

OPINIÃO: Comparação entre Institutos de Tecnologia Baseada em Indicadores do Capital Intelectual

FEIG
SESA
SENAI
EEL
TCO BRASIL

SENAI

REVISTA

Processos Químicos

Revista Científica da Faculdade de
Tecnologia SENAI Roberto Mange

Ano 8
n° 16
Jul/Dez
2014

www.rpqsenai.org.br

Otimização de Processos de Extração





ISSN 1981-8521

REVISTA **Processos**
Químicos

Revista Científica da Faculdade de
Tecnologia SENAI Roberto Mange



Goiânia, v.8, n.16, ano 8, jul/dez 2014.

REVISTA

Processos Químicos

Ano 8
nº 16
Jul/Dez
2014

Pedro Alves de Oliveira

Presidente do Conselho Regional do SENAI

Paulo Vargas

Diretor Regional do SENAI

Ivone Maria Elias Moreyra

Diretora de Educação e Tecnologia

Ítalo de Lima Machado

Gerente de Educação Profissional

Aroldo dos Reis Nogueira

Diretor da Faculdade de Tecnologia SENAI Roberto Mange

Joana Darc Silva Borges

Coordenadora da Área de Química

Corpo Editorial

Ademir João Camargo

Anselmo Eucana de Oliveira

Carlito Lariucci

Eurípedes de Almeida Ribeiro Júnior

Gilberto Lúcio Benedito Aquino

Guilherme Roberto de Oliveira

Hamilton Barbosa Napolitano

Kleber Carlos Mundim

Manoel Pereira da Costa

Maria Assima Bittar Gonçalves

Roberta Signini

Solemar Silva Oliveira

Valeter Henrique Carvalho Silva

FIG
SENAI
TEL
ICO BRASIL

SENAI

Revista Processos Químicos / SENAI.

Departamento Regional de Goiás - v.8,
n.16 (jul/dez 2014). Goiânia: SENAI/
DR. Gerência de Educação Profissional /
Faculdade de Tecnologia SENAI Roberto
Mange, 2014.
v.: il.

Semestral

Núcleo de Material Didático da Gerência
de Educação Profissional do SENAI/DR/GO
Capa e Diagramação: Juliano Rodrigues
Revisão Linguística: Fernanda Marques

ISSN 1981-8521

1. Educação Profissional - Periódicos. 2.
Processos Químicos.
I. SENAI. Departamento Regional de
Goiás

CDD - 540

Tiragem: 1.500 exemplares

Faculdade de Tecnologia SENAI Roberto Mange
Av. Engenheiro Roberto Mange, nº 239
Bairro Jundiá - CEP 75113-630 - Anápolis-GO
Fone: (62) 3902-6200 - Fax: (62) 3902-6226
e-mail: revistapq.senai@sistemafieg.org.br

ARTIGOS CONVIDADOS

09 *Impactos Sobre a Biota e a Qualidade de Latossolos Cultivados com Cana-de-Açúcar*
Georgia R. S. Sant'Ana & Selma S. Castro

33 *Otimização de Processos de Extração de Princípios Ativos de Plantas*
Gerlon A. R. Oliveira

ARTIGOS GERAIS

43 *Avaliação Energética da Biomassa de Cana-de-Açúcar em Diferentes Indústrias Sucroenergéticas*
Stella F. A. Oliveira, Deborah D. Brunelli, José E. Gonçalves, Yzel R. Suárez & Clauber Rodrigues

53 *A Produção de Combustíveis de Microalgas no Brasil*
Luiza Paula C. Lopes & Arnaldo S. Cabral

61 *Método Gravimétrico de Determinação de Umidade Comparativo à Determinação por Infravermelho*
José R. Gonçalves, Wellington A. Moraes, Ana Cleide dos Santos & Renata M. Gonçalves

65 *Análise Físico-Química e Biológica da Água do Lago do Jardim Botânico de Goiânia (GO)*
Carlos Eduardo R. Sant'Ana, Georgia R. S. Sant'Ana & Luiz C. P. da Silva

75 *Cristalografia: 100 Anos no Caminho da Inovação*
Leonardo R. Almeida, Jhonata J. Silva, Vitor S. Duarte, Thalita N. S. dos Santos & Hamilton B. Napolitano.

87 *Avaliação do Nível de Intensidade do Capital Intelectual das Redes de Atendimento Setoriais do SESI*
Julio A. Z. dos Santos & Jefferson O. Gomes



RESUMO ESTENDIDO

95

Fotodegradação do Corante Vermelho Congo Utilizando Dióxido de Titânio

Leonardo R. Caixeta & Leonardo L. Costa

OPINIÃO

107

Modelo de Avaliação de Capital Intelectual para Institutos SESI de Inovação por meio de Método Multicritério

Sergio L. S. Motta & Jefferson O. Gomes

113

A Modelagem de Processos como Ferramenta para Melhoria da Educação Profissional

Sandro P. Ormond & Luís G. Trabasso

123

Comparação entre Institutos de Tecnologia Baseada em Indicadores do Capital Intelectual

Paula B. Nadai & Jefferson O. Gomes

129

INSTRUÇÕES PARA ENVIO DE ARTIGOS PARA A REVISTA PROCESSOS QUÍMICOS





Apresentação

A inovação tecnológica inclui a apropriação pelo mercado de um novo produto ou processo e compreende as atividades internas e externas de pesquisa e desenvolvimento, bem como a apropriação desse conhecimento específico pelo setor produtivo. Cabe destacar que a inovação não exclui uma relação de busca com o conhecimento consolidado, não exclui a compreensão e construção do estado da arte do conhecimento específico, não exclui elementos essenciais como a sensibilidade, a criatividade, a imaginação, a competência acadêmica, a visão de mercado, dentre outros. Um exemplo a ser pensado é o da Fundação Fraunhofer, da Alemanha, que tem alcançado vários sucessos nesta direção, tendo como diretriz, na busca pela inovação, as seguintes etapas (*sine qua non*): (1) pesquisa básica; (2) pesquisa aplicada; (3) pesquisa direcionada ao setor produtivo; e (4) inovação tecnológica. Fica evidente, portanto, que a inovação não prescinde em importância ao conhecimento básico.

O Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI) tem avançado sistematicamente a cada dia no cumprimento da sua missão, que afirma “Promover a inovação e a transferência de tecnologias industriais para elevar a competitividade da indústria”. Dentre as várias ações que evidenciam o cumprimento dessa missão, destaca-se a Revista Processos Químicos (RPQ), vinculada ao Departamento Regional de Goiás. Ainda que a vinculação da RPQ seja regional, o seu alcance atinge o nível nacional. O sucesso da RPQ, periódico científico com ênfase tecnológica, apresenta, pelo menos, duas razões. A primeira delas é a qualidade dos artigos publicados, que além do rigor acadêmico, possuem compromisso com a transferência qualificada de tecnologias para a indústria. A segunda razão está no preenchimento de uma lacuna pré-existente, dentro da transversalidade dos processos químicos, de um instrumento qualificado que levasse o estado da arte desse conhecimento específico para o cotidiano da indústria. Nesse contexto, a RPQ publica seu décimo sexto volume visando elevar a competitividade da indústria brasileira. Entre os artigos, destacam-se várias contribuições oriundas Mestrado Profissional em Produção do Instituto Tecnológico da Aeronáutica. Desejo a todos um boa leitura.

Aroldo dos Reis Nogueira

Diretor da FATEC SENAI Roberto Mange



Impactos Sobre a Biota e a Qualidade de Latosolos Cultivados com Cana-de-Açúcar

Georgia R. S. Sant'Ana & Selma S. Castro

Em Goiás, a expansão da cultura da cana-de-açúcar destaca-se, estando hoje entre as três maiores áreas cultivadas no Brasil. O presente estudo analisou a influência das diferentes práticas de manejo no cultivo de cana-de-açúcar na Microrregião de Quirinópolis, utilizando-se de indicadores biológicos, físicos e químicos. Foram selecionados oito sítios amostrais em áreas ocupadas por solos do tipo Latossolo Vermelho Distrófico e Distroférico e dois mananciais próximos da cultura, com coletas a montante e a jusante. Concluiu-se que as diferentes práticas agrícolas influenciam diretamente na dinâmica do solo e da água, quanto aos seus aspectos físicos, químicos e biológicos, evidenciando-se bioindicadores.

Palavras-chaves: *Qualidade do solo; qualidade da água; bioindicadores.*

In Goiás, the expansion of cultivation of sugar cane stands and is now among the three largest areas cultivated in Brazil. The present study examined the influence of different management practice in the cultivation of sugar cane in the micro-region of Quirinopolis, using biological, physical and chemical indicators. Eight sampling sites were selected in areas occupied by soil type Red Oxisol dystrophyc and distroferric and two springs coming from culture collections with upstream and downstream. It was concluded that the different agricultural practices directly influence the dynamics of soil and water, regarding their physical, chemical and biological aspects, evidencing bioindicators.

Key words: *Soil quality; water quality; bioindicators.*

Introdução

A expansão da cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) no cenário agrícola brasileiro tem sido impulsionada por tecnologias que contribuem para a redução de custo de produção e uma maior produtividade¹. Tal expansão vem se dando em direção à região Centro-Oeste, em particular nos estados de Mato Grosso do Sul (MS) e Goiás (GO), onde ocorrem grandes extensões em área com condições edafoclimáticas e logísticas (incluindo melhoria e expansão) favoráveis^{2,3,4}.

Segundo dados da literatura⁵, o município de Quirinópolis, juntamente com Gouvelândia, situados na porção sudoeste da região sul do estado de Goiás e que integram a microrregião de Quirinópolis (MRQ), lideram a nova centralidade do setor no estado e no país, no qual a cana chegou em 2004⁶. Quirinópolis, em particular, destaca-se como o principal município em área plantada no estado e já superou o município de Santa Helena de Goiás, o qual, durante muito tempo, liderou o *ranking* da produção de cana no estado de Goiás.

A história da cana-de-açúcar, em Goiás, não é recente, pois em 1935, já havia cerca de 1400 engenhos nos municípios goianos⁷. A produção aumentou gradativamente até 1988, tendo alcançado o declínio em 1995 e, daí em diante, experimentou novo e notável crescimento, sendo um dos principais eixos da recente expansão de fronteira da cana-de-açúcar no país e no Cerrado. Tanto é assim que na safra de 1995/1996 apresentou uma produção de seis milhões de toneladas, na safra 2008/2009, saltou para uma produção de 29 milhões de toneladas e continua crescendo. Na safra 2009/2010, alcançou 40 milhões de toneladas, passando a 46 milhões de toneladas na safra 2010/2011, a 48 milhões de toneladas na safra 2011/2012, e tem uma previsão de 51 milhões de toneladas para atual safra 2012/2013⁸. Isso significa um incremento da ordem de 850% no período, tendo por base a safra 1995/1996⁶.

Na mesorregião Sul do estado, as microrregiões com maior área plantada na atualidade são Sudoeste de Goiás, Meia Ponte e Quirinópolis. Estudos^{9,2} demonstraram que, na microrregião Meia Ponte, a expansão da cana-de-açúcar deu-se por meio de substituição de culturas, principalmente de soja e, secundariamente, pastagem.

A expansão inicial da cana-de-açúcar na MRQ iniciou-se em 2004, com a primeira safra colhida em 2006/2007, e prosseguiu até os dias atuais. Possui sete usinas, estando quatro em operação e três em implantação, e já provocou mudanças significativas na forma de uso e ocupação das suas terras, que refletem na mudança da paisagem, evidenciada pela substituição de culturas e pelo aumento da área de produção⁶, a qual passou de 5,6 mil ha em 2006/2007 para 254,8 mil ha na safra de 2011/2012, um incremento de área plantada da ordem de 4550%⁵, valores extraordinários e incomparáveis no estado, no bioma Cerrado e mesmo no país.

A Cultura da Cana-de-Açúcar

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*), originária do Sudeste asiático, foi trazida ao Brasil em 1532 da Ilha da Madeira, por Martin Afonso de Souza. Neste mesmo ano, foi construído o primeiro engenho de açúcar do país na capitania de São Vicente, mas nas capitanias de Pernambuco e da Bahia que os engenhos de cana-de-açúcar multiplicaram-se. Por quase dois séculos, o açúcar foi o principal produto agrícola exportado pelo Brasil, e, por conseguinte, sua principal fonte de divisas. Durante este período, a nação deteve o monopólio da produção mundial, vindo a perder a liderança no final do século XVII¹⁰.

No estado de Goiás, a história de produção da cana-de-açúcar apresenta registros de cultivo já em 1935, com cerca de 1400 engenhos e uma produção de 166 mil toneladas no ano de 1940, segundo dados do Censo Agropecuário⁷, sendo destinada principalmente à produção de açúcar, rapadura e cachaça. Valores de produção que se mantiveram até o final da década de 1980, quando houve um incremento, chegando a mais de 5 milhões de toneladas em 1988. Após esse período, ocorreu queda e novo aumento que sobreveio em 1996, sendo superior a 6 milhões de toneladas, segundo dados⁸. Essas oscilações relacionam-se principalmente às fases de implantação e declínio do Proálcool, bem como em parte às políticas do próprio setor sucroalcooleiro nacional. É importante ressaltar que, desde o PNA, esse patamar vem apresentando crescimento exponencial, alcançando cerca de 48 milhões de toneladas na safra 2010/2011. Na atualidade, a cana-de-açúcar já se posiciona como



um importante produto em termos de produtividade no estado^{11,12}.

A cana-de-açúcar é uma das seis espécies do gênero *Saccharum*, apresentando desenvolvimento em formas de touceira ou moita. É uma planta da família *Poaceae*, com as quais se relaciona com a forma da inflorescência (espiga), o crescimento do caule em colmos e as folhas com lâminas de sílica em suas bordas e bainha aberta. As raízes são fasciculadas, sendo que 85% delas encontram-se nos primeiros 50 cm de profundidade e aproximadamente 60% entre os primeiros 20-30 cm, havendo pequenas variações nessa percentagem dependendo, sobretudo, das variedades¹³.

O ciclo fenológico da cultura varia entre 11 e 22 meses, cana de ano e cana de ano e meio, respectivamente, dependendo da época do plantio. Nos canaviais plantados entre setembro e novembro, ou seja, no início da estação chuvosa, a duração do ciclo é em torno de 12 meses. Após o plantio da muda, ocorre a brotação e a planta tem aproximadamente oito meses de desenvolvimento vegetativo e quatro meses para que ocorra a maturação. Já nos canaviais plantados entre janeiro e abril, apresentam ciclo variando entre 14 e 21 meses. Neste caso, o desenvolvimento é favorecido nos três meses iniciais, ficando limitado nos meses secos, entre abril e agosto, e nos sete meses seguintes, volta a vegetar, amadurecendo nos meses de inverno¹⁴. Após o amadurecimento, a cana é colhida e a colheita pode ser mecanizada (colhedoras) ou manual (cortadores de cana). No processo de colheita mecanizada, a cana é colhida crua, com a palha remanescente, retornando ao solo, o que forma uma densa camada sobre a superfície desse. No processo de colheita manual, a cana é queimada antes do corte, para facilitar o trabalho e aumentar a eficiência dos cortadores.

Após a colheita/corte da cana-de-açúcar, inicia-se novo ciclo, de aproximadamente 12 meses, repetindo-se o processo de cinco a seis vezes, até se dar a reforma do canavial e um novo tolete é plantado. A avaliação econômica do rendimento irá determinar a renovação dos canaviais^{15,14}.

A cana-de-açúcar é cultivada ininterruptamente num mesmo solo por vários anos; assim, com o passar do tempo, a tendência é que ocorra queda de fertilidade e, conseqüentemente, menor rendimento da cultura. No

entanto, a adoção de algumas práticas conservacionistas, como a utilização de resíduos orgânicos na fertilização dos solos (torta de filtro e vinhaça) e a sobreposição da palha ao solo, em virtude da colheita mecanizada, protegendo contra a erosão, podem atenuar impactos negativos e prolongar a vida útil do canavial. Contudo, o prevalecimento de sistemas de cultivos convencionais (com intenso revolvimento do solo) em diversas unidades produtoras, assim como a realização da queima antes da colheita (perda de C orgânico e emissão de CO₂) para facilitar o corte manual, são fatores preocupantes que podem vir a causar desequilíbrio no ambiente em que estão inseridos^{16,10}.

A alternativa de aplicação de vinhaça ao solo, em vez de seu lançamento em rios, vem sendo recomendada como meio de fertilização das culturas e constitui uma forma de eliminar outras das fontes poluidoras dos cursos de água com adubação mineral. A incorporação de resíduos orgânicos ao solo promove aumentos na fixação do C, sendo parte desse aumento originária da decomposição da matéria orgânica no solo^{17,18}. O constituinte principal da vinhaça é a matéria orgânica, basicamente sob a forma de ácidos orgânicos e, em menor quantidade, por cátions como o K, Ca e Mg, sendo que sua riqueza nutricional está ligada à origem do mosto. Quando se parte de mosto de melaço, apresenta maiores concentrações em matéria orgânica, potássio, cálcio e magnésio, ao passo que esses elementos decaem consideravelmente quando se trata de mosto de caldo de cana, como é o caso de destilarias autônomas^{19,20}.

Vários estudos sobre a disposição da vinhaça no solo vêm sendo conduzidos, enfocando-se os efeitos no pH do solo, propriedades físico-químicas e seus efeitos na cultura da cana-de-açúcar, mas poucos avaliaram o real potencial poluidor da vinhaça sobre o solo e lençol freático²¹ já que, em virtude dos elevados níveis de matéria orgânica e nutrientes, principalmente potássio, quase toda destilaria brasileira tem adotado sua utilização na fertirrigação de plantações de cana-de-açúcar^{22,23}.

Os sistemas de cultivo convencional consistem em sucessivas operações, que o deixam pronto para receber a cultura da cana-de-açúcar, onde as atividades mais utilizadas são a sistematização, distribuição dos corretivos, aração, gradagem pesada, subsolagem e gradagem niveladora²⁴. Este tipo de manejo pode ocasionar alterações



nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, além de elevar as taxas de erosão hídrica, resultantes das chuvas que encontram o solo desnudo^{25,26}.

A degradação^{27,28} do solo pelo cultivo é manifestada por processos erosivos, redução da matéria orgânica, perda de nutrientes, compactação do solo, redução de populações microbianas, de atividades enzimáticas e pH. Assim, torna-se imprescindível a adoção de práticas agrícolas sustentáveis, que causem menores danos ao ambiente em que estão inseridas, como também estudos sobre o efeito que diferentes sistemas causam ao ambiente de produção, definindo, assim, a melhor estratégia de uso e manejo, buscando sempre a melhoria da qualidade de vida humana, animal e vegetal.

Qualidade do Solo

O conceito de qualidade do solo data de civilizações muito antigas²⁹ e é parte fundamental da qualidade ambiental. No final da década de 70 e durante os dez anos seguintes, esse conceito esteve muito associado à ideia de fertilidade, sendo um solo considerado de alta qualidade quando se apresentava quimicamente rico. No entanto, os conceitos foram renovados e o solo de alta qualidade passou a ser visto de outra forma. As implicações³⁰ de qualidade do solo não se restringem somente ao ambiente solo, mas se estendem à hidrosfera, atmosfera e a biosfera, atuando na qualidade da água, qualidade do ar e na biodiversidade (Figura 1).

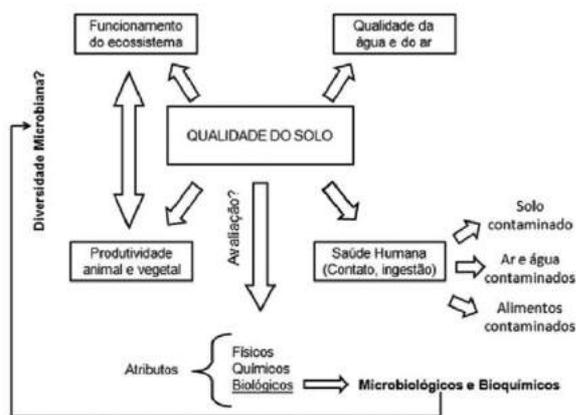


Figura 1. Fatores relacionados à qualidade do solo e aos atributos utilizados para sua quantificação, com destaque para a diversidade microbiana. Fonte: Adaptado de Melloni, 2007.

O novo conceito de qualidade do solo é relativamente recente, iniciando na década de 1990, com grandes controvérsias e ainda não tão bem estabelecido na comunidade científica^{30,31}(Quadro 1).

Quadro 1. Definições para “Qualidade do Solo”. Fonte: Adaptado de Araújo e Monteiro, 2007.

Definição	Autores
Capacidade de um solo funcionar dentro do ecossistema para sustentar a produtividade biológica, manter a qualidade ambiental e promover a saúde das plantas e dos animais.	Doran e Parkin, 1994
Capacidade de um tipo específico de solo funcionar como ecossistema natural ou manejado para sustentar a produtividade animal e vegetal, manter a qualidade da água e do ar e suportar o crescimento humano.	Karlen et al., 1997
Condição do solo relativa aos requerimentos de uma ou mais espécies biológicas e/ou de algum propósito humano.	Johnson et al., 1997
Capacidade do solo de sustentar a diversidade biológica, regular o fluxo da água e solutos, degradar, imobilizar e detoxificar compostos orgânicos e inorgânicos e atuar na ciclagem de nutrientes e outros elementos.	Seybold et al., 1998

Embora haja consenso entre pesquisadores e agricultores de que a manutenção da qualidade do solo é um elemento-chave para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas, a avaliação desse atributo não é uma tarefa fácil. O objetivo desta busca é obter uma ferramenta para avaliar, principalmente, a qualidade das práticas de manejo empregadas na produção agrícola, visando à sustentabilidade da agricultura e a preservação do ambiente.

A qualidade do solo pode ser avaliada, considerando a capacidade do solo em suprir nutrientes às plantas, suportar o crescimento das raízes, proporcionar adequada atividade biológica, propiciar adequada estabilidade estrutural, resistir à erosão e reter água para as plantas, entre outros²⁶. Nessa perspectiva, é fundamental a escolha de um conjunto mínimo de indicadores que apresentem características como facilidade de avaliação,



aplicabilidade em diferentes escalas, capacidade de integração, adequação ao nível de análise da pesquisa, sensibilidade às variações de manejo e clima e possibilidade de medições por métodos quantitativos e/ou qualitativos²⁹⁻³¹ (Quadro 2).

Quadro 2. Principais indicadores físicos, químicos e biológicos e suas relações com a qualidade do solo. Fonte: Adaptado de Doran e Parkin (1994).

Indicadores	Relação com qualidade do solo
Estrutura do solo Infiltração e densidade Capacidade de retenção de umidade	Físicos Retenção e transporte de água e nutrientes Movimento de água e porosidade do solo Armazenamento e disponibilidade de água
pH Condutividade elétrica Conteúdo de N, P e K	Químicos Atividade biológica e disponibilidade de nutrientes Crescimento vegetal e atividade microbiana Disponibilidade de nutrientes para as plantas
Biomassa microbiana, Mineralização de nutrientes (N, P e S) Respiração do Solo Fixação Biológica Atividade enzimática do solo	Biológicos Atividade microbiana e reposição de nutrientes Produtividade do solo e potencial de suprimento de nutrientes Atividade microbiana Potencial de suprimento de N para as plantas Atividade microbiana e catalítica no solo

Atualmente, existe na literatura uma grande quantidade de informações acerca dos indicadores de caráter químico e físico, que permite, com certo grau de confiabilidade, definir faixas de valores adequados para essas características em diversos tipos de solos e culturas. Não se pode afirmar o mesmo sobre a base de informações disponíveis sobre os dados biológicos do solo que ainda é pequena. As principais causas³² estão no fato de os testes microbiológicos não serem incluídos em análise de laboratórios de rotina e na falta de padronização de métodos, desde a amostragem, estocagem, pré-tratamento das amostras até os procedimentos analíticos

e a apresentação dos resultados. Dessa forma, saber quando os valores obtidos indicam ou não um bom solo é um dos grandes obstáculos ao uso dessas variáveis nas avaliações de qualidade do solo³³.

A avaliação da qualidade do solo é desejável para detectar as mudanças causadas pelos diferentes processos de degradação, que resultam no declínio da produtividade do solo ou qualidade do solo³⁴ após utilização em diferentes usos. Definir e quantificar a qualidade do solo tem sido uma tarefa difícil, uma vez que ela depende das características intrínsecas do solo, de interações com o ecossistema e de uso para diversos fins³⁵. As diferentes interações que ocorrem no solo dependem da atuação dos diferentes constituintes (matriz mineral, matéria orgânica, água, ar e organismos), além das condições climáticas existentes no ambiente e as atuações humanas nas determinações de uso desse solo.

Para avaliar a qualidade do solo, é necessária a utilização de uma quantidade de atributos indicadores que tenham como finalidade quantificar as mudanças ocasionadas no ambiente pelos diferentes sistemas de manejo em relação a um sistema referência, que é geralmente considerado a floresta nativa. Atualmente são conhecidos efeitos isolados de diferentes manejos e uso do solo nos atributos físicos, químicos e biológicos³⁶. No entanto, há necessidade de avaliar esses atributos em conjunto, principalmente, em solos do bioma Cerrado.

ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO

O monitoramento da qualidade do solo, por meio de indicadores químicos do solo, tem sido mais frequentemente utilizado, principalmente relacionando os atributos descritos numa análise convencional de fertilidade do solo³⁷. Os indicadores químicos estão relacionados com os aspectos de nutrição de plantas, sendo de efeito direto no caso dos macro e micronutrientes, ou indiretos, quando se trata da presença da matéria orgânica do solo³⁸.

No entanto, estudos experimentais sugerem que, para o nitrogênio (N) do solo, a limitação é generalizada ao nível mundial³⁹, e solos com elevado grau de intemperização mostram limitação de N, além da limitação de P⁴⁰. Há também casos em que o cálcio (Ca) ou K podem limitar o crescimento das plantas, ou fornecer co-limitação com N



e P⁴¹. Os micronutrientes necessários para o crescimento das plantas também podem se ligar fortemente aos minerais do solo e matéria orgânica, e poderiam não estar disponível em certos casos⁴². Não sendo o caso dos solos sob condições tropicais com baixos teores de matéria orgânica e baixos valores de pH.

ATRIBUTOS BIOLÓGICOS DO SOLO

Um indicador microbiológico³⁷ pode ser definido como uma espécie de microrganismo ou grupo de microrganismo que indica, pela sua presença e atividade numa determinada área, a existência de uma condição ambiental específica. No entanto, esse conceito aborda apenas os organismos do solo, e é importante considerar também a matéria orgânica do solo dentro de um atributo biológico, devido à grande influência com relação a esse aspecto. Ainda pode-se incluir como indicador biológico do solo a atividade enzimática dos microrganismos, a avaliação da meso e macrofauna do solo, entre outros atributos biológicos do solo.

A atividade microbiológica é altamente concentrada nas camadas mais superficiais do solo, ocupando uma fração de menos que 0,5% do volume total do solo e representando menos que 10% da matéria orgânica⁴³. A função dos microrganismos é mediar processos no solo, relacionados com o manejo, podendo, assim, serem indicadores sensíveis de qualidade do solo⁴⁴. Alguns estudos avaliaram as variáveis microbiológicas e identificaram que estas foram mais sensíveis em detectar, em etapa anterior, efeitos dos diferentes sistemas de manejo do que as variáveis físicas e químicas⁴⁵⁻⁴⁸.

Os organismos do solo, em especial os microrganismos, são responsáveis em transformar a energia e matéria vegetal produzida pelas plantas em formas adequadas para o funcionamento do sistema solo. Dessa forma, convertem a energia e a matéria vegetal de uma forma para outra, o que caracteriza o fluxo de compostos orgânicos no sistema solo. Em função desse fluxo, os componentes do solo interagem e se auto-organizam em estados de ordem, seguindo uma hierarquia de complexidade⁴⁹.

A biomassa microbiana do solo é considerada a parte viva e mais ativa da matéria orgânica do solo, constituída por fungos, bactérias, actinomicetos, protozoários, algas

e microfauna, excluindo-se raízes e animais inferiores a $5 \times 10^3 \mu\text{m}^3$ ^{52,35}, representando em média de 2 a 5% do C orgânico⁵¹ e de 1 a 5% do N total do solo⁵². A biomassa microbiana é considerada o reservatório mais ativo da matéria orgânica do solo, atuando diretamente no balanço de nutrientes, particularmente, para o nitrogênio, fósforo e potássio. A literatura⁵² ressalta que os solos que mantêm elevados teores de biomassa microbiana são capazes, não somente de armazenar, mas também de reciclar mais nutrientes no sistema⁵³.

Alterações significativas na biomassa microbiana do solo podem ser identificadas com antecedência, quando comparadas às mudanças na matéria orgânica. Assim, a avaliação da biomassa microbiana tem sido proposta como um indicador do estado e das alterações da matéria orgânica do solo e sugerida como uma medida sensível ao aumento ou decréscimo de sua quantidade³³.

A população microbiana é grandemente influenciada pelo manejo e pela cobertura vegetal do solo, sendo cada grupo afetado de forma seletiva. Os solos submetidos ao plantio direto ou preparo reduzido apresentam acúmulo superficial de resíduos orgânicos e nutrientes minerais, possibilitando a formação de uma camada de alguns centímetros muito favorável ao desenvolvimento microbiano. Com aumento da profundidade, as condições tornam-se adversas e a população diminui. No preparo convencional, quando a aração é feita até 20 cm, em média, ocorre uma incorporação mais uniforme dos resíduos, resultando numa distribuição mais homogênea da população microbiana na camada arável⁵⁴. Considerando-se que os microrganismos constituem excelente indicador das condições biológicas do solo, além de seu efeito sobre a produtividade agrícola, torna-se importante o conhecimento do manejo do solo e da cobertura vegetal sobre a população microbiana⁵⁵.

O solo é provavelmente um dos habitats mais diversos do ecossistema terrestre, sendo bactérias, fungos e invertebrados seus principais representantes⁵⁶. Do ponto de vista funcional⁵⁷, a fauna do solo é classificada por tamanho em três principais grupos: microfauna, mesofauna e macrofauna. A microfauna (4 a 100 μm de diâmetro corporal) é composta por protozoários, rotíferos, copépodes, tardígrados, nematódeos e outros. Tais organismos participam da ciclagem de nutrientes, podem ainda ser reguladores da atividade microbiana⁵⁸.



A mesofauna (100 μm a 2 mm de diâmetro corporal) é a mais abundante do solo, representada principalmente por ácaros e colêmbolos que, juntos, correspondem a mais de 95% dos microartrópodes do solo⁵⁹. A macrofauna (maior que 2 mm de diâmetro corporal) é representada pelos anelídeos, diplópodes, isópteros, entre outros. Esses artrópodes são responsáveis principalmente pela fragmentação da serrapilheira, alterações na estrutura do solo e incorporação dos detritos no solo e são conhecidos como “engenheiros do ecossistema”⁶⁰.

A matéria orgânica do solo tem grande importância como fonte de nutrientes para as culturas, na retenção de cátions, complexação de elementos tóxicos e micronutrientes, estabilidade de estrutura, infiltração e retenção de água, aeração, e como fonte de C e energia aos microrganismos heterotróficos⁶¹. Assim, considerando a matéria orgânica como influenciadora dos atributos químicos, físicos e biológicos do solo, observa-se a importância de manutenção no ambiente e a relação com cada atributo do solo^{62, 61, 49, 63}.

Qualidade da Água

Os principais poluentes nas áreas rurais normalmente são a matéria orgânica, os sedimentos, os nutrientes e os pesticidas, transportados principalmente pelo escoamento da água oriunda das terras agricultadas. A malha viária, representada pelas estradas rurais e caminhos internos das propriedades, em geral, construída e conservada de modo inadequado, contribui de forma significativa para a erosão e a contaminação da água com sólidos totais⁶⁴.

O solo descoberto, desprovido de cobertura vegetal, expõe os agregados do solo à ação direta das gotas de chuva. O impacto da gota no solo rompe as forças de coesão dos agregados e as partículas tornam-se mais susceptíveis ao escoamento superficial, iniciando-se um processo gradativo de erosão das partículas do solo. Os processos erosivos podem ser intensificados por fatores ambientais (declividade, tipo de solo, erosividade das chuvas) ou antrópicos, este último intrinsecamente relacionado ao uso e manejo das terras⁶⁵. Áreas manejadas inadequadamente, contrapondo à ótica conservacionista, levam à diminuição da taxa de infiltração de água no solo, favorecendo o escoamento superficial e carreando sedimentos para as partes mais baixas do

terreno, causando o assoreamento dos rios, provocando enchentes na época chuvosa e vazões reduzidas na época seca e, assim, a migração de nascentes e o posterior desaparecimento de pequenos rios⁶⁶.

Outras fontes de poluição importantes nas áreas rurais são os resíduos sólidos (esgotos domésticos e animais, lixo domiciliar) e os agrotóxicos. Os agrotóxicos, muitas vezes, são utilizados sem cuidados técnicos e ambientais. As transformações de áreas de vegetação natural para uso agropecuário levam à alteração das relações físicas e biológicas nos córregos e, normalmente, resulta em degradação de habitat e impactos negativos na biota de rios^{67, 68}. A presença de vegetação natural na bacia, ou ao menos de uma zona ripária protegida, é vista como condição para a integridade biológica de rios^{69, 70}. A vegetação ripária nas margens dos rios funciona como uma zona tampão entre o rio e o resto da bacia hidrográfica, por isso, o estado da vegetação ripária influencia a hidrologia, características do substrato, regimes térmicos e a química da água do rio, o que afeta todos os níveis tróficos⁷¹.

A análise da água de um manancial pode evidenciar o uso inadequado do solo, os efeitos do lançamento de efluentes, as limitações de uso e o potencial de autodepuração, isto é, sua capacidade de restabelecer o equilíbrio após o recebimento de efluentes⁷². Dentre os parâmetros utilizados para qualificar a água, estão os físico-químicos (pH, dureza total, cloretos, alcalinidade e sólidos totais) e os microbiológicos (coliformes fecais e totais)⁷³.

A resolução n.º 357/05 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) apresenta os diversos parâmetros para o enquadramento dos corpos hídricos brasileiros e é uma ferramenta importante e decisiva para o monitoramento da qualidade da água, além de ser um referencial para a gestão dos recursos hídricos. Os padrões de qualidade da água servem para regular e controlar os níveis de qualidade que podem ser mantidos no corpo hídrico, dependendo do uso a que este está destinado. A utilização dos padrões de qualidade mantém a qualidade do curso hídrico ou define uma ação a ser realizada. A literatura^{74, 75} trata os padrões de qualidade da água de modo mais complexo, em que norma é um processo e o critério faz parte da norma, reforça que o critério deve ter suporte em informações científicas avaliadas no efeito

dos poluentes na saúde humana, estética e ecossistema aquático.

A utilização de pequenas quantidades de pesticidas, aliada ao fato do rápido crescimento da planta, que permite uma boa cobertura do solo, o que facilita o controle da erosão, são considerados como pontos positivos na cultura da cana-de-açúcar⁷⁶. Ao contrário, o uso de herbicidas e fertilizantes de larga utilização são os pontos negativos nessa cultura^{76, 77}. A este fato se soma a problemática resultante da devastação das matas ciliares, o que acarreta, em diferentes graus, impactos sobre os recursos hídricos das áreas adjacentes, na forma de impactos difusos do setor agroindustrial⁷⁸.

A expansão da monocultura de cana-de-açúcar no estado de Goiás pode levar à ocupação de novas áreas com a consequente destruição de habitats e impactos sobre a biodiversidade, bem como à degradação do solo (erosão e contaminação), à poluição dos recursos hídricos superficiais e subsuperficiais e à redução da disponibilidade hídrica decorrente da captação de água de áreas já ocupadas para fins agrícolas.

Numerosos estudos têm sido realizados, em diferentes áreas, com o objetivo de se detectar possíveis impactos resultantes do plantio da cana-de-açúcar nas águas dos córregos e rios localizados em áreas adjacentes da cultura de cana-de-açúcar⁷⁷. Tais estudos têm demonstrado que, principalmente em áreas sem vegetação de proteção (mata ciliar), os agroquímicos (metais, fertilizantes, herbicidas e pesticidas), utilizados no plantio de cana, são carregados para os corpos d'água, por meio do processo de lixiviação do solo, há possibilidade de contaminar a água e o sedimento desses ambientes, além de poder acarretar problemas de bioacumulação em diferentes níveis tróficos^{79, 80}. Consequentemente, a identificação e o conhecimento dos impactos dos usos da terra em ambientes lóticos e a influência no ecossistema são componentes essenciais para o manejo, para a conservação e para o estabelecimento de estratégias de restauração desses habitats⁸¹.

Caracterização da Área de Pesquisa

Caracterização do meio físico da região de Quirinópolis, Goiás

A MRQ localiza-se na região de planejamento denominada de Sudoeste de Goiás, pertencente à mesorregião Sul Goiano. Possui uma área total de 16.068,103 km² e é composta por nove municípios: Cachoeira Alta, Caçu, Gouvelândia, Itajá, Itarumã, Lagoa Santa, Paranaiguara, Quirinópolis e São Simão. Como diferencial no setor agrícola, apresenta vantagens logísticas para a distribuição e escoamento da produção, uma vez que nela se situa o Porto de São Simão, o qual integra trecho da Hidrovia Paranaíba-Tietê-Paraná, o poliduto (gasoduto, petroduto e alcoolduto) procedente da Bolívia e que interliga Campinas (SP) a Brasília (DF), passando pela mesorregião Sul Goiano no município de Senador Canedo, pertencente à região Metropolitana de Goiânia, além das rodovias pavimentadas GO 164, que se liga à BR 060 e 452 e GO 206, que se liga, por sua vez, à BR 364 e 483 (Figura 2).



Figura 2. Mapa de localização da microrregião de Quirinópolis, Goiás, indicando a hidrografia, o sistema viário principal e a localização das usinas em 2010. **Fonte:** Silva (2012)

A MRQ possui sete usinas instaladas, sendo que quatro se encontram devidamente cadastradas junto ao Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento e outras três se encontram em processo de licenciamento⁸². As usinas cadastradas e já em operação estão citadas no Quadro 3 e na Figura 2.

Quadro 3. Usinas cadastradas e já em operação na microrregião de Quirinópolis, Goiás. Fonte: Mapas elaborados sobre imagens Landsat 2004 e 2010/Castro;Silva (2011).

USINAS	LOCALIZAÇÃO	PRODUÇÃO
Usinas São Francisco Razão Social U.S.J. Açúcar e Álcool S/A ,Registro: 22/03/2006	Município de Quirinópolis	Produção mista de açúcar etanol e energia
Usina Boa Vista Razão Social usina Boa Vista S/A Registro: 18/04/2008	Município de Quirinópolis	Produção de Etanol
Usina São Simão Razão Social Energética São Simão S/A Registro: 25/06/2008	Município de São Simão	Produção mista de açúcar e etanol
Usina Rio Claro, Razão Social Rio Claro Agroindustrial S/A, Registro: 03/08/2009	Município de Caçu	Produção de etanol
Usina Rio Doce I	Município de Cachoeira Alta	Fase de implantação
Usina Rio Doce II	Município de Caçu	Fase de implantação
Usina Complexo bioenergético	Município divisa Caçu e Itarumã	Fase de implantação
Razão Social Rio Claro Agroindustrial S/A, Registro: 03/08/2009	Município de Caçu	Produção de etanol
Usina Rio Doce I	Município de Cachoeira Alta	Fase de implantação
Usina Rio Doce II	Município de Caçu	Fase de implantação
Usina Complexo bioenergético	Município divisa Caçu e Itarumã	Fase de implantação

O início do processo⁶ de inserção da cana-de-açúcar para produção sucroalcooleira na MRQ data de final de 2004, mediante aquisição de terras e formalização de contratos com fornecedores, e cujo início da produção deu-se, de fato, em 2006 para colheita em 2007, quando se obteve uma área de produção de 5.688 ha, sendo 2.270 ha no município de Gouvelândia e 3.418 ha em Quirinópolis. Na safra 2007/2008, a área de produção passou para 21.633 ha com predominância em Quirinópolis e Gouvelândia, porém, com a inserção de

outros dois municípios, São Simão e Paranaiguara. Na safra 2008/2009⁸, a área de produção já abrangia seis municípios: incluindo Caçu e Itarumã à lista anterior, cobrindo uma área total de 42.542 ha. Na safra 2009/2010, um sétimo município inicia a produção, Cachoeira Alta, totalizando uma área de produção de 86.401 ha, que na safra 2010/2011 chega a 104.226 ha.

As áreas de pastagem reduziram em 20,59%, passando a 926.003 ha, assim como o número de pivôs de 10 para apenas 5. No entanto, as áreas de agricultura de grãos aumentam em 79,21%, chegando a 268.072 ha, demonstrando que, mesmo com a inserção da cana, a qual representa 7,23% da área, a tradição da cultura de grãos permanece (Tabela 1).

Tabela 1. Dados do uso e cobertura da terra de 2004 a 2010

Tipo de uso	2004		2010	
	Área em ha	% da microrregião	Área em ha	% da microrregião
Agricultura	149.585,741	9,31	268.072,572	16,68
Pivô	769,441	0,05	586,901	0,03
Pastagem	1.166.208,300	72,58	926.003,100	57,63
Cana-de-açúcar	0	0	116.003,007	7,23
Vegetação natural	247.932,100	15,42	247.225,400	15,38
Drenagem	40.465,910	2,52	47.070,512	2,93
Área urbana	1.841,807	0,12	1.841,807	0,12
Total	1.606.803,300	100	1.606.803,300	100

As referidas condições indicam que MRQ apresenta-se com clima tropical quente sub-úmido, do tipo Aw, com duas estações bem definidas e variações anuais significativas quanto à umidade, precipitação e temperatura, de acordo com a tipologia climática estabelecida por Köppen⁸³. Apresenta chuvas de verão (outubro a março) e inverno seco (junho a setembro), transições entre períodos úmidos e secos, volume total de 1700 mm e uma amplitude térmica de cerca de 15°⁸⁴ clima altamente favorável ao cultivo da cana-de-açúcar⁸⁵.

Na MRQ, os Latossolos Vermelho Distrófico (LVd) e Distroférico (LVdf) destacam-se, sendo de grande importância no processo de expansão da cana-de-açúcar (Figura 3). Os LVd são caracterizados como solos profundos a muito profundos, bem drenados friáveis e bastante porosos. Sua estrutura caracteriza-se por ser fracamente desenvolvida, pequena a muito pequena e granular, raramente com blocos subangulares, o que lhe confere um aspecto maciço. Apresenta-se na cor vermelho-escuro (2,5 YR) com grande variação textural. Quando associados

aos arenitos do Grupo Bauru apresentam textura média, com teor de argila variando entre 12 e 31%. Tais solos podem se apresentar com caráter aluminífero, em estado dessaturado, com problemas críticos quanto à deficiência de nutrientes, necessitando de correção da fertilidade natural⁸⁶.



Figura 3. Mapa de solos da microrregião de Quirinópolis, Goiás. Fonte: Silva (2012)

Os LVdf assemelham-se ao LVd, exceto por apresentarem alto teor de ferro, no geral, teores de Fe₂O₃ (pelo H₂SO₄) de 180g/kg a < 360g/kg na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte B, em virtude da rocha de origem (basalto). Têm horizonte A moderado, textura argilosa e horizonte B latossólico com cores relativas aos tons vermelho-escuro (matiz 2,5YR e 10R), estrutura microagregada, muito pequena e pequena granular, fraca, com aspecto maciço e altamente porosa. Apresentam ainda alta capacidade de retenção de umidade. São solos de textura argilosa, bem drenados e aerados⁸⁷.

A MRQ faz parte da Bacia Hidrográfica do Paraná, sendo muito rica em sua rede de drenagem. A área é composta por 16 sub-bacias. Os principais rios da região correm entre os residuais areníticos da Formação Marília, do Grupo Bauru e correm em direção à calha coletora (NW-SE) do rio Paranaíba. Por se encaixarem nas rochas sedimentares, a drenagem reflete o padrão paralelo das fraturas e falhamentos de direção NW-SE, encontradas nas rochas da região. Na parte SE, encontramos a

barragem de São Simão, no rio Paranaíba, divisor dos municípios da microrregião com o Estado de Minas Gerais. Os principais rios desta região são: rio dos Bois, São Francisco, Preto, Claro, Doce, Corrente, Aporé, Tijucu, Verde e Arantes⁸⁸.

Caracterização do Meio Biótico da Região de Quirinópolis, Goiás

COBERTURA VEGETAL

Em relação às formações vegetais originais na MRQ, ocorriam formações do tipo Floresta Estacional semidecidual, sobre os solos argilosos (LVdf), zonas aluviais com domínio dos Gleissolos Háplicos (GX) e, no restante, as formações típicas do Cerrado (Savana Tropical), sobre os arenitos e solos associados (LVd e LVAd), caracterizado pelas fisionomias de Savana Florestada, Savana Arborizada, Savana Parque e Savana Gramíneo-lenhosa^{89, 90}. Grande parte desta região, no entanto, caracterizava-se por apresentar áreas relativas a zonas de transição ou áreas de tensão ecológica entre a Floresta Estacional semidecidual e o Cerrado, as quais se localizavam, principalmente, na porção noroeste da microrregião (Figura 4).



Figura 4. Mapa de vegetação original da microrregião de Quirinópolis, Goiás. Fonte: Silva (2012).



A microrregião de Quirinópolis⁹¹ no ano de 2010 apresentava a pastagem como atividade predominante, cobrindo 64% da área total seguida pela agricultura com 16% da área, em que 7% destes já se referem às áreas de cana-de-açúcar e, por fim, a vegetação remanescente que ocupava apenas 16% da paisagem (incluídas as Áreas de Preservação Permanente – APP). Estes 16% estão em desacordo com a legislação, pois em estados localizados no bioma Cerrado, a obrigatoriedade da Reserva Legal é de 20% da área na forma de remanescentes, além das áreas de APP. Em relação ao número de fragmentos remanescentes, possuía 5.890, seguindo-se a pastagem e a agricultura com 1.560 e 1.472 fragmentos, respectivamente. Apesar do grau de fragmentação, os fragmentos de Cerrado ainda apresentam conectividade física, fator importante para a conservação.

FAUNA

O EIA/RIMA da Usina São Francisco Açúcar e Alcool S/A94, na área de pesquisa, cita os seguintes grupos: grupo de herpetofauna - 30 espécies, sendo 10 espécies de anfíbios, seis espécies de lagartos e 14 espécies de serpentes; grupos de avifauna - 96 espécies, distribuídas em 39 famílias; grupo da mastofauna - 11 espécies de mamíferos, distribuídos em nove famílias. No ecossistema aquático, em quatro pontos de amostragem, em dois córregos da região, foram encontrados 1890 indivíduos do grupo de macroinvertebrados bentônicos, de 16 táxons diferentes. Quanto à ictiofauna, foram identificados 26 espécies de peixes, com 13 famílias. No levantamento realizado neste trabalho de estudo de impacto ambiental, a fauna e flora nativas ainda permanecem em pequeno número, e muitos em fase de extinção devido à alteração dos *habitats*.

Estratégia Metodológica Geral

ROTEIRO METODOLÓGICO GERAL

O roteiro geral da pesquisa passou por quatro grandes etapas: 1) revisão da literatura para aquisição das bases conceituais e metodológicas; 2) análise espacial do processo de expansão da cana-de-açúcar numa escala regional, ou seja, da MRQ que permitiu o delineamento amostral dos solos para os trabalhos

de campo e laboratório; 3) o estudo específico dos solos e corpos d'água em campo; o pós-campo, no laboratório da Faculdade Roberto Mange-SENAI, Anápolis, a partir das análises biológicas do solo, no laboratório de Geomorfologia, Pedologia e Geografia Física (LABOGF/IESA) e Laboratório de Física dos Solos (LFS/UFG), com as análises físicas do solo e as análises de fertilidade foram levadas para o laboratório da Solocria Ltda, Goiânia, as análises físico-químicas e biológicas da água foram realizadas no laboratório AQUALIT, Goiânia; 4) as análises dos resultados para as discussões e conclusões do estudo (Figura 10). O resultado da primeira etapa está distribuído em todos os capítulos deste trabalho. Para cada etapa há materiais e métodos específicos, os quais serão rapidamente abordados no item a seguir.

Caracterização das Áreas Amostrais

SOLO

Neste estudo, foram selecionadas áreas homogêneas representativas do histórico de expansão da cana-de-açúcar na MRQ relatado e considerando as características do meio físico, a saber, geologia, geomorfologia e pedologia. Assim, selecionaram-se áreas ocupadas pelos LVdf argilosos, antes sob cultivo de grãos, sobretudo soja, onde a expansão se deu inicialmente; além de áreas com LVd textura média, antes com pastagem, convertidos em cana-de-açúcar em um segundo momento³.

Foram selecionados oito sítios amostrais para a abertura de trincheiras e descrição de perfis de solo com cana-de-açúcar, observando características semelhantes em relação ao manejo; todos relativos ao 4º corte do 1º ciclo, plantados com a mesma variedade de cana (SP 813250), cultivo e colheita fortemente mecanizada e sem queima (junho 2008, maio 2009, maio 2010), além de terem sido alvo do mesmo preparo do solo, variando apenas em relação ao manejo da cultura, isto é, com fertirrigação com vinhaça (Quadro 4) ou sem. Apoiados nas práticas de preparo e de conservação promovidas nestes solos, entende-se que os vestígios dos cultivos anteriores foram eliminados.

A escolha dos sítios amostrais considerou



Quadro 4. Preparo do solo utilizado nos oito pontos amostrais com cultura de cana-de-açúcar na região de Quirinópolis, Goiás.

Uso anterior /cana, Perfil/ Manejo*	Preparo e conservação do solo		
	Atividade	Quantidade	Período/ano
Soja/cana 1A – LVdf 1B – LVdf 3B – LVd	Construção de terraços	-	Agos/2006
	Subsolagem	-	Agos/2006
	Grade pesada	-	Agos/2006
	Calagem	3 t/ha	Set/2006 – jun/2009
	Gessagem	1,5 t/ha	Set/2006 – jun/2009
	Fosfatagem	0,23 t/ha	Set/2006
	Grade leve	-	Set/2006
Pasto/cana 2A – LVdf 2B – LVdf 4B – LVd	Dessecação (glifosato)	5 l/ha	Out/2006
	Sulcação e adubação (05-25-25)	0,6 t/ha	Nov/2006
	Cobrição (regent 800 WG)	0,25 kg/ha	Nov/2006
	Quebra lombo	-	Fev/2007
Pasto/soja/cana 5B – LVd 6B – LVdf	Adubação de cobertura (31-00-00)	0,20 t/ha	Jun/2008 – jun/2009
	Herbicida pré-emergente	0,14 kg/ha	Jun/2008 – jun/2009
	Controle de broca (vespa)	4 copos/ha	Dez/2008 – Dez/2009
	Controle de cigarrinha	0,8 kg/ha	Jan/2009 – Jan/2009
Soja/cana 1A – LVdf Pasto/cana 2ª – LVdf	Fertirrigação (vinhaça)	150 m ³ /ha	Jun/2008

* fertirrigado (A), não fertirrigado (B) Fonte: Adaptado de Borges (2011).

observações preliminares, em que se constataram processos de compactação em diversos graus e tipos de solos, bem como nas informações contidas no Plano de Manejo da Usina São Francisco. Para viabilizar a análise comparada da qualidade física dos solos com e sem uso antrópico, foram selecionadas duas áreas amostrais, relativas à vegetação natural para cada um dos referidos solos. Ao todo, foram estudados dez perfis de solo com características físicas homogêneas (Quadro 4 e 5), sendo oito referentes às substituições soja/cana, pasto/cana e sucessão de culturas (pasto/soja/cana), além de duas áreas de controle com vegetação (Figura 5).

Os perfis (Figura 6) foram analisados em faces de trincheiras abertas (cerca de 2,0 x 1,5 x 2,5 m), a partir da realização das descrições morfológicas, relativas à espessura do horizonte, cor, textura, estrutura,

consistência, porosidade, presença de nódulos ou concreções e transição entre horizontes, além de coleta de amostras deformadas (compostas) e indeformadas de cada um dos seus horizontes (anéis volumétricos com três repetições) por horizonte e caixas para confecção de lâminas delgadas para descrição micromorfológica com uma repetição por horizonte). Seguiram-se as recomendações da literatura^{92,93} quanto à coleta de amostras para análises físicas, de amostras indeformadas em anéis volumétricos e coleta de amostras indeformadas para confecção de lâminas delgadas para estudos micromorfológicos.

As amostras biológicas de organismos edáficos foram colocadas no mesmo dia no funil de Berlese^{94,90}, coletados nos respectivos horizontes de cada perfil. Os animais capturados foram fixados em álcool 70% e armazenados em recipientes de vidro, para posteriores

Quadro 5. Caracterização dos perfis de solo estudados. Fonte: Silva (2012)

Perfil	Elementos do meio físico				Uso e manejo	
	Solo	Geologia	Declividade	Altitude	Uso da terra anterior à cana/ vegetação	Fertirrigação
1A	LVdf	Basalto	0 a 3%	576	Soja	Fertirrigada
1B				540		Não fertirrigada
2A				503	Pastagem	Fertirrigada
2B				460		Não fertirrigada
6B				458		Sucessão: pasto/soja/cana
7C				545	Vegetação natural	-
3B				LVd	Arenito	0 a 3%
4B	595	Pastagem				
5B	633	Sucessão: pasto/soja/cana				
8C	589	Vegetação natural	-			
			3 a 6%			

identificações. As amostras microbiológicas foram as primeiras a serem coletadas em recipientes estéreis e armazenadas em isopor^{95, 96}.

Realizaram-se dois trabalhos de campo para descrição morfológica e coletas de amostras. O primeiro foi realizado do dia 01 a 03 de maio de 2010, quando foram descritos os perfis 1A, 1B, 2A, 2B e 7C e coletadas as amostras. Já o segundo foi realizado do dia 03 a 07 de setembro de 2010, quando foram descritos os perfis 3B, 4B, 5B, 6B e 8C e coletadas as amostras (Quadro 6).

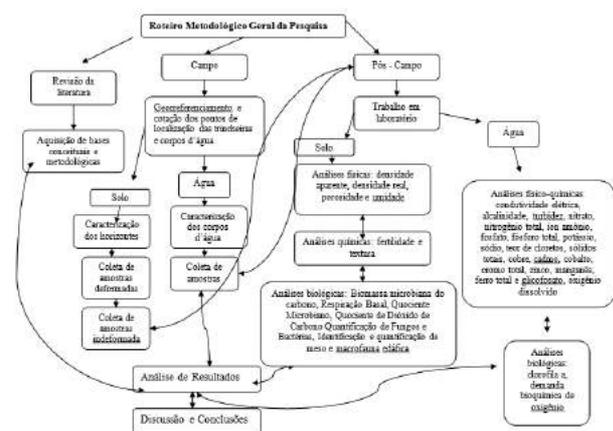


Figura 5. Fluxograma mostrando as etapas da pesquisa.

LOCALIZAÇÃO DOS PERFIS DE SOLO NA MICRORREGIÃO DE QUIRINÓPOLIS, GOIÁS

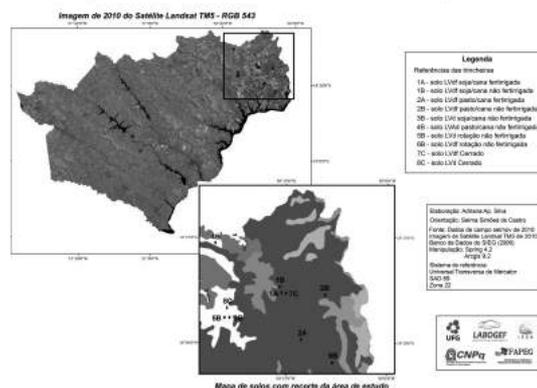


Figura 6. Mapa da microrregião de Quirinópolis, Goiás com a localização dos perfis de solos estudados. Fonte: Silva (2012).

ÁGUA

As coletas de água foram conduzidas em dois córregos localizados no município de Quirinópolis. O município de Quirinópolis está localizado nas sub-bacias do Rio dos Bois, Rio São Francisco e Rio Preto (IBGE, 2009), conforme exposto. Nele foram amostrados dois córregos, sendo um referente à bacia do Rio Preto, com 2340,83 km², sub-bacia do Córrego Limeira, com 40,25 Km², extensão de 22,243 Km e localizado próximo à usina sucroalcooleira Boa Vista. Outro córrego amostrado foi da bacia do Rio dos Bois, com 34.812,06 Km², sub-bacia do Córrego do Lajeado, com 70,59 Km² e extensão de 33,43 Km, localizado próximo à usina sucroalcooleira São Francisco (Figura 7).

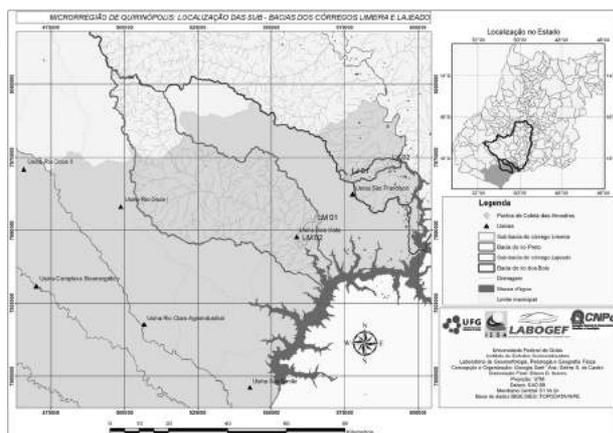


Figura 7. Localização das áreas das bacias dos córregos amostrados: bacia do Rio Preto/sub-bacia do Córrego Limeira; bacia do Rio dos Bois/sub-bacia do Córrego do Lajeado.

As sub-bacias estudadas estão localizadas em posição a montante da cidade de Quirinópolis, a uma altitude de 506 e 542 m e a jusante entre 405 e 542 m. Quanto à declividade, a montante, é de 5 a 13 % e, a jusante, é de 13 a menor que 7,8 %. A seleção dos mananciais foi devido à proximidade da cultura de cana-de-açúcar de duas grandes usinas na MRQ.

O Córrego do Lajeado, a montante, apresenta água transparente com leito pedregoso. O tipo do solo é Gleissolo, situado em área de mata galeria, próximo a uma área rural, apresenta profundidade de 0,30 e 0,50 cm, seu leito se encontra sombreado pela vegetação. A jusante do Córrego do Lajeado apresenta água transparente, mostrando leito argiloso. O tipo do solo também é Gleissolo, possui pouca vegetação nativa, estando bem próximo às áreas de plantação de cana-de-açúcar. O fundo do córrego é argiloso e pedregoso.

Já o Córrego Limeira, a montante, apresenta água transparente e leito argiloso. O tipo do solo é Gleissolo, situado em área de mata galeria, com presença de muito material em suspensão. O córrego é sombreado pela vegetação marginal. Não possui um grande volume de água, variando entre 0,40 e 0,60 cm de profundidade, o fundo do córrego é argiloso.

A jusante do Córrego Limeira, a água é turva com leito argiloso e presença de algumas rochas. O tipo do solo é Latossolo. Possui pouca vegetação nativa em seu

entorno, estando próximo à área de cultivo de cana-de-açúcar e uma pequena porção de pasto. A profundidade do córrego é de 0,60 a 0,70 cm. O fundo do córrego é argiloso, com pouca presença de seixos e rocha.

Em cada córrego, foram amostrados dois pontos (Figura 7), escolhidos por permitirem acesso aos córregos pela existência de trilhas próximas. A localização dos pontos amostrados é apresentada a seguir: Córrego Do Lajeado a montante - LJ1 (S 18°22'32,9" e W 0,50° 16'37,5"); a jusante - LJ2 (S 18°20'02,4" e W 0,50°08'43,0"); Córrego Limeira a montante - LM1 (S 18°31'14,4" e W 0,50°23'06,5"); a jusante - LM2 (S 18°35'01,0" e W 0,50°26'01,8").

Análise de Dados

Os resultados da fauna edáfica, químicos do solo e biomassa microbiana, índices derivados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) de medidas repetidas. Para execução do cálculo estatístico foi utilizado o software STATISTICA® versão 8.0 (Statsoft, Inc). Antes das análises, os dados foram logaritimizados para estabilizar as variâncias e o nível de significância assumido foi de $\alpha = 0,05$.

Todas as variáveis da água (temperatura da água, condutividade elétrica, alcalinidade, turbidez, nitrato, nitrogênio total, íon amônio, fosfato, fósforo total, potássio, sódio, teor de cloretos, sólidos totais, cobre, cadmo, cobalto, cromo total, zinco, manganês, ferro total, glicofosato, clorofila a, demanda bioquímica de oxigênio e oxigênio dissolvido) foram submetidas a análises qualitativas.

Resultados e Discussão

Os diferentes sistemas de manejo na área com cultura provocaram alterações nos atributos químicos. A principal refere-se à disponibilidade de fósforo que apresentou maior concentração decorrente do manejo anterior com soja e do atual com cana não fertirrigada, associada à aplicação de insumos orgânicos e químicos. Os perfis fertirrigados não apresentaram nenhuma melhora no solo, embora seja necessário ressaltar que receberam apenas uma aplicação de vinhaça até o momento da coleta das amostras. Verificou-se também, a importância da adoção de sistemas de manejo com aumento de carbono orgânico para melhorar a qualidade do solo (Figura 8 e 9).

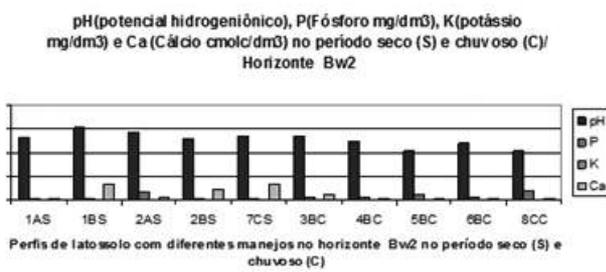
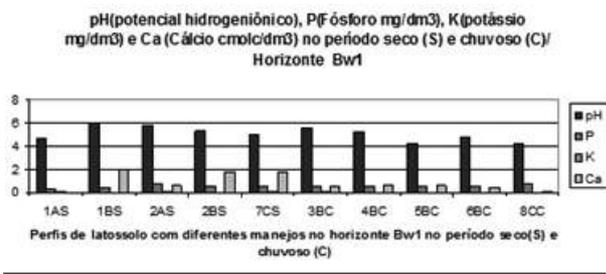
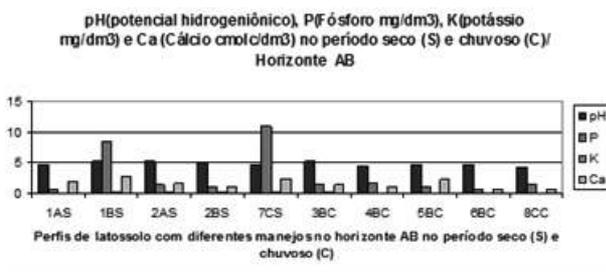
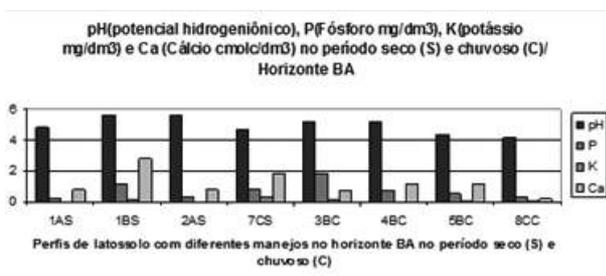
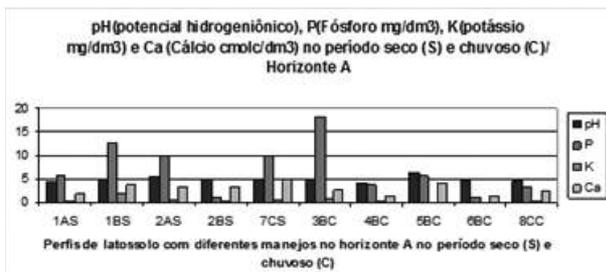
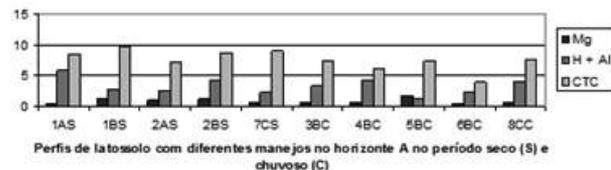
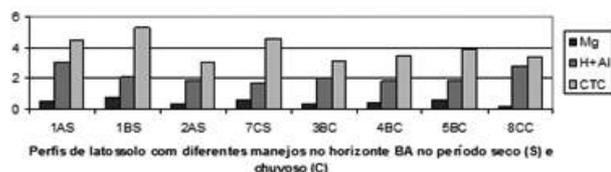


Figura 8. pH (potencial hidrogeniônico), P (Fósforo), K (Potássio) e Ca (Cálcio) no período Seco (S) e chuvoso (C) nos perfis de Latossolo Vermelho em cultivos de cana-de-açúcar sob diferentes manejos em Quirinópolis, Goiás.

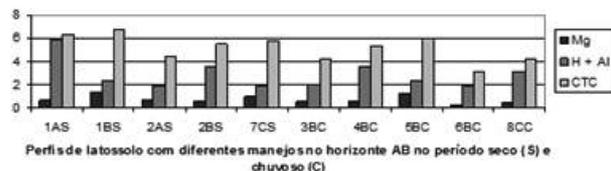
Mg (Magnésio cmol/dm³), H+Al (Acidez potencial do solo cmol/dm³), CTC (Capacidade de trocas de cátions cmol/dm³) no período Seco (S) e Chuvoso (C) /Horizonte A



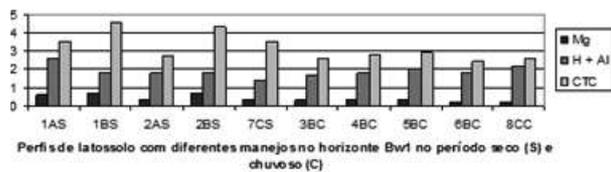
Mg (Magnésio cmol/dm³), H+Al (Acidez potencial do solo cmol/dm³), CTC (Capacidade de trocas de cátions cmol/dm³) no período Seco (S) e Chuvoso (C) /Horizonte BA



Mg (Magnésio cmol/dm³), H+Al (Acidez potencial do solo cmol/dm³), CTC (Capacidade de trocas de cátions cmol/dm³) no período Seco (S) e Chuvoso (C) /Horizonte AB



Mg (Magnésio cmol/dm³), H+Al (Acidez potencial do solo cmol/dm³), CTC (Capacidade de trocas de cátions cmol/dm³) no período Seco (S) e Chuvoso (C) /Horizonte Bw1



Mg (Magnésio cmol/dm³), H+Al (Acidez potencial do solo cmol/dm³), CTC (Capacidade de trocas de cátions cmol/dm³) no período Seco (S) e Chuvoso (C) /Horizonte Bw2

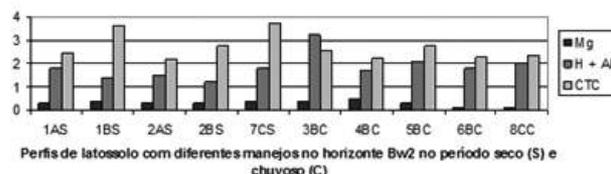


Figura 9. Mg (Magnésio), H+Al (Acidez potencial do solo), CTC (Capacidade de troca de cátions) no período Seco (S) e Chuvoso (C) nos perfis de Latossolo Vermelho em cultivos de cana-de-açúcar sob diferentes manejos em Quirinópolis, Goiás.



A biomassa microbiana foi identificada como um bioindicador sensível para a avaliação da qualidade do solo. Os perfis com sucessão de culturas no manejo anterior à cana mostraram melhor condição físico-química para o equilíbrio da biomassa do solo. Os perfis com vinhaça não apresentaram nenhuma melhoria para o desenvolvimento dos microrganismos no solo, tampouco melhores condições químicas (Figura 10 e 11).

O LVd apresentou melhores condições de desenvolvimento para os organismos edáficos do que o LVdf. A sucessão de culturas favoreceu o aumento da abundância de indivíduos e o aumento do número de colêmbolos. Porém, as áreas fertirrigadas com vinhaça apresentaram menor quantidade de fauna edáfica, que as demais, fato atribuído à modificação da estrutura do habitat e dos recursos alimentares. O perfil com uso anterior soja apresentou maior abundância de fauna edáfica (Figura 12).

Os córregos estudados, principalmente, nos trechos a jusante, onde há maior influência do tipo de uso, no caso o cultivo da cana-de-açúcar, apresentaram indícios de impactos negativos do uso agrícola relacionados. Nesse aspecto, traços de elementos utilizados nos manejos da cultura foram encontrados, com valores superiores nos resultados do nitrogênio, fosfatos, TDS, alcalinidade, oxigênio dissolvido e cloretos. Outro impacto de grande relevância foi a alta concentração de Ferro total, constatando, assim, o assoreamento nos mananciais (Figura 13).

Correlacionando os resultados, pode-se concluir que os usos anteriores, em particular a soja e a sucessão, tanto no LVdf, como no LVd contribuíram para a melhora das condições de qualidade dos solos e águas, bem como de suas biotas, do que a cana-de-açúcar. Mesmo assim, tais condições são muito distantes daquelas dos perfis de referência sob vegetação natural, logo os usos anteriores promoveram mudanças nas biotas, sobretudo, na abundância e biodiversidade, mas a cana não as recuperou, ao contrário, os ambientes apresentaram condições mais estressantes ao solo e à água. Os mananciais com cobertura vegetal nativa na mata ciliar foram aqueles com melhor qualidade da água e sem a influência direta do manejo.

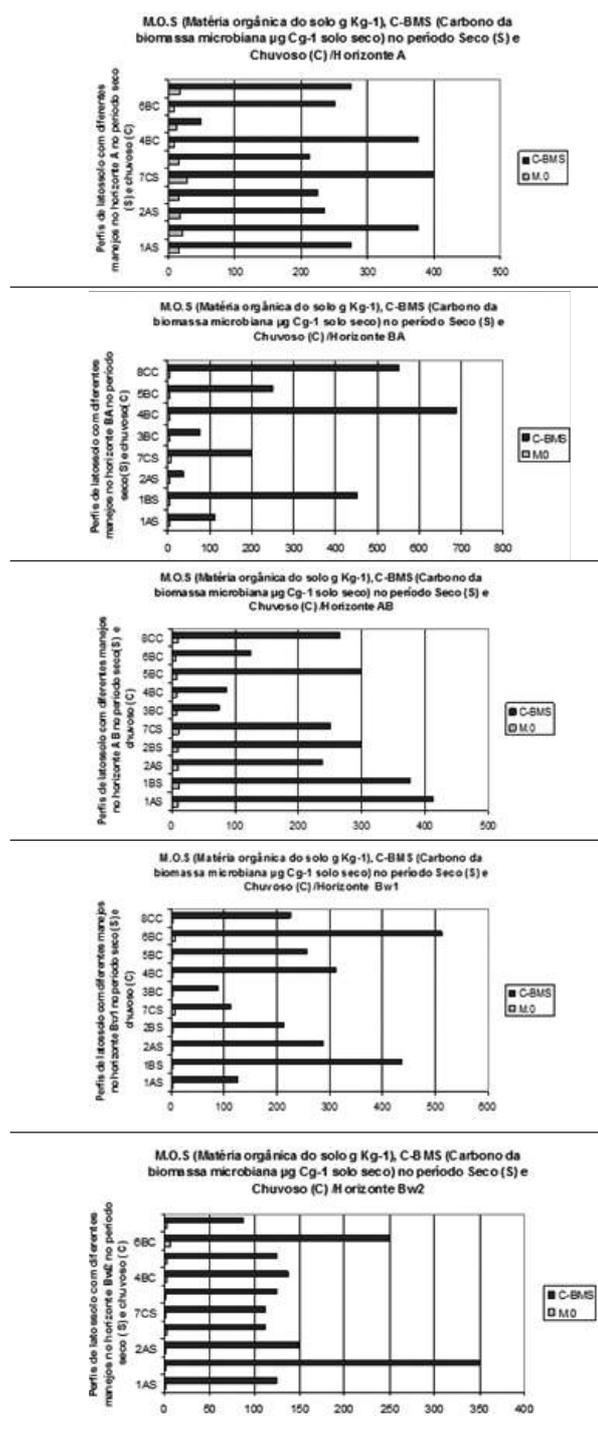


Figura 10. M.O.S (Matéria orgânica do solo), C-BMS (Carbono da biomassa microbiana) no período Seco (S) e Chuvoso (C) nos perfis de Latossolo Vermelho em cultivos de cana-de-açúcar sob diferentes manejos em Quirinópolis, Goiás

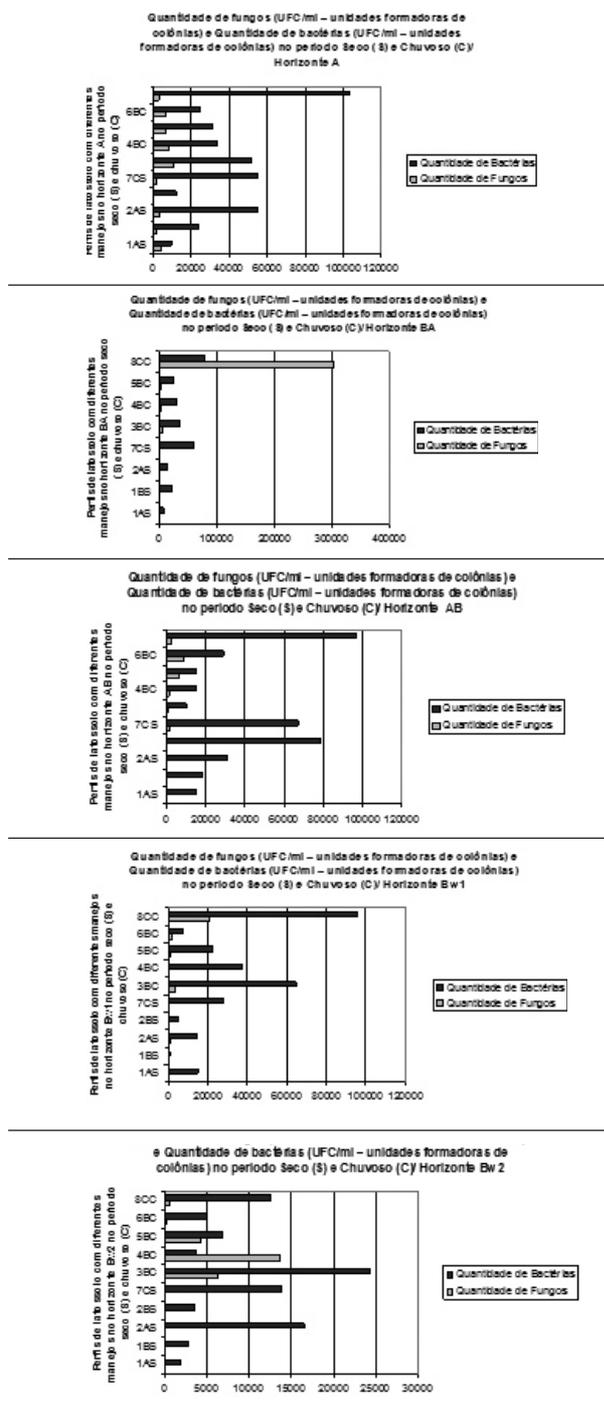


Figura 11. Quantidade de fungos (UFC/ml – unidades formadoras de colônias) e Quantidade de bactérias (UFC/ml – unidades formadoras de colônias) no período Seco (S) e Chuvoso (C) nos perfis de Latossolo Vermelho em cultivos de cana-de-açúcar sob diferentes manejos em Quirinópolis, Goiás.

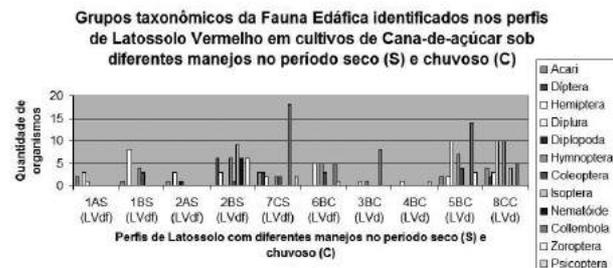


Figura 12. Fauna Edáfica do Latossolo Vermelho Distrófico (LVd) e Distrófico (LVdf) cultivado com cana-de-açúcar sob diferentes manejos, no período seco (S) e chuvoso (C) na MRQ, Goiás.

Conclusões

Considerando que a cultura de cana-de-açúcar deste estudo encontra-se no 4º corte e somente com uma aplicação de vinhaça conclui-se que os solos com manejo anteriores soja e sucessão apresentaram melhores condições para a melhora da qualidade do solo, em todos os aspectos, tanto físico-químicos, como da biota para microrganismos e fauna edáfica. A presença de palha no solo teve um efeito mais importante para a abundância de fauna edáfica, do que a vinhaça. Os solos com vinhaça não apresentaram melhoria e sim modificaram os parâmetros químicos do solo no horizonte A e apresentaram menor quantidade de fauna edáfica, em relação aos outros manejos. Os manejos anteriores com pasto apresentaram boas condições para a melhora da qualidade do solo nos horizontes Bw1 e Bw2. Em relação ao tipo de solo, o LVdf apresentou melhores condições físico-químicas para o equilíbrio dinâmico da biomassa e o LVd apresentou melhores condições de desenvolvimento para os organismos edáficos. Os córregos estudados apresentaram melhores condições na qualidade da água, a montante e a jusante apresentaram indícios de alterações no ecossistema. As altas concentrações de Fe, constatadas nos mananciais indicaram assoreamento e processo erosivo. Os tipos de manejo anteriores e atuais interferem ainda hoje na qualidade do solo e da água.



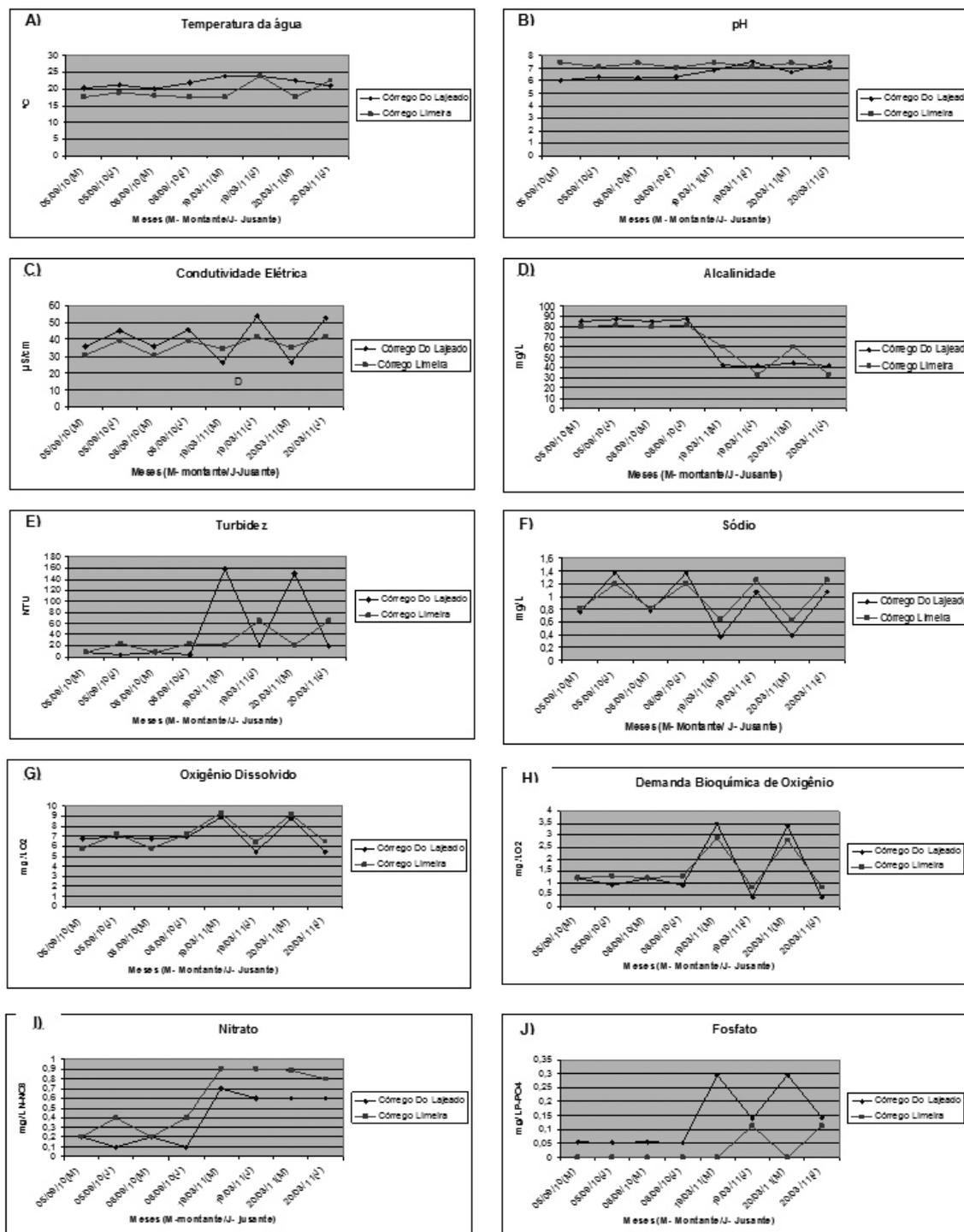


Figura 13. Parâmetros físico-químicos nos Córregos do Lajeado e Limeira no período de setembro de 2010 (período seco) e março de 2011 (período chuvoso): A: Temperatura da água; B: pH; C: Condutividade Elétrica; D: Alcalinidade; E: Turbidez; F: Sódio; G: Oxigênio Dissolvido; H: Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO); I: Nitrito; J: Fosfato.

Referências

- Schultz, N.; Lima, E.; Pereira, M. G.; Zonta, E. Efeito residual da adubação de cana planta e da adubação nitrogenada e potássica na cana-soca colhidas com e sem a queima de palhada. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, **2010**, v. 34, p. 811-820.
- Castro, S. S. de; Adbala, K.; Silva, A. A.; Borges, V. M. S. A expansão da cana-de-açúcar no Cerrado e no Estado de Goiás: elementos para uma análise espacial do processo. *Boletim Goiano de Geografia, Goiânia*, **2010**, v.30, nº 1. p. 171 – 191.
- Silva, A. A.; Castro, S. S. Dinâmica de uso da terra e expansão da cana-de-açúcar entre os anos de 2004 a 2010, na microrregião de Quirinópolis, Goiás. In: PIETRAFESA, J. P.; SILVA, S. D. de (org.). *Transformações no Cerrado: progresso, consumo e natureza*. Goiânia: Ed. Da PUC Goiás, **2011**, p. 155-170.
- Silva, A. A.; Castro S. S. Potencial e risco à compactação dos solos da microrregião de Quirinópolis, sudoeste do estado de Goiás. *Revista Territorial, Cidade de Goiás, Goiás*, **2013** v.2, n.1, p.106-127.
- CANASAT – Mapeamento da cana via imagens de satélite de observação da Terra. INPE-Instituto Espacial de Pesquisas Espaciais. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/canasat/>> Acesso em 17 abril. **2012**.
- Borges, V. M. S. Formação de uma nova centralidade do setor sucroenergético no Cerrado: o caso de Quirinópolis, Estado de Goiás. 2011. 333 f. Tese (Doutorado) Instituto de Estudos Socioambientais, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, **2011**.
- Santos, M. H. M. e C. A expansão canavieira em Goiás e seus reflexos: exemplo de Santa Helena de Goiás. 160 f. (Dissertação) Mestrado em Geografia Humana. Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo. São Paulo, **1987**.
- CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento de safra brasileira: cana-de-açúcar, primeiro levantamento, abril. Brasília: Conab, 2012. Disponível em: <www.conab.gov.br> Acesso em 24 abr. **2012**.
- Abdala, K.; Castro, S. S. de. Dinâmica do uso do solo da expansão sucroalcooleira na Microrregião Meia Ponte, Estado de Goiás, Brasil. In: *Seminário Latino-Americano de Geografia Física*, 6. 2010. Anais. Disponível em: [HTTP://www.uc.pt/fluc/cegot/VISLAGF/actas/tema3/klaus](http://www.uc.pt/fluc/cegot/VISLAGF/actas/tema3/klaus). Acesso em 02 jul. **2010**.
- Ferro, J. A.; Maccheroni, W.; Uilian, E. C. A importância da biotecnologia para o futuro da cana-de-açúcar. In: PINTO, A. S.; SCANDIUZZI, G. F. *Revista Protec: edição especial cana-de-açúcar*. Piracicaba. Facile, p. 35-38, **2009**.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE/SEPAN. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>> Acesso em: 24 nov. **2013**.
- Barbalho, M. G. da S.; Silva, A. A.; Castro, S. S. A expansão da área de cultivo da cana-de-açúcar na região Sul do estado de Goiás de 2001 a 2011. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*. São Paulo, **2013**, v. 29, p. 98-109.
- Mozambani, A. E.; Pinto, A.; Segato, S. V.; Mattiuz, C. F. M. História e morfologia da cana-de-açúcar. In: Segato, S. V.; Pinto, A.; Jendiroba, E.; Nóbrega, J. C. M. *Atualização em produção de cana-de-açúcar*. Piracicaba. CP 2, **2006**, 415 p.
- Segato, S. V.; Mattiuz, C. F. M.; Mozambani, A. E. Aspectos fenológicos da cana-de-açúcar. In: Segato, S. V.; Pinto, A.; Jendiroba, E.; Nóbrega, J. C. M. *Atualização em produção de cana-de-açúcar*. Piracicaba. CP 2, **2006**, 415 p.
- Jendiroba, E. A expansão da cana-de-açúcar e as questões ambientais. In: Segato, S. V.; Fernandes, C.; Pinto, A. *Expansão e renovação de canavial*. Piracicaba, CP 2, **2006**, 415 p.
- Junior, P. P. Bioindicadores de qualidade do solo em cultivos de cana-de-açúcar sob diferentes manejos. Dissertação (Mestrado – Agronomia) – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul – UEMS, 95 f., **2012**.
- Alexander, M. *Introduction to soil Microbiology*. New York: John Wiley, **1961**, 472 p.
- Feigin, A.; Ravina, I.; Shalhevet, J. *Irrigation with treated sewage effluent: management for environmental protection*. Berlin: Springer-Verlag, **1991**, 224p.
- Rossetto, A. J. Utilização agrônômica dos subprodutos e resíduos da indústria açucareira e alcooleira. In: Paranhos, S.B. (ed.). *Cana-de-açúcar: cultivo e utilização*. Campinas: Fundação Cargill, **1987**, v.2, p.435-504.
- Silva, A. S. M.; Nori, P. G.; Lino, C. B. Uso de vinhaça e impactos nas propriedades do solo e lençol freático. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, PB, **2007**, v.11, n.1, p.108-114.
- Lyra, M. R. C. C.; Rolim, M. M.; Silva, J. A. A Toposequência de solos fertirrigados com vinhaça: contribuição para a qualidade das águas do lençol freático. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, **2003**, v.7, n.3, p.525-532.
- Cunha, R. C. A.; Costa, A. C. S.; Maset Filho, B.; Casarini, D. C. P. Effects of irrigation with vinasse and dynamics of its constituents in the soil: I – physical and chemical aspects. *Water Science Technology*, **1981**, v.19, n.8, p.155-165.

23. Canellas, L. P.; Vellos A. C. X.; Marciano, C. R.; Ramalho, J. F. G. P.; Rumjanek, V. M.; Rezende, C. E.; Santos, G. A. Propriedades químicas de um cambissolo cultivado com cana-de-açúcar, com preservação do palhicho e adição de vinhaça por longo tempo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa*, **2003**, v. 27, p. 935-944.
24. Gonçalves, N. H. Manejo do solo para implantação da cana-de-açúcar. In: Segato, S. V.; Pinto, A.; Jendiroba, E.; Nobrega, J. C. M. Atualização em produção de cana-de-açúcar. Piracicaba, CP 2, **2006**, 415 p.
25. Nunes, R. S. Distribuição de fósforo no solo sob dois sistemas de cultivos e diferentes manejos da adubação fosfatada. 2010. 88 p. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília, Brasília - DF, **2010**.
26. Casalinho, H. D.; Martins, S. R.; Silva, J. B.; Lopes, A. S. Qualidade do solo como indicador de sustentabilidade de agroecossistemas. *Revista Brasileira de Agrociência*. 2007, v. 13, p.195-203.
27. Staben, M. L.; Bezdicek, D. F.; Smith, J. L.; Fauci, M. F. Assentment of soil quality in conservation reserve program and wheat -fallow soils. *Soil Science Society of America Journal* v. 61, 1997, p. 124-130.
28. Franchini, J. C.; Crispino, C. C.; souza, R. A.; Torres, E.; Hungria, M. Microbiological parameters as indicators of soil quality under various soil management and crop rotation systems in southern Brazil. *Soil Tillage Research*, 2007, v. 92, p.18-29.
29. Doran, J. W.; Sarrantonio, M.; Liebig, M. A. Soil health and sustainability. *Advances in Agronomy*, 1996, v. 56, p. 1-54.
30. Vezzani, F. Qualidade do sistema solo na produção agrícola. Porto Alegre: UFRGS, 2001. 184 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo). Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.
31. Mendes, I. C.; Hungria, M.; Rei-Junior, F. B.; Fernandes, M. F.; Chaer, G. M.; Mercante, F. M.; Zilli, J. E. Bioindicadores para avaliação da qualidade dos solos tropicais: utopia ou realidade? Planaltina-DF: Embrapa Cerrados, 2009. 31p. (Documentos, 246).
32. Stenberg, B. Monitoring soil quality of arable land: microbiological indicators. *Soil and Plant Science*, 1999, v. 49, p. 1-24.
33. Tótola, M. R.; Chaer, G. M. Microrganismos e processos microbiológicos como indicadores da qualidade dos solos. In: Venegas, V. H. A., Schaefer, C. E. G. R., Barros, N. F., Mello, J. W. V., Costa, L. M. (Eds.). *Tópicos em ciência do solo. v. II (2002) – Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo*, 2002, P. 195-276.
34. Arshad, M. A. Coen, G. M. Characterization of soil quality Physical and chemical criteria. *American Journal of Alternative Agriculture Cambridge*, v. 7, n. 1 e 2, p. 25-31, 1992.
35. Goedert, W.; Oliveira, S. A. Fertilidade do solo e sustentabilidade da atividade agrícola In Novas, R. F. Alvarez, V. H.; Barros, N. F.; Fontes, R. L. F. Cantarutti, R. B.; Neves, J. C. L. Fertilidade do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007, p. 991-1017.
36. Carneiro, M. A.; Souza, E. D.; Reis, E. F.; Pereira, H. S.; Azevedo, W. R. Atributos físicos, químicos e biológicos de solo de Cerrado sob diferentes sistemas de uso e manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa*, 2009, v. 33, n.1, p. 147-157.
37. Melloni, R.; Melloni, E. G. P; Alvarenga, M. I. N.; Vieira, F. B. M. Avaliação da qualidade de solos sob diferentes coberturas florestais e de pastagem no sul de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa*, 2008, v. 32, n. 6, p. 2461-2470.
38. Mesquita, H. A.; Paula, M. B.; Alvarenga, M. I. N. Indicadores de impactos das atividades agropecuárias. *Informe agropecuário, Belo Horizonte*, 2000, v. 21, n. 202, p. 57-62, 70-71.
39. Lebauer, D. S.; Treseder, K. K. Nitrogen limitation of net primary productivity in terrestrial ecosystems is globally distributed. *Ecology*, Washington, 2008, v. 89, n. 2, p. 371-379.
40. Ernani, P. R. Notas sobre química do solo. Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC. 2001. 50 p.
41. Cuevas, E.; Medina, E. Nutrient dynamics within Amazonian forests. II. Fine root growth, nutrient availability and leaf litter decomposition. *Oecologia*, Berlin, 1988, v. 76, n. 2, p. 222-35.
42. Kaspari, M.; Wright, J.; Yavitti, J.; Harms, K.; Garcia, M.; Santana, M. Multiple nutrients limit litterfall and decomposition in a tropical forest. *Ecology Letters*, Oxford, 2008, v.11, n.1, p.35-43.
43. Araujo, A. S. F.; Monteiro, R. T. R. Indicadores biológicos de qualidade do solo. *Bioscience Journal*, 2007, v. 23, p. 66-75.
44. Powson, D. S.; Brookes, P. C.; Christensen, B. T. Measurement of soil microbial biomass provides an early indication of changes in total organic matter due to straw incorporation. *Soil Biology and Biochemistry*, 1987, v. 19, p. 159-164.
45. Balota, E. L.; collozi-Filho, A.; Andrade, D. S.; Hungria, M. Biomassa microbiana e sua atividade em solos sob diferentes sistemas de preparo de sucessão de culturas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 1998, v. 22, p. 641-649.
46. Roscoe, R.; Mercante, F. M.; Mendes, I. C.; Reis Junior,



- F. B.; Santos, J. C. F.; Hungria, M. Biomassa microbiana do solo: fração mais ativa da matéria orgânica. In: ROSCOE, R.; Mercante, F. M.; Salton, J. C. (Ed.). *Dinâmica da matéria orgânica do solo em sistemas conservacionistas: modelagem matemática e métodos auxiliares*. Dourados, Embrapa Agropecuária Oeste, 2006, p. 163-198.
47. Mercante F. M.; Silva, R. F.; Francelino, C. S. F.; Cavaleiro, J. C. T.; Otsubo, A. A. Biomassa microbiana em um Argissolo Vermelho, em diferentes coberturas vegetais, em área cultivada com mandioca. *Acta Scientiarum Agronomy*, 2008, v. 34, p.479-485.
48. Barbosa, L. A. Impacto de sistemas de cultivo orgânico e convencional da cana-de-açúcar, nos atributos do solo. 2010. 93p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade de Brasília, Brasília – DF, 2010.
49. Mielniczuk, J.; Bayer, C.; Vezzani, F. M.; Lovato, T. Fernandes, F. F.; Debarba, L. Manejo de solo e culturas e sua relação com os estoques de carbono e nitrogênio do solo. In: *Tópicos e ciência do solo*. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003, v. 3, p. 209-248.
50. Gama-Rodrigues, E. F. Biomassa microbiana e ciclagem de nutrientes. In: Santos, G. A.; Camargo, F. A. O. (Ed.). *Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais*. Porto Alegre: Gênese, 1999. p. 227-243.
51. Jenkinson, E. S.; Ladd, J. N. Microbial biomass in soil measurement and turnover. In: Paul, E. A.; Ladd, J. N. (Ed.). *Soil Biochemochemistry*. New York: Marcel Dekker, 1981. v. 5, p. 415-471. (Books in Soil and the Environment).
52. Gama-Rodrigues, E. F.; Gama-Rodrigues, A. C. Atributos químicos e microbianos de solos sob diferentes coberturas vegetais no norte do estado do Rio de Janeiro. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 2008, v. 32, p. 1521-1530.
53. Reis Junior, F. B.; Mendes, I. C. Biomassa microbiana do solo. Embrapa Cerrados. Planaltina – DF. 2007. Documentos. 40 p.
54. Coelho, D. G.; Santos, T. M. C.; Albuquerque, L. S.; Campos, V. B. C.V; Prazeres, S. S. Quantificação de fungos celulolíticos em solos de três ecossistemas. *Revista Verde (Mossoró – RN – Brasil)*, 2008, v.1, n.3, p.45-49.
55. Ruegger, M. J. S.; Tauk-Tornisielo, S. M. Atividade da celulase de fungos isolados do solo da Estação Ecológica de Juréia-Itatins, São Paulo, Brasil. *Revista Brasileira de Botânica, São Paulo*, 2004, v. 27, n. 2, p. 205-211.
56. Arias, M. E.; González-Perez, J. A.; González-Vila, F. J.; Ball, A. S. Soil health – a new challenge for microbiologists and chemists. *International Microbiology*, 2005 V.8, p. 13-21.
57. Swift, M. J.; Heal, O. W.; Anderson, J. M. *Decomposition in Terrestrial Ecosystems*. University of California Press, Berkeley, 1979.
58. Lavelle, P. Diversity of soil fauna and ecosystem function. *Biology International*, 1996, v. 33, p. 3-16.
59. Baretta, D.; Santos, J. C. P.; Bertol, I; Alves, M. V.; Manfoi, A.F; Baretta, C. R. D. M. Efeito do cultivo do solo sobre a diversidade da fauna edáfica no Planalto Sul Catarinense. *Revista de Ciências Agroveterinárias, Lages*, 2006, v.5, n.2, p. 108-117.
60. Aquino, A. M.; Assis, R. L. Processos Biológicos no Sistema Solo-Planta. Brasília: EMBRAPA, 2005, 368 p.
61. Bayer, C.; Mielniczuk, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: Santos, G. A; Silva, L. S.; Canellas, L. P.; Camargo, F. A. O. (Ed.). *Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais*. 2. ed. ver. E atual. Porto Alegre: Metrópole, 2008, cap. 2, p. 7-18.
62. Santos, J. L. S. Qualidade do solo após implantação do sistema integração lavoura-pecuária em pastagem degradada no cerrado. 2009. 130 f. Dissertação (Mestrado em agronomia) – Universidade Federal de Goiás – Escola de Agronomia, Goiânia, GO, 2009.
63. Silva, J. E.; Resck, D. V. S. Matéria orgânica do solo. In: Vargas, M. A. T.; Hungria, M. *Biologia dos solos dos cerrados*. 1 ed. Planaltina: Embrapa, 1997, p. 467-517.
64. INSTITUTO DE PLANEJAMENTO E ECONOMIA AGRÍCOLA DE SANTA CATATINA. Avaliação do projeto microbacias I: monitoramento da qualidade da água Relatório de Avaliação Final. Florianópolis: ICEPA, outubro de 1999.
65. Bertoni, J.; Lombardini Neto, F. Conservação do Solo. Piracicaba: Livroceres, 1985.
66. Faria, A. P.; Marques, J. S. “o desaparecimento de pequenos rios brasileiros”. 1999, 146(25) 56-61. *Ciência Hoje*
67. Karr, J. R.; Schlosser, I. J. Water resources and the land-water interface. *Science*, 1978, v. 201, p. 229-234.
68. Schlosser, I. J. Stream fish ecology: a landscape perspective: *Bioscience*, 1991, v. 4, p. 704-712.
69. Gregory, S. V.; Swanson, F. J.; Mickee, W. A.; Cummins, K. W. An ecosystem perspective of riparian zones: focus on links between land water. *Bioscience*, 1991 v. 41, p. 540-551.
70. Sweeney, B. W. Streamside forest and the physical, chemical, and trophic characteristics of Piedmont streams in eastern North America. *Water Science and Technology*, 1992, v. 26, p. 2653-2673.
71. Wallace, J. B.; Eggert, S. L.; Meyer, J. L.; Webster, J. R. Multiple trophic levels of a forest stream linked to

- terrestrial litter inputs. *Science*, **1997**, v. 277, p. 102-104.
72. Von Sperling, M. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 3^o ed. Belo Horizonte: UFMG, **2005**, v. 1. 452 p.
73. Pedroza, A. O. R. M.; Carvalho, E. M.; Monteiro, P. L. A. Aspectos físico-químicos e microbiológicos do córrego Estiva em Rio Brilhante, MS. *Revista InterBio*, Dourados, Mato Grosso do Sul, **2009**, v.3 n.1.
74. Abron, L. A.; Corbitt, R. A. Air and water quality standards. In: Corbitt, R. A. *Standard Handbook of Environmental Engineering*. 2 ed., McGraw-Hill, **1999**, p. 3.1-3.33.
75. Corbi, J. J. Influência de práticas de manejo de solo sobre os macroinvertebrados aquáticos de córregos: ênfase para o cultivo de cana-de-açúcar em áreas adjacentes. 2006. 92 f. Tese (Doutorado – Programa de Pós-graduação em Ecologia e Recursos Naturais) – Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, **2006**.
76. Macedo, I. C. (org.). Doze estudos sobre a agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil e sua sustentabilidade. São Paulo: Berlendis; Vertecchia: ÚNICA - União da Agroindústria Canavieira do Estado de São Paulo, **2005**, 200 p.
77. Nery, M. S. Desempenho operacional e econômico de uma colhedora em cana crua. 108 p. Dissertação (Mestrado). ESALQ, Piracicaba – SP. **2000**.
78. COOPERCITRUS INFORMATIVO AGROPECUÁRIO. A responsabilidade do setor agrícola na preservação da água. Ano XIV – n° 164, p. 16 – junho de **2000**.
79. Oliveira, R. M. S.; Tornisielo, V. L. Determinação de resíduos organoclorados no leite bovino na bacia do Cerveiro, Piracicaba, SP. In: VI Encontro de Ecotoxicologia, **2000**, p. 95.
80. Santos, A. Distribuição de metais no reservatório de captação de água superficial Anhumas Américo Brasileiro – SP. USP. **1999**. 147 p. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo.
81. Richards, C.; Johnson, L. B.; Host, G. E. Landscape-scale influences on stream habitats and biota. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* **1996**, p. 295-311.
82. MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Produção e Agroenergia. Departamento da Cana-de-açúcar e Agroenergia. Relação das Unidades Produtoras Cadastradas no Departamento da Cana-de-açúcar e Agroecologia. Posição 22/07/2009. Disponível em <http://www.agricultura.gov.br> Acesso em 20 de dez. **2012**.
83. Köppen, W. Klassifikationen des klimate nach temperatur, niederschlag und jahrelauf. *Petermans Geographische Mitteilugem*, Goth, **1918**, v. 64, p. 193-203.
84. AGRITEMPO – Sistema de Monitoramento Agroecológico. Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. Disponível em: <<http://www.agritempo.gov.br>> Acesso em 13 mai. **2012**.
85. Oliveira, A. L. R. de. Riscos climáticos e fator de resposta das culturas da cana-de-açúcar e do trigo para o Estado de Goiás e o Distrito Federal. 2006. 168 f. Tese (Doutorado em Agronomia). Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Escola de Agronomia da Universidade Federal de Goiás. Goiânia, **2006**.
86. Novaes, A. S. S. Amaral Filho, Z. P.; Vieira, P. C.; Fraga, A. G. C. Levantamento Exploratório dos Solos. In: Projeto RADAMBRASIL, Folha SE. 22, Goiânia. Rio de Janeiro: **1983**.
87. EMBRAPA. Sistema Brasileiro de Classificação de solos. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. 2ª edição. Rio de Janeiro: EMBRAPA, **2006**, 306 p.
88. Souza Junior, J. J. Mapa de Geologia. In: Projeto RADAMBRASIL. Levantamento de Recursos Naturais, 31. Folha SE. 22. Rio de Janeiro: **1983**.
89. World Wildlife Fund (WWF). Expansão agrícola e perda da biodiversidade no Cerrado: origens históricas e o papel do comércio internacional. Brasília, DF: WWF. Brasil, **2000**.
90. World Wildlife Fund (WWF). Análise da expansão do complexo agroindustrial canavieiro no Brasil: Documento aberto para consulta pública. Coordenação Técnica: Luiz Fernando Laranja da Fonseca; Ilan Kruglianskas. Brasília: WWF Brasil, **2008**.
91. DBO ENGENHARIA. Estudo de Impacto Ambiental para instalação da Usina São Francisco de Açúcar e Álcool S/A. Rov. GO-206, km 18 Fazenda São Francisco, Quirinópolis, Goiás, **2004**, 350 p.
92. Santos, R. D. do; Lemos, R. C. de; Santos, H. G. dos; Ker, J. C.; Anjos, L. H. C. dos. Manual de descrição e coleta de solo no campo. EMBRAPA. 5ª Ed. Viçosa, **2005**, 120 p.
93. Castro, S. S.; Cooper, M.; Santos, M. C. P. Vidal Torrado. Micromorfologia do solo: Bases e Aplicações. Tópicos de Ciências do Solo, c. 3. **2003**, p.107-164.
94. Antonioli, Z. I; Conceição, P.C; Bock, V; Port, O; Silva, D. M; Silva, R. F. Método Alternativo para Estudar a Fauna do Solo. *Ciência Florestal*, Santa Maria, **2006**, v.16, n.4, p. 407-417.
95. Filizola, H. F.; Gomes, M. A. F.; Souza, M. D. Manual de Procedimentos de Coleta de Amostras em Áreas Agrícolas para Análise da Qualidade Ambiental: Solo, Água e Sedimentos. Jaguariúna-SP: EMBRAPA Meio Ambiente, **2006**, 169 p.
96. Filho, G. N. S.; Oliveira, V. L. Microbiologia: Manual de aulas práticas. Florianópolis-SC: Editora UFSC, **2007**, 80 p.



R. S. Sant'Ana^{1,2 *} & Selma S. Castro³

¹Faculdade de Tecnologia SENAI Roberto Mange, 75113-630, Anápolis-GO, Brasil.

²Jardim Botânico de Goiânia (AMMA), 74820-030, Goiânia-GO, Brasil.

³Instituto de Estudos Socioambientais (IESA), Universidade Federal de Goiás, Campus Samambaia, 74001-970, Goiânia-GO, Brasil.

*E-mail: grssantana@gmail.com



Otimização de Processos de Extração de Princípios Ativos de Plantas

Gerlon A. R. Oliveira

Algumas atividades biológicas associadas a plantas devem-se a grupos específicos de constituintes químicos, os princípios ativos. A extração desses compostos pode ser feita por diferentes métodos, e cada método possui variáveis de processo que podem influenciar na extração. Por isso, é necessário estabelecer as condições experimentais que possibilitem uma extração seletiva e com boa recuperação dos compostos de interesse. O delineamento experimental é uma abordagem eficiente para o planejamento dos experimentos de otimização dos processos extrativos. Neste trabalho, as principais etapas para se realizar a otimização de processos extrativos de princípios ativos de plantas são apresentadas.

Palavras-chave: *extração; plantas; otimização.*

Some biological activities associated with plants are due to specific groups of chemical constituents, the bioactive compounds. The extraction of these compounds can be performed by several methods, and every method has process variables that may influence the extraction. It is therefore necessary to establish the experimental conditions that allow a selective extraction and with good recovery of the compounds of interest. The experimental design is an efficient approach for planning optimization experiments of extractive processes. In this paper, the main steps to perform the optimization of extractive processes of plant bioactive compounds are presented.

Keywords: *extraction; extraction; plants; optimization.*

Introdução

O homem sempre se valeu das plantas para suprimento de suas necessidades, como a alimentação e a busca da saúde física e mental. O relato de efeitos indesejados de compostos sintéticos, e a restrição ao seu uso têm aumentado a demanda por derivados de plantas com propriedades curadoras ou de manutenção da saúde^{1,2}. A utilização de compostos provenientes de plantas, consumidas há séculos pelo homem, é vista como mais segura pela população, o que justifica o grande interesse atual da comunidade científica por estudos sobre produtos derivados de plantas.

O uso de plantas *in natura* ou em pó tem algumas restrições, principalmente, ligadas à variabilidade natural delas mesmas e à baixa concentração dos compostos responsáveis pela atividade desejada. A alternativa para contornar essas dificuldades consiste em submeter a planta a processos extrativos, os quais visam separar os constituintes de interesse do restante da matriz. O produto obtido, chamado de extrato, geralmente tem maior concentração de princípios ativos, maior aplicabilidade e, portanto, maior valor agregado que a matéria-prima. O problema da baixa reprodutibilidade também é contornado, pois os extratos obtidos de diferentes lotes de matérias-primas podem ser misturados, ou, ainda, diferentes quantidades de adjuvantes podem ser adicionadas a cada lote, visando obter um extrato com concentrações padronizadas dos compostos de interesse.

Ao longo do tempo, vários métodos de extração têm sido propostos^{3,4}. De uma forma geral, a matéria-prima pré-processada é colocada em contato com um solvente durante um período de tempo em que o solvente extrai os constituintes de interesse e, em seguida, separa-se o extrato da parte da matriz vegetal que permaneceu insolúvel. O extrato, então, pode ser utilizado tal como obtido, como é o caso de chás e tinturas, ou pode ser concentrado e/ou seco⁵. Os métodos extrativos diferem uns dos outros sob vários aspectos, como o tipo de solvente utilizado (p. ex. líquidos ou fluidos supercríticos), as condições de temperatura e pressão, o tipo de agitação (p. ex. mecânica ou por ondas de ultrassom ou micro-ondas), entre outros.

A escolha do método a ser utilizado baseia-se na disponibilidade do sistema extrativo, nos custos

de instalação e operação, e em questões ambientais, como a geração de resíduos, as quais se revelam mais importantes a cada dia. A escolha também depende das características que se deseja para o produto final, como a pureza do extrato ou sua compatibilidade com a matriz onde ele será adicionado.

Uma vez escolhidos os métodos de extração, há ainda que se estabelecer as condições operacionais deles. Para cada método, uma série de variáveis influencia nos custos do processo e nas características do produto final. A escolha de condições de extração inadequadas pode ocasionar baixa recuperação dos compostos de interesse e alta recuperação de constituintes indesejáveis da matriz, além de prejudicar o processo nos âmbitos econômicos e ambientais. Por isso, os processos tecnológicos de obtenção de extratos devem ser planejados e otimizados para que se estabeleçam as condições experimentais que melhor atendam aos interesses da indústria.

Otimização de Processos

O *design* de experimentos, ou delineamento experimental, é um procedimento estatístico eficiente para o planejamento de experimentos. Os dados obtidos permitem que se obtenham conclusões objetivas e válidas sobre a relação entre as variáveis dependentes e as independentes. O *design* experimental define quais serão os experimentos realizados. Uma ou mais variáveis do processo (ou fatores) são deliberadamente alteradas em cada experimento, e uma ou mais respostas são medidas. Após a realização dos experimentos, faz-se o tratamento matemático para se conhecer o efeito que a alteração das variáveis independentes produz sobre as respostas. *Designs* experimentais bem escolhidos permitem que se extraia grande quantidade de informação sobre o processo, a partir de reduzido número de experimentos⁶.

A prática de se variar um fator de cada vez pode produzir resultados enganosos, caso haja interação entre o efeito dos fatores. Por exemplo, em uma extração, usando-se essa abordagem, o experimentador poderia concluir que um tempo de extração elevado é necessário para se extrair os constituintes de interesse. Em seguida, por outros experimentos, ele concluiria que uma temperatura elevada é necessária. Juntando as duas informações, ele concluiria que o processo mais adequado seria realizado



em alta temperatura e por um tempo elevado. Entretanto, pode haver interação entre esses dois fatores, de modo que se o tempo for elevado, a temperatura pode ser baixa, ou, se a temperatura for elevada, o tempo pode ser baixo. Os *designs* experimentais propõem experimentos com alterações simultâneas dos fatores.

A obtenção de resultados satisfatórios, a partir de *designs* experimentais, envolve os seguintes passos⁶:

1. Estabelecimento das respostas a serem otimizadas;
2. Escolha das variáveis independentes a serem avaliadas;
3. Escolha de um *design* experimental;
4. Execução do *design* experimental;
5. Avaliação dos dados;
6. Análise e interpretação dos resultados;
7. Uso do modelo.

Essas etapas podem ser implementadas para vários tipos de processos, inclusive para a extração de princípios ativos de plantas.

Respostas Otimizadas nos Processos Extrativos

O processo de otimização visa melhorar as características do produto ou do processo e, portanto, métodos para quantificar essas características imprescindíveis. É preciso muita clareza na definição de quais sejam os interesses que se têm em vista ao se propor a otimização de um processo extrativo. Os sistemas extrativos são avaliados por meio de respostas quantitativas, que dão indícios da qualidade do extrato, e da eficiência da extração.

O rendimento total da extração é um parâmetro frequentemente utilizado na avaliação da eficiência dos processos extrativos^{7,8}. Ele representa a relação entre a massa de extrato obtida e a massa de matéria-prima utilizada, e é calculado mediante um procedimento de perda por dessecação. Alto rendimento significa que maior quantidade de produto é obtida e, portanto, há expectativa de ganho comercial. É preciso considerar, contudo, que essa resposta não pode ser utilizada sozinha, uma vez que um alto rendimento não é indício de alta qualidade se os constituintes extraídos não são

os responsáveis pela atividade atribuída à planta.

A concentração dos princípios ativos, utilizados como marcadores químicos, é seguramente o índice mais representativo da qualidade dos extratos, e do quanto o processo extrativo foi adequado. Por isso, os extratos de uso mais difundido no mundo todo, inclusive os relatados nas farmacopeias de maior alcance, são rotulados pelos teores de princípios ativos.

Na otimização dos processos extrativos, a concentração deve ser medida em base seca, caso contrário, os extratos obtidos utilizando-se menor razão líquido/sólido, levarão vantagem, pois uma maior quantidade de matéria-prima por unidade de volume foi submetida à extração. Portanto, um procedimento de perda por dessecação deve ser conduzido paralelamente, para que se possa estimar o rendimento da extração. De posse desse resultado, e da concentração dos marcadores no extrato líquido, é possível calcular a concentração dos marcadores no extrato, em base seca.

A concentração dos marcadores no extrato, em base seca, indica a qualidade do extrato. Em base úmida, indica a quantidade extraída da planta, ou seja, a recuperação do processo extrativo. Essa concentração também é função da qualidade da matéria-prima. Por mais que o processo extrativo seja adequado, ele é incapaz de extrair grandes quantidades de princípios ativos de uma matéria-prima pobre nesses constituintes. Um indicativo melhor da recuperação do processo extrativo é a concentração dos marcadores em relação à massa da matéria-prima utilizada.

Algumas vezes, não se tem clareza sobre quais são os constituintes químicos responsáveis pela atividade de alguma planta. Nesses casos, a resposta mais adequada é obtida testando-se o extrato obtido quanto à atividade pretendida. Essa abordagem também é útil quando a atividade se dá por mecanismos sinérgicos, em que vários constituintes contribuem para a ação pretendida, e seja difícil a quantificação de todos eles. Extratos a serem utilizados como antioxidantes geralmente são avaliados quanto a respostas ligadas à atividade antioxidante, como o conteúdo de fenóis e flavonoides, a atividade sequestradora de radicais livres, a capacidade de inibir a peroxidação lipídica, etc.^{9,10} Enfim, devem-se buscar respostas que deem bons indicativos sobre a qualidade do processo extrativo e do produto obtido.

Variáveis Independentes que Influenciam nos Processos Extrativos

Por melhor que seja o processo extrativo, seu sucesso está sempre condicionado à qualidade da matéria-prima. Os métodos de obtenção e pré-processamento da matéria-prima vegetal devem ser criteriosamente avaliados. A concentração dos marcadores pode variar em função de fatores genéticos, ambientais e sazonais¹¹, o que justifica cuidado na escolha dos fornecedores da matéria-prima. O pré-processamento da planta inclui operações como pré-lavagem, secagem, e moagem¹².

A secagem geralmente se dá em temperaturas elevadas, o que pode propiciar a degradação de substâncias termolábeis¹³ e a perda de substâncias voláteis. O controle da moagem é uma etapa crucial, pois o tamanho das partículas do pó tem forte influência no processo extrativo. A menos que ocorra aglomeração do pó durante o processo extrativo, a extração é favorecida com pós mais finos, pois a superfície de contato exposta à ação do solvente é maior¹⁴. Entretanto, a moagem acarreta custos ao processo e, portanto, é importante que se conheça o tamanho de partícula que não prejudique o processo extrativo, mas que também não onere o processo sem necessidade. A moagem também favorece a perda de constituintes termolábeis e voláteis. Após o pré-processamento e antes de ser submetida à extração, a matéria-prima fica estocada. As condições de estocagem também influenciam na concentração dos marcadores¹³, e devem ser estabelecidas apropriadamente.

A importância do tipo de solvente utilizado como líquido extrator é evidente, uma vez que a solubilidade, tanto dos constituintes desejáveis, quanto dos indesejáveis, é função da constante dielétrica do solvente. O desafio é encontrar um solvente, ou uma mistura de solventes, capaz de extrair, do modo mais seletivo possível, os constituintes de interesse. Outros fatores devem ser levados em conta, como a toxicidade aos técnicos das indústrias e aos consumidores, a segurança do descarte, sua disponibilidade nas quantidades necessárias, e o custo¹⁵. Nas extrações sólido-líquido, a preferência pelas misturas etanol-água deve-se às vantagens ambientais, econômicas, e de segurança. Outra vantagem é que,

dependendo da concentração alcoólica da mistura, podem-se extrair constituintes de maior ou menor polaridade. Além do tipo de solvente utilizado, o pH do meio é outro fator que altera o equilíbrio da extração⁹. Nos sistemas que utilizam fluidos supercríticos, a proporção dos solventes modificadores tem grande influência nos processos extrativos⁴.

O tempo de extração é um fator de grande importância nos processos extrativos. Tempos muito baixos podem ser insuficientes para permitir ao solvente extrair os compostos de interesse, enquanto que tempos muito longos podem favorecer a degradação desses ou a extração de constituintes indesejáveis, ou simplesmente representam um desperdício. O tempo de extração pode variar de poucos minutos até várias horas, ou dias inteiros¹⁶, dependendo do método extrativo e das características da matéria-prima.

A temperatura também altera o equilíbrio da extração. Temperaturas mais altas geralmente favorecem a solubilização dos constituintes. Contudo, há que se avaliar se a temperatura também não está aumentando a solubilização dos constituintes indesejados, e se os compostos de interesse não se degradam a temperaturas elevadas. O uso de solventes orgânicos de baixo ponto de ebulição em temperaturas elevadas apresenta riscos. Além disso, é preciso avaliar o impacto financeiro do aquecimento de grandes volumes de líquidos, e da instalação de sistemas de aquecimento e isolamento térmico. Portanto, o uso de temperaturas elevadas, nos processos industriais de extração, somente é justificado por grandes vantagens no processo extrativo.

A razão entre o volume de líquido extrator e a massa de sólidos da matéria-prima tem sido relatada como um fator de grande influência nas extrações^{9,17}. Razões elevadas, geralmente, facilitam a extração, pois aumentam a solubilidade dos constituintes da planta. Por outro lado, o extrato obtido será mais diluído, o que torna o processo de concentração e secagem mais caro. Além disso, altos volumes de solvente favorecem a extração de todos os constituintes da planta, e não somente dos de interesse, o que pode originar um extrato menos concentrado. O ideal é estabelecer o menor volume de solvente capaz de extrair os constituintes de interesse, do modo mais seletivo possível.



Existem variáveis peculiares aos diferentes sistemas de extração, as quais influenciam no processo extrativo. As extrações por ultrassom ou por micro-ondas, por exemplo, são influenciadas pela potência da radiação emitida^{18,19}, e a extração por fluido supercrítico é influenciada pela taxa de fluxo do fluido e pela pressão do sistema²⁰. É preciso estudar o impacto de cada etapa com potencial influência no processo extrativo, para se determinarem as variáveis influentes.

Uma vez que já se tenham definido as respostas que se deseja avaliar (variáveis dependentes), e as variáveis com potencial influência no processo extrativo (variáveis independentes), o objetivo da otimização é encontrar as condições em que as variáveis independentes devem ser configuradas para que as variáveis dependentes apresentem os resultados mais apropriados. Isso é feito de modo empírico, pois o efeito das variáveis independentes sobre as respostas é complexo demais para ser determinado com precisão apenas pela teoria.

Designs Experimentais Utilizados para Avaliação de Processos Extrativos

De acordo com o objetivo que se tem em vista, diferentes *designs* experimentais podem ser escolhidos. Quando não se sabe quais são as variáveis importantes no processo extrativo, recorre-se a um experimento de triagem. Se o experimentador suspeita que um número de variáveis menor que cinco é importante, recomenda-se a utilização de experimentos fatoriais completos ou fracionários. Para a verificação prévia de um número de variáveis igual ou superior a cinco, recomendam-se experimentos fatoriais fracionários ou o *design* de Plackett-Burman⁶. Esses *designs* permitem avaliar muitas variáveis mediante poucos experimentos. Anastácio e Carvalho, por exemplo, avaliaram a influência de nove variáveis mediante doze experimentos e concluíram que apenas duas delas influenciavam na extração de compostos fenólicos da casca de batata²¹.

A avaliação de um número alto de variáveis por meio de poucos experimentos, obviamente, tem suas limitações. Experimentos dessa natureza dão informações

apenas suficientes para se determinar se uma variável é ou não importante. Não é possível chegar-se a um valor ótimo para as respostas, utilizando esses experimentos, exceto por um acaso.

O número de variáveis importantes nos processos extrativos não é tão alto, e é possível determiná-las previamente, pelo conhecimento do processo. Em caso de dúvidas, um planejamento de triagem pode ser realizado, ao final do qual geralmente se constata que o número de variáveis importantes é reduzido. Essas variáveis, então, são estudadas em um novo planejamento experimental. Além disso, por questões de ordem prática, algumas variáveis, ainda que reconhecidamente importantes, não são avaliadas. Por exemplo, para evitar o aumento de custos de produção, ou por questões de segurança, pode-se escolher extrair à temperatura ambiente, e não avaliar o efeito da temperatura, embora se saiba que ele é, provavelmente, relevante. Por isso, grande parte dos estudos sobre otimização de extrações avalia o efeito de, no máximo, quatro variáveis independentes^{7,10,18,22}.

A otimização de um processo com um número igual ou inferior a quatro variáveis independentes é feita, comumente, pela metodologia de superfície de resposta. Dentro dessa abordagem, diversos *designs* experimentais são possíveis. Eles permitem que se obtenham modelos quadráticos ou, menos usualmente, cúbicos⁶. Muitas das respostas, comumente avaliadas em processos extrativos, não dependem linearmente das variáveis independentes. A recuperação dos marcadores, por exemplo, é baixa quando a razão líquido-sólido é muito baixa, porque não ocorre completa solubilização. Aumentando-se a razão líquido-sólido, a recuperação atinge um valor ótimo, quando a maior parte dos marcadores é extraída. Em seguida, ocorre uma estabilização, e o aumento do volume de líquido extrator não ocasiona incremento na extração, pois os marcadores já foram completamente extraídos. Da mesma forma, concentrações alcoólicas abaixo ou acima de certo valor podem não extrair adequadamente um composto. Portanto, em processos extrativos, *designs* capazes de prever um comportamento de estabilização, ou de aumento seguido de diminuição das respostas, são necessários. Os *designs* experimentais usados na metodologia de superfície de resposta têm se mostrado adequados a

tais finalidades. A Figura 1 ilustra uma superfície de resposta genérica, a qual foi montada utilizando termos lineares e quadráticos. Como se pode observar, a estabilização da resposta com o aumento da variável codificada 1 pôde ser prevista pelo modelo.

Os *designs* mais utilizados na metodologia de superfície de resposta são os de delineamento composto central^{9,10,20,23,24} e os de Box Behnken²⁵⁻²⁷. Estes últimos requerem um número de experimentos menor, quando três ou quatro fatores são avaliados, porém, apresentam regiões experimentais de baixo poder de predição. Os *designs* usando delineamento composto central têm sido mais utilizados na literatura de extrações de princípios ativos de plantas.

Os *designs* experimentais propostos na literatura são roteiros que indicam os níveis em que cada fator deve estar, na série de experimentos a serem realizados. Esses níveis são codificados para normalizar as variáveis de magnitudes diferentes. Após a codificação, todas as variáveis estarão contidas em um domínio experimental com a mesma variação. Os *designs* propõem os níveis codificados, mas cabe ao experimentador escolher a faixa de valores a se trabalhar. Em um trabalho da literatura, variações de pressão de 450 para 550 MPa, de concentração de etanol na mistura hidroalcoólica de 50 para 60 %, e de razão líquido-sólido de 20 para 25 mL/g, foram normalizadas, de modo que todos representassem uma unidade de variação, nas variáveis codificadas¹⁷. O experimentador deve conhecer o sistema extrativo com o qual trabalha, para que não faça codificações incoerentes.

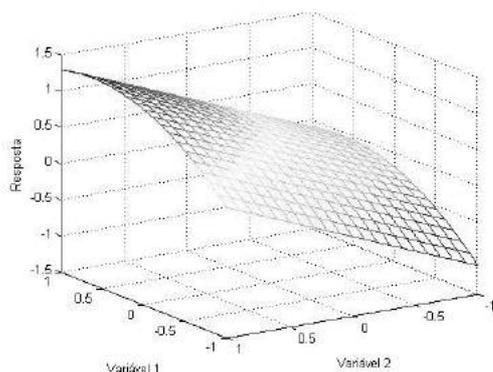


Figura 1. Ilustração de uma superfície de resposta para otimização de um processo extrativo. As variáveis independentes estão em um domínio experimental codificado. Equação usada para montar a superfície: Resposta = $0,5 + 0,5 * (\text{Variável 1}) + 0,7 * (\text{Variável 2}) - 0,4 * (\text{Variável 1})^2$.

A escolha do domínio experimental é muito importante para se obter modelos confiáveis. Antes de se otimizar, é necessário saber qual a faixa de valores que as variáveis independentes podem assumir, de modo que o processo não saia dos limites da viabilidade técnica e econômica. A escolha da faixa em que cada variável será avaliada é feita a partir de um estudo prévio, o qual conta com levantamento bibliográfico e com experimentos preliminares. O ponto ótimo deve estar dentro do domínio experimental testado, para que ele seja predito através de uma interpolação do modelo, e não de uma extrapolação. Fora do domínio experimental testado, pode haver efeitos que não foram previstos.

O ponto ótimo, preferencialmente, não deve estar nos níveis extremos do domínio experimental testado. Se o modelo indica que a resposta ainda está melhorando no limite da região experimental testada, o ideal é realizar um planejamento na nova região. Entretanto, limitações técnicas podem impedir essa mudança. Um modelo pode indicar, por exemplo, que uma concentração alcoólica superior à testada no planejamento experimental aumentaria a extração de um princípio ativo. Se a mistura com máxima concentração testada foi o etanol absoluto, então, não será possível modificar o domínio experimental dessa variável.

EXECUÇÃO DO DESIGN EXPERIMENTAL NOS PROCESSOS EXTRATIVOS

Os *designs* experimentais indicam quais os experimentos a serem realizados, mas a ordem de realização deve ser aleatória. Isso porque pode haver algum fator, ignorado pelo experimentador, variando em função do tempo ou da ordem de realização do experimento. Nesse caso, se os experimentos são realizados aleatoriamente, o efeito do fator ignorado é distribuído aleatoriamente entre os experimentos. Outra recomendação é a de que os experimentos sejam realizados de forma independente. Após cada experimento, as condições iniciais dos equipamentos devem ser restabelecidas, também objetivando à aleatoriedade dos experimentos. Recomenda-se, ainda, que se disponha de tempo e material a mais do que o previsto, para o caso de eventos inesperados⁶. No caso de ser necessário repetir algum experimento,



caso não se disponha de matéria-prima suficiente, pode-se perder um grande trabalho.

Avaliação dos Dados

A primeira observação a ser feita, após a realização dos experimentos, é quanto à estabilidade do processo extrativo durante a execução do *design* experimental. Os *designs* contam com replicatas de experimentos, para que se estime o erro experimental. Não é bom que as replicatas tenham um desvio padrão relativo elevado, pois, nesse caso, os efeitos podem se confundir com os erros. A aleatoriedade da variação das respostas das replicatas, durante o tempo, também indica a estabilidade do processo⁶. Após avaliar a estabilidade do processo, passa-se à avaliação dos modelos de previsão.

Uma forma de se avaliar a adequação dos modelos, é pela análise das diferenças entre os resultados experimentais e os preditos, ou seja, dos resíduos. Os resíduos não são explicados pelo modelo, e, por serem uma forma de erro, devem seguir a distribuição normal, com média zero. Devem, ainda, distribuírem-se de forma aleatória em relação à ordem em que os experimentos foram realizados, à magnitude da resposta predita, e à configuração das variáveis independentes envolvidas na predição⁶. Gráficos da distribuição dos resíduos são ferramentas importantes na avaliação da adequação dos modelos de previsão.

Os modelos também são avaliados quanto à capacidade de fazerem previsões acertadas. A análise de variância indica que um bom modelo tem uma regressão significativa e uma falta de ajuste não significativa. Os resíduos devem ser compostos, em grande parte, pelo erro experimental, e não pela falta de ajuste. A significância das variáveis do modelo é medida pelo valor de *p* dessas, que indica a probabilidade de sua influência ser casual. Após determinarem-se as variáveis não significativas do modelo, essas devem ser descartadas, e um novo modelo calculado.

Quanto mais próximo de 1 o valor do coeficiente de variação R^2 do modelo, melhor o seu ajuste às respostas obtidas experimentalmente²⁸. Entretanto, o R^2 pode estar alto por estar inserido um grande número de variáveis no modelo, dentre as quais, algumas podem não ser significativas. A inserção de variáveis a um modelo, ainda que não significativas, aumenta o valor do R^2 . O

R^2 ajustado é um parâmetro de avaliação mais adequado, pois seu valor diminui, caso se adicionem ao modelo variáveis não significativas⁶.

O objetivo do planejamento experimental pode ser otimizar mais de uma resposta do processo extrativo, como a recuperação de mais de um princípio ativo²³. Nesse caso, funções de desejabilidade são empregadas. Esse método consiste em transformar cada resposta em uma nova resposta, cujo valor varia entre zero e 1. Quanto mais próxima de 1, mais desejável a resposta é. As respostas que se quer otimizar, após transformadas em desejabilidades individuais, são combinadas em uma desejabilidade global única, que geralmente é a média geométrica de todas²⁹. Assim, otimiza-se a desejabilidade global, como se otimizaria uma única resposta.

Análise e Interpretação dos Resultados

Uma vez que se tenham obtidos modelos adequados, o próximo passo é avaliá-los para saber os níveis em que as variáveis independentes devem ser fixadas, visando a uma resposta mais adequada. O ponto ótimo, ou região experimental ótima, é mais facilmente visualizado por meio de gráficos, ou superfícies de resposta. Quando mais que duas variáveis influenciam significativamente em uma resposta, não é possível construir uma superfície única para apresentar toda a informação, pois haveria mais que três dimensões. Nesses casos, costumam-se apresentar os gráficos de superfície com uma resposta em função de duas variáveis independentes, ignorando-se as demais. Atribui-se o valor zero ao nível das variáveis não apresentadas. Um processo extrativo com duas respostas e três variáveis independentes gera seis superfícies de resposta. Uma alternativa para diminuir o número de superfícies é a apresentação de gráficos em quatro dimensões, em que, em um cubo, cada eixo representa uma variável independente, e a resposta é representada por uma escala de cores (a Figura 2 é um exemplo desses gráficos em 4 dimensões). Entretanto, nem sempre essa estratégia é possível, pois se o ponto ótimo encontrar-se no interior do cubo, ele pode não ser enxergado. De qualquer forma, é bom que se avaliem os modelos não só pela forma gráfica, como também pelo entendimento matemático da equação.

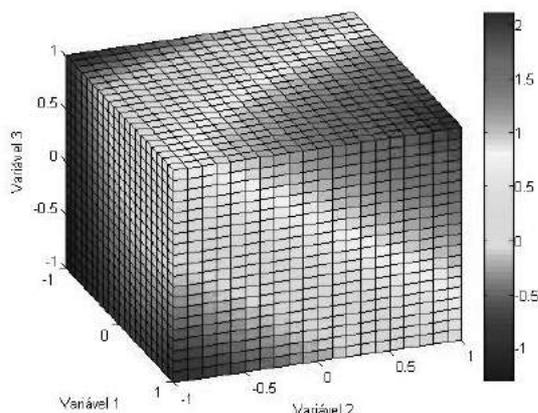


Figura 2. Ilustração de um gráfico em 4 dimensões para otimização de um processo extrativo. As variáveis independentes estão um domínio experimental codificado. A escala de cores indica a variação das respostas. Equação usada para montar o gráfico: $\text{Resposta} = 0,5 + 0,5 * (\text{Variável } 1) + 0,7 * (\text{Variável } 2) + 0,5 * (\text{Variável } 3) - 0,4 * (\text{Variável } 1)^2 + 0,3 * (\text{Variável } 1) * (\text{Variável } 3)$.

Os modelos dão uma indicação das regiões mais adequadas, mas a escolha das condições extrativas a serem empregadas em escala industrial engloba outros fatores, que devem ser criteriosamente avaliados. Se uma região não contiver o ponto ótimo do modelo, mas apresentar valores próximos a ele, e, por outro lado, representar benefícios de ordem prática, econômica e ambiental, ela provavelmente será escolhida. No contexto acadêmico, isso talvez não seja tão importante, mas seguramente o é nos âmbitos da indústria e do mercado.

Uso do Modelo

Se o modelo indicar que a condição ótima pode estar fora do domínio experimental avaliado, convém realizar um novo planejamento nesta região. Caso contrário, pode-se validar o modelo, pela realização de um experimento nas condições escolhidas, para se comprovar sua previsão. Se os experimentos foram realizados em escala laboratorial, procede-se ao aumento de escala, para que, por fim, o método de extração dos constituintes de interesse das plantas possa ser utilizado na indústria.

Referências

1. Wanasundara, U. N.; Shahidi, F.; *Food Chem.* **1998**, 63, 335.
2. Vitaglione, P.; Fogliano, V.; *J. Chromatogr. B. Analyt. Technol. Biomed. Life Sci.* **2004**, 802, 189.
3. Carvalho, R. N.; Moura, L. S.; Rosa, P. T. V.; Meireles, M. A. A.; *J. Supercrit. Fluids* **2005**, 35, 197.
4. Herrero, M.; Plaza, M.; Cifuentes, a; Ibáñez, E.; *J. Chromatogr. A* **2010**, 1217, 2512.
5. Azmir, J.; Zaidul, I. S. M.; Rahman, M. M.; Sharif, K. M.; Mohamed, a.; Sahena, F.; Jahurul, M. H. a.; Ghafoor, K.; Norulaini, N. a. N.; Omar, a. K. M.; *J. Food Eng.* **2013**, 117, 426.
6. NIST SEMATECH Engineering Statistics e-Handbook; **2012**.
7. Rezzoug, S. A.; Boutekdjiret, C.; Allaf, K.; *J. Food Eng.* **2005**, 71, 9.
8. Rodríguez-Rojo, S.; Visentin, A.; Maestri, D.; Cocero, M. J.; *J. Food Eng.* **2012**, 109, 98.
9. Dorta, E.; Lobo, M. G.; González, M.; *Food Bioprocess Technol.* **2011**, 6, 1067.
10. Singh, B.; Sharma, H. K.; Sarkar, B. C.; *J. Food Sci. Technol.* **2011**, 49, 294.
11. Hidalgo, P. J.; Uberta, J. L.; Tena, M. T.; Valcárcel, M. ;*J. Agric. Food Chem.* 1998, 46, 2624.
12. Ong, E. S.; *J. Chromatogr. B. Analyt. Technol. Biomed. Life Sci.* **2004**, 812, 23.
13. Mulinacci, N.; Innocenti, M.; Bellumori, M.; Giaccherini, C.; Martini, V.; Michelozzi, M.; *Talanta* **2011**, 85, 167.
14. Sari, F.; Velioglu, Y. S.; *J. Food Compos. Anal.* **2011**, 24, 1130.
15. Albu, S.; Joyce, E.; Paniwnyk, L.; Lorimer, J. P.; Mason, T. J.; *Ultrason. Sonochem.* **2004**, 11, 261.
16. Pérez-Serradilla, J. A.; Luque de Castro, M. D.; *Food Chem.* **2011**, 124, 1652.
17. Xi, J.; Wang, B.; *Food Bioprocess Technol.* **2012**, 6, 2538.
18. Chavan, Y.; Singhal, R. S.; *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* **2013**, 17, 106.
19. Song, J.; Li, D.; Liu, C.; Zhang, Y.; *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* **2011**, 12, 282.
20. Shao, P.; Sun, P.; Ying, Y.; *Food Bioprod. Process.* **2008**, 86, 227.
21. Anastácio, A.; Carvalho, I. S.; *Ind. Crops Prod.* **2013**, 43, 99.
22. Elksibi, I.; Haddar, W.; Ben Ticha, M.; Gharbi, R.; Mhenni, M. F.; *Food Chem.* **2014**, 161, 345.
23. Yang, B.; Liu, X.; Gao, Y.; *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* **2009**, 10, 610.



24. Ghafoor, K.; Choi, Y. H.; Jeon, J. Y.; Jo, I. H.; J. Agric. Food Chem. **2009**, 57, 4988.
25. Swamy, G. J.; Sangamithra, A.; Chandrasekar, V.; Dye. Pigment. **2014**, 111, 64.
26. Ahmad, A.; Alkharfy, K. M.; Wani, T. A.; Raish, M. ;Int. J. Biol. Macromol. **2014**.
27. Prakash Maran, J.; Manikandan, S.; Thirugnanasambandham, K.; Vigna Nivetha, C.; Dinesh, R.; Carbohydr. Polym. **2013**, 92, 604.
28. Teófilo, R.; Ferreira, M.; Quim. Nova **2006**, 29, 338.
29. Derringer, G.; J. Qual. Technol. **1980**, 12, 214.

Gerlon A. R. Oliveira

Universidade Federal de Goiás, CEP 74001-970, Caixa Postal 131, Goiânia, GO, Brasil. Instituto de Química.

SENAI – GO, Faculdade de Tecnologia Roberto Mange. Rua Engenheiro Roberto Mange, nº 239. Bairro Jundiá - CEP 75113-630 – Anápolis, GO, Brasil.

E-mail: gerlonalmeida@gmail.com



Avaliação Energética da Biomassa de Cana-de-Açúcar em Diferentes Indústrias Sucroenergéticas

Stella F. A. Oliveira, Deborah D. Brunelli, José E. Gonçalves, Yzel R. Suárez & Clauber Rodrigues

O objetivo deste estudo é a avaliar o potencial energético do bagaço de cana para gerar eletricidade. Através da análise estatística de PCU, observou-se uma diferença significativa entre os grupos analisados ($F = 3,71$, $p = 0,008$). No entanto, não foi verificada diferença entre as plantas ($F = 0,15$, $p = 0,700$). Comparando-se os grupos pelo teste de Tukey, pode-se concluir que o grupo A1 é estatisticamente diferente de A2 ($p = 0,039$) e A5 ($p = 0,028$). O grupo A1 foi a amostra mais viável para a geração de energia elétrica, uma vez que apresentou o maior PCU. Todos os grupos da planta B são iguais.

Palavras-chave: bioenergia; bagaço; poder calorífico.

The objective of this study is the evaluation of the energy potential of sugarcane bagasse to generate electricity. Through the statistical analysis of PCU, it was observed a significant difference between the analyzed groups ($F = 3.71$, $p = 0.008$). However it was verified no difference between plants ($F = 0.15$, $p = 0.700$). Comparing the groups by Tukey test, it can conclude that the group A1 is statistically different from A2 ($p = 0,039$) and A5 ($p = 0,028$). The group A1 was the most viable sample for electricity generation, since it presented the highest PCU. All groups of the plant B were equal.

Keywords: bioenergy; bagasse; calorific value.

Introdução

A ideia do aproveitamento da cana-de-açúcar como planta energética, ao invés de apenas como fonte de sacarose, surgiu no final da década de 70 do século passado nos EUA, em razão da crise do petróleo^{1,2}. Demonstrou-se, àquela época, que, além da utilização para a produção de etanol combustível, como estava fazendo o Brasil, devia se considerar a cana-de-açúcar como grande produtora de biomassa, pois até então apenas o colmo era o alvo e, deste, apenas a sacarose².

O bagaço consiste em uma matéria orgânica vegetal rica em polissacarídeos (açúcares complexos), como a celulose e a hemicelulose, compostos comumente encontrados nas paredes celulares das células vegetais. Também está contida nessa massa orgânica a lignina (biomassa lignocelulósica). Esses três materiais juntos compõem mais de 75% da biomassa vegetal e conferem resistência mecânica à planta. O restante da biomassa é composto por substâncias como proteínas, óleos vegetais e minerais³. Se a fibra passasse a ser o composto carbônico mais importante, haveria possibilidade de se incrementar a produtividade em maior grau do que com a cana tradicional, ainda que às custas da diminuição da produção de sacarose^{2,4}. Esse novo tipo de cana foi cunhado como cana-energia (*energy cane*) na Louisiana e em Porto Rico, onde foram realizados os primeiros trabalhos de melhoramentos dirigidos para esse fim^{4,5}.

Atualmente, a tendência é o desenvolvimento de espécies de cana-de-açúcar que apresentem maior conteúdo de fibra em relação ao de sacarose, com o objetivo de aumentar a produtividade de biomassa, diminuindo a necessidade de recursos e de mão-de-obra⁶.

O melhoramento genético da cana-de-açúcar é, portanto, um novo divisor de águas neste início de século. Enquanto, durante 100 anos, buscou-se maior produtividade na produção de açúcar, agora as novas variedades estão direcionadas para alta produtividade de fibra. A vantagem de se produzir mais fibra em detrimento do açúcar é que as plantas serão mais rústicas, o que traz uma série de vantagens econômicas e ambientais. As plantas serão menos exigentes em solo, clima, água

e nutrientes e mais resistentes a pragas e doenças, daí resultando maior eficiência energética no seu cultivo, ou seja, maior unidade de energia produzida por energia gasta, quando se considera toda a cadeia. Este é um parâmetro essencial e finalista que determinará as opções energéticas a serem consideradas, visto que a preservação ambiental e a sustentabilidade, necessariamente, terão que permear o processo^{7,8}.

O bagaço passou a ser uma importante fonte de energia (vapor) para o processo de produção de açúcar em substituição à tradicional lenha. Posteriormente, aplicou-se o bagaço na geração da eletricidade necessária no processo de produção de etanol e sacarose e, seguindo com a evolução, passou-se a produzir excedente de eletricidade para ser direcionado a rede pública^{9,10}. Diante desse cenário, o presente trabalho teve como objetivo a avaliação energética de biomassa do bagaço de cana-de-açúcar, de forma comparativa entre duas indústrias sucroenergéticas. Para tanto, a biomassa da cana-de-açúcar foi avaliada quanto ao teor de umidade, cinzas, combustibilidade, poder calorífico superior (PCS), poder calorífico inferior (PCI), poder calorífico útil (PCU), propondo, assim, comparações quanto aos diferentes comportamentos existentes entre as duas indústrias avaliadas.

Metodologia

COLETA DE AMOSTRAS

Foram coletadas amostras de biomassa – bagaço de cana-de-açúcar – em duas indústrias sucroenergéticas localizadas na região sul de Mato Grosso do Sul, sendo que as amostras utilizadas foram blendas de diferentes variedades de cana-de-açúcar. Em cada ponto de coleta, foram obtidas 3 amostras de 500 g cada, sendo 1,5 kg por ponto de coleta. As amostras foram coletadas a uma profundidade de 50 cm da superfície, com distância entre os pontos de 100 metros.

Vale salientar que, tanto os pontos de coleta da usina aqui identificada como A, como os pontos da usina identificada como B, são semelhantes no que diz respeito à estrutura de cada operação unitária das usinas. Os pontos de coleta das usinas A e B são apresentados nas Figuras 1 e 2. As usinas diferenciam-se quanto à moagem, no que se refere à quantidade de ternos existentes, sendo quatro ternos na indústria A e seis ternos na B.

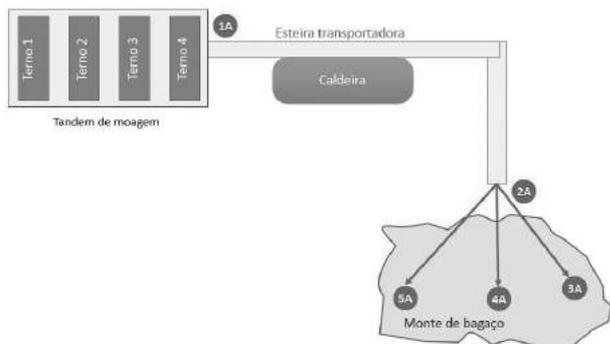


Figura 1. Esquema detalhado dos pontos de coleta da usina A.

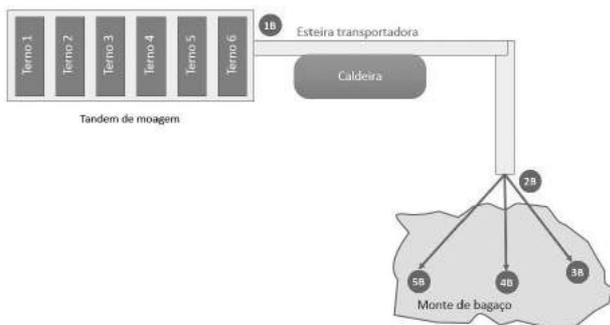


Figura 2. Esquema detalhado dos pontos de coleta da usina B.

A Figura 3 apresenta o fluxograma das etapas do trabalho.

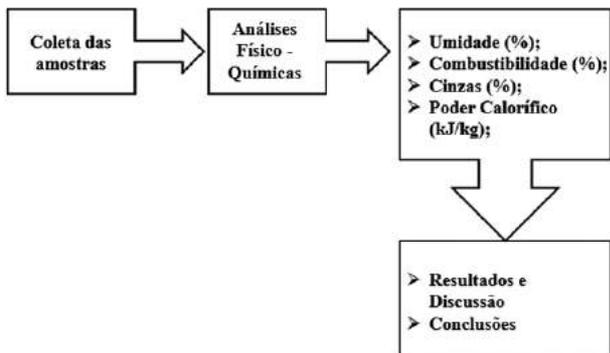


Figura 3. Fluxograma de sintetização do trabalho

DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE

A determinação do teor de umidade foi realizada na FATEC SENAI Dourados. O teor de umidade, a base úmida de todas as amostras, foi determinado realizando a secagem das amostras em estufa de circulação forçada, marca Quimis, a 105°C, por um período de tempo de 4h30 até que a massa permanecesse constante. As amostras foram pesadas, aproximadamente 3g, utilizando-se de uma balança analítica marca Shimadzu. Após o processo de secagem, as amostras foram resfriadas à temperatura ambiente em dessecadores e pesadas novamente. Utilizou-se para o cálculo do teor de umidade a Equação 1:

$$\%u = \frac{(\mu - m_s)100}{\mu} \quad (1)$$

Onde: μ é a massa (g) de matéria úmida, m_s é a massa (g) de matéria seca e u é a umidade (%).

DETERMINAÇÃO DOS TEORES DE COMBUSTIBILIDADE E CINZAS

A determinação dos teores de combustibilidade e cinzas foi realizada no laboratório de análises físico-químicas da FATEC SENAI Dourados. A determinação destas propriedades é imprescindível para a caracterização dos resíduos. O teor de combustíveis e o teor de cinzas (ou inertes) fornecem informações aproximadas da combustibilidade dos resíduos. O método foi adaptado do Guia de Prática de Análise Imediata de Combustíveis Sólidos¹¹, utilizando-se o procedimento descrito a seguir.

Inicialmente, os cadinhos foram secos em estufa modelo Quimis a 105°C, por 1 h. Em seguida, as amostras foram pesadas, e carbonizadas em cadinhos de porcelana a 600°C por 4 h em mufla. As amostras foram resfriadas à temperatura ambiente em dessecadores e pesadas novamente.

O teor de combustíveis foi calculado pela Equação 2:

$$TC = \frac{c - d}{c} \times 100 \quad (2)$$



Onde TC é o teor de combustíveis (%), c é o peso da amostra antes da queima (g), d é o peso da amostra após a queima (g).

O teor de cinzas é obtido pela Equação 3:

$$TCZ=100-TC \quad (3)$$

Onde TCZ é o teor de cinzas (%) e TC é o teor de combustíveis em porcentagem.

MÉTODO PARA DETERMINAÇÃO DE PCS

As análises de poder calorífico superior (PCS) foram realizadas na Universidade Estadual de São Paulo – UNESP, Campus de Botucatu, Faculdade de Ciências Agrônomicas (FCA) - Laboratório de Resíduos Sólidos e Compósitos. Para a análise do PCS, seguiu-se a norma ABNT – NBR 8633/84. Esta norma prescreve o método de determinação do poder calorífico superior a um volume constante, em calorimétrico adiabático, isotérmico ou estático.

Primeiramente, foi realizada a calibração do aparelho utilizado. O processo de calibração é importante, e pode ser realizado a partir do PCS de materiais de referência. Para o presente estudo, foram realizadas pastilhas de ácido benzoico que possuem PCS conhecido 6.318 cal.g-1. A pastilha de ácido benzoico foi colocada em um cadinho de aço inox e amarrada a um fio de níquel de 0.3 mm e aproximadamente 10 cm de comprimento. As extremidades do fio foram fixadas aos contatos elétricos que contêm as válvulas de entrada e saída de gases. Colocou-se esta peça na abertura da bomba sobre anéis de vedação e a bomba foi fechada com uma tampa vazada para permitir o acesso às válvulas e contato elétrico.

Adicionaram-se 2.700 mL de água destilada e oxigênio a uma pressão de 150 psi no interior da bomba, quantidade suficiente para a combustão completa da amostra. O calorímetro foi ligado e, então, deixado sob agitação até a verificação da estabilização térmica. Após a estabilização da temperatura, a ignição foi realizada. Verificou-se a variação da temperatura da água adicionada ao calorímetro antes e após a ignição, ou seja, antes e após a combustão da amostra.

O calorímetro tem como unidade de calor cal/g,

optou-se em transformar em kJ/kg. A constante K da máquina utilizada foi determinada com ácido benzoico, sabendo-se previamente que o PCS do ácido benzoico é de 6.318 cal. g-1e o valor obtido de K foi de 413.1228 cal/°C.

A partir da Equação 4, calculou-se a constante do calorímetro (K), conhecendo-se o poder calorífico superior (PCS) do ácido benzoico 6.318 cal. g-1.

$$PCS = \frac{(K+V_{H_2O}) \times \Delta T}{ms} \quad (4)$$

Onde PCS é o poder calorífico superior (cal/g), K é a constante do equipamento 413.1228 (cal/°C), V_{H_2O} é 2700 (mL), ΔT é a diferença de temperatura (°C) e ms é a massa seca (g).

MÉTODO PARA DETERMINAÇÃO DO PCI E PCU

Para o cálculo do poder calorífico inferior foi estabelecida uma média de porcentagem de hidrogênio (H) igual a 6,0. Justifica-se esta média pela composição química de resíduos lignocelulósicos que apresentam porcentagens de hidrogênio entre 5,5 e 6,5, com algumas exceções ultrapassando os 6,5 de H.

O poder calorífico inferior (PCI) e o poder calorífico útil (PCU), foram determinados, segundo Brito (1993), pelas Equações 5 e 6:

$$PCI = PCS - 600 (9H/100) \quad (5)$$

$$PCU = PCI \left[\frac{(100-u)}{100} \right] - 6u \quad (6)$$

Onde PCS é o poder calorífico superior, determinado através de bomba calorimétrica (cal/g), PCI é o poder calorífico inferior (cal/g), PCU é o poder calorífico útil (cal/g), H é o teor de hidrogênio (%) e u é a umidade do material (%). Para o cálculo do poder calorífico útil (PCU), foram considerados os teores médios de umidade correspondentes a cada amostra coletada.

ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os valores de poderes caloríficos (PCS, PCI e PCU) das amostras obtidas nas usinas A e B foram submetidos, por meio do programa SYSTAT 12, à análise de variância *two-way* (ANOVA), testando a influência da usina e dos grupos, com teste de Tukey a posteriori¹².

Resultados e Discussão

Teor de umidade: os teores médios de umidade das amostras coletadas nas usinas A e B são apresentados na Figura 4.

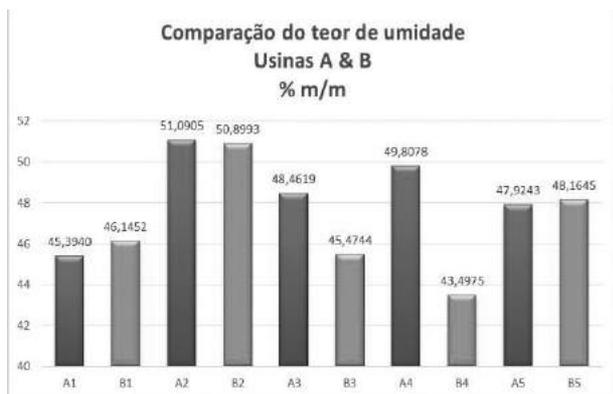


Figura 4. Comparação dos teores de umidade (%m/m) das amostras coletadas nas usinas A e B.

Para a geração de energia elétrica, dois fatores são extremamente significativos na biomassa: umidade e composição química das amostras a serem degradadas termicamente. Se comparados os resultados da análise do teor de umidade das duas usinas, observa-se que a indústria sucroenergética que apresentou melhores condições quanto ao teor de umidade para geração bioeletricidade, foi a usina B, mesmo essa tendo apresentado o resultado do teor de umidade superior à usina A para as amostras B1 e B5, observa-se que nas demais amostras ela encontrou-se com valores inferiores. A amostra B4 apresentou o valor mais significativo para fins energéticos.

DETERMINAÇÃO DOS TEORES DE COMBUSTIBILIDADE E CINZAS

Os teores de combustibilidade e cinzas são mostrados nas Figuras 5 e 6, respectivamente.

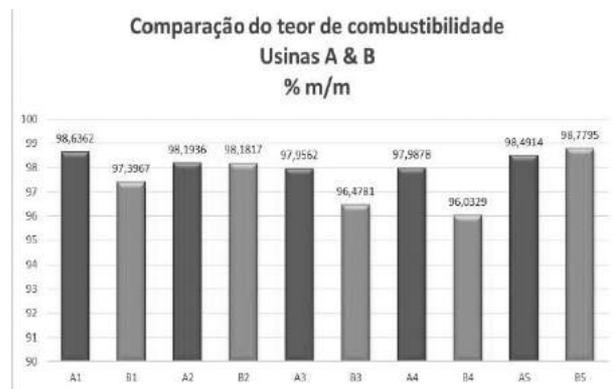


Figura 5. Comparação dos teores de combustibilidade (%m/m) das amostras coletadas nas usinas A e B.



Figura 6. Comparação dos teores de cinzas (%m/m) das amostras coletadas nas usinas A e B.

O teor de combustíveis é um índice importante para a geração de bioenergia, pois indica o potencial de geração de calor de cada material. Já o teor de cinzas corresponde à porcentagem de material inerte na geração de calor presente na amostra¹². Visto ser desejável que, após a queima do bagaço, haja a menor quantidade de resíduos possível, indicando que grande parte do material foi utilizada na geração de calor, sobrando apenas as cinzas, verificou-se que a amostra com menor porcentagem de

cinzas foi a identificada como B5 (1,2205 %), ou seja, apresentou o maior teor de combustível. Dessa forma, o comportamento do teor de cinzas é inversamente proporcional ao encontrado no teor de combustíveis.

Para a geração de bioenergia, um dos fatores imprescindíveis a ser considerado é o teor de cinzas, que quanto menor, mais favorável a amostra se torna para tal fim. Sendo assim, observou-se que as duas amostras mais favoráveis à geração de energia, foram as amostras A1 e B5. Porém, quando comparadas, a amostra A1 – recém moída – torna-se a mais significativa na geração de energia, por manter sua integridade elementar contrapondo-se à B5 – monte velho – que entrou em processo de decomposição por ser proveniente da safra anterior.

PODER CALORÍFICO SUPERIOR (PCS), INFERIOR (PCI) E ÚTIL (PCU)

Os valores de PCS, PCI e PCU das amostras coletadas nas usinas A e B são apresentados nas Figuras 7 e 8.

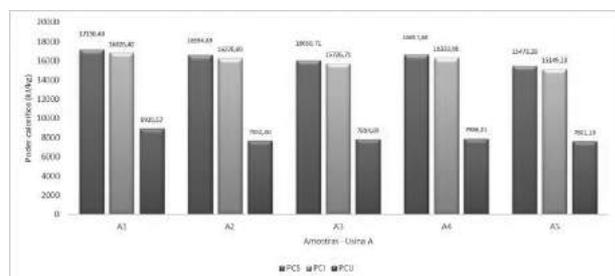


Figura 7. Poder calorífico superior, inferior e útil das amostras – usina A

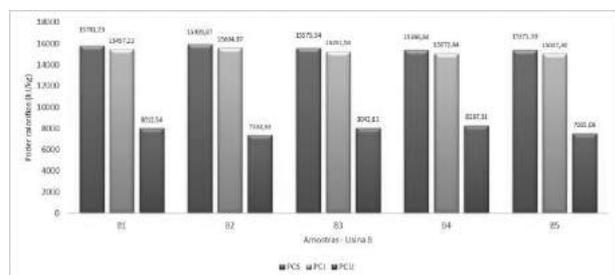


Figura 8. Poder calorífico superior, inferior e útil das amostras – usina B

As análises de poder calorífico superior, inferior e útil fundamentam-se na NBR- ABNT 8633/84, que permite a determinação da energia liberada na combustão completa de um combustível. Entretanto, vale salientar que o resultado de um PC é subsequente ao outro, ou seja, para o cálculo do poder calorífico inferior, é necessário o valor de poder calorífico superior e para calcular o poder calorífico útil, necessita-se do valor do poder calorífico inferior – PCS → PCI → PCU, na unidade de kJ/kg.

Pode-se observar que a amostra A1 apresentou o maior valor de poder calorífico superior (17150,40 kJ/kg). Supõe-se que nesta amostra não houve o início da decomposição das partes constituintes do bagaço, que é matéria orgânica vegetal rica em polissacarídeos (açúcares complexos), como a celulose e a hemicelulose, compostos comumente encontrados nas paredes celulares das células vegetais. Também está contida nessa massa orgânica a lignina (biomassa lignocelulósica). Esses três materiais juntos compõem mais de 75% da biomassa vegetal.

As amostras A1 e A4 apresentaram os maiores valores, tanto para o PCS (17150,40 e 16657,68 kJ/kg) como para o PCI (16826,40 e 16333,68 kJ/kg) e quando considerado o PCU (8920,57 e 7886,01 kJ/kg) elas também foram as que mais se destacaram. As amostras que apresentarem os menores índices de umidade, irão apresentar os maiores valores de PCU¹². Considerando as amostras da usina B, os melhores resultados foram observados para as amostras B1 e B2, tanto para PCS como para PCI que foram, respectivamente de 15781,23 e 15457,23 kJ/kg e 15928,87 e 15604,87 kJ/kg. Quando considerado o PCU, as amostras que apresentaram maiores valores foram B4 e B3: 8267,31 e 8042,81 kJ/kg.

Segundo Gonçalves (2010)¹² e Silva & Moraes (2008)¹³, que estudaram a influência da umidade no poder calorífico superior, há um considerável acréscimo desse com a diminuição da umidade. Se há uma diminuição da umidade de 50% para 0%, observa-se um incremento energético da ordem de 92%, sendo que 60% são atingidos com a redução



da umidade para 20%. Segundo estes autores, o bagaço de cana-de-açúcar com umidade em torno de 20% é mais viável para o aproveitamento energético.

Portanto, as amostras que demonstraram maior viabilidade para geração de energia em ambas as indústrias sucroenergéticas são as dos pontos de coleta A1 e B4, sendo a primeira coletada no último terço de moagem e a segunda, no monte excedente.

A redução do PCS do bagaço envelhecido das amostras A5 (15473,28 kJ/kg) e B5 (15371,30 kJ/kg), em relação ao bagaço recém-moído A1 (17150,40 kJ/kg) e B1 (15781,23 kJ/kg), está relacionada com a deslignificação da fibra e consequente decomposição da hemicelulose durante a estocagem. O bagaço mais velho apresentou maior perda do poder calorífico, esses valores foram obtidos pela média de cada uma das três amostras do ponto de coleta. O desvio padrão aumenta com o tempo de exposição do bagaço aos microrganismos e, devido à homogeneidade desse, que também diminui com o passar do tempo.

Os resultados obtidos no presente trabalho são coerentes com aqueles obtidos por Gonçalves (2010)¹², nos quais a redução de poder calorífico foi evidenciada quando comparado o poder calorífico superior com o poder calorífico útil, comprovando a importância do teor de umidade de cada amostra. A umidade está totalmente relacionada com o poder calorífico, como pode ser constatado nas Figuras 7 e 8. No qual aponta que quanto maior o teor de umidade, menor será o poder calorífico útil - mais importante entre os três resultados. A ordem decrescente dos valores de umidade é de: A2> A4> A3> A5> A1 e a ordem decrescente do poder calorífico útil foi A1> A4> A3> A2> A5>. Observa-se que os valores de umidade e poder calorífico útil são coerentes para as amostras A4 e A3, no entanto, para as demais, a quantidade de cinzas e combustibilidade interferem na associação.

ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os valores médios de PCS, PCI e PCU são apresentados na Tabela 1 e na Figura 9.

Tabela 1. Valores médios de PCS, PCI e PCU de todos os tratamentos.

Amostras	Média de PCS (kJ/kg)	Média de PCI (kJ/kg)	Média de PCU (kJ/kg)
A1	17150,40	16826,40	8920,57a
A2	16594,89	16270,89	7652,60b
A3	16050,71	15726,71	7814,89ab
A4	16657,68	16333,68	7886,01ab
A5	15473,28	15149,28	7601,10b
B1	15781,23	15457,23	8012,54c
B2	15928,87	15604,87	7352,53c
B3	15575,54	15251,54	8042,81c
B4	15396,84	15072,84	8267,31c
B5	15371,30	15047,30	7505,06c

* As médias seguidas de letras iguais na mesma coluna não diferem pelo teste de Tukey.

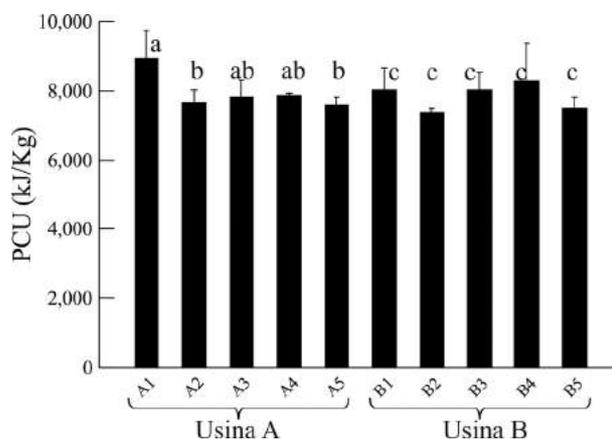


Figura 9. Resultado da análise estatística para os dados de poder calorífico útil.

A partir dos dados estatísticos, obtidos para a análise da PCU entre usinas e entre grupos, constatou-se que: o modelo gerado explica 60,4% da variação nos dados. Existe diferença significativa entre os grupos analisados ($F=3,71$; $p=0,008$), mas não existe diferença entre as usinas ($F=0,15$; $p=0,700$), comparando os grupos pelo teste de Tukey, observou-



se que o grupo A1 se diferencia estatisticamente do grupo A2 ($p=0,039$) e do A5 ($p=0,028$) e na usina B, os grupos são iguais, conforme apresentado na Figura 9.

Na média, as usinas são iguais, contudo, o grupo A1 apresenta maior PCU que os demais desta usina (Fig. 9). Em relação à usina B, todos os grupos são iguais. Conclui-se, portanto, que o grupo 1 da usina A foi o que apresentou maior PCU.

Em geral, é aproveitada apenas uma fração modesta do potencial de uma fonte de energia que tem qualidades indiscutíveis: (a) baixo custo operacional, pois o bagaço é produzido no mesmo ambiente físico das fornalhas, caldeiras e geradores; (b) alta qualidade energética, porque, de modo geral, a unidade geradora está próxima dos centros de consumo; (c) baixo custo de transmissão, porque as distâncias para a instalação das linhas conectoras são curtas e têm baixo nível de perda de carga e (e) grande atrativo ambiental, pois é possível gerar uma enorme quantidade adicional de energia elétrica com a queima da mesma quantidade de bagaço que já está sendo queimado atualmente.

Considerando apenas o bagaço, seria possível gerar 85,6 kWh de energia de exportação, utilizando caldeira de 65 bar. Supondo a utilização de 75% do bagaço disponível em 2012/13 e 50% da palha disponível no mesmo ano, uma tonelada de cana poderia gerar 210 kWh para exportação. Finalmente, uma tonelada de bagaço gera 342,4 kWh para exportação enquanto que uma tonelada de palha gera 500 kWh em função da menor umidade¹⁴.

A energia da cana é dividida em três partes: 1/3 da energia está no caldo, que fabrica açúcar e álcool; 1/3 da energia são folhas e pontas e 1/3 da energia é bagaço. Uma tonelada de cana contém de 250 a 275 kg de bagaço, sendo que 1 kg de bagaço gera 2 kg de vapor e, para a geração de 1 kW, são necessários 10 kg de vapor (BALBO, 2013). Considerando-se estes dados, pode-se calcular a capacidade de geração de energia elétrica da amostra A1, que pela análise estatística dos resultados de PCU, foi a melhor. O valor determinado de PCU para a amostra A1 foi de 8920,57 kJ/kg. Este valor gera 2,47 kWh de energia elétrica, convertendo a tonelada gerou o montante de 2470 kWh, em TWh representa 24700 kg/vapor.

Na usina B, a amostra B1, quando considerada

a média do PCU de 8012,54 kJ/kg e as conversões a kWh, gerou uma quantidade de energia inferior 10,17% quando comparada à usina A.

Conclusões

A análise do teor de umidade permitiu concluir que a indústria sucroenergética A, que possui quatro ternos de moagem, apresentou maior eficiência na extração da fase líquida, quando comparada com a usina B que possui seis ternos de moagem. Esta superioridade na extração identificada na amostra da usina A, deve-se a vários fatores como: velocidade e pressão aplicada pelos rolos de cada terno, altura da cama do bagaço, largura da moenda e principalmente ao processo de embebição composta, com adição de água do último terno para os anteriores, com exceção do primeiro terno. O teor de combustíveis é um índice importante para a avaliação da geração de bioenergia, pois indica o potencial de geração de calor de cada material. Já o teor de cinzas corresponde à porcentagem de material inerte na geração de calor presente na amostra. Sendo assim, observou-se que as duas amostras mais favoráveis à geração de energia, foram as amostras A1 e B5.

A partir da análise estatística dos resultados de PCU, conclui-se que existe diferença significativa entre os grupos analisados ($F=3,71$; $p=0,008$), mas não existe diferença entre as usinas ($F=0,15$; $p=0,700$). Comparando-se os grupos pelo teste de Tukey, conclui-se que o grupo A1 se diferencia estatisticamente do grupo A2 ($p=0,039$) e do A5 ($p=0,028$). Na usina B, os grupos são iguais. O grupo A1 apresentou o maior PCU, sendo a amostra mais viável para a geração de bioeletricidade. A partir do resultado de PCU, conclui-se que 1 tonelada de bagaço de cana-de-açúcar coletado na saída do último terno de moagem pode gerar 2,47 kWh de energia elétrica.

Conclui-se, com esse trabalho, que um fator importante a ser reavaliado, é a operação unitária de limpeza da cana a seco, pois a sua ineficiência foi identificada através dos altos valores de teor de cinzas.

Outros trabalhos poderão ser realizados para avaliar o custo e a viabilidade econômica da implementação do gerenciamento do resíduo gerado (bagaço) pelas usinas sucroenergéticas.

Referências

1. Bischoff, K.P.; Gravois, K.A.; Eagan, T.E.; Hoy, J.W.; Kimbeng, C.A.; Laborde, C.M.; Hawkins, G.L.Registration of “L79-1002” sugarcane. *Journal of Plant Registrations*. 2008, 2:211-217
2. Alexander, A.G.The energy cane alternative. Amsterdam: Elsevier. 1985, 509p.
3. Soares, L. C. S. R. Destoxificação biológica do hidrolisado hemicelulósico de bagaço de cana-de-açúcar para utilização em processos fermentativos. 2012. 112 f. Dissertação (Mestrado em Ciências – Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia Industrial na Área de Microbiologia Aplicada) – Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo, Lorena, 2012.
4. Giamalva, M.J.; Clarke, S.J.; Stein, J.M.Sugarcane hybrids of biomass. *Biomass*. 1984, 6:61-68.
5. Samuels, G.; Alexander, A.G; Rios, C.E.; Garcia, H.The production of energy cane in Puerto Rico: The Hatillo Project. *Journal of the American Society of Sugar Cane Technologists* 1984, 3: 14-17.
6. Santos, F.; Borém, A.; Caldas, C. 2012. Cana-de-açúcar: bioenergia, açúcar e etanol: tecnologias e perspectivas. – 2. ed. rev. e ampl. – Viçosa, MG: Os Editores, 2011. 637p.
7. Johnson, J.M-F.; Coleman, M.D.; Gesh, R.; Jaradat, A.; Mitchell, R.; Reicosky, D.; Wilhelm, W.W. Biomass-bioenergy crops in the United States: a changing paradigm. *The Americas Journal of Plant Science and Biotechnology*. 2007, 1(1):1-28.
8. Hill, J.; Nelson, E.; Tilman, D.; Polasky, S.; Tiffany, D.Environmental, economic, and energetic costs and benefits of biodiesel and ethanol biofuels. *Proceedings of the National Academy of Science*. 2006, 103(43):11206-11210.
9. Balbo, J.M.; Padovani neto, A.. Excedentes de energia elétrica e sobra de bagaço para diferentes concepções e sistemas de conversão e utilização de energia aplicáveis a indústria sucroalcooleira. *STAB, Açúcar, Alcool, e Subprodutos*. 1987, 692:52-58.
10. Campos, R.M.Valor econômico do bagaço. *Brasil Açúcar*. 1987, 55(105):20-24.
11. UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais Guia de Prática de Análise Imediata de Combustíveis Sólidos. Curso de Engenharia Mecânica. 2014.
12. Gonçalves, J.E.2010. Avaliação energética e ambiental de bagaço de cana-de-açúcar produzidos com rejeitos de resíduos sólidos urbanos e madeira de *Eucalyptus grandis*. Botucatu, 2010.
13. Silva, M. B. e Morais, A. S. Avaliação Energética do Bagaço de Cana em Diferentes Níveis de Umidade e Graus de Compactação; XXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção/ A integração de cadeias produtivas com a abordagem da manufatura sustentável. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 13 a 16 de outubro de 2008, p. 3.
14. Nogueira, M. A. F. S.; Garcia, M. S.; Gestão dos resíduos do setor industrial sucroenergético: estudo de caso de uma usina no município de Rio Brillhante, Mato Grosso do Sul. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental – RGET*, e-ISSN 2236 1170 – v. 17n. 17 Dez 2013, p. 3275 – 3283.

Stella F. A. Oliveira^{*1},
Deborah D. Brunelli², José E.
Gonçalves³, Yzel R. Suárez³,
Clauber Rodrigues³.

¹ Fatec SENAI Dourados, Dourados/MS, CEP 79813-270, Brasil

² Instituto Tecnológico em Aeronáutica (ITA), São José dos Campos/SP, CEP 12228-900, Brasil

³ Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (UEMS), Campus de Glória de Dourados/MS, CEP 79830-000, Brasil

* E-mail stella@ms.senai.br



A Produção de Combustíveis de Microalgas no Brasil

Luiza Paula C. Lopes & Arnaldo S. Cabral

Os altos preços dos combustíveis fósseis, aliado a sua escassez, têm levado o mundo a refletir e procurar por fontes alternativas de combustíveis, dentre esses as microalgas. Essas não dependem de terras aráveis e não concorrem com alimentos. Este trabalho fornece um panorama geral sobre as pesquisas de microalgas desenvolvidas no Brasil. Embora existam projetos relacionados à produção de combustível de microalgas, este número poderia ser mais expressivo. Para aumentar o número de projetos relacionados a este tema, seria importante um olhar mais crítico dos órgãos de fomento do Governo Federal do Brasil, fornecendo subsídios para essa linha de pesquisa.

Palavras Chaves: *Biocombustíveis; Microalgas; Brasil.*

The high prices of fossil fuels combined with their scarcity led the world to reflect and look for alternative fuel sources, among which microalgae-based fuels. Microalgae do not depend on arable land and do not compete with food. This work provides an overview of the research on microalgae developed in Brazil. Although there are projects related to the production of microalgae-based fuels, this number could be more expressive. To increase the number of projects related to this topic, it would be important to be more critical regarding this subject than what has been done by the funding agencies of the Federal Government of Brazil, Providing funding for this line of research would be a good alternative.

Keywords: *Biofuels; microalgae; Brazil.*

Introdução

O aumento da população é uma das razões que tem levado a uma crescente demanda de energia no mundo. O consumo de petróleo é 105 vezes mais rápido do que a natureza pode criar¹. O petróleo, existente em depósitos sob o solo e no fundo do mar, torna-se cada vez mais raro, difícil de extrair e com custo elevado. Esses fatores farão com que os biocombustíveis tornem-se mais competitivos no mercado global de energia. Diante disso, existe uma tendência mundial para a busca de combustíveis mais limpos e novas fontes de energia que possuam baixa emissão de carbono como a energia solar, térmica, fotovoltaica, hidrelétrica, geotérmica, eólica e biocombustíveis.

Os biocombustíveis são combustíveis com origem em biomassa renovável, e podem substituir totalmente ou parcialmente os combustíveis derivados do petróleo, além disso, não contribuem para o acúmulo de gases de efeito estufa na atmosfera. Os gases gerados na sua queima são reabsorvidos no crescimento da safra seguinte, trazendo equilíbrio entre a emissão e a absorção de poluentes. Nesse sentido, a busca por combustíveis alternativos de fontes renováveis vem se tornando cada vez mais atrativa em escala mundial. Segundo dados da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), (órgão ligado ao Ministério de Minas e Energia), do Ministério de Ciência e Tecnologia e da International Energy Agency, as fontes de energia de origem renovável hidráulica, biomassa, solar, eólica e geotérmica, somam uma participação de pouco mais de 14% da matriz energética mundial.

No Brasil, um bom exemplo do uso de biocombustíveis é o uso do etanol feito a partir da cana-de-açúcar, que hoje representa o principal biocombustível em substituição à gasolina. Há também o biodiesel, que é produzido a partir de óleos vegetais ou de gorduras animais, sendo adicionado ao diesel de petróleo em proporções variáveis.

Para a produção desses biocombustíveis, o Brasil utiliza principalmente a cana-de-açúcar para o etanol, e soja para o biodiesel. No entanto, outras fontes de biomassa já estão sendo pesquisadas para dar suporte ao desenvolvimento de novas fontes renováveis. Dentre essas, destacam-se algodão, mamona, palma-de-óleo (dendê), girassol amendoim². Recentemente, outro tipo de biomassa surge como uma nova fonte energética nos países desenvolvidos: as microalgas.

O cultivo de microalgas para fins energéticos ainda está na fase de pesquisa e desenvolvimento, e não está estabelecida a produção comercial de algas para biocombustíveis. No entanto, elas surgem como uma grande potência para a produção de biocombustíveis, pois uns de seus principais componentes da fração lipídica são os triglicerídeos e ácidos graxos livres. A composição e a quantidade de lipídeos dependem da espécie de microalgas, e das condições de crescimento a que essas são submetidas.

As vantagens para a produção de biocombustíveis, que utilizam como fonte as microalgas, são amplas quando comparadas a outros cultivos, como por exemplo, a cana-de-açúcar e a soja, pois as microalgas apresentam:

- Alta produtividade, uma vez que as algas dependem apenas de luz, nutrientes e gás carbônico para fazer a fotossíntese e consequentemente suas funções biológicas como reprodução e crescimento;
- Consumo de CO₂;
- Ausência de demanda adicional de água doce;
- As zonas áridas costeiras com águas subterrâneas salobras podem ser usadas para seu crescimento;
- Efeito positivo sobre a saúde humana e a dos animais.

Este trabalho tem por objetivo fornecer um panorama geral sobre as principais pesquisas de microalgas que estão sendo conduzidas no Brasil.

Visão Geral

Atualmente, as necessidades energéticas do planeta são baseadas em combustíveis fósseis. Por isso, existe uma tendência mundial pela busca de combustíveis mais limpos, e por novas fontes de energia que possuem baixa emissão de carbono. Essas fontes estão sendo avaliadas, e se encontram em diferentes fases de estudo e aplicação, cada um com suas próprias vantagens e problemas³.

Uma das poucas fontes com potencial para substituição dos combustíveis derivados do petróleo é a biomassa. Além de ser um recurso renovável, é o único material rico em carbono disponível no planeta, além dos fósseis⁴.

Biomassa pode ser conceituada sob o ponto de vista ecológico e energético. Do aspecto ecológico, é



considerada como: o montante de matéria viva numa área ou volume de habitat⁵. Do entendimento energético, pode ser definido como: todo recurso renovável oriundo de matéria orgânica (de origem animal ou vegetal) que pode ser utilizado para produção de energia⁶.

Associado ao uso da biomassa, surge, então, o conceito de combustíveis renováveis. Os biocombustíveis aparecem para responder à dependência energética em relação aos combustíveis fósseis, e ajudar a reduzir as emissões de gases com efeito estufa, sobretudo, no setor dos transportes. Esses têm sido apontados como uma solução verde para responder ao problema das alterações climáticas do mundo. No entanto, os impactos ambientais e alimentares, associados ao seu aproveitamento e produção, são controversos, tornando a sua utilização um assunto fortemente debatido⁷. As principais matérias-primas para sua produção são cana-de-açúcar, beterraba, sorgo, dendê, semente de girassol, mamona, milho, mandioca, soja, aguapé, copaiba, lenha, resíduos florestais, excrementos de animais, resíduos agrícolas, entre outras. Do processamento dessa matéria orgânica origina-se um óleo que depois de processado pode ser misturado aos derivados do petróleo (gasolina, diesel, etc.), ou utilizado puro⁸.

Cada vez mais, as produções de cana-de-açúcar, milho e trigo estão sendo convertidas para a fabricação de etanol e as produções de soja, girassol e óleo de palma em biocombustíveis. Nesse contexto, é necessário equilibrar as balanças. Se por um lado, os biocombustíveis representam uma forma mais limpa e barata de suprir às necessidades energéticas do mundo, por outro, as fortes repercussões ambientais e alimentares põem em check essa estratégia energética⁷.

Um aumento desenfreado da produção de biocombustíveis pode colocar em risco a biodiversidade. Se florestas tropicais são derrubadas para o seu espaço ser utilizado na produção de culturas energéticas, os biocombustíveis contribuirão, inclusivamente, para o aumento da emissão líquida de gases com efeitos de estufa.

No Brasil, esta situação não parece ser diferente, o aumento da área de cana-de-açúcar plantada duplicou nos últimos oito anos (Figura 1). Analisando a evolução da área de cana plantada no país, observa-se o aumento de 2% na área de cana colhida em relação a 2011/2012, atingindo 8,5 milhões de hectares⁷. Tais áreas são divididas em:

- Áreas reformadas: são aquelas recuperadas no ano anterior e estão disponíveis para colheita;
- Área em reforma: é aquela que não será colhida, pois se encontra em período de recuperação para o replantio da cana ou outros usos;
- Área de expansão: é a classe de lavouras de cana que pela primeira vez está disponível para colheita;
- Área de cana soca: cana que já passou por mais de um corte,⁷.

Embora exista muita discussão sobre os biocombustíveis, especialistas afirmam que sua utilização oferece uma série de vantagens, podendo inclusive ser um substituto de transição para o petróleo quando ele tiver esgotado, nomeadamente na área dos transportes. Na área de produção de eletricidade, a energia hidroelétrica, eólica e solar têm progressivamente avançado⁸.

As razões para o interesse pelos biocombustíveis são muitas e variam de um país para outro e ao longo do tempo, sendo as principais: diminuir a dependência externa de petróleo, por razões de segurança de suprimento ou impacto na balança de pagamentos; minimizar os efeitos das emissões veiculares na poluição local, principalmente, nas grandes cidades e controlar a concentração de gases de efeito estufa na atmosfera⁹.

Apesar de serem todos oriundos da biomassa, os biocombustíveis podem ser classificados, de acordo com sua origem. São, portanto, distribuídos em combustíveis de primeira, segunda e, mais recentemente, os combustíveis de terceira geração.

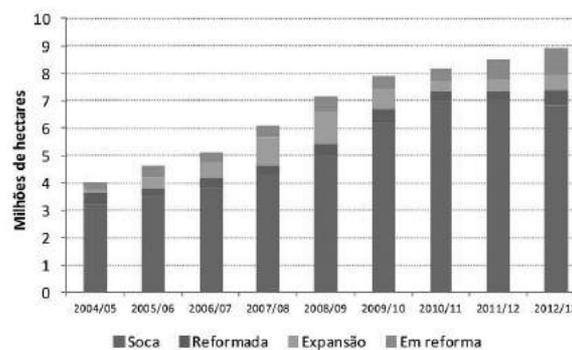


Figura 1- Evolução da área plantada de cana-de-açúcar no período de 2004 a 2013. Fonte: EPE a partir de INPE.



Os combustíveis de primeira geração são fabricados a partir de matérias vegetais produzidas pela agricultura como: trigo, milho, soja, girassol, cana-de-açúcar. Esses combustíveis entram em concorrência com culturas alimentícias. Os combustíveis de primeira geração mais comuns são o bioetanol, biodiesel e biogás, derivado do amido⁴.

Os combustíveis de segunda geração são produzidos a partir da lignocelulose, tais como resíduos florestais e industriais, ou seja, não são oriundos de gêneros alimentícios. Os combustíveis de segunda geração, ao contrário dos de primeira geração, não utilizam partes vegetais, pois neste caso, emprega-se o vegetal na íntegra para a produção de bioenergia⁴.

Os chamados combustíveis de terceira geração, também são derivados de espécies não comestíveis. Nesse caso, utilizam-se as cianobactérias, algas e as microalgas. A diferença com os demais biocombustíveis é que nesse existe a utilização da biotecnologia. São, desta forma, conhecidos como biocombustíveis avançados e utilizam técnicas de biologia molecular.

Em decorrência da sua origem, esses biocombustíveis geram questionamentos éticos, políticos, ambientais e econômicos como mostrado anteriormente. Desta forma, os combustíveis de segunda e terceira geração vêm ganhando cada vez mais espaço ao longo do tempo.

Desta forma, as microalgas surgem como uma possível solução para o problema energético do mundo sem, no entanto, concorrer por áreas que serviriam para a plantação de alimentos. Porém, a tecnologia do processo produtivo para a fabricação de biocombustíveis de terceira geração encontra-se em diferentes fases de desenvolvimento de tecnologia, dependendo do país em questão.

Panorama Nacional da Produção de Biocombustíveis Utilizando Microalgas

Segundo a Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) o Brasil ocupa hoje uma posição privilegiada em relação ao resto do mundo. No Brasil, cerca de 45% da energia consumidas no Brasil e 18% dos combustíveis são provenientes de fontes renováveis. No resto do mundo, apenas 14% dessa energia são de fontes renováveis. Neste sentido, o Brasil tem se mostrado pioneiro no mercado mundial no uso de biocombustíveis (Figura 2).

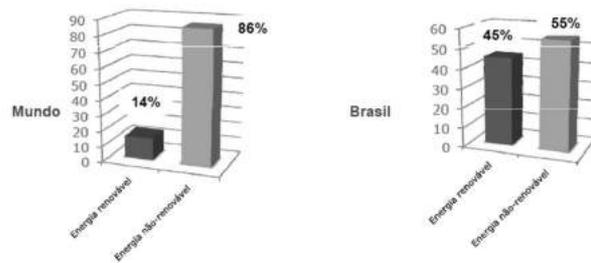


Figura 2- Comparação da matriz energética do Brasil, e do restante do mundo. Fonte EPE-Ministério de Minas e Energia.

O Brasil produz, em escala comercial, os biocombustíveis de primeira e de segunda geração, e pode-se dizer com segurança que o país possui o domínio dessa tecnologia. O etanol produzido através da cultura de cana-de-açúcar representa o principal biocombustível do Brasil em substituição à gasolina. Outras fontes de biomassa já estão sendo pesquisadas para dar suporte ao desenvolvimento de novas fontes renováveis para a produção de energia. Recentemente, outro tipo de Biomassa surge como uma nova fonte energética nos países desenvolvidos e em desenvolvimento: as microalgas.

Os estudos de microalgas no Brasil começaram de forma descentralizada em 2005 por alguns institutos de pesquisa e universidades. Relatos científicos deste período demonstram que os estudos com esses microrganismos tinham como principal foco a parte nutricional (utilização na alimentação humana ou no complemento de rações animais), econômicas e ecológicas^{10,11,e 12}.

Recentemente, os estudos estão mudando o foco e apontam as microalgas como potencial fonte para a produção de energia, principalmente, devido às condições climáticas do Brasil. CARIOCA¹³ SOUZA¹⁴ e MENEZES¹⁵ demonstram que as microalgas possuem um grande potencial para a produção de biocombustíveis, devido ao seu elevado teor de lipídios. RÓS¹⁶ cita que fontes de biodiesel utilizadas no Brasil, oriundas de gordura animal e vegetal podem ser inovadas com a utilização das microalgas e cianobactérias, especialmente, pela sua facilidade de cultivo.

Um estudo realizado por MENDES¹⁴ desenvolveu um trabalho taxonômico com as espécies nativas de



microalgas nas proximidades da cidade de Salvador, e avaliou a possibilidade destas serem utilizadas para suprir as espécies brasileiras para a produção de biodiesel.

Projetos Desenvolvidos sobre Microalgas no Brasil

O Brasil possui algumas iniciativas para o desenvolvimento de pesquisas sobre a produtividade e a potencialidade de utilização de microalgas para geração de biocombustíveis de terceira geração. Seguem abaixo as iniciativas mais promissoras que estão sendo desenvolvidas no país relacionadas a este tema.

No Estado do Paraná, especialmente na cidade de Londrina, existe um laboratório destinado ao estudo de microalgas. Os estudos tiveram seu início em 2009, como iniciativa da IAPAR (Instituto Agrônomo do Paraná).

O laboratório foi inaugurado em outubro de 2010, como resultado de parcerias entre IAPAR (Instituto Agrônomo do Paraná), COPEL (Companhia Paranaense de Energia), TECPAR (Instituto de Tecnologia do Paraná), UEL (Universidade Estadual de Londrina) e UEM (Universidade Estadual de Maringá)¹⁷. O projeto visa comercializar o biodiesel a preços competitivos no mercado. Espera-se retorno dos investimentos em torno de 5 a 10 anos¹⁷.

A equipe possui catalogada mais de 70 cepas nativas de microalgas para a produção de microalgas, e adquiriu oito espécies que foram catalogadas pela Universidade do Texas. Essas microalgas, tanto catalogadas, quanto importadas estão sendo avaliadas quando a sua produção de lipídeos¹⁸.

Além disso, está sendo estudada a possibilidade de incluir resíduos de origem agrícola, pecuária ou industrial como alternativa para minimizar os custos realizados com suplementação de nutrientes que as microalgas necessitam para a seu crescimento. Estão sendo avaliados resíduos líquidos de suíno biodigerido, podendo assim ser uma alternativa econômica para essa atividade e com sustentabilidade ambiental.

Existe hoje desenvolvida uma planta piloto para cultivo de microalgas. A planta piloto consiste de quatro tanques revestidos com vinil e interligados com capacidade de nove mil litros, com reciclagem do meio de cultivo. Neste sistema interligado e com agitação

contínua, será testado o crescimento das microalgas e seu potencial para a produção de biomassa para extração de óleo e outros compostos de interesse econômico.¹⁹

Diante da potencialidade do Brasil para a produção de microalgas, algumas empresas nacionais e multinacionais também realizam investimentos na estruturação de sistemas de produção de microalgas no Brasil

O grupo brasileiro JB, em parceria com a empresa SAT (See Algae Technology) da Áustria, visa produzir etanol e ração animal, a partir de microalgas cultivadas em uma planta piloto de microalgas instalada em Recife-PE. O projeto é baseado na tecnologia de prismas solares, desenvolvida pela SAT, capaz de concentrar a luz solar nos tanques de cultivo, por meio do uso de fibras ópticas²⁰.

A empresa parceira SAT, possui sua sede em Viena na Áustria e apresenta grande expertise nesse mercado. É detentora da patente para o desenvolvimento da fazenda de algas para produção de bioquímicos (cosméticos e suplementos alimentares), ração animal e combustível (bioetanol e biodiesel). Possui planta piloto na Áustria em funcionamento desde 2010.

O grupo JB, a mais de 40 anos, dedica-se ao cultivo da cana-de-açúcar e seus derivados, inaugurou no ano de 2012, na cidade de Vitória de Santo Antão, a primeira planta do Brasil de biodigestão da vinhaça para a recuperação do Gás Metano (CH₄), para geração de energia elétrica. Esta planta está instalada dentro da usina de etanol do grupo JB. A instalação da planta foi concluída em 2013²⁰.

O Brasil apresenta um excelente mercado para o desenvolvimento desta tecnologia, visto que possui mais de 400 usinas geradoras de etanol, além de ser favorecido pelo clima, em especial na região do Nordeste. Para este projeto, as algas utilizadas serão as mesmas utilizadas na Áustria, e serão também comercializados subprodutos para a indústria de suplementos alimentares e cosméticos²⁰.

A EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) Agroenergia sediada em Brasília, Distrito Federal, também realiza pesquisa sobre microalgas, essas iniciativas tiveram seu início em 2012.

A instituição conta com parceiras da Embrapa Amazônia Oriental, Embrapa Pantanal, a Embrapa Suínos e Aves, Fundação Oswaldo Cruz (FIOCRUZ), Instituto Botânico de São Paulo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRS) e Fundação Universidade do Rio Grande (FURG). Os pesquisadores pretendem



aproveitar resíduos das usinas sucroenergéticas para cultivar microalgas, gerando óleo para produção de biodiesel e biomassa residual que pode servir de matéria-prima para etanol, carotenóides e outros pigmentos de alto valor agregado²¹.

O projeto busca microalgas de alto rendimento na biodiversidade brasileira, especialmente na Amazônia e Pantanal. Estirpes serão isoladas, testadas e selecionadas quanto à capacidade de crescimento em meios à base de vinhaça e aerados com diferentes concentrações de gás carbônico (CO₂), dois resíduos abundantes de usinas de açúcar e etanol. A vinhaça é rica em Nitrogênio, Fósforo e Potássio (NPK) – nutrientes tão essenciais para as microalgas, quanto para as plantas. Além de agregar valor a esse resíduo, hoje empregado na fertirrigação de canaviais, as microalgas poderiam consumir o carbono liberado na produção de etanol, tornando-a ainda mais sustentável.

A abundância de nutrientes da vinhaça vem acompanhada de características menos favoráveis como acidez e pouca translucidez, o que pode comprometer a capacidade das microalgas fazerem fotossíntese. A equipe envolvida no projeto trabalhará no escalonamento da produção das cepas que se mostrarem mais promissoras nas bancadas. O desafio será encontrar o ponto ótimo entre o fornecimento de insumos, o crescimento das microalgas e a obtenção de óleo e biomassa.

A integração com uma indústria de biocombustível já estabelecida no país é um dos diferenciais desse projeto. Isso reforçaria a inserção das usinas sucroenergéticas e do cultivo de microalgas no conceito de biorrefinaria, que prevê o aproveitamento total da biomassa, minimizando a geração de resíduos.

Em busca de estirpes com alto rendimento, está prevista a caracterização genômica das linhagens promissoras, pois pesquisadores detectaram ser uma área ainda carente de resultados científicos. É preciso desenvolver cepas de microalgas adaptadas às diferentes condições climáticas do Brasil, que sejam resistentes a pragas e boas competidoras em sistemas de cultivos abertos²¹.

O projeto tem como principal foco a obtenção de uma nova fonte de óleo para a produção de biodiesel. No entanto, o projeto irá caracterizar a biomassa residual, buscando potencial para geração de produtos de alto

valor agregado, como carotenóides e outros pigmentos. Avaliarão ainda a possibilidade da microalga ser utilizada para produzir mais um biocombustível, o etanol celulósico. A ideia é que os biocombustíveis não sejam os únicos produtos responsáveis por “pagar” a produção das microalgas, mas que o custo seja dividido com outros itens²¹. Outra empresa brasileira que conduz pesquisas com microalgas é a Algae Biotecnologia Ltda. Esta empresa é a pioneira no desenvolvimento tecnológico de sistemas de cultivo de microalgas e cianobactérias no Brasil e na América Latina.

Segundo a empresa, o Brasil terá um atraso de cinco a dez anos na produção do biocombustível de microalgas. No entanto, a empresa aposta na produtividade de microalgas para dar sobrevida à empresa. Uma delas é o uso da biomassa de microalgas para nutrição animal, em substituição à farinha de peixe. O potencial de produção de biocombustíveis, de outros compostos de interesse industrial e sequestro de CO₂, a partir destes microrganismos, é imensurável, e por meio de um projeto estruturado de pesquisa, a Algae, em breve, disponibilizará processos e equipamentos para a sua utilização comercial.

Essa empresa possui uma planta piloto de cultivo de microalgas em parceria com a Universidade Federal de São Carlos (UFSCAR). Nesse modelo, a vinhaça, resíduo poluente derivado da destilação do etanol, é utilizada como base para o meio de cultivo.

Outra empresa que investe em pesquisas de microalgas é a estatal brasileira PETROBRAS (Petróleo Brasileiro SA). A empresa iniciou em 2006 os estudos em laboratório com microalgas. A Petrobras instalou uma planta de cultivo de microalgas próximo à cidade de Natal-RN e aposta no aproveitamento da água de produção de petróleo como fonte de nutrientes para as microalgas. Esse projeto é realizado em parceria com a Universidade Federal do Rio Grande do Norte-UFRN e tem foco na produção de biodiesel.

Hoje essa parceria possui seis tanques, com quatro mil litros cada, no Rio Grande do Norte, lugar que acredita ser mais propício à produção. É a chamada fase-piloto, que vem depois do laboratório e antes da demonstração, que deverá ser iniciada no fim deste ano. A empresa projeta a chegada do biocombustível ao mercado brasileiro até 2018.



Outro exemplo de empresas brasileiras que estão desenvolvendo estudo sobre microalgas, é a parceria entre a empresa brasileira BUNGE e a empresa americana SOLAZYME. As microalgas serão cultivadas em sistemas heterotróficos, utilizando a sacarose do caldo de cana-de-açúcar como fonte de carbono, com o objetivo de servir de matéria-prima para a produção de cosméticos, químicos renováveis e biocombustíveis²³. Até o momento, o Projeto já identificou dez espécies de microalgas, capazes de crescer em água de produção de petróleo. No entanto, o maior desafio para este estudo é a produção em larga escala, além de passar pela aprovação dos Biocombustíveis pela ANP, para serem comercializados.

No entanto, até o momento, essas pesquisas sobre microalgas se encontram em fase de Pesquisa e desenvolvimento, e não está estabelecida a produção comercial de algas para biocombustíveis. Como demonstrado acima, as pesquisas no Brasil, relacionadas à produtividade de microalgas para biocombustíveis, encontram-se em diferentes fases de desenvolvimento, e são desenvolvidas por empresas privadas e alguns órgãos federais.

Considerações Finais

Este trabalho aponta os principais projetos que estão sendo desenvolvidos no Brasil na área de microalgas. Embora existam alguns projetos, este número poderia ser mais expressivo.

Para aumentar o número de projetos relacionados à fabricação de biocombustíveis, utilizando microalgas, seria importante um olhar mais crítico dos órgãos de fomento do Governo Federal do Brasil, fornecendo subsídios para essa linha de pesquisa.

Parcerias estratégicas são de fundamental importância quando se trata de projetos, tanto de pequeno, quanto de grande porte. Nenhum órgão, empresa ou instituto de pesquisa, reúnem individualmente todos os conhecimentos necessários nas diferentes áreas de atuação de um projeto. Parceiros envolvidos, trabalhando com objetivos comuns, aumentam a chance dos projetos atingirem seus objetivos.

Para deslançar a pesquisa de microalgas no Brasil, é preciso, então, unir as empresas privadas nacionais e internacionais que possuem elevados valores de

investimento com a expertise da academia e demais parceiros. No entanto, é necessário dar maior agilidade do processo de entrega do produto final, pois a academia está acostumada a trabalhar com um tempo de entrega maior do que aqueles requeridos pelas empresas.

Embora o Brasil tenha se lançado na pesquisa e produção de biocombustíveis de terceira geração, com atraso, se comparado aos demais países como Estados Unidos, Japão e União Europeia, existem alguns projetos sendo desenvolvidos no Brasil que buscam desenvolver essa linha de pesquisa.

Esses projetos não são feitos de uma forma homogênea e se diferem, no que diz respeito a investimentos, parceiros, fontes de recursos disponíveis e grau de maturidade dos objetivos propostos.

O Brasil possui condições climáticas ideais para o cultivo de microalgas durante o ano todo, principalmente, nas regiões Norte e Nordeste, em função de apresentarem uma intensa radiação solar e temperaturas elevadas durante o ano. Entretanto, necessita de desenvolvimento de tecnologias para que o custo final do processo possa colocar o biodiesel de microalgas como forte concorrente do biodiesel de segunda geração.

No entanto, essas diferenças nas pesquisas e na sua aplicação, devem-se a vários fatores, como políticas públicas, iniciativa privada, grau de maturidade científica dos países e principalmente em função da tecnologia desenvolvidas por estes países durante o seu processo produtivo, e em função dos custos envolvidos.

Se o governo em conjunto com empresas privadas do Brasil tiver como prioridade a busca de novos biocombustíveis, para a substituição do petróleo, é possível que o Brasil, mesmo com algumas dificuldades iniciais, desenvolva tecnologia suficiente e domínio do processo produtivo para a produção de combustível de terceira geração, assim como foi desenvolvida a tecnologia para o desenvolvimento da tecnologia de produção de combustível de primeira e de segunda geração.

No entanto, sem o incentivo de políticas públicas específicas para este fim, ou seja, se as iniciativas partirem apenas das indústrias privadas, o Brasil ficará sempre a um ou dois passos atrás dos demais países não apenas nestas áreas, como nas demais.

Como apresentado, a busca por novos combustíveis alternativos, em substituição àqueles oriundos de



combustíveis fósseis, vem ganhando cada vez mais espaço nas pesquisas mundiais, incluindo o Brasil. No entanto, o Brasil, mesmo que alguns passos atrás, também vem desenvolvendo pesquisas nesta área.

Embora o Brasil tenha se lançado na produção de biocombustíveis de 3ª geração recentemente, o desenvolvimento de um sistema de produção de microalgas de baixo custo, adaptado à realidade regional, poderá garantir, ao país, papel de protagonismo no cenário mundial em médio prazo e longo prazo.

Referências

- Bischoff, K.P.; Gravois, K.A.; Eagan, T.E.; Hoy, J.W.; Kimbeng, C.A.; Laborde, C.M.; Hawkins, G.L. Registration of "L79-1002" sugarcane. *Journal of Plant Registrations*. **2008**, 2:211-217
- Alexander, A.G. 1988. Sugarcane as a source of biomass. In: Sansoucy, R.; Aarts, G. e Preston, T.R. (eds.). Sugarcane as feed. *FAO Expert Consultation, Proc.*, Santo Domingo, Dominican Republic, July. Roma: FAO Corporate Document Repository. **1986**, 11p.
- Alexander, A.G. The energy cane alternative. Amsterdam: Elsevier. **1985**, 509p.
- Soares, L. C. S. R. Destoxificação biológica do hidrolisado hemicelulósico de bagaço de cana-de-açúcar para utilização em processos fermentativos. 2012. 112 f. Dissertação (Mestrado em Ciências – Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia Industrial na Área de Microbiologia Aplicada) – Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo, Lorena, **2012**.
- Giamalva, M.J.; Clarke, S.J.; Stein, J.M. Sugarcane hybrids of biomass. *Biomass*. **1984**, 6:61-68.
- Samuels, G.; Alexander, A.G.; Rios, C.E.; Garcia, H. The production of energy cane in Puerto Rico: The Hatillo Project. *Journal of the American Society of Sugar Cane Technologists* 3: **1984**, 14-17.
- Santos, F.; Borém, A.; Caldas, C. 2012. Cana-de-açúcar: bioenergia, açúcar e etanol: tecnologias e perspectivas. – 2. ed. rev. e ampl. – Viçosa, MG: Os Editores, **2011**. 637p.
- Johnson, J.M-F.; Coleman, M.D.; Gesh, R.; Jaradat, A.; Mitchell, R.; Reicosky, D.; Wilhelm, W.W. Biomass-bioenergy crops in the United States: a changing paradigm. *The Americas Journal of Plant Science and Biotechnology*. **2007**, 1(1):1-28.
- Hill, J.; Nelson, E.; Tilman, D.; Polasky, S.; Tiffany, D. Environmental, economic, and energetic costs and benefits of biodiesel and ethanol biofuels. *Proceedings of the National Academy of Science*. **2006**, 103(43):11206-11210.
- Balbo, J.M.; Padovani Neto, A. Excedentes de energia elétrica e sobra de bagaço para diferentes concepções e sistemas de conversão e utilização de energia aplicáveis a indústria sucroalcooleira. *STAB, Açúcar, Álcool, e Subprodutos*. **1987**, 692:52-58.
- Campos, R.M. Valor econômico do bagaço. *Brasil Açúcar*. **1987**, 55(105):20-24.
- UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais Guia de Prática de Análise Imediata de Combustíveis Sólidos. Curso de Engenharia Mecânica. **2014**.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 8633: determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro, **1984**. 36 p.
- Gonçalves, J.E. Avaliação energética e ambiental de bagaço de cana-de-açúcar produzidos com rejeitos de resíduos sólidos urbanos e madeira de *Eucalyptus grandis*. Botucatu, **2010**.
- Silva, M. B. e Morais, A. S. Avaliação Energética do Bagaço de Cana em Diferentes Níveis de Umidade e Graus de Compactação; XXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção/ A integração de cadeias produtivas com a abordagem da manufatura sustentável. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 13 a 16 de outubro de **2008**, p. 3.
- Nogueira, M. A. F. S.; Garcia, M. S.; Gestão dos resíduos do setor industrial sucroenergético: estudo de caso de uma usina no município de Rio Brillhante, Mato Grosso do Sul. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental – RGET*, e-ISSN 2236 1170 – v. 17n. 17 Dez **2013**, p. 3275 – 3283.
- Balbo, J. M. A mundialização do etanol aumenta a oferta da bioeletricidade – Opiniões: Sucroenergético: cana, açúcar, etanol & bioeletricidade, nº 38. Divisão C – **2013**.

Luiza Paula C. Lopes^{1*} & Arnoldo S. Cabral²

¹Instituto SENAI de Inovação-Biomassa. Av. Afonso Pena, 1206, Bairro Amambai. Campo Grande/ MS

²Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA, São José dos Campos, SP

*E-mail: llopes@ms.senai.br

Método Gravimétrico de Determinação de Umidade Comparativo à Determinação por Infravermelho

José R. Gonçalves, Wellington A. Morais, Ana Cleide dos Santos & Renata M. Gonçalves

A validação de métodos analíticos é uma das formas de se comprovar a eficiência de uma metodologia aplicada em laboratórios de físico-química. Sendo o parâmetro “percentual de umidade e voláteis” de grande relevância em alimentos para animais, validou-se o método de determinação de umidade e voláteis por infravermelho, comparando-o com o método oficial descrito pela Portaria 108 - Métodos analíticos para controle de alimentos uso animal, de 1991- do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. As matrizes foram: produtos e subprodutos de origem vegetal, animal, sais minerais, rações e concentrados.

Palavras-Chave: *infravermelho; umidade; validação.*

The validation of analytical methods is one way to prove the efficiency of a methodology applied in physical chemistry laboratories. Being the “percentage of moisture and volatile” parameter of great importance in animal feed, validated the method of determination of moisture and volatile infrared comparing it with the official method described by Ordinance 108 - Analytical methods for food control use animal, from 1991 to the Ministry of Agriculture, Livestock and Supply. Matrices were: Products and byproducts of concentrated vegetable, animal, mineral salts, and rations.

Keywords: *infrared; moisture; validation.*

Introdução

A ABNT NBR ISO/IEC 17025:2005 - Requisitos gerais para Laboratórios de Ensaio e Calibração - determina diversos parâmetros para instituições que desejam implantar um Sistema de Gestão da Qualidade para sua rotina de trabalho e comprovar a eficiência analítica do trabalho realizado. Essa prevê o cumprimento de diversas exigências, citam-se como exemplos: Calibração de equipamentos, documentação atualizada e sem ambiguidades, além da melhoria contínua em vários níveis¹.

Um dos requisitos da norma é a Validação de Métodos Analíticos. Essa utiliza dados estatísticos como a Análise de Variância (ANOVA), One-Way, Teste T de Student e vários outros para comprovar a eficiência de um método².

O objetivo deste trabalho foi a validação da análise de determinação da umidade e voláteis por infravermelho em comparação ao método gravimétrico tradicional descrito na Portaria 108, métodos analíticos para controle de alimentos uso animal de 1991³. As análises aconteceram no Laboratório de Alimentos para Animais do Laboratório Nacional Agropecuário (LANAGRO) em Goiás. As matrizes que compuseram a análise foram produtos e subprodutos de origem vegetal, animal, sais minerais, rações, concentrados e ingredientes.

CONCEITOS BÁSICOS DE VALIDAÇÃO

Em sistemas de qualidade, a avaliação da eficiência de uma metodologia analítica é uma das etapas fundamentais ao processo de gestão. O principal objetivo de se avaliar um método analítico é vislumbrar se ele está adequado ao que se propõem identificar ou quantificar.

É possível utilizar várias metodologias para a determinação de algum parâmetro físico-químico, para tanto, é necessário que o procedimento seja corretamente validado. Validar é provar que um método analítico é aceito para a proposta pretendida. Mediante essa ferramenta, fatores como a imprecisão ou inexatidão do método podem ser reduzidas ou controladas. A validação de um método analítico prevê o cumprimento de vários parâmetros, quando aplicáveis, tais como: linearidade de resposta, curva de calibração, sensibilidade, limites de detecção, limites de quantificação, precisão e exatidão⁴.

Materiais e Métodos

DETERMINAÇÃO DE UMIDADE PELO MÉTODO DE REFERÊNCIA

De acordo com a Portaria 108 de 1991, o método de determinação de umidade aplica-se a produtos ou subprodutos de origem animal, vegetal, mineral e a rações, concentrados e ingredientes. Baseia-se na perda de umidade e substâncias voláteis à temperatura de 105 ° C.

Para a marcha analítica, pesaram em cadinhos de porcelana, isentos de umidade, em torno de 2,0 g das amostras em balança analítica. Colocaram-nas em estufa, pré-aquecida a 105° C (± 1°C) até peso constante (4 a 6 horas) ou por mínimo de 6 h. Após esse período, colocaram-se as amostras no dessecador até temperatura ambiente para a pesagem final. Para a determinação do teor de umidade, utilizou-se a seguinte fórmula (método gravimétrico):

$$\text{Umidade \%} = \frac{(A - B)}{C} \times 100 \quad (1)$$

Onde A = Peso do recipiente + amostra, B = Peso do recipiente + amostra após secagem e C = Peso da amostra³.

DETERMINAÇÃO DE UMIDADE POR INFRAVERMELHO

Para a determinação de umidade por infravermelho, utilizou-se a balança da Marca Ohaus modelo MB 200. De acordo com Park e Antônio (2007)⁵, a determinação de umidade procede-se como descrito a seguir: um aparelho portátil obtém resultados rápidos sobre o percentual de umidade. A amostra é colocada em um prato de alumínio, os vapores de água saem do analito e a massa é quantificada. Dentro de uma câmara, a balança de calor é protegida por meio de um colchão de ar, dessa forma, é garantida a circulação de ar interna.

Em equipamentos de secagem por infravermelho, a balança faz a leitura do conteúdo de umidade pela diferença do peso da material em estudo. Esse método mostra-se bastante eficaz, pois a penetração do calor dentro da amostra encurta o tempo de secagem em até 1/3 do tempo total. Utiliza-se uma lâmpada de radiação infravermelha com 250 a 500 watts, há equipamentos que



alcançam temperaturas de até 700 °C. Quanto à distância da lâmpada à amostra, recomendam-se entre de 10 mm a 15 mm, dessa forma, previne-se a decomposição do material em estudo⁶.

A análise gravimétrica oficial de determinação de umidade orienta que as amostras permaneçam na estufa a 105 °C, ajustou-se a balança com essa faixa de trabalho. O Tempo de permanência do alimento para animal, analisado no equipamento, foi de 20 minutos para cada amostra. Ressalta-se que é possível ajustar a temperatura e o tempo de permanência no equipamento, de acordo com a matriz trabalhada. O resultado é apresentado em porcentagem pelo próprio equipamento.

IMPORTÂNCIA DA DETERMINAÇÃO DE UMIDADE EM ALIMENTOS PARA ANIMAIS

Recomenda-se monitorar os teores de umidade em produtos destinados à alimentação animal, desde a produção, estocagem até a distribuição do produto, visto que a conservação desse está diretamente ligada a esse parâmetro Físico-Químico. Produtos úmidos oferecem condições para o desenvolvimento de micro-organismos e suas toxinas. O aumento do teor de umidade deve-se, na maioria dos casos, ao fato de a estocagem ocorrer de forma incorreta, havendo, até mesmo, um amontoado do produto acabado guardado em situações impróprias.

Além dos problemas relacionados à microbiologia do alimento, o excesso deste parâmetro físico-químico pode acarretar diluições dos nutrientes do alimento, diminuindo o valor nutritivo. Ressalta-se, porém, que baixos teores de umidade em alimentos para animais também propiciam o surgimento micro-organismos⁷.

Resultados e Discussão

Na Tabela 1, constam os valores obtidos pelos dois métodos de determinação de umidade. Observando os resultados da tabela, percebe-se que para as mesmas amostras, são obtidos resultados bastante próximos, mesmo quando se utilizam metodologias analíticas distintas. Apesar de a tabela apresentar valores obtidos por matrizes diferentes, vislumbra-se que os valores de média e desvio padrão apresentaram-se semelhantes para os dois tipos de determinação de umidade.

Tabela 1: Resultados analíticos dos métodos gravimétrico e infravermelho para a determinação de umidade e voláteis, 2014.

Replicatas	Umidade e Voláteis (método gravimétrico)%	Umidade e Voláteis (Infravermelho)%
1	10,37	10,22
2	10,13	10,18
3	10,56	10,60
4	10,33	10,70
5	10,03	10,45
6	10,79	10,90
7	10,93	10,90
8	10,99	11,00
9	10,91	10,50
10	10,85	10,90
11	5,12	5,50
12	5,24	5,40
13	5,20	5,20
14	5,07	5,10
15	5,31	5,40
Média	8,79	8,86
Desvio Padrão	2,65	2,61

Os dados também foram tratados estatisticamente com o “Teste T de Emparelhado” e concluiu-se que não há diferença significativa entre os métodos, ou seja, a metodologia a ser validada, determinação de umidade por infravermelho, é eficaz e aplicável à rotina laboratorial.

Ressalta-se que o objetivo da validação foi alcançado, tendo em vista que a comparação entre as duas metodologias demonstrou analiticamente e estatisticamente que o método em validação, umidade por infravermelho, quantificou de maneira satisfatória os teores de umidade das amostras, fato comprovado pelos resultados do método de referência- gravimétrico⁴.

Conclusão

A validação de métodos analíticos é uma ferramenta capaz de demonstrar não apenas a exatidão e a precisão de um método, mas também uma forma de propor novos caminhos para análises, ganho de tempo e/ou de reagentes, além da comprovação da eficiência do Laboratório.



Por meio da validação do método de determinação de umidade e voláteis por infravermelho, percebe-se redução no tempo de análise e, quando necessária, a confirmação de resultados obtidos pelo método oficial.

Destaca-se que a validação do método analítico descrito neste artigo enquadra-se em Sistemas de Gestão da Qualidade que têm por finalidade implementar ou manter a Norma ABNT NBR ISO/IEC 17025:2005 (Requerimentos Gerais para Laboratórios de Ensaio e Calibração).

Agradacimento

Agradecemos aos Responsáveis Técnicos do Setor de Alimentos para Animais do Laboratório Nacional Agropecuário em Goiás (LANAGRO-GO) pela gentileza de permitir a realização desse artigo científico.

Referências

1. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia- Inmetro. Acreditação de Laboratórios (ABNT NBR ISO/IEC 17025:2005), **2012**.
2. Lavra, Zênia Maria Maciel; Neto, Pedro José Rolim; SILVA, Rosali Maria Ferreira da; Medeiros, Flávia Patrícia Morais de. Desenvolvimento e validação de método analítico para determinação simultânea de lamivudina, zidovudina e nevirapina em comprimidos dose-fixa combinada por cromatografia líquida de alta eficiência. Quím. Nova, v. 31, n. 5, 969-974, **2008**.
3. Brasil. Ministério da Agricultura e Abastecimento (Mapa). Métodos analíticos para controle de alimentos uso animal. Portaria nº 108 de 04 de setembro de **1991**.
4. Cotta, Jussara Aparecida Oliveira; Marques, Almir Rogério; Rezende, Maria Olímpia Oliveira; Landgraf, Maria Diva. Validação do método para determinação de nitrogênio kjeldahl total. Revista Analytica, Dezembro **2006**/Janeiro **2007**, Nº26.
5. Park, Kil Jin; Antonio, Graziella Colato. Análises de materiais biológicos, **2006**.
6. Heloisa, Máscia Cecchi; Fundamentos teóricos e práticos em análise de alimentos. 2. ed. revista, Editora: Unicamp, **2012**.
7. Custódio, Daniel Pettersen; Brandstter, Eduardo Valcácer; Oliveira, Itamar Pereira; Oliveira, Luana Carvalho; Santos, Klayto José Gonçalves; Machado, Orlandina Ferreira; Araujo, Ailton Antônio de. Ração: Alimento animal perecível – Trabalho de revisão sobre conservação de alimento animal. Revista Eletrônica Faculdade Montes Belos, Goiás, ISSN 1808-8597, v.1, n.2, p. 131 - 147, **2005**

José R. Gonçalves¹,
Wellington A. Morais², Ana
Cleide dos Santos³ & Renata
M. Gonçalves^{4*}

¹Faculdade de Tecnologia SENAI Roberto Mange, técnico do LANAGRO-GO. Endereço: Rua da Divisa, s/n, Setor Jaó, CEP 74674-025, Goiânia-GO.

²Instituto Federal Goiano, técnico e estagiário do LANAGRO-GO. Endereço: Rua da Divisa, s/n, Setor Jaó, CEP 74674-025, Goiânia-GO.

³LANAGRO-GO. Endereço: Rua da Divisa, s/n, Setor Jaó, CEP 74674-025, Goiânia-GO.

⁴Centro de Treinamento da EMATER-GO. Rodovia R2, quadra, área, lote AR-3, Campus II-UFG, CEP 74690-815, Goiânia-GO.

*E-mail: renata.nut@gmail.com



Análise Físico-Química e Biológica da Água do Lago do Jardim Botânico de Goiânia (GO)

Carlos Eduardo R. Sant'Ana, Georgia R. S. Sant'Ana & Luiz C. P. da Silva

O presente trabalho objetivou analisar fatores físico-químicos e biológicos da água do lago do Jardim Botânico de Goiânia e compará-los com os valores preconizados pela Resolução nº 357/2005 do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. As amostras de água foram coletadas mensalmente, nas estações seca e chuvosa, de junho de 2004 a julho de 2005. A análise dos dados sugere a presença de impactos ambientais, como descarga de esgotos clandestinos e infiltrações da rede de esgoto domésticos, o que indica a necessidade de políticas ambientais voltadas para conservação e manejo desses ecossistemas aquáticos e de seu entorno.

Palavras-chaves: *Parâmetros físico-químicos, análise da água, ambientes aquáticos.*

Physicochemical and biological analyses were carried out on water samples collected monthly for the period of one year from June 2004 to July 2005, from a lake in the Botanical Garden of Goiânia. The results obtained were compared with CONAMA standards (Resolution No. 357/2005) and indicated the presence of environmental impacts such as clandestine disposal of sewage and infiltration of domestic sewage. Educational programs and environmental policies for conservation and management of these aquatic environments must be organized by researchers and government agencies.

Keywords: *Physico-Chemical parameters, water analyses, aquatic environments.*



Introdução

A água é essencial para existência e bem-estar do ser humano, devendo ser disponível em quantidade suficiente e boa qualidade, para garantir qualidade de vida^{1,2}; além de ser um recurso que influencia a economia de diversos países^{3,4,5,6}. O ambiente hídrico e toda a estrutura biótica e abiótica que o compõem têm sofrido elevadas pressões antrópicas nas últimas décadas e diversas técnicas de agricultura utilizadas têm provocado grande degradação ambiental^{7,8,9}. Também são inúmeras as impurezas que se apresentam nas águas naturais, algumas inócuas e outras extremamente perigosas^{10,11,12}.

Desde 1950, o Brasil apresenta problemas de escassez hídrica que decorrem principalmente do crescimento populacional e industrial, exclusão social e a expansão agrícola^{9,13,14}, sendo os efluentes domésticos os grandes responsáveis pela degradação dos recursos hídricos¹⁵.

O Brasil possui uma grande oferta de água doce superficial, detém 11,5% da água doce superficial mundial e 34,9% do continente americano e é o 25º país com maior oferta per capita¹⁶. Apesar de o Brasil ser um dos países de maior disponibilidade hídrica, porém, por conta de suas dimensões geográficas e condições climáticas diferenciadas¹⁷, a gestão dos recursos hídricos tem merecido, nos últimos anos, ampla discussão em razão da degradação qualitativa e quantitativa desses recursos¹⁸, que incluem as consequências de eventuais mudanças climáticas¹⁹.

A análise da água de um manancial pode evidenciar o uso inadequado do solo, os efeitos do lançamento de efluentes, suas limitações de uso e seu potencial de autodepuração²⁰, isto é, sua capacidade de restabelecer o equilíbrio após recebimento de efluentes. Dentre os parâmetros utilizados para qualificar a água, estão os físico-químicos (pH, cloretos, alcalinidade, nitratos, fosfatos, turbidez, condutividade), os biológicos (clorofila-*a*) e microbiológicos (coliformes fecais e totais)^{14,21,22}.

O presente trabalho teve como objetivo analisar fatores físico-químicos e biológico da água do lago do Jardim Botânico, localizado em Goiânia, Goiás, que se encontra em meio urbano sob interferência de atividades urbanas, a fim de compará-los com os valores de referência preconizados pela Resolução nº 357/2005 do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA¹¹.

Metodologia

O trabalho foi conduzido no lago do Jardim Botânico de Goiânia, Goiás. A área foi contemplada no projeto original de urbanização de Goiânia, elaborado pelo arquiteto Atilio Correia Lima. A partir da Lei Municipal 7.800, de 5 de março de 1998, a área passou a ter como finalidade “desenvolver pesquisa, divulgação, conservação, preservação e recuperação, além de programas de atividades de recreação e educação ambiental em logradouro”²³.

O Jardim Botânico está localizado na região sul de Goiânia (Figura 1). Limita-se ao sul com a Vila Santo Antônio (latitude 16 graus e 41 minutos sul), a noroeste com o Setor Pedro Ludovico (longitude 49 graus e 17 minutos oeste) e a leste com a Vila Redenção. Possui a forma de cauda de um peixe, com uma densa cobertura vegetal que apresenta diversos espécimes centenários de grande porte (coordenadas geográficas 0686358E e 8150179N e altitude de aproximadamente 815 metros). Destinava-se a preservar uma área de mata primitiva de cerca de 1.000.000 m², remanescente do início de Goiânia. Na década de 1960, sob a administração do Estado, a 3ª Radial, avenida que liga Goiânia ao município de Aparecida de Goiânia, cortou o Jardim Botânico ao meio, o que provocou a perda de aproximadamente 9.000 m². Na atualidade, o Jardim Botânico de Goiânia apresenta uma área total de 990.992 m², dividido em duas áreas: Área I, com 441.600 m² e Área II, com 558.400 m².²⁴

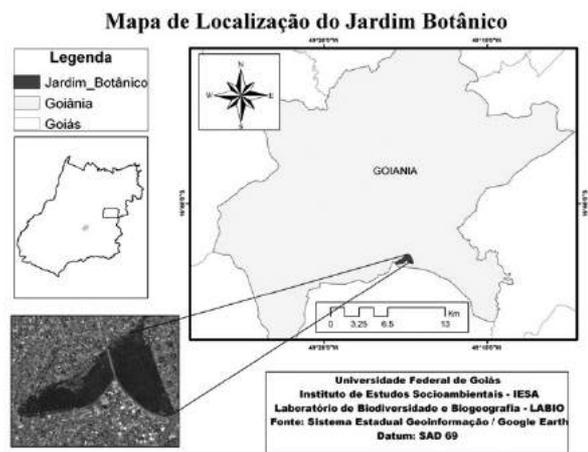


Figura 1. Mapa de localização do Jardim Botânico de Goiânia, Goiás.



O principal curso d'água do Jardim Botânico é o Córrego Botafogo, a partir do qual se formam três lagos, e que possui três nascentes: duas localizadas na Área I e uma, na Área II. A nascente principal se encontra fora da área de preservação, submergida em áreas residenciais e canalizada. O escoamento do lago se dá por uma canalização sob a Avenida 1ª Radial, encontrando-se com as águas provenientes da nascente da Área II e seguindo por toda extensão do Jardim Botânico (aproximadamente 2.618,74m), recebendo outros afluentes, águas pluviais e esgotos clandestinos ao longo de todo o seu percurso, aproximadamente 15 quilômetros de extensão, seguindo até o seu encontro com o Rio Meia Ponte^{24,25}.

Os dados referentes à pluviosidade mensal foram fornecidos pela equipe de Furnas (não publicados) e dados referentes à temperatura do ar e da água foram coletadas juntamente com as amostras de água nas datas de coleta. As amostras de água, por sua vez, foram coletadas mensalmente abrangendo parte das estações de seca e chuvosa, durante o período compreendido entre junho de 2004 a julho de 2005, exceto no mês de setembro de 2004 que, por problemas técnicos, não foi realizada a coleta. Os critérios para determinação dos pontos das coletas levam em consideração a facilidade de acesso, a representatividade dos pontos de amostragem em relação ao lago, a localização em área de grande urbanização, grande importância para a comunidade, dentre outros.

Foram analisados 12 parâmetros físico-químicos e um parâmetro biológico para o ambiente aquático em questão. As amostras de água foram coletadas sub-superficialmente, na margem dos lagos (região ecótica lântica), sendo acondicionadas em caixa com gelo, levadas ao laboratório ao menor tempo possível^{14,21,22}. Todas as coletas seguiram a norma NBR 9898/87 da ABNT²⁶, no que se refere à preservação, técnicas de amostragem, efluentes líquidos e corpos receptores e NBR 10679/88 da ABNT²⁷ de coleta, preservação e estocagem de amostras de águas minerais e de mesa. Alguns parâmetros, tais como pH, condutividade, oxigênio dissolvido, turbidez e temperatura da água, foram determinadas em campo, com o auxílio de uma sonda multiparâmetro da marca YSI 6600. Os métodos de análise do laboratório baseiam-se no Standard Methods²⁸, normas da ABNT^{26,27} e são descritos em manuais de qualidade^{21,22}. Os dados geográficos foram coletados com GPS GARMIN modelo ⁴⁵.

Resultados e Discussão

Na Tabela 1, são apresentados os valores obtidos para as variáveis físico-químicas e biológica nos pontos de coleta no lago do Jardim Botânico, Goiânia-GO. O padrão sazonal das chuvas foi bem marcado. Durante o período das coletas, o período que mais choveu foi do mês de dezembro de 2004 (300 mm). A precipitação

Tabela 1. Valores dos parâmetros físico-químicos e biológico analisados no lago do Jardim Botânico de Goiânia, no período de junho de 2004 a julho de 2005.

JARDIM BOTÂNICO																			
Variáveis	Unidade	jun-04	jul-04	ago-04	out-04	nov-04	dez-04	jan-05	mar-05	abr-05	mai-05	jun-05	jul-05	Média	Min	Máx	Desvio Padrão	CV%	CONAMA
Alcalinidade	mg/l CaCO ₃	23,72	27,55	30,70	35,06	37,15	34,59	31,50	25,59	26,09	28,95	33,83	29,50	30,35	23,72	37,15	4,21	13,88	*
pH		6,0	6,60	6,70	5,72	6,60	6,50	6,20	7,09	6,20	6,50	7,00	6,20	6,44	5,72	7,09	0,40	6,19	6,0 a 7,0
Condutividade	µS/cm	117,0	110,0	147,0	191,0	250,0	241,0	127,0	218,00	114,00	126,00	125,00	125,00	157,58	110,00	250,00	52,44	33,28	*
Oxigênio Dissolvido	mg/l	8,39	7,72	7,76	7,67	6,37	6,27	7,20	8,56	5,27	8,70	9,72	8,60	7,69	5,27	9,72	1,25	16,21	2,0 mg/LO ₂
Turbidez	NTU	5,0	6,50	5,0	8,20	10,30	8,90	6,20	11,00	3,20	4,70	10,50	12,50	7,67	3,20	12,50	2,98	38,88	100 NTU
Nitrogênio Total	mg/l	3,08	2,80	2,49	1,01	0,73	0,92	2,02	2,03	3,30	3,30	2,86	2,18	2,23	0,73	3,30	0,92	41,38	*
Amônia	mg/l	0,03	0,07	0,03	0,01	0,05	0,09	0,09	0,01	0,09	0,02	0,01	0,02	0,04	0,01	0,09	0,03	75,27	Máx. 5,6 mg/LN para pH 7,5 < pH < 8,0
Nitrito	mg/l	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,00	30,60	1,00 mg/LN
Nitrato	mg/l	2,80	2,70	2,40	0,67	0,49	0,62	1,75	2,00	3,20	2,50	2,00	1,80	1,91	0,49	3,20	0,90	47,18	10,00 mg/LN
Fósforo Total	mg/l	0,01	0,05	0,02	0,03	0,03	0,03	0,0	0,03	0,01	0,02	0,02	0,03	0,02	0,00	0,05	0,01	50,96	0,05 mg/LP
Ortofosfato	mg/l	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	#DIV/0!	*
Clorofila	µg/l	9,45	6,81	12,68	46,23	59,59	20,47	7,21	15,53	3,04	20,03	68,00	30,10	24,93	3,04	68,00	21,70	87,05	Máx. 60,00 mg/L
Cloretos	mg/l Cl-l	11,39	11,57	10,93	10,17	8,32	8,23	6,81	7,14	7,97	10,51	11,47	10,51	9,59	6,81	11,57	1,77	18,43	250mg/L Cl
Temperatura da Água	°C	22,01	20,02	23,87	25,40	26,36	25,89	26,16	27,00	24,00	24,20	22,90	22,50	24,19	20,02	27,00	2,08	8,60	*
Temperatura do Ar	°C	22,0	20,0	27,0	22,80	21,0	24,0	25,0	24,00	27,45	28,00	25,00	24,00	24,19	20,00	28,00	2,50	10,35	*



do mês de junho e agosto de 2004 foi 0,0 mm (Figura 2). A variação de temperatura do ar na área do lago do Jardim Botânico (Figura 3), nos meses de junho de 2004 a junho de 2005, apresentou um padrão sazonal cíclico com duas estações distintas: uma quente e úmida (abril, maio e agosto) e outra mais fria e seca (junho e julho), embora não tenha havido expressiva diferenciação entre os pontos de coleta ao longo dos meses.

De maneira geral, os períodos chuvosos podem ser considerados os de maior instabilidade para os corpos d'água tropicais. Isto é consequência das rápidas modificações que a chuva pode promover na água, que por sua ação como carreadoras de partículas e substâncias, sendo carreadas para os corpos d'água (material alóctone), pelos efeitos da diluição das chuvas mais intensas²⁹. Desta forma, as chuvas atuam, tanto como fonte de aumento nas concentrações de partículas e certas substâncias na água, quanto como fonte de diluição dessas partículas. Os efeitos se diferenciarão principalmente pela época do ano, segundo a frequência e intensidade das precipitações³⁰. A temperatura da água (Figura 4), no mês de março apresentou maior temperatura em média, ou seja, variando de 20,02°C e 27°C.

A grande maioria dos corpos d'água continentais tem pH variando entre 6 e 8. No entanto, podem-se encontrar ambientes mais ácidos ou mais alcalinos. Em ambos os casos, estes ecossistemas apresentam comunidades vegetais e animais característicos. Ecossistemas aquáticos que apresentam mais frequentemente valores baixos de pH têm elevadas concentrações de ácidos orgânicos dissolvidos de origem alóctone e autóctone²⁹.

Os valores de pH observados na zona eufótica apresentaram-se frequentemente ácido ou próximo de neutro, que pode ser decorrente da intensa decomposição e respiração que resultam na produção de CO₂ e diminuição do pH. Uma vez que o pH está relacionado ao equilíbrio das reações do ácido carbônico e das reações de carbonatos e bicarbonatos, todas relacionadas à concentração de CO₂, os maiores valores encontrados na zona eufótica são uma consequência da intensa atividade fotossintética nesta região (consumo de CO₂), como é o encontrado no mês de março e junho de 2005, em que os valores de pH estão entre o alcalino ou próxima de neutro. A menor média encontrada para os valores de pH 6,24 (Figura 5), foi encontrado em outubro de 2004,

sendo esse pH classificado como fracamente ácido ou próximo de neutro, ver tabela VI³¹.

A condutividade elétrica de uma solução é a capacidade desta em conduzir corrente elétrica. Considerando-se que essa capacidade seja uma função da concentração dos íons presentes, é de se esperar que em soluções de maior concentração iônica, maior será a condutividade elétrica. Por outro lado, em águas muito puras, ocorre o fenômeno inverso: maior será a resistência e maior a condutividade²⁹. O pH também influencia a condutividade elétrica, que depende das concentrações iônicas e da temperatura e indica a quantidade de sais existentes no corpo d'água, e, portanto, representa uma medida indireta da concentração de poluentes³². O período de agosto de 2004 a dezembro de 2004 apresentou os valores mais altos de condutividade elétrica (Figura 6). Altos valores obtidos para a condutividade elétrica são característicos de ambientes impactados, em geral, níveis superiores a 100 µS/cm.³³

A alcalinidade, por sua vez, representa a capacidade que um sistema aquoso tem de neutralizar ácidos. Esta capacidade depende de alguns compostos, principalmente bicarbonatos, carbonatos e hidróxidos, sendo que este último ânion é raro na maioria das águas naturais, ocorrendo geralmente em águas cujo pH é superior a 10. A alcalinidade reflete, em última instância, a capacidade que um ecossistema aquático apresenta em neutralizar (tamponar) ácidos a eles adicionados^{29,33}. De uma maneira em geral, todos os valores apresentaram-se relativamente altos com relação à concentração da alcalinidade (Figura 7). Os maiores valores encontram-se no mês de novembro de 2004 e junho de 2005 (entre 37,05 mg/l CaCO₃ e 33,83 mg/l CaCO₃).

Dentre os nutrientes associados ao processo de eutrofização, destaca-se o fósforo, geralmente, escasso em ambientes aquáticos tropicais, o que faz com que os aportes provenientes de esgotos domésticos, ricos em fósforo tenham efeitos muito pronunciados. A quantificação do fósforo nos lagos alvo de estudo, foi realizada mediante duas análises²⁸: a) fósforo solúvel reativo (ortofosfato); b) fósforo total. O ortofosfato é a principal forma de fósforo assimilado pelos produtores primários no ambiente aquático. O fósforo total inclui todas as formas de fósforo presentes no sistema, orgânicos/inorgânicos e particulados/dissolvidos, e sua

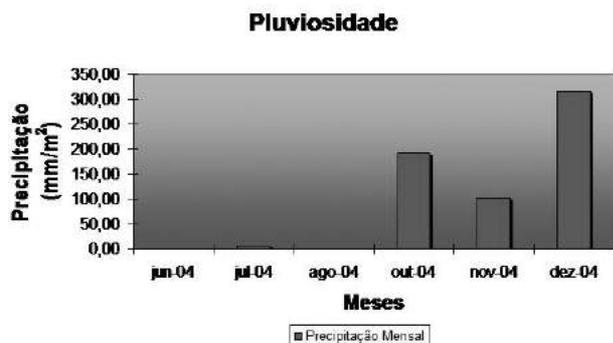


Figura 2. Valores de Precipitação total mensal entre junho de 2004 a dezembro de 2004 Fonte: Furnas – DCT.T.

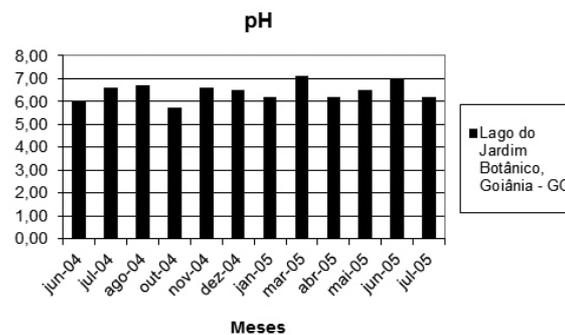


Figura 5. Variação do pH no lago do Jardim Botânico, Goiânia, Goiás, no período de junho de 2004 a julho de 2005.

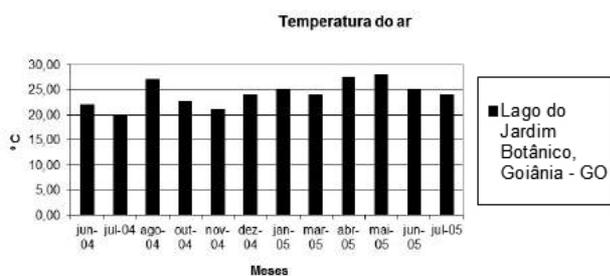


Figura 3. Variação da temperatura do ar, no lago do Jardim Botânico, Goiânia, Goiás, no período de junho de 2004 a julho de 2005.

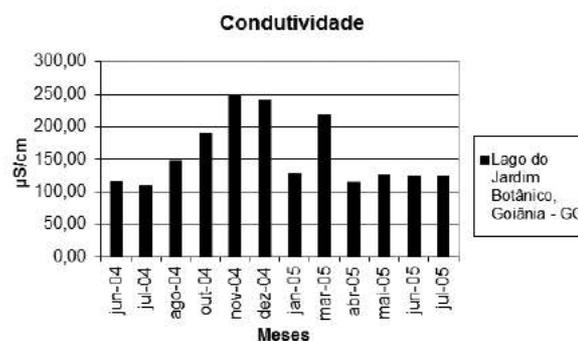


Figura 6. Variação de condutividade elétrica no lago do Jardim Botânico, Goiânia, Goiás, no período de junho de 2004 a julho de 2005.

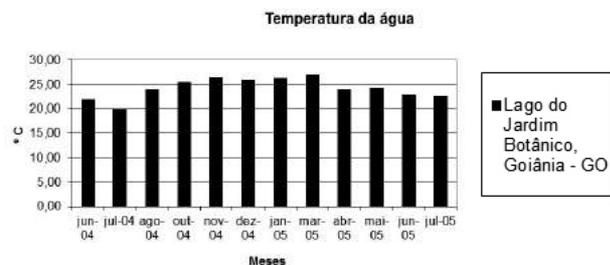


Figura 4. Variação da temperatura da água, no lago do Jardim Botânico, Goiânia, Goiás, no período de junho de 2004 a julho de 2005.

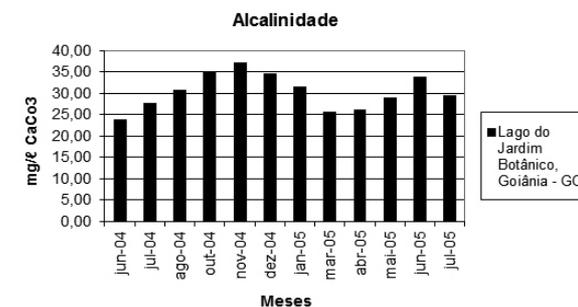


Figura 7. Variação de alcalinidade no lago do Jardim Botânico, Goiânia, Goiás, no período de junho de 2004 a julho de 2005.



qualificação fornece dados importantes²⁹. O fósforo total e o ortofosfato apresentaram-se em concentrações diferentes, ou seja, o ortofosfato não apresentou valores (Tabela 1) e o fósforo total apresentou maior concentração no período de junho de 2004. Os outros valores apresentaram concentrações de fósforo total abaixo deste período de junho de 2004. Em comparação com os valores de referência¹¹, as concentrações de fósforo total não ultrapassaram o estipulado de 0,050mg/L (Figura 8).

Outro aspecto a ser considerado é que o CONAMA¹¹ estabelece limites que variam, de acordo com o pH dos corpos d'água. Como os lagos alvo do estudo, apresentaram valores de pH inferiores a 7,50, a Resolução prevê o valor máximo para a concentração de nitrogênio amoniacal de 13,30mg/L, em corpos d'água enquadrados na Classe 4 (águas destinadas à navegação, à harmonia paisagística). Ressalta-se que os valores encontrados para o período de junho de 2004 a julho de 2005 foram inferiores a esse valor (Figura 9).

O nitrito, por outro lado, corresponde à forma intermediária (e mais instável) dos íons nitrogenados. A conversão do nitrito em amônia ou nitrato é dependente das condições ambientais, como a disponibilidade de oxigênio. O nitrito é extremamente tóxico para grande parte da flora e da fauna aquática, mas algumas espécies fitoplanctônicas utilizam o nitrito como fonte de nitrogênio quando submetidas a baixas concentrações de nitrogênio amoniacal e nitrato²⁹. Os maiores valores de nitrito foram em outubro de 2004 e março de 2005, período que coincide com a maior concentração de chuvas na região (Figura 10). Dentre as diferentes formas, o nitrato, juntamente com o íon amônio, assume grande importância nos ecossistemas aquáticos, uma vez que representam as principais fontes de nitrogênio para os produtores primários²². O nitrato apresentou concentrações muito superiores às demais formas inorgânicas de nitrogênio (Figura 11), sendo a principal forma de nitrogênio inorgânico nos lagos. Em alguns períodos, a concentração de nitrato apresentou grandes oscilações durante o período amostrado de 0,49 mg/l a 3,20 mg/l (entre novembro de 2004 a novembro de 2005). Quanto às concentrações de nitrato permitidas pelo CONAMA¹¹, as concentrações apresentam-se com valores inferiores ao limite estabelecido para a Classe 4, que é de 10,0mg/L.

As análises biológicas são de grande importância na caracterização dos ambientes aquáticos. Isto é especialmente verdadeiro para os trópicos, em que o rápido metabolismo da comunidade fitoplanctônica pode promover a depleção nos níveis de nutrientes, dificultando a determinação do grau trófico do sistema. Em situações de grande densidade fitoplanctônica, que são típicas de sistemas eutrofizados, os níveis de nutrientes podem ser mantidos baixos pelo consumo fitoplanctônico, tornando fundamental a avaliação de variáveis biológicas para permitir uma melhor caracterização da água²⁹. O estudo da composição pigmentar completa das populações vem revelando-se de grande importância ecológica e taxonômica. Os pigmentos podem ser rapidamente degradados durante períodos de carência de nutrientes, de estresses e na morte das células. Portanto, o conhecimento da presença e da concentração de vários pigmentos e de seus produtos de degradação é um valioso indicador do estado fisiológico das células fitoplanctônicas. Convém lembrar que ocorrem populações com composições pigmentares bastante diversas³⁴. Em comparação com os valores estipulados pelo CONAMA¹¹ (valores inferiores a 60,0µg/L de clorofila- α para águas de Classe 4), o valor obtido para o mês de junho de 2005 ultrapassou a concentração estipulada, com 68 mg/l, já os outros valores mantiveram-se abaixo do estipulado pela legislação.

As concentrações de oxigênio dissolvido apresentaram valores acima do especificado pelo CONAMA¹¹, tanto no período da seca, como no período da chuva. Isso evidencia que o ambiente vem sofrendo grande descarga de matéria orgânica (Figura 12). Dessa forma, os resíduos orgânicos despejados nos corpos d'água são decompostos por microrganismos que utilizam o oxigênio na respiração. Assim, quanto maior a carga de matéria orgânica, maior o número de microrganismos decompositores e, conseqüentemente, maior o consumo de oxigênio menor a concentração de oxigênio dissolvido no corpo d'água^{32,35}.

Os principais responsáveis pela turbidez da água são principalmente as partículas suspensas (bactérias, fitoplâncton, detritos orgânicos e inorgânicos) e em menor escala, os compostos dissolvidos. Estes são responsáveis pela cor verdadeira da água e o material em suspensão pela cor aparente²⁹. Os parâmetros

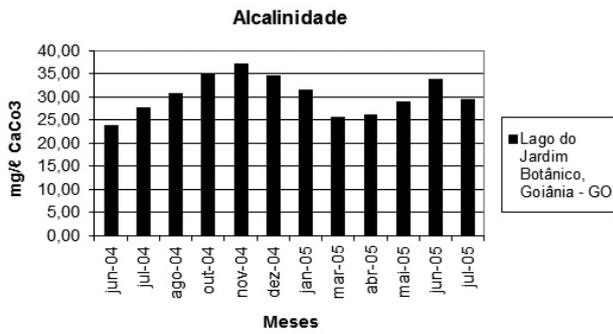


Figura 8. Variação do Fósforo Total no lago do Jardim Botânico, Goiânia, Goiás, no período de junho de 2004 a julho de 2005.

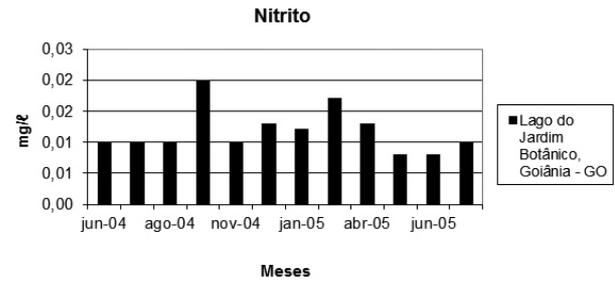


Figura 11. Variação do Nitrato no lago do Jardim Botânico, Goiânia, Goiás, no período de junho de 2004 a julho de 2005.

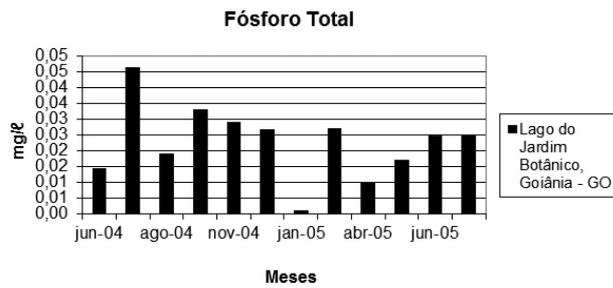


Figura 9. Variação do Íon Amônio no lago do Jardim Botânico, Goiânia, Goiás, no período de junho de 2004 a julho de 2005.

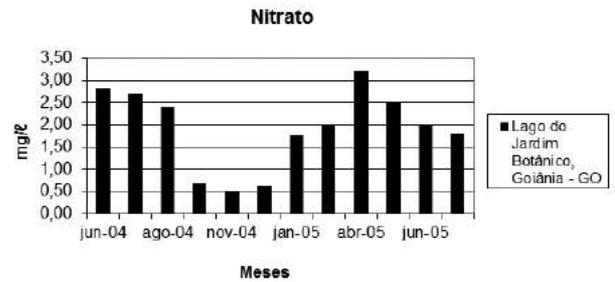


Figura 12. Variação do Oxigênio Dissolvido no lago do Jardim Botânico, Goiânia, Goiás, no período de junho de 2004 a julho de 2005.

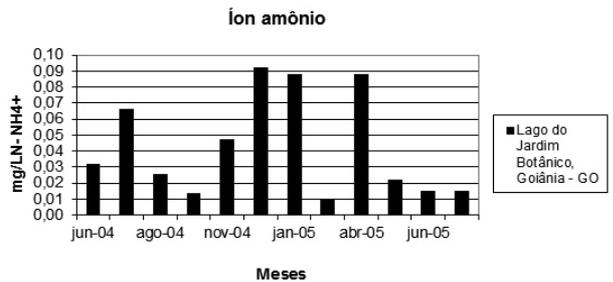


Figura 10. Variação do Nitrito no lago do Jardim Botânico, Goiânia, Goiás, no período de junho de 2004 a julho de 2005.

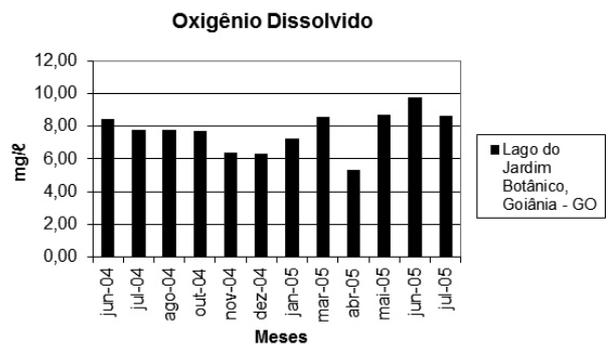


Figura 13. Variação de Turbidez no lago do Jardim Botânico, Goiânia, Goiás, no período de junho de 2004 a julho de 2005.



climatológicos de uma região também influenciam os parâmetros avaliados, como a turbidez do corpo d'água. Em um período de maior precipitação, pode ocorrer aumento na turbidez, em função do grande aporte de material que é carregado pelas chuvas para o corpo d'água em questão²⁰, como o que provavelmente ocorreu no período chuvoso, que apresentaram valores altos. De acordo com o CONAMA11, para os lagos de Classe 4 (águas destinadas à navegação e à harmonia paisagística) o valor de turbidez não pode ultrapassar 100 NTU's e todos os valores obtidos nas amostras do Jardim Botânico de Goiânia estão abaixo desse limite.

Outro indicador de poluição por esgotos domésticos nas águas naturais é o teor de cloretos, uma vez que excretas humanos contêm cerca de 6g por pessoa ao dia³². Os maiores valores de cloretos encontrados foram em julho de 2004 e junho de 2005, mas nenhuma das amostras apresentou valores que ultrapassaram os valores de referência¹¹ (Figura 14).

A análise dos dados indicou que esse corpo d'água recebe um considerável aporte de nutrientes, possivelmente através da descarga de esgotos clandestinos e infiltrações da rede de esgoto doméstico. Fato como esse já foi relatado pela equipe técnica da Prefeitura de Goiânia, que se deparou com uma fossa séptica em uma das nascentes do Córrego Botafogo, formador dos lagos do Jardim Botânico com o seu represamento^{24,25}.

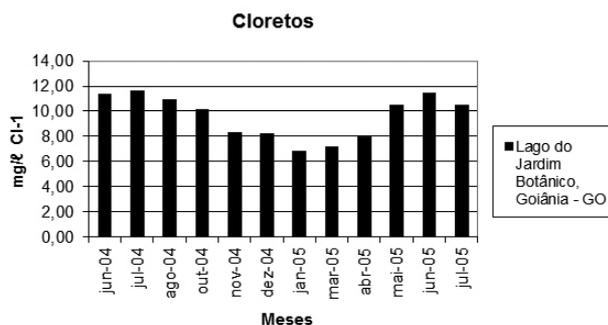


Figura 14. Variação de Cloretos no lago do Jardim Botânico, Goiânia, Goiás, no período de junho de 2004 a julho de 2005.

Considerações Finais

O presente trabalho avaliou as condições físicas, químicas e biológicas da água no lago do Jardim Botânico de Goiânia, Goiás, que se encontra em uma região urbana sob efeito de atividades antrópicas. Os resultados obtidos sugerem a existência de alterações ecológicas no lago estudado e fornecem subsídios para diagnósticos de impacto ambiental. Além disso, indicam a necessidade de políticas ambientais voltadas para conservação e o manejo desses ecossistemas aquáticos e de seu entorno, sobretudo, considerando a sua grande importância socioambiental e para a qualidade de vida da comunidade.

Referências

- Freitas, V. P. S. et al. Rev. Inst. Adolfo Lutz, Campinas, **2002**, 61(1), 51.
- EPA - United States Environmental Protection Agency. The Importance of Water to the U.S. Economy: Synthesis Report. **2013**. Disponível em: <http://water.epa.gov>. Acesso em 25/06/2014.
- Bockstael, N. E.; Freeman, A. M.; Kopp III, R. J.; Portney, P. R.; Smith, V. K. Environmental Science and Technology, **2000**, 34(8), 1384.
- Shittu, O. B.; Olaitan, J. O.; Amusa, T. S. African Journal of Biomedical Research, **2008**, 11, 285.
- Manjare, S. A.; Vhanalakar, S. A.; Muley, D. V. International Journal of Advanced Biotechnology and Research, **2010**, 1(2), 115.
- Ruddell, B. Embedded Resource Accounting: Evaluating the Comparative Intensity of Water Use in Multiple Sectors of the U.S. Economy, **2012**.
- Tundisi, J. G. Água no século XXI: enfrentando a escassez. RiMa: São Carlos, IIE, **2005**.
- Khan, S. A.; Ali, A.; Baig, M. N. Journal of Environmental Treatment Techniques, **2013**, 1(1), 19.
- Schock, N. T.; Murry, B. A.; Uzarski, D. G. Wetlands, **2014**, 34(2), 297.
- Barrel, R.; Benton, C.; Boyd, P.; Cartwright, R.; Chada, C.; Colbourne, J.; Cole, S.; Colley, A.; Drury, D.; Godfree, A.; Hunter, P.; Lee, J.; Machray, P.; Nicholis, G.; Sartory, D.; Sellwood, J.; Watkins, J. The microbiology of drinking water-party water quality and public health. Methods for the examination of waters and associated materials. Environment Agency, **2002**.
- CONAMA - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução n. 357, de 17 de março de **2005**. Brasília, 2005.
- Moraes, D. S. de L.; Jordão, B. Q. Rev. Saúde Pública **2002**, 36, 370.



13. Carvalho, R. S. de. Água, um bem que precisa ser cuidado. 2004. Disponível em: <<http://www.cnrh-srh.gov.br/artigos/main.htm>>. Acesso em: 15 de outubro de 2011.
14. Sant'Ana, G. R. S.; Sant'Ana, C. E. R.; Maciel, J. R.; Costa, C. R. Rev. Proc. Quím., 2009, 3(6), 48.
15. Baird, C.; Cann, M. Environmental Chemistry. H. Freeman and Company: New York, 2012.
16. Grassi, M. T. As Águas do Planeta Terra. São Paulo: Caderno Temático de Química Nova na Escola, 2001.
17. Brito, L. T. de L. et al. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, 2005, 9(4), 596.
18. Conte, M. L.; Leopoldo, P. R. Avaliação de recursos hídricos: Rio Pardo, um exemplo. Unesp: São Paulo, 2001.
19. Tao, F.; Yokozawa, M.; Hayashi, Y.; Lin, E. Ambio, 2003, 32(4), 295.
20. Grabow, W. Water S. A., Washington, 1996, 22(2), 193.
21. Golterman, H. L. Methods for chemical analysis of freshwater. Blacwell Scientific Publications: Oxford and Edinburgh, 1978.
22. Sperling, M. V. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. UFMG: Belo Horizonte, 2005.
23. Amorin, M. A. P. et al. Caderno dos Parques do Município de Goiânia. SEMMA, 1997.
24. Sant'Ana, G. R. S. (org.). Plano de Manejo do Jardim Botânico Amália Hermano Teixeira, Goiânia, 2007.
25. SEMMA - SECRETARIA MUNICIPAL DO MEIO AMBIENTE. Relatório de Impacto Ambiental do Jardim Botânico, Goiânia, 1994.
26. ABNT. NBR 9897, 1987.
27. ABNT. NBR 10679, 1988.
28. Clesceri, L. S.; Geenberg, A. E.; Trussel, R. R. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Public Health Association, American Water Environments Federation, 20th Edition, 2005.
29. Esteves, F. de A. Fundamentos de Limnologia. 3.ed. Interciência: Rio de Janeiro, 2011.
30. PLANCTON CONSULTORIA LTDA. Relatório de UHE Furnas 1996 a 2003. Belo Horizonte, 2003.
31. EMGOPA - Empresa Goiana de pesquisa agropecuária. Universidade Federal de Goiás, Goiânia-GO, 1988.
32. Richter, C. A.; Neto, J. M. A. Tratamento de água: tecnologia atualizada. Edgard Blucher: São Paulo, 1991.
33. Wetzel, R. G.; Linkens, G. E. Limnological Analyses. Springer: New York, 2010.
34. Paranhos, R. Alguns Métodos Para Análise de Água. Rio de Janeiro: Cadernos didáticos UFRJ, 1996.
35. Baumgarten, M. G. Z.; Pozza, S. A. Qualidade de água: descrição de parâmetros químicos referidos na legislação ambiental. FURG: Rio Grande, 2001.

Carlos Eduardo R.
Sant'Ana^{1*}, Georgia R. S.
Sant'Ana^{2,3} & Luiz C. P. da
Silva⁴

¹Instituto de Estudos Socioambientais (IESA), Universidade Federal de Goiás, Campus Samambaia, Cx. Postal 131, 74001-970, Goiânia-GO, Brasil.

²Faculdade de Tecnologia SENAI Roberto Mange, 75113-630, Anápolis-GO, Brasil.

³Jardim Botânico de Goiânia (AMMA), 74820-030, Goiânia-GO, Brasil.

⁴AQUALIT, Goiânia-GO, Brasil.

*E-Mail: cersantana@gmail.com





Cristalografia: 100 Anos no Caminho da Inovação

Leonardo R. Almeida, Jhonata J. Silva, Vitor S. Duarte,
Thalita N. S. dos Santos & Hamilton B. Napolitano.

A cristalografia é uma metodologia científica de excelência interdisciplinar, que surgiu como uma das mais promissoras inovações dos últimos 100 anos, considerando sua ampla aplicação e importância do ponto de vista tecnológico e de propriedade intelectual envolvida—que permite conhecer a estrutura de um composto químico, desde que esteja no estado sólido cristalino sem nenhuma informação *a priori*. O conhecimento do arranjo tridimensional molecular é umas das principais e mais importantes informações para as ciências moleculares. A metodologia cristalográfica é baseada em fundamentos como difração de raios X por sólidos cristalinos, simetria, Lei de Bragg e a transformada de Fourier.

Palavras-chave: *Cristalografia; Difração de raios X; Lei de Bragg.*

Crystallography is a scientific methodology of interdisciplinary excellence, which has emerged as one of the most promising innovations of the last 100 years, considering its wide application and importance, from a technological point of view and intellectual property involved, which allows to know the structure of a chemical compound, since it is in the crystalline solid state without any *a priori* information. Knowledge of the three-dimensional molecular arrangement is one of the main and most important information for molecular sciences. The crystallographic methodology is based on fundamentals such as X-ray diffraction for crystalline solids, symmetry, Bragg's Law and the Fourier transform.

Keywords: *Crystallography; X-ray diffraction; Bragg's Law.*



Introdução

Após 100 anos de desenvolvimento, a cristalografia de raios X consolidou-se como uma metodologia de referência para estudar a estrutura atômica, as propriedades dos materiais e atualmente encontra-se no centro de vários domínios científicos. O ano de 2014 foi declarado pela UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization) o “Ano Internacional da Cristalografia” em comemoração ao centenário de seu nascimento, homenageando os trabalhos pioneiros de Max Von Laue, Wiliam Henry Bragg e William Lawrence Bragg¹.

A cristalografia é uma metodologia científica extremamente importante para diferentes áreas da ciência, sendo que são 30 prêmios Nobel até o momento, envolvendo a metodologia. Alguns laureados destacam-se como Wilhelm Conrad Röntgen que, em 1901, ganhou o primeiro Prêmio Nobel de Física pela descoberta dos raios X; em 1914, M. von Laue e seus colaboradores pela descoberta da difração de raios X e estudo da detecção da interferência das ondas difratadas, comprovando o caráter ondulatório da radiação de raios X e a periodicidade do estado cristalino; em 1913, W. H. Bragg e W. L. Bragg pela dedução da equação conhecida como Lei de Bragg, que fornece informações sobre o retículo cristalino a partir do fenômeno da difração; em 1964, Dorothy Crowfoot Hodgkin ganhou o Prêmio Nobel de Química pela revelação da estrutura de um grande número de moléculas biológicas, incluindo o colesterol, a penicilina e a insulina; em 1962, John Cowdery Kendrew e Max Ferdinand Perutz elucidaram a estrutura cristalina de uma proteína, o que lhes concedeu o Prêmio Nobel de Química^{2,3,4}.

Atualmente, mais de 90.000 proteínas, ácidos nucleicos e outras moléculas biológicas foram determinadas, baseando-se na cristalografia de raios X. No século XX, James Dewey Watson, Francis Harry Compton Crick e Maurice Hugh Frederick Wilkins elucidaram a estrutura cristalina do DNA, a partir das experiências de difração realizadas por Rosalind Elsie Franklin. A descoberta da dupla-hélice abriu caminho para a cristalografia das proteínas e das macromoléculas, fundamental para a Biologia e para a Medicina atual. Nos últimos 50 anos, a cristalografia e os métodos cristalográficos continuaram o

seu processo evolutivo, recentes trabalhos na área foram laureados com Prêmio Nobel, como pela identificação da estrutura de um ribossomo e a forma como é interrompido por antibióticos (2009), pela descoberta do funcionamento interno de uma importante família de receptores celulares, que comandam grande parte das funções do corpo humano (2012)¹.

O conhecimento da estrutura molecular e cristalina de um composto é importante para o entendimento das propriedades físico-químicas e estudos de aplicação. Entretanto, poucas são as metodologias disponíveis quando se faz necessário saber a distribuição espacial relativa dos átomos constituintes de uma dada molécula. Estas metodologias incluem: Difração de Raios X por Monocristais, Difração de Nêutrons, Ressonância Magnética Nuclear, Espalhamento de Raios X a Baixo Ângulo, Microscopia Eletrônica, Modelagem Teórica e outros. Sendo que a metodologia cristalográfica apresenta-se como a mais adequada devido à alta resolução com que pode descrever a densidade eletrônica⁵.

A cristalografia é um ramo da ciência que estuda a estrutura da matéria em nível atômico, com a classificação e interpretação geométrica da estrutura dos cristais. É compreendida de forma interdisciplinar nas áreas da física, química, biologia molecular, ciências dos materiais e mineralogia². Em Física e na Ciência dos Materiais, é indispensável na relação entre as propriedades físicas e a estrutura interna dos sólidos. Na Química, os parâmetros estéricos de novos compostos ou complexos são obtidos, devido à caracterização de sua estrutura. Na Biologia e Bioquímica, a potencialidade de uma molécula está vinculada com a sua estrutura tridimensional. Em Medicina e Farmacologia, a atividade de alguns fármacos está relacionada com as interações entre o fármaco e receptor, a explicação desta ação é resultante do conhecimento estrutural de ambos⁶.

A metodologia cristalográfica é baseada no fenômeno da difração, e fornece o conhecimento da disposição tridimensional dos átomos na estrutura molecular para compostos no estado cristalino, quando expostos à radiação, não necessitando de nenhum conhecimento *a priori*⁷. Como resultado do experimento da difração de raios X, obtêm-se as intensidades e as posições dos feixes difratados, a partir dos quais pode se obter a amplitude dos



fatores de estrutura. Toda informação explícita das fases dos fatores de estrutura é perdida durante o experimento, o que impossibilita a determinação analítica da estrutura, a partir das intensidades medidas. Assim, as posições atômicas são determinadas pelos valores máximos da função de densidade eletrônica, e para que essa função seja conhecida, torna-se necessário o conhecimento dos fatores de estrutura (amplitude e fase) de cada reflexão coletada^{5,6}.

A partir do conhecimento tridimensional dos átomos e das posições atômicas individuais, podem-se calcular as distâncias interatômicas, ângulos de ligação e avaliar informações sobre empacotamento molecular e distribuição de carga molecular. Tais informações são de grande interesse para os químicos, bioquímicos e biólogos moleculares que estão interessados na relação de características estruturais de efeitos químicos e biológicos, e expandem a compreensão da estrutura eletrônica, tensão molecular, e as interações entre as moléculas^{8,9}.

Difração de Raios X

As ondas eletromagnéticas apresentam o comportamento característico de sofrerem interferência entre si, essa interferência propicia maiores deslocamentos nos pontos em que os máximos ou os mínimos coincidem, e menores deslocamentos quando máximos coincidem com os mínimos. De acordo com a teoria eletromagnética clássica, a intensidade da radiação eletromagnética é proporcional ao quadrado da amplitude das ondas. Portanto, as regiões de interferência construtiva ou destrutiva exibem, alternadamente, intensidades reforçadas ou intensidades diminuídas¹⁰.

Os raios X são radiações de natureza eletromagnéticas, com comprimento de onda muito pequeno em comparação ao da luz visível, foram descobertos em 1895 pelo físico alemão W. Röntgen e ocupam no espectro eletromagnético a região entre os raios gama e ultravioleta, tendo comprimento de onda que varia de 0,1 a 100 Å⁹. Experimentalmente, os raios X usados têm intervalo de comprimento de onda, variando de 0,4 a 2,5 Å. Os raios X geralmente são produzidos quando um feixe de elétrons acelerados por um campo elétrico colide com um alvo metálico, provocando rápida desaceleração desse feixe de elétrons.

Do ponto de vista da teoria quântica, os raios X podem ser compreendidos como um feixe de fótons com energia $h\nu$. Pela alta frequência desta radiação, pode-se perceber a evidência de que possuem alta energia, conforme Equação (1) seu comprimento de onda depende da energia,

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad \text{Eq. (1)}$$

em que h é a constante de Planck, c é a constante da velocidade da luz, ν é a frequência e λ é o comprimento de onda da radiação⁸.

Quando um feixe de raios X atinge algum material cristalino, os elétrons de seus átomos são forçados a oscilar, devido ao campo elétrico que compõe a radiação incidente, tornando, segundo a teoria clássica da radiação eletromagnética, uma nova fonte espalhadora em todas as direções. O fenômeno da difração surge da interferência destas ondas espalhadas pelos diversos espalhadores discretos que, quando arranjados ordenadamente, ou seja, apresentam simetria translacional, possibilitam a obtenção da informação estrutural da molécula. A difração pode ser explicada pelo princípio de Huygens que, qualitativamente, diz que “todos os pontos de uma frente de onda de luz podem ser considerados fontes puntiformes que produzem ondas secundárias”^{7,8}.

O fenômeno da difração é a interferência provocada por um corpo colocado na trajetória das ondas, e a distribuição espacial da intensidade resultante dessa interferência é chamada de Figura de difração. A difração ocorre quando as dimensões do corpo que provoca a difração são comparáveis ao comprimento de onda da radiação¹⁰. O arranjo atômico dentro de um cristal só pôde ser elucidado experimentalmente, a partir do início do século XX, com o desenvolvimento da primeira técnica, a difração de raios X pelos cristais que foi descoberta em 1911 pelo físico alemão Max Von Laue.

O método original de Von Laue consistia em passar um feixe de raios X de ampla faixa de comprimento

de onda através de um monocristal e registrar a Figura de difração (Imagem do Padrão de difração Figura 1) fotograficamente. A ideia era de que um cristal poderia não estar adequadamente orientado para atuar como uma rede de difração para um único comprimento de onda, mas independentemente de sua orientação, a difração poderia ser alcançada, pelo menos, para um dos comprimentos de onda, se um amplo intervalo fosse usado. Atualmente, há um interesse renomado nesta abordagem, com o uso da radiação disponível, a partir de fontes de síncrotron, que cobre uma faixa contínua de comprimento de onda de raios X e sua alta intensidade reforça a sensibilidade da técnica¹⁰.

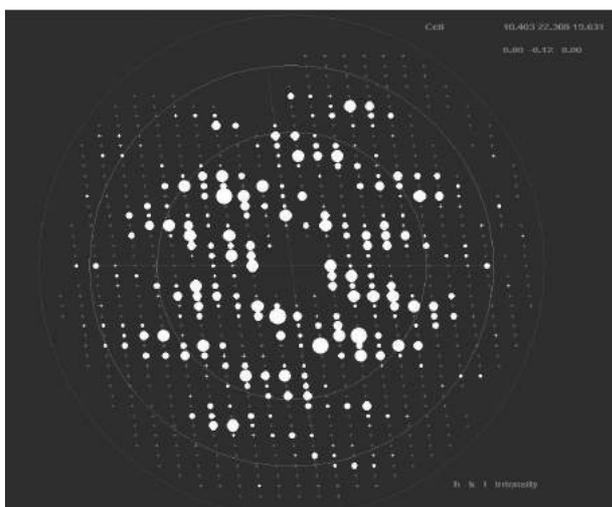


Figura 1. Parte de um padrão de difração de raios X gerado por uma pequena molécula.

Quase todo o trabalho moderno de cristalografia de raios X é baseado no método desenvolvido por Willian Henry Bragg e seu filho Willian Lawrence Bragg. Eles usaram um monocristal e um feixe monocromático de raios X e giraram o cristal até que uma reflexão fosse detectada.

A dedução da fórmula fundamental por W. L. Bragg para análise estrutural da matéria ocorreu em 1912, sendo uma forma analítica de extrair informações do fenômeno da difração. A partir de sua descrição e da intensidade associada a cada direção difratada, podemos obter diversas informações sobre

a estrutura da matéria, tais como: (1) conhecimento do tipo de retículo cristalino associado ao ordenamento dos átomos; (2) estrutura molecular; (3) simetria envolvida no empacotamento; (4) estrutura cristalina, entre outros. A utilidade prática desta teoria pode ser avaliada pela quantidade de estruturas moleculares resolvidas, atingindo a ordem de centenas de milhares, disponíveis, por exemplo, nos bancos de dados do Cambridge Crystallographic Data Centre (CCDC), para estruturas de moléculas pequenas, e do Protein Data Bank (PDB), para estruturas de macromoléculas.

Lei de Bragg

Com a descoberta da difração de raios X em cristais por Von Laue, mostrou-se que este fenômeno poderia ser descrito em termos de difração de uma grade tridimensional. Por outro lado, W. L. Bragg, em 1913, mostrou que a distribuição angular da radiação espalhada pode ser compreendida, considerando que os raios difratados comportam-se como se fossem refletidos, a partir de planos, passando através de pontos da rede cristalina. Essa reflexão é semelhante ao espelho, no qual o ângulo incidente da radiação é igual ao ângulo de reflexão⁹. Considerando um feixe de raios X incidente num par de planos paralelos com distância interplanar d (Figura 2).

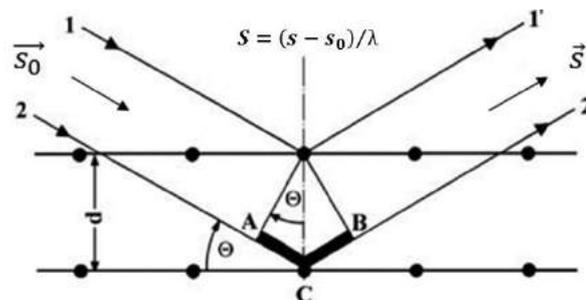


Figura 2. Representação esquemática (fora de escala) da equação de Bragg. θ é o ângulo entre o feixe de raios X incidente e o plano difrator hkl . A diferença de caminho entre as duas ondas espalhadas por A e C é $AC + CB = 2dhklsen\theta$. A condição de difração é verificada quando a diferença de caminho for um múltiplo inteiro do comprimento de onda λ . O módulo do vetor $Shkl$ é o inverso da distância interplanar $dhkl$.



Os raios paralelos incidentes 1 e 2 formam um ângulo θ com esses planos. Supondo que os elétrons em A e C sejam forçados a vibrar por oscilação do raio incidente e, como cargas vibratórias, irradiarão em todas as direções. Especificamente, para a direção onde raios paralelos secundários 1' e 2' emergem no ângulo θ como se fossem refletidos pelos planos, uma intensidade máxima do feixe difratado resultará, se as ondas representadas por estes raios estiverem em fase. A diferença entre o caminho ótico das duas ondas espalhadas pelo conteúdo eletrônico de A e C é dado pela Equação (2):

$$\delta = \overline{AC} + \overline{BC} = r \cdot (s - s_0) \quad \text{Eq. (2)}$$

Sabendo que a radiação usada na maioria dos experimentos de difração é monocromática com um único comprimento de onda λ , a diferença de fase entre as duas ondas será dada conforme Equação (3):

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \delta = 2\pi r \cdot \frac{(s - s_0)}{\lambda} = 2\pi r \cdot s \quad \text{Eq. (3)}$$

Em que $r \cdot s$ deve ser um número inteiro, pois a diferença de fase é igual a $n\lambda$. Tomando as perpendiculares de A e C, respectivamente, fica claro que os ângulos $AC = BC = \theta$. Neste caso, $AC = BC$, e se $AC + BC$ (igual a $2AC$) é um número inteiro de comprimento de onda (λ), então, as ondas no raio 2' estarão em fase com as ondas do raio 1'. Como $AC/d \equiv \sin \theta$ e n um número inteiro, teremos a expressão descrita na Equação (4), conhecida como lei de Bragg. Nesta equação, d corresponde à distância interplanar, θ ao ângulo de incidência, λ ao comprimento de onda do feixe incidente e n é a ordem da difração.

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad \text{Eq. (4)}$$

Neste caso, consideraram-se somente as reflexões de dois planos, portanto, os máximos de difração são pouco

definidos e observados com uma variação relativamente grande em relação ao valor de θ , que satisfaz a lei de Bragg. Em cristais, porém, muitos planos compõem um mosaico de blocos que constituem o cristal macroscópico. Sob essas condições, o máximo de difração será bem definido somente para valores de θ que estejam muito próximos do valor que satisfaz a lei de Bragg. Como a densidade eletrônica na cela unitária de um cristal não está distribuída em planos, mas sim tridimensionalmente por toda a cela, a lei de Bragg não retrata a realidade dentro do cristal. Porém, não se pode deixar de lado sua importância para o desenvolvimento da ideia de espaço recíproco e para a elucidação da difração de raios X¹¹.

A Densidade Eletrônica e o Problema da Fase

Existem muitos fatores que afetam a intensidade dos raios X no padrão de difração. Um deles depende apenas da estrutura cristalina, é chamado fator de estrutura. Trata-se do efeito do espalhamento de ondas nas direções hkl , devido a N átomos na cela unitária. Cada onda que contribui para esta resultante possui amplitude proporcional a f_j (fator de espalhamento atômico) e a fase $[2\pi(hx_j + ky_j + lz_j)]$. Expressa a soma do poder de espalhamento de todos os átomos da cela unitária, em relação a um plano hkl . Está relacionada, portanto, à distribuição dos átomos na cela unitária e a partir do conhecimento da sua distribuição eletrônica¹¹. Pode ser expressa de forma genérica para uma única cela unitária, conforme Equação (5):

$$F(hkl) = \sum_{j=1}^N f_j \exp[2\pi i(hx_j + ky_j + lz_j)] \quad \text{(Eq. 5)}$$

A Equação (5) é conhecida como equação do Fator de Estrutura $F(hkl)$, que é uma medida da amplitude de reflexão para um conjunto de planos hkl . O fator de estrutura é um número complexo que representa o espalhamento de raios X por todos os componentes da cela unitária. Os fatores de estrutura dependem somente



da estrutura cristalina e dão uma descrição matemática do padrão de difração. Se as posições de todos os átomos na cela unitária são conhecidas, então, o correspondente padrão de difração pode ser calculado¹¹.

A estrutura cristalina $r(\mathbf{r})$ e o padrão de difração $F(\mathbf{h})$ estão relacionados entre si pelo procedimento matemático da transformada de Fourier. Este teorema de grande utilidade e importância, desenvolvido por Baron Jean Baptiste Fourier (1768 - 1830), estabelece que qualquer função de uma variável contínua de um valor simples pode ser expandida como uma série de harmônicos (senos ou cossenos). A transformada de Fourier de uma função periódica é a soma das transformadas de Fourier de suas componentes individuais, obtidas pela sua série de Fourier^{11,12}.

O padrão de difração de um cristal é a análise de Fourier da estrutura cristalina, correspondendo ao padrão das ondas espalhadas por um feixe de raios X incidente em uma amostra cristalina. Por sua vez, a estrutura cristalina é a síntese de Fourier do padrão de difração e é expresso em termos da distribuição de densidade eletrônica concentrada em átomos¹¹. Essa não é possível ser medida por nenhum método direto, devido a limitações conceituais, fundamentadas na incompatibilidade do olho humano em enxergar no comprimento de onda da grandeza atômica da matéria, não seria possível desenvolver, por exemplo, um microscópio ótico com tal resolução, também não pode ser obtido diretamente por cálculos porque as fases relativas das ondas são desconhecidas. Porém, o padrão de difração pode ser medido pelo experimento de difração de raios X. Durante o experimento, são obtidas as amplitudes por medidas diretas das intensidades, considerando um número de correções. Entretanto, as fases relativas das ondas espalhadas são perdidas¹¹. O fator estrutura e a função de densidade eletrônica estão relacionados pela Equação (6):

$$\rho(xyz) = \frac{1}{V} \sum_{hkl} F_{hkl} \exp[-2\pi i(hx + ky + lz)] \quad \text{Eq. (6)}$$

É possível utilizar outra forma de descrição mais compacta em que $hx+ky+lz$ são dados por $\mathbf{h.r}$. E com esta

informação, pode-se reescrever a Equação (6) e obter a Equação (7):

$$\rho(\mathbf{r}) = \frac{1}{V} \sum_{\mathbf{h}} |F(\mathbf{h})| \exp[-2\pi i(\mathbf{h.r}) + i\phi(\mathbf{h})] \quad \text{Eq. (7)}$$

Na equação da densidade eletrônica Eq. (7), V é o volume da cela unitária e $F(\mathbf{h})$ é o fator de estrutura na forma complexa, sendo seu módulo $|F(\mathbf{h})|$ proporcional à intensidade da reflexão medida para direção hkl . A quantidade $\mathbf{h.r}$ corresponde ao produto escalar entre o vetor espalhamento no espaço recíproco \mathbf{h} e o vetor posição no espaço direto \mathbf{r} . O problema da fase fica evidente na Equação (7), uma vez que o conhecimento da função $\rho(\mathbf{r})$ para cada posição \mathbf{r} da cela unitária depende do conhecimento das fases $\phi(\mathbf{h})$ que são perdidas no processo de medida. De uma forma geral, a solução do problema da fase em cristalografia de pequenas moléculas é obtida por Métodos Diretos ou Método de Patterson⁷. Assim, se os fatores de estrutura, $F(\mathbf{h})$, são conhecidos para todas as reflexões hkl , então, a densidade eletrônica $\rho(\mathbf{r})$ pode ser calculada para cada ponto xyz , na cela unitária. O que permite a construção de um mapa de densidade eletrônica tridimensional (3D), tal como apresentado na Figura 3.

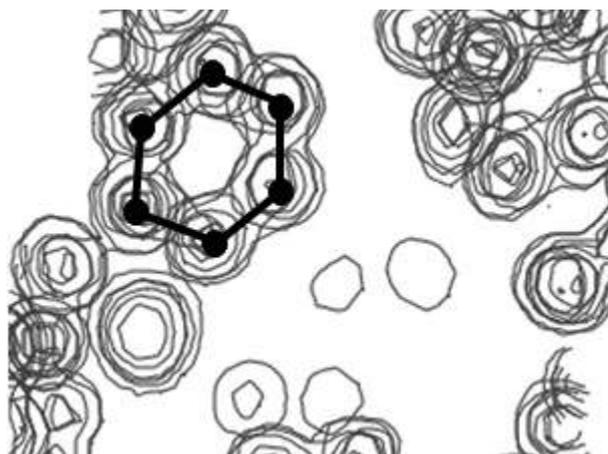


Figura 3. Esquema de representação da construção de um mapa de densidade eletrônica em 3 Dimensões com resolução compatível para a identificação de um provável anel aromático (conforme destacado).



Coleta de Dados e Solução da Estrutura

Os dados obtidos, por meio de experimentos de difração de raios X, consistem nas intensidades e nas posições dos feixes difratados, a partir dos quais se pode obter a amplitude dos fatores de estrutura $|F(\mathbf{h})|$. Toda informação explícita das fases dos fatores de estrutura, $\varphi(\mathbf{h})$, é perdida durante o experimento, o que impossibilita a determinação analítica da estrutura, a partir das intensidades medidas. As posições atômicas são determinadas pelos valores máximos da função de densidade eletrônica $\rho(\mathbf{r})$ Equação (8)^{7,11}, em que V é o volume da cela unitária e $F(\mathbf{h})$ é o fator de estrutura na forma complexa, sendo seu módulo $|F(\mathbf{h})|$ proporcional à intensidade da reflexão medida para direção hkl . A quantidade $\mathbf{h}\cdot\mathbf{r}$ corresponde ao produto escalar entre o vetor espalhamento no espaço recíproco \mathbf{h} e o vetor posição no espaço direto \mathbf{r} ⁷.

$$\rho(\mathbf{r}) = \frac{1}{V} \sum_{\mathbf{h}} F(\mathbf{h}) \exp[-2\pi i(\mathbf{h}\cdot\mathbf{r})] = \frac{1}{V} \sum_{\mathbf{h}} |F(\mathbf{h})| \exp[-2\pi i(\mathbf{h}\cdot\mathbf{r}) + i\varphi(\mathbf{h})] \quad \text{Eq. (8)}$$

O problema da fase fica evidente, por meio da Equação (8), uma vez que o conhecimento da função $\rho(\mathbf{r})$ para cada posição \mathbf{r} da cela unitária depende do conhecimento das fases $\varphi(\mathbf{h})$. Com o objetivo da obtenção da fase, concentra-se a etapa de solução da estrutura. Sua solução para a cristalografia de pequenas moléculas, em geral, é obtida por meio dos Métodos Direto e/ou do Método de Patterson^{2,15}. As posições atômicas são correspondentes aos pontos de máximo da densidade eletrônica $\rho(\mathbf{r})$. Os programas mais comumente utilizados na resolução da estrutura são SHELXS¹⁶, SIR¹⁷ e/ou DIRDIF¹⁸.

Métodos Diretos

Quando medimos o padrão de difração, isso nos dá apenas as intensidades (que podem ser transformadas em amplitudes), mas não as fases dos fatores de estrutura. As fases $\varphi(\mathbf{h})$ são mais importantes para a determinação da função densidade eletrônica $\rho(\mathbf{r})$, em relação às amplitudes. O termo Métodos Diretos é aplicado à

metodologia desenvolvida por Jerome Karle e Herbert Aaron Hauptman (laureados com o Prêmio Nobel de Química em 1985 pelo trabalho sobre a resolução do problema de fase para estruturas de pequenas moléculas) cujo objetivo é encontrar as fases dos fatores de estrutura $F(\mathbf{h})$, por meio de relações matemáticas, diretamente, a partir de um conjunto de intensidades medidas experimentalmente. É um método amplamente utilizado na solução do problema da fase para pequenas moléculas^{11,13}. Em geral, a fase e a amplitude de uma onda são quantidades independentes, mas felizmente, no caso da difração de raios X, as amplitudes dos fatores de estrutura $|F(\mathbf{h})|$ e as fases $\varphi(\mathbf{h})$ estão relacionadas por meio do conhecimento da função densidade eletrônica $\rho(\mathbf{r})$, conforme a Equação (7)^{11,12}. Desta forma, se as fases são conhecidas, as amplitudes podem ser calculadas, conforme a informação da densidade eletrônica, e similarmente, as fases podem ser calculadas a partir das amplitudes.

Desde que $\rho(\mathbf{r})$ está relacionado com o fator estrutura por um procedimento matemático (Transformada de Fourier), restrições na densidade eletrônica impõem restrições matemáticas correspondentes no fator estrutura. Como a amplitude é conhecida, a maioria das restrições limita os valores das fases dos fatores de estrutura e, em casos favoráveis, são suficientes para atribuir os valores da fase diretamente. A fim de entender como é possível relacionar estas duas grandezas, uma importante propriedade física da função de densidade eletrônica $\rho(\mathbf{r})$ deve ser considerada: atomicidade [$\rho(\mathbf{r})$ é composta por átomos discretos]^{7,11}.

Para a elaboração do mapa de densidade, os métodos de solução devem atender a alguns critérios impostos para função densidade, tal como:

- A densidade é sempre positiva;
- É construída de átomos discretos.

Para fazer uso da propriedade da atomicidade da função de densidade eletrônica, é necessário remover o efeito da forma do átomo do fator de estrutura $F(\mathbf{h})$ e convertê-lo para fatores de estrutura normalizados $E(\mathbf{h})$. A necessidade do fator de estrutura normalizado vem do fato que, no início da resolução de estruturas, somente as posições atômicas interessam e não o detalhe da forma de distribuição da densidade eletrônica $\rho(\mathbf{r})$ ^{9,11}. Logo, os



Métodos Diretos são aqueles que buscam derivar as fases, por meios dos fatores de estruturas coletados diretamente de um único conjunto de intensidades¹².

No início de uma resolução estrutural, algumas fases são arbitradas, dentro de certos critérios, e as outras são obtidas por um processo decorrente das relações entre as fases. Posteriormente, essas fases são refinadas por um processo interativo, culminando para as fases corretas. Com as informações de intensidades e fases, a densidade eletrônica pode ser calculada e a estrutura resolvida. Quando este problema da fase é considerado quase solucionado, por alguma aproximação, imagina-se que o mapa de densidade eletrônica mostrará a posição exata dos átomos na cela unitária¹¹. Isto não é verdade, pois seria necessário estender a série de Fourier ao infinito, relação que se torna impossível¹⁴. Logo, qualquer mapa de densidade eletrônica apresenta um erro. A fim de aperfeiçoar este mapa, utiliza-se o refinamento dos parâmetros estruturais.

O melhor conjunto de fases, como indicados pelas figuras de mérito, serão usadas para cálculo dos mapas de densidade eletrônica (Figura 3). Frequentemente, o melhor mapa, de acordo com as figuras de mérito, revelam muitas das posições atômicas.

Refinamento

O refinamento é o procedimento de minimização da discordância entre os módulos dos fatores de estrutura observados $|F(\mathbf{h})|_{obs}$ e calculados $|F(\mathbf{h})|_{cal}$, que realiza pequenas modificações nos parâmetros atômicos determinados para a estrutura aproximada. Átomos podem ainda ser acrescentados, por meio da síntese de Fourier^{2,15}, e ter também seus parâmetros refinados. O princípio utilizado é o dos Mínimos Quadrados^{2,15} em que a soma dos erros ao quadrado é minimizada por meio da função M dada pela Equação (9):

$$M = \sum_{\mathbf{h}} w_{\mathbf{h}} \left[|F(\mathbf{h})|_{obs}^2 - |F(\mathbf{h})|_{cal}^2 \right]^2 \quad \text{Eq. (9)}$$

em que w é peso atribuído à cada reflexão, inversamente

proporcional ao *desvio padrão* que está associado à medida da reflexão h . O refinamento é um processo interativo na construção do modelo cristalográfico, guiado pela convergência e pela consistência química do modelo obtido. Em geral, os programas utilizados são o SHELXL¹⁹ e/ou SIR¹⁷.

Esperava-se que, com a evolução da informática e dos equipamentos de coleta de dados, fossem criadas estratégias automatizadas de refinamento de estruturas, mas um número crescente de estruturas tem requerido a intervenção e a percepção humana. Se o refinamento de uma estrutura não converge de um jeito normal, algumas possíveis ações podem ser executadas. Problemas durante o refinamento aparecem quando os fatores R crescem incontrolavelmente, ou mudanças de parâmetros fazem a estrutura irreconhecível. Exclusão de átomos válidos é geralmente menos prejudicial do que a inclusão de falsos e, em qualquer caso, os átomos válidos reaparecem em mapas posteriores¹¹.

Após a finalização do trabalho de construção do modelo estrutural, todas as informações cristalográficas podem ser armazenadas em um arquivo-texto (formato txt*) comum, respeitando o padrão *Crystallographic Information File* (CIF)²⁰, adotado em 1991 pela *International Union of Crystallography* (IUCr). Nesta etapa, o autor do trabalho será reconhecido como detentor da propriedade intelectual da estrutura trabalhada. Uma vez construído o modelo estrutural cristalográfico e tendo-se todas as informações no formato CIF, a etapa seguinte é a validação.

Validação da Estrutura Cristalina

A análise de possíveis erros referentes ao modelo construído é feita durante a etapa de validação que irá avaliar a exatidão e a precisão desses resultados, sendo de grande importância para a qualidade e confiabilidade das estruturas resolvidas. Os critérios analisados são: a coerência química na estrutura, o conjunto dos dados, a precisão nas distâncias e ângulos de ligação, a qualidade dos índices estatísticos, a vibração térmica dos átomos, as interações intermoleculares, a desordem no cristal e a completude do espaço tridimensional cristalino. Índices estatísticos são utilizados para avaliar a diferença entre



o conjunto de dados teóricos $\Sigma|F(\mathbf{h})|_{\text{cal}}$, gerado para o modelo construído, e o conjunto de dados experimentais $\Sigma|F(\mathbf{h})|_{\text{obs}}$, medido a partir do cristal que contém o erro randômico^{7,21}.

Uma avaliação estatística, fazendo uso dos conjuntos $\Sigma|F(\mathbf{h})|_{\text{obs}}$ e $\Sigma|F(\mathbf{h})|_{\text{cal}}$, pode ser feita com Figuras de Mérito, índices estatísticos, que indicam a qualidade de uma estrutura cristalográfica, sempre obtidos pela comparação entre os fatores de estrutura medidos experimentalmente e aqueles calculados teoricamente. O grau com que a distribuição das diferenças entre os conjuntos $\Sigma|F(\mathbf{h})|_{\text{obs}}$ e $\Sigma|F(\mathbf{h})|_{\text{cal}}$ se ajusta aos valores esperados, afetados pelos erros randômicos, pode ser avaliado através do teste do χ^2 (chi-quadrado)^{2,7}, dado pela expressão do Goodness of Fit (Goof) ou simplesmente S (para o SHELXL-97) Equação (10):

$$\text{Goof} = \left[\frac{\sum w \left(|F(\mathbf{h})|_{\text{obs}}^2 - |F(\mathbf{h})|_{\text{cal}}^2 \right)^2}{(m-n)} \right]^{1/2} \quad \text{Eq. (10)}$$

Em que m corresponde ao número de observações, n, ao número de parâmetros independentes refinados. $\text{Goof} > 5$ indica algum problema com um dos conjuntos $\Sigma|F(\mathbf{h})|_{\text{obs}}$ ou $\Sigma|F(\mathbf{h})|_{\text{cal}}$, e Goof, significativamente menor do que a unidade, não tem significado físico e a unidade é seu valor ideal²². Teoricamente, por ajustes no fator peso, w, pode se chegar a valores de S próximos da unidade. O grau de precisão do modelo cristalográfico construído e a estrutura real podem ser avaliados pelos índices de discordância (residual factors), calculado a partir do quantitativo total desviado entre os conjuntos $\Sigma|F(\mathbf{h})|_{\text{obs}}$ e $\Sigma|F(\mathbf{h})|_{\text{cal}}$, dado pela Equação (11):

$$R = \frac{\sum \left| |F(\mathbf{h})|_{\text{obs}} - |F(\mathbf{h})|_{\text{cal}} \right|}{\sum |F(\mathbf{h})|_{\text{obs}}} \quad \text{Eq. (11)}$$

Para uma estrutura confiável, o valor de R deve estar entre 0,02 e 0,06, após o refinamento. Elevados ao quadrado, todos os fatores de estrutura associados, os correspondentes às reflexões mais intensas têm um peso maior em relação aos correspondentes às reflexões fracas. Pode-se, então, com a Equação (12) avaliar alternativamente o refinamento,

$$R_w = \left[\frac{\sum w \left(|F(\mathbf{h})|_{\text{obs}}^2 - |F(\mathbf{h})|_{\text{cal}}^2 \right)^2}{\sum w \left(|F(\mathbf{h})|_{\text{obs}}^2 \right)^2} \right]^{1/2} \quad \text{Eq. (12)}$$

Os limites máximos para o valor de R, Equação (11), baseados na distribuição randômica de átomos dentro da cela unitária, são 0,83 e 0,59 para estruturas centrossimétricas e não-centrossimétricas, respectivamente. Valores aceitáveis para R, R_w e Goof indicam a convergência do refinamento e reforçam a confiança no modelo construído, mas não evidenciam de forma absoluta que os resultados obtidos estejam corretos.

O senso químico é um excelente indicador da qualidade estrutural, contudo, os dados estatísticos e cristalográficos devem ser prioritários na análise.

TESTES DE VALIDAÇÃO

Os testes de validação são frequentemente executados com o PLATON²³, um programa de amplo uso no trabalho cristalográfico que contém vários procedimentos computacionais e gráficos, para a análise dos resultados na determinação e/ou no refinamento da estrutura cristalina. Entre as várias ferramentas disponíveis²³, podem-se citar aquelas relacionadas com redução de dados, desenhos gráficos, validação e construção do arquivo CIF.

Finalizado o trabalho de construção do modelo estrutural, todas as informações cristalográficas podem ser armazenadas no arquivo CIF. Esse formato de arquivo armazena cada informação cristalográfica através de um código para o item no formato ASCII²¹.

Após toda a etapa de validação e análise de dados, o modelo cristalográfico no formato CIF pode ser depositado no banco de dados apropriado. Para pequenas



moléculas, geralmente, utiliza-se o CCDC, mantido pelo *Cambridge Crystallographic Data Centre*.

Aplicações Tecnológicas

Mediante a todo arcabouço de conhecimentos da metodologia cristalográfica, a sua aplicação, em determinadas áreas, é de suma importância, sobretudo, quando tratamos da elucidação estrutural de substâncias obtidas, tanto por vias de síntese, como isoladas de fontes naturais. Contudo, destacamos que este conhecimento sobre o arranjo tridimensional molecular, juntamente ao ordenamento periódico dos átomos ou moléculas, é extremamente útil para o entendimento das propriedades químicas, físico-químicas e biológicas dos compostos para os mais variados ramos da ciência⁶.

Na indústria farmacêutica, o processo de descoberta e desenvolvimento de novos fármacos requer demanda de tempo na ordem de 10 anos, processos elaborados com alta propriedade intelectual, sistematizado e bastante rigoroso, além de envolver altos custos. Do início do projeto até a introdução de um fármaco no mercado farmacêutico, são investidos até 15 anos em pesquisa e desenvolvimento (P&D), e estima-se que, em alguns casos, os gastos totais podem chegar a números de até US\$ 1 bilhão^{24,25}.

Atualmente, um dos grandes desafios de inovação das indústrias farmacêuticas está ligado à questão dos fármacos que apresentam polimorfismo, chamados de fármacos polimórficos. Estes sólidos são assim denominados, pois podem apresentar diferentes estruturas cristalinas para um determinado composto.

Determinar a estrutura cristalina de um composto ativo é uma das primeiras etapas do desenvolvimento de uma molécula com potencial interesse tecnológico, e o conhecimento de sua estrutura pode sugerir o quão facilmente ela pode ser formulada, ter aplicabilidade biológica e aludir sobre a sua durabilidade. Todavia, os compostos farmacêuticos podem existir em diferentes formas, apresentando diferentes arranjos estruturais, logo, diferentes propriedades físicas e químicas. Este fenômeno do polimorfismo, como já mencionado, é atualmente um grande problema na indústria farmacêutica, pois afeta diretamente a qualidade e eficácia de um fármaco, podendo resultar em ineficácia farmacêutica e também toxicidade. Por isso, o conhecimento dos diferentes

polimorfos de um cristal é essencial, antes dos estudos clínicos e dos testes de estabilidade, aludindo que a cristalografia de monocristais, por difração de raios X fornece tais informações estruturais que podem fazer a caracterização destes fármacos polimórficos²¹.

MINERALOGIA

No campo de estudo da ciência dos minerais – mineralogia, a utilização do método cristalográfico é de extrema notoriedade, uma vez que um mineral é um sólido de ocorrência natural com um arranjo atômico altamente ordenado e com composição química homogênea e definida. A determinação de sua estrutura cristalina fornece informações sobre posição atômica, tipo de ligações e a composição química dos blocos componentes básicos dos minerais. Informações essas fundamentais para os conceitos da cristalochimica que está relacionada com a composição química, estrutura interna e as propriedades físicas dos materiais cristalinos²⁶. O método da cristalografia de raios-X é utilizado para determinar a estrutura atômica dos minerais, desde 1920, sendo, assim, a mineralogia o ramo mais antigo da cristalografia. A utilização do método cristalográfico, para o estudo e entendimento dos minerais, remete a significativos avanços e informações que existem hoje sobre as rochas, formações geológicas e história da terra¹.

MACROMOLÉCULAS

As macromoléculas (moléculas com massa molecular elevada e formadas por um grande número de átomos de ordem superior a 1000 átomos) são uma das importantes classes de moléculas biológicas, como proteínas, ácidos nucleicos e vírus. A cristalografia para macromoléculas é notória, sendo uma grande área de aplicação desta metodologia. A determinação da estrutura de uma macromolécula é de extremo estimo, numa era em que os proteomas ganham importância fundamental, a determinação da primeira estrutura atômica da matéria foi realizada por Bragg. No entanto, só após 45 anos, foi possível a resolução da primeira estrutura de proteínas por M. F. Perutz e J. C. Kendrew, tratava-se da estrutura da mioglobina, que rendeu aos autores o Prêmio Nobel de Química em 1962²⁷.

O principal caminho tecnológico utilizado para a resolução da estrutura cristalina de macromoléculas



biológicas tem sido a cristalografia por difração de raios X, sendo até hoje a principal metodologia para o entendimento da estrutura de macromoléculas biológicas^{28,29}. A abordagem moderna para o desenvolvimento de drogas fundamenta-se no princípio fármaco-receptor, que se dá através de mecanismos de complementaridade estérica, química e geométrica entre o ligante e a macromolécula alvo. Uma vez conhecida a estrutura de uma enzima como alvo patogênico, estas informações tornam-se valiosas na busca de possíveis inibidores³⁰.

Considerações Finais

A Assembleia Geral das Nações Unidas elegeu 2014 como o Ano Internacional da Cristalografia, em reconhecimento às contribuições desta área do conhecimento para a compreensão da natureza e suas aplicações. Ao fazer a declaração formal do ano internacional, várias ações, divulgando a importância e o impacto desta área, têm sido realizadas em todo o mundo. A Cristalografia é uma área da ciência que se dedica, por excelência, ao estudo dos cristais e ao entendimento da sua estrutura molecular, tanto dos cristais minerais (encontrados em abundância na natureza), quanto dos cristais de proteínas, obtidos sob condições controladas nos mais modernos laboratórios de bioquímica. Em um sentido amplo do termo, a Cristalografia pode ser vista como uma viagem ao interior dos cristais, com o objetivo de entender suas propriedades, de desbravar sua organização atômica e de inferir sobre suas características fundamentais.

A diversidade dos cristais encontrados na natureza é uma beleza à parte, tanto pela simetria interna, quanto pela forma externa. Nesse sentido, o trabalho cristalográfico é um misto de arte e ciência, uma vez que cada cristal exibe particularidades únicas de organização das suas moléculas, o que os tornam admiráveis. Essa organização singular exige um sólido conhecimento científico para descrever suas propriedades com segurança e qualidade, por meio das mais complexas metodologias experimentais.

Ao olharmos para a história da ciência, várias conquistas podem ser pontuadas por essa área do conhecimento: desde a simples estrutura do cloreto de sódio (sal de cozinha) até as complexas estruturas

de proteínas do organismo humano. Vários nomes da ciência como William Bragg, Linus Pauling, Herbert H. Hauptman, dentre outros, receberam o prêmio Nobel pela significativa contribuição à Cristalografia. Hoje, a relevância e o impacto dela podem ser observados no atual entendimento das ligações químicas e no fundamento moderno da obtenção de novos fármacos.

Outro aspecto da Cristalografia, a ser pontuado, refere-se à ampla aplicação tecnológica proporcionada pelo entendimento dos cristais. Seria inconcebível pensarmos a descoberta de novos fármacos, divorciando-a do entendimento de suas estruturas moleculares. Seria, também, impossível o entendimento atual das funções das proteínas se suas respectivas estruturas moleculares não fossem conhecidas. Haveria uma expressa lista de argumentos a favor do suporte dado pela pesquisa básica a pesquisa aplicada, que, como consequência, alicerça as ações de inovação. O estudo da história da ciência, em geral, e da história da Cristalografia, em particular, mostra isso. Os primeiros pesquisadores em Cristalografia atuavam, particularmente, na academia e, com o avançar da pesquisa aplicada e da inovação tecnológica, uma significativa parte deles passou a atuar nos setores produtivos, com destaque para a mineração e para a indústria farmacêutica.

Os processos educacionais, sobretudo, em nível de graduação, sempre enquadraram a Cristalografia como sub-área da Física, da Química e, mais recentemente, da Biologia Estrutural. Tal visão se justifica na própria essência, extensão e abrangência da Cristalografia. Contudo, não se pode perder de vista a independência dessa área das demais. Ela possui trajetória, pressupostos e fundamentos únicos.

Referências Bibliográficas

1. Schneegans, S. "Cristalografia e aplicações: no íntimo da matéria!". **2013**. <http://www.unesco.org>, acessado em 17/11/2014.
2. Schwarzenbach, D. *Crystallography*. John Wiley & Sons. Chichester, **1996**.
3. Glusker, J. P.; Lewis, M.; Rossi, M.; "Crystal Structure Analysis for Chemists and Biologists". Oxford: VCH, 2ª ed., **1994**.
4. Nobel prize. <http://www.iucr.org>, acessado em 19/11/2014.
5. Napolitano, H. B.; Camargo, A. J.; Mascarenhas, Y. P.; Vencato,



- I.; Lariucci, C. Análise da difração dos Raios X. Revista Processos Químicos, Goiânia, v. 1, n. 1, p. 35-45, **2007**.
6. Fernandes, W. B.; Napolitano, H. B.; Pérez, C. N.; Martins, F. T.; Lariucci, C. Aplicações Tecnológicas da Metodologia Cristalográfica. Revista Processos Químicos, Goiânia, v. 4, n. 7, p. 19-32, **2010**.
 7. Giacovazzo, C.; Monaco, H. L.; Viterbo, D.; Scordari, F.; Gilli, G.; Zanotti, G.; Catti, M.; "Fundamentals of Crystallography". ed. Giacovazzo, Oxford: IUCR - Oxford University Press, 2ª ed., **2002**.
 8. Hammond, C.; "The Basics of Crystallography and Diffraction". Oxford: IUCr - Oxford University Press, 3ª ed., **2009**.
 9. Glusker, J. P.; Trueblood, K. N. "Crystal structure analysis: A primer." New York: IUCr - Oxford University Press, 3ª ed., 2010.
 10. Atkins, P.; Paula, J. Físico-Química. v.2, 8ª ed., Rio de Janeiro:LTC, **2008**.
 11. Clegg, W.; "Crystal Structure Analysis: Principle and Practices". New York: IUCr - Oxford University Press, 2ª ed., **2009**.
 12. Stout, G. H.; Jensen, L. H.; "X-Ray Structure Determination - A practical guide." New York: Wiley-Interscience, 2ª ed., **1989**.
 13. Shmueli, U.; "Theories and Techniques of Crystal Structure Determination". New York: IUCr - Oxford University Press, **2007**.
 14. Ladd, M.; Palmer, R. "Structure Determination by X-Ray Crystallography". Kluwer Academic", New York, 2ª ed., **2003**.
 15. Viterbo, D. "Em Fundamentals of crystallography". 2ª ed. New York: IUCr - Oxford University Press, 2ª ed., **2009**.
 16. Sheldrick, G. M.; "SHELXS-97 Program for the solution of crystal structures". Germany: University of Göttingen, **1990**.
 17. Altomare A. A.; Cascarano, G.; Giacovazzo, C.; Guagliardi, A.; "SIR92 - A program for crystal structure solution". J. Appl. Cryst., **1993**, v. 26, p. 343-350.
 18. Beurskens, P. T. et al. The DIRDIF-99 Program System. The Netherlands: Crystallography Laboratory, University of Nijmegen, **1999**.
 19. Sheldrick, G. M. "The SHELX-97 Tutorial". **1997**.
 20. Hall, S. R.; Allen, F. H.; Brown, I. D. "The Crystallographic Information File (CIF): a New Standard Archive File for Crystallography". Acta Cryst. A47, 655-685, **1991**.
 21. Napolitano, H. B.; Camargo, A. J.; Vencato, I.; Lariucci, C.; Ellena, J.; Cunha, S.; "Caracterização de Fármacos Polimórficos". Revista Estudos, v. 32, n. 11, p. 2021-2046, **2005**.
 22. Müller, P.; Irmer, R. H.; Spek, A. L.; Schneider, T. R.; Sawaya, M. R.; "Crystal Structure Refinement: A Crystallographer's Guide to SHELXL" New York: IUCr - Oxford University Press, **2006**.
 23. Spek, A. L.; "Platon / Pluton". Acta Cryst. A, 1990, v. 46.
 24. Guido, R.V. C.; Andricopulo, A. D. Modelagem Molecular de Fármacos. Revista Processos Químicos. Goiânia, v. 2, n. 4, p. 24-36, **2008**.
 25. Andricopulo, A. D.; Garratt, R. C.; Oliva, Glaucius. A importância da inovação no desenvolvimento da indústria farmacêutica. Revista Estudos, Goiânia - GO, v. 32, n. 11, p. 1877-1899, **2005**.
 26. Klein, C.; Dutrow, B.; Manual de ciências dos minerais; Trad. e Rev. Téc.: Rualdo Meneget - 23ª ed., Porto Alegre: Bookman, **2012**.
 27. Al Karadaghi, S. Introduction to Protein Crystallography: X-ray Diffraction and Data Collection. 2014. <http://www.proteinstructures.com/Experimental/Experimental/protein-crystallography.html>, acessado em 20/11/2014.
 28. Blundell, T. L.; Johnson, L. N. Protein Crystallography. Academic Press. USA. **1976**.
 29. Drenth, J. Principles of Proteins X-Ray Crystallography. Springer-Verlag. New York. USA. **1994**.
 30. Napolitano, H. B.; Estudos estruturais da enzima Fosforribosilpirofosfato sintase de Cana-de-açúcar. Tese (Doutorado - Área de Física Aplicada) - Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, **2004**.

Leonardo R. Almeida^{1*},
Jhonata J. Silva¹, Vitor S.
Duarte¹, Thalita N. S. dos
Santos¹ & Hamilton B.
Napolitano^{1,2}

¹Unidade Universitária de Ciências Exatas e Tecnológicas, UEG. Caixa Postal 459, CEP 75001-970, Anápolis, GO, Brasil.

²Faculdade de Tecnologia SENAI Roberto Mange, CEP 75113-630, Anápolis, GO, Brasil.

*E-mail: leonardochem@hotmail.com

Avaliação do Nível de Intensidade do Capital Intelectual das Redes de Atendimento Setoriais do SESI

Julio A. Z. dos Santos & Jefferson O. Gomes

A avaliação do Capital Intelectual de Redes Organizacionais de Segurança e Saúde do Trabalho para o escalonamento das prioridades é essencial para o atendimento das demandas das indústrias, pois além de alinhar as expectativas dos diversos *Stakeholders*, contribui com a melhor forma de realizar futuros investimentos na rede. Para realizar a avaliação do capital intelectual, esse trabalho propõe a utilização de multimetodologias, a partir da combinação das metodologias InCaS para realizar a avaliação do Capital Intelectual – CI de redes organizacionais de SST, e o Método de Multicritério a AHP com *Ratings* visando realizar o escalonamento das prioridades para a tomada de decisão.

Palavras chaves: Rede Organizacional; Capital Intelectual; Método Multicritério.

The valuation of Intellectual Capital Organizational Networks Safety and Health at Work the schedule of priorities is essential to meet the demands of industries, as well as align the expectations of the various stakeholders, contributes the best way to make future investments in the network. In order to evaluate intellectual capital, this paper proposes the use of multi methodologies with combination of InCaS methodologies to conduct the evaluation of the Intellectual Capital - IC organizational networks of SST, and the multicriteria method AHP with ratings to perform the scheduling of priorities for decision making.

Keywords: Organizational Network; Intellectual Capital; Multicriteria Methods.

Introdução

Diante das pressões econômicas, da necessidade de aumento da produtividade e da competitividade, dos avanços tecnológicos, do aperfeiçoamento profissional, do estabelecimento de redes de relacionamentos, organizações buscam meios para aperfeiçoar, medir e controlar seus ativos intangíveis.

Neste contexto, segundo Malavski et al., (2010)¹, o plano estratégico da organização tem suas raízes na análise nos aspectos relacionados aos ambientes internos (forças e fraquezas) e externos (oportunidades e ameaças), as quais, na sua maioria, dependem do capital humano, estrutural e relacional que compõem a organização; da forma como as competências individuais se integram no trabalho coletivo; da qualidade da coordenação dos esforços das equipes na transformação dos recursos em valor aos seus Stakeholders.

Os ativos intangíveis podem ser qualificados em duas categorias centrais de propósito econômico: ativos de geração de valor (como Marcas, Inovação e Capital Intelectual) e ativos de proteção de valor (como Segurança da Informação, Gestão de Riscos e Governança Corporativa), variando em dimensões de impacto e materialidade de curto prazo a médio e longo prazos (DOMENEGHETTI, p. 13, 2009)².

O presente artigo tem como objetivo propor uma metodologia de aplicação do método InCaS para definir a estrutura hierárquica do problema, visando à avaliação do nível de intensidade e priorização do Capital Intelectual – CI por meio da AHP com Ratings das redes setoriais de atendimento à segurança e saúde do trabalho do SESI à indústria.

Referencial Teórico

INTELLECTUAL CAPITAL STATEMENT

Segundo European Commission DG Research (2010)³, o Intellectual Capital Statement – ICS é um instrumento de gestão estratégica para avaliação e desenvolvimento do Capital Intelectual (CI) de uma organização. Ele mostra como Capital Intelectual está ligado a metas corporativas, processos de negócios e para o sucesso de uma organização, por meio de indicadores para medir esses elementos.

Com objetivo de oferecer para as pequenas e médias empresas uma ferramenta de desenvolvimento do relatório do seu Capital Intelectual – CI, em junho de 2006, a metodologia InCaS teve início como parte de um programa de investigação financiado pela Comissão Europeia, coordenado pela Confederação Europeia das Associações de Pequenas e Médias Empresas, coordenado cientificamente pelo Fraunhofer Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik Fraunhofer IPK, com a área de Pesquisa & Desenvolvimento realizado pela London School of Economics and Political Sciences (LSE) e com apoio do grupo de peritos do Intangible Assets Consulting (IAC), UNIC Universal Networking Intellectual Capital AB, University of Maribor, ARC Systems Research GmbH (ARCS), Wissenskapital Entwicklungsunternehmen GmbH (WEKE), além da contribuição de associações empresariais da França, Alemanha, Espanha, Eslovênia e Polônia.

Segundo Will, Wuscher e Bodderas (2006)⁴, para obter a vantagem competitiva, é fundamental que pequenas e micro (PME) empresas utilizem o conhecimento de forma eficiente e para melhorar o seu potencial de inovação.

O ambiente de negócio é a interação existente entre o processo de negócio com a estratégia e visão da organização, os quais devem estar alinhados, possibilitando o alcance do sucesso de negócio. No modelo estrutural, são imprescindíveis a gestão do conhecimento do Capital Intelectual e monitoramento do seu desempenho, com objetivo de estabelecer ações de melhoria.

Conforme European Commission DG Research (2010), a organização está inserida no ambiente de negócio, em que Capital Intelectual (CI) é dividido em três categorias: Capital Humano (CH), Capital Estrutural (CE), e Capital Relacional (CR), os quais descrevem os recursos intangíveis de uma organização, sendo:

- Capital Humano (CH): definido como “o que funcionário adiciona de valor ao processo de negócio”;
- Capital Estrutural (CE): definido como “o que acontece entre as pessoas, como as pessoas estão conectadas dentro da empresa, e o que resulta quando o empregado deixa a empresa”;
- Capital Relacional (CR): definido como “as relações da empresa com as partes interessadas externas (Stakeholders)”.



Os Processos de Negócios (PN), representados no modelo estrutural do InCaS, referem-se às atividades dentro de uma organização e seus contextos como atuação em rede. Eles proporcionam a saída da organização, que são os produtos e/ou serviços entregues aos seus clientes. O PN descreve a interação de pessoas, recursos operacionais, conhecimento e informação em etapas coesas. A criação de valor, neste processo de negócios, é suportada por uma gestão do conhecimento organizacional.

O Sucesso do Negócio (SN) é o resultado operacional, o que é obtido pela interação dos recursos organizacionais (intangíveis) disponíveis nos processos de negócio. O sucesso do negócio compreende, nos ativos tangíveis da organização, como, por exemplo, o crescimento da produção e o respectivo faturamento, além dos ativos intangíveis, por exemplo, imagem da organização e fidelidade de clientes.

No caso do objeto de estudo, a estrutura do Capital Intelectual das Redes Setoriais de Atendimento SESI à indústria é definida, por meio do workshop durante a sessão de *brainstorming* com os gestores e especialistas do Departamento Nacional e Regional do SESI, para definição de uma hierarquia que possibilite a utilização da Analytic Hierarchy Process - AHP com Ratings, que objetiva avaliar o nível de intensidades destes fatores que compõem o Capital Intelectual.

AVALIAÇÃO DA QUALIDADE, QUANTIDADE E SISTEMÁTICA DO CI

Segundo Mertins e Will (2007)⁵, a avaliação dos fatores do CI identifica a situação inicial, no que diz respeito a suas forças e fraquezas. A equipe do projeto realiza uma autoavaliação de cada fator, quanto à quantidade, à qualidade existente e à sistemática de gestão (avaliação “Quantity, Quality, e Systematic - QQS”). Com isso, a avaliação do QQS deve estar alinhada com o planejamento estratégico da organização.

Cada fator crítico é pontuado numa escala de 0 a 120%. Para avaliações insatisfatórias ou não suficientes, o seu grau de desenvolvimento será considerado 0%, para avaliações parcialmente suficientes, o seu grau será de 30%. Para avaliações suficientes, em grande parte, seu grau será de 60%. Para avaliações totalmente suficientes, seu grau será 90% e para avaliações consideradas

melhores ou mais do que o necessário, 120%. Neste caso, permite indicar fatores que são mais empregados ou investidos operacionalmente do que estrategicamente necessário, permitindo, assim, uma racionalização.

Para obtenção dos resultados destes valores, empregam-se tabelas de gráficos elaborados no MS Excel® ou software Wissensbilanz-Toolbox (“Caixa de Ferramentas - Capital Intelectual”), desenvolvido pelo Instituto Fraunhofer IPK Berlim, Alemanha, durante o projeto “Wissensbilanz – Made in Germany”.

ANÁLISE DE IMPACTO DOS FATORES DE CI (PONTUAÇÃO DE IMPACTO E MATRIZ DE IMPACTO CRUZADO)

A análise de impacto dos fatores de CI permite a priorização de áreas de intervenção. Para analisar a relação, a importância de cada fator, a equipe do projeto do CI estrutura uma matriz de impactos cruzados e capta a influência mútua entre os fatores, resultando numa influência relativa.

A matriz de impacto cruzada analisa cada fator, no que diz respeito à sua influência sobre outros fatores, em que a pontuação de impacto emprega-se (0) para fraca influência, (1) para forte influência (2) ou (3) para influência exponencial de um fator de CI sobre outro. (European Commission DG Research, 2010)

No caso de aplicação da matriz de impacto, a qual não correlaciona os julgamentos entre os fatores cujos valores obtidos serão apenas referentes ao impacto do CI no sucesso do negócio, definidos pelos membros da equipe do projeto InCaS, resultando numa importância relativa.

ANALYTIC HIERARCHY PROCESS – AHP COM USO DE RATINGS

No processo de priorização das ações de gerenciamento dos ativos intangíveis das redes setoriais de segurança saúde do trabalho, o método que será utilizado é o Analytic Hierarchy Process (AHP), pois conforme Saaty (1980)⁶, o método promove a superação das limitações cognitivas dos tomadores de decisão.

Conforme Nascimento (2010)⁷, o Analytic Hierarchy Process (AHP), é um dos mais utilizados para solucionar problemas que envolvem múltiplos critérios, sendo aplicado nas diversas áreas. É usado para organizar

elementos relativos a um problema de decisão em magnitudes comparáveis da maior para a menor nos níveis de uma hierarquia.

Desenvolvido por Thomas L. Saaty (1980)⁶, o AHP baseia-se na capacidade humana de usar informação e experiência para estimar magnitudes relativas, por meio de comparações par a par que serão utilizadas para construir escalas de razão sobre uma variedade de dimensões tangíveis e intangíveis. No caso deste estudo, o processo de organização e avaliação dos ativos intangíveis, compreendidos nos pilares do Capital intelectual, que são o Capital Humano, Capital Relacional e Capital Estrutural, possibilitará uma estruturação hierárquica e o julgamento de especialistas e decisores, quanto às prioridades do problema.

A estrutura com abordagem ratings é diferente do AHP tradicional (medição relativa), pois no último nível, não se encontram as alternativas. A avaliação é realizada, a partir de níveis de intensidades (categorias) atribuídos a cada subcritério, relacionados a cada alternativa, ao invés de avaliar as comparações par a par das alternativas.

Para estabelecer a importância relativa entre estas categorias (obtenção dos vetores de prioridades), os valores/opiniões do especialista e dos decisores são incorporados ao sistema ratings. Neste caso, os especialistas e decisores estão associados à participação e gestão da respectiva rede organizacional.

Segundo Nascimento (2010)⁷, para classificar alternativas, precisam ser criados níveis de intensidade ou grau de variação de qualidade sobre um critério, como por exemplo, excelente, acima da média, médio, abaixo da média e pobre. Tais classificações serão comparadas par a par, a fim de que se estabeleçam prioridades. Estas, por sua vez, serão normalizadas dividindo-se cada uma pelo maior valor entre elas, de tal forma que a classificação “excelente” receba valor 1 e as subsequentes recebam valores proporcionalmente menores.

A principal vantagem do uso da AHP com ratings, é o de reduzir o número de comparações necessárias quando o número de alternativas é grande, sendo que na AHP tradicional é recomendável no máximo 9 alternativas. Neste processo, com o uso de medida absoluta (ratings) não ocorre a inversão das alternativas, quando novas, são incluídas e excluídas.

O AHP apresenta-se como um método que permite a decisão em grupo, visto que disponibiliza as informações necessárias para os decisores interpretarem o problema de forma clara e objetiva.

Portanto, de acordo com Forman e Peniwati (1998)⁸, o comportamento do grupo é o fator que determinará a forma com que as informações serão analisadas e agregadas. No caso do grupo que atua como uma unidade, utiliza-se uma abordagem do AHP, conhecida como Agregação Individual de Julgamentos (AIJ). Já para grupos que preferem manter a análise individual, existe a Agregação Individual de Prioridades (AIP). Em ambos os casos, podem-se atribuir diferentes pesos aos decisores no processo, ou então, considerá-los de mesmo grau de importância para a decisão.

Para a proposta da metodologia, a avaliação par a par das prioridades referentes aos subcritérios dos subcritérios, de acordo com os critérios e dos critérios, conforme o objetivo, ocorrerá individualmente por empresas clientes da Rede SESI, com isso, o método de que será utilizado é a Agregação Individual de Prioridades – AIP, em função das independências destes clientes.

Desenvolvimento

Na metodologia proposta, o processo de decisão do método AHP com Ratings não possui alternativas, pois o objetivo é identificar o nível de priorização do capital intelectual e seus respectivos fatores do Capital Humano, Relacional e Estrutural.

A estrutura do problema, conforme previsto no método InCaS, é estabelecida por meio de workshop com os gestores locais e nacionais de uma Rede SESI de atendimento. Neste processo, os gestores das redes validam os fatores críticos do Capital Intelectual, conforme dados apresentados sobre o planejamento estratégico da instituição, os indicadores primários e secundários de acidentes de trabalho no Brasil e os custos com Fator Acidentário de Prevenção/ Seguro Acidente de Trabalho (FAP/SAT) das indústrias, os quais estão associados aos acidentes de trabalho.

Com o InCaS, a estrutura hierárquica do problema tem como objetivo avaliar o nível de intensidade do Capital Intelectual da rede, como Ponto de Vista – PV os critérios, como Ponto de Vista Fundamental – PVF os subcritérios e Ponto de Vista Elementares os Ratings.

Para a avaliação dos pontos fortes e fracos dos fatores críticos de sucesso do Capital Intelectual, é utilizada a metodologia QQS (quantidade, qualidade e sistemática), aplicada em cada núcleo regional, possibilitando uma análise local e global da Rede SESI de atendimento. Na avaliação do impacto e influência entre os fatores críticos, é utilizada a matriz de impacto cruzado, a qual permite juntamente com o QQS avaliar o portfólio local do capital intelectual, considerando a existência de fatores que necessitam desenvolver (com média QQS baixa e influência relativa alta), estabilizar (com média QQS e influência relativa alta), analisar (com média QQS e influência relativa baixa), e ainda aqueles que não necessitam de ação (com média QQS alta e influência relativa baixa), cabendo apenas o monitoramento.

Após a estruturação do problema e definição da hierarquia por meio do InCaS, são realizados os julgamentos das matrizes par a par dos critérios (conforme o objetivo global), dos subcritérios (de acordo com o critério) e dos ratings (conforme os subcritérios). Estes julgamentos são realizados com a visão externa, empresas clientes da Rede

SESI, para uma avaliação e com a visão interna dos gestores locais da rede. O método é aplicado, conforme definido por Forman e Peniwati (1998)⁸, com o emprego da Agregação Individual de Prioridades (AIP), em que a decisão a ser tomada pelo grupo considera os julgamentos de cada indivíduo, separadamente, de acordo com os critérios estabelecidos, para depois agregá-los para obter a síntese do grupo. Este processo possibilita uma avaliação dos pontos de vistas entre cliente e fornecedor, permitindo identificar pontos de melhoria e alinhamento de estratégias.

Para facilitar a comunicação entre os gestores locais da rede, após definição da estrutura hierárquica no workshop, é utilizado o MS Excel® para registro dos dados de campo (clientes e gestores da rede), referente ao QQS e aos julgamentos das matrizes “par a par” da AHP. De posse dos dados, são utilizados os softwares Wissenbilanz-Nord para análise do QQS e o Superdecision para análise da AHP com Ratings. O método proposto no estudo está representado na Figura 01.

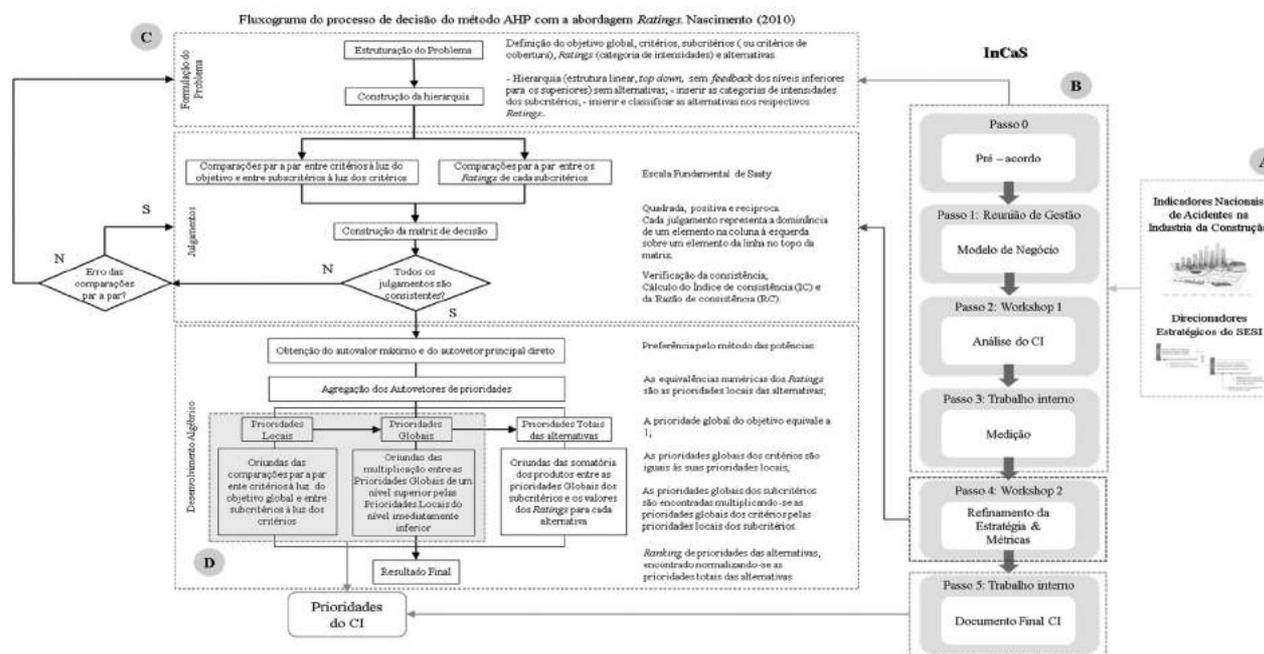


Figura 1. Metodologia proposta para avaliação do nível de intensidade do Capital Intelectual com uso do InCaS e AHP com Ratings. Fonte: O Autor

PROCESSO DA METODOLOGIA PROPOSTA

A metodologia proposta segue as etapas, conforme Figura 01 e descritas a seguir:

Identificação de direcionadores estratégicos e modelo lógico da rede

Para o desenvolvimento da metodologia proposta, são identificados os principais indicadores de demanda, relacionados com os acidentes de trabalho do setor industrial, direcionadores estratégicos da organização em que a rede de atendimento SESI está inserida.

- Indicadores referentes ao nº de trabalhadores, nº de empresas e de acidente de trabalho na indústria da construção: os dados utilizados são extraídos de relatórios oficiais do Governo Federal, originados dos registros dos afastamentos dos trabalhadores por motivos de acidentes de trabalhos, referentes aos acidentes por motivo, arrecadação do Seguro Acidentário Previdenciário – SAT, nº de trabalhadores e nº de empresas. Estas informações são fundamentais para identificar a demanda por serviços de SST, ofertado pela rede organizacional objeto desse estudo.
- Direcionadores estratégicos: as redes SESI de atendimento têm como objetivo ofertar serviços de SST para a indústria, com o intuito de reduzir os principais indicadores relacionados ao acidente de trabalho, contribuindo, desta forma, com a produtividade e competitividade da empresa. Neste contexto, é utilizado, como referencial estratégico, o Planejamento Estratégico Integrado SESI-SENAI-IEL de 2015 a 2022 cujo foco prioritário desse estudo será direcionadores de Qualidade de Vida na área de Segurança e Saúde do Trabalho – SST.

Desenvolvimento do InCaS da Rede SESI de atendimento à Indústria

Nessa etapa, são seguidos os passos previstos no método InCaS, iniciando um workshop com os stakeholders envolvidos no processo decisório para a definição do objetivo geral, dos pontos de vista e definição dos ratings. O desenvolvimento do InCaS é realizado com os gestores da Rede SESI de atendimento à Indústria, em que se aplicam os questionários QQS com suas equipes para avaliarem o impacto local, permitindo uma reflexão entre gestores e especialistas quanto ao seu papel e o impacto

do capital intelectual para a rede. As etapas posteriores estão descritas abaixo:

Passo 1: Reunião de Gestão (Modelo de Negócio): em um workshop, são definidos os limites de atuação da rede, a qual tem como referência o seu modelo lógico, desenvolvido por gestores nacionais da organização, possibilitando a definição do modelo de criação de valor, definição da estratégia de negócios (ambiente externo de negócios, os principais objetivos estratégicos, o sucesso do negócio). Estes aspectos são descritos no relatório do Capital Intelectual da rede, alinhado com os pontos fortes e fracos identificados na metodologia QQS.

Passo 2: Workshop 1 (Análise do Capital Intelectual – CI): com base na reunião de formada pelos gestores nacionais, realiza-se um workshop com interlocutores regionais cujo objetivo é identificar os fatores críticos, Capital Intelectual (Capital Humano, Estrutural e Relacional) em sua estrutura local que impacta a rede. Com base nestas informações, o grupo de interlocutores recebe orientações quanto ao processo de avaliação do QQS (qualidade, quantidade e sistemática) e da matriz de impacto e influência entre os fatores do CI, além de ferramentas (formulários e planilha) para aplicar a metodologia na estrutura local. O resultado é consolidado com a rede nacional, permitindo avaliação local e global da rede. Com estas informações, é possível avaliar o portfólio do capital intelectual e as possíveis intervenções.

O Capital Intelectual (Humano, Estrutural e Relacional), seus respectivos fatores críticos e os respectivos níveis de intensidades, resultam na estrutura hierárquica (Figura 02) necessária para aplicação do método AHP com Ratings.

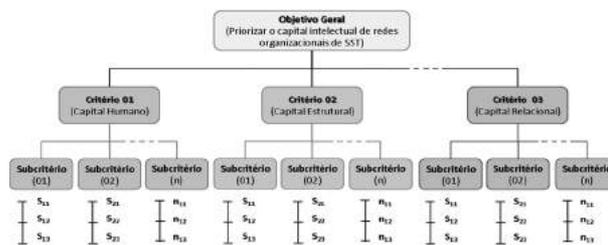


Figura 02: Estrutura hierárquica resultante do InCaS. Fonte: O Autor



Passo 3: Trabalho Interno (Medição): com base no mapeamento dos fatores críticos do Capital Intelectual, a equipe de gestores nacional define os indicadores de monitoramento para avaliar a evolução do processo. Estes indicadores servem como referência para definição dos ratings.

Passo 4: Workshop 2 (Refinamento da Estratégia e Métricas): de posse do diagnóstico realizado, interlocutores locais, os dados são inseridos no software Wissenbilanz-Nord para a análise dos pontos fortes e fracos, do impacto entre os fatores, além das áreas de intervenção, conforme a média QQS e a influência relativas destes fatores.

Aplicação do método AHP com Ratings

O fluxo proposto tem como referência Nascimento (2010)⁷, a partir das etapas de estruturação do problema definido pelo InCaS, julgamentos realizados pelos decisores formado por clientes e membros da rede organizacional de SST, o desenvolvimento algébrico, apoiado pelo software Superdecision, resultando na apresentação do documento final, alinhado com dados gerados pela metodologia InCaS. Neste contexto, serão realizados os seguintes passos:

Passo 1: A partir da definição da estrutura hierárquica do problema, os gestores locais da Rede SESI de atendimento à Indústria recebem orientações quanto à aplicação da metodologia. Eles têm como apoio um formulário composto por questões referentes ao modelo e planilha eletrônica MS Excel® para inserção dos julgamentos dos decisores, com intuito de avaliarem consistências dos valores durante a dinâmica com clientes e membros das redes. Isso possibilita a revisão de julgamentos que forem necessários, conforme prevê Saaty (1990).

Passo 2: De posse dos dados de campo, é realizado o desenvolvimento algébrico com a Agregação Individual de Prioridades (AIP), aplicação da média aritmética, conforme Figura 03, lançamento dos dados no software Superdecision para avaliações dos índices locais, globais, geração das priorizações, quanto aos julgamentos realizados pelos clientes e membros da rede. A matriz de prioridades finais das alternativas define seu respectivo ranking que servirá para priorizar ações de melhorias na rede organizacional.

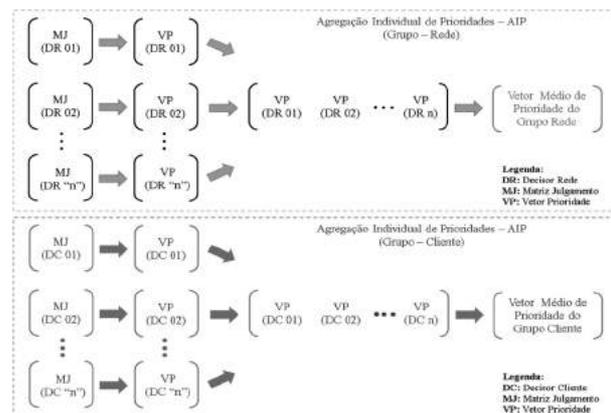


Figura 03. Agregação Individual de Prioridades – AIP dos grupos de membros da rede e clientes. Fonte: O Autor

Para utilização dos julgamentos, todos os grupos de decisão possuem o mesmo peso.

Priorização do capital intelectual

A última etapa é a apresentação das priorizações do Capital Intelectual da estrutura hierárquica analisada. Com isso, apresenta-se estrutura mínima com informações sobre o Capital Intelectual da rede, recomendações quanto às oportunidades de melhoria e a matriz de priorização dos capitais, de forma a subsidiar futuros investimentos para o desenvolvimento da rede organizacional.

Considerações Finais

O objetivo deste trabalho foi apresentar uma proposta de aplicação do método InCaS, com intuito de definir a estrutura hierárquica do problema para a avaliação do nível de intensidade e priorização do Capital Intelectual – CI de redes de atendimento setoriais em SST do Serviço Social da Indústria - SESI, por meio método multicritério de apoio a decisão, AHP com o uso de Ratings.

A aplicação desta metodologia na rede possibilitará aos gestores da organização a priorização de investimentos no Capital Intelectual de maior impacto e de geração de valor para a indústria.

A construção da hierarquia, desenvolvida pelos gestores de redes, possibilitará o alinhamento da expectativa da indústria quanto à necessidade de redução dos acidentes de trabalho e seus respectivos custos, com o Capital Intelectual da organização, provedor de soluções em SST, além de permitir investimento nos principais fatores geradores de valor para a indústria.

Para trabalho futuros, sugere-se a implementação de um monitor de Capital Intelectual da rede para acompanhamento das melhorias e alinhamento com a indústria.

Referências

1. Malavski O. S.; Lima E. P.; Costa S. E. G.. Modelo para a mensuração do capital intelectual: uma abordagem fundamentada em recursos, *Produção*, v. 20, n. 3, jul./set. **2010**, p. 439-454.
2. Domeneghetti, D., Meir, R. Ativos intangíveis: Como sair do deserto competitivo dos mercados e encontrar um oásis de valor e resultados para sua empresa. Rio de Janeiro: Elsevier, **2009**
3. European Commission DG Research. Information about InCaS. "InCaS: Intellectual Capital Statement - Made in Europe". **2010**
4. WILL, M.; Wuscher, S.; Bodderas, M.: Wissensbilanz - made in germany - nutzung und bewertung der wissensbilanz durch die pilotunternehmen", recent study by fraunhofer ipk, berlin. retrieved may 2nd, 2007, <http://www.akwissensbilanz.org/projekte/kmuwirkungstest teil 2.pdf>(**2006**)
5. Mertins, K. and Will, M. A consistent assessment of intellectual capital in SMEs InCaS: Intellectual Capital Statement - Made in Europe." *The Electronic Journal of Knowledge Management* Volume 5 Issue 4, **2007**, pp. 427 - 436, available online at www.ejkm.com
6. Saaty, T.L.: How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process. *European Journal of Operational Research*, **1990**.
7. Nascimento, L.P.A.S. Aplicação do método AHP com as abordagens Ratings e BOCR:O Projeto F-X2. Tese de mestrado - Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos, **2010**.
8. Forman, E., e Peniwati, K. Aggregating individual judgments and priorities with the analytic hierarchy process, *European Journal of Operational Reserach*, 108, 165-169. **1998**.

Julio A. Z. dos Santos* &
Jefferson O. Gomes

Departamento Nacional do SESI. Brasília-DF.

*E-mail: julio.zorzal@sesi.org.br

Fotodegradação do Corante Vermelho Congo Utilizando Dióxido de Titânio

Leonardo R. Caixeta & Leonardo L. Costa

Um dos métodos e formas para o tratamento de efluentes é o uso dos Processos Oxidativos Avançados (POAs), juntamente com a Fotocatálise Heterogênea, que são cada vez mais utilizados, por possuir uma característica oxidante acentuada. O presente artigo tem como objetivo principal analisar e entender a fotodegradação do corante vermelho congo, encontrado em efluentes têxteis, ou seja, a degradação deste composto poluente, através da luz. A fotodegradação foi realizada através dos Processos Oxidativos Avançados (POAs), com a utilização do catalisador dióxido de titânio (TiO_2) e nanotubo de dióxido de titânio e radiação ultravioleta (agente ativador do processo). Esta radiação ultravioleta foi adquirida por meio de uma lâmpada vapor de mercúrio 125 W. Na tentativa de melhorar o processo de degradação do corante vermelho congo, variou-se o pH meio reacional, com intuito de verificar em qual pH o processo de degradação é mais eficiente.

Palavras-Chave: *Processos Oxidativos Avançados (POAs), Fotodegradação, Fotocatálise Heterogênea.*

One of the methods and forms for the treatment of effluent is the use of the Advanced Oxidativos Processes (POAs) together with the Heterogeneous photocatalysis that are each time more used, for possessing an accented oxidant characteristic. The present article has as objective main to analyze and to understand the photodegradation of the red corants the Congo found in effluents, that is, the degradation of this pollutant composition, through the light. The photodegradation was carried through in the Advanced Oxidativos Processes (POAs), with the use of the catalytic dioxide of titanium (TiO_2) and nanotubs of titanium dioxide and ultraviolet radiation (activator agent of the process). This ultraviolet radiation was acquired by means of a light bulb mercury vapor 125 W. In the attempt to improve the process of degradation of the red corants the Congo, varied pH half reactional in the attempt to verify in which pH the degradation process is more efficient.

Word-Key: *Advanced processes Oxidatives (POAs), Photodegradation, Heterogeneous Photocatalises.*

Introdução

Os problemas ambientais têm se tornado cada vez mais críticos, devido principalmente ao crescimento populacional e ao aumento da atividade industrial. Estas informações geram problemas graves ao meio ambiente, sendo que as consequências podem ser observadas nas alterações, quanto à qualidade do solo, do ar e também das águas¹.

A contaminação de águas naturais tem sido um dos grandes problemas da sociedade moderna. Os cuidados quanto ao uso correto e desperdícios de água em processos produtivos vêm ganhando especial atenção, devido a sua importância em processos industriais e em vários outros setores, sendo um bem que influenciará na economia de qualquer país, principalmente, países em desenvolvimento¹. A contaminação e poluição do meio ambiente e das águas que o compõem, por meio dos compostos orgânicos de origem industrial, causam prejuízos e problemas à saúde do homem e prejudicam os demais seres vivos. Estes compostos orgânicos poluentes apresentam uma variedade de substâncias químicas. Consequentemente, a possibilidade de aplicação de um método de tratamento universal confiável e eficiente é descartado, abrindo possibilidades para o desenvolvimento de métodos de tratamento alternativos para a descontaminação das águas e do meio ambiente².

Os corantes são altamente visíveis a olho nu, sendo detectáveis, em alguns casos, em baixas concentrações, 1mg/L. Estas características físico-químicas dos corantes estabelecem a esses algumas vantagens e desvantagens, pois uma pequena quantidade lançada em efluentes aquáticos pode causar grande mudança de coloração nas águas, mas pode também ser facilmente detectada para posteriores análises e processos de descontaminação⁴. Até a metade do século XIX, todos os corantes eram derivados de folhas, ramos, raízes, frutos ou flores de várias plantas e de substâncias extraídas de animal. Embora a indústria de corantes têxteis tenha se originado na Europa, desde o século XVI, o primeiro corante sintético foi descoberto apenas em 1856 na Inglaterra. Com a intensa inovação tecnológica ao redor de 1915, a Alemanha manteve o monopólio sobre a produção de corante sintético até a Segunda Guerra Mundial. Hoje a indústria de corantes dos Estados Unidos é a maior fonte exportadora destes produtos, colocando no mercado

aproximadamente 2000 tipos diferentes de corantes sintéticos. Desde o descobrimento do Brasil, sua história está relacionada à produção de corantes. A começar pelo nome do país, uma vez que este é proveniente da madeira Pau-Brasil, fonte natural de corante avermelhado. Durante grande parte do século XIX, o Brasil também foi fonte principal do índigo natural (extraído da *Indigofera tinctoria*). A produção industrial de corantes sintéticos no país foi introduzida logo após a Primeira Guerra Mundial e atualmente supre 60% da sua demanda doméstica⁴.

As indústrias têxteis são os principais modelos de empresas que se destacam quanto à poluição ambiental e principalmente quanto à contaminação de efluentes. Estas utilizam corantes nos processos de pintura dos tecidos e matérias-primas similares, e um dos corantes utilizados neste processo é o corante chamado vermelho congo. Consequentemente, os resíduos gerados têm, em sua composição, os corantes utilizados no processo. O agravante principal que explica o descarte dos poluentes orgânicos, nos efluentes pelas indústrias têxteis, é o fato de que o controle e o tratamento dos efluentes são inviáveis economicamente para as empresas e indústrias, de forma que, em grande parte dos processos industriais, o descarte destes compostos é realizado sem o menor discernimento e controle¹⁰.

O Corante Vermelho Congo

A degradação e a poluição do meio ambiente estão relacionadas com a presença de agentes tóxicos e não biodegradáveis, constituídos principalmente por compostos e substâncias orgânicas, de origem industrial e proporcionam problemas e danos aos seres vivos. Existe uma grande variedade de poluentes com diferentes composições químicas, estes podem ser tratados com diferentes métodos de descontaminação da água².

Um destes compostos orgânicos relacionados com a degradação e poluição do meio ambiente é o corante chamado vermelho congo ou vermelho do congo, um sal sódico do ácido benzidinodiazó-bis-1-naftilamina-4-sulfônico cuja fórmula molecular é $C_{32}H_{22}N_6Na_2O_6S_2$ e peso molecular de 696.66 g/mol. Vermelho do congo é solúvel em água, produzindo uma solução coloidal vermelha, sendo que sua solubilidade é melhor em solventes orgânicos, tais como o etanol⁴.

Ele tem forte afinidade com fibras de celulose, por isso mesmo, é muito utilizado na coloração de tecidos.



Entretanto, o uso de vermelho do congo na indústria de celulose foi abandonado, pois este apresenta alta toxicidade⁴.

O corante vermelho congo foi utilizado no presente trabalho na tentativa de sua fotodegradação, que possui ainda diversas aplicações, principalmente, dentro das indústrias têxteis⁴.

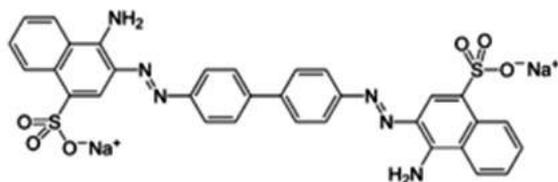


Figura 1. Fórmula estrutural do corante Vermelho Congo⁴.

Métodos Convencionais de Tratamento de Efluentes

Os métodos convencionais de tratamento de efluentes industriais estão relacionados com processos baseados na mudança de fase e na degradação dos poluentes. Os processos que envolvem a mudança de fase, como por exemplo, a precipitação, a coagulação, a filtração e a adsorção, são caracterizados por reduzirem o volume do meio contaminado pela transferência do contaminante, onde sua degradação não acontece. Assim, é obtida uma fase composta pela água limpa e outra pelo contaminante. Existem outros processos, chamados de processos oxidativos, estes estão baseados na degradação total dos resíduos contaminantes¹¹.

Outro processo utilizado na descontaminação de poluentes orgânicos é a incineração, esta baseia-se na mineralização dos compostos orgânicos, submetendo-os a altas temperaturas. Possui como vantagem o fato de promover a oxidação destes compostos, sendo utilizada no tratamento de resíduos em geral. As desvantagens quanto à utilização deste método estão relacionadas ao custo e à dificuldade de operação, pois estão envolvidas temperaturas geralmente maiores que 900°C. Conseqüentemente, este processo mostra-se mais adequado para tratar soluções aquosas contaminadas⁸.

Os processos de descontaminação mais comuns

, utilizados no tratamento de efluentes têxteis, são os físico-químicos e também os processos biológicos. No entanto, estudos realizados determinam os corantes como sendo muito reativos e com fórmula estrutural química complexa, com isso, tem-se uma dificuldade quanto a sua retirada e desaparecimento das cores. Alguns processos físico-químicos, por exemplo, coagulação e floculação são desenvolvidos com o objetivo de remover a cor dos efluentes. Entretanto, esses processos e métodos apenas modificam o corante, minimizando parcialmente o problema, mas eliminam totalmente os compostos orgânicos, principais responsáveis pela contaminação¹².

Um dos processos e métodos eficientes quanto à degradação dos corantes que contaminam efluentes são os Processos Oxidativos Avançados (POA), estes apresentam resultados satisfatórios quanto à degradação de poluentes orgânicos. Os Processos Oxidativos Avançados (POA) são aplicados no tratamento de águas com os mais diversos tipos de compostos orgânicos, como por exemplo: pesticidas, herbicidas e corantes, podendo ser também utilizados no tratamento de compostos poluentes com baixo ponto de ebulição⁹.

Processos Oxidativos Avançados (POA)

Os Processos Oxidativos Avançados (POAs) têm merecido destaque, devido à sua alta eficiência na degradação de inúmeros compostos orgânicos. Têm-se mostrado como uma alternativa no tratamento de águas superficiais e subterrâneas, bem como de águas residuais e solos contaminados. Este projeto tem como objetivo pesquisar e viabilizar processos de tratamento de efluentes e de água em toda sua complexidade, seja em controle de processos ou inovações para incrementar o estado da arte e propor novas alternativas de processos com maior tecnologia agregada. Para alcançar esse objetivo, desenvolvem-se os Processos Oxidativos Avançados que são utilizados para oxidar constituições orgânicas complexas encontradas na água, dificilmente degradadas biologicamente, em constituições finais mais simples⁵.

Neste processo de degradação, os radicais hidroxila (OH·) são gerados através de reações por oxidantes fortes, como por exemplo, ozônio (O₃) e peróxido de hidrogênio (H₂O₂), semicondutores (SiO₂, ZnO, CdO, Nb₂O₅, TiO₂ e nanotubos de

TiO₂), e irradiação ultravioleta (UV). Os processos oxidativos avançados podem ser homogêneos ou heterogêneos, estes acontecem devido à presença de catalisadores sólidos⁸.

Em muitos casos, uma oxidação parcial é suficiente para transformar alguns compostos em intermediários que sejam mais facilmente biodegradáveis. A oxidação de certos compostos pode ser caracterizada pela extensão de degradação dos produtos finais oxidados, como: degradação primária, degradação aceitável (difusão), degradação final e degradação inaceitável (fusão). Os Processos Oxidativos Avançados (POAs) envolvem a geração e uso de radicais hidroxila (OH⁻) como forte oxidante e não seletivo para destruir compostos que não são oxidados pelos oxidantes convencionais como o oxigênio, ozônio e cloro. Não há geração de materiais secundários, não há necessidade de desfazer-se ou de regenerar materiais. Entretanto, apresenta custos elevados, tanto na sua implementação, quanto na operação. Sendo assim, os Processos Oxidativos Avançados (POAs) devem ser empregados quando as tecnologias usuais (processos físico-químico e biológicos) não atendam aos padrões exigidos, e a escolha do processo a ser utilizado deve ser realizada com base nas propriedades químicas do efluente. Outra possibilidade de emprego é em áreas com reduzida disponibilidade de água e/ou área para implantação de Estação de Tratamento de Efluentes convencionais⁵.

Os processos oxidativos avançados apresentam algumas vantagens consideráveis, as quais podem ser citadas:

- Mineralizam o poluente e não somente transferem-no de fase;
- Podem ser usados para compostos refratários a outros tratamentos;
- Podem ser usados com outros processos (pré e pós tratamento);
- Apresentam forte poder oxidante, com cinética de reação elevada;
- Em muitos casos, não necessitam de um pós-tratamento;
- Degrada o contaminante e não são formados subprodutos;
- Geralmente, melhoram as qualidades organolépticas da água tratada;
- Consomem menos energia, acarretando menor custo;

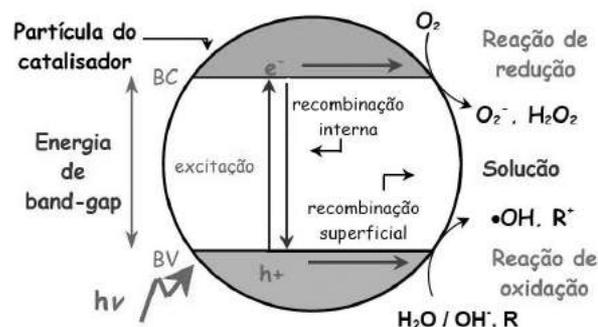


Figura 2. Esquema representativo da fotoativação do semicondutor, ocorrendo a promoção dos elétrons da banda de valência para a banda de condução⁵.

A literatura menciona vários trabalhos, envolvendo diversos catalisadores (semicondutores) como o SiO₂, ZnO, ZnS, CdS, Nb₂O₅, Al₂O₃, V₂O₅, Fe₂O₃, TiO₂ e nanotubos de TiO₂. Entretanto, o TiO₂, juntamente com nanotubos de TiO₂, são os semicondutores mais ativos e os mais utilizados na fotodegradação dos compostos orgânicos presentes nos efluentes e nas águas⁸.

PRINCÍPIOS DA FOTOCATÁLISE HETEROGÊNEA E A FOTOATIVAÇÃO DO DIÓXIDO DE TITÂNIO (TiO₂)

A fotocatalise heterogênea tem sua origem na década de setenta quando pesquisas em células fotoeletroquímicas começaram a ser desenvolvidas, com o objetivo de produção de combustíveis, a partir de materiais baratos, visando à transformação da energia solar em química. Em 1972, um trabalho de Fujishima e Honda¹⁰ descreveu a oxidação da água em suspensão de TiO₂ irradiado em uma célula fotoeletroquímica, gerando hidrogênio e oxigênio. A partir desta época, muitas pesquisas foram dedicadas ao entendimento de processos fotocatalíticos, envolvendo a oxidação da água e íons inorgânicos⁸.

O princípio da fotocatalise heterogênea envolve a ativação de um semicondutor (geralmente TiO₂) por luz solar ou artificial⁸. Um semicondutor é caracterizado por bandas de valência (BV) e bandas de condução (BC) sendo a região entre elas chamada de bandgap¹.

A absorção de fótons com energia superior à energia



de bandgap resulta na promoção de um elétron da banda de valência para a banda de condução com geração concomitante de uma lacuna (h^+) na banda de valência. Estas lacunas mostram potenciais bastante positivos, na faixa de +2,0 a +3,5 V, medidos contra um eletrodo de calomelano saturado, dependendo do semiconductor e do pH. Este potencial é suficientemente positivo para gerar radicais HO, a partir de moléculas de água adsorvidas na superfície do semiconductor, os quais podem subsequentemente oxidar o contaminante orgânico. A eficiência da fotocatalise depende da competição entre o processo em que o elétron é retirado da superfície do semiconductor e o processo de recombinação do par elétron/lacuna, o qual resulta na liberação de calor, de acordo com as seguintes informações⁸.

O TiO_2 , por se tratar de um semiconductor, possui uma banda de valência, em que os elétrons não possuem movimento livre e uma banda de condução, em que os elétrons são livres para se moverem. Entre essas duas bandas existe uma diferença de energia, chamada de band-gap. Quando uma partícula deste semiconductor é irradiada com fótons de energia maior do que a energia de band-gap, o elétron é transferido da banda de valência para a banda de condução, gerando um par elétron/lacuna (e_{BC}^-/h_{BV}^+)⁸.

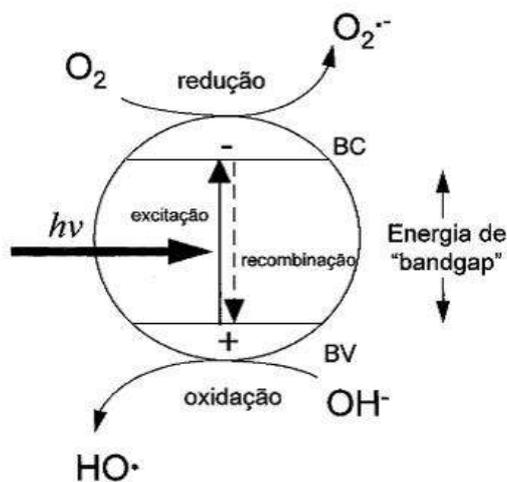
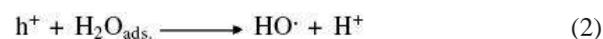


Figura 2. Esquema representativo da fotoativação do semiconductor, ocorrendo a promoção dos elétrons da banda de valência para a banda de condução⁵.

As Equações (1-6) indicam, de forma geral, o fenômeno de absorção de radiação UV do catalisador.



Mediante pesquisas⁷ conclui-se que o mecanismo de degradação não se dá exclusivamente através do radical hidroxila, mas também através de outras espécies radiculares derivadas de oxigênio ($O_2^{\cdot-}$, $HO_2\cdot$, etc.), formadas pela captura de elétrons fotogerados.

Uma grande variedade de compostos orgânicos tóxicos é passível de degradação por fotocatalise heterogênea. Na maior parte, a fotodegradação leva à total decomposição dos poluentes, gerando CO_2 , H_2O e íons diversos. Alguns tipos de compostos passíveis de degradação por fotocatalise são alcanos, cloroalifáticos, álcoois, ácidos carboxílicos, fenóis, clorofenóis, herbicidas, surfactantes e corantes,.



Entre as limitações do processo de fotodegradação, o espectro de absorção da amostra pode afetar o rendimento do processo, se esta absorve grande parte da radiação UV, dificultando a penetração de luz⁸. Além da descontaminação de efluentes, a fotocatalise heterogênea tem apresentado grande eficiência na destruição de várias classes de compostos orgânicos voláteis em fase gasosa, incluindo álcoois, cetonas, alcanos, alcenos clorados e éteres, com potencialidade de aplicação à remediação de solos e águas contaminadas, bem como a retirada dos odores de ambientes⁷.

De acordo com as classes de compostos orgânicos acima citados, os radicais hidroxila, gerados durante irradiação de TiO_2 , são capazes também de reagir com a maioria das moléculas biológicas, resultando numa atividade bactericida. O poder bactericida do TiO_2 foi comprovado na inativação de micro-organismos tais como *Lactobacillus acidophilus*, *Sacharomyces cerevisiae* e *Escherichia Coli*⁸.

Entre as mais recentes aplicações da fotocatalise heterogênea, algumas estão sendo desenvolvidas por companhias japonesas e já começam a ser industrializadas, como: a) desodorização de ambientes através da utilização de filtros impregnados com TiO_2 , que sob iluminação é capaz de degradar substâncias causadoras de mal odor; b) tintas fotocatalíticas para revestimentos anti-bactericidas e autolimpantes de paredes de centros cirúrgicos; c) vidros e espelhos antiembassantes, em que a característica super-hidrofílica do TiO_2 quando iluminado com luz UV, é aproveitada. Neste caso, a água espalha rapidamente, formando um filme uniforme sobre a superfície, ao invés de gotículas, evitando o embassamento; d) vidros autolimpantes para iluminação de túneis, em que a formação de filme de poeira oleosa na superfície dos holofotes pode ser destruída por fotocatalise, mantendo, assim, o vidro sempre limpo⁸.

A fotocatalise heterogênea apresenta-se como um método e técnica confiável e eficiente no tratamento de efluentes e descontaminação ambiental. Este processo está baseado na formação de radicais hidroxilas por irradiação de luz ultravioleta fotocatalisada, juntamente, com um semicondutor inorgânico, no presente trabalho foram utilizados dióxido de titânio (TiO_2) e nanotubos de TiO_2 ⁷.

DIÓXIDO DE TITÂNIO (TiO_2)

Muitas substâncias como TiO_2 , CdS, ZnO, WO_3 , ZnS, Fe_2O_3 podem agir como semicondutores nos processos de oxidação e redução, mediados pela luz devido à sua estrutura eletrônica. Entretanto, a combinação de fotoatividade e fotoestabilidade não é, muitas vezes, satisfeita, como por exemplo, o semicondutor CdS que, apesar de absorver radiação de até 510 nm, sofre fotocorrosão quando irradiado, gerando Cd_2^+ e enxofre, inviabilizando sua utilização em processos de descontaminação. Entre os semicondutores, o TiO_2 é o mais amplamente estudado, devido principalmente à sua não toxicidade, fotoestabilidade e estabilidade química em uma ampla faixa de pH. O TiO_2 existe em três formas alotrópicas, anatase, rutilo e brookite, sendo as 2 primeiras as mais comuns, inclusive são comercializadas. A forma rutilo é inativa para a fotodegradação de compostos orgânicos, sendo que a razão para tal ainda não é totalmente esclarecida. No entanto, a baixa capacidade de adsorção de O_2 em sua superfície é apontada como um dos possíveis fatores₂.

O dióxido de titânio (TiO_2) apresenta-se como um sólido na temperatura ambiente com ponto de fusão podendo chegar até o limite de 1800°C. Possui propriedades dielétricas, alta absorção ultravioleta e altamente estável, característica esta que permite ser usado em aplicações de fotodegradação².

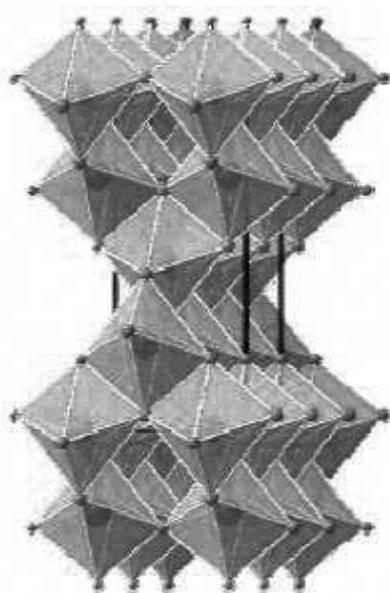
Os compostos de TiO_2 têm sua atividade fotodegradativa influenciada negativamente, pois sua energia de band-gap fica em torno de 3.2 e V, correspondendo a uma absorção no ultravioleta. Isso limita a eficiência dos compostos sensíveis ao TiO_2 , pois a radiação ultravioleta corresponde somente a uma pequena parte da energia solar. Com isso, teve-se a necessidade de realizar modificações na estrutura do TiO_2 , o que poderia levar a uma menor diferença de energia entre as bandas de valência (BV) e bandas de condução (BC)⁶.

NANOTUBOS DE DIÓXIDO DE TITÂNIO (TiO_2)

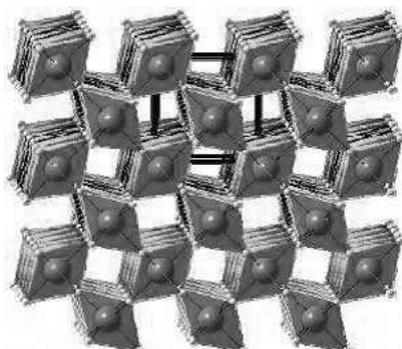
Um material que também se estrutura em camadas e tem propriedades muito interessantes é o dióxido de titânio. Por apresentarem uma função trabalho alta e absorverem na região ultravioleta do espectro, cristais de TiO_2 têm um grande potencial de aplicação em células solares, como agentes fotocatalíticos, e até em



a)



b)



c)

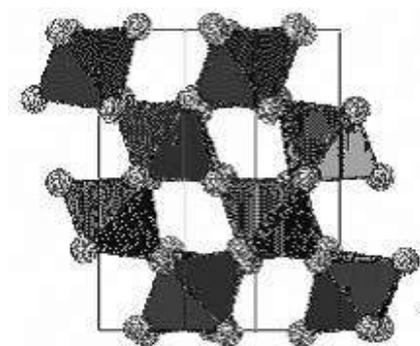


Figura 4. Esquema representativo das formas alotrópicas do dióxido de titânio (TiO₂). **A)** Anatase – forma alotrópica do TiO₂ que é produzida comercialmente. **B)** Rutile – forma alotrópica do TiO₂ que é produzida comercialmente. **C)** Brookite – forma alotrópica do TiO₂.

dispositivos destinados a gerar hidrogênio através de hidrólise. Em 1998, através de uma técnica hidrotérmica sintetizaram nanotubos de TiO₂ ⁶.

A atividade catalítica de compostos de TiO₂ em geral, é prejudicada pelo fato de a energia de band-gap desse material ficar em torno de 3,2 eV, correspondendo a uma absorção no ultravioleta. Isso limita a eficiência de dispositivos fotossensíveis baseados em TiO₂, pois a radiação ultravioleta corresponde a apenas 8% da energia solar. Seria conveniente trazer a absorção ótica para a região do visível, que representa 45% da energia solar. Alguns pesquisadores vêm tentando isso através da introdução de modificações na estrutura do TiO₂, o que poderia levar ao estreitamento da energia entre os orbitais. Os resultados indicam um aumento da atividade catalítica, da absorção ótica entre 500 a 450 nm e a redução da energia de band-gap em torno de 2,90 eV ⁶.

A síntese dos nanotubos de dióxido de titânio (TiO₂) é realizada a partir do aquecimento da mistura de partículas de TiO₂, uma solução aquosa de NaOH concentrada. Em seguida, observa-se a estrutura do material formado em um microscópio de transmissão eletrônica, em que este revela a existência de estruturas cilíndricas e multicamadas ⁶.

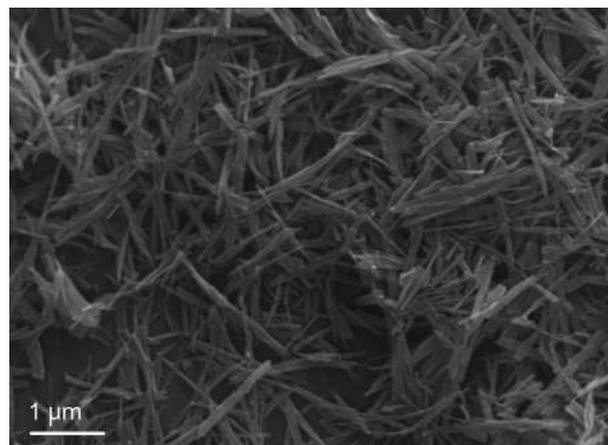


Figura 5. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) para os nanotubos de dióxido de titânio ⁶.



Influência do PH na Fotodegradação de Corantes Orgânicos

A fotodegradação do corante vermelho congo pode ser influenciada pela variação do pH do meio reacional. Um processo oxidativo avançado pode sofrer alteração em função do pH por uma série de motivos: ele pode afetar as propriedades superficiais do catalisador, incluindo a carga das partículas, o tamanho dos agregados e as posições das bandas de condução e de valência³. Este trabalho tem por objetivo analisar e compreender a fotocatalise heterogênea e a fotodegradação do corante vermelho congo, utilizando processo oxidativo avançado com auxílio dos semicondutores dióxido de titânio (TiO_2) e nanotubo de dióxido de titânio (TiO_2). Para ativar este semiconductor, foi utilizado um agente ativador do processo de degradação, radiação ultravioleta (UV) gerada por uma lâmpada de vapor de mercúrio de 125W.

Metodologia

CONSTRUÇÃO DO REATOR

O fotorreator foi construído a partir de um recipiente cilíndrico em aço inoxidável de 42 cm de altura, 22 cm de diâmetro. Na tampa do recipiente, foi fixado um soquete para lâmpadas de 30 mm, no qual foi colocada uma lâmpada de vapor de mercúrio sem o bulbo de proteção. Na mesma tampa, foram feitos dois orifícios para a passagem dos cabos elétricos. Esta tampa permite a utilização de lâmpadas de vapor de mercúrio de 125 W. A lâmpada de vapor de mercúrio atingiu a temperaturas de aproximadamente 200°C. Para a diminuição da temperatura do reator, foi colocado um ventilador de 12 V e 2 A na lateral do cilindro na altura da lâmpada (18cm da tampa), e foram confeccionados diversos orifícios na tampa do sistema para a refrigeração do reator. Na base do recipiente cilíndrico, foi colocada uma chapa aquecedora com agitação magnética para homogeneizar a solução durante o experimento.



Figura 6. Representação esquemática do fotorreator⁹.



Figura 7. Fotorreator em funcionamento utilizado no experimento de degradação do corante vermelho congo (próprio autor, 2010).

Síntese dos Nanotubos de Dióxido de Titânio (TiO_2)

O dióxido de titânio em pó foi utilizado para a criação dos nanotubos de titânio. Utilizou-se 2g TiO_2 em pó e foram adicionadas a 25mL de uma solução aquosa



de NaOH 10 mol/L e levados em autoclave. O sistema foi aquecido a uma temperatura de aproximadamente 1700°C por um período de 72 h. Após esse período, deixou-se o sistema em repouso até que a temperatura ambiente fosse atingida. Em seguida, o produto obtido foi lavado com água e filtrado a vácuo. O precipitado obtido foi adicionado a 500mL de solução aquosa de HCl a um pH igual a 2 e agitada por um período de 4h. Esse procedimento foi repetido por 3 vezes. O pó obtido por este procedimento foi seco em estufa a 110°C.

CARACTERIZAÇÃO DOS NANOTUBOS DE DIÓXIDO DE TITÂNIO (TiO₂)

O produto final do procedimento anterior, ou seja, os nanotubos de TiO₂ foram caracterizados por microscopia eletrônica de varredura (MEV), em um microscópio eletrônico de varredura ZEISS modelo EVO 50, metalizador Baltec modelo SCD 050. As medidas de área superficial foram realizadas em um Analisador Quantacrome Nova 2200.

FOTODEGRADAÇÃO DO CORANTE VERMELHO CONGO

Preparou-se uma solução, chamada solução estoque do corante vermelho congo de concentração igual de 1x10⁻⁴mol/L. Esta foi estocada em um frasco âmbar de capacidade igual a 1000mL para que a solução estoque não sofresse degradação da luz. Em seguida, diluiu-se a solução estoque do corante vermelho congo para uma concentração de 1x10⁻⁵mol/L.

Logo após, submeteu-se uma amostra do corante à fotodegradação, junto ao reator, cujo volume utilizado foi igual a 150mL por um período de 190 minutos. Para isso, adicionou-se um volume de 150mL da solução diluída de concentração 1x10⁻⁵mol/L em um béquer de 800mL e em seguida adicionou-se ao sistema 0,15g de dióxido de titânio (TiO₂) (catalisador). Após estes procedimentos, todo o sistema foi colocado em uma chapa aquecedora com agitação magnética no interior do fotorreator para posterior degradação com auxílio da lâmpada de mercúrio de 125W. Durante o processo, em intervalos de tempo de 3 em 3 minutos, em seguida de 15 em 15 minutos com um total de 17 amostras até a amostra contida dentro do becker, junto

ao reator, apresentasse coloração branca, retivam-se pequenas alíquotas de aproximadamente 8mL em tubos de ensaio com capacidade de 15ml para futuras análises em espectrofotômetro, com o objetivo de se determinar a influência do fator tempo no processo de fotodegradação do corante.

Posteriormente, realizou-se este procedimento, utilizando a mesma solução estoque do corante vermelho congo de concentração igual de 1x10⁻⁴mol/L. Em seguida, diluiu-se a solução estoque do corante vermelho congo para uma concentração de 2,5x10⁻⁶mol/L.

Logo após, submeteu-se uma amostra do corante à fotodegradação, junto ao reator, cujo volume utilizado foi igual a 200mL por um período de 175 minutos. Para isso, adicionou-se um volume de 200mL da solução diluída de concentração 2,5x10⁻⁶mol/L em um béquer de 800mL e, em seguida, adicionou-se ao sistema 0,1g de nanotubos de dióxido de titânio (TiO₂) (catalisador). Após estes procedimentos, todo o sistema foi colocado em uma chapa aquecedora com agitação magnética no interior do fotorreator para posterior degradação com auxílio da lâmpada de mercúrio de 125W. Durante o processo, em intervalos de tempo de 3 em 3 minutos, em seguida de 15 em 15 minutos, com um total de 17 amostras até a amostra contida dentro do becker, junto ao reator, apresentasse coloração branca, retivam-se pequenas alíquotas de aproximadamente 8mL em tubos de ensaio com capacidade de 15mL para futuras análises em espectrofotômetro, com o objetivo de se determinar a influência do fator tempo no processo de fotodegradação do corante.

Por fim, submeteu-se a solução do corante vermelho congo à fotodegradação, mas não foi utilizado nenhum dos semicondutores. Estas amostras foram analisadas em espectrofotômetro.

Análise em Espectrofotômetro

A determinação da concentração após a fotodegradação por espectrofotometria foi realizada, utilizando-se para esta análise quantitativa o espectrofotômetro Biospectro modelo SP-22.

De acordo com a literatura pesquisada, o corante vermelho congo absorve, no máximo, um comprimento de onda igual a aproximadamente 510nm.





Figura 8. Espectrofotômetro Biospectro modelo SP-22 utilizado na análise espectrofotométrica do TiO_2

Análise e Determinação da Influência do pH na Fotodegradação

Na determinação da influência do pH nas amostras do corante vermelho congo, foi utilizado o pHmetro QUIMIS modelo Q-400A, variando-se o pH das amostras do corante nos seguintes intervalos: 2, 4, 6, 8 e 10. Para realizar estas variações de forma correta, utilizaram-se soluções de ácido clorídrico e hidróxido de sódio na concentração de 0,01 mol/L e 0,1 mol/L, respectivamente. A influência do pH no processo de degradação do corante vermelho congo foi determinada, utilizando-se 75 mL da solução aquosa do corante, tanto para o semicondutor dióxido de titânio (TiO_2), quanto para nanotubos de dióxido de titânio (TiO_2), em que a massa utilizada dos semicondutores para ambos os procedimentos foi de 0,05g. Em seguida, atingia-se o pH de interesse, por exemplo, pH 2, utilizando as soluções de ácido clorídrico e hidróxido de sódio e, em seguida, submetia-se a solução do corante vermelho congo a uma exposição no fotorreator de 15 minutos. Em seguida, retirava-se uma alíquota de aproximadamente 10 mL em um tubo de ensaio de capacidade de 20 mL para posteriores análises em espectrofotômetro e realizava-se a exposição da amostra do corante no fotorreator, desta vez em outro pH por 15 minutos.



Figura 9. pHmetro QUIMIS modelo Q-400A utilizado na análise de fotodegradação do corante vermelho congo por influência do pH do meio reacional (próprio autor, 2010).

Resultados e Discussões

FOTODEGRADAÇÃO DO CORANTE VERMELHO CONGO

De acordo com os procedimentos experimentais realizados, foram obtidos os seguintes resultados: as amostras na presença de dióxido de titânio (TiO_2) apresentaram perda da coloração original. As amostras na presença de nanotubo de dióxido de titânio (TiO_2) perderam grande parte de sua coloração, enquanto que as amostras que não possuíam os catalisadores, mantiveram sua cor inicial. Após a coleta das amostras das soluções do corante vermelho congo, estas foram levadas para análises no espectrofotômetro para se determinar a concentração das soluções. Os resultados foram obtidos por meio de curvas analíticas de soluções com concentrações conhecidas do corante vermelho congo, por meio do Software OriginPro versão 8.0.



A curva analítica padrão, estabelecida por meio das soluções do corante vermelho congo de concentrações conhecidas e definidas, foram obtidas por meio do Software OriginPro 8.0. Este gráfico, contendo a equação da reta em função da concentração padrão ($C = 4,15 \times 10^{-5} \cdot A - 9,45 \times 10^{-7}$), em que a variável A representa os valores de absorbância que apresentou valor máximo de absorbância igual a 510nm para o corante vermelho congo e outros resultados, como por exemplo, a regressão linear, que apresentou resultado igual a $R = 0,99904$, ou seja, o gráfico que representa os valores padrões de concentrações do corante vermelho congo explica em 99,9% de confiabilidade a relação direta entre concentração das soluções e suas respectivas absorbâncias.

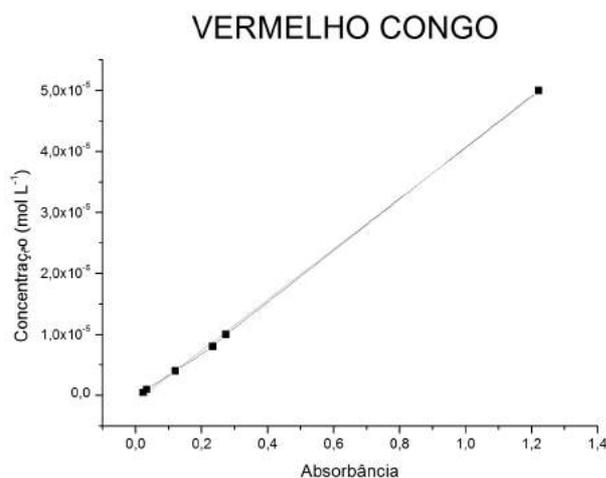


Figura 10. Gráfico representando a curva analítica padrão para o corante vermelho congo (próprio autor, 2010).

Através das concentrações padrões e da equação da reta, calcularam-se as concentrações das amostras após suas respectivas degradações ao longo de determinados intervalos de tempo com a presença ou ausência dos semicondutores.

A fotodegradação com uso de nanotubos de dióxido de titânio apresenta resultados menos satisfatórios e menos

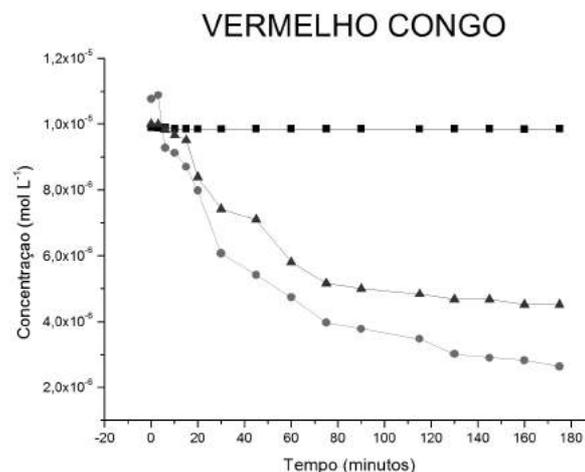


Figura 11. Gráfico representando a fotodegradação do corante vermelho congo em função da irradiação da lâmpada de vapor de mercúrio de 125W com raios UV na ausência do semicondutor (A), na presença de nanotubos de dióxido de titânio (TiO₂) (B) e na presença de dióxido de titânio (TiO₂) (C) (próprio autor, 2010).

eficientes na degradação do corante vermelho congo que dióxido de titânio propriamente dito. Uma explicação para tal comportamento dos semicondutores é que o nanotubo apresenta uma área superficial aproximadamente três vezes maior que o dióxido de titânio, o que teoricamente melhoraria o processo de fotodegradação. Por outro lado, o dióxido de titânio apresenta uma suspensão em solução, deixando as partículas do catalisador dispersas por toda a extensão da solução e, com isso, a radiação atinge mais superfícies catalíticas. Os nanotubos possuem uma vantagem que é seu fácil reaproveitamento no meio reacional, pois o dióxido de titânio é altamente disperso no meio reacional, mas a maior eficiência do dióxido de titânio na degradação do corante vermelho congo em relação aos nanotubos de dióxido de titânio é muito pequena quando comparados os valores das concentrações, assim como, os resultados nos gráficos.

Por fim, variou-se o pH da solução, contendo o corante vermelho congo, para se ter a certeza da influência do pH do meio reacional na fotodegradação. Os gráficos abaixo mostram a degradação do corante vermelho congo em diferentes pH em presença dos semicondutores dióxido de titânio (TiO₂) e nanotubos de dióxido de titânio (TiO₂).

Os resultados, de acordo com o gráfico, mostram que em meio ácido, especificamente em pH=2, a



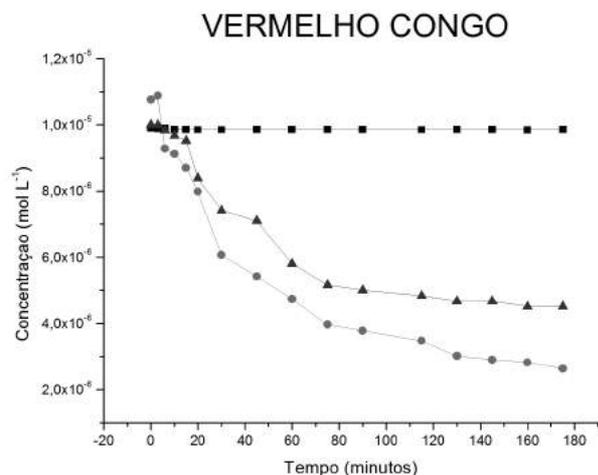


Figura 12. Gráfico representando a fotodegradação do corante vermelho congô em diferentes faixas de pH com a presença do semicondutor dióxido de titânio (TiO_2) e nanotubos de dióxido de titânio (TiO_2) (próprio autor, 2010).

fotodegradação com nanotubo de dióxido de titânio obteve maior rendimento. O maior rendimento da fotodegradação, com variação de pH, observado para o dióxido de titânio, também é em torno de $\text{pH}=2$.

Ao final, observou-se que o nanotubo de TiO_2 apresentou maior rendimento que o dióxido de titânio (TiO_2).

Conclusão

Mediante pesquisas, observou-se que o desenvolvimento de novos processos de tratamento de efluentes é necessário para manter as descargas industriais dentro dos limites estabelecidos pelos órgãos de controle.

Por meio de estudos e experiências realizadas, pode-se observar que a fotocatalise heterogênea apresenta grande importância como método de descontaminação em fase aquosa e gasosa, considerando vários fatores que vão desde sua eficiência, até o custo envolvido no processo. Sendo assim, concluiu-se que, embora a fotocatalise heterogênea seja relevante quanto ao processo de degradação dos

corantes poluidores dos meios aquosos, a adaptação e otimização dos processos de produção industrial, visando à minimização da geração de resíduos, é, além de útil, uma forma estratégica para garantir a melhor qualidade do meio ambiente, o que é fundamental para a sociedade nos dias de hoje.

Referências

1. Nogueira, R.F.P. E Jardim, W.F. (1997). *Química Nova*, v. 21, p. 69-74.
2. Mozeto, A. A.; Jardim, W. F. (2002). *Química Nova*, v. 25, p. 7-11.
3. Oliveira, J. L. (2006). Dissertação (Mestrado), Departamento de Química, Universidade Estadual de Maringá, p. 83.
4. Guaratini, C. C. I. E Zanoni, M. V. B. (2000). *Química Nova*, v. 23, p. 71-78,
5. Freire, R. S.; Pelegrini, R.; Kubota L. T.; Duran, N. (2000). *Química Nova*, v 23, p. 504-511,
6. Lino, A. A. (2007). Dissertação (Mestrado), Departamento de Física, Universidade Federal De Minas Gerais, p. 61.
7. Montagner, C.C.; Paschoalino, M.; Jardim, W.F. (2005). *Caderno Temático*, p. 4.
8. Teixeira, C.P.A.; Jardim, W.F. (2004).
9. Prado, A.G.S.; Faria, E.A.; Souza, J.R.; Torres, J.D.; (2006) .p.182-202.
10. Prado, A.G.S.; Souza, J.R.; Bolzon, L.B.B. (2006). *Revista Brasileira de Ensino de Química*, p. 25-32.
11. Santos, S.K.; (2007). Dissertação (Mestrado), UFRJ. p. 15-21
12. Araújo, F. V. F.; Yokoyama, L. (2006). *Química Nova*, v. 29, p. 11-14.

**Leonardo R. Caixeta* &
Leonardo L. Costa**

Faculdade de Tecnologia SENAI Roberto Mange, 75113-630, Anápolis-GO, Brasil.

*E-mail: leonardor.senai@sistemafieg.org.br

Modelo de Avaliação de Capital Intelectual para Institutos SESI de Inovação por meio de Método Multicritério

Introdução

Os investimentos em inovação podem ser direcionados para os dois principais fatores que impactam a produtividade industrial: a tecnologia associada ao processo produtivo e a tecnologia associada aos fatores que influenciam a produtividade do trabalhador, como o ambiente de trabalho e saúde do trabalhador.

O Brasil atualmente apresenta uma tendência de estagnação do seu processo de desenvolvimento industrial e isto se deve a alguns fatores relacionados à perda de produtividade, seja por fatores tecnológicos ou por fatores humanos. Porém, os investimentos destinados à inovação industrial no Brasil são direcionados para a área tecnológica, deixando-se de lado investimentos para inovação dos fatores que afetam a produtividade do trabalhador. O alto índice de afastamentos de trabalhadores, devido a acidentes, problemas osteomusculares decorrentes de fatores ergonômicos e fatores psicossociais, contribui fortemente para a falta de produtividade industrial.

Com o objetivo de apoiar a indústria brasileira no enfrentamento desses desafios apresentados, o SESI – Serviço Social da Indústria, alinhado à sua missão de contribuir para a competitividade da indústria, implantará 7 Institutos de Inovação nas áreas de prevenção de acidentes, ergonomia, fatores psicossociais, gestão do absenteísmo, transição demográfica, promoção de saúde e tecnologias para a segurança e saúde. Com esta iniciativa, o SESI ampliará o potencial de inovação das empresas, por meio de soluções inovadoras, apoiando as

indústrias na redução custos com acidentes no trabalho, presenteísmo e absenteísmo relacionados à segurança e saúde do trabalhador.

Os Institutos SESI de Inovação têm como premissa operar de forma integrada, oferecendo às empresas serviços de pesquisa aplicada, disseminação e transferência de tecnologias, disseminação de conhecimento e inovação.

Dessa forma, há uma necessidade de definição de um modelo de medição do desempenho desses núcleos de inovação do SESI, por meio de um conjunto de indicadores, que compõem o modelo de Capital Intelectual dos Institutos. O presente artigo tem por objetivo propor um modelo de avaliação do capital intelectual dos Institutos SESI de Inovação, baseado em indicadores de gestão do Capital Humano, do Capital Estrutural e Capital Relacional, como auxílio na tomada de decisões estratégicas para, posteriormente, compará-los, por meio de uma multimetodologia em paralelo.

Desenvolvimento

O método utilizado nesse trabalho baseia-se no uso de uma multimetodologia em paralelo. Segundo Mingers e Brocklesby (1995)¹, a essência de uma multimetodologia consiste na utilização de mais de uma metodologia, método, ou parte deles, de iguais ou diferentes paradigmas, em uma única intervenção.

Pollack (2009)² apresenta a multimetodologia em paralelo como aquela que envolve o uso de metodologias ao mesmo tempo, permitindo uma abordagem de

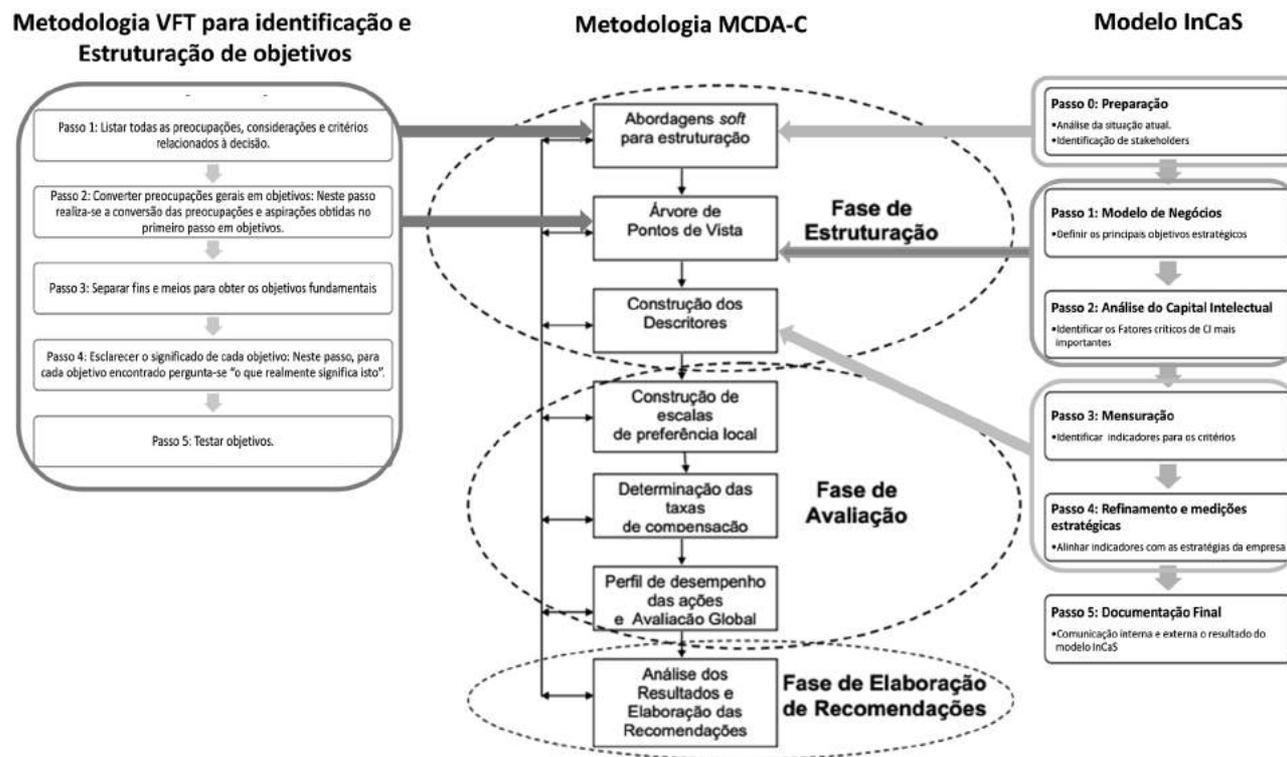


Figura 1: Modelo proposto para avaliação de Capital Intelectual

colaboração, enfatizando o aprendizado contínuo e a adaptação às mudanças. Assim, essa abordagem é mais adequada aos contextos de turbulência em que se espera que as exigências possam mudar no decorrer do projeto, ou exista a necessidade de usar diferentes metodologias para atingir o objetivo desejado.

Na multimetodologia em paralelo, será utilizada a metodologia *Value Focused Thinking* (VFT) como apoio na primeira fase da metodologia do Modelo Multicritérios de apoio à Decisão - Construtivista (MCDA-C), correspondente à fase de estruturação do problema. Além disso, nessa primeira fase, serão considerados os princípios de Capital Intelectual e a sua metodologia, conforme o modelo InCaS. Para o desenvolvimento do modelo de negócios, será utilizada a metodologia de estruturação de Modelo Lógico da *United States Government Accountability Office*. Dessa forma, serão usados em forma paralela, os três métodos, na primeira fase do MCDA-C, conforme mostra-se na Figura 1.

O método *Intellectual Capital Statement* será aplicado e a avaliação de cada Instituto realizada, por meio de oficinas e seus resultados documentados. Os coordenadores das oficinas são qualificados para conduzi-las, observando os resultados desejados na aplicação do método. O método será aplicado separadamente para cada Instituto.

PROCESSO DO MODELO PROPOSTO

O modelo proposto seguirá a seguinte sequência de passos, conforme as fases descritas:

Fase de estruturação do problema:

Nesta fase, deverão realizar-se, dois *workshops* com os *stakeholders*, envolvidos no processo decisório:

- **Workshop 1:** Para identificar a contextualização da situação problemática complexa por meio da metodologia VFT.



- **Workshop 2:** Para construir uma árvore de pontos de vista fundamentais (PVF), considerando a metodologia InCaS e utilizando o modelo lógico como modelo de negócio.

Para identificar a contextualização da situação problemática complexa e construir uma árvore de pontos de vista fundamentais (PVF), será utilizado o VFT, devido ao seu foco nos valores dos decisores. O VFT possui uma sequência de cinco passos para identificar e estruturar objetivos, os quais serão de bastante utilidade na hora de definir os PVFs. Por outro lado, devido a que o foco do trabalho consiste na criação de um modelo para avaliação do Capital Intelectual, utilizam-se também os fundamentos do modelo InCaS como apoio na identificação dos PVFs, segundo os critérios do capital intelectual.

Fase de avaliação

Nesta fase, deverá ser realizado, pelo menos, um *workshop* com os stakeholders envolvidos no processo decisório para a validação dos dados numéricos gerados pelo analista.

Para a construção de escalas de preferência local, deve-se quantificar o desempenho das instituições em relação a cada critério identificado pelo avaliador e decomposto nos diversos níveis dos descritores. Para isso, será usada a função de valor, útil para determinar as taxas de compensação, o perfil de desempenho e a avaliação global. Para obter os valores das taxas de compensação, será usado o *software* Macbeth.

Fase elaboração de recomendações

Nesta fase, serão concentrados esforços para correção ou proposição de alternativas, visando à melhoria da proposta do modelo. Para a estruturação do problema, será realizado um *workshop* com os gestores dos Institutos de Inovação e do Departamento Nacional do SESI. Nesse *workshop*, os participantes definirão os objetivos em 5 passos:

- **Passo 1:** A primeira parte do *workshop* será uma discussão sobre o papel dos Institutos, preocupações gerais e riscos, cenário atual da empresa e como esse cenário impacta no sucesso do negócio, possíveis fatores críticos e critérios para a avaliação do capital intelectual.

- **Passo 2:** Neste passo, os participantes irão converter as preocupações levantadas no passo 1 em objetivos. Nessa fase, poderá ser criada uma longa lista de objetivos, cujos similares devem ser combinados e agrupados em categorias.
- **Passo 3:** Nesta etapa do processo, os participantes separarão os objetivos listados em dois grupos: objetivos fins e objetivos meios.
- **Passo 4:** Neste passo, os participantes avaliarão cada objetivo, ampliando o entendimento sobre ele. Após essa avaliação serão levantados os meios para alcançar cada objetivo.
- **Passo 5:** Nesta etapa, os objetivos serão testados, comparando-se a lista final com as preocupações levantadas no passo 1 e se esses objetivos ajudam na elucidação dos problemas levantados.

A Avaliação do Capital Intelectual é realizada por meio de um *workshop* com resultados documentados. Os líderes do *workshop* são qualificados para conduzi-las, sempre observando os resultados desejados na aplicação do método. O método será aplicado separadamente para cada Instituto SESI. Inicialmente, serão definidos os modelos lógicos de negócio que definirão os objetivos estratégicos de cada Instituto. Posteriormente, será realizada a avaliação do Capital Intelectual.

A Definição do Modelo Lógico do Negócio de cada Instituto será realizada em um *workshop* com todo o grupo reunido. Nessa primeira etapa, será realizada uma contextualização sobre os objetivos da inovação na área de segurança e saúde do SESI e alinhamento das diretrizes para a área. Numa segunda etapa, será apresentado o planejamento estratégico da área para garantir que todo desdobramento esteja alinhado a esse planejamento. Após essa etapa, os grupos serão divididos por cada instituto. Nos grupos, serão discutidas problemáticas envolvendo a especificidade de cada Instituto. Para cada modelo lógico, será definido o problema, seus objetivos, resultados a médio e longo prazo, *inputs*, atividades e *outputs*.

Após a definição do Modelo Lógico do negócio, serão definidos os fatores críticos de Capital Intelectual essenciais para se atingir o objetivo, observando-se os itens da Tabela 1. Após essa etapa, será feita uma avaliação de cada fator crítico com relação à sua



Tabela 1: Fatores críticos respectivos indicadores

FATOR CRÍTICO	QUANTIDADE	QUALIDADE	SISTEMÁTICA	INDICADOR	
	<i>Temos o suficiente deste fator para atingir nossos objetivos?</i>	<i>Este fator é bom o suficiente para atingir nossos objetivos</i>	<i>Desenvolvemos e mantemos este fator sistematicamente para manter e/ou melhorar seu estado?</i>		
CAPITAL HUMANO	Liderança Técnica	60% em grande parte	60% Em grande parte	60% Em grande parte	% de rateio das horas técnicas por projeto, N° de horas de capacitação
	Pesquisador Visitante	0% Não existe	0% Não existe	0% Não existe	N° de pesquisadores vinculados ao projeto
	Bolsista SET (linhas de pesquisa)	30% Parcialmente	30% Parcialmente	30% Parcialmente	N° de bolsistas vinculados ao projeto
	Especialista em elaboração e gerenciamento de projetos e captação de recursos.	60% Em grande parte	60% Em grande parte	60% Em grande parte	% de rastreio das horas técnicas por projeto, N° de horas de capacitação
	Especialista em gestão do conhecimento (Plataforma de conhecimento)	0% Não existe	0% Não existe	0% Não existe	% de rastreio das horas técnicas por projeto, N° de horas de capacitação
	Especialista em TI (Plataforma de Conhecimento)	30% Parcialmente	30% Parcialmente	30% Parcialmente	Aumento da base de conhecimento
	Especialista em comunicação e gestão de stakeholders	30% Parcialmente	30% Parcialmente	30% Parcialmente	% de rateio das horas técnicas por projeto, N° de horas de capacitação

suficiência para o atendimento do objetivo, sua qualidade e sistemática da gestão. As evidências para os resultados da avaliação serão sistematicamente documentadas. Cada fator crítico será pontuado numa escala de 0 a 120%, no qual 0% corresponde a não existência do recurso, 30% a existência parcial, 60% existência suficiente em grande parte, 100% existência totalmente suficiente e 120% existência do recurso mais que necessária.

A fim de estabelecer o mesmo padrão de procedimento, serão também determinados indicadores específicos para cada fator crítico para permitir a medição de cada item. Os indicadores determinados precisam ter definições consistentes com as definições dos indicadores padrão de Capital Intelectual e devem cobrir os indicadores básicos estabelecidos no método (Mertins e Will, 2009)³. Cada fator crítico deve seguir um padrão de detalhamento único cujo modelo será conforme exemplo da Tabela 1.

Participarão do workshop os coordenadores regionais e nacionais de cada instituto, o gestor da área de Saúde e Segurança do SESI, o coordenador do projeto de implantação dos Institutos e consultores das áreas foco do estudo.

A Avaliação por meio de método multicritério (MCDA-C) é uma ferramenta que auxilia o gestor a gerir seus problemas, de acordo com suas percepções de valor, considerando aspectos qualitativos e quantitativos (ENSSLIN et al, 2001)⁴. O objetivo dos modelos, na visão construtivista, é de gerar conhecimento aos atores do processo decisório. Os modelos construídos no Apoio à Decisão devem permitir identificar oportunidades de

aperfeiçoamento, bem como servir também como base para que os atores entendam o impacto que as ações exercem sobre os seus valores (LIMA et al, 2012)⁵.

O processo de MCDA – C é realizada por meio de três fases básicas, diferenciadas, porém, correlacionadas, que se apresentam na Figura 2, detalha-se a seguir a fase de estruturação:

- a) Identificar a contextualização da situação problemática complexa por meio de:
 - Identificação dos *stakeholders* envolvidos no processo de tomada de decisão, assim como os decisores que participarão ativamente na construção do modelo.
 - Identificar quais são as instituições envolvidas (alternativas) e as suas problemáticas.

- b) Construção da árvore de pontos de vista fundamentais. Várias são as técnicas que podem ser usadas, a fim de extrair do decisor aqueles pontos que ele considera fundamental para a tomada de decisão. Uma vez identificados os pontos de vistas fundamentais (PVF), é possível representá-lo na forma de uma estrutura arborescente e aumentar o grau de compreensão do decisor. Desta forma, constrói-se uma estrutura de valor ou uma árvore de PVF. Após construir a estrutura de valor, é necessário um critério que permita mensurar o desempenho de cada alternativa avaliada em cada PVF considerado.



- c) Construção de descritores: cada critério é decomposto em diversos níveis, chamados de descritores, os quais fornecem um melhor entendimento daquilo que representa a preocupação do decisor ao mensurar uma dimensão do contexto decisório.

Detalha-se a seguir a fase de fase de avaliação:

- Construção de escalas de preferência local: deve-se quantificar o desempenho das alternativas (instituições) em relação a cada critério identificado pelo avaliador e decomposto no diversos níveis dos descritores. O instrumento que pode auxiliar os decisores a expressar, de forma numérica, suas preferências será a função de valor. A função de valor é necessária, tanto para avaliar as alternativas, quanto para melhorar o entendimento sobre o problema dos decisores. Uma vez quantificados estes critérios, é possível agregar estas informações locais, de modo a obter uma avaliação global. Uma função de valor é usada para ordenar a intensidade de preferência (diferença de atratividade) entre pares de níveis de impacto ou ações potenciais.
- Determinação das taxas de compensação: para que seja possível a agregação das informações, é necessário um conjunto de parâmetros associados aos critérios, os quais são chamados de taxas de compensação. Essas taxas são parâmetros que os decisores julgam adequados para agregar, de forma compensatória, desempenhos locais em um desempenho global (ROY, 1996)⁶. Entre os métodos para determinação de taxas de compensação, destaca-se o MACBETH, que adota lógica similar àquela utilizada para determinação de função de valor, ou seja, a do julgamento semântico.
- Identificação do perfil de desempenho e avaliação global: elaborada a avaliação local das alternativas, em todos os pontos de vistas, é importante, agora, utilizar esta informação para comparar alternativas potenciais e determinar seus pontos fortes e fracos. Para uma melhor visualização do desempenho de cada alternativa potencial, traça-se o seu perfil de impacto que é útil para, além de avaliar as alternativas, possibilitar a geração de oportunidades para aperfeiçoá-las, favorecendo, com isso, o aumento de conhecimentos dos decisores sobre o seu problema. Essas avaliações locais podem ser

agregadas agora em uma única avaliação global, por meio da fórmula de agregação aditiva (KEENEY, 1996)⁷.

A análise de resultados e elaboração de recomendações: considerando os pontos de vistas fundamentais em que o desempenho da alternativa mostrou-se inadequado, é possível concentrar esforços para correção ou proposição de novas alternativas para melhoria deste desempenho.

Considerações Finais

Com isso, a proposta de modelo de avaliação de Capital Intelectual para Institutos SESI de Inovação, desenvolvendo paralelamente as metodologias VFT para a estruturação do problema e InCaS, cumpre com o objetivo de avaliar o Capital Intelectual de Institutos de Inovação, geração dos PVF e indicadores.

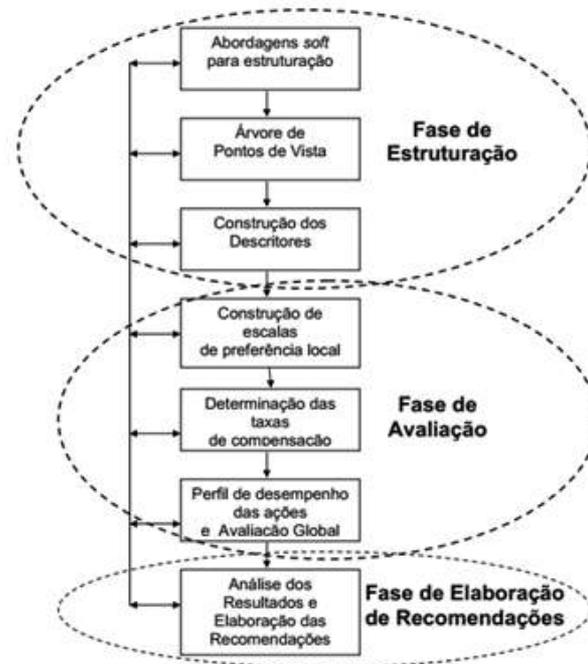


Figura 2: O modelo Multicritério de apoio à decisão - Construtivista, adaptado de Ensslin et al (2000)



De posse dos indicadores, a metodologia MCDA-C servirá como modelo para medição do desenvolvimento de cada instituto, podendo ser utilizada para realizar a comparação e *benchmark* com instituições internacionais, por meio de uma multimetodologia em paralelo.

Referências

1. Mingers, J.; Brocklesby, J. Multimethodology: towards a framework for mixing methodologies. *Omega*, v. 25, n. 5, p. 489-509, **1995**.
2. Pollack, J. Multimethodology in series and parallel: strategic planning using hard and soft OR. *Journal of the Operational Research Society*, v. 60, n. 2, p. 156-167, **2009**.
3. Mertins, K., Will M. InCaS: Intellectual Capital Statement – Made in Europe; Strategic Relevance of Intellectual Capital in European SMEs and Sectoral Differences. In: *Proceedings of the 9th European Conference on Knowledge Management*, Southampton 4-5 September **2008**.
4. Ensslin, L.; Montibeller Neto, G.; Noronha, S. M. D. Apoio à Decisão: Metodologia para Estruturação de Problemas e Avaliação Multicritérios de Alternativas. Florianópolis: Insular, **2001**.
5. Lima, V. M.; Soares, T.; Herling, L. H. D. Aplicação da metodologia MCDA-C na gestão do capital de giro em suinocultura. *Race, Unoesc*, v. 11, n. 11. Ed. Especial Agronegócios, p. 131 - 150, **2012**.
6. Roy, B. Multi-criteria methodology for decision aiding. *Lamsade, Université Paris.Dauphine*, cap.4, **1996**.
7. Keeney, R. L. Value focused thinking: Identifying decision opportunities and creating alternatives. *European Journal of Operational Research*, v. 92, p. 537-549, **1996**.

Sergio L. S. Motta^{1*} &
Jefferson O. Gomes²

¹Departamento Nacional do SESI. Brasília-DF

²Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos/SP - Brasil

*E-mail:sergio.motta@cni.org.br

A Modelagem de Processos como Ferramenta para Melhoria da Educação Profissional

Introdução

A literatura apresenta algumas definições de processo. Segundo Hammer e Champy Hammer & Champy, 1993, processo é um grupo de atividades que são realizadas numa sequência lógica, com o objetivo de produzir um bem ou serviço que tem valor para um grupo específico de clientes. Cameron Cameron, 1995 define processo como a maneira de realizar um determinado conjunto de tarefas.

O processo empresarial pode ser definido como um conjunto de tarefas logicamente interligadas que utilizam os recursos da empresa para gerar resultados os quais sejam úteis aos clientes. Portanto, uma empresa é tão efetiva quanto forem os seus processos, pois estes são responsáveis pelo produto ofertado aos clientes (Johansson; Mchugh, 1995). O uso da informação no acompanhamento de desempenho de processos pode torná-los mais eficientes. Atualmente, a modelagem ou mapeamento de processos é uma importante ferramenta que auxilia diversas organizações em suas buscas, por um aproveitamento melhor do tempo, recursos, entre outros. O mapeamento de processos, em uma organização, é uma ferramenta gerencial analítica valiosa para organizações que desejam promover melhorias ou implantar novos processos. O mapeamento desafia processos, criando oportunidades de melhoria de desempenho organizacional ao identificar pontos críticos, e cria bases para a implantação de tecnologias de informação e integração organizacional. Esta análise estruturada de processos permite: reduzir custos no desenvolvimento de produtos ou serviços; reduzir falhas na integração de sistemas e etapas; promover melhoria de desempenho organizacional; obter melhor compreensão dos processos atuais, com conseqüente decisão por eliminação

ou simplificação dos processos que necessitam de mudanças e tornam claras as responsabilidades de cada grupo em cada etapa do processo (Hunt, 1996; Kumar; Strehlow, 2004).

Na modelagem de processos, é verificado o estado atual do mapeamento, ou seja, como está o processo (AS IS). A próxima etapa é verificar possíveis repetições, ou melhorias no referido processo. Esta etapa é chamada de (TO BE). Com o processo melhorado, parte-se para a implantação, isto é, para a etapa (TO DO).

O SENAI (Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial) que é o maior formador de trabalhadores para a indústria nacional, tem seus processos modelados para atender, com maior qualidade e rapidez, a suas demandas. Para suprir essas necessidades, a organização, elaboração, atualização e avaliação de cursos de educação profissional são fundamentais.

No processo de organização, elaboração e avaliação de cursos, enfatiza-se a necessidade de padronização de cursos. No Brasil, a padronização de cursos, em instituições nacionais, é um grande desafio, devido às dimensões continentais do país. O objetivo dessa padronização é atender às necessidades das empresas que possuem instalações em diferentes regiões do país e permitir aos alunos mobilidade para ingresso em escolas de diferentes localidades, sem o prejuízo de seus estudos. No SENAI, a padronização curricular destes cursos é feita por meio dos Itinerários Nacionais Formativos de Educação Profissional. Itinerários Formativos são definidos como o conjunto dos percursos (trajetórias) de formação oferecidos por uma Instituição de Educação Profissional, dentro de cada uma das áreas profissionais. Eles são o conjunto das etapas que compõem a organização da oferta

da Educação Profissional pela instituição de Educação Profissional e Tecnológica, possibilitando contínuo e articulado aproveitamento de estudos e de experiências profissionais, devidamente certificadas.

Para a elaboração dos Itinerários Formativos, é necessário verificar as necessidades do mundo do trabalho, isto é, identificar a demanda das áreas carentes e os profissionais necessários com suas funções claramente definidas. Essas funções, quando enumeradas, definem os perfis profissionais.

O perfil profissional de conclusão é a descrição do que um trabalhador faz em uma determinada ocupação. Geralmente, é descrito com uma ou mais funções. Para que as escolas possibilitem aos alunos alcançar o perfil profissional, é necessária a estruturação de um desenho curricular que é a forma com que representa a organização curricular do curso, ou seja, unidades curriculares (disciplinas) com suas respectivas ementas, cargas horárias e a descrição da modularização do curso (SENAI, 2009, 2013).

Para criar cursos, o SENAI adota uma metodologia de ensino que verifica, no mundo do trabalho, os perfis profissionais demandados, para depois elaborar os desenhos curriculares dos cursos. Para fortalecer e padronizar os cursos, em todos os departamentos regionais, o SENAI conta com metodologia de ensino baseada em competências profissionais, referenciais operacionais, fluxograma de ações, definição e compartilhamento de responsabilidades entre as instâncias da instituição. Para padronizar seus cursos, o SENAI também utiliza desenhos curriculares validados por especialistas técnicos e pedagógicos de todo país; livros didáticos baseados nos desenhos curriculares nacionais; descrição dos ambientes pedagógicos e capacitação técnica e pedagógica de docentes em âmbito nacional.

Os temas da Educação Profissional e Tecnológica e os assuntos sobre a modelagem de processos são, na maioria das vezes, tratados de maneira separada. Neste artigo, propõem-se trazer aplicações da engenharia, como a modelagem de processos para ajudar questões educacionais, aprimorar o uso de recursos financeiros, humanos e ainda propiciar a melhoria contínua da qualidade. A contribuição do presente trabalho é a modelagem dos processos dos Itinerários Formativos Nacionais de Educação Profissional do SENAI e definição de critérios para tomada de decisão e consequente melhoria dos processos mapeados.

Detalhamento da Proposta

A Unidade de Educação Profissional e Tecnológica trabalha com diversos projetos, dentre eles, o projeto analisado neste trabalho: os Itinerários Nacionais de Educação Profissional. Esse trabalho tem como objetivo padronizar os cursos do SENAI em âmbito nacional. Os cursos são de qualificação profissional, cursos técnicos e cursos superiores de tecnologia. A concepção de curso tem como premissa as demandas da indústria, sociedade e governo. A partir dessas demandas, fazem-se estudos de demandas e tendências sobre a área solicitada. O SENAI possui métodos para realizar estudos de tendências, chamados Modelo SENAI de Prospecção. Além disso, também possui a Metodologia SENAI de Educação Profissional que descreve como será elaborado, por meio de um Comitê Técnico Setorial, o perfil profissional do trabalhador em questão. Com perfil em mãos, é elaborado o Desenho Curricular do Curso. As Unidades Operacionais (escolas) fazem o planejamento da oferta do curso e o planejamento da execução. Para isso, é necessário verificar os recursos físicos e tecnológicos, recursos didáticos e elaborar os planos de ensino e de aula. O curso é executado e tem-se o aluno concluinte. Esse aluno vai para o mercado de trabalho e passa a ser chamado egresso. Além dos métodos descritos, todo o processo tem suporte de capacitação de pessoas para realizar cada etapa descrita e do Sistema SENAI de Avaliação da Educação Profissional (SAEP), no qual se avalia cada etapa dos cursos, desde o projeto, desenvolvimento, desempenho do estudante e acompanhamento de egressos.

No trabalho de padronização desses cursos, foram mapeados distintos processos, a saber:

- Elaboração de cursos (cursos novos),
- Atualização de cursos (cursos em funcionamento),
- Implantação de cursos (monitoramento).

A Figura 1 apresenta a etapa AS IS da modelagem do processo, em que se tem a visão do processo, ou seja, como ele é atualmente. Além disso, temos a etapa TO BE – Execução do processo, considerando os direcionamentos e redirecionamentos das ações de melhoria e a etapa TO DO – a implementação do processo e suas melhorias. Na realimentação do processo, são apresentados os dados (indicadores) de melhoria contínua, a saber:



- Avaliação – Avaliação de estudantes e acompanhamento de egressos
- Sistema de atualização dos itinerários formativos nacionais
- Estudos prospectivos – trabalho; educação; tecnologia
- Marcos regulatórios MEC/MTE



Figura 1. Modelagem do processo – AS IS – TO BE – TO DO

Na etapa AS IS, foram modelados os processos de Elaboração, Atualização e Monitoramento dos Itinerários Formativos Nacionais de Educação Profissional (Figura 2).

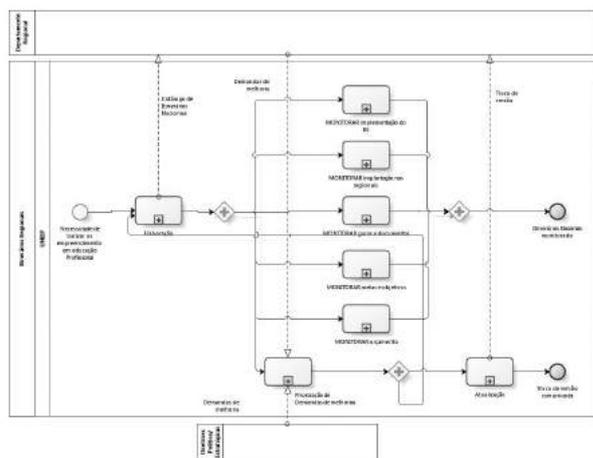


Figura 2 – Modelagem dos processos – Macro visão (AS IS)

PROCESSO DE ELABORAÇÃO

O macro processo de elaboração de itinerários nacionais de educação profissional tem periodicidade anual e começa a partir da “Análise da Demanda de Melhoria”. Após esta etapa, temos a “Elaboração do Perfil Profissional” e “Elaboração do Desenho Curricular”. Além disso, ocorre a etapa de “Consolidação do Itinerário Nacional”, “Comunicação da Troca de Versão” e “Arquivamento do Catálogo de Itinerários”. O resultado desse trabalho é o novo Itinerário Nacional publicado e comunicado.

PROCESSO DE ATUALIZAÇÃO

O macro processo de atualização dos itinerários nacionais de educação profissional tem periodicidade anual e algumas semelhanças e interfaces com o processo de elaboração dos Itinerários Nacionais. Inicia-se da mesma forma, a partir da Análise da Demanda de Melhoria. Após esta etapa, tem-se a definição das áreas que terão reuniões presenciais e das áreas que terão reuniões a distância. Nessas reuniões, tem-se a participação dos 37 Comitês de especialistas técnicos do SENAI. Trata-se de comitês internos (somente representantes do SENAI para cada área de atuação da indústria, diferente do CTSN que conta com a participação de representantes externos e internos) com a função de analisar tecnicamente as solicitações de melhoria. São realizadas reuniões presenciais e a distância. As reuniões a distância tem como base o sistema de atualização dos Itinerários Nacionais que recebem atualizações e sugestões de todos os colaboradores do SENAI. Em ambas as atividades, realizam-se pareceres sobre as solicitações de atualização de cada Itinerário Nacional. Nos pareceres favoráveis, são atualizados o perfil profissional (data de validade prorrogada) e o desenho curricular, consolidando, assim, o itinerário nacional da área. Os pareceres desfavoráveis são enviados ao Departamento Nacional que podem desencadear, dependendo do caso, uma demanda ao processo de Elaboração de IN.

As próximas etapas fundem-se ao processo de elaboração, ou seja, consolidação do itinerário nacional e publicação do IN.



PROCESSO DE MONITORAMENTO DA IMPLANTAÇÃO

O processo de monitoramento da implantação dos itinerários nacionais verifica o desenvolvimento dos cursos nas unidades operacionais do SENAI (escolas) dos Departamentos Regionais (DR) que aderiram à iniciativa nacional. Esse processo é de responsabilidade dos DR, mas conta com o acompanhamento do Departamento Nacional do SENAI. Nesse acompanhamento, por meio de visitas *in loco*, verificam-se as boas práticas implantadas e as dificuldades apresentadas. Durante essas visitas, são realizadas entrevistas com interlocutor do projeto de itinerários nacionais no DR, gerentes / diretores de unidades operacionais, coordenadores de cursos, docentes e alunos.

Além de monitorar a implantação nos DR, verificam-se, também, os objetivos do projeto, o alcance de metas, o cumprimento do orçamento e a utilização de guias e documentos do projeto itinerários nacionais. Esse monitoramento serve para suprir a gerência executiva de informações estratégicas.

Análise dos Resultados

A seguir, está descrita a análise dos resultados, após a realização da modelagem do processo (AS IS) e sua melhoria (TO BE). Inicialmente, são ressaltadas as dificuldades apresentadas após a modelagem do processo (AS IS). Além disso, são descritos também critérios para tomada de decisão, ou seja, quais serão os caminhos a serem seguidos no processo de melhoria contínua dos cursos.

Na etapa TO BE, foram realizados ajustes nos processos modelados de Elaboração, Atualização e Monitoramento dos Itinerários Formativos Nacionais de Educação Profissional, os quais estão detalhados a seguir.

AÇÕES DE MELHORIA NO PROCESSO

Após o mapeamento de todo o processo (AS IS), verifica-se a necessidade de ajustes para a execução (TO BE).

Comparando-se a modelagem AS IS com a modelagem TO BE, verificam-se pequenas diferenças nos processos de elaboração, atualização e implantação de cursos. Entretanto, ocorreu o acréscimo de um subprocesso, o apoio técnico à

implantação. Esse apoio consiste numa ação mais efetiva do Departamento Nacional do SENAI, junto aos Departamentos Regionais, na questão da implantação dos itinerários nacionais de educação profissional em todas as unidades operacionais do SENAI no país. Além do novo subprocesso, foi possível detectar que durante a análise da demanda de melhoria, as atividades podiam ser representadas em uma única forma, neste caso, em um único subprocesso. No processo de elaboração de perfil profissional, foi incluída uma reunião de alinhamento antes da realização do evento que unificou discursos e entendimento sobre a área, além de auxiliar os convidados externos no andamento dos trabalhos. Na identificação de participantes, foi inserida uma atividade de validação dos integrantes do CTSN junto à Direção da CNI. Com essa medida, evitaram-se possíveis ausências na reunião, as quais seriam fundamentais para garantir a representatividade de toda a área industrial a ser trabalhada. Essa representatividade diz respeito à constituição de um CTSN abrangente, isto é, contendo empresas de grande, médio e pequeno porte, sindicatos, associações, trabalhadores, entre outros. Toda a cadeia produtiva da área deve estar representada (SENAI, 2013).

No processo de elaboração do desenho curricular, as atividades das reuniões com especialistas do SENAI foram reavaliadas e, em alguns casos, foi possível suprimir uma etapa que deverá levar a uma redução de custos. Na atualização de cursos, foi inserida uma validação da atividade realizada junto ao demandante, ou seja, antes da publicação em âmbito nacional, todo o trabalho foi verificado pelo solicitante.

Mais uma vez, ressalta-se a importância do trabalho de mapeamento dos processos, pois somente foi possível verificar a lacuna de um subprocesso, devido ao trabalho de modelagem.

IMPLANTAÇÃO DO PROCESSO

O processo de implantação, etapa TO DO, é realizada pelos Departamentos Regionais do SENAI e não será foco desse estudo. Entretanto, como descrito no item ações de melhoria do processo, foi estabelecido um



subprocesso que prevê o apoio técnico à implantação, o qual ajudará muito as unidades operacionais para o êxito no trabalho.

Aplicação do Processo Proposto

O processo (TO BE) foi aplicado no Curso Técnico de Química. Entretanto, antes da aplicação, foi necessário estabelecer indicadores, critérios e pesos para tomada de decisão durante a aplicação do método. Além da modelagem de todo o processo, o estabelecimento de indicadores, critérios e pesos, é fundamental para tomada de decisão na realimentação do processo. Para o estabelecimento de pesos de cada indicador / critério foi levada em conta a importância desse, ou seja, seu impacto frente ao curso. Para tanto, verifica-se que os indicadores 1, 2 e 3 possuem menor peso, e os indicadores 4 e 5 possuem maior peso. Não foi necessário utilizar um método multicritério de análise de decisão (MCDA), pois os pesos, associados a cada indicador / critério, já estão determinados. O estabelecimento de pesos foi em função da clara hierarquia entre os indicadores, isto é, as questões de ordem legal e regulamentar sempre terão maior importância. O método de análise hierárquica (AHP) (Saaty, 2008) e o método da análise dos pares (Vallejos; Gomes, 2005) foram estudados e os resultados seriam os mesmos. O método AHP (Analytic Hierarchy Process) é um dos primeiros e mais utilizados métodos de apoio multicritério à decisão. É aplicado em diversas áreas do conhecimento, dada a sua característica de incorporar em sua análise critérios quantitativos e qualitativos (Belderrain; Costa, 2009). O método de análise dos pares consiste em elaborar uma matriz de comparação par a par, em que o tomador de decisão deve informar o indicador de maior importância. Após isso, é verificado o número de ocorrências por meio de uma equação. O número de ocorrências determina os pesos dos indicadores. Na Tabela 1, são apresentados os indicadores, critérios, decisões e pesos.

Na Tabela 1, estão relacionados dois indicadores, avaliação de desempenho de estudantes e avaliação de egressos, os quais são ações do Sistema SENAI de Avaliação da Educação Profissional e Tecnológica (SAEP). O SAEP, com a finalidade

Tabela 1. Indicadores, critérios e decisões.

Indicadores	Crítérios	Decisões	Pesos
Avaliação de desempenho de estudantes	Desempenho abaixo do básico e básico	Atualização do curso	2
	Desempenho adequado e avançado	Manutenção do curso (sem alterações)	1
Avaliação de egressos	Desempenho abaixo do básico e básico	Atualização do curso	2
	Desempenho adequado e avançado	Manutenção do curso (sem alterações)	1
Sistema de atualização dos itinerários nacionais	Mais de três sugestões de diferentes DR sobre mesmo assunto	Atualização do curso	2
	Menos de três sugestões de diferentes DR sobre mesmo assunto	Manutenção do curso (sem alterações)	1
Estudos Prospectivos	Inserção ou mudança de função na profissão	Elaboração de curso	3
	Mudança ou inserção de tecnologias na área	Atualização de curso	2
Marcos Regulatórios MEC/MTE	Alterações de função	Elaboração de curso	3
	Alterações de carga horária e inserção de temas	Atualização de curso	2

de verificar a eficácia e a efetividade dos serviços educacionais, a qualidade dos cursos e os benefícios para os participantes dos programas, setor industrial e sociedade. Além disso, o SENAI considera de suma importância a avaliação para retroalimentar os processos educacionais e alinhá-los com as políticas públicas e exigências do setor industrial. As



avaliações de projeto de curso e do desenvolvimento de curso não serão abordadas neste trabalho porque são realizadas nas unidades operacionais e não são focos deste estudo.

A Avaliação de Desempenho de Estudantes tem como principal objetivo realizar avaliações de larga escala, que permitam avaliar as competências previstas nos perfis profissionais nacionais dos cursos, ou seja, verificar o grau de desenvolvimento das capacidades básicas, técnicas e de gestão, contempladas nos itinerários formativos e desenhos curriculares. Essa atividade é realizada no SENAI desde o ano de 2010 (SENAI, 2011). Esta avaliação prevê a construção de uma série histórica, visando a um diagnóstico do perfil de saída do aluno, permitindo uma análise da efetividade do processo de ensino e de aprendizagem e suas relações com fatores externos. A avaliação educacional em larga escala é uma ferramenta útil que auxilia no monitoramento da qualidade da educação profissional, permitindo detectar os efeitos das políticas adotadas e subsidiar a tomada de decisões para implementação de melhorias pelo SENAI. Essa ação pode ser comparada com um ENEM (Exame Nacional do Ensino Médio) da educação profissional. Atualmente, o Ministério da Educação está preparando a implantação de ação, semelhante ao SENAI, para todas as instituições de educação profissional do país.

A avaliação ou acompanhamento de egressos tem como objetivo estabelecer e monitorar indicadores de desempenho dos egressos no mercado de trabalho com foco na Educação Profissional. Os objetivos específicos são avaliar a adequação dos programas às expectativas profissionais e sociais dos concluintes e egressos e avaliar adequação dos programas frente às expectativas empresariais e às exigências do mundo do trabalho. O egresso do SENAI é caracterizado como aquele aluno que concluiu os estudos, recebeu o diploma e está apto a ingressar no mercado de trabalho. O SENAI realiza anualmente a Pesquisa de Acompanhamento de Egressos. Essa avaliação segue os pressupostos preconizados pela OIT (Organização Internacional do Trabalho) e adotados, referencialmente, por instituições nacionais como a

SEFOR/MTE (Secretaria da Formação Profissional do Ministério do Trabalho e Emprego) e a SEMTEC/ MEC (Secretaria de Ensino Médio e Tecnológico do Ministério da Educação). Essa pesquisa gerou indicadores que respondem pelo desempenho do SENAI, tanto internamente, como externamente. No âmbito interno, ajudam na composição das diretrizes do SENAI para educação profissional. No âmbito externo, atendem à prestação de contas ao Tribunal de Contas da União (TCU), à sociedade, às empresas e entidades parceiras, como o Ministério do Trabalho e o Ministério da Educação (SENAI-DN, 2011).

O sistema de atualização dos itinerários nacionais tem como função verificar melhorias indicadas pelos colaboradores do SENAI em todo o país. Os colaboradores têm acesso a esse sistema de forma facilitada, em que inserem suas contribuições para determinado curso e área de atuação do SENAI. Essas sugestões passam por uma validação em seu estado. Essa validação é realizada pelo interlocutor dos itinerários formativos nacionais do estado. Os interlocutores são indicados pelos Departamentos Regionais. Após a validação, as sugestões são direcionadas para o Departamento Nacional, onde podem ser aceitas ou não aceitas. Para sugestões não aceitas, é realizado um parecer sobre a recusa da sugestão. Para as sugestões aceitas, têm-se dois caminhos: realizar a atualização do curso e respectivo itinerário, mediante uma consulta ao Comitê de especialistas técnicos do SENAI (reunião de colaboradores internos), ou são subsídios para uma maior ação, isto é, convocação de um Comitê Técnico Setorial Nacional (CTSN) para nova elaboração de perfil profissional e desenhos curriculares nacionais.

Os estudos prospectivos são realizados na Unidade de Estudos e Prospecção (UNIEPRO) para atender solicitações do SESI, SENAI e IEL e da própria CNI. Esses estudos, também chamados de Cenários Setoriais para Educação Profissional (EP) e Serviços Técnicos e Tecnológicos (STT), têm por objetivo caracterizar a necessidade futura de mão-de-obra qualificada (Caruso, 2010). Os cenários são o resultado de vários estudos e consultas a especialistas



internos e externos (universidades, instituições de referência, entre outros). É realizada, para cada área de atuação da indústria, uma Antena Temática. Esse evento é parte integrante da metodologia para geração de Cenários Setoriais para EP e STT (Pio, 2011). Nela, são discutidos os resultados da dimensão quantitativa da demanda (análise de tendências ocupacionais), da dimensão qualitativa da demanda (mudanças em perfis profissionais) e da dimensão do perfil da escolaridade do público-alvo do SENAI. Com base na identificação dessas prováveis mudanças, a Antena Temática formula recomendações referentes ao setor em questão, disponibilizando-as para as áreas de educação e de tecnologia do Departamento Nacional (DN) e dos Departamentos Regionais (DRs), e para todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para alcançar esses resultados. Para a realização desses estudos, além da UNIEPRO/DN, têm-se os Observatórios SESI/SENAI/IEL da Federação das Indústrias do Estado do Paraná que também auxiliam, quando demandado, o Departamento Nacional do SENAI.

Os marcos regulatórios são todas as leis, decretos, normas, entre outras, descritas pelo Ministério da Educação e pelo Ministério do Trabalho. O SENAI, como instituição privada de educação profissional, faz parte do Sistema Oficial de Ensino e deve seguir essas legislações.

Independente da combinação de fatores, foi estabelecido neste trabalho que a decisão deve ser tomada, respeitando a seguinte ordem com pesos decrescentes: elaboração, atualização e manutenção do curso. O peso 1 foi atribuído para a manutenção do curso sem alterações; peso 2 foi atribuído para atualização do curso e peso 3 para a elaboração do curso, tendo em vista mudanças ou incremento de funções no perfil profissional do trabalhador. Para a elaboração de cursos, em que as mudanças são mais profundas e significativas, deve-se utilizar o Comitê Técnico Setorial Nacional (CTSN), um comitê com participação de membros externos (academia, indústrias, governo, entre outros). Para a atualização de cursos, parte-se para a colaboração dos Comitês de Especialistas Técnicos do SENAI que contam com

a participação de membros técnicos internos para pequenos ajustes nos desenhos curriculares dos cursos.

CURSO TÉCNICO DE QUÍMICA

Aplicando-se o processo proposto para o curso Técnico de Química, observa-se a necessidade de realizar ajustes no perfil profissional e desenho curricular (Atualização do Curso), pois sua descrição não atendia a todos os fatores apresentados nos estudos prospectivos. Esses estudos são realizados pela Unidade de Estudos e Prospecção (UNIEPRO). Essa Unidade tem com premissa verificar as mudanças tecnológicas, do trabalho e da educação para as áreas da indústria. Nesse contexto, o SENAI tem um modelo de prospecção que foi desenvolvido para analisar os setores industriais, de forma amplificada, e gerar parâmetros para que a instituição atenda às demandas da indústria de forma adequada. De acordo com as demandas, são realizados estudos para determinadas áreas. No caso da área Química, foi realizado um estudo prospectivo em 2005 e atualizado em 2013.

Durante essa atualização, verificou-se a necessidade de realizar ajustes no perfil profissional e no desenho curricular. O perfil profissional estava com seu prazo de validade quase expirado, outubro de 2014, e o desenho curricular necessitava maior alinhamento em relação às funções descritas no perfil profissional. Esses ajustes destacaram detalhes de funções do perfil profissional e os nomes e distribuição de cargas horárias do desenho curricular. Ao verificar marcos regulatório do MEC (Catálogo Nacional de Cursos Técnicos – CNCT) (MEC, 2013), atualizado em 2013, foi constatado que os ajustes estão alinhados. Foi realizada uma fusão das unidades de competência 1 e 2 e conseqüentemente, ajustes no desenho curricular do curso. Na Tabela 2, é apresentado o resumo do processo proposto (avaliação) do curso técnico de química.

Conclusões

Durante o trabalho, foram apresentadas formas para priorizar a objetividade, em detrimento à subjetividade,



Tabela 2. Resumo da aplicação da avaliação do curso Técnico em Química.

Indicadores	Crítérios	Atendimento do Critério	Decisões	Pesos
Avaliação de desempenho de estudantes	Desempenho abaixo do básico e básico	Não	Atualização do curso	2
	Desempenho adequado e avançado	Não	Manutenção do curso (sem alterações)	1
Avaliação de egressos	Desempenho abaixo do básico e básico	Não	Atualização do curso	2
	Desempenho adequado e avançado	Não	Manutenção do curso (sem alterações)	1
Sistema de atualização dos itinerários nacionais	Mais de três sugestões de diferentes DR sobre mesmo assunto	SIM	Atualização do curso	2
	Menos de três sugestões de diferentes DR sobre mesmo assunto	Não	Manutenção do curso (sem alterações)	1
Estudos Prospectivos	Inserção ou mudança de função na profissão	Não	Elaboração de curso	3
	Mudança ou inserção de tecnologias na área	SIM	Atualização de curso	2
Marcos Regulatórios MEC/MTE	Alterações de função	Não	Elaboração de curso	3
	Alterações de carga horária e inserção de temas	Não	Atualização de curso	2

na tomada de decisão durante a avaliação do processo de implantação dos Itinerários Nacionais de Educação Profissional e Tecnológica. Para resolver esse problema, fez-se necessária a modelagem dos processos dessa linha de atuação do Departamento Nacional do SENAI.

Ressalta-se que o mapeamento dos processos de elaboração, atualização e implantação de cursos é de vital importância na instituição de ensino profissionalizante. Essa importância deve-se ao fato de novas demandas recorrentes e a necessidade de respostas cada vez mais ágeis. Além disso, destaca-se o estabelecimento de indicadores, critérios para a tomada de decisões operacionais para o constante processo de melhoria de cursos.

O trabalho trouxe novas perspectivas para a harmonização de ações da área de educação profissional com questões aplicadas na engenharia de produção, por causa da pequena literatura envolvendo a relação entre ambas as atividades. Diante de um quadro claro e melhorado de todo o processo referente aos Itinerários Formativos Nacionais de Educação Profissional, ressaltam-se ganhos quantitativos na inserção de cursos, otimização de recursos e investimentos, pois os Departamentos Regionais do SENAI não precisarão investir nesse trabalho, em função da atividade realizada pelo Departamento Nacional. Os ganhos qualitativos

estão na melhoria da qualidade de cursos, tendo em vista a construção de padrões nacionais em consonância às demandas do mercado de trabalho em âmbito nacional e a troca de experiências entre os docentes de diferentes regiões do país.

A atualização de cursos pertencentes aos Itinerários Nacionais de Educação Profissional terá maior agilidade e integração nacional, em função da clareza das etapas e atores do processo. A modelagem dos processos referentes aos Itinerários Nacionais de Educação permitirá atendimentos a áreas com carência de profissionais onde a instituição tem pequena atuação.

Como sugestão para o desenvolvimento de trabalhos futuros, vale destacar a necessidade de uma análise mais detalhada para os estudos prospectivos considerarem os indicadores econômicos na aquisição de máquinas e equipamentos pelas empresas nacionais. Muitas empresas acabam adquirindo máquinas e equipamentos importados e têm dificuldade de preparação de mão-de-obra qualificada. O fornecedor do equipamento não tem como objetivo principal essa vertente (educação profissional), a instituição tem um nicho de mercado pouco explorado no país.

A instituição passa por transformações em seu modo de trabalho, no qual educação profissional, serviços técnicos e tecnológicos e inovação estarão cada vez mais



interligados para que a indústria brasileira consiga atender às demandas de mercado e fortaleça seu posicionamento no mercado mundial.

Referências

1. Belderrain, M. C. N., & Costa, T. C. da. (2009). Decisão em grupo em métodos multicritério de apoio à decisão. In 15º Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação do ITA – XV ENCITA (pp. 19–22).
2. Cameron, K. (1995). Downsizing and redesigning organization. In *Organizational change and redesigning*. New York: Oxford.
3. Caruso, L. A. C. (2010). Cenários de educação profissional e de serviços técnicos e tecnológicos no Brasil 2010/2014. Brasília: SENAI.
4. Hammer, M., & Champy, J. (1993). *Reengineering the Corporation: A Manifesto for Business Revolution* (First.). London: Harper Collins.
5. Hunt, V. D. (1996). *Process mapping: how to reengineer your business process*. New York: John Wiley & sons.
6. Johansson, H., & Mchugh, P. (1995). *Processos de negócios*. São Paulo: Pioneira.
7. Kumar, S., & Strehlow, R. (2004). Business process redesign as a tool for organizational development. *Technovation*, 24(11), 853–861.
8. MEC. (2013). *Catálogo Nacional de Cursos Técnicos*. Retrieved from www.pronatec.mec.gov.br/cnct
9. Pio, M. (2011). *Setor de automação industrial: recomendações setoriais*. Brasília: SENAI.
10. Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Service Science*, 1(1), 83–98.
11. SENAI. (2009). *Metodologias SENAI para a formação profissional com bases em competências*. (3 edição.). Brasília: SENAI.
12. SENAI. (2011). *PROADE 2011-Programa de Avaliação de Desempenho de Estudantes*. Juiz de Fora: SENAI.
13. SENAI. (2013). *Metodologia SENAI de educação profissional*. Brasília: SENAI.
14. SENAI-DN. (2011). *Programa de acompanhamento de egressos do SENAI 1999/2010: construção e resultados*. Brasília: SENAI.
15. Vallejos, R. V., & Gomes, J. de O. (2005). *Applying a Benchmarking Methodology to Empower a Virtual Organisation*. *IFIP International Federation for Information Processing*, 159, 279–28

Sandro P. Ormond^{1*} & Luís G. Trabasso²

¹Departamento Nacional do SENAI. Brasília-DF

²Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos/SP - Brasil

*E-mail: sormond@dn.senai.br



Comparação entre Institutos de Tecnologia Baseada em Indicadores do Capital Intelectual

Introdução

O Planejamento Estratégico é o processo gerencial construído para desenvolver e manter ajuste entre os objetivos, habilidades e recursos da organização e suas oportunidades de mercado, remoldando os negócios e produtos da empresa, de maneira que alcancem o lucro e o crescimento esperado, a partir dos valores que são criados aos seus acionistas. Nas metodologias existentes para sua elaboração, a estratégia aparece como uma das fases que se caracteriza pela seleção de caminhos a serem trilhados, a partir do conhecimento do ambiente no qual a empresa está inserida, bem como suas propostas de valor e o que é necessário medir para verificar se objetivos estão sendo alcançados (Meirelles, 2003) (Kotler, 1998).

Neste contexto ambiental, a análise do Capital Intelectual (CI) de uma corporação auxilia a gerenciar seus recursos e mensurar suas forças e fraquezas com o intuito de buscar maior eficiência e competitividade

no mercado. O Capital Intelectual é composto por três pilares, a saber: Capital Humano (relacionado à gestão das pessoas), Capital Estrutural (gestão da estrutura física e de processos de negócio) e Capital Relacional (gestão da relação com clientes e instituições parceiras), (MERTINS;ALWERT & WILL,2006).

Os recursos do Capital Intelectual estão intimamente ligados ao sistema de medição de desempenho baseado em indicadores e sendo, portanto, utilizados como um instrumento de gestão estratégica, descrevendo a dinâmica e as relações do negócio, o que permite uma avaliação mais holística e orientada para o futuro da empresa.

Os indicadores serão identificados, visando, sobretudo, incrementar a compreensão da organização quanto à realidade na qual está inserida, permite, assim, que melhores decisões sejam tomadas e ações efetivas tragam os resultados esperados. Procuram-se evitar os erros ainda cometidos pela maioria das empresas, que possuem seus indicadores baseados exclusivamente em índices financeiros, provocando as seguintes inconsistências (Bond, 2002):

- Medição apenas dos ativos tangíveis, normalmente, índices financeiros;
- Foco em resultados de curto prazo;
- Ausência de informações relacionadas à qualidade, entrega e flexibilidade;
- Não possuem métricas voltadas para o cliente e desempenho da concorrência;
- Pouco incentivo à inovação.



Figura 2.2 - Modelo estrutural da Declaração do Capital Intelectual [MERTINS;ALWERT & WILL,2006].

Desse modo e, com foco exclusivamente retrospectivo, existe incapacidade de apresentar uma trajet3oria para cria33o de valor, pois n3o aferem e, portanto, n3o conseguem impactar a satisfa33o do cliente, a qualidade dos produtos, os servi3os fornecidos e a motiva33o dos colaboradores. Desse modo, pretende-se implementar um sistema de medi33o com capacidade para (Kaplan & Norton,1992):

- Mensurar ativos intang3iveis;
- Verificar a efici3ncia dos processos de neg3cio;
- Verificar se a proposta de valor da empresa est3 sendo percebida pelo cliente;
- Comunicar a seus colaboradores as expectativas de desempenho esperadas pela organiza33o;
- Identificar os recursos deficientes e/ou eficientes para a presta33o de servi3os, gerando oportunidades de melhoria;
- Tomar decis3es baseadas em informa33es s3lidas, transparentes que possam ser justificadas;
- Comunicar-se de forma eficiente ao mercado.

Com o conhecimento da atmosfera de trabalho e recursos dispon3veis (humanos, infraestrutura, organiza33o e rela33es), tem-se o conjunto de informa33es necess3rias para o preenchimento do modelo de neg3cios. A gera33o do Modelo de Neg3cios deve ser um esquema destinado a identificar a33es a serem implementadas por meio das estruturas organizacionais, buscando atingir os objetivos tra3ados, a partir dos elementos-chave do empreendimento (a proposta de valor, a quem ser3 comercializado, os processos essenciais para o desenvolvimento do produto/servi3o e a intera33o mercadol3gica) (OSTERWALDER&PIGNEUR, 2011; OROFINO, 2011).

Diante desse contexto amplo de cada instituto, este trabalho tem por objetivo definir indicadores e a cria33o de um sistema de medi33o de desempenho que permita realizar compara33es entre institutos com distintas voca33es, de modo a estabelecer posicionamentos e foco em linhas de atua33o, al3m de fornecer aos gestores informa33es estrat3gicas e operacionais, possibilitando a

correta tomada de decis3o, visando a melhoria cont3nua dos processos.

Metodologia

A presente proposi33o metodol3gica para o estabelecimento de indicadores de desempenho e conseqente proposta de mensura33o dos indicadores intang3iveis a ser utilizados na compara33o de Institutos de Tecnologia est3 embasada no cumprimento das seguintes etapas:

CRIA33O DO MODELO DE NEG3CIOS

Foi constru3do o modelo de neg3cios para os Institutos de Tecnologia com a participa33o de cinco Diretores convidados, utilizando-se do m3todo "Business Model Canvas". O processo foi adaptado do esquema proposto por Osterwalder e Pigneur e utilizado em 3 fases - mobiliza33o: apresenta33o dos objetivos na constru33o do modelo de neg3cios; compreens3o: desenvolvimento do conhecimento a respeito do cliente e o mercado que se pretende atender; e, o design: fase de concep33o do modelo de neg3cio (Figura1).

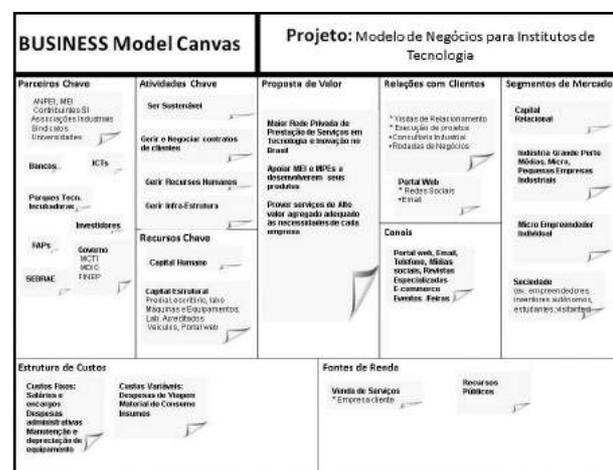


Figura 1. Ilustra33o de um modelo para Instituto de Tecnologia.

Ap3s realizar an3lise criteriosa sobre os principais fatores de Capital Intelectual e a constru33o dos 9 blocos do Business Model Canvas, foi poss3vel identificar os recursos de Capital Humano, Relacional e Estrutural



Figura 2 - Integração do Modelo de Negócios com a estrutura de Capital Intelectual - Fonte: Autora

dentro dessa estrutura. As dimensões do Canvas foram, então, classificadas, de acordo com os conceitos do Capital Intelectual para posterior mensuração e definição dos Indicadores, visando atingir os fatores de sucesso que é a proposta de valor pela qual a organização existe (Figura 1).

ANÁLISE DA ESTRATÉGIA, PROPOSTA DE VALOR E DEFINIÇÃO DOS INDICADORES

As etapas anteriores se mostraram necessárias, prioritariamente, pela importância da clareza do negócio, a influência do ambiente externo e para o correto mapeamento das propostas de valor, dos processo do conhecimento (Atividade-Chave do negócio) e os recursos do Capital Intelectual necessários para se atingir a visão e objetivos estratégicos da organização.

O desdobramento da Visão nos objetivos estratégicos até a definição dos fatores de sucesso (proposta de valor), conforme apresentado na Figura 1, fez-se necessário para facilitar a informação a ser comunicada para todos os níveis da organização, bem como gerar ações objetivas em busca das metas pré-estabelecidas, de modo a serem avaliadas a partir da definição dos indicadores que compõem o sistema de medição de desempenho.

No presente estudo buscou-se investigar na literatura, sob a ótica da avaliação de desempenho organizacional, indicadores de desempenho que pudessem descrever e mensurar os recursos intangíveis da organização, conforme apresentado na tabela ratificadora, como sendo capaz de mensurar os resultados a partir dos recursos de Capital Intelectual, provendo as informações necessárias para tomada de decisão.

Tabela 1- Tabela ratificadora de indicadores para Institutos de Tecnologia

CAPITAL HUMANO	CAPITAL ESTRUTURAL	CAPITAL RELACIONAL
Competência Comunicativa dos Funcionários	Portfólio de Serviços aderentes às Demandas da Indústria Local	Relacionamento com empresas e clientes
Competência Técnica dos Funcionários	Autonomia do Gestor do Instituto	Relacionamento com parceiros estratégicos
Competência Comportamental dos Funcionários	Laboratórios equipados e certificados	Relacionamento com fontes públicas de fomento
Habilidade de Liderança	Otimização de Processos e Inovação	Relacionamento Interno
	Serviços Executados em rede	

Para comparar distintos institutos, será necessária a atribuição de pesos, de acordo com a qualidade da instituição nos diferentes critérios baseados nos recursos necessários para entregar valor aos seus clientes. Por intermédio de comparação par a par, proposto pelo método de Vallejos & Gomes (2005), estabeleceu-se a melhor opção dentro das alternativas possíveis, considerando aspectos qualitativos, permitindo que os indicadores sejam estruturados hierarquicamente definindo, ao final, um índice de competitividade para cada instituto.

Após contabilizar as preferências entre os indicadores, baseado na percepção dos avaliadores, o peso de cada indicador deve ser calculado pela variação da medida executada com a mínima prevalência, pela máxima variação de prevalências, convertida para uma escala de 1 a 5 de números inteiros (Equação 1).

$$\text{Peso} = \text{arred}[4(N_i - N_{\min}) / (N_{\max} - N_{\min}) + 1] \quad (1)$$

Onde N_j é igual à prevalência medida, N_{\max} é a máxima prevalência e N_{\min} é a mínima prevalência.

Cada indicador é, então, multiplicado pela situação ideal que neste trabalho foi considerado o valor 5 sendo, portanto, o padrão de *benchmarking*. Em seguida, o responsável pela medição avaliou o estágio em que se encontrava seu instituto em cada um dos indicadores apresentados, levando-se em consideração na Tabela 2:

Finalizadas as análises dos indicadores, baseadas na percepção dos avaliadores do Instituto, atribuem-se as Notas e chega-se ao Índice Real do Instituto.



Tabela 2. Avaliação Qualitativa para os Indicadores

Valor Absoluto	Conceito	Valor de Referência
5	Excelente	Valor baseado na percepção do avaliador
4	Muito Bom	Valor baseado na percepção do avaliador
3	Bom	Valor baseado na percepção do avaliador
2	Regular	Valor baseado na percepção do avaliador
1	Insuficiente	Valor baseado na percepção do avaliador

A comparação par a par dos indicadores e a subsequente definição do Índice de Competitividade será realizada, tendo a aplicação de um estudo de caso com 3 Institutos de Tecnologia que será apresentado na seção dos resultados.

Resultados

Definido o método para criação do Índice de Competitividade para Institutos de Tecnologia, foi realizado um estudo de caso com uma amostragem de 3 Institutos que compõem a Rede de Institutos SENAI de Tecnologia e Inovação, totalizando 85. Para a avaliação dos indicadores, baseados nos recursos do Capital Intelectual, foram convidados 5 Diretores de Institutos com linhas de atuação distintas, com o intuito de se verificar o sucesso do método quando aplicado na prática. O resultado desta aplicação é apresentado nas tabelas, ilustrando a proposta do artigo.

O peso real do Instituto foi definido, utilizando-se a análise par a par entre todos os indicadores e aplicando a Equação 1. Posteriormente, foi solicitado aos Diretores dos Institutos que avaliassem seus recursos de capital intelectual, baseado na Tabela 1 na qual foram atribuídos valores absolutos aos conceitos escolhidos. Multiplicando-se, então, as duas colunas da tabela, peso real e Nota do IST, encontra-se o Índice de Competitividade Real do Instituto. No entanto, para fins de comparação, é necessário estabelecer o Índice de Competitividade Ideal, que é o produto do Peso Real X a Nota Ideal, o qual, neste trabalho, foi considerado 5 (Valor Absoluto de *Benchmarking*), permitindo aos Diretores o correto entendimento da situação do seu Instituto e qual nível de pontuação eles podem obter se todos os seus recursos obtiverem a nota máxima.

Acredita-se que a grande vantagem desta técnica, primeiramente, é a possibilidade de criar um grande banco de dados com indicadores padronizados que permitam a comparação entre institutos com área de atuação tecnológica e diferentes portes de infraestrutura física e de capital humano. Com esses dados, é possível realizar “benchmarking” com os institutos de maior nota total ou apenas em algum indicador, de acordo com a prioridade de investigação e atuação. Outro tipo de análise que pode ser feita é em relação aos pesos definidos e a nota atribuída. Ao final desta atividade, um plano de ação deve ser criado para aumentar os indicadores de desempenho mais baixos do Instituto e as estratégias podem ser revistas e reposicionadas.

Conclusão

Com este projeto, diversas análises de *benchmarking* podem ser obtidas, de acordo com a performance dos Institutos de Tecnologia do SENAI e pode-se verificar ainda como esses indicadores influenciam a sua competitividade e estratégias em relação à proposta de valor que pretendem oferecer para a indústria.

Outro ponto importante a ser considerado neste trabalho foi a aceitação incondicional dos Diretores de Institutos durante a aplicação do questionário e análise dos resultados de *benchmarking*. Eles identificaram problemas que, até o momento, não haviam sido percebidos mas que podem ser resolvidos imediatamente com as experiências e as “melhores práticas” de outros. Também verificaram que possuem situações semelhantes, tanto em relação aos indicadores que estão com um nível de satisfação bom, mas dos indicadores que merecem uma atenção especial. E, neste ponto, foi possível observar a mudança de atitude para trabalharem em uma estratégia colaborativa em que todos pudessem se ajudar. Como, por exemplo, foi o caso do indicador de trabalhos executados em rede, nos cinco Institutos, o item foi avaliado como Insuficiente o que provocou proatividade imediata dos Diretores com o objetivo de unir as competências e esforços para trabalharem juntos.

Como limitações do método, registra-se a característica estática da medição, ou seja, o cálculo do Índice de Competitividade do Instituto deverá ser realizado em um determinado momento de

Tabela 3. Aplicação do Método nos Institutos Senai de Tecnologia

ÍNDICE DE COMPETITIVIDADE PARA INSTITUTOS DE TECNOLOGIA																			
Indicadores de Desempenho	INSTITUTO SENAI DE TECNOLOGIA N. 1						INSTITUTO SENAI DE TECNOLOGIA N. 2						INSTITUTO SENAI DE TECNOLOGIA N. 3						
	Avaliação	Peso Real	Nota do IST	Nota Ideal	IC Real	IC Ideal	Avaliação	Peso Real	Nota do IST	Nota Ideal	IC Real	IC Ideal	Avaliação	Peso Real	Nota do IST	Nota Ideal	IC Real	IC Ideal	
1	Competência Comunicativa dos Funcionários	BOM	2	3	5	6	10	BOM	2	3	5	6	10	BOM	2	3	5	6	10
2	Competência Técnica dos Funcionários	MUITO BOM	5	4	5	20	25	MUITO BOM	5	4	5	20	25	BOM	5	3	5	15	25
3	Competência Comportamental dos Funcionários	BOM	1	3	5	3	5	MUITO BOM	1	4	5	4	5	REGULAR	1	2	5	2	5
4	Habilidade de Liderança do Gestor	BOM	4	3	5	12	20	MUITO BOM	4	4	5	16	20	BOM	4	3	5	12	20
5	Portfólio de Serviços aderentes às Demandas da Indústria Local	REGULAR	4	2	5	8	20	BOM	4	3	5	12	20	MUITO BOM	4	4	5	16	20
6	Autonomia do Gestor do Instituto	REGULAR	2	2	5	4	10	REGULAR	2	2	5	4	10	INSUFICIENTE	2	1	5	2	10
7	Laboratórios equipados e certificados	MUITO BOM	5	3	5	15	25	BOM	5	3	5	15	25	BOM	5	3	5	15	25
8	Otimização de Processos e Inovação	REGULAR	3	2	5	6	15	EXCELENTE	3	5	5	15	15	REGULAR	3	2	5	6	15
9	Serviços Executados em rede	INSUFICIENTE	4	1	5	4	20	INSUFICIENTE	4	1	5	4	20	INSUFICIENTE	4	1	5	4	20
10	Relacionamento com empresas e clientes	BOM	4	3	5	12	20	BOM	4	3	5	12	20	MUITO BOM	4	4	5	16	20
11	Relacionamento com parceiros estratégicos	REGULAR	1	2	5	2	5	REGULAR	1	2	5	2	5	BOM	1	3	5	3	5
12	Relacionamento com fontes públicas de fomento	REGULAR	2	2	5	4	10	BOM	2	3	5	6	10	MUITO BOM	2	4	5	8	10
13	Relacionamento Interno	BOM	5	3	5	15	25	MUITO BOM	5	4	5	20	25	INSUFICIENTE	5	1	5	5	25
		TOTAL				111	210	TOTAL				136	210	TOTAL				110	210

verificação. Indica-se aplicar o método pelo menos uma vez ao ano em todos os Institutos de Tecnologia do Senai, criando um *ranking* para facilitar a identificação dos melhores índices. Neste estudo de caso, a medição foi realizada em junho/2014. Sugere-se ainda a definição de uma sistemática de aplicação do método anualmente.

Referências

1. Bond, Emerson. Medição de desempenho para gestão produção em um cenário de cadeia de suprimentos. **2002**. 125f. Tese (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
2. Meirelles, A. M. A Formação de Estratégias no sistema bancário brasileiro: modelo teórico e evidências empíricas. **2003**. 414f.

Tese (Doutorado em Administra3o) – Faculdade de Ci4ncias Econ3micas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

3. Mertind, K., Will, M. Incas: Declara3o de Capital Intelectual - Made in Europe; Relev4ncia Estrat4gica do Capital Intelectual nas PME: Anais da Confer4ncia Europeia 9 em Gest3o do Conhecimento, Southampton 04-05 setembro de **2008**.
4. Kaplan, R. S., Norton, D. P. The Balanced Scorecard: measures that drive performance. Harvard Business Review, Boston, **1992**.
5. Kotler, Philip. Administra3o de Marketing: an4lise, planejamento, implementa3o e controle. 5. Ed. S3o Paulo: Atlas, **1998**.
6. Osterwalder, A.; Pigneur, Y., Business Model Generation – Inova3o em modelos de neg3cios, Rio de Janeiro: Altas Books, **2011**.
7. Vallejos,R; Gomes,J. O. Applying a benchmarking methodology to empower a virtual organisation, **2005**.

Paula B. Nadai^{1*} & Jefferson O. Gomes²

¹Unidade de Inova3o e Tecnologia do Departamento Nacional do SENAI.

²Instituto Tecnol3gico de Aeron4utica. S3o Jos4 dos Campos/SP - Brasil

*E-mail: pnadai@cni.org.br

Instruções para Envio de Artigos para a Revista Processos Químicos

Prezado(a) autor(a),

Para que seu artigo possa entrar em nosso processo de avaliação, visando à possível publicação na revista Processos Químicos, ele deverá satisfazer às seguintes condições:

- ▶ Utilizar somente o editor Microsoft Word, numerando todas as páginas;
- ▶ Conter, no máximo, 40 laudas, incluindo Figuras, Tabelas, Esquemas etc.;
- ▶ Conter Resumo e *Abstract*, ambos com até 100 palavras;
- ▶ Conter Palavras-chave e *Keywords*, ambos com até 3 palavras;
- ▶ Título com, no máximo, 20 palavras;
- ▶ Titulação do autor (créditos). Dados pessoais do autor: endereço, telefone, e-mail;

- ▶ As figuras, tabelas, esquemas etc. devem ser colocados após as referências e devidamente identificados. Se escaneados, devem ser em alta resolução (800 dpi/ bitmap para traços) com extensão TIF ou JPEG. As fotos ou desenhos com cor (300 dpi/grayscale) devem ser enviados com extensão tif/jpg, para não termos problemas ao aplicá-las no padrão da Revista. Outras extensões possíveis: CDR, EPS ou CDX. No caso particular de esquemas contendo estruturas químicas, estas deverão ter sempre a mesma dimensão, para que possam ser reduzidas uniformemente. Considerar que as figuras deverão ter largura máxima de uma coluna (8,5 cm) ou, excepcionalmente, de 2 colunas (17,5 cm).

► As figuras (gráficos, esquemas, etc.) deverão ter qualidade gráfica adequada (usar somente fundo branco).

► A primeira página deverá conter o título do trabalho, nome e endereço dos autores (para a revista, a menor unidade é o departamento). Havendo autores com diferentes endereços, estes deverão se seguir imediatamente ao nome de cada autor. Os autores devem ser agrupados por endereço. Indicar com asterisco(*) o autor para correspondência, colocando seu e-mail no rodapé desta página (um só e-mail). A segunda página deverá conter o título, o resumo e o *abstract* do trabalho;

► As referências bibliográficas deverão ser numeradas e todas citadas ao final do artigo. Será utilizada a abreviatura da revista como definida no *Chemical Abstracts Service Source Index* (ver <http://www.cas.org/sent.html>). Caso a abreviatura autorizada de uma determinada revista não possa ser localizada e não for óbvio como o título deve ser abreviado, deve-se citar o título completo. Exemplos de citações:

1. Varma, R. S.; Singh, A. P.; J. Indian Chem. Soc. **1990**, 67, 518.
2. Provstyanoi, M. V.; Logachev, E. V.; Kochergin, P. M.; Beilis, Y. I.; Izv. Vyssh. Uchebn. Zadev.; Khim. Khim. Tekhnol. **1976**, 19, 708.
3. Lemos, T. L. G.; Andrade, C. H. S.; Guimarães, A. M.; Wolter-Filho, W.; Braz-Filho, R.; J. Braz. Chem. Soc. **1996**, 7, 123;
4. Ângelo, A. C. D.; de Souza, A.; Morgon, N. H.; Sambrano, J. R.; Quim. Nova **2001**, 24, 473.
5. Regitz, M. Em Multiple Bonds and Low Coordination in Phosphorus Chemistry; Regitz, M.; Scherer, O. J., eds.; Georg Thieme Verlag: Stuttgart, **1990**, cap. 2.
6. Cotton, F.A.; Wilkinson, G.; Advanced Inorganic Chemistry, 5th ed., Wiley: New York, **1988**.

- Espaço duplo entre linhas;
- Fonte: *Times New Roman* 12;
- A linguagem empregada deve ser atual. Isso implica a não utilização de termos, tais como: destarte, outrossim, descrever-se-á.
- O texto deve apresentar discurso impessoal, ou seja, expressões, tais como: constatamos, verificamos, utilizamos devem ser substituídas por constatou-se, foi verificado, utilizou-se.
- Enviar uma cópia do artigo, acompanhada de carta de encaminhamento à Editoria da Revista Processos Químicos, por meio do site **www.rpqsenai.org.br**. Maiores informações podem ser obtidas mediante endereço eletrônico: revistapq.senai@sistemafieg.org.br.

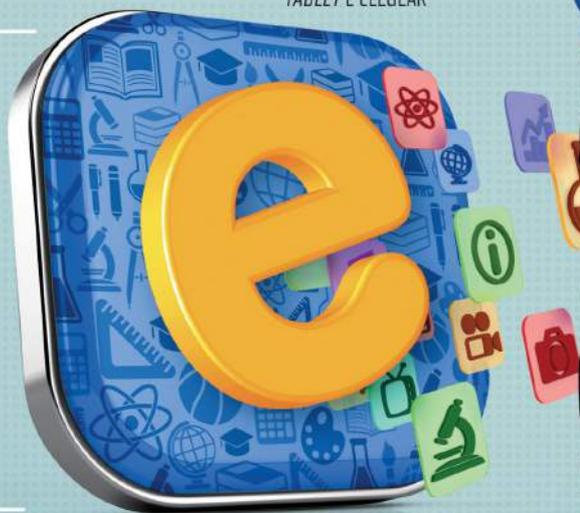


Agora, o seu projeto para
o futuro não precisa mais
esperar tanto tempo.

EDITAL SENAI SESI DE INOVAÇÃO 2014.



MARCELO ALMEIDA
GERENTE DE INOVAÇÃO
QUE DESENVOLVEU UM
APLICATIVO COM CURSOS
DE ATUALIZAÇÃO PARA SEUS
FUNCIONÁRIOS VIA
TABLET E CELULAR



www.editaldeinovacao.com.br

Chegou o Edital SENAI SESI de Inovação 2014. Seus projetos inovadores contam com um grande incentivo para aumentar a produtividade das empresas e *startups* brasileiras e melhorar a educação, saúde, segurança e qualidade de vida dos seus trabalhadores. E este ano o Edital traz novidades. Agora você tem ainda mais chances de emplacar os seus projetos, afinal pode enviá-los durante todo o ano. É isso mesmo, são quatro ciclos de avaliação. Para saber mais, acesse: www.editaldeinovacao.com.br. Não perca tempo, crie o futuro agora.

SESI: (62) 3219-1392
SENAI: (62) 3219-1496

APDIO:



Ministério da
Ciência e Tecnologia



REALIZAÇÃO:

