

VALDEIR EUSTÁQUIO JÚNIOR

**EFICIÊNCIA DO SISTEMA DE AERAÇÃO EM CASCATA
NO TRATAMENTO DA ÁGUA RESIDUÁRIA DA LAVAGEM
E DESCASCAMENTO/DESPOLPA DOS FRUTOS DO
CAFEEIRO**

Dissertação apresentada
à Universidade Federal de
Viçosa, como parte das
exigências do Programa de
Pós-Graduação em Engenharia
Agrícola, para obtenção do
título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2010

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

E91e
2010

Eustáquio Júnior, Valdeir, 1982-

Eficiência do sistema de aeração em cascata no tratamento da água residuária da lavagem e descascamento/despolpa dos frutos do cafeeiro / Valdeir Eustáquio Júnior. – Viçosa, MG, 2010.

xli, 63f. : il. (algumas col.) ; 29cm.

Inclui apêndice.

Orientador: Antonio Teixeira de Matos.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 45-53.

1. Águas residuais. 2. Águas residuais - Purificação - Aeração. 3. Águas residuais - Purificação - Oxidação. 4. Águas residuais - Purificação - Tratamento biológico. 5. Café. 6. Resíduos orgânicos - Purificação. I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.


CDD 22. ed. 628.162

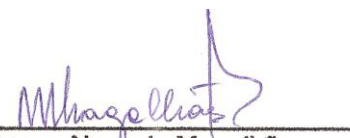
VALDEIR EUSTÁQUIO JÚNIOR

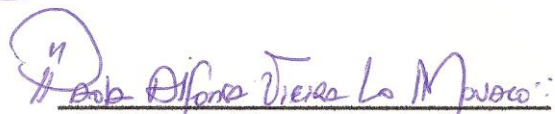
**EFICIÊNCIA DO SISTEMA DE AERAÇÃO EM CASCATA
NO TRATAMENTO DA ÁGUA RESIDUÁRIA DA LAVAGEM
E DESCASCAMENTO/DESPOLPA DOS FRUTOS DO
CAFEIRO**


Dissertação apresentada
à Universidade Federal de
Viçosa, como parte das
exigências do Programa de
Pós-Graduação em Engenharia
Agrícola, para obtenção do
título de *Magister Scientiae*.

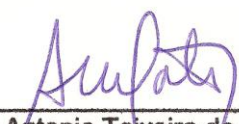
APROVADA EM: 28 de Julho de 2010.


Prof. Juarez de Souza e Silva


Prof. Marcos Alves de Magalhães


Prof.^a Paola Alfonsa Vieira Lo Monaco
(Coorientadora)


Prof. Sérgio Maurício Lopes Donzeles


Prof. Antonio Teixeira de Matos
(Orientador)

A Deus.

Aos meus pais Olenir e Valdeir (*in memoriam*).

À minha avó Maria José.

OFEREÇO

À minha namorada Juliana.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida e por sempre colocar pessoas muito especiais em meu caminho.

À minha família, em especial a minha mãe Olenir, a meu pai Valdeir (*in memoriam*), minha avó Maria José e minha tia Olenice por todo amor, dedicação e ensinamentos que contribuíram para minha formação pessoal.

Aos meus primos Marco, Laís, Sibely e Máira por sempre estarem presentes em minha vida.

À Juliana pelo amor, amizade, carinho e por sempre estar presente em todos os momentos de minha vida.

À família Pinheiro Dadalto pelas “resenhas” e por terem me acolhido com tanto carinho.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Agrícola pela oportunidade.

Ao Professor Antonio Teixeira de Matos, pela orientação, confiança, e por ser um exemplo de profissionalismo.

À Professora Paola Alfonsa Vieira Lo Monaco, pela coorientação, amizade, carinho e apoio.

Ao Professor Alisson Carraro Borges pela coorientação, sugestões e esclarecimentos.

Aos Professores Juarez de Souza e Silva, Marcos Alves de Magalhães e Sérgio Maurício Lopes Donzeles por participarem da minha banca de defesa e pelas sugestões muito bem vindas.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de estudos.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola: José Galinari, Marcos, Edna, Délio, Danilo, Dona Maria, Evaristo e José Mauro, pela excelente convivência durante esses anos.

Ao Simão pelo suporte e ensinamentos no laboratório.

Ao Edson, proprietário do Sítio Jatobá, por disponibilizar as águas do processamento dos frutos do cafeeiro para realização desse trabalho.

Aos amigos André Luciano, Danilo Fukunaga e Leandro Willer pela amizade e pela excelente convivência em Viçosa.

À Priscila pela grande amizade e por estar sempre presente em minha vida, mesmo estando longe.

À Fabiana e a Maíke pela grande amizade, carinho e por sempre se preocuparem comigo.

Aos queridos amigos Caio Vini, Denis, Daniel (pastor), Leandro Almeida, Mauro Lúcio, Raphael e Silvana pela cumplicidade, dedicação e compreensão.

Aos meus queridos amigos Antover, Fabrício, Júlio, Geice, Gheila, Lucimar, Joselma, Benatti, Ronaldo, Flávia, André, Gil, Luana, Flávia, Marta, Juliana, Thaís, Josiane, Ivan e Henrique, por sempre estarem presentes quando precisei.

Às demais pessoas que, direta ou indiretamente contribuíram, para realização deste trabalho, o meu muito obrigado.

ÍNDICE

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	vii
RESUMO	viii
ABSTRACT	x
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	4
2.1 Importância do café.....	4
2.2 Processamento pós-colheita dos frutos do cafeeiro.....	5
2.2.1 Processamento via seca.....	6
2.2.2 Processamento via úmida	7
2.3 Resíduos provenientes do processamento dos frutos do cafeeiro	9
2.3.1 Caracterização da água residuária da lavagem e descascamento/despolpa dos frutos do cafeeiro.....	9
2.3.2 Impactos ambientais das águas residuárias geradas no processamento dos frutos do cafeeiro.....	12
2.4 Tratamento da água residuária via aeração em cascata	13
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	19
3.1 Local de instalação e operação do sistema	19
3.2 Água residuária	19
3.3 Sistema de aeração em cascatas	20
3.4 Variáveis monitoradas na ARC tratada no sistema de aeração em cascatas	23
3.5 Análise estatística dos dados.....	25

4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
4.1	Caracterização da água residuária da lavagem e descascamento/despolpa dos frutos do cafeeiro	27
4.2	Condições do ambiente.....	28
4.3	Desempenho do sistema de aeração em cascata	29
4.3.1	Alteração no potencial hidrogeniônico e na condutividade elétrica da ARC.....	29
4.3.2	Incorporação de oxigênio dissolvido.....	30
4.3.3	Decaimento de oxigênio dissolvido no tanque de recepção/detenção	33
4.3.4	Remoção de matéria orgânica.....	35
4.3.5	Remoção de macronutrientes.....	40
4.3.6	Remoção de compostos fenólicos	41
5	CONCLUSÕES	44
6	REFERÊNCIAS	45
7	APÊNDICE	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABIC	Associação Brasileira da Indústria de Café
ARC	Água residuária da lavagem e descascamento/despolpa dos frutos do cafeeiro
CERH	Conselho Estadual de Recursos Hídricos
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COPAM	Conselho Estadual de Política Ambiental
DEA	Departamento de Engenharia Agrícola
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
K	Coeficiente de eficiência
PVC	Policloreto de vinila
UFV	Universidade Federal de Viçosa

RESUMO

EUSTÁQUIO JÚNIOR, Valdeir, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2010. **Eficiência do sistema de aeração em cascata no tratamento da água residuária da lavagem e descascamento/despolpa dos frutos do cafeeiro.** Orientador: Antonio Teixeira de Matos. Coorientadores: Alisson Carraro Borges e Paola Alfonsa Vieira Lo Monaco.

Devido à falta de informações técnicas sobre o tratamento de águas residuárias utilizando o sistema de aeração em cascatas, objetivou-se com a realização deste trabalho estudar o desempenho desse sistema no tratamento de águas residuárias da lavagem e descascamento/despolpa dos frutos do cafeeiro (ARC). Além disso, procurou-se determinar o coeficiente de eficiência associado à aeração em cascatas, avaliar a incorporação de oxigênio dissolvido e a capacidade do sistema em remover matéria orgânica, macronutrientes (nitrogênio, fósforo e potássio) e compostos fenólicos da ARC. O experimento foi implantado e conduzido na Área Experimental de Tratamento de Resíduos do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa. O sistema de aeração em cascatas foi instalado em um talude com inclinação de 30° e com uma diferença de nível de 4,14 m. A cascata foi composta de 23 degraus, com altura, largura e comprimento de 0,18; 0,32 e 0,60 m, respectivamente. No final da cascata foi instalado um reservatório, com 2 m³ de volume, denominado “recepção/detenção” da ARC escoada na escada. Após ser submetida a um tempo de detenção de 3 horas, a ARC era transferida para outro reservatório denominado “tanque de recirculação”, de onde era recalçada para nova recirculação na cascata. Essa recirculação era feita 3 vezes ao dia e sob vazão constante de 1 L s⁻¹. Durante os 30 dias de operação do sistema de tratamento foram utilizadas amostras de ARC coletadas em 3 diferentes ocasiões e, a cada 10 dias de operação do sistema, as mesmas eram trocadas. O experimento foi instalado seguindo um delineamento em blocos casualizados, esquema de parcelas subdivididas no tempo, consistindo de 3 blocos (3 amostras de ARC). Em relação à variável DBO, foram avaliados 6

tratamentos principais (locais de coleta da ARC na cascata) e 4 tratamentos secundários (tempo de recirculação da ARC: 0, 3, 6 e 9 dias), totalizando 72 unidades experimentais. No que se refere à análise das alterações na variável DQO, foram avaliados 6 tratamentos principais (locais de coleta da ARC na cascata) e 10 tratamentos secundários (tempo de recirculação: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 9 dias), totalizando 180 unidades experimentais. Nesse caso, as unidades experimentais foram constituídas por amostras coletadas em cada dia, nos pontos pré-estabelecidos. Para estudar o decaimento da concentração de oxigênio dissolvido em função do tempo no tanque de recepção/detenção, um experimento à parte foi realizado em delineamento inteiramente casualizado com 6 repetições e 15 tratamentos (0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28 minutos). Nessa avaliação, as unidades experimentais foram as alíquotas de ARC amostradas a cada 2 minutos. Com a utilização do sistema de aeração em cascatas foi possível incorporar, em média, 0,2 mg L⁻¹ de oxigênio a cada lance de 1 m de degraus na cascata. A máxima porcentagem de saturação de oxigênio na ARC foi de 19,4%, tendo sido obtida com o escoamento em lance de escada de 4 m. A alta concentração de material orgânico não permitiu que se detectassem grandes alterações na concentração de oxigênio dissolvido na ARC. O sistema constituído pela cascata de aeração apresentou coeficiente de eficiência de 0,078. O tempo de detenção ideal no tanque de recepção/detenção foi de 26 minutos. O sistema em operação proporcionou eficiência na remoção média de DQO de 28,9%. As remoções de sólidos totais, sólidos voláteis totais; sólidos suspensos totais, sólidos suspensos voláteis, nitrogênio total, fósforo total, potássio total e compostos fenólicos foram de 57,3; 71,6; 26,5; 17,2; 35,7; 62,5; 49,5 e 55,0%, respectivamente. A cascata de aeração mostrou ser uma importante alternativa para composição de sistemas de tratamento da ARC, tendo em vista que é um meio efetivo de tratamento aeróbio do material orgânico em suspensão.

ABSTRACT

EUSTÁQUIO JÚNIOR, Valdeir, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, July 2010. **Efficiency of cascade aeration system for treating wastewater from washing and peeling/pulping coffee fruits.** Advisor: Antonio Teixeira de Matos. Co-advisors: Alisson Carraro Borges and Paola Vieira Alfonsa Lo Monaco.

Due to lack of technical information on the treatment of wastewater using cascade aeration systems, this work aimed to study the performance of this system in the treatment of the wastewater from washing and stripping/pulping coffee (CW). In addition, it sought to determine the coefficient of efficiency associated with cascade aeration system, evaluate the incorporation of dissolved oxygen and the system's ability to remove organic matter, nutrients (nitrogen, phosphorus and potassium) and phenolic compounds from CW. The experiment was assembled and conducted in the Waste Management Experimental Area of the Agricultural Engineering from the Federal University of Viçosa. The cascade aeration system was installed in a slope with an inclination of 30° and with a level difference of 4.14 m. The cascade consisted of 23 steps, with height, width and length of 0.18; 0.32 and 0.60 m respectively. At the end of the cascade was installed a container with 2 m³ volume. It was called reception/detention of the CW disposed on the ladder. After a detention time of 3 hours, the CW was transferred to another tank, called recirculation tank, where it was pumped for further recycling in the cascade. This recirculation was done three times a day and under constant flow rate of 1 L s⁻¹. During the 30 days of operation of the treatment system it was used samples of CW collected at three different occasions and it was changed every 10 days of system. The experiment was conducted following a randomized block design, split plot in time, consisting of 3 blocks (3 samples CW). Regarding to the variable BOD, it was evaluated six main treatments (location in the cascade of CW) and four secondary treatments (recirculation time of CW: 0, 3, 6 and 9 days), totalizing 72 experimental units. As regards the analysis of changes in variable COD, it

was evaluated six main treatments (location in the cascade of CW) and 10 secondary treatments (recirculation time: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 and 9 days), totaling 180 experimental units. In this case, the experimental units were composed of samples collected each day, in pre-set points. To study the decay of dissolved oxygen concentration versus time in the receiving/holding tank, another experiment was conducted in a randomized design with 6 replications and 15 treatments (0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28 minutes). In this evaluation, the experimental units were the rates of CW sampled every 2 minutes. With the cascade aeration system it was possible to incorporate an average of 0.2 mg L^{-1} of oxygen at each meter of stairs. The maximum percentage of oxygen saturation in the CW was 19.4% and it was obtained at flight of stairs at 4 m. The high concentration of organic material did not allow it to detect major changes in the concentration of dissolved oxygen in the CW. The system consisting of cascade aeration coefficient for efficiency of 0.078. The detention time in the tank for ideal reception/detention was 26 minutes. The system in operation provided average removal efficiency of COD was 28.9%. The removals of total solids, volatile solids, total suspended solids, volatile suspended solids, total nitrogen, total phosphorus, potassium and total phenolic compounds were 57.3; 71.6; 26.5; 17.2; 35.7; 62.5; 49.5 and 55.0% respectively. The cascade aeration proved to be an important alternative for the composition of treatment systems of CW, considering it is a very effective aerobic treatment of suspended organic material.

1 INTRODUÇÃO

O Brasil colheu, na safra de 2008/2009, cerca de 39,47 milhões de sacas de café, sendo que essa produção concentra-se na região sudeste do país, com destaque para os estados de Minas Gerais, Espírito Santo e São Paulo que, juntos, contribuíram com mais de 85% para a produção nacional (CONAB, 2009). Segundo dados do ICO (2009), o país ocupa o primeiro lugar no *ranking* mundial de produção e exportação de grãos de café.

A busca por qualidade é uma das maiores preocupações nos diversos segmentos produtivos e, em especial, no agronegócio cafeeiro, devido à alta exigência do mercado. O café é um produto cujo valor cresce consideravelmente com a melhoria de qualidade, sendo que um produto de qualidade inferior sofre redução em seu valor de comercialização. A qualidade final do produto, bem como a viabilidade econômica da cafeicultura, está altamente relacionada com técnicas corretas e de manejo racional do sistema de processamento (EMBRAPA, 2009). Em vista disso, o produtor brasileiro que quer dedicar-se à cafeicultura lucrativa deverá se especializar na produção de grãos de café de boa qualidade.

O processamento por via úmida, que dá origem aos grãos de café lavados e descascados/despulpados, é realizado a partir de frutos maduros. Esse processo facilita a eliminação da polpa (fonte de fermentação), fornecendo grãos de café de boa qualidade e com uma bebida de sabor suave (MATOS *et al.*, 2003; GARCIA *et al.*, 2008). No entanto, neste tipo de processamento, geram-se grandes volumes de águas residuárias que, se lançadas sem tratamento em corpos hídricos, podem causar diversos impactos ambientais.

A água residuária da lavagem e descascamento/despolpa dos frutos do cafeeiro (ARC), além de apresentar alto conteúdo de matéria orgânica, é constituída por nitrogênio total, fósforo total, sódio e, principalmente, potássio (MATOS; LO MONACO, 2003). Segundo Campos (1993), quando a ARC é lançada em corpos hídricos receptores, rapidamente formam zonas anóxicas, como resultado de sua estabilização anaeróbia, podendo gerar, como subprodutos da degradação do material orgânico, metano, fenóis e

ácido sulfídrico. Além disso, o aumento na concentração de nutrientes pode promover a eutrofização dessas águas, prejudicando o ecossistema aquático.

A Zona da Mata Mineira é uma região montanhosa que tem cerca de 70% da área total dominada por terrenos de vertentes e, portanto, de elevadas declividades. Considerando-se que a disponibilidade de áreas de baixa declividade, imprescindíveis para a construção de sistemas de tratamento da ARC, é rara na região, torna-se necessário o desenvolvimento de tecnologias de tratamento mais apropriadas e exequíveis para este tipo de conformação topográfica.

Dentre os vários sistemas propostos para o tratamento da ARC, os sistemas de aeração em cascata podem ser uma alternativa apropriada para implantação em regiões de elevada declividade, já que apresentam como principais vantagens o baixo custo de implantação e operação e possibilitam o aproveitamento das condições naturais do local (MATOS, 2007).

Tais sistemas consistem na construção de degraus, aproveitando a diferença de nível do terreno, por onde a ARC seria escoada. Em razão do movimento turbulento a ela proporcionado, há a incorporação de oxigênio ao meio líquido. A máxima eficiência obtida nessa incorporação, e consequentemente na oxidação do material orgânico por micro-organismos aeróbios, ocorre quando a saturação do meio líquido é atingida com mínimas perdas de oxigênio para a atmosfera. A perda do oxigênio incorporado pode ocorrer de forma rápida, limitando os processos de oxidação da matéria orgânica contida na água residuária.

Acredita-se que a construção de tanques de oxidação ao final de cada lance de escada possa conferir tempo de detenção suficiente para que ocorra eficiente uso do oxigênio pelos micro-organismos, além de permitir a reincorporação de mais oxigênio à ARC a cada lance em que ela for submetida ao escoamento. O maior aproveitamento da massa de gás incorporada em lances sucessivos da escada pode melhorar a eficiência do sistema de aeração em cascata.

Estudos relativos ao sistema de aeração em cascatas tornam-se necessários, tendo em vista que os processos envolvidos precisam ser

melhor compreendidos para que se possa otimizar sua utilização no tratamento de águas residuárias, dentre elas, da ARC.

Com base no exposto, com a realização deste trabalho objetivou-se avaliar a eficiência do sistema de aeração em cascata no tratamento da água residuária da lavagem e descascamento/despolpa dos frutos do cafeeiro, tendo como objetivos específicos: determinar o coeficiente de eficiência (K) associado à aeração em cascatas; avaliar a influência do tempo nos valores de concentração de oxigênio dissolvido da ARC, quando mantida no tanque de detenção; além de avaliar a eficiência do sistema na incorporação de oxigênio dissolvido, na remoção da matéria orgânica, macronutrientes (nitrogênio, fósforo e potássio) e compostos fenólicos nessa água residuária.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Importância do café

O Brasil é o maior produtor e exportador de café do mundo. A safra brasileira, em 2008, totalizou 45,99 milhões e, ao final do ano de 2009, foi de 39,47 milhões de sacas de café beneficiado (CONAB, 2009).

A América do Sul é a região de maior produção de grãos de café do mundo, com destaques para o Brasil e a Colômbia que, juntos, produziram 40% do total mundial nas últimas duas décadas (SILVA; LEITE, 2000).

O sistema agroindustrial do café no Brasil é responsável pela geração 10,2 milhões de empregos diretos e indiretos (REVISTA CAFEICULTURA, 2009) e por uma riqueza anual de 8 bilhões de reais (IBGE, 2009). Atualmente, o país possui 2,0 milhões de hectares de área plantada, com produtividade média de 18,86 sacas por hectare. O Estado de Minas Gerais é o primeiro no *ranking* nacional em produtividade de café, apresentando uma área de 1,0 milhão de hectares em produção, o que representa 48,15% de toda a área cultivada com café no país (CONAB, 2009; ABIC, 2010).

A falta de política interna para o custeio do setor cafeeiro no decorrer da crise gerada a partir de 1986 e, em seguida, as mudanças no mercado externo, em 1989, com a anulação das cláusulas econômicas do Acordo Internacional do Café, resultaram na descapitalização dos cafeicultores e no declínio de parte das lavouras. Esses fatos podem fazer com que permaneça na atividade somente os produtores mais competitivos, ou seja, aqueles que buscarem fornecer ao mercado um produto de boa qualidade (MATIELLO, 1991).

Hoje se sabe que um aumento na produtividade da lavoura de café não pode ser tomado como indicativo de obtenção de um produto de boa qualidade, pois cuidados na colheita e no processamento dos frutos devem ser incluídos na cadeia produtiva do café (CHALFOUN, 1996). Com a melhoria na qualidade dos grãos de café, há um aumento no valor de comercialização, pois o mercado está tornando-se cada vez mais exigente. O processamento pós-colheita tem grande influência sobre a qualidade final

dos grãos de café e tem sido aceito que o descascamento/despolpa dos frutos traz melhorias na qualidade da bebida do café (MATOS *et al.*, 2007; CAFÉS DO BRASIL, 2009).

Com o intuito de conquistar clientes no mercado internacional, o grande paradigma dos tempos atuais passou a ser, juntamente com o aumento na produtividade, a busca da melhoria na qualidade do produto e a preservação do meio ambiente, uma vez que o produto adquire maior valor de mercado com a melhoria da qualidade da bebida e com o uso de técnicas na produção que proporcionem maior preservação ambiental (MATOS; LO MONACO, 2003).

2.2 Processamento pós-colheita dos frutos do cafeeiro

O processamento pós-colheita tem influência direta na qualidade final dos grãos de café (FIA *et al.*, 2008; GARCIA *et al.*, 2008; LO MONACO *et al.*, 2009). Em virtude do método de colheita empregado no Brasil, o café colhido apresenta mistura de frutos verdes, maduro (cereja), supermaduros (passas), secos, folhas, ramos, terra e pedras (SILVA *et al.*, 2001; BORÉM, 2008). Para que o café colhido apresente boa qualidade, é necessária a utilização de processos pós-colheita que retirem essas impurezas e possibilitem a separação dos grãos de pior qualidade, como os passas, secos e brocados, dos verdes e cereja.

No processamento pós-colheita dos frutos do cafeeiro, dois diferentes métodos são usados (Figura 1), o via seca e o via úmida (SILVA, 1995; BORÉM, 2008; LO MONACO *et al.*, 2009). As etapas comuns a ambos envolvem: limpeza, separação e, depois da separação do grão, secagem, armazenamento, beneficiamento e comercialização (SILVA *et al.*, 2000). No processamento por via úmida, especificamente, inclui-se as etapas de separação entre os frutos cerejas e verdes, descascamento/despolpa e remoção da mucilagem.

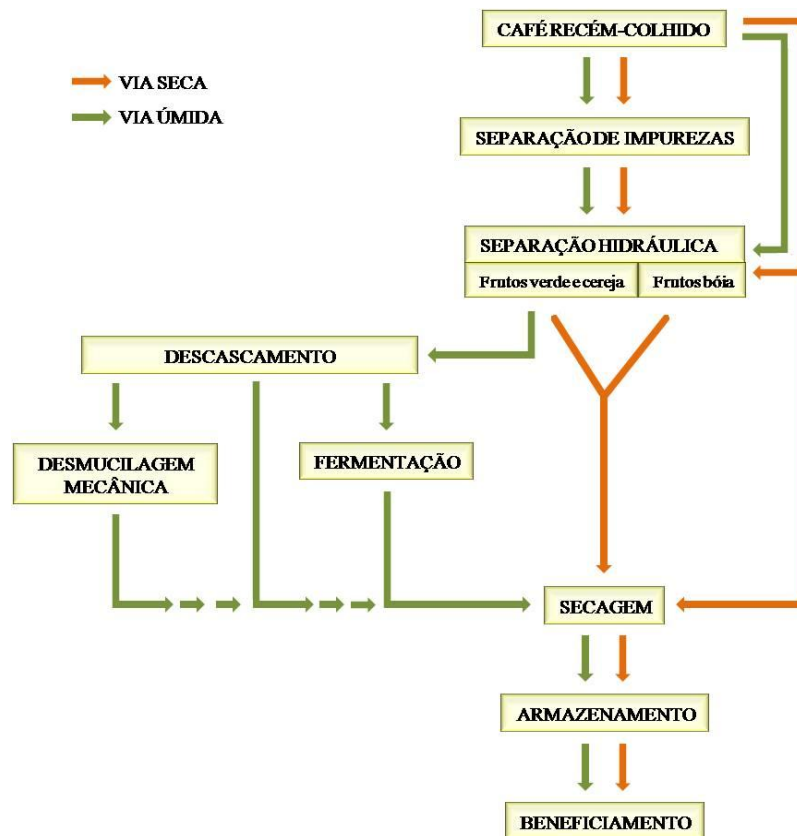


Figura 1. Esquema do processamento dos frutos do cafeeiro.

2.2.1 Processamento via seca

Na cafeicultura brasileira, mais de 90% do processamento dos frutos do cafeeiro se dá por via seca. Nesse processo, a qualidade do produto vai depender principalmente das condições climáticas da zona de produção, especialmente durante o período de colheita, e dos cuidados adotados durante a colheita e o beneficiamento do fruto colhido (PINTO, 2001; MATIELLO, 2005).

No processamento via seca, após a colheita, os frutos do cafeeiro são submetidos aos processos de separação de impurezas, que pode ser feito por peneiramento manual, ventilação forçada ou por máquinas de pré-limpeza, e separação hidráulica, em que a separação é feita de acordo com o estágio de maturação dos frutos, ou seja, pela diferença de massa específica, separando os cafés boias, que inclui os cafés secos, quase secos, supermaduros, brocados e mal formados, dos frutos cerejas e verdes (SILVA, 1995; BARTHOLO; GUIMARÃES, 1997). Segundo Borém (2008), além de manter o potencial de qualidade e higiene do fruto recém-colhido, o

procedimento de lavagem permite a remoção de materiais que não foram removidos na etapa anterior.

Após a separação das impurezas e lavagem, os frutos do cafeeiro podem ser levados para secagem, seja em terreiros, pré-secadores ou secadores mecânicos, sem a retirada da casca, resultando no café de terreiro, café em coco ou café natural. Completando o processo, os grãos de café são armazenados e beneficiados.

O fruto do cafeeiro processado por via seca pode apresentar baixa qualidade devido à ausência de cuidados na colheita e a presença concomitante de frutos verdes, brocados e fermentados. Além disso, a secagem mais lenta, originada pela presença da casca e pelo alto teor de açúcares da mucilagem, aumenta os riscos de fermentações que afetam a qualidade final do grão de café (BORÉM, 2008). Apesar disso, essa forma de processamento não gera resíduos líquidos, diferentemente do processamento via úmida, o que pode ser computado como fator positivo.

2.2.2 Processamento via úmida

Embora o processamento via seca seja o mais utilizado, o preparo via úmida tem sido considerado uma alternativa viável para obtenção de grãos de café com qualidade superior. Essa melhoria na qualidade deve-se à remoção da casca e da mucilagem, controle da fermentação e pela secagem cuidadosa dos grãos.

O processamento via úmida é iniciado de forma similar ao via seca, com a passagem dos frutos do cafeeiro pela separação de impurezas e separação hidráulica ou lavagem. Entretanto, no processamento via úmida, antes da secagem, os frutos são conduzidos a três processos distintos: (a) remoção mecânica da casca e parte da mucilagem, resultando em café cereja descascado; (b) remoção da casca mecanicamente e da mucilagem por meio de fermentação biológica, produzindo café despulpado ou; (c) remoção mecânica da casca e da mucilagem, produzindo o café desmucilado (SILVA, 1995; PINTO, 2001; BORÉM, 2008; LO MONACO *et al.*, 2009). Independente do processo adotado na via úmida, a operação de descascamento é comum a todos eles.

O descascamento é um procedimento mecânico baseado na diferença de resistência à pressão do fruto verde e do fruto cereja. Nessa etapa, os frutos cerejas, com mesocarpo gelatinoso, separam-se em duas sementes e passam, juntamente com a casca (exocarpo) e parte da mucilagem (mesocarpo) (Figura 2), através de peneiras de perfuração – café descascado. Já os frutos verdes, com mesocarpo ainda rígido, resistem à pressão, sendo transportados às laterais do equipamento (BORÉM, 2008).

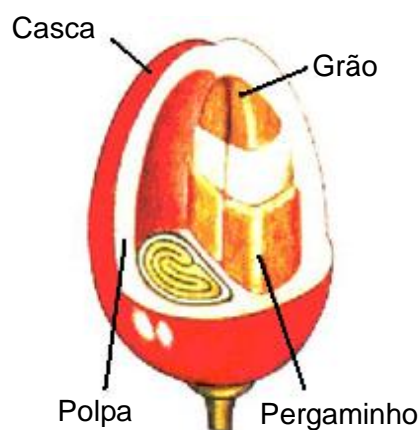


Figura 2. Estrutura do fruto do cafeeiro (Fonte: Lo Monaco, 2005).

Quando no processamento do fruto cereja está incluído o despulpamento, os frutos descascados são levados para tanques de fermentação, onde permanecem de 12 a 48 horas, dependendo das condições (altitude e temperatura) do local de processamento, obtendo-se o café despulpado (BORÉM, 2008).

A remoção da mucilagem pode ser feita de forma mecânica, logo após o processo de descascamento – café desmucilado, sendo que a remoção da mucilagem ocorre devido ao atrito entre os grãos e dos grãos com um cilindro metálico (LO MONACO, 2005; BORÉM, 2008). Uma das vantagens de se realizar a desmucilagem dos grãos de café é a obtenção de lotes homogêneos e de melhor qualidade, já que a retirada desse componente facilita o transporte e o revolvimento dos frutos no terreiro e diminui a incidência de fermentações indesejadas.

Após o descascamento e/ou o despulpamento e/ou a desmucilagem, os grãos de café são lavados e encaminhados ao terreiro para pré-secagem, completando-se o processo em secadores mecânicos (SILVA, 1995). Como

vantagem da secagem dos frutos dos cafeeiros por via úmida, tem-se a diminuição da área do terreiro, do volume do secador e do tempo necessário à secagem (PINTO, 2001).

Em suma, o processamento via úmida tem a vantagem de reduzir significativamente o consumo de energia, mão-de-obra e tamanho das instalações e equipamentos necessários nas etapas posteriores de secagem, armazenamento e beneficiamento do grão de café, além de permitir maior controle sobre a qualidade do produto, já que não existe a mistura do sabor mais adstringente fornecido pelos frutos verdes, em um lote de café cereja. Entretanto, apesar das inúmeras vantagens oferecidas pelo processamento via úmida, deve-se atentar às questões ambientais, já que, para sua execução são requeridos grandes volumes de águas “limpas”, além de ser responsável pela geração de grandes volumes de resíduos líquidos.

2.3 Resíduos provenientes do processamento dos frutos do cafeeiro

As operações de lavagem e descascamento/despolpa dos frutos do cafeeiro, imprescindíveis para agregar valor ao produto final e diminuir os gastos na secagem dos grãos, geram grandes volumes de águas residuárias (constituídas pelos efluentes gerados na lavagem dos tanques de fermentação, despoldadores e desmuciladores), ricas em material orgânico em suspensão e constituintes orgânicos e inorgânicos em solução, de grande poder poluente (BATISTA *et al.*, 2007; MATOS, 2008; LO MONACO *et al.*, 2009) além de grande quantidade de resíduos sólidos, como folhas, cascas, polpa, pergaminho, borra, etc. (MATOS; LO MONACO, 2003).

2.3.1 Caracterização da água residuária da lavagem e descascamento/despolpa dos frutos do cafeeiro

A água residuária da lavagem e descascamento/despolpa dos frutos do cafeeiro é, dentre todos os resíduos do processamento do fruto do cafeeiro, a que provoca maior impacto ambiental. Durante o processo de lavagem dos frutos do cafeeiro, é gerado 0,2 L de água residuária para cada litro de fruto processado, razão que depende do tamanho do tanque de

lavagem e do número de descargas efetuadas durante o dia para substituição da água. No descascamento/despolpa e desmucilagem dos frutos do cafeeiro gera-se em torno de 3 a 5 L de água para cada litro de fruto processado (MATOS, 2003), perfazendo uma média de 4 m³ de água para cada tonelada de grão processada (DELGADO; BAROIS, 1999). Entretanto, caso seja feita recirculação de água no processo, esta proporção pode diminuir para aproximadamente um litro para cada litro de fruto processado, reduzindo a quantidade de água de boa qualidade a ser captada em mananciais superficiais ou subterrâneos (MATOS *et al.*, 2007; CARVALHO *et al.*, 2008).

As águas residuárias do processamento dos frutos do cafeeiro são ricas em material orgânico e inorgânico e, de acordo com Zambrano e Isaza (1998), são compostas principalmente por carboidratos e açúcares (frutose, glicose e galactose), além de proteínas, polifenóis (ácidos clorogênico e caféico, taninos e cafeína) e pequenas quantidades de corantes naturais, do tipo das antocianinas.

Nas Tabelas 1 e 2 estão apresentadas as características físicas, químicas e bioquímicas das águas residuárias do processamento do fruto do cafeeiro geradas no processamento de duas espécies do gênero *coffea*: o *Coffea arabica* L. (Arábica) e o *Coffea canephora* Pierre (Conilon).

Tabela 1. Resultado das análises físicas, químicas e bioquímicas da água residuária da separação hidráulica (lavagem) dos frutos do cafeeiro

Fruto	Recirculação	Proporção água/fruto	pH	CE	SP	ST	SS	SD	SFT	SVT	DQO	DBO	N _T	P _T	K _T	Na _T
				dS m ⁻¹	mL L ⁻¹	mg L ⁻¹										
Conilon	Não	-	-	0,259	17	1069	380	689	390	679	1520	411	77	5	41	26
Arábica	Não	-	4,90	-	130	18134	6200	11934	3546	14588	-	-	-	-	-	-
Arábica	Sim/com diluição*	0,15:1	5,50	0,344	50	3255	867	2388	984	2271	5604	514	55	12	49	16
Arábica	Sim/com diluição*	0,15:1	5,50	0,599	80	5038	2430	2608	898	4140	6583	1887	75	15	77	23

Sendo: pH – potencial hidrogeniônico; CE – Condutividade elétrica; SP – Sólidos Sedimentáveis; ST – Sólidos Totais; SS – Sólidos em Suspensão; SD – Sólidos Dissolvidos; SFT – Sólidos Fixos Totais; SVT – Sólidos Voláteis Totais; DQO – Demanda Química de Oxigênio; DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio; N_T – Nitrogênio Total; P_T – Fósforo Total; K_T – Potássio Total; Na_T – Sódio Total.

*Diluição feita pela adição de água “limpa” sempre que as condições da água tornavam-se inadequadas para a continuidade da lavagem dos frutos.

Fonte: Matos (2008) e Rigueira *et al.* (2010).

Tabela 2. Resultados das análises físicas, químicas e bioquímicas da água residuária do descascamento/despolpa e desmucilagem dos frutos do cafeeiro

Fruto	Recirculação	Proporção água/fruto	pH	CE	SP	ST	SS	SD	SFT	SVT	DQO	DBO	N _T	P _T	K _T	Na _T
				dS m ⁻¹	mL L ⁻¹	mg L ⁻¹										
Conilon	Não	3:1	4,75	0,585	0	4889	850	4039	126	4763	5148	2525	106	9	115	45
Conilon	1	3:1	4,10	0,718	180	5504	1888	3616	706	4798	10667	3184	125	11	154	58
Conilon	2	1,8:1	4,10	0,992	330	6403	2336	4067	848	5555	11000	3374	160	14	205	77
Arábica	-	-	3,50- 5,20	0,55- 0,95	0-45	2100- 3700	-	-	370- 530	1800- 3200	3430- 8000	1840- 5000	120- 250	4- 10	315- 460	2-6
Arábica	1	-	-	-	-	14000- 18200	-	-	-	-	18600- 29500	10500- 14340	400	16	1140	17
Arábica	Sim/com diluição*	3:1	5,40	1,090	850	16507	2647	-	1406	15101	18680	6384	168	23	157	46
Arábica	Sim/com diluição*	1,8:1	5,30	0,800	900	14827	2780	-	1210	13617	18066	5006	163	22	157	58

*Diluição feita pela adição de água “limpa” sempre que as condições da água tornavam-se inadequadas para a continuidade descascamento/despolpa dos frutos.

Fonte: Matos (2008) e Rigueira *et al.* (2010).

Os altos valores de DBO e DQO apresentados na Tabela 1 indicam que as águas residuárias da lavagem e descascamento dos frutos do cafeeiro apresentam alta carga orgânica, assim como as provenientes do processo de descascamento/despolpa e desmucilagem (Tabela 2). Essas águas residuárias apresentam alta concentração de ST, dos quais a maior parte é composta por SVT, que em grande parte pode ser removido por tratamento biológico (LO MONACO *et al.*, 2003).

De maneira geral, a água residuária advinda do processamento dos frutos arábica apresenta maiores valores de ST, DQO, DBO, N_T, P_T e K_T que a gerada no processamento do café conilon. Essa diferença pode ser devida à estrutura dos grãos das duas espécies. Os frutos do café arábica possuem mesocarpo carnoso, já os frutos do café conilon possuem mesocarpo pouco aquoso (MELO *et al.*, 1998), o que confere aos primeiros maior capacidade de liberação de sólidos para a água, durante o processamento.

No processo de recirculação da água residuária para o processamento dos frutos do cafeeiro há redução no consumo de água e na geração de água residuária, entretanto, à medida que essa água vai sendo recirculada no sistema, suas características físicas e químicas são muito alteradas, havendo expressivo aumento na concentração de material suspenso e em solução (MATOS *et al.*, 2007). Essas alterações podem comprometer o desempenho das máquinas e a qualidade final do produto (RIGUEIRA *et al.*, 2010), sendo que essa água pode ser veiculadora de fungos e contaminantes que depreciem a qualidade dos grãos de café.

2.3.2 Impactos ambientais das águas residuárias geradas no processamento dos frutos do cafeeiro

Quando as águas residuárias do processamento dos frutos do cafeeiro são lançadas em corpos hídricos receptores, rapidamente formam-se zonas anóxicas, como resultado de sua estabilização anaeróbia, gerando, como subprodutos da degradação do material orgânico, metano, fenóis e ácido sulfídrico, os quais exalam odores desagradáveis (von SPERLING, 2005). Além disso, com o enriquecimento nutricional dessas águas, pode-se ocasionar a eutrofização, que é o desenvolvimento de vegetais (*Typha sp.*,

Eichornia crassipes, *Salvinia* sp., algas em geral etc.), prejudicando, assim, o ecossistema aquático.

O principal efeito da poluição orgânica em um corpo d'água receptor é a diminuição na concentração de oxigênio dissolvido, uma vez que os microorganismos aeróbios consomem o oxigênio dissolvido no meio para efetuar seus processos metabólicos, tornando possível a degradação do material orgânico presente no meio. A diminuição na concentração de oxigênio dissolvido na água pode ser fatal para biota aquática.

Dessa forma, em razão dos impactos que essa água pode proporcionar no ambiente, o seu lançamento, sem tratamento, em corpos hídricos receptores não é permitido, conforme a legislação ambiental vigente, tornando-se necessário tratá-las e dispô-las de modo adequado (MATOS; LO MONACO, 2003; BATISTA *et al.*, 2007).

De acordo com a Deliberação Normativa do COPAM/CERH n.º 01/2008, o efluente tratado deve possuir DBO inferior a 60 mg L^{-1} , ou que o sistema de tratamento utilizado tenha eficiência média anual igual ou superior a 85%; possuir DQO inferior a 180 mg L^{-1} , ou que o sistema de tratamento utilizado tenha eficiência média anual igual ou superior a 75%, desde que seu lançamento em cursos d'água receptores não venha a prejudicar a qualidade do mesmo de tal forma a exceder padrões estabelecidos para sua classe de enquadramento (MINAS GERAIS, 2008).

2.4 Tratamento da água residuária via aeração em cascata

A reaeração atmosférica é frequentemente o principal fator responsável pela introdução de oxigênio no meio líquido. A transferência de gases é um fenômeno físico por meio do qual há a troca de moléculas entre o líquido e o gás através de sua interface, desde que a fase líquida não esteja saturada com o gás. Esta transferência de oxigênio da fase gasosa para a fase líquida se dá, basicamente, por meio da difusão molecular e da difusão turbulenta.

Em corpos d'água lânticos, onde a massa líquida permanece praticamente parada, como por exemplo, em lagos onde o vento não é suficiente para promover maior mistura e renovação da interface, há

predomínio da difusão molecular. Este mecanismo é bastante lento e requer um longo tempo para que um gás atinja as camadas mais profundas do corpo d'água.

O mecanismo da difusão turbulenta é mais eficiente, pois promove a criação e a renovação das interfaces líquido-gás. Esta é a forma de difusão predominante em um rio de baixa profundidade, com corredeiras e que também pode ser encontrada nas cascatas de aeração (MORENO *et al.*, 2003).

Cascatas de aeração são unidades, normalmente localizadas a jusante das estações de tratamento de efluentes, que visam à elevação da concentração de oxigênio dissolvido, antes do seu lançamento em curso d'água receptor (von SPERLING, 2002a; MAGALHÃES *et al.*, 2003). Esse sistema é vantajoso por apresentar baixo custo de instalação e operação, e por aproveitar a topografia acidentada (desnível) do local de sua implementação.

O princípio da aeração em cascatas consiste na utilização da energia potencial gravitacional da água, proporcionando a criação de interfaces de exposição por meio da qual pode-se obter eficiente transferência de gases (METCALF; EDDY, 2003). De acordo com von Sperling (2002a), quando a água passa pelo degrau, dois diferentes mecanismos de transferência de gases podem ocorrer: o primeiro relaciona-se com a exposição da água ao ar circundante e que ocorre durante a queda livre e o segundo diz respeito à exposição do ar à massa d'água, sendo sua ocorrência devida à submersão do fluxo na massa líquida situada na base da queda d'água. Esses mecanismos possibilitam que significativas quantidades de ar sejam incorporadas ao líquido e, assim, dispersas na forma de bolhas pela massa líquida, gerando intensa transferência de gases. Segundo o mesmo autor, a quantidade de ar incorporada por meio do segundo mecanismo depende primariamente da velocidade do jato ao passar pela superfície da massa d'água e, conseqüentemente, a transferência gasosa é substancialmente determinada pela altura de queda, de uma forma muito mais significativa que no primeiro mecanismo mencionado. Generalizando, pode-se dizer que o primeiro mecanismo é eficiente para o desprendimento de gases e o segundo, para a incorporação dos mesmos.

Grande parte da incorporação de oxigênio é também proporcionada pelo choque dos jatos d'água contra obstáculos, permitindo a subdivisão da massa líquida em queda, aumentando, por conseguinte, a área de exposição. Dessa forma, se a água não cair livremente, mas descer aderida à face da queda d'água ou cascata, a reaeração é expressivamente reduzida (von SPERLING, 2002a).

A construção de tanques de oxidação ao final de cada lance de escadas pode conferir tempo de detenção suficiente para que ocorra eficiente uso do oxigênio pelos micro-organismos, além de permitir a reincorporação de mais oxigênio à ARC, a cada lance de escoamento da água residuária. Dessa forma, o maior aproveitamento da massa de gás incorporada em lances sucessivos da cascata possibilita que se obtenha melhoria na eficiência desse sistema.

Na Tabela 3 estão apresentadas as dimensões dos degraus e as taxas de aplicação recomendadas por Metcalf e Eddy (2003) em cascatas de aeração utilizadas no tratamento de água. Darto Filho e Souza (1997) conseguiram incorporar, em média, $4,28 \text{ mg L}^{-1}$ de oxigênio dissolvido ao esgoto doméstico após o mesmo passar pelo sistema de aeração em cascata com 25 degraus, altura de queda de 3,75 m, sendo a altura, largura e comprimento de cada degrau de 0,15; 0,50 e 0,20 m, respectivamente. Além do aumento na concentração de oxigênio dissolvido, os mesmos autores verificaram que houve ligeiro aumento no pH e diminuição na concentração de sulfeto. Segundo Matos (2007), citando informações apresentadas por outros autores, o sistema de aeração em cascata, com 109 degraus, utilizado no tratamento do esgoto doméstico, apresentou eficiências de 64% e 44% na remoção da DBO e SP, respectivamente. Além disso, o mesmo autor citou que cada degrau de 0,25 m de altura incorporou até $1,72 \text{ mg L}^{-1}$ de oxigênio dissolvido na água residuária.

Tabela 3. Recomendações de taxas de aplicação e dimensões dos degraus em cascatas de aeração

Variável	Unidade	Faixa
Taxa de aplicação	$m^3 m^{-1} d^{-1}$	1240 a 6200
Dimensões dos degraus		
Altura	m	0,15 a 0,30
Comprimento	m	0,30 a 0,60
Altura da cascata	m	2 a 5

Fonte: Metcalf e Eddy (2003).

A concentração de oxigênio dissolvido na ARC efluente de um sistema de cascata pode ser estimada com base no conhecimento do coeficiente de transferência de gases, denominado no caso da aeração por gravidade, de coeficiente de eficiência (K) (von SPERLING, 2002a), o qual deve ser obtido para ser utilizado no dimensionamento desses sistemas.

Algumas fórmulas empíricas têm sido utilizadas para determinação de K como função da altura de queda e de outras condições, como as apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4. Equações propostas para determinação do coeficiente de eficiência (K) para aeração por gravidade em vertedores e degraus

Autor	Coeficiente K	Coeficientes da equação
Barret, Gameson e Ogden	$K=P.(1+0,046.T).H$	P = 0,45 (água limpa) P = 0,36 (água poluída) P = 0,29 (esgoto) R = 0,40
Kroon e Schram	$K=R.H$	R = 0,64 (no caso de vertedores com mais de 4 jatos por metro linear, e quedas inferiores a 0,70 m)
Pomeroy	$K=1-e^{-F.H}$	F = 0,53 m^{-1} (água limpa sobre vertedores e comportas) F = 0,41 m^{-1} (água ligeiramente poluída, em vertedores) F = 0,28 m^{-1} (efluentes de tratamento, em vertedores)

H - altura de cada queda livre (m); T - temperatura do líquido ($^{\circ}C$).Fonte: von Sperling (1983).

De acordo com a Equação 1, tendo-se o valor de K para a queda d'água, a concentração efluente pode ser estimada para distintas condições de saturação e concentração afluenta de oxigênio dissolvido (von SPERLING, 2002a).

$$C_e = C_o + [K \times (C_s - C_o)] \quad (1)$$

em que,

C_e = concentração de oxigênio dissolvido no efluente (jusante), mg L^{-1} ;

C_o = concentração de oxigênio dissolvido no afluente (montante), mg L^{-1} ;

C_s = concentração de saturação de oxigênio dissolvido, mg L^{-1} ;

K = coeficiente de eficiência, adimensional.

Em uma queda d'água, o coeficiente K pode ser obtido por meio de rearranjo da Equação 1, conforme apresentado na Equação 2.

$$K = \frac{C_e - C_o}{C_s - C_o} \quad (2)$$

Na Figura 3 está a representação gráfica conceitual da Equação 1, no qual obtém-se o valor de C_e a partir de K e das concentrações C_o e C_s . Nessa figura, fica ressaltada a grande influência do déficit de oxigênio ($C_s - C_o$) no acréscimo da concentração de oxigênio. Para o caso em que $C_o = 0$, o acréscimo na concentração de oxigênio será $C_e = K.C_s$. Portanto, com o K estabelece-se a fração da concentração de saturação que será obtida ao se aerar uma água totalmente livre de oxigênio. Em condições estáveis do sistema, o valor de K será sempre menor que 1,0. Observa-se, também, que quanto mais próxima estiver a concentração afluente C_o de C_s , menor será o déficit de oxigênio e, portanto, menor o acréscimo na concentração de oxigênio ($C_e - C_o$) (von SPERLING, 2002a).

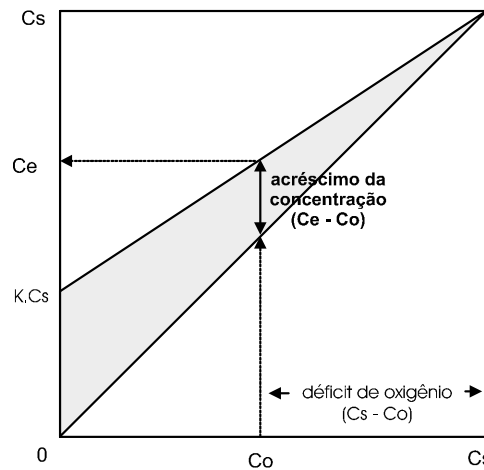


Figura 3. Estimativa do acréscimo na concentração de oxigênio dissolvido no meio, por efeito da aeração (Fonte: von Sperling, 2002a).

Estudos relativos ao sistema de aeração em cascatas tornam-se necessários, tendo em vista que os processos envolvidos precisam ser melhor compreendidos para que se possa otimizar sua utilização no tratamento de águas residuárias, dentre elas, da ARC.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Local de instalação e operação do sistema

O experimento foi implantado e conduzido na Área Experimental de Tratamentos de Resíduos do Departamento de Engenharia Agrícola, da Universidade Federal de Viçosa – DEA/UFV, em Viçosa, Minas Gerais, tendo como coordenadas geográficas: latitude 20° 46' 24" S, longitude 42° 52' 21" W e altitude de 662 m.

3.2 Água residuária

A ARC utilizada no experimento foi proveniente do Sítio Jatobá, propriedade agrícola situada a 12 km da cidade de Viçosa. O consumo médio de água no local é de 2,5 L L⁻¹ de grãos processados, pois há recirculação de água no processo. Os grãos eram lavados e descascados/despolidos, tendo parte da polpa removida. A ARC era transportada para a Área Experimental de Tratamentos de Resíduos do DEA/UFV a cada 10 dias por meio de um carro-pipa. Durante os 30 dias de operação do sistema de tratamento, foram utilizadas três diferentes amostras de ARC (coletadas em diferentes épocas do processamento dos frutos do cafeeiro), e a cada 10 dias as mesmas eram trocadas no sistema em avaliação. A 1ª, 2ª e 3ª amostras de ARC foram coletadas, respectivamente, entre 18/05/2010 e 27/05/2010, 28/05/2010 e 06/06/2010 e 07/06/2010 e 16/07/2010.

As variações nas principais características da ARC ao longo de todo período experimental estão apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5. Valores das principais características da ARC afluyente utilizada no experimento

Variáveis	Unidade	Valores			
		1ª ARC	2ª ARC	3ª ARC	Média
pH		3,4	4,3	3,8	3,9 ± 0,5
T	°C	21,5	19,5	19,0	20,0 ± 1,3
CE	dS m ⁻¹	0,06	0,14	0,10	0,11 ± 0,05
OD	mg L ⁻¹	0	0	0	0
DQO	mg L ⁻¹	9345	20858	12409	14204 ± 5962
DBO	mg L ⁻¹	3860	6727	3979	4855 ± 1622
ST	mg L ⁻¹	4626	14564	17329	12173± 6681
SVT	mg L ⁻¹	3965	12305	16306	10859 ± 6296
SFT	mg L ⁻¹	661	2259	1023	1314 ± 838
SST	mg L ⁻¹	214	860	648	574 ± 329
SSV	mg L ⁻¹	188	770	618	525 ± 302
SSF	mg L ⁻¹	26	90	30	48,7 ± 35,9
SP	mL L ⁻¹	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
CF	mg L ⁻¹	60,7	309,8	133,8	168 ± 128
Na _T	mg L ⁻¹	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
P _T	mg L ⁻¹	24,3	53,0	21,0	32,7 ± 17,6
K _T	mg L ⁻¹	248	922	605	591 ± 337
N _T	mg L ⁻¹	57,1	278,5	134,2	157 ± 112

Sendo: pH - potencial hidrogeniônico; T - temperatura; CE - condutividade elétrica; OD - oxigênio dissolvido; DQO - demanda química de oxigênio; DBO - demanda bioquímica de oxigênio; ST - sólidos totais; SVT - sólidos voláteis totais; SFT - sólidos fixos totais; SST - sólidos suspensos totais; SSV - sólidos suspensos voláteis; SSF - sólidos suspensos fixos; SP - sólidos sedimentáveis; CF - compostos fenólicos; Na_T - sódio total; P_T - fósforo total; K_T - potássio total; N_T - nitrogênio total; N.D: não detectado.

3.3 Sistema de aeração em cascatas

O sistema de aeração em cascatas foi instalado em um talude de 30° de inclinação, aproveitando-se uma diferença de nível de 4,14 m do terreno (Figura 4).



Figura 4. Vista geral do sistema de aeração em cascata.

A cascata foi composta de 23 degraus, com altura, largura e comprimento de 0,18; 0,32 e 0,60 m, respectivamente, e construída em concreto armado no traço 1:2:4 (cimento:areia:brita) (Figura 5). Nas laterais da cascata foram colocadas alvenaria em blocos de concreto, com altura, largura e comprimento de 0,18; 0,12 e 0,40 m, respectivamente, para evitar o escape lateral (perda) da ARC do sistema.

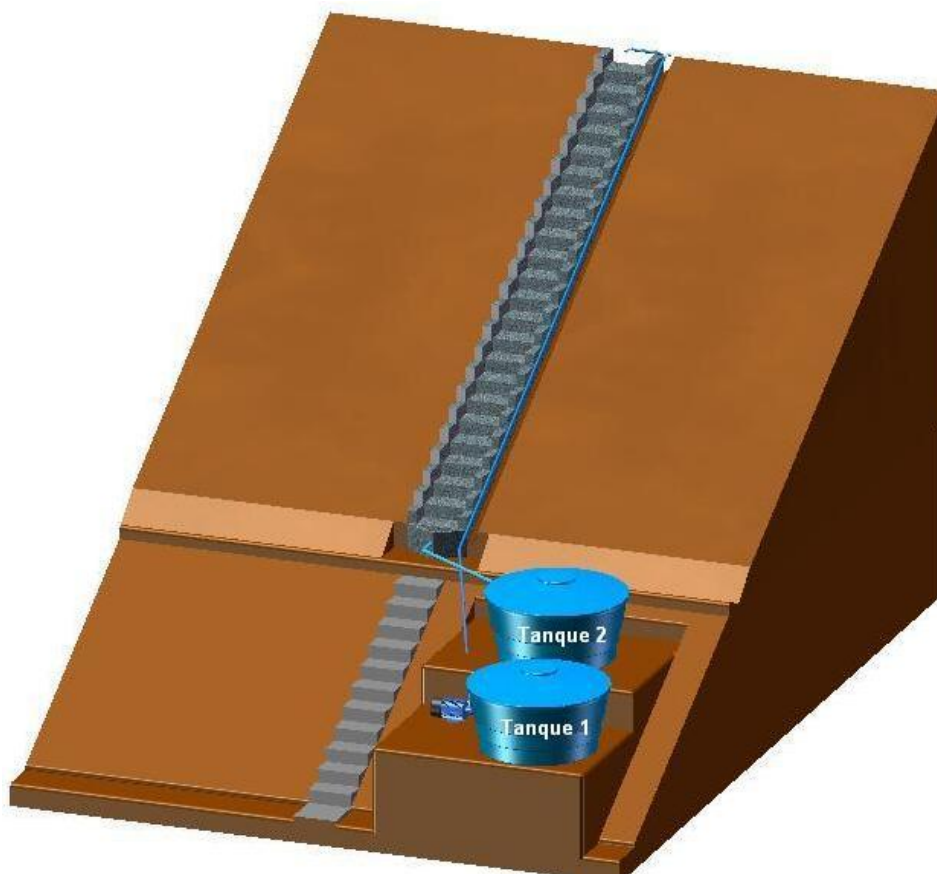


Figura 5. Esquema do sistema de tratamento por aeração em cascatas, com destaque para os Tanque 1, de recirculação, e Tanque 2 de recepção/detenção da ARC.

No final da cascata, foi instalado um Tanque 2, denominado “tanque de recepção/detenção”, com capacidade volumétrica de 2 m^3 , que recebia a ARC escoada na escada e que era coletada utilizando-se um tubo de PVC de 40 mm. Na parte inferior do tanque de recepção/detenção, foi instalado um registro de 40 mm, para controle da passagem da ARC de um tanque para o outro e que se obtivesse um tempo de detenção de 3 horas antes da ARC vinda da cascata passar para o Tanque 1, denominado “tanque de recirculação”. Após passar para o tanque de recirculação, a ARC era bombeada desse tanque para o topo da cascata, utilizando-se, para isso, um conjunto moto bomba com potência de 1 cv. A recirculação da ARC na cascata foi realizada 3 vezes ao dia, às 7, 10 e 13 horas, sob vazão constante de 1 L s^{-1} (Figura 6).



Figura 6. Detalhe do sistema em operação, por ocasião da recirculação da ARC na cascata.

A troca da ARC foi feita 3 vezes durante a operação do sistema, sendo realizada a cada 10 dias. O sistema funcionou de 18/05 a 16/06 de 2010.

3.4 Variáveis monitoradas na ARC tratada no sistema de aeração em cascatas

Durante a fase de experimentação, foram coletadas amostras de ARC afluyente (tanque de recirculação) e efluente (tanque de recepção/detenção), a cada troca da ARC. Nessas amostras, foram realizadas as seguintes análises: oxigênio dissolvido (OD) e demanda bioquímica de oxigênio (DBO), pelo método iodométrico (processo Winkler); demanda química de oxigênio (DQO), pelo método de oxidação química em refluxo aberto; sólidos totais

(ST), sólidos fixos totais (SFT), sólidos voláteis totais (SVT), sólidos suspensos totais (SST), sólidos suspensos fixos (SSF), sólidos suspensos voláteis (SSV) pelo método gravimétrico; sólidos sedimentáveis (SP), pelo cone Imhoff; sódio total (Na_T) e potássio total (K_T), por fotometria de chama; fósforo total (P_T), por espectrofotometria; condutividade elétrica (CE), por condutivímetro de banca; potencial hidrogeniônico (pH), por peagâmetro de bancada; temperatura (T), por meio de termômetro de mercúrio, em conformidade com recomendações do *Standard Methods for the Examination Water and Wastewater* (APHA, 2005). O nitrogênio total (N_T) foi quantificado utilizando-se o método semimicro Kjeldahl com adição de ácido salicílico, adaptado de Kiehl (1985), e os compostos fenólicos (CF) seguiu-se a metodologia proposta por Folin e Ciocalteu (1927).

Em cada recirculação, foram coletadas amostras da escada a cada 1; 2; 3; 4 m de desnível, bem como nos tanques de recepção/detenção e de recirculação, para avaliação da DQO, OD, T e DBO, sendo esta última análise realizada a cada 3 dias, na terceira recirculação de cada dia.

A concentração de OD foi monitorada no tanque de recepção/detenção (local de repouso do efluente da cascata), obtendo-se assim o modelo de seu decaimento com o tempo.

O K da cascata foi obtido conforme apresentado na Equação 2, utilizando-se a média das concentrações afluentes (C_o), efluentes (C_e) e de saturação de oxigênio com a altitude corrigida (C_s').

Para o cálculo da concentração de saturação de oxigênio dissolvido utilizou-se a Equação 3, que fornece diretamente seu valor em função da temperatura da ARC (PÖPEL, 1979).

$$C_s = 14,652 - (4,1022 \times 10^{-1} \times T) + (7,9910 \times 10^{-3} \times T^2) - (7,7774 \times 10^{-5} \times T^3) \quad (3)$$

em que,

T = temperatura do líquido, °C.

A influência da altitude sobre a concentração de saturação de oxigênio dissolvido foi calculada de acordo com a Equação 4 (QASIM, 1985).

$$C_s' = C_s \times \left(1 - \frac{A}{9450} \right) \quad (4)$$

em que,

C_s' = concentração de saturação de oxigênio dissolvido com a altitude corrigida, mg L⁻¹;

A = altitude, m.

Depois de realizadas as correções, a porcentagem de saturação de oxigênio (PSO) foi calculada conforme a Equação 5.

$$PSO (\%) = \frac{OD}{C_s'} \times 100 \quad (5)$$

3.5 Análise estatística dos dados

O experimento foi instalado seguindo um delineamento em blocos casualizados, esquema de parcelas subdivididas no tempo, consistindo de 3 blocos (3 ARCs). Em relação à variável DBO, foram avaliados 6 tratamentos principais (locais de coleta da ARC) e 4 tratamentos secundários (tempo de recirculação da ARC: 0, 3, 6 e 9 dias), totalizando 72 unidades experimentais. No que se refere à variável DQO, foram avaliados 6 tratamentos principais (locais de coleta da ARC) e 10 tratamentos secundários (tempo de recirculação: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 9 dias), totalizando 180 unidades experimentais. As unidades experimentais foram as amostras coletadas em cada dia, nos pontos pré-estabelecidos.

Os dados foram submetidos à análise de variância por meio do teste F. As médias dos tratamentos principais foram comparadas pelo teste Duncan. O efeito dos tratamentos secundários (tempo) sobre as variáveis DBO e DQO foi estudado por meio de regressão. Na escolha do melhor modelo de regressão, adotaram-se os seguintes critérios: regressão significativa, ajuste não significativo e maior valor de coeficiente de determinação (R^2). As análises de estatística foram realizadas com o auxílio dos aplicativos Excel 2010, GENES 4.1 (CRUZ, 2006) e SigmaPlot 11.0.

Para estudar o decaimento da concentração de OD em função do tempo no tanque de recepção/detenção, um experimento a parte foi realizado em um delineamento inteiramente casualizado com 6 repetições e 15 tratamentos (0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28 minutos). As unidades experimentais foram as alíquotas de ARC amostradas a cada 2 minutos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização da água residuária da lavagem e descascamento/despolpa dos frutos do cafeeiro

A ARC apresentou elevada carga orgânica; pH reduzido; elevada concentração de CF, que são inibidores da atividade microbiana, e elevadas concentrações de potássio, conforme está apresentado na Tabela 5. Esses altos valores encontrados na ARC podem ser atribuídos à recirculação da água no processamento dos frutos do cafeeiro, tendo em vista que, quando isso é feito, a concentração de poluentes aumenta (MATOS, 2008).

Conforme pode ser observado na Tabela 5, a relação DQO/DBO média da ARC afluyente foi igual a 2,9, resultado idêntico ao encontrado por Rigueira *et al.* (2010). Para que um resíduo seja considerado facilmente biodegradável a relação DQO/DBO deve ser menor que 2 (BRAILE; CAVALCANTE, 1993), entretanto, Matos (2007) cita que os tratamentos biológicos são indicados quando a razão DQO/DBO é menor que 3. von Sperling (2005) recomenda que, para se indicar um tratamento biológico, a relação DQO/DBO tem que ser menor que 2,5, embora considere que se a razão superar 4,0, existe a possibilidade de se indicar um tratamento físico-químico.

A razão DBO:N_T:P_T média foi de 149:5:1. Este desequilíbrio nutricional pode ser fator limitante para a biodegradação do material orgânico presente na ARC, pois segundo Jordão e Pessôa (2009) a relação DBO:N_T:P_T ideal para o tratamento biológico de águas residuárias é de 100:5:1. A adição de nutrientes (nitrogênio e fósforo) à ARC é recomendável, visando-se a correção de seu déficit nutricional e, assim, o aumento na eficiência dos micro-organismos em degradar o material orgânico presente.

4.2 Condições do ambiente

A precipitação, a temperatura média ambiente e a temperatura média da ARC, monitoradas durante o período de condução do experimento, estão apresentadas na Figura 7.

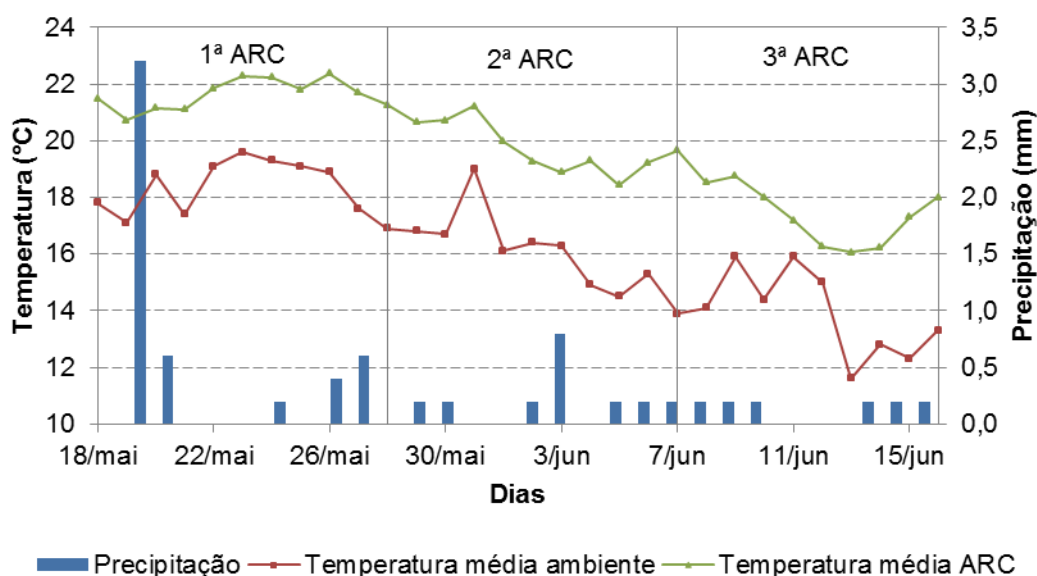


Figura 7. Variações da precipitação, temperatura média ambiente e temperatura média da ARC ocorrida durante o período de condução do experimento.

A temperatura da ARC esteve baixa, menor que 22,5 °C durante todo o período experimental, tendo sido verificado decréscimo mais acentuado com a entrada do período de inverno, ocasião em que a temperatura ficou abaixo de 20 °C.

Sabe-se que a temperatura da água residuária pode afetar o desempenho do tratamento em sistema de aeração em cascatas. Enquanto a concentração de OD diminui com o aumento da temperatura, a atividade dos micro-organismos cresce com seu aumento (von SPERLING, 2005; JORDÃO; PESSÔA, 2009), em função disso, depende-se que com a redução da temperatura, a incorporação e manutenção de oxigênio na massa líquida seja maior.

Fia *et al.* (2007) encontraram um coeficiente de desoxigenação da ARC bruta de 0,02 dia⁻¹, em condições anóxicas, e de 0,19 dia⁻¹ para ARC, com a relação DBO:N_T:P_T corrigida em 100:5:1, em ambiente aeróbio.

Baixos valores desse coeficiente indicam degradação lenta, estando relacionados com o tipo de material orgânico presente em suspensão, presença de substâncias inibidoras e com a temperatura do líquido (von SPERLING, 2005). Segundo a EPA (1987), um acréscimo de 1 °C na temperatura da água, faz com que esse coeficiente tenha seu valor aumentado em 4,7%, aumentando a taxa de metabolismo microbiano.

Durante toda a fase experimental, a precipitação total registrada foi de 8,2 mm, não proporcionando influência mensurável nos resultados experimentais.

4.3 Desempenho do sistema de aeração em cascata

4.3.1 Alteração no potencial hidrogeniônico e na condutividade elétrica da ARC

Na Figura 8 está apresentada a caracterização média das três amostras de ARC utilizadas, em relação às variáveis pH e CE, monitoradas durante o período de condução do experimento.

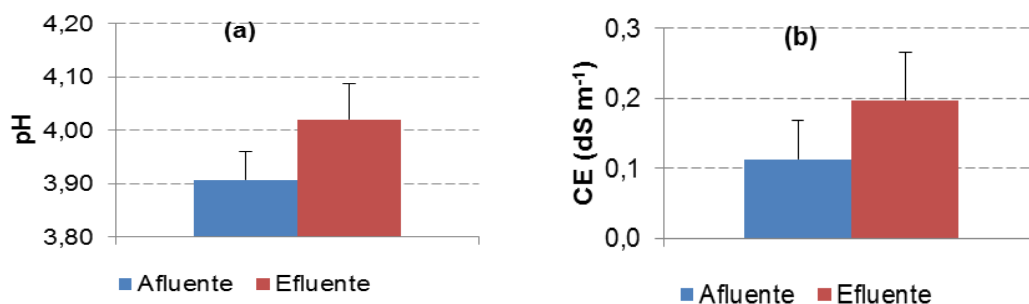


Figura 8. Valores médios de pH (a) e CE (b) na ARC, obtidos durante o período de condução do experimento.

Verificou-se elevação no pH efluente, o que pode estar associado à liberação de cátions em solução, decorrente da degradação da matéria orgânica contida na ARC, os quais proporcionam um abaixamento na atividade dos íons H⁺ no meio.

Em média, o pH da ARC afluente encontrava-se em 3,90, abaixo da faixa de 4,0 a 9,5 citada por von Sperling (2002b) como ideal para

sobrevivência das bactérias responsáveis pela degradação do material orgânico. O pH tem influência em muitas transformações bioquímicas, visto que altera o equilíbrio das formas de ácidos orgânicos e bases ionizadas e não ionizadas, além de controlar a solubilidade de muitos gases e sólidos (HUSSAR, 2001). O fato de a ARC apresentar baixo pH é fator que contribui para que se obtenha baixa biodegradabilidade do material orgânico que ela possui.

O valor de CE efluente foi superior ao afluente devido à degradação da matéria orgânica presente na ARC, que faz com que íons sejam liberados para a solução, e, além disso, existe a perda de água por evaporação ao passar pela cascata, acarretando num aumento da concentração iônica do líquido.

O aumento nos valores de CE, que estão associados a aumento na concentração iônica em solução, dificulta a retenção de oxigênio na massa líquida (von SPERLING, 2005), o que pode ter proporcionado diminuição na eficiência do sistema de cascata.

4.3.2 Incorporação de oxigênio dissolvido

Na Figura 9 estão apresentadas a variação média da concentração de OD (a) e a variação da PSO (b) nas três amostras da ARC em tratamento no sistema de cascata, obtidas com base na análise de amostras coletadas durante o período de condução do experimento, nos locais pré-determinados.

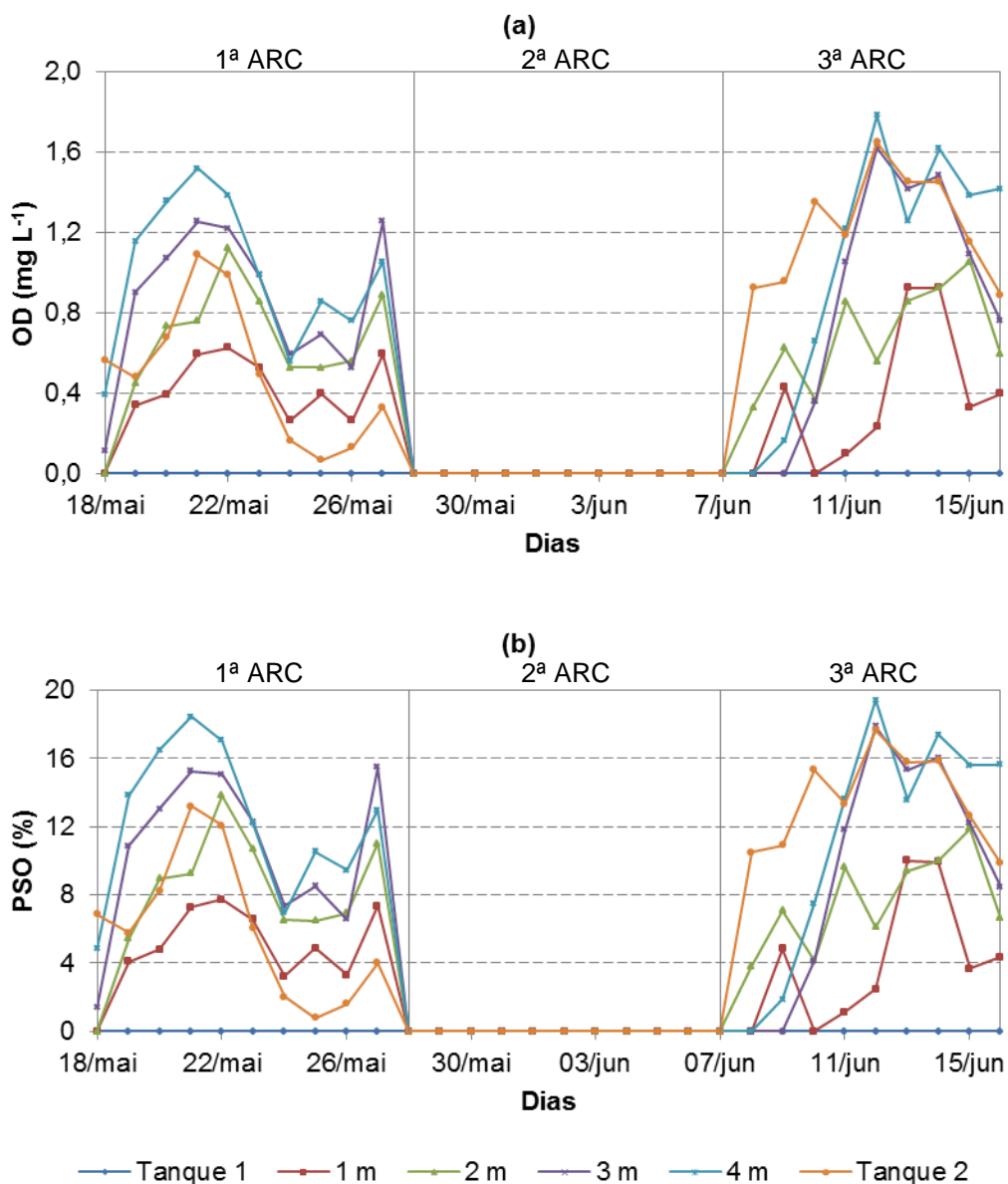


Figura 9. (a) Incorporação média de OD e (b) PSO na cascata de aeração e nos tanques.

Houve incorporação de OD por meio da cascata de aeração quando se utilizou as 1ª e 3ª amostras de ARC, o que não foi observado quando foi utilizada a 2ª amostra de ARC. Analisando-se os dados apresentados na Tabela 5, verifica-se que a 2ª amostra de ARC foi a que apresentava maiores concentrações de DBO e DQO, além de maior CE. Acredita-se que o oxigênio incorporado nessa água residuária tenha sido muito rapidamente consumido pelos micro-organismos, o que impossibilitou a ocorrência de alterações na sua concentração de OD. Além disso, é possível que a maior CE (salinidade) da água residuária possa ter dificultado a manutenção do

oxigênio incorporado no meio líquido, uma vez que é um dos fatores que dificulta esse processo.

Nas 1ª e 3ª amostras de ARC, houve uma incorporação média de 0,2 mg L⁻¹ de OD a cada 1 m de desnível na cascata, sendo que a 4 m de desnível, foi possível a incorporação de até 1,8 mg L⁻¹ de OD na ARC. Não houve incorporação de OD à ARC no tanque de recepção/detenção porque antes de haver a transferência da água residuária para esse tanque, ela ficava por 3 horas no tanque de recirculação, local no qual os micro-organismos aeróbios consumiam todo o OD presente no meio.

A incorporação de OD obtida neste trabalho foi menor que a obtida por Darto Filho e Souza (1997) que conseguiram incorporar, em média, 4,28 mg L⁻¹ de OD ao esgoto doméstico, após o mesmo ter passado pelo sistema de aeração em cascata contendo 25 degraus, altura de queda de 3,75 m, sendo a altura, largura e comprimento de cada degrau de 0,15; 0,50 e 0,20 m, respectivamente. Considerando-se que o esgoto doméstico apresenta menores concentrações de material orgânico e de sais, torna-se compreensível a maior facilidade que a cascata utilizada pelos referidos autores teve para incorporar e manter oxigênio na massa líquida.

A PSO máxima alcançada foi de 19,4% (Figura 9) no desnível de 4 m quando tratada a amostra da 3ª ARC, pois nesse dia (12/06) a ARC apresentou a menor temperatura em relação à toda a fase experimental (Figura 7).

A cascata de aeração apresentou um valor de K de 0,078, o que indica que, em média, a cada recirculação da ARC conseguiu-se atingir 7,8% da concentração de saturação de oxigênio dissolvido. Conforme já foi referido, essa baixa capacidade da cascata em oxigenar a ARC pode estar relacionada ao rápido consumo do oxigênio incorporado à massa líquida.

4.3.3 Decaimento de oxigênio dissolvido no tanque de recepção/detenção

Na Tabela 6 está apresentado o resumo da análise de regressão para o decaimento de OD em função do tempo no tanque de recepção/detenção.

Tabela 6. Resumo da análise de regressão para o decaimento do OD no tanque de recepção/detenção em função do tempo

Fonte de Variação	GL	Quadrados médios	R ² (SQreg/SQTrat)
(Trat) Linear	1	4,07813**	0,7361
(Trat) Quadrático	1	1,05043**	0,9257
(Trat) Cúbico	1	0,31015*	0,9817
Desvios	11	0,00922 ^{NS}	---
Tempo (t)	14	0,39573	---
Resíduo	75	0,06910	---

^{NS}, * e **: não significativo, significativo a 5% e a 1% de probabilidade pelo teste F, respectivamente.

Todos os modelos apresentados na Tabela 6 foram significativos, no entanto, não estão adequados para explicar o decaimento do oxigênio dissolvido no tanque de recepção/detenção. Desta forma, ajustou-se um modelo exponencial ($Y = ae^{-bx} + \varepsilon$).

Na Figura 10 está apresentada a curva ajustada para o decaimento do OD no tanque de recepção/detenção em função do tempo.

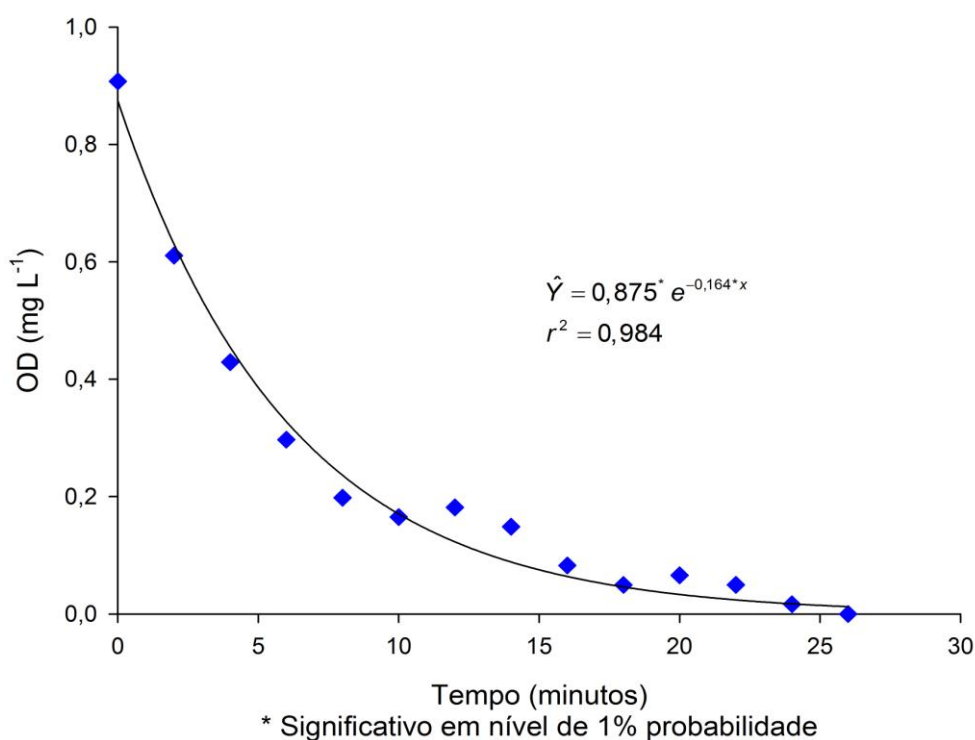


Figura 10. Decaimento médio de OD no tanque de recepção/detenção em função do tempo.

Conforme mostrado na Figura 10, a ARC apresentou um coeficiente de decaimento de OD de $0,164 \text{ minutos}^{-1}$ no tanque de recepção/detenção. Esse alto decaimento de OD foi devido ao rápido consumo por parte dos micro-organismos aeróbios para degradação do material orgânico presente no meio e devida à perda de oxigênio da massa líquida para atmosfera.

O OD, incorporado na cascata de aeração, demorou cerca de 26 minutos para ser totalmente consumido pelos micro-organismos aeróbios presente no meio, conforme observado. A rapidez com que o OD foi consumido, após sua incorporação à ARC, corrobora a discussão de que a sua não detecção em águas contendo altas concentrações de material orgânico tratadas em cascatas se prende ao fato de que todo o oxigênio é rapidamente consumido no meio.

4.3.4 Remoção de matéria orgânica

Na Tabela 7 está apresentado o resumo da análise de variância para DBO e DQO e o resumo da análise de regressão do tempo sobre as mesmas variáveis.

Tabela 7. Resumo da análise de variância relativa à DBO e DQO e resumo da análise de regressão dos modelos matemáticos de relação entre essas variáveis e o tempo

Fonte de variação	DBO		DQO	
	GL	Quadrados médios	GL	Quadrados médios
Bloco	2	71935741,43	2	1583678298,57
Amostra (A)	5	477160,14 ^{NS}	5	417120,96 ^{***}
Resíduo (a)	10	385443,11	10	214212,29
Tempo (t)	3	2207299,42 ^{**}	9	41418850,82 [*]
Interação A x t	15	332237,51 ^{NS}	45	208503,92 ^{NS}
Resíduo (b)	36	578265,92	108	1327314,78
CV resíduo (a)	13,89 %		3,89 %	
CV resíduo (b)	17,0 %		9,69 %	
(Trat) Linear	1	3283507,36 ^{NS}	1	346634211,89 [*]
(Trat) Quadrático	1	446611,41 ^{NS}	1	403709,01 ^{NS}
(Trat) Cúbico	1	2893323,57 ^{NS}	1	7381458,39 ^{NS}
Desvios	---	---	6	3058379,69 ^{NS}

^{NS}, *, ** e ***: não significativo, significativo a 1, 5 e 10% de probabilidade pelo teste F, respectivamente.

Conforme apresentado na Tabela 7, é possível verificar que não houve efeito significativo para interação local de amostragem e tempo de coleta das amostras de ARC, no que se refere a ambas as variáveis (DBO e DQO), ou seja, os fatores estão atuando independentemente. Em relação à variável DBO, apenas o fator isolado tempo de coleta foi significativo, indicando que para qualquer local de coleta, houve uma variação expressiva na DBO em função do tempo. Neste caso, os modelos lineares de regressão até o 3º grau não se ajustaram aos dados, assim como o modelo não linear ($Y = ae^{-bx} + \varepsilon$), o qual é o mais utilizado para avaliação do decaimento da DBO em função do tempo.

No que se refere à variável DQO, ambos os fatores (local de amostragem e tempo) tiveram efeito significativo em nível de 10% de

probabilidade, pelo teste F. Na Tabela 8 estão apresentadas as comparações dos locais de amostragem em relação à variável DQO.

Tabela 8. Comparações das médias das amostras (locais de coleta) para DQO

Amostra	Nº Dados	Médias
Tanque de recirculação	30	11764,16 b
Tanque de recepção/detenção	30	12103,58 a
1 m	30	11867,63 ab
2 m	30	11869,29 ab
3 m	30	11831,75 ab
4 m	30	11825,85 ab

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Duncan em nível de 5% de probabilidade.

De acordo com o que está apresentado na Tabela 8, pode-se observar que existe diferença significativa nos valores de DQO, quando comparado o que foi obtido nas amostras coletadas nos dois tanques. Neste caso, pelo teste de Duncan, em nível de 5% de probabilidade, a maior DQO ocorreu nas amostras coletadas no tanque de recirculação. Isto pode ser explicado pelo fato de que, quando a ARC saía da escada e caía no tanque de recepção/detenção, o material sedimentado (lodo) era ressuspensionado, se misturando à ARC afluyente e, com isso, proporcionando aumento no valor da sua DQO.

Nas amostras coletadas na cascata, ou nos desníveis de 1, 2, 3 e 4 m, o teste de comparações múltiplas de médias utilizado não foi capaz de detectar diferenças significativas, em termos estatísticos. Não obstante, estas médias também não diferiram estatisticamente das médias dos tanques. Pelo fato da ARC passar muito rapidamente pelos degraus da escada, não há tempo suficiente para que os micro-organismos entrem em contato com mesma para que ocorra a degradação do material orgânico e, conseqüentemente, diminuição no valor da DQO.

Para a variável DQO, o fator tempo foi desdobrado para se estudar o ajuste de modelos de regressão, onde se constatou o efeito significativo a 1% de probabilidade pelo teste F, do modelo linear. No entanto, os modelos lineares não explicam de forma adequada o decaimento da variável DQO em função do tempo. Sendo assim, ajustou-se um modelo não linear

($Y = ae^{-bx} + \varepsilon$) para representar o decaimento da DQO em função do tempo na ARC (Figura 11).

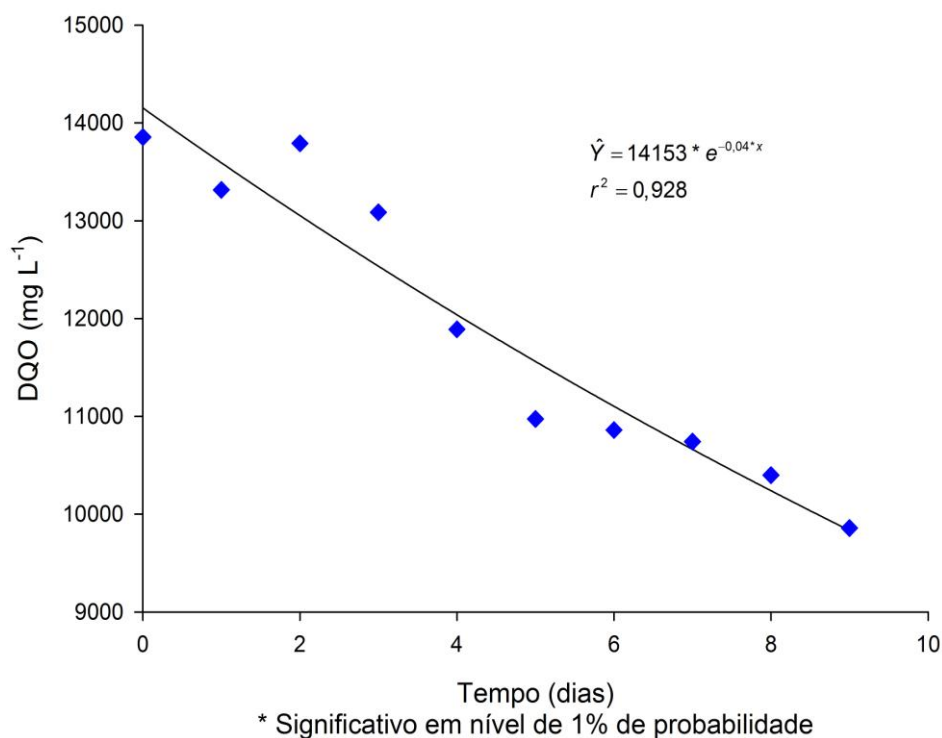


Figura 11. Decaimento da DQO da ARC com o tempo.

Na Figura 11, observa-se que o aumento no tempo foi efetivo na redução da DQO da ARC, após ela ter sido submetida ao tratamento na escada de aeração, apresentando um coeficiente de decaimento de $0,04 \text{ dia}^{-1}$. Acredita-se que esse decaimento seja devido à incorporação de OD à ARC durante as 3 recirculações diárias pela cascata de aeração, o que proporcionou que os micro-organismos aeróbios atuassem eficientemente na degradação do material orgânico. Houve uma incorporação média de OD de $1,06 \text{ g}$ a cada recirculação, o que gerou uma eficiência média de remoção de $28,9\%$ na DQO presente, indicando que a taxa de incorporação de OD foi insuficiente para manter a massa líquida em condições aeróbias.

Na Deliberação Normativa do COPAM/CERH nº 01/2008 está estabelecido que o efluente tratado deva possuir DQO inferior a 180 mg L^{-1} , ou que o sistema de tratamento utilizado tenha eficiência média anual igual ou superior a 75% , desde que seu lançamento em curso d'água receptores

não venha a prejudicar a qualidade do mesmo de tal forma a exceder padrões estabelecidos para sua classe de enquadramento (MINAS GERAIS, 2008). Em relação à variável DQO, a ARC tratada não atendeu aos padrões de lançamento citados anteriormente, o que já era esperado visto que a utilização apenas de cascatas não é, geralmente, suficiente para tratamento de águas residuárias brutas. A ideia de utilizá-la de forma conjunta com outras técnicas de tratamento, tais como tratamento primário (decantação, filtro orgânico) ou primário/secundário (lagoas anaeróbias, filtros anaeróbios, reatores anaeróbios), possibilitaria, em vista da presença de maior parcela de DBO e DQO solúvel, que fosse possível obter maior eficiência do sistema. Filtros orgânicos, por exemplo, sendo capazes de remover 60% da DBO (LO MONACO *et al.*, 2002) e 80% da DQO (LO MONACO *et al.*, 2004) podem constituir importante operação unitária ser inserido como tratamento prévio da água residuária antes de cascatas de aeração, tendo em vista que removem grande parte do material orgânico em suspensão. Outra possibilidade seria intercalar entre lances de escada de aeração os sistemas de tratamento biológico, como por exemplo lagoas, principalmente facultativas, afim de se obter uma redução na área utilizada para construção das mesmas.

Brasil *et al.* (2003) ao tratarem a ARC em áreas alagadas naturais (*wetlands*) colonizadas com taboa (*Thypha* sp.) obtiveram remoção média de 84,5% da DQO. Fia (2008) ao utilizar o mesmo sistema de tratamento e espécie cultivada para o tratamento da ARC, obteve 69% na remoção da DQO, enquanto Fia *et al.* (2010a), ao utilizarem um reator anaeróbio preenchido com espuma de poliuretano, conseguiram eficiência de 80%. Esses resultados dão indicativos de que a inserção de sistemas biológicos associados à cascata também poderiam contribuir no tratamento da ARC.

Na Figura 12 estão apresentadas a caracterização média das três amostras de ARC afluente e efluente, em relação às variáveis ST, SVT, SST, SSV e eficiências monitoradas durante o período de condução do experimento.

Conforme se pode verificar, analisando os dados apresentados na Tabela 5, a ARC afluente apresentou relação SVT/ST e SSV/SST de 0,89,

indicando alto percentual de matéria orgânica, o que é indicativo de potencial tratamento biológico dessa água.

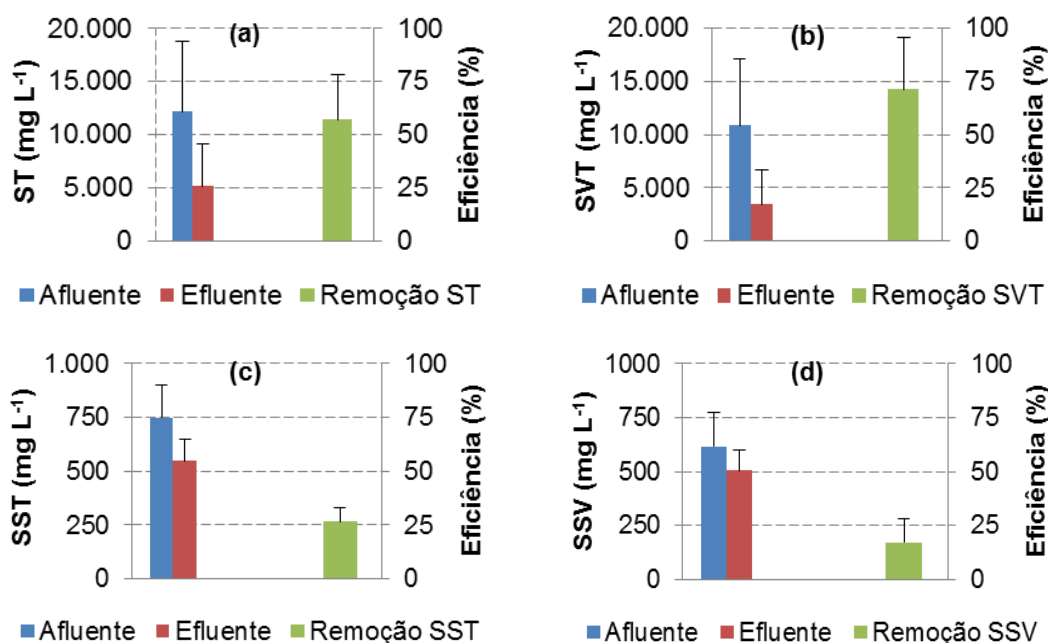


Figura 12. Valores médios de concentração de (a) ST, (b) SVT, (c) SST e (d) SSV e eficiência de remoção na ARC, obtidos durante o período de condução do experimento.

A remoção de ST e SST da ARC foi de 57,3 e 26,5%, respectivamente. Já para SVT e SSV, as remoções foram de 71,6 e 17,2%, respectivamente. Acredita-se que parte dessa reduzida remoção de sólidos seja decorrente do fato de que, com a recirculação da ARC, para a cascata de aeração, há ressuspensão de sólidos já sedimentados no fundo do tanque de recirculação e manutenção dos flotados em recirculação, proporcionando, com isso, permanentemente altas concentrações de sólidos na ARC em tratamento.

Lo Monaco *et al.* (2002) obtiveram remoção de 65% de ST ao tratarem a ARC em filtros de serragem de madeira. Luiz (2007) ao tratar a ARC em reatores anaeróbios de leito fixo, utilizando escória de alto forno como material suporte, conseguiu eficiência de remoção de até 22; 49; 27 e 47% de ST, SVT, SST e SSV, respectivamente. Ao utilizar espuma de poliuretano como meio suporte, o mesmo autor conseguiu eficiências de até 33; 60, 60 e 65% na remoção de ST, SVT, SST e SSV, respectivamente, e

quando utilizou brita obteve eficiência de remoção de 31; 55; 44 e 54% de ST, SVT, SST e SSV, respectivamente.

Com base nos resultados apresentados, verifica-se, a não ser no caso do filtro orgânico, relativamente baixas eficiências dos sistemas de tratamento na remoção de sólidos suspensos da ARC. Isso se justifica, pelo menos em parte, pelo fato desses sólidos (mucilagem) serem, na sua maior parte, de massa específica menor que a da água, o que lhes confere grande potencial de se manterem em suspensão, dificultando sua remoção por sedimentação.

4.3.5 Remoção de macronutrientes

Na Figura 13 está apresentada a caracterização média das três amostras de ARC em relação aos macronutrientes (N_T , P_T e K_T) e a eficiência na remoção dos mesmos.

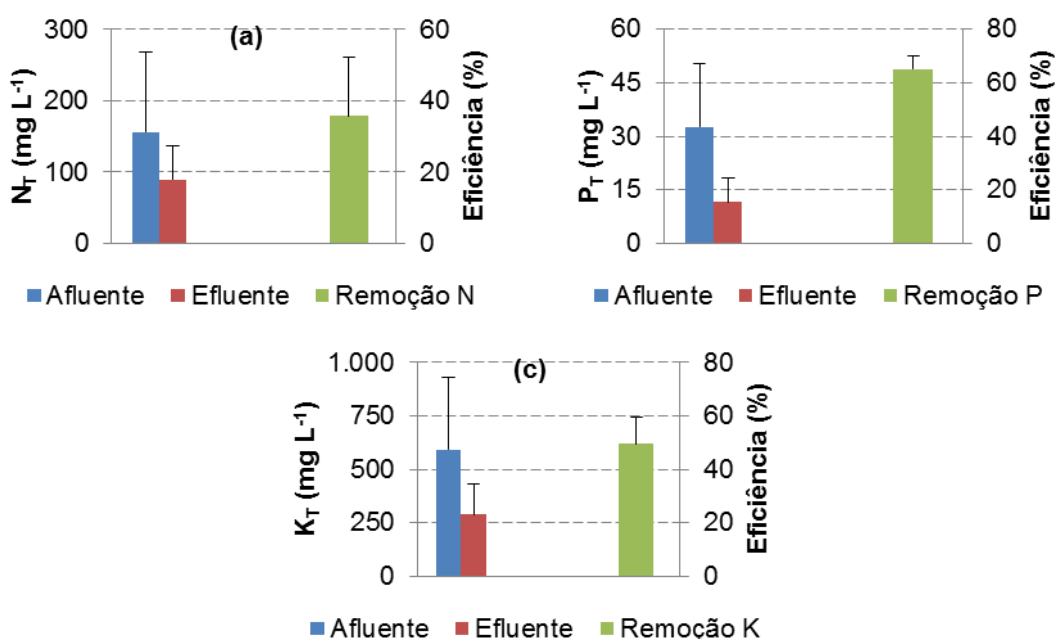


Figura 13. Valores médios de concentração de N_T , (b) P_T e (c) K_T no afluente e efluente e eficiência de remoção na ARC, obtidos durante o período de condução do experimento.

Houve eficiência de 35,7% na remoção de N_T , o que, acredita-se, tenha sido devida aos processos de assimilação pela massa microbiana, parcialmente sedimentada nos tanques e pela desnitrificação. Como a

desnitrificação ocorre em condições anóxicas (METCALF; EDDY, 2003), esse processo pode ser acentuado logo depois que o oxigênio dissolvido presente na ARC seja consumido pelos micro-organismos no tanque de recepção/detenção, que funcionou como um tanque de oxidação. Como a ARC apresentava-se em condição ácida, além das perdas de nitrogênio na forma de nitrogênio gasoso (N_2), pode ter ocorrido também na forma de óxido nitroso (N_2O), que seria resultado de uma desnitrificação parcial (AKUNNA *et al.*, 1992; DRTIL, 1995; BERNET; MOLETTA, 1998; METCALF; EDDY, 2003).

As eficiências na remoção de P_T e K_T foram, respectivamente, de 65,2 e 49,5%, valores que podem considerados muito altos, tendo em vista que não era de se esperar significativa remoção desses nutrientes, pois no sistema de tratamento avaliado, a única forma de perda de P_T e K_T seria por meio da absorção e incorporação ao protoplasma dos micro-organismos, formando-se o banco de lodo nos tanques e escada.

Lo Monaco *et al.* (2002), ao utilizarem um filtro orgânico constituído por serragem de madeira e outro por bagaço de cana-de-açúcar para o tratamento da ARC, obtiveram eficiências de remoção de 75 a 80% do N_T e 50% do P_T . Prado *et al.* (2010), ao tratarem a ARC em reator anaeróbio (UASB), conseguiram eficiências máximas de remoção de N_T e P_T de 32,5 e 37,2%, respectivamente. Comparando-se os resultados obtidos neste trabalho com os citados acima, observa-se que o sistema de tratamento em cascatas de aeração foi eficiente na remoção principalmente do P_T e K_T , o que merece melhor investigação, em outros trabalhos, dos fatores intervenientes que proporcionaram a obtenção desses resultados.

4.3.6 Remoção de compostos fenólicos

Na Figura 14 estão apresentados os valores de concentração média de CF nos afluentes e efluentes do sistema de tratamento das três amostras de ARC, além da eficiência na remoção dos mesmos.

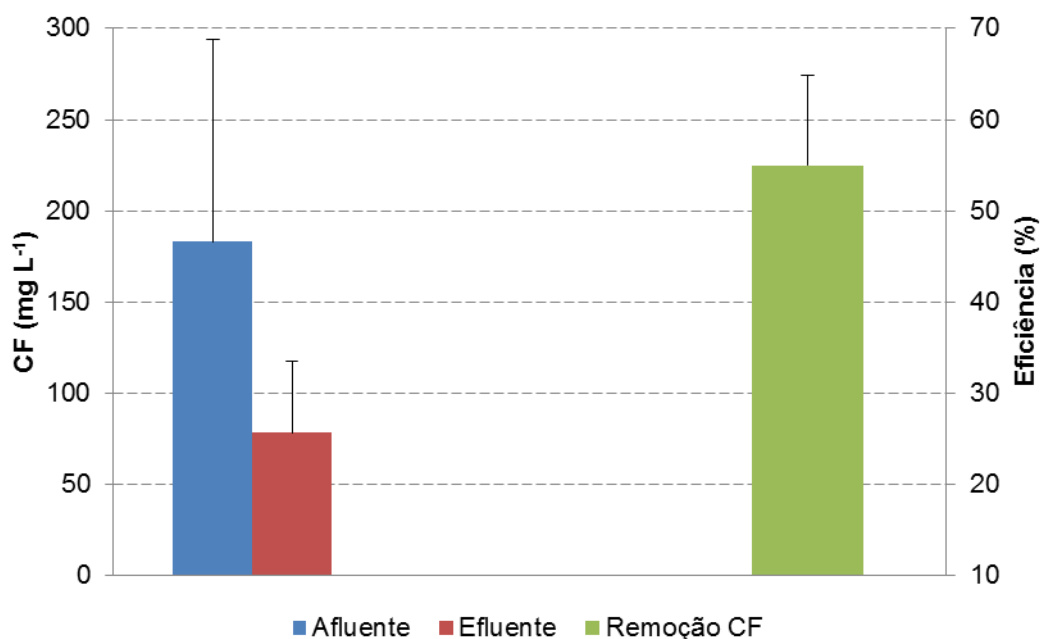


Figura 14. Valores médios de concentração de CF e eficiência de remoção na ARC, obtidos durante o período de condução do experimento.

A eficiência na remoção de CF no sistema de tratamento constituído pela cascata de aeração foi de 55%. Acredita-se que essa remoção tenha sido causada em decorrência da volatilização destes compostos durante o processo de recirculação.

A remoção de CF por sedimentação foi, aparentemente, baixa, tendo em vista a pequena quantidade de material sedimentado nos tanques, fato que contraria o que foi observado por Tsonis *et al.* (1989) que trataram águas residuárias do processamento de azeite e Sarasa *et al.* (1998) que trataram efluentes da fabricação de corantes e associaram a remoção de CF com sedimentação. Segundo Hsu *et al.* (2007), na presença de íons de cálcio, alguns produtos intermediários do fenol (ácido maléico, ácido oxálico e produtos de alto peso molecular) podem interagir com íons cálcio e formar compostos insolúveis, os quais precipitam. Ao adicionar cal à água residuária do processamento de oliva, Aktas *et al.* (2001) conseguiram remover entre 63 e 73% de polifenóis. Considerando que a adição de cal hidratada tem sido prática indicada para aumentar o pH e equilibrar a relação cálcio/potássio, visando aumentar a eficiência dos mecanismos biológicos na degradação do material orgânico da ARC (MATOS, 2008), a

ideia de incorporação da cal hidratada à ARC antes de seu lançamento em cascatas de aeração pode trazer muitos benefícios ao tratamento.

Fia (2008) conseguiu remover até 65% dos CF presente na ARC ao tratá-la em filtro anaeróbio seguido de sistema alagado construído cultivado com as espécies alternantera (*Alternanthera philoxeroides* Mart) e taboa (*Typha* sp.). Fia *et al.* (2010b), ao tratarem a ARC em reatores anaeróbios de leito fixo, conseguiu remover 68; 52 e 44% de CF, quando o meio suporte foi a escória de alto forno, a espuma de poliuretano e a brita, respectivamente. Prado *et al.* (2010), ao tratarem a ARC em reator anaeróbio (UASB), conseguiram eficiências máximas de remoção de CF de até 27,8%. Comparando-se os resultados obtidos por esses autores com os obtidos neste experimento, há de se considerar que a remoção de compostos fenólicos pode ser considerada alta.

De acordo com a Resolução CONAMA n.º 357/2005, a concentração de fenóis totais, estabelecida como padrão de lançamento para qualquer tipo de efluente, é de 0,5 mg L⁻¹. A concentração de CF encontrada na ARC efluente do sistema de tratamento em cascata de aeração superou o referido padrão, já que este foi, em média, de 78,3 mg L⁻¹. Embora tenham sido obtidos resultados satisfatórios de remoção de CF com o escoamento da ARC bruta em cascatas de aeração, tal como já discutido anteriormente, outros sistemas de tratamento prévio ou posterior às cascatas devem ser implementados para que se os referidos padrões possam ser atendidos.

5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos com a utilização do sistema de aeração em cascatas para o tratamento da água residuária da lavagem e descascamento/despolpa dos frutos do cafeeiro, foi possível concluir que:

- A elevada concentração de material orgânico no meio líquido impossibilitou que se detectassem alterações mais significativas de oxigênio dissolvido na ARC;
- O sistema conseguiu incorporar, em média, $0,2 \text{ mg L}^{-1}$ de oxigênio a cada desnível de 1 m na cascata;
- A porcentagem de saturação de oxigênio máxima obtida foi de 19,4% no desnível de 4 m;
- A cascata de aeração apresentou coeficiente de eficiência (K) de 0,078;
- A inclusão de tempo de detenção entre lances de escada, para possibilitar melhor aproveitamento do oxigênio incorporado, mostrou-se fundamental no tratamento da ARC, devendo ser superior a 26 minutos;
- A eficiência de remoção média de DQO foi de 28,9% durante o experimento;
- As remoções de sólidos totais, sólidos voláteis totais; sólidos suspensos totais, sólidos suspensos voláteis, nitrogênio, fósforo, potássio e compostos fenólicos foram de 57,3; 71,6; 26,5; 17,2; 35,7; 62,5; 49,5 e 55%, respectivamente;
- A cascata de aeração mostrou ser importante alternativa para composição de sistemas de tratamento da ARC, tendo em vista que é meio efetivo para o tratamento aeróbio do material orgânico presente na ARC.

6 REFERÊNCIAS

- ABIC – Associação Brasileira da Indústria do Café. Disponível em: <http://www.abic.com.br/estat_pagricola.html#cafe_benef08>. Acesso em: 17 de fevereiro de 2010.
- AKTAS, E. S.; IMRE, S.; ERSOY, L. Characterization and lime treatment of olive mil wastewater. **Water Research**, v. 35, n. 9, p. 2336-2340, 2001.
- AKUNNA, J.C.; BIZEAU, C.; MOLETTA, R. Denitrification in anaerobic digesters: possibilities and influence of wastewater COD/N-NO_x ratio. **Environmental Technology**, v. 13, p. 825-836, 1992.
- APHA [AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION]; AWWA [AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION]; WEF [WATER ENVIRONMENT FEDERATION]. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 21 ed. Washington: APHA/ AWWA/ WEF, 2005. 1268 p.
- BARTHOLO, G. G.; GUIMARÃES, P. T. G. Cuidados na colheita e preparo do café. **EPAMIG – Informe Agropecuário**. v. 18, n. 187, p. 33-42, 1997.
- BATISTA, R. O.; MATOS, A. T.; CUNHA, F. F.; LO MONACO, P. A. Formação de biofilme em gotejadores aplicando água residuária da despolpa dos frutos do cafeeiro. **Acta Scientiarum. Agronomy**. v. 29, n. 3, p. 367-371, 2007.
- BERNET, N.; MOLETTA, R. Anaerobic digestion and nitrogen removal from wastewaters. In: **IV Seminariotaller latinoamericano sobre tratamiento anaerobio de aguas residuales**. Mar del Plata, p. 495-506. 1998.
- BORÉM, F. M. Processamento do Café. In: BORÉM, F. M. **Pós-Colheita do Café**. 1ª Ed. Lavras: UFLA. Cap. 5, p. 127-158, 2008.

- BORÉM, F. M.; SALVA, T. J. G.; SILVA, E. A. A. Anatomia e Composição Química do Fruto e da Semente do Cafeeiro. In: BORÉM, F. M. **Pós-Colheita do Café**. 1ª Ed. Lavras: UFLA. Cap. 1, p. 19-40, 2008.
- BRAILE, P. M.; CAVALCANTI, J. E. W. A. **Manual de tratamento de águas residuárias industriais**. São Paulo: CETESB, 1993, 764 p.
- BRASIL, M. S.; MATOS, A. T.; FIA, RONALDO. Eficiência e impactos ambientais do tratamento de águas residuárias da lavagem e despolpa de frutos do cafeeiro em áreas alagadas naturais. **Revista Engenharia na Agricultura**. v. 11, n. 1-4, p. 43-51, 2003.
- CAFÉS DO BRASIL. Disponível em: <<http://www.cafesdobrasil.com.br>>. Acesso em: 05 de dezembro de 2009.
- CAMPOS, J. M. C. Contaminación del agua en Costa Rica por residuos Del procesamiento del café y de la porcinoicultura. In: —. **Prevención de La contaminación del agua por la agricultura y actividades afines**. Santiago: FAO. p. 113-124, 1993. (Informe sobre temas hídricos, n.º 1).
- CARVALHO, J. A.; AQUINO, R. F.; PEREIRA, G. M.; RODRIGUES, R. C.; CAMPOS, T. B. Desempenho de bomba centrífuga operando com água residuária do processamento do café. **Revista Engenharia Agrícola**. v. 28, n. 1, p. 86-94, 2008.
- CHALFOUN, S. M. **O café (*Coffea arábica* L.) na região Sul de Minas – Relação da qualidade com fatores ambientais, estruturais e tecnológicos**. 1996. 125 p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Departamento de Fitotecnia, UFLA, Lavras, 1996.
- CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Avaliação da Safra Cafeeira 2009 – Quarta Estimativa, Dezembro/2009**. Brasília, 2010. 18 p. Disponível em:<http://www.conab.gov.br/conabweb/download/safra/4_levantamento_2009.pdf>. Acesso em: 16 de dezembro de 2009.
- CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 357 de 17 de março de 2005**, Brasília. Cap. IV, Art. 34, 2005.

- CRUZ, C. D. **Programa Genes versão Windows. Aplicativo Computacional em Genética e Estatística.** Viçosa: UFV, 2006. 648 p.
- DARTO FILHO, J.; SOUZA, A. M. O cascadeamento como uma opção para o arejamento de efluentes anaeróbios diluídos. In: 19º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. **Anais...** p. 253-261, 1997.
- DELGADO, E. A.; BAROIS, I. Lombricompostaje de la pulpa de café em México. In: International seminar on biotechnology in the coffee agroindustry, 3, Londrina. **Proceedings...** Londrina, PR: UFPR, IAPAR, IRD. p. 335-343, 1999.
- DRTIL, M.; NÉMETH, P.; KUCMAN, K.; BODÍK, I.; KASPEREK, V. Acidobasic balances in the course of heterotrophic denitrification. **Water Research**, v. 29, n. 5, p. 1353-1360, 1995.
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Novas tecnologias de secagem para café.** Brasília, 2009. Disponível em: <<http://www23.sede.embrapa.br:8080/aplic/cafenews.nsf/f66e4ae353d4b87e03256b1700494349/51b3077ac7b12d4b03256beb0074286e?OpenDocument>>. Acesso em: 05 de dezembro 2009.
- EPA – United States Environmental Protection Agency, Athens. **The enhanced stream water quality models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS.** Documentation and user model. 1987, 189 p.
- FIA, F. R. L.; BORGES, A. C.; MATOS, A. T.; DUARTE, I. C. S.; FIA, R.; CAMPOS, L. C. Development of biofilm in anaerobic reactor treating wastewater from coffee grain processing. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental.** v. 14, n. 2, p. 210-217, 2010a.
- FIA, F. R. L.; MATOS, A. T.; BORGES, A. C.; MOREIRA, D. A.; FIA, R.; EUSTÁQUIO JÚNIOR, V. Remoção de compostos fenólicos em reatores de leito fixo com diferentes materiais suporte. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental.** v. 14, n. 10, p. 1079-1086, 2010b.

- FIA, R. **Desempenho de sistemas alagados construídos no tratamento de águas residuária da lavagem e descascamento/despolpa dos frutos do cafeeiro.** 2008. 181 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Departamento de Engenharia Agrícola, UFV, Viçosa, 2008.
- FIA, R.; MATOS, A. T.; FERREIRA, P. A.; TEODORO, P. E. P.; SCHUERY, F. C. LUIZ, F. A. R. Desempenho agrônômico da *Thypha* sp. e *Alternanthera philoxeroides* Mart utilizadas no tratamento de águas residuárias da lavagem e descascamento/despolpa dos frutos do cafeeiro em sistema alagado construído. **Revista Engenharia na Agricultura.** v. 16, n. 4, p. 436-448, 2008.
- FIA, R.; MATOS, A. T.; LUIZ, F. A. R.; PEREIRA, P. A. Coeficiente de degradação da matéria orgânica de água residuária da lavagem e descascamento dos frutos do cafeeiro em condições anóxica e aeróbia. **Revista Engenharia na Agricultura,** v. 15, n. 1, p. 45-54, 2007.
- FOLIN, O.; CIOCALTEU, V. On tyrosine and tryptophane determinations in proteins. **The Journal of Biological Chemistry.** v. 73, n.2, p. 627-650, 1927.
- GARCIA, G. O.; FERREIRA, P. A.; MATOS, A. T.; RUIZ, H. A.; MARTINS FILHO, S. Alterações químicas em três solos decorrentes da aplicação de águas residuárias da lavagem e despolpa de frutos do cafeeiro conilon. **Revista Engenharia na Agricultura.** v. 16, n. 4, p. 416-427, 2008.
- HSU, Y-C.; CHEN, J-H.; YANG, H-C. Calcium enhanced COD removal for the ozonation of phenol solution. **Water Research,** v. 41, p. 71-78, 2007.
- HUSSAR, G. J. **Avaliação do desempenho de leitos cultivados no tratamento de águas residuárias de suinocultura.** 2001. 118 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, UNICAMP, Campinas, 2001.

- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Sistema IBGE de Recuperação Automática** - SIDRA. Brasília, 2009. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br>>. Acesso em: 19 de outubro de 2009.
- ICO – International Coffee Organization. **Total production of exporting countries crop years commencing: 2004 to 2009**. Disponível em: <<http://dev.ico.org/prices/po.htm>>. Acesso em: 16 de dezembro de 2009.
- JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. **Tratamento de esgotos domésticos**. 5ª Ed. Rio de Janeiro: ABES, 2009, 941 p.
- KIEHL, E. J. **Fertilizantes orgânicos**. Piracicaba: Editora Agronômica Ceres Ltda., 1985. 492 p.
- LO MONACO, P. A. **Fertirrigação do cafeeiro com águas residuária da lavagem e descascamento de seus frutos**. 2005. 96 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Departamento de Engenharia Agrícola, UFV, Viçosa, 2005.
- LO MONACO, P. A.; GARCIA, G. O.; MATOS, A. T. Caracterização da água residuária da lavagem e despulpa dos frutos dos cafeeiros Arábica e Conilon. In: Simpósio de pesquisa dos cafés do Brasil, 3, 2003, Porto Seguro, BA. **Anais...** Porto Seguro, BA: EMBRAPA CAFÉ, 2003, CD-ROM.
- LO MONACO, P. A.; MATOS, A. T.; JORDÃO, C. P.; MARTINEZ, M. A. Influencia da granulometria da serragem de madeira como material filtrante de águas residuárias da suinocultura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 8, n. 1, p. 116-119, 2004.
- LO MONACO, P. A.; MATOS, A. T.; MARTINEZ, H. E. P.; FERREIRA, P. A.; RAMOS, M. M. Características químicas do solo após a fertirrigação do cafeeiro com águas residuárias da lavagem e descascamento de seus frutos. **Revista Irriga**. v. 14, n. 3, p. 348-364, 2009.

- LO MONACO, P. A.; MATOS, A. T.; MARTINEZ, M. A.; JORDÃO, C. P. Eficiência de materiais orgânicos filtrantes no tratamento de águas residuárias da lavagem e despolpa dos frutos do cafeeiro. **Revista Engenharia na Agricultura**. v. 10, n. 1-4, p. 40-47, 2002.
- LUIZ, F. A. R. **Desempenho de reatores anaeróbios de leito fixo no tratamento de águas residuárias da lavagem e descascamento/despolpa dos frutos do cafeeiro**. 2007. 132 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Departamento de Engenharia Agrícola, UFV, Viçosa, 2007.
- MAGALHÃES, C. A. C.; MORENO, J.; SILVA, A. J. L. Programa computacional para o dimensionamento de escadas de aeração. In: 22º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2003, Joinville. **Anais...** 2003.
- MATIELLO, D. R. **Cultura de café no Brasil: novo manual de recomendações**. Rio de Janeiro: MAPA/PROCAFE, 2005. 438 p.
- MATIELLO, J. B. **O café: do cultivo ao consumo**. São Paulo: Globo, 1991. 320 p. (Coleção do Agricultor. Grãos).
- MATOS, A. T. **Manejo e tratamento de resíduos agroindustriais**. Associação dos Engenheiros Agrícolas de Minas Gerais. Departamento de Engenharia Agrícola. UFV, (Série Caderno Didático nº 31), Viçosa, 2007. 121 p.
- MATOS, A. T. Tratamento de resíduos na pós-colheita do café. In: Borém, F. M. (Ed.). **Pós-colheita do café**. Lavras: UFLA. p. 159-201, 2008.
- MATOS, A. T. **Tratamento e destinação final dos resíduos gerados no beneficiamento do fruto do cafeeiro**. Produção Integrada de Café. ZAMBOLIM, L. (ed.). Viçosa: UFV; Departamento de Fitotecnia, p. 647-705, 2003.

- MATOS, A. T.; PINTO, A. B.; PEREIRA, O. G.; SOARES, A. A.; LO MONACO, P. A. Produtividade de forrageiras utilizadas em rampas de tratamento de águas residuárias da lavagem e despolpa dos frutos do cafeeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 7, n. 1, p. 154-158, 2003.
- MATOS, A. T.; EUSTÁQUIO JÚNIOR, V.; PEREIRA, P. A.; MATOS, M. P. Tratamento da água para reuso no descascamento/despolpa dos frutos do cafeeiro. **Revista Engenharia na Agricultura**. v. 15, n. 2, p. 173-178, 2007.
- MATOS, A. T.; LO MONACO, P. A. **Tratamento e aproveitamento agrícola de resíduos sólidos e líquidos da lavagem e despolpa dos frutos do cafeeiro**. Viçosa: UFV / Departamento de Engenharia Agrícola, 2003. (Boletim técnico n. 7).
- MELO, B.; BARTHOLO, G. F.; MENDES, A. N. G. Café: Variedades e Cultivares. **Informe Agropecuário**, v.19, n.193, p. 92-96, 1998.
- METCALF; EDDY. **Wastewater engineering: treatment and reuse**. 4th Ed. New York: McGraw-Hill, Inc. 2003, 1819 p.
- MINAS GERAIS, **Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG N.º 1**, de 5 de maio de 2008. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Diário do Executivo, Belo Horizonte, 13 de maio de 2008.
- MORENO, J.; MAGALHÃES, C. A. C.; SILVA, A. J. L. Avaliação do desempenho de escadas de aeração utilizadas em estações de tratamento de esgotos. In: 22º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2003, Joinville. **Anais...** 2003.
- PINTO, A. B. **Avaliação de gramíneas forrageiras com uso de águas residuárias da lavagem e despolpa dos frutos do cafeeiro**. 2001. 108 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Departamento de Engenharia Agrícola, UFV, Viçosa, 2001.

- PÖPEL, H. J. **Aeration and gas transfer**. 2. Ed. Delft, Delft University of Technology. 1979, 169 p.
- PRADO, M. A. C.; CAMPOS, C. M. M.; SILVA, J. F. Estudo da variação da concentração de metano no biogás produzido a partir das águas residuárias do café. **Ciência e Agrotecnologia**. v. 34, n. 2, p. 475-484, 2010.
- QASIM, S. R. **Wastewater treatment plants: planning, design and operation**. Holt, Rinehart and Winston, New York. 1985.
- REVISTA CAFEICULTURA. **Movimento S.O.S Cafeicultura – Marcha pelo café acontece em Varginha/MG em 16 de março de 2009**. Disponível em: <<http://www.revistacafeicultura.com.br/index.php?tipo=ler&mat=19618>>. Acesso: em 05 de dezembro de 2009.
- RIGUEIRA, R. J. A.; LACERDA FILHO, A. F.; MATOS, A. T.; DONZELES, S. M. L.; PALACIN, J. J. F. Alteração nas características físicas, químicas e bioquímicas da água no processo de lavagem, despolpa e desmucilagem de frutos do cafeeiro. **Revista Engenharia na Agricultura**, v. 18. n. 2, p. 131-139, 2010.
- SARASA, J.; ROCHE, M. P.; ORMAD, M. P.; GIMENO, E.; PUIG, A.; OVELLEIRO, J. L. Treatment of a wastewater resulting from dyes manufacturing with ozone chemical coagulation. **Water Research**, v. 32, p. 2721-2727, 1998.
- SILVA, J. S. **Colheita, secagem e armazenagem de café**. 1ª Ed. Viçosa: Editora Aprenda Fácil, 1995. 146 p.
- SILVA, J. S.; PARIZZI, F. C.; SOBRINHO, C. J. Beneficiamento de grãos. In: SILVA, J. S. **Secagem e armazenagem de produtos agrícolas**. 1ª Ed. Viçosa: Editora Aprenda Fácil. Cap. 13, p. 307-323, 2000.
- SILVA, J. S.; SAMPAIO, C. P.; MACHADO, M. C.; LO MONACO, P. A. Secagem e armazenagem do café: tecnologias e custos. In: **Preparo, secagem e armazenagem**. 1ª Ed. Editora Jard. Viçosa, 2001.

- SILVA, O. M.; LEITE, C. A. M. Competitividade e custos do café no Brasil. In: **Café: produtividade, qualidade e sustentabilidade**. Viçosa: UFV, Impr. Univ., p. 27-50, 2000.
- TSONIS, S. P.; TSOLA, V. P.; GRIGOROPOULOS, S. G. Systematic characterization and chemical treatment of olive oil mill wastewater. **Toxicological and Environmental Chemistry**, v. 20-21, p. 437-457, 1989.
- von SPERLING, M. **Autodepuração dos cursos d'água**. 1983. 366 p. Dissertação (Mestrado) – DES-EEUFMG, Belo Horizonte, 1983.
- von SPERLING, M. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. Vol. 3. **Lagoas de estabilização**. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, Belo Horizonte. 2ª Ed. 2002a, 196 p.
- von SPERLING, M. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. Vol. 4. **Lodos ativados**. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, Belo Horizonte. 2ª Ed. 2002b, 428 p.
- von SPERLING, M. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. Vol. 1. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, Belo Horizonte. 3ª Ed. 2005, 452 p.
- ZAMBRANO, F.D.A.; ISAZA, H.J.D. Demanda química de oxígeno e nitrogênio total de los subproductos del proceso tradicional de beneficio húmedo del café. **Revista del Centro Nacional de Investigaciones de Café - Cenicafé**, v.49 n.4, p.279-89, 1998.

7 APÊNDICE

Tabela A.1. Valores de precipitação, temperatura média do ambiente e temperatura média da ARC durante a avaliação do sistema de tratamento

Dia/Mês	Precipitação (mm)	Temperatura média (°C)	
		Ambiente	ARC*
18/mai	0,0	17,8	21,5
19/mai	3,2	17,1	20,7
20/mai	0,6	18,8	21,2
21/mai	0,0	17,4	21,1
22/mai	0,0	19,1	21,9
23/mai	0,0	19,6	22,3
24/mai	0,2	19,3	22,3
25/mai	0,0	19,1	21,8
26/mai	0,4	18,9	22,4
27/mai	0,6	17,6	21,7
28/mai	0,0	16,9	21,3
29/mai	0,2	16,8	20,7
30/mai	0,2	16,7	20,7
31/mai	0,0	19,0	21,2
01/jun	0,0	16,1	20,0
02/jun	0,2	16,4	19,3
03/jun	0,8	16,3	18,9
04/jun	0,0	14,9	19,3
05/jun	0,2	14,5	18,4
06/jun	0,2	15,3	19,2
07/jun	0,2	13,9	19,7
08/jun	0,2	14,1	18,5
09/jun	0,2	15,9	18,8
10/jun	0,2	14,4	18,0
11/jun	0,0	15,9	17,2
12/jun	0,0	15,0	16,3
13/jun	0,0	11,6	16,1
14/jun	0,2	12,8	16,2
15/jun	0,2	12,3	17,3
16/jun	0,2	13,3	18,0

* Média de 3 recirculações diárias.

Tabela A.2. Concentração média de oxigênio dissolvido da ARC nos tanques 1 e 2 e em diferentes desníveis da cascata de aeração

Dia/Mês	ARC	Tanque		Cascata de aeração – desnível (m)			
		1	2	1	2	3	4
-----OD* (mg L ⁻¹)-----							
18/mai	1 ^a	0,0	0,6	0,0	0,0	0,1	0,4
19/mai		0,0	0,5	0,3	0,5	0,9	1,2
20/mai		0,0	0,7	0,4	0,7	1,1	1,4
21/mai		0,0	1,1	0,6	0,8	1,3	1,5
22/mai		0,0	1,0	0,6	1,1	1,2	1,4
23/mai		0,0	0,5	0,5	0,9	1,0	1,0
24/mai		0,0	0,2	0,3	0,5	0,6	0,6
25/mai		0,0	0,1	0,4	0,5	0,7	0,9
26/mai		0,0	0,1	0,3	0,6	0,5	0,8
27/mai		0,0	0,3	0,6	0,9	1,3	1,1
28/mai	2 ^a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
29/mai		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
30/mai		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
31/mai		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
01/jun		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
02/jun		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
03/jun		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
04/jun		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
05/jun		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
06/jun		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
07/jun	3 ^a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
08/jun		0,0	0,9	0,0	0,3	0,0	0,0
09/jun		0,0	1,0	0,4	0,6	0,0	0,2
10/jun		0,0	1,4	0,0	0,4	0,4	0,7
11/jun		0,0	1,2	0,1	0,9	1,1	1,2
12/jun		0,0	1,7	0,2	0,6	1,6	1,8
13/jun		0,0	1,5	0,9	0,9	1,4	1,3
14/jun		0,0	1,5	0,9	0,9	1,5	1,6
15/jun		0,0	1,2	0,3	1,1	1,1	1,4
16/jun		0,0	0,9	0,4	0,6	0,8	1,4

* Média de 3 recirculações diárias.

Tabela A.3. Concentração média de saturação de oxigênio dissolvido (C_s') corrigida a altitude

Dia/Mês	ARC	Tanque		Cascata de aerção – desnível (m)			
		1	2	1	2	3	4
----- C_s' (mg L ⁻¹)-----							
18/mai		8,1	8,1	8,1	8,1	8,2	8,2
19/mai		8,3	8,3	8,2	8,3	8,3	8,3
20/mai		8,2	8,2	8,2	8,2	8,2	8,2
21/mai		8,2	8,3	8,2	8,2	8,2	8,2
22/mai	1 ^a	8,0	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1
23/mai		7,9	8,0	8,0	8,0	8,0	8,1
24/mai		8,0	8,1	8,0	8,1	8,0	8,0
25/mai		8,0	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1
26/mai		8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0
27/mai		8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1
28/mai		8,3	8,1	8,1	8,2	8,2	8,2
29/mai		8,4	8,3	8,3	8,2	8,2	8,3
30/mai		8,2	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3
31/mai		8,1	8,2	8,2	8,2	8,2	8,2
01/jun	2 ^a	8,4	8,4	8,4	8,4	8,4	8,4
02/jun		8,6	8,6	8,5	8,5	8,5	8,5
03/jun		8,6	8,6	8,6	8,6	8,6	8,6
04/jun		8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5
05/jun		8,7	8,7	8,7	8,7	8,7	8,7
06/jun		8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5
07/jun		8,4	8,4	8,4	8,5	8,5	8,5
08/jun		8,7	8,7	8,6	8,6	8,7	8,7
09/jun		8,5	8,6	8,6	8,6	8,6	8,6
10/jun		8,8	8,8	8,7	8,7	8,8	8,8
11/jun	3 ^a	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9
12/jun		9,1	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1
13/jun		9,1	9,1	9,1	9,2	9,2	9,2
14/jun		9,0	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1
15/jun		8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9
16/jun		8,8	8,7	8,8	8,8	8,8	8,8

Média de 3 recirculações diárias.

Tabela A.4. Porcentagem de saturação de oxigênio média (PSO) da ARC nos tanques e em diferentes desníveis da cascata de aeração

Dia/Mês	ARC	Tanque		Cascata de aeração – desnível (m)			
		1	2	1	2	3	4
-----PSO (%)-----							
18/mai	1 ^a	0,0	6,9	0,0	0,0	1,4	4,8
19/mai		0,0	5,8	4,1	5,5	10,9	13,8
20/mai		0,0	8,2	4,8	8,9	13,1	16,5
21/mai		0,0	13,2	7,3	9,3	15,3	18,4
22/mai		0,0	12,1	7,7	13,8	15,1	17,1
23/mai		0,0	6,1	6,6	10,7	12,3	12,2
24/mai		0,0	2,0	3,2	6,5	7,3	7,0
25/mai		0,0	0,8	4,9	6,5	8,5	10,5
26/mai		0,0	1,6	3,3	6,9	6,6	9,5
27/mai		0,0	4,0	7,3	11,0	15,5	13,0
28/mai	2 ^a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
29/mai		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
30/mai		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
31/mai		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
01/jun		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
02/jun		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
03/jun		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
04/jun		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
05/jun		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
06/jun		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
07/jun	3 ^a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
08/jun		0,0	10,5	0,0	3,8	0,0	0,0
09/jun		0,0	10,9	4,9	7,1	0,0	1,9
10/jun		0,0	15,3	0,0	4,2	4,1	7,5
11/jun		0,0	13,3	1,1	9,6	11,8	13,6
12/jun		0,0	17,7	2,5	6,1	17,9	19,4
13/jun		0,0	15,8	10,0	9,4	15,3	13,6
14/jun		0,0	15,9	9,9	10,0	16,1	17,4
15/jun		0,0	12,7	3,7	11,9	12,2	15,6
16/jun		0,0	9,9	4,4	6,7	8,5	15,6

Média de 3 recirculações diárias.

Tabela A.5. Concentração efluente (C_e), concentração afluente (C_o), concentração de saturação de oxigênio já corrigida a altitude (C_s') e coeficiente de eficiência (K) obtidos na cascata de aeração

Dia/Mês	ARC	C_e	C_o	C_s'	K
		-----mg L ⁻¹ -----			
18/mai		0,40	0,00	8,20	0,049
19/mai		1,20	0,00	8,30	0,145
20/mai		1,40	0,00	8,20	0,171
21/mai		1,50	0,00	8,20	0,183
22/mai	1 ^a	1,40	0,00	8,10	0,173
23/mai		1,00	0,00	8,10	0,123
24/mai		0,60	0,00	8,00	0,075
25/mai		0,90	0,00	8,10	0,111
26/mai		0,80	0,00	8,00	0,100
27/mai		1,10	0,00	8,10	0,136
28/mai		0,00	0,00	8,20	0,000
29/mai		0,00	0,00	8,30	0,000
30/mai		0,00	0,00	8,30	0,000
31/mai		0,00	0,00	8,20	0,000
01/jun	2 ^a	0,00	0,00	8,40	0,000
02/jun		0,00	0,00	8,50	0,000
03/jun		0,00	0,00	8,60	0,000
04/jun		0,00	0,00	8,50	0,000
05/jun		0,00	0,00	8,70	0,000
06/jun		0,00	0,00	8,50	0,000
07/jun		0,00	0,00	8,50	0,000
08/jun		0,00	0,00	8,70	0,000
09/jun		0,20	0,00	8,60	0,023
10/jun		0,70	0,00	8,80	0,080
11/jun	3 ^a	1,20	0,00	8,90	0,135
12/jun		1,80	0,00	9,10	0,198
13/jun		1,30	0,00	9,20	0,141
14/jun		1,60	0,00	9,10	0,176
15/jun		1,40	0,00	8,90	0,157
16/jun		1,40	0,00	8,80	0,159

Média de 3 recirculações diárias.

Tabela A.6. Decaimento do oxigênio dissolvido (OD) em função do tempo para 6 repetições

Tempo (minutos)	-----OD (mg L ⁻¹)-----						Média
	1ª Rep	2ª Rep	3ª Rep	4ª Rep	5ª Rep	6ª Rep	
0	0,69	1,98	0,89	0,50	0,59	0,79	0,91
2	0,50	1,39	0,69	0,40	0,30	0,40	0,61
4	0,50	1,09	0,40	0,10	0,30	0,20	0,43
6	0,50	0,89	0,20	0,00	0,10	0,10	0,30
8	0,50	0,59	0,10	0,00	0,00	0,00	0,20
10	0,40	0,59	0,00	0,00	0,00	0,00	0,17
12	0,40	0,69	0,00	0,00	0,00	0,00	0,18
14	0,30	0,59	0,00	0,00	0,00	0,00	0,15
16	0,20	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08
18	0,10	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05
20	0,10	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07
22	0,10	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05
24	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02
26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabela A.7. Variação do potencial hidrogeniônico (pH) do afluente e efluente de cada ARC utilizada no experimento

Amostra	-----pH-----			Média
	1ª ARC	2ª ARC	3ª ARC	
Afluente	3,44	4,43	3,85	3,91 ± 0,50
Efluente	4,01	4,09	3,96	4,02 ± 0,07

Tabela A.8. Variação da condutividade elétrica (CE) afluente e efluente de cada ARC utilizada no experimento

Amostra	-----CE (dS m ⁻¹)-----			Média
	1ª ARC	2ª ARC	3ª ARC	
Afluente	0,062	0,171	0,107	0,113 ± 0,054
Efluente	0,126	0,262	0,205	0,198 ± 0,068

Tabela A.9. Demanda bioquímica de oxigênio (DBO) nos tanques e em diferentes desníveis da cascata de aeração

Dia/Mês	ARC	Tanque		Cascata de aeração – desnível (m)			
		1	2	1	2	3	4
-----DBO [*] (mg L ⁻¹)-----							
18/mai	1 ^a	3688	5534	3454	3870	3159	3297
21/mai		3638	3004	3238	2500	3566	4181
24/mai		3211	2482	2331	3181	3034	2912
27/mai		2995	5357	2783	3088	5467	5754
28/mai	2 ^a	7249	6068	6284	6942	6473	6996
31/mai		8100	7599	7479	7144	6659	7057
03/jun		6336	6540	6179	5975	6107	5413
06/jun		6140	5730	5004	5950	5886	5843
07/jun	3 ^a	3627	3826	3970	3624	3859	3482
10/jun		3493	3755	3353	3615	3240	3963
13/jun		3612	3345	3163	2731	3183	2730
16/jun		3300	2979	2997	2773	2768	3502

* Média de 3 recirculações diárias.

Tabela A.10. Demanda química de oxigênio (DQO) nos tanques e em diferentes desníveis da cascata de aeração

Dia/Mês	ARC	Tanque		Cascata de aeração – desnível (m)			
		1	2	1	2	3	4
-----DQO ⁺ (mg L ⁻¹)-----							
18/mai		9346	9595	9844	9595	9470	9470
19/mai		9097	9470	9221	8972	8723	8723
20/mai		8972	8847	8847	8972	8723	8972
21/mai		9637	9241	9901	10033	9505	9769
22/mai	1 ^a	8845	9373	8449	8581	8713	8713
23/mai		7921	8713	8185	7921	8185	7921
24/mai		7129	8581	7525	7921	7921	8449
25/mai		6337	8581	7789	7657	7261	8053
26/mai		8053	8185	8185	8317	8317	7789
27/mai		7525	6733	7921	7789	8317	7789
28/mai		20858	20858	21386	20858	20858	20990
29/mai		20594	21122	20858	21122	21254	20858
30/mai		19010	20330	21122	21386	22046	21650
31/mai		19274	20594	19670	19538	19406	20462
01/jun	2 ^a	18123	17864	16699	17605	17087	16699
02/jun		16570	16828	16570	16440	16181	16699
03/jun		15534	15922	15922	15793	15405	15793
04/jun		15793	15793	16052	15405	15922	16181
05/jun		15146	15016	15146	14498	15405	14757
06/jun		14887	14887	15016	14887	14757	14369
07/jun		12409	10957	11221	11617	10033	10033
08/jun		9505	11353	9505	9769	9769	9769
09/jun		11701	11837	11156	11701	11429	11565
10/jun		9932	10612	9388	9252	9796	9524
11/jun	3 ^a	9796	9524	9252	9388	10068	9252
12/jun		8435	8980	7619	7891	8571	7891
13/jun		8844	8980	8980	8844	8844	9116
14/jun		8571	8844	8844	8571	9116	8571
15/jun		8081	7677	8620	9024	7003	7946
16/jun		7003	7811	7138	6734	6869	7003

Média de 3 recirculações diárias.

Tabela A.11. Variação de sólidos totais (ST) afluente e efluente de cada ARC utilizada no experimento e eficiência média na remoção dos mesmos

Amostra	-----ST (mg L ⁻¹)-----				Eficiência (%)
	1ª ARC	2ª ARC	3ª ARC	Média	
Afluente	4626	14564	17329	12173 ± 6681	57,3 ± 20,8
Efluente	4761	9537	4275	5191 ± 3968	

Tabela A.12. Variação de sólidos voláteis totais (SVT) afluente e efluente de cada ARC utilizada no experimento e eficiência média na remoção dos mesmos

Amostra	-----SVT (mg L ⁻¹)-----				Eficiência (%)
	1ª ARC	2ª ARC	3ª ARC	Média	
Afluente	3965	12305	16306	10859 ± 6296	71,6 ± 24,5
Efluente	430	6937	2947	3438 ± 3281	

Tabela A.13. Variação de sólidos voláteis totais (SST) afluente e efluente de cada ARC utilizada no experimento e eficiência média na remoção dos mesmos

Amostra	-----SST (mg L ⁻¹)-----				Eficiência (%)
	1ª ARC	2ª ARC	3ª ARC	Média	
Afluente	576	860	808	748 ± 151	26,5 ± 6,5
Efluente	434	570	638	547 ± 104	

Tabela A.14. Variação de sólidos voláteis totais (SSV) afluente e efluente de cada ARC utilizada no experimento e eficiência média na remoção dos mesmos

Amostra	-----SSV (mg L ⁻¹)-----				Eficiência (%)
	1ª ARC	2ª ARC	3ª ARC	Média	
Afluente	462	770	622	618 ± 154	17,1 ± 10,9
Efluente	396	545	572	504 ± 95	

Tabela A.15. Variação de nitrogênio total (N_T) afluente e efluente de cada ARC utilizada no experimento e eficiência média na remoção dos mesmos

Amostra	-----N _T (mg L ⁻¹)-----				Eficiência (%)
	1ª ARC	2ª ARC	3ª ARC	Média	
Afluente	57,1	278,5	134,2	156,6 ± 112,4	35,7 ± 16,5
Efluente	47,1	139,9	80,6	89,2 ± 47,0	

Tabela A.16. Variação de fósforo total (P_T) afluente e efluente de cada ARC utilizada no experimento e eficiência média na remoção dos mesmos

Amostra	----- P_T (mg L ⁻¹)-----				Eficiência (%)
	1ª ARC	2ª ARC	3ª ARC	Média	
Afluente	24,3	53,0	21,0	32,7 ± 17,6	65,2 ± 5,1
Efluente	9,5	19,1	6,1	16,3 ± 9,1	

Tabela A.17. Variação de potássio total (K_T) afluente e efluente de cada ARC utilizada no experimento e eficiência média na remoção dos mesmos

Amostra	----- K_T (mg L ⁻¹)-----				Eficiência (%)
	1ª ARC	2ª ARC	3ª ARC	Média	
Afluente	248	922	605	592 ± 337	49,5 ± 9,9
Efluente	124	377	367	289 ± 143	

Tabela A.18. Variação de compostos fenólicos (CF) afluente e efluente de cada ARC utilizada no experimento e eficiência média na remoção dos mesmos

Amostra	-----CF (mg L ⁻¹)-----				Eficiência (%)
	1ª ARC	2ª ARC	3ª ARC	Média	
Afluente	105,9	310	134	183 ± 110	55,0 ± 9,8
Efluente	59,6	123	52,0	78,3 ± 39,2	