outros problemas. Ele me deixa viver em troca de vinte cigarros. E segui viagem. Três dias e três noites. Através das crianças que choravam, perdidas e famintas, recrutadas para lutar, e, em seguida, abandonadas por seus comandantes. Através da fome dos trabalhadores escravos que iam a pé para casa na França, Polônia, na Estônia. Através da minha amada terra. Minha arruinada, desonrada e amada terra.

Bohr: Meu caro Heisenberg, meu querido amigo!

Margreth: Silêncio. O silêncio a que sempre voltamos.

Heisenberg: E, é claro, eu sei em que estão pensando.

Margreth: Todas aquelas crianças perdidas nas estradas.

Bohr: Heisenberg vagando pelo mundo, ele mesmo como um menino perdido.

Margreth: Nossos próprios filhos perdidos.

Heisenberg: E no barco, o leme se trava uma vez mais.

Bohr: Tão perto, tão perto! Por tão pouco! ...

Margreth: Niels para na porta, olhando para mim, então desvia seu olhar...

Heisenberg: E mais uma vez mergulha nas profundezas do mar.

Bohr: Antes que possamos agarrar a algo, nossa vida se acabou.

Heisenberg: Antes que possamos discernir quem ou o que somos, nos fomos para sempre e nos tornamos poeira.

Bohr: Instalados em toda essa poeira que nós levantamos.

Margreth: E, cedo ou tarde chegará o tempo que todos nossos filhos serão pó, e, em seguida, os filhos de nossos filhos.

Bohr: Quando as decisões, grandes ou pequenas, não se voltam a tomar nunca mais. Quando não há mais incerteza, porque não haverá mais conhecimento.

Margreth: E quando todos nossos olhos se tiverem fechados, quando até os nossos fantasmas se tenham ido... o que restará do nosso adorado mundo? De nosso arruinado, desonrado e adorado mundo?

Heisenberg: Mas enquanto isso, neste meio tempo precioso aí está. As árvores do parque. Os lugares amados. Os nossos filhos e os filhos dos nossos filhos. Preservados possivelmente, por aquele momento tão breve em Copenhague. Por algum acontecimento será encontrada ou definida em todo. Por esse último núcleo de incerteza que se encontra no coração de tudo o que existe.

<FIM DO SEGUNDO ATO>