



II-109 – PRODUÇÃO MAIS LIMPA NO PROCESSO DE TINGIMENTO DE ÁGATAS COM ÊFASE NA GESTÃO DO USO DAS ÁGUAS

Ênio Leandro Machado⁽¹⁾

Químico Industrial. Doutor em Engenharia. Professor do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Professor do Departamento de Química e Física da Universidade de Santa Cruz do Sul–UNISC/RS. e-mail: enio@unisc.br

Lourdes Teresinha Kist

Química. Doutora em Química, Professora do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Professora do Departamento de Química e Física da Universidade de Santa Cruz do Sul-UNISC/RS. e-mail: lourdes@unisc.br

Eduardo Alexis Lobo Alcayaga

Biólogo. Doutor em Ciências Aquáticas, Professor do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Professor do Departamento de Biologia da Universidade de Santa Cruz do Sul–UNISC/RS. e-mail: lobo@unisc.br

Filipe Vargas Zerwes

Engenheiro Ambiental pela Universidade de Santa Cruz do Sul-UNISC/RS.

Vagner de Sales Dambros

Biólogo. Mestre do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental pela Universidade de Santa Cruz do Sul-UNISC/RS.

Endereço⁽¹⁾: Avenida Independência, 2293 - Caixa Postal 188 – Universidade de Santa Cruz do Sul - Bairro Universitário – Santa Cruz do Sul – RS – CEP 96.815-900 – Brasil Tel: 0xx (51) 3717-7545

RESUMO

O processo industrial de beneficiamento de pedras preciosas gera riquezas para diversos municípios brasileiros, especialmente no Rio Grande do Sul-Brasil. Considerando o crescente número de microempresas que processam pedras preciosas, a geração de efluentes se torna inevitável e também uma preocupação com relação à preservação da natureza. Considerando-se a relação de importância econômica e de impactos ambientais associados com o setor pedrista, neste trabalho foram investigadas as fontes geradoras de emissões de efluentes no processo de tingimento de Ágatas e alternativa para uma remediação mais limpa destes efluentes do que a prática usual de oxidação com hipoclorito de sódio. Especificamente foram estudadas proposições de produção mais limpa para o processo de tingimento de ágatas com solução alcoólica de Rodamina B e ensaios de tratamento com os processos UV, O₃, UV/O₃, Carvão Ativado e O₃/Carvão Ativo. Além disso, foram realizadas análises citotoxicidade/genotoxicidade a fim de pesquisar se os efluentes gerados nestes processos industriais podem ser mutagênicos ou de alguma forma afetar a composição genética dos ecossistemas vizinhos à indústria, já que organismos vivos estão frequentemente expostos a agentes ambientais que possuem a capacidade de induzir alterações (mutações) cromossômicas, fenômenos estes que podem levar ao desenvolvimento de processos cancerosos e morte celular. Portanto, detecção destes produtos e seus prováveis efeitos nos organismos vivos são importantes no estudo do impacto causado às populações animal, vegetal e principalmente, humana.

PALAVRAS-CHAVE: Rodamina B, Tingimento, Ágatas.

INTRODUÇÃO

O Brasil pela sua formação geológica recente, possui muitos afloramentos de rochas e minerais em todo o seu território, e isso fez com que a exploração de minerais perdurasse desde a colonização brasileira até hoje. Uma prova disso é que no ano de 2006, aproximadamente 35% de transações comerciais no mundo vinculadas à comercialização de gemas e pedras preciosas foram brasileiras e no mesmo ano, a exportação de jóias brasileiras somente para os Estados Unidos da América (EUA), correspondeu a 22,6 milhões de dólares. Alguns estados brasileiros como Bahia, Minas Gerais, Rio Grande do Norte e Rio Grande do Sul estão entre os maiores produtores de minerais, especificamente as pedras preciosas, como Ametista, Citrino, Cristal, Ágata, tornando essa produção uma atividade de alta rentabilidade para os setores primário, secundário e terciário de suas economias (www.feninjer.com.br, 04/05/2008; www.museumin.ufrgs.br, 16/05/2007;



www.soledade.com.br, 16/05/2007; www.soledaders.com.br, 16/05/2007) www.feninjer.com.br, 04/05/2008; www.almg.gov.br, 25/04/2008; www.bndes.gov.br, 25/04/2008).

No estado do Rio Grande do Sul o comércio de pedras preciosas no período de 1998 a 2002 representou 0,40% da economia. Isto se explica devido ao grande número de municípios com afloramentos e minas de pouca profundidade, favorecendo a extração desses minerais, em municípios como: Ametista do Sul, Barros Cassal, Lajeado, Salto do Jacuí e Soledade, que ampliam as suas ações para além da extração, como também a manufatura e comercialização para o próprio Brasil, além de exportação para inúmeros países como: EUA, Tailândia, China, Japão, Itália, Espanha, entre outros (www.feninjer.com.br, 04/05/2008; www.museum.ufrgs.br, 16/05/2007; www.soledade.com.br, 16/05/2007; www.soledaders.com.br, 16/05/2007; www.bndes.gov.br, 25/04/2008).

O produto final, elaborado a partir da pedra bruta passa por uma série de processos de beneficiamento até chegar ao seu estado final para a comercialização. Dentre esses processos, podem-se citar: corte ou serragem; lixamento; lavagem; queima; tingimento e polimento. A partir dos processos citados, há a poluição do ar por partículas de sujidade das pedras e pó de sílica, emissão de calor e fumaça pela queima, gasto indiscriminado de água, assim como a sua poluição por ácidos, bases, corantes, etc.

Dentre as etapas pelas quais a pedra bruta passa, a que mais polui é a do tingimento, pois essa pode alterar a cor da água (turbidez), mudar seu pH natural, alterar a sua condutividade, demanda química de oxigênio (DQO), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), nutrientes solubilizados (nitrogênio e fósforo por exemplo) além de contaminar ou poluir a água com metais pesados (SENGER, 2005). Embora as empresas trabalhem com variados tipos de pedras, são os geodos de Ágata o principal tipo de pedra utilizada para tingimento. As cores usadas no processo de tingimento são muito variadas sendo predominantes o verde, o amarelo, o vermelho, o roxo, o rosa, o preto e o azul. Os corantes usados no tingimento de Ágatas podem ser divididos em inorgânicos e orgânicos. Os corantes inorgânicos são compostos principalmente de ácidos como o crômico e nítrico em combinação com outros componentes. Já os orgânicos incluem de forma mais freqüente os corantes, Cristal Violeta, a Rodamina B e o Verde Brilhante. A Rodamina B, por exemplo, é usada para dar a cor rosa às pedras que serão tingidas (SENGER, 2005).

A indústria de pedras preciosas de Soledade, Rio Grande do Sul, é constituída de uma grande diversidade de produtos fabricados nas empresas da cidade, ou também, produzida nas microempresas e revendida pelas grandes empresas. Esta terceirização na produção ocorreu devido às variações cambiais ocorridas a partir de 1994, quando houve a introdução da nova moeda, o real, e a equiparação das moedas americana e brasileira, fazendo com que as grandes empresas que empregavam muitos funcionários, reduzissem drasticamente o número de empregados, bem como o número de processos de beneficiamento que eram feitos no interior da fábrica. Essa nova estruturação de mercado no município tensionou os empregados despedidos a produzir a mesma mercadoria fora das grandes empresas, mas agora sem um vínculo empregatício. Nesse período, como as mercadorias passaram a ser produzidas em “fundos de quintal” sem a infra-estrutura necessária para a industrialização, alguns dos processos industriais nocivos à natureza, que antes eram realizados sob a responsabilidade dos grandes empresários e não foram tratados com a devida importância, agora passou a ser de responsabilidade dos pequenos e novos microempresários. Então, a crise financeira do setor impediu a implantação de medidas de segurança e métodos de tratamentos realmente efetivos dos efluentes e os órgãos ambientais responsáveis pressionaram para uma solução dos problemas de poluição, algumas das empresas passaram a utilizar métodos de tratamento paliativo a fim de mascarar a poluição gerada no processo produtivo.

METODOLOGIA

Os estudos foram realizados através das etapas de caracterização do local de estudo, caracterização analítica dos efluentes (DQO, DBO₅, pH; turbidez, nitrogênio total (NTK) e fósforo total, surfactantes, sólidos suspensos, condutividade, ecotoxicologia com *Daphnia magna* e citotoxicologia) e ensaios de tratamento com UV, O₃, O₃/UV e Carvão Ativado + O₃. Os ensaios de fotodegradação, ozonização e fotoozonização foram feitos com reator tipo coluna, volume útil de 10L, construído em acrílico e dotado de sistema de difusão de ar, amostrador, amostrador de gás com kitassato contendo solução absorvedora de ozônio e lâmpada germicida concêntricamente disposta (30 W, $\lambda = 254$ nm, T8GL). O ozônio foi gerado através de um ozonizador (RADAST 2C – OzOxi – Ozônio).



Os efluentes tratados foram preparados sinteticamente com concentrações de rodamina B de 20 mg L⁻¹ dissolvidos em solução álcool/água de 10% v/v. O ajuste do pH foi realizado com solução de hidróxido de sódio 10% m/v para valores de 9-10. Os ensaios de tratamento com as amostras sintéticas foram feitos durante 60 min com coletas a cada 10 min para construção das curvas cinéticas. A dosagem de ozônio no reator foi de 1.141,08 mg O₃ h⁻¹ (seletor em 100% de geração) e potência irradiada de 3 W L⁻¹. Para as amostras reais foram observadas as mesmas condições de ajuste de pH, tempo reacional, dosagem de ozônio e intensidade de radiação. A exceção ocorreu para a amostragem, realizada no tempo zero e 60 min para o método de melhor eficiência de descolorimento.

A amostra sintética de rodamina B a 20 mg L⁻¹ foi adsorvida por uma massa de carvão equivalente a 20 g L⁻¹ sob agitação mecânica constante por uma hora. Durante a adsorção foram retiradas alíquotas que eram filtradas (papel filtro de filtração rápida) e medidas suas absorbâncias a cada 10 minutos. Feita a adsorção, o pH do efluente foi ajustado para básico (9-10) e logo após ozonizado nas mesmas condições.

As coletas, preservação e análises das amostras real foram realizadas seguindo a metodologia do APHA/AWWA/WEF-*Standard methods for the examination of water and wastewater* (1998). As análises foram realizadas na Central Analítica da Universidade de Santa Cruz do Sul (UNISC), Santa Cruz do Sul, RS, Brasil.

Todos os ensaios de tratamento foram realizados no Laboratório de Tecnologia de Tratamento de Águas e Efluentes da UNISC.

Os ensaios citogenéticos foram realizados no Laboratório de Citogenética Vegetal e Genotoxicidade (LABCITOGEN) – Departamento de Biologia - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil. As amostras do efluente industrial avaliadas foram coletadas e preparadas das seguintes maneiras: 1- efluente diluído; 2- efluente tratado com O₃; 3- efluente tratado com carvão. Como controles foram utilizados: água destilada (controle negativo para mutações) e extrato aquoso de *Bacharis trimera* 75 g L⁻¹ (controle positivo para inibição total da divisão celular) (FACHINETTO e TEDESCO, 2007). As amostras do efluente de tingimento usadas nos testes de toxicidade genética foram previamente coletadas e/ou preparados para o experimento com cebolas. O efluente bruto (real) foi coletado na empresa a partir do procedimento de lavagem das peças tingidas e, posteriormente, acondicionado em galões ao abrigo da luz e do calor excessivo.

RESULTADOS

Ensaios de Descolorimento via UV, O₃ e O₃/UV.

A sequência de Tabelas 1-4 apresenta os resultados dos ensaios comparativos dos métodos: Luz Ultravioleta (UV), Ozonização (O₃/HO[•]) e Ozonização associada à Luz Ultravioleta (O₃/UV) no tratamento dos efluentes contendo Rodamina B.

Tabela 1: Teste realizado com a lâmpada germicida (UV, λ=254 nm).

Tempo (minutos)	0	10	20	30	40	50	60
Absorvância	0,141	0,143	0,147	0,151	0,151	0,151	0,153
pH	9	9	9	9	9	9	9

A ineficiência de fotodegradação com radiação UV está associada com as características do espectro de absorção (UV-Vis) demonstradas nos Anexos III, IV e V. A fotodegradação mais intensa ocorreria nas regiões acima de 300 nm, especialmente no visível.

**Tabela 2: Ozonização a 20% de capacidade do gerador de ozônio (228,16 mg O₃ h⁻¹).**

Tempo (minutos)	0	10	20	30	40	50	60
Absorvância	0,140	0,121	0,114	0,098	0,081	0,069	0,055
pH	10	10	9	9	9	9	9

Tabela 3: Ozonização a 100% de gerador de ozônio (1.141,08 mg O₃ h⁻¹).

Tempo (minutos)	0	10	20	30	40	50	60
Absorvância	0,157	0,121	0,059	0,016	0,001	0,001	0,002
pH	9	8,5	7,5	7,5	7	6,5	6

Os ensaios de ozonização foram feitos com aplicação de equivalente de massa de 1,4 e 5,7 mg O₃ mg⁻¹ de Rodamina B. A transferência de ozônio para o reator tipo coluna foi total durante todo o período de tratamento. Quanto ao pH observou-se redução de 9-6,5 por consequência da geração de radical HO[•] produzido pela ação do O₃, uma vez que o sistema O₃/HO[•] atua com os íons hidroxila como agente redutor.

O aumento da taxa de degradação confirma que a reação apresenta características de pseudo-primeira ordem (neste caso considera-se apenas uma variante, no caso a cor), pois há relação direta do aumento da concentração de ozônio com a redução de cor.

Tabela 4: Ozonização a 100% de capacidade do gerador de ozônio associado ao UV (λ=254 nm).

Tempo (minutos)	0	10	20	30	40	50	60
Absorvância	0,151	0,151	0,139	0,120	0,103	0,082	0,063
pH	9,5	9,5	8,5	8,5	8	7,5	7

Quanto aos ensaios de fotoozonização não ocorreu a esperada ação coadjuvante da radiação UV, pois as reduções de absorvância foram menores na relação como, a redução de pH. A competição por sítios de ação entre os caminhos avançados de ozonização O₃/HO[•] e O₃/UV pode explicar este fato.

Considerando-se então as exposições com os testes comparativos, conclui-se que no meio alcalino o método O₃/HO[•] foi mais eficiente no descolorimento, sendo este selecionado para estudos de citotoxicidade, bem como para combinar a pré-recuperação de Rodamina B com carvão ativado e a pós-ozonização.

Ensaio de Descolorimento via Adsorção com Carvão Ativado e O₃/Carvão Ativado

O processo de recuperação prévia de Rodamina B (Tabelas 5 e 6) demonstra capacidade de adsorção na melhor condição dos testes de 50% em termos de concentração inicial.

Tabela 5: Solução de 20 mg L⁻¹ filtrada e adsorvida com carvão a 20 g L⁻¹.

Tempo (minutos)	0	10	20	30	40	50	60
Absorvância	0,210	0,200	0,185	0,169	0,163	0,148	0,138
pH	7	7	7	7	7	7	7

**Tabela 6: Ozonização a 100% da solução filtrada e adsorvida pelo CA a 20 g L⁻¹.**

Tempo (min)	0	10	20	30	40	50	60
Absorvância	0,138	0,194	0,148	0,133	0,127	0,123	0,117
pH	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	8,5	7,5

A ozonização pós adsorção não mostrou a eficiência do método O₃/HO⁻, porém permite um conceito mais limpo de tratamento quanto a recuperação de corante residual. Para regeneração do carvão saturado, poderia ser praticada a lavagem com solução alcoólica já empregada na dissolução de Rodamina B. A solução gerada seria adicionada ao banho de tingimento.

Caracterização Analítica dos Efluentes

Na Tabela 7 são demonstrados os dados de eficiência da ozonização em meio alcalino para o tratamento dos efluentes do processo de tingimento de ágatas com o corante rodamina B, sendo considerado o encaminhamento de melhor desempenho dos métodos e procedimentos estudados.

Vários parâmetros podem ser considerados como críticos quanto ao impacto ambiental limitado pela resolução CONSEMA 128/06. Dentre estes aparecem a DQO, Fósforo Total e cor real. No entanto, aspectos associados a toxicidade e genotoxicidade, caracterizam adicionais analíticos importantes para configurar o efluente em estudo como perigoso, pois as classificações de genotóxico e altamente ecotóxico são demonstrada com o percentual de aberrações cromossômicas e pelo índice de inatividade percentual do microcrustáceo *Daphnia magna*.

O descolorimento, apesar de efetivo em 40 min de O₃/HO⁻, revela ineficiência para detoxificação, aumento da biodegradabilidade e diminuição do índice de eutrofização. O fato pode ser explicado devido à oxidação parcial que associa compostos mais tóxicos (especialmente genotóxicos) que a rodamina B.

Tabela 7: Comparação do efluente bruto, tratado e comparativo com limites de emissão.

Parâmetro	Valores do Efluente Bruto	Valores do Efluente Tratado O ₃ /HO ⁻	Limites Estabelecidos na Resolução Consema 128/06
DQO (mg L ⁻¹ O ₂)	2600	2560	330
DBO ₅ (mg L ⁻¹ O ₂)	≅ 0*	≅ 0*	110
pH	5,6	7,8***	9
Cor Real - Absorvância (λ = 585 nm)	0,26	0,0	Não deve conferir mudança de coloração (cor verdadeira) ao corpo hídrico receptor.
Nitrogênio Total (mg L ⁻¹)	5,8	6,2	20
Fósforo Total (mg L ⁻¹)	470,00	474,00	4
Surfactantes (mg L ⁻¹)	0,06	<LD**	2,0 mg MBAS/L
Sólidos Suspensos (mg L ⁻¹)	57,5	12,0	180
Sólidos Sedimentáveis (mg L ⁻¹)	< 0,1	< 0,1	≤ 1,0 ml/L em teste de 1 (uma) hora em Cone Imhoff
Turbidez (UT)	19,2	8,0	-
Condutividade (µScm ⁻¹)	0,363	0,380	-
Aberrações Cromossômicas %	27	40	****
CE(I)50% (<i>Daphnia magna</i>) %	26,794	28,600	****
Vazão (m ³ dia ⁻¹)	< 20	-	<20

* Valor abaixo do limite de determinação do método. ** LD = limite de determinação. ***Efluente alcalinizado para tratamento. **** Valores de comparação não existentes.



O detalhamento das análises citogenéticas realizadas com o efluente bruto diluído pode ser observado na Tabela 8. Através dos dados verificados de forma comparativa na Tabela 8, pode-se comprovar a real toxicidade do efluente. Isso é visualizado quando compara-se o número de células com aberrações e pelo número de células em divisão.

Outro aspecto relevante é de que a genotoxicidade e ecotoxicidade observadas podem explicar o comportamento refratário do efluente, pois os valores de DBO_5 estão abaixo do limite de determinação do método biológico.

Tabela 8: Resultado comparativo do comportamento celular em água e no efluente.

Amostra	Número de células sem divisão	Número de células em divisão regular	Aberrações celulares	% de aberrações cromossômicas em relação ao número de células em divisão
Controle Negativo (água destilada)	3790	202	08	4
Efluente Diluído	3868	104	28	27

Neste sentido, mesmo que possa ser atenuada a carga poluente dos efluentes do tingimento com medidas de produção mais limpa, parece ser adequado o estudo de método de tratamento dos efluentes que possam detoxificar a fração orgânica responsável por este comportamento.

Avaliação da Genotoxicidade das Amostras Tratadas via $\text{O}_3/\text{HO}^\cdot$ e O_3 /Carvão Ativado.

Avaliou-se a citotoxicidade/genotoxicidade do efluente industrial contendo o corante Rodamina B diluído através do sistema teste de *Allium cepa*. Os resultados mostram que houve decréscimo do índice mitótico para ambas as amostras. Isto indica, qualitativamente, a presença no efluente de compostos com algum grau de citotoxicidade. As análises cromossômicas realizadas indicam ocorrência de alteração cromossômica evidenciando a presença de substâncias genotóxicas nos efluentes.

Em um ciclo de vida celular normal, a célula pode encontrar-se em Interfase, ou em Divisão celular. Durante a interfase, ocorrem as fases de duplicação do material genético (DNA), síntese de RNA e síntese de proteínas. Ao entrar em período de divisão celular, as células já com DNA duplicado começam a organizar os cromossomos a fim de dividi-los igualmente para as futuras duas células-filhas. O processo de divisão celular subdivide-se em quatro subfases: prófase, metáfase, anáfase e telófase.

Os dados relativos ao número de células analisadas durante o ciclo celular de *Allium cepa*, mostrando os valores dos índices mitóticos (IM) obtidos a partir das células em divisão celular (prófase, metáfase, anáfase e telófase) propriamente dita. Ressalta-se que o IM do controle negativo diferiu significativamente dos demais tratamentos e apresentou o maior valor médio, 5,54%. Esse valor está abaixo de 10%, portanto, pode ser considerado baixo, mas está entre os valores comumente encontrados através do uso do teste de *Allium cepa* por vários pesquisadores como Fachinetto *et al.*, 2007; Bagatini, *et al.*, 2007; Bagatini *et al.* 2008. Foi possível observar que após o tratamento do efluente diluído com O_3 houve um decréscimo no valor de IM significativo ($\chi^2=110,3$) de 5,54% (controle negativo) para 1,12%.

Após o tratamento do efluente com carvão, a redução nos valores do IM foi menor que com o tratamento com o O_3 . O índice mitótico reduziu de 5,54% (controle negativo) para 2,65% nesse tratamento ($\chi^2=35,63$). A comparação dos valores de IM do efluente tratado com O_3 daquele tratado com carvão mostrou que os mesmos diferiram entre si estatisticamente ($\chi^2=25,12$). A observação dos valores de IM em porcentagem mostraram que houve decréscimo da proliferação celular do efluente diluído, bem como do efluente após tratamentos com O_3 e com carvão. Isso pode ser devido ao fato de que os tratamentos aplicados ao efluente devem ser melhor ajustados até que os valores fiquem próximos daqueles encontrados para o controle negativo.



Aberrações cromossômicas foram encontradas e estão apresentadas numericamente na Tabela 9. Houve o aparecimento de células durante as fases metáfase, anáfase e telófase com aberrações cromossômicas, e também a ocorrência de células binucleadas. Observando-se os resultados obtidos na Tabela 9 tem-se que mesmo no controle negativo em água houve a ocorrência de 8 células com aberrações cromossômicas, no entanto, esse número deveria ter se mantido após os bulbos terem sido submetidos a outros tratamentos, indicando que apesar de valores não muito elevados, houve um acréscimo significativo das aberrações cromossômicas em relação ao efluente diluído, efluente tratado com O₃ e efluente tratado com carvão. Além disso, não ocorreu nenhuma aberração cromossômica nas células submetidas ao controle negativo, pois esse inibiu totalmente a divisão celular. Como parâmetro de comparação, para os tipos de aberrações encontradas podem ser utilizados os trabalhos de Cuchiara (2007) e Souza (2005) que encontraram desde simples quebras até pontes anafásicas, bem como telofásicas.

Tabela 9: Número de células em interfase e em divisão, aberrações celulares e índice percentual de células de radículas de *A. cepa* aberrantes.

Tratamento	Número de células em interfase	Número de células em divisão regular	Aberrações celulares	% de aberrações cromossômicas em relação ao número de células em divisão
Controle Negativo (água destilada)	3790	202	08 a	4
Efluente Diluído	3868	104	28 b	27
Efluente tratado com O₃	3955	32	13 c	40
Efluente tratado com Carvão/O₃	3894	86	20 d	23
Controle Positivo (<i>Bacharis trimera</i> [75g/L])	4000	004	00 e	00

Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente ao nível de 5%, pelo teste χ^2 .

Estão entre as alterações citogenéticas, mais comuns nas células em metáfase, os cromossomos em anel e disrupções cromossômicas que se referem aos cromossomos que se soltam, perdem partes, resultando em fragmentos de cromossomos ou então se mostram na forma de cromossomos desorganizados. Na anáfase, a ocorrência de disrupção e/ou desorganização do fuso mitótico, bem como pontes anafásicas e presença de micronúcleos na telófase (FACHINETTO e TEDESCO, 2007). Nesse trabalho foram observadas disrupções cromossômicas na metáfase (Figura 9), formação de ponte anafásica e presença de micronúcleos na telófase, bem como alterações morfológicas. Essas alterações observadas indicam claramente a presença de substâncias tóxicas e mutagênicas e/ou genotóxicas nas amostras do efluente. Observou-se também, alterações na estrutura dos cromossomos, indicando genotoxicidade do efluente diluído e também do efluente após o tratamento com O₃ e com carvão/O₃. Comparativamente o tratamento com O₃ é mais nocivo que o tratamento com carvão/O₃ e que o efluente sem tratamento, quando se trata do aparecimento de aberrações cromossômicas (Tabela 9) e ambos os tratamentos do efluente podem ser considerados ineficazes para diminuição do aparecimento de aberrações cromossômicas estruturais do tipo quebras e pontes anafásicas. Porém, o IM aumentou, indicando que a proliferação celular aumentou após o tratamento do efluente com carvão quando comparado com o tratamento do mesmo efluente com O₃.

Esses resultados mostram claramente a toxicidade e também genotoxicidade do efluente diluído em relação a água destilada, devido ao aparecimento significativo de células com aberrações cromossômicas. Ressalta-se que o efluente tratado com O₃ ou com carvão/O₃ não tem a eficácia desejada – a detoxificação do efluente, porque reduz a proliferação celular, inibindo a vida aquática e prejudicando quaisquer formas de vida silvestre no local. Além disso, o tratamento com O₃ aumenta a porcentagem de aberrações cromossômicas durante a divisão celular. Mais estudos são necessários para ajustar o tratamento ideal que permita a adequação do tratamento desse efluente minimizando danos ao ambiente.



CONCLUSÕES

O uso de adsorção com carvão ativado granulado também poderá proporcionar recuperação de 50% do corante residual em meio aquoso, diminuindo posteriores gastos de tratamento e ganhos de insumos. A regeneração com etanol comercial também incluiria uma rota de insumo já empregada no processo.

Quanto ao processo de remediação, a ozonização em meio alcalino foi o método mais efetivo para descolorimento dos efluentes do tingimento orgânico com rodamina B, porém o aumento da genotoxicidade aparece como fato limitante. Também a refratariedade e ecotoxicidade não foram atenuadas, pois a oxidação parcial, sem redução significativa de DQO, demonstra que a extensão de oxidação terá de ser aumentada com pesquisas de aplicações em condições mais drásticas e outros POAs.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. APHA/AWWA - AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 20. ed. Baltimore, APHA, 1998.
2. BAGATINI, M. D.; SILVA, A. C. F.; TEDESCO, S. B. Uso do sistema teste de *Allium cepa* como bioindicador de genotoxicidade de infusões de plantas medicinais. *Rev. Bras. Farmacogn.*, Set 2007, v.17, n.3, p.444-447.
3. BAGATINI, M. D.; VASCONCELOS, T. G.; LAUGHINGHOUSE IV, H. D.; MARTINS, A. F.; TEDESCO, S. B., Biomonitoring Hospital Effluents By *Allium cepa* L. Test. *Bulletin of environmental toxicology and contamination*, 2008.
4. CUCHIARA, C. C. *et al*, Efeito antiproliferativo dos extratos aquosos de Mamona (*Ricinus communis* L.), *Revista Brasileira de Biociências*, Porto Alegre, v.5, supl.2, p.639-641, jul. 2007.
5. FACHINETTO, J. M.; TEDESCO, S. B., Estudo da genotoxicidade dos extratos de *Baccharis trimera* sobre o ciclo celular de *Allium cepa* (CEBOLA). *Jornada Acadêmica Integrada*, UFSM, SANTA MARIA, RS, 2007.
6. KADIRVELU, K. *et al*. Activated carbon from industrial solid waste as an adsorbent for the removal of Rhodamine-B from aqueous solution: Kinetic and equilibrium studies, *Chemosphere*, 60 (2005) 1009-1017.
7. METCALF & EDDY. *Wastewater engineering: treatment and reuse*. 4. ed. New York: McGraw Hill, 2003. 1819 p. ISBN 0-07-041878-0.
8. SENGHER, A. M. Tratamento de Efluente das Indústrias de Beneficiamento de Pedras Preciosas, Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia, UFRGS, 2005.
9. SOUZA, S. A. M. *et al*, Atividade alelopática e citotóxica do extrato daquoso de Espinheira-Santa (*Maytenus ilicifolia* Mart. Ex Reiss.), *Publ. UEPG Ci. Biol. Saúde*, Ponta Grossa, 11 (3/4), p.7-14, set./dez. 2005.
10. PIZZOLATO, T.M., CARISSIMI, E., MACHADO, E.L. SCHNEIDER, I.A.H. Colour removal with NaClO of dye wastewater from an agate-processing plant in Rio Grande do Sul. *International Journal of Mineral Processing*, v.65, p.203-211, 2002.
11. ZOLLINGER, H., *Color Chemistry Syntheses, Properties and Applications of Organic Dyes and Pigments*, VCH, Weinheim, Germany, 1987.