

Artigo Técnico

Impactos ambientais de efluentes de laticínios em curso d'água na Bacia do Rio Pomba

Environmental impacts of dairy effluent on waterway in the Pomba River Basin

Roselir Ribeiro da Silva^{1*}, Eduardo Queija de Siqueira², Ina de Souza Nogueira³

RESUMO

A atividade láctea tem importância econômica e ambiental na Bacia do Rio Pomba. Com o objetivo de determinar possíveis impactos ambientais dos efluentes lácteos em cursos d'água, foram caracterizados durante o ciclo de produção os efluentes de cinco laticínios. Para selecionar as variáveis importantes na caracterização dos efluentes, usou-se a análise dos componentes principais (ACP). Os dados obtidos foram comparados com as normas legais e foi simulado o impacto do lançamento de efluentes, com e sem tratamento, em um curso d'água. As variáveis mais representativas nas análises dos efluentes foram condutividade, demanda bioquímica de oxigênio (DBO), fósforo total, turbidez, temperatura e pH. Os laticínios não atendem aos padrões legais para lançamento de efluentes, mesmo com estações de tratamento instaladas. O principal motivo é o baixo aproveitamento do soro, associado à ineficiência no tratamento dos efluentes. Ao simular o lançamento de efluentes, concluiu-se que a redução da DBO deveria ser de 60 a 70% para que as águas do rio não ultrapassassem os limites legais para DBO. A simulação foi importante na determinação dos impactos causados pelos efluentes e pode ser aplicada em outros laticínios, a fim de assegurar que o efluente não cause alterações ambientais. Desenvolver produtos ou tecnologia para aproveitar melhor o soro em pequenos laticínios, tratar adequadamente os efluentes, além de diminuir o consumo de água, foram consideradas ações importantes para reduzir os impactos ambientais nos recursos hídricos.

Palavras-chave: soro de leite; resíduos líquidos; impacto ambiental; modelagem.

ABSTRACT

Dairy activity has economic and environmental importance in the Pomba River Basin. Aiming to check for possible environmental impacts of dairy effluents on watercourses, five dairy effluents were characterized during the production cycle. To select the variables important for the characterization of effluents, it was applied a principal component analysis (PCA). Data obtained were compared with official regulations and it was simulated the impact of the discharge of effluents, treated or non-treated, on a waterway. The most significant variables in the effluent analysis were conductivity, biochemical oxygen demand (BOD), total phosphorus, turbidity, temperature and pH. Dairy plants do not comply with legal standards for effluent discharge, even with treatment plants installed. The main reason is the low use of whey, associated with inefficient treatment of effluents. By simulating the discharge of effluents, it can be concluded that the reduction of BOD should be 60-70% for the river water did not exceed the standard limits for BOD. The simulation was important to determine the impacts of dairy effluents and can be applied to other dairy plants in order to ensure that effluent cause no environmental damage. Developing products or technology for the better use of whey in small dairy plants, adequately treat the effluents, and reduce water consumption are considered important actions to reduce environmental impacts on water resources.

Keywords: whey; wastewater; environmental impact; modeling.

INTRODUÇÃO

Em 2013, a produção brasileira de leite foi de 32,4 bilhões de litros, sendo o Brasil o quarto maior produtor mundial (USDA, 2013). Minas Gerais, maior produtor estadual, foi responsável por 27,3% da produção nacional (CILEITE, 2012). A atividade leiteira nos municípios da Bacia Hidrográfica do Rio Pomba contribui com 3,6% da produção

estadual (IBGE, 2013), e os laticínios inseridos nesse contexto representam uma parcela importante na economia do setor.

Apesar da vasta contribuição econômica e social, a atividade láctea se destaca pela geração de resíduos líquidos, pelo lançamento de efluentes nas águas receptoras e pelo elevado consumo de água no processo de produção e higienização dos laticínios (CARVALHO; PRAZERES;

¹Professor do Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais (IF Sudeste MG) - Rio Pomba (MG), Brasil.

²Professor da Universidade Federal de Goiás (UFG) - Goiânia (GO), Brasil.

³Professora da UFG - Goiânia (GO), Brasil.

*Autor correspondente: roselir_silva@yahoo.com.br

Recebido: 22/07/14 - Aceito: 30/01/17 - Reg. ABES: 138062

RIVAS, 2013). A gestão ambiental dos laticínios, principalmente em pequenos e médios estabelecimentos, fica relegada a segundo plano e só é motivada pelos órgãos de controle (ROHLFES *et al.*, 2011).

A Política Nacional de Recursos Hídricos (BRASIL, 1997), ao estabelecer o conceito de usuário pagador, deixou o segmento lácteo em alerta. A cobrança pelo uso da água aumentaria os custos operacionais dos laticínios, uma vez que o consumo é elevado e o lançamento de efluentes é cobrado como serviço ambiental (BRIÃO & TAVARES, 2007), especialmente se for sem tratamento ou com elevada carga orgânica.

O soro é o principal agente poluidor dos laticínios e, quando transformado em queijo, representa 90% do volume do leite, pois para produzir 1 kg de queijo são necessários 10 L de leite, o que gera 9 L de soro (LEITE; BARROZO; RIBEIRO, 2012). A produção de queijo em 2013, no Brasil, foi de 722.000 t, o que gerou 695 milhões de litros de soro (USDA, 2013). Portanto, a importância ambiental do soro está relacionada ao volume, ao baixo aproveitamento e ao potencial poluidor (ROHLFES *et al.*, 2011). Dez litros de soro descartado equivalem à poluição causada por cinco habitantes (MOREIRA; SILVA; ANTUNES, 2000), além de aumentar a demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e o risco de eutrofização das águas (PRAZERES; CARVALHO; RIVAS, 2012).

No Brasil, a Resolução nº 430 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) normatiza o lançamento de efluentes nos rios (BRASIL, 2011), e a Resolução CONAMA nº 357 dispõe sobre a classificação dos corpos d'água (BRASIL, 2005). No Estado de Minas Gerais, a Deliberação Normativa nº 74 do Conselho Estadual de Política Ambiental (COPAM) – DN74 regulariza os empreendimentos com atividades modificadoras do meio ambiente e classifica os laticínios com potencial poluidor-degradador médio e capacidade instalada (L de leite.dia⁻¹) como pequena, média e grande (MINAS GERAIS, 2004).

Nos laticínios, as etapas de produção e higienização geram um grande volume de efluentes com elevada carga orgânica (CASTRO, 2007; SARAIVA & PEREIRA, 2009), que deve ser tratado antes de ser descartado. Os efluentes lácteos, se constituídos basicamente de resíduos de leite e soro, são fáceis de serem oxidados nas estações de tratamento de efluentes (ETEs) dos laticínios. No entanto, a acidez e os resíduos de detergentes alteram o pH, enquanto os sanitizantes inibem o crescimento bacteriano, tornando o tratamento mais complexo (BRIÃO & TAVARES, 2007). O tempo de detenção hidráulica nas ETEs, que pode variar de 8 a 13 dias para estabilizar a matéria orgânica, requer sistemas de maior porte, inviáveis em grandes volumes de efluentes produzidos (RIVAS *et al.*, 2010).

Os efluentes líquidos sem tratamento alteram a qualidade das águas, podendo inviabilizar o uso múltiplo da água a jusante do lançamento (AZZOLINI & FABRO, 2013). O mais grave é que os cursos d'água abastecem a população ao mesmo tempo em que recebem esgotos e efluentes industriais (LUCAS & CUNHA, 2007). O controle das ações de manejo se torna menos eficiente quando os efluentes não são bem caracterizados.

Portanto, a falta de informações do consumo de água, das características dos efluentes, da variação horária e diária na composição dos efluentes e dos processos produtivos, além da coleta de amostra única, são fatores que dificultam a avaliação do potencial poluidor das indústrias lácteas. Este estudo pretendeu atender a essas premissas e contribuir com mais detalhes para a elucidação desses fatores.

Em busca de averiguar os impactos do lançamento dos efluentes de laticínios nos cursos d'água da Bacia do Rio Pomba, questiona-se o quanto essa atividade pode afetar a qualidade e a sanidade das águas dessa bacia. Diante da situação, o objetivo deste artigo foi analisar os efluentes das indústrias lácteas da Bacia do Rio Pomba em um ciclo diário e os possíveis impactos na qualidade das águas. Para atender a esse objetivo, averiguou-se quais variáveis físicas e químicas seriam importantes nesta análise, como ocorre a variação da composição dos efluentes entre e dentro dos estabelecimentos, e se as variáveis físico-químicas atendem à Resolução CONAMA nº 430 (BRASIL, 2011), sendo, ainda, efetuada simulação da dinâmica de um curso d'água receptor de efluentes de laticínios.

MATERIAL E MÉTODOS

A área de drenagem da Bacia Hidrográfica do Rio Pomba é de 8.544 km². Com população de 618.000 habitantes (IBGE, 2011), a bacia é formada por 34 municípios mineiros e 3 fluminenses. No uso do solo da bacia predominam as pastagens para criação de gado leiteiro, principal atividade econômica da região, onde estão inseridos os laticínios. A distribuição espacial dos laticínios da Bacia do Rio Pomba, com os 5 laticínios amostrados que representam 11,4% dos estabelecimentos lácteos da bacia, são apresentados na Figura 1.

Dos laticínios analisados, três são de pequeno porte, e dois, de médio porte. O aproveitamento do soro é parcial e consiste em fabricação de ricota e disposição para alimentação animal. Porém, quando não há demanda, o soro é conduzido para as ETEs, e, no caso de ausência destas, é misturado ao efluente e lançado sem tratamento nos cursos d'água (Quadro 1).

Os laticínios P e V não têm ETE instalada e lançam os resíduos líquidos diretamente nos cursos d'água. Os laticínios B e D têm depósitos onde os efluentes passam por caixas plásticas de 1.000 a 2.000 L, mas sem um tempo de detenção hidráulica padronizado, sem caixa de areia e de gordura e sem controle de pH, o que não configura necessariamente uma ETE dentro das normas técnicas. O laticínio C disponibiliza parte do soro para alimentação animal, o excedente passa por um depósito de alvenaria e o efluente final é lançado no curso d'água.

Foram realizadas duas amostragens dos efluentes nos laticínios durante o ciclo de produção diária. Durante a amostragem averiguou-se a descarga dos efluentes, aferindo a vazão por cronometragem e vertedouro triangular. O coeficiente de consumo

de água (L água.L⁻¹ de leite processado) foi estimado a partir do volume de leite processado e o consumo de água diário. Esses dados foram comparados com o recomendado pela *United Nations Publications* – UNEP (2000).

Nos efluentes dos laticínios foram aferidas, a cada 30 minutos, as variáveis pH, temperatura (TEMP), salinidade (SAL), potencial redox (ORP), condutividade elétrica (CND), oxigênio dissolvido (OD) e sólidos totais dissolvidos (TDS), utilizando a sonda Hannahi 9828. A turbidez (TURB) foi aferida com turbidímetro Hanna HI98703.

Para análise de DBO, demanda química de oxigênio (DQO) e óleos e graxas (OG) os efluentes foram amostrados a cada espaço de uma hora, e analisados de acordo com os métodos padronizados (APHA; AWWA; WEF, 2012). Para análise de nitrogênio total (NT) e fósforo total (PT), coletou-se 1L de efluente a cada espaço de uma hora, sendo posteriormente analisado no espectrofotômetro Biospectro SP-220, de acordo

com método de Golterman, Clymo e Ohnstad (1978). Para análise de coliformes totais (COLT) e termotolerantes (COLF), amostras foram coletadas a cada espaço de duas horas, e os métodos de análise foram os recomendados por APHA, AWWA e WEF (2012).

A síntese das informações foram efetuadas por meio da ACP (LATTIN; CARROLL; GREEN, 2011). Essa análise foi utilizada para verificar a dinâmica das variáveis dos efluentes dos laticínios com e sem ETE, e ainda condensar as informações contidas em um conjunto menor de variáveis explicativas. Para identificar os laticínios, os dias e os horários da coleta no diagrama da ACP, foi estabelecida uma codificação (Quadro 2).

A capacidade de depuração do rio a jusante do lançamento do efluente de um laticínio foi simulada em função da DBO. Adotou-se o modelo matemático de primeira ordem (Equação 1), em que a taxa de reação é proporcional à concentração do reagente.

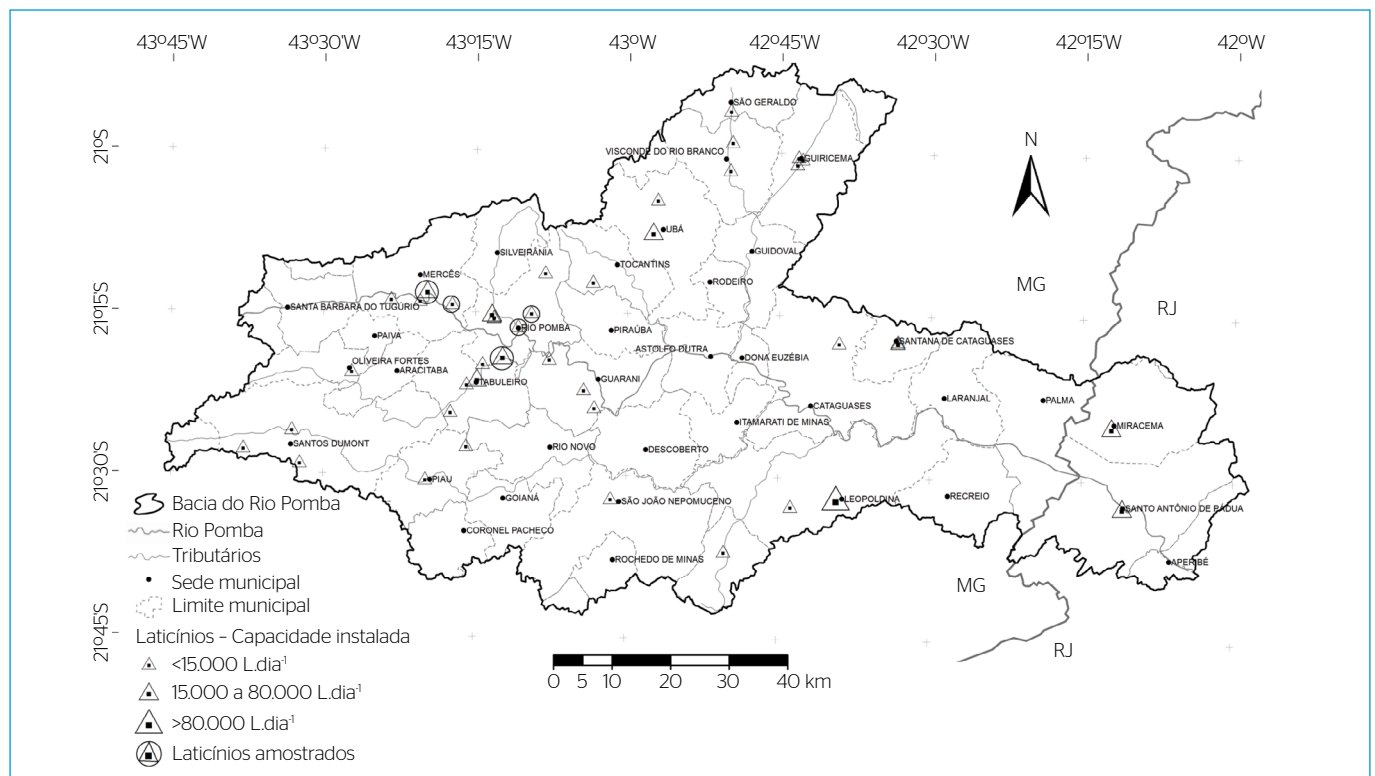


Figura 1 – Localização dos laticínios na Bacia do Rio Pomba, sedes e limites municipais e rede de drenagem, destacando os laticínios amostrados (n=5).

Quadro 1 –Caracterização dos laticínios avaliados em dois municípios da Bacia do Rio Pomba (n=5).

Laticínio	Porte*	CI	Classe*	Produtos processados	Presença de ETE	Uso parcial do soro
P	Médio	20.000	3	Queijos e ricota	Não	Sim
V	Pequeno	1.500	1	Queijos, iogurte, doce de leite e manteiga	Não	Não
B	Pequeno	10.000	1	Queijos, doce de leite e manteiga	Sim	Não
D	Pequeno	1.500	1	Queijos e ricota	Sim	Sim
C	Médio	20.000	3	Queijos, manteiga, ricota e iogurte	Sim	Sim

*Deliberação Normativa COPAM 74-04 (MINAS GERAIS, 2004); CI: capacidade instalada (L.dia⁻¹); ETE: estação de tratamento de efluentes.

$$\frac{dC}{dt} = -kd.C \quad (1)$$

Considerando $C = C_0$ em $t = 0$ e integrando a Equação 1, tem-se a Equação 2:

$$\ln C - \ln C_0 - kdt \text{ ou } C = C_0 \cdot e^{-kdt} \quad (2)$$

Em que:

C é a DBO em um tempo t (mg.L⁻¹);

C₀, a DBO inicial do rio (mg.L⁻¹);

kd, o coeficiente de redução da DBO (1.d⁻¹); e

t, o tempo (d).

Para testar a hipótese de que os efluentes de laticínios sem tratamento alteram a qualidade da água do rio, foram consideradas três condições de eficiência de redução (ER) da DBO (Quadro 3). Cada condição foi gerada

Quadro 2 - Informações dos laticínios estudados (n=5) com os códigos das amostragens. A letra representa o laticínio; o primeiro número, o dia; e o segundo número, a hora da amostragem.

Laticínio	Data	Dia	Códigos								
			8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h
P	21-05	1º	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18	P19
	28-05	2º	P21	P22	P23	P24	P25	P26	P27	P28	P29
V	31-05	1º	V11	V12	V13	V14	V15	V16	-	-	-
	03-06	2º	V21	V22	V23	V24	V25	V26	V27	V28	V29
B	08-06	1º	B11	B12	B13	B14	B15	B16	B17	B18	B19
	18-06	2º	-	B21	B22	B23	B24	B25	B26	B27	-
D	21-08	1º	-	D11	D12	D13	D14	-	-	-	-
	27-08	2º	-	D21	D22	D23	D24	D25	D26	-	-
C	22-08	1º	-	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	-
	28-08	2º	-	C21	C22	C23	C24	C25	C26	-	-

Quadro 3 - Dados de entrada para modelagem do decaimento da demanda bioquímica de oxigênio.

Dados de entrada	Mínimo	Máximo	Fonte dos dados
Qr (m³.s ⁻¹)	3,20	4,20	Campo
Qe (m³.s ⁻¹)	0,0016	0,002	Campo
DBOr (mg.L ⁻¹)	1,80	4,00	Laboratório
DBOe (mg.L ⁻¹)	1.000,00	20.000,00	Laboratório
Vr (m.s ⁻¹)	0,45	0,65	Campo
Kd	0,40	0,80	Von Sperling (2007)
ER1=0%	0,00	0,00	Observado
ER2=40 a 50%	40,00	50,00	Atribuído
ER3=60 a 70%	60,00	70,00	Atribuído

Q: vazão; r: rio; e: efluente; V: velocidade; Kd: coeficiente de decaimento da DBO; ER: eficiência da redução da DBO do efluente.

1.000 vezes, usando a simulação de Monte Carlo. Assim, cada entrada teve a incerteza adotada, com distribuição aleatória e uniforme. Nas simulações, cada parâmetro foi variado entre um mínimo e um máximo, com igual probabilidade de ocorrência em qualquer valor da faixa adotada.

O laticínio simulado processa 20.000 L de leite.dia⁻¹ e gera 50.000 L de efluentes. O modelo simula o decaimento da DBO do rio a jusante do lançamento até a foz a 12 km. O código adotado para simulação foi gerado no programa R (R CORE TEAM, 2014). No modelo de simulação foi exemplificada a condição de redução de DBO ER1. Para simular a condição ER2 e ER3, basta substituir o valor de Y pelo valor mínimo (Quadro 3) e X pela variação de 10%. As etapas geradas para simulação foram adaptadas de Von Sperling (1993).

Para testar a sensibilidade do modelo, os dados de entrada foram separados pelo percentil (50%) da DBO final em “abaixo” e “acima” (Quadro 3). Considerou-se até 50% “abaixo” e mais de 50% “acima” (VON SPERLING, 2007). Após a separação, os dados de entrada “abaixo” e “acima” foram comparados pelo teste de média de Mann-Whitney (MONTGOMERY & RUNGER, 2011). Sob a hipótese nula, a distribuição a partir de ambos os grupos, “abaixo” e “acima”, é a mesma para o nível de significância de 5% de probabilidade e, neste caso, os dados de entrada não foram importantes para o modelo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Entre os 44 laticínios em atividade, 1 é de grande porte, 18% são médios e 80%, de pequeno porte. Em 2012, os 37 municípios da bacia produziram 877.000 L de leite.dia⁻¹ (IBGE, 2013). Os produtos mais fabricados na região foram os queijos minas frescal, muçarela, ricota, minas padrão e manteiga (CARNEIRO *et al.*, 2010). No processo de fabricação, todos esses produtos geram soro como subproduto.

De acordo com Giroto e Pawlowsky (2001), somente 19,4% do soro produzido em um laticínio no Estado do Paraná era transformado em produtos alimentícios. Recentemente, o soro passou a ser considerado um coproduto nas indústrias de laticínios (PRAZERES; CARVALHO & RIVAS, 2012; ROHLFES *et al.*, 2011). No entanto, o baixo valor pago pelo soro, associado à dificuldade de estocagem e conservação e ao elevado custo da tecnologia para transformação em bebidas lácteas e soro em pó — produtos considerados mais nobres — inviabiliza o aproveitamento integral, principalmente nos pequenos estabelecimentos.

Como o aproveitamento total do soro ainda não é uma realidade nos laticínios da Bacia do Rio Pomba, parte dele — ou, às vezes, quase a sua totalidade — é descartada nos rios ou nas ETES. Dos cinco laticínios estudados, três têm ETE, porém só a estrutura física não garante eficiência de tratamento. Não existe manutenção nem operador responsável pelo funcionamento das ETES e a dificuldade de tratar os efluentes lácteos é ampliada pela falta de gestão do consumo de água,

pelo manejo inadequado dos resíduos líquidos e pela variação da TEMP e do pH dos efluentes (MENDONÇA *et al.*, 2012).

No presente estudo, o ciclo de produção está relacionado ao volume de leite processado e aos tipos de produtos fabricados. Os laticínios de médio porte (P e C) têm, em média, um ciclo de 8 h.dia⁻¹, e os laticínios de pequeno porte (V, B e D) operam 6 h.dia⁻¹ (Tabela 1 e Quadro 2).

O volume de efluente, a tecnologia de fabricação, as condições de funcionamento da indústria e o baixo aproveitamento do soro interferem na composição do efluente e, conseqüentemente, na eficiência do tratamento (PATITNAIK *et al.*, 2008). Talvez seja por esses motivos, somados ao econômico, que, no Brasil, o tratamento de efluentes em laticínios é realizado por somente de 6 a 8% dos estabelecimentos (SOUZA, 2006).

As variáveis CND, TDS, SAL, TURB, DBO, DQO, NT e PT apresentaram maiores coeficientes de correlação, enquanto TEMP, OD, pH e OG foram menos correlacionadas com as demais variáveis (Figura 2). Os cinco maiores coeficientes de correlação positiva ocorrem entre TDS-CND, DQO-DBO, SAL-TDS, DBO-TDS e DQO-PT. A variável TURB apresentou correlação positiva e significativa com TDS, CND, DBO, DQO e PT, e, sendo uma análise mais simples, pode servir de indicativo da composição dos efluentes antes de realizar os demais exames.

A ACP selecionou as variáveis importantes na avaliação dos efluentes. Os dois primeiros componentes explicaram 83,8% da variância (Tabela 2). O primeiro eixo contribuiu com 65,5% da variância e está associado aos laticínios com efluentes de elevada CND, DBO e PT. As variáveis NT e TURB tiveram importância secundária e estão mais associadas aos laticínios sem ETE (P e V). O segundo eixo contribuiu com 16,4% da variância e esteve relacionado são pH e à TEMP (Tabela 2 e Figura 3). O agrupamento dos laticínios com ETE (B, C e D) apresentou baixo pH. Entre os laticínios sem ETE (P e V), o laticínio V apresentou menor valor de DBO, CND e PT (Figura 3). As amostras V14 e V28 apresentaram maiores valores de DBO, CND e PT, pois a amostragem coincidiu com o horário de descarte do soro durante o processamento.

O coeficiente do consumo de água variou de 1,1 a 12,0, com média de 4,4 (Figura 4). Ao considerar que cada litro de leite transformado em queijo produz, em média, 0,9 L de soro, para cada litro de leite processado foram gerados 5,3 L de efluentes. Observou-se que os laticínios de pequeno porte gastaram mais água, provavelmente devido à falta de controle do consumo e à maior disponibilidade de água proveniente de poços artesianos, além de vazamentos e registros abertos.

Tabela 1 - Variáveis físico-químicas e biológicas dos efluentes de laticínios (n=5) ao longo de um ciclo de produção.

IL	CP		CND	TDS	OD	TURB	SAL	DBO	DQO	PT	pH	COLT	COLF
P	9	Máx.	6.982	3.541	6,50	5.700,00	3,90	19.964,00	61.045,00	456,00	11,8	1,1E5	2,1E4
		Mín.	538	269	1,50	408,00	0,60	1.544,00	4.823,00	11,70	3,0	2,3E3	2,1E2
		Med.	3.574	1.827	3,40	1.293,00	1,90	9.450,00	24.895,00	180,00	6,5	1,1E5	2,1E4
		CV	48	48	30,00	81,00	49,00	66,00	71,00	74,00	33,0	22,0	48,0
V	6	Máx.	4.431	2.221	7,30	8.440,00	2,40	16.080,00	56.201,00	1.078,00	10,2	1,1E5	<30,0
		Mín.	45	23	3,20	3,70	0,02	1,40	1,30	0,10	7,1	<30,0	<30,0
		Med.	178	89	6,40	90,00	0,08	281,00	894,00	6,50	7,9	5,5E4	<30,0
		CV	197	197	15,00	229,00	205,00	197,00	201,00	147,00	7,6	36,0	197,0
B	8	Máx.	4.480	2.241	2,90	3.608,00	2,40	8.278,00	25.506,00	104,00	7,6	2,4E3	2,1E2
		Mín.	2.064	1.033	0,00	1.157,00	1,10	2.013,00	6.569,00	51,10	3,7	<30,0	<30,0
		Med.	3.241	1.624	0,50	2.550,00	1,70	3.596,00	12.104,00	63,50	5,6	1,2E3	6,0E1
		CV	16	17	106,00	31,00	17,00	51,00	47,00	21,00	27,0	16,0	17,0
D	4	Máx.	2.951	1.568	4,70	1.056,00	1,70	2.996,00	8.459,00	81,00	3,9	<30,0	<30,0
		Mín.	2.347	1.134	2,70	115,00	1,20	2.149,00	6.458,00	49,00	3,5	<30,0	<30,0
		Med.	2.718	1.364	4,10	787,00	1,40	2.368,00	7.606,00	66,80	3,7	-	-
		CV	7	7	13,00	41,00	8,00	8,00	7,00	15,00	3,0	7,0	7,0
C	7	Máx.	4.089	2.138	3,80	2.561,00	3,10	6.202,00	14.050,00	96,00	5,4	1,3E4	1,5E3
		Mín.	2.158	1.167	1,50	959,00	1,70	4.289,00	8.082,00	42,00	3,9	2,8E2	3,6E0
		Med.	3.212	1.749	2,50	1.711,00	2,10	5.159,00	12.774,00	54,80	4,6	6,6E3	6,0E2
		CV	18	17	23,00	23,00	17,00	11,00	18,00	26,00	11,0	18,0	17,0

IL: indústria de laticínio; CP: ciclo de produção (horas); Máx.: máximo; Mín.: mínimo; Med.: mediana; CV: coeficiente de variação (%); CND: condutividade ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$); TDS: sólidos totais dissolvidos; OD: oxigênio dissolvido; TURB: turbidez(NTU); SAL: salinidade; DBO: demanda bioquímica de oxigênio; DQO: demanda química de oxigênio; PT: fósforo total ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$); COLT: coliformes totais; COLF: coliformes termotolerantes (NMP/100 mL).

A higienização também contribuiu para o aumento do consumo, pois foi realizada manualmente e sem uma rotina, e o resfriamento do leite em tanques de parede dupla, em que a água circula e não é reaproveitada, também desperdiça muita água.

Resultados semelhantes aos observados neste estudo foram relatados por Castro (2007), com coeficiente de consumo de 5,7, enquanto Saraiva *et al.* (2009) apresentaram coeficiente de 3,2. O coeficiente de consumo de água em nível mundial varia de 1,2 a 2,5, mas chega a 10,0. Para a UNEP (2000), esse coeficiente deveria estar entre 0,8 e 1,0. Para alcançar essa meta, o laticínio deve contar com equipamentos e instalações apropriadas, higienizações automatizadas, bem como diminuir o desperdício mantendo os registros fechados ou instalando mecanismos que obstruam a vazão da água quando não houver necessidade de uso.

De acordo com a ACP (Tabela 2) as variáveis CND e PT foram importantes na avaliação dos efluentes lácteos, porém não apresentam

Tabela 2 - Correlação das variáveis obtidas nos efluentes dos laticínios (n=5) com os dois primeiros componentes.

Variáveis	Eixo 1	Eixo 2
CND	-0,4216	0,0903
DBO	-0,4182	-0,0272
PT	-0,4105	-0,0783
TURB	-0,4026	0,0627
NT	-0,3950	0,2091
OG	-0,3090	-0,3213
TEMP	-0,1800	-0,6557
pH	0,1809	-0,6357
% total da variância	62,5000	18,3000
% acumulada da variância	62,5000	83,8000

*Em negrito estão os coeficientes importantes para a formação dos componentes. CND: condutividade; DBO: demanda bioquímica de oxigênio; PT: fósforo total; TURB: turbidez; NT: nitrogênio total; OG: óleos e graxas; TEMP: temperatura.

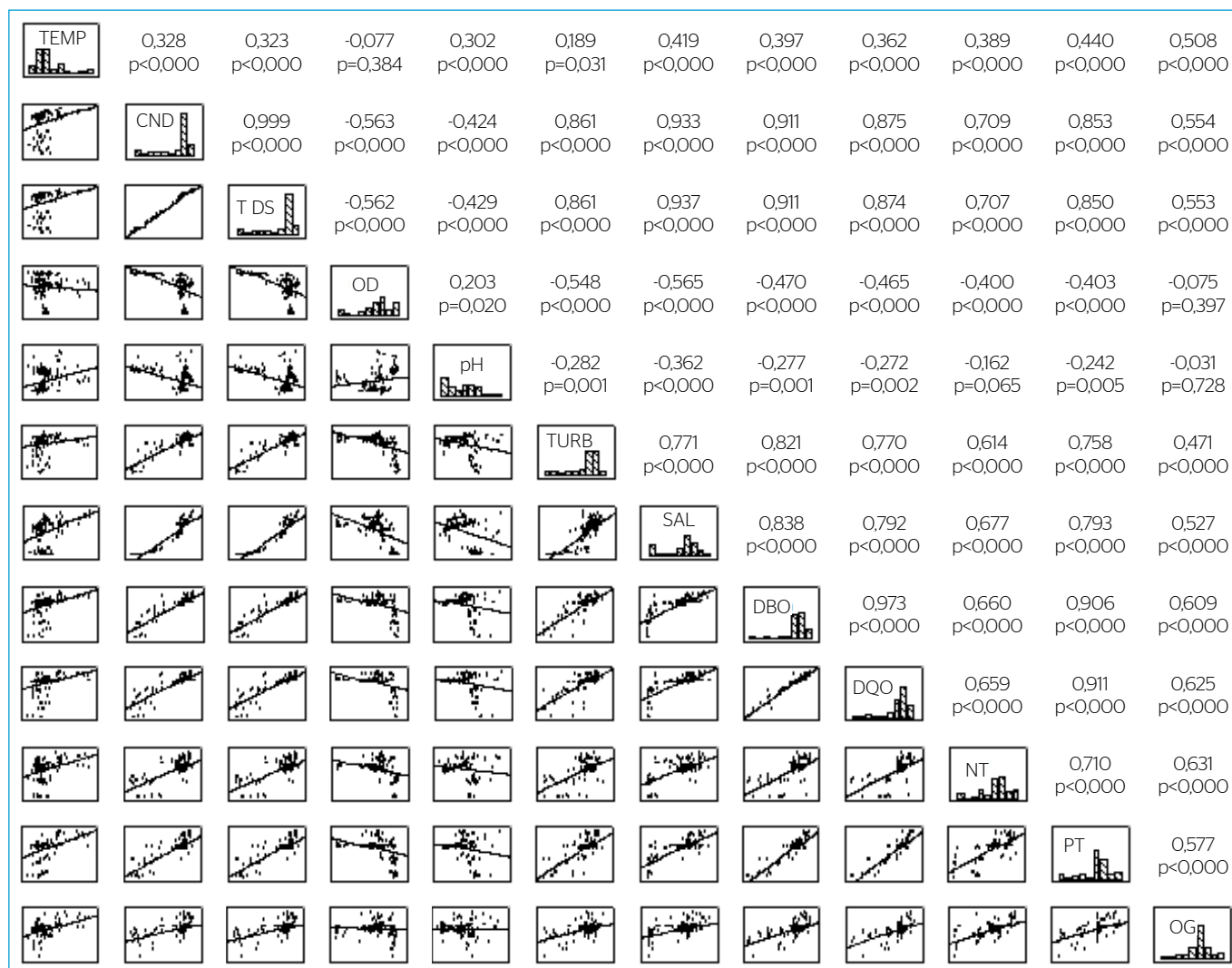


Figura 2 - Matriz de correlação entre as variáveis medidas nos efluentes dos laticínios com coeficientes e valores de p<0,05. A codificação das variáveis encontra-se no item "Materiais e métodos".

limites para lançamento na CONAMA nº 430. Para a DBO, prevê remoção mínima de 60% após tratamento do efluente, mas também não apresenta exigência de limites máximos de DBO para lançamento (BRASIL, 2011). Assim, neste estudo, OG, NT, pH e TEMP foram comparados com os padrões legais e os laticínios não atenderam à legislação (Figura 5).

O excesso de NT, com PT, causa eutrofização do meio aquático (PRAZERES; CARVALHO; RIVAS, 2012). Valores elevados de OG promovem a diminuição do OD na água, além de causar problemas nas ETEs, pois floculam nos depósitos e inibem a digestão anaeróbia (MENDES & CASTRO, 2004). Outra observação neste estudo foi que nos laticínios com ETE não foi realizado tratamento primário, pois não havia caixas de gordura instaladas.

Os valores de pH dos laticínios com ETE (B, C e D) não atenderam à CONAMA nº 430 (BRASIL, 2011), além de o pH estar fora da faixa de 5 a 9, recomendada para melhor desempenho dos microrganismos responsáveis pela fermentação anaeróbia que diminui a DBO (PEREIRA; CAMPOS; MOTERANI, 2009), o que pode explicar, em parte, a baixa eficiência das ETEs.

A variabilidade na composição dos efluentes, principalmente pH e TEMP (Figura 6), afeta o desenvolvimento dos microrganismos deterioradores e pode inviabilizar o funcionamento da ETE. Nos laticínios P e V (sem ETE), a variação na composição dos efluentes foi maior que nos laticínios com ETE, fato ligado à disposição do soro em intervalos não regulares. A variação da composição do efluente que não passou pela ETE aconteceu em função do que é lançado no momento da coleta. Nos laticínios são elaborados vários tipos de produtos lácteos

que produzem diferentes tipos de resíduos, além das variações que ocorrem nos processos de higienização, nos quais são usados detergentes que vão do ácido ao alcalino. Assim, ficou justificada a amostragem em intervalos menores, como a realizada neste estudo, o que proporcionou uma avaliação mais criteriosa e fiel dos efluentes lácteos.

Nos laticínios B, D e C (com ETE), o pH ficou abaixo de 5, fato que pode explicar a elevada DBO e a ausência de coliformes em algumas amostras (Tabela 1), pois esses têm o crescimento paralisado em baixo pH (TAMANINI *et al.*, 2012). A elevada carga orgânica do efluente, promovida pela presença de resíduos de leite e soro, favorece a acidificação do meio, importante na primeira fase do tratamento de efluentes, na qual ocorre o desenvolvimento das bactérias anaeróbias

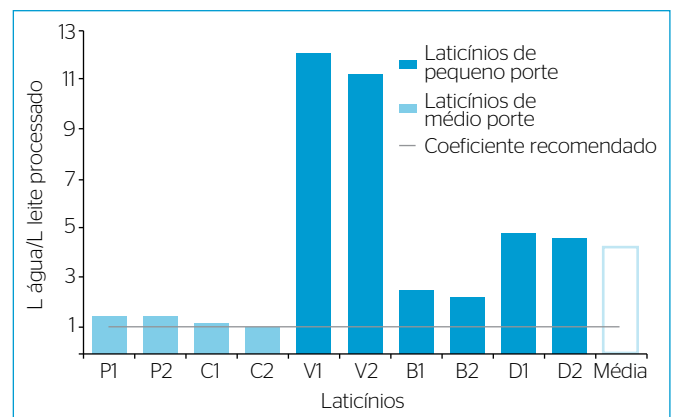


Figura 4 – Coeficiente de consumo de água por litro de leite processado. A linha indica o máximo recomendado pela *United Nations Publications - UNEP (2000)*. Na abscissa a letra é o código do estabelecimento, e o número ao lado da letra representa o dia da amostragem.

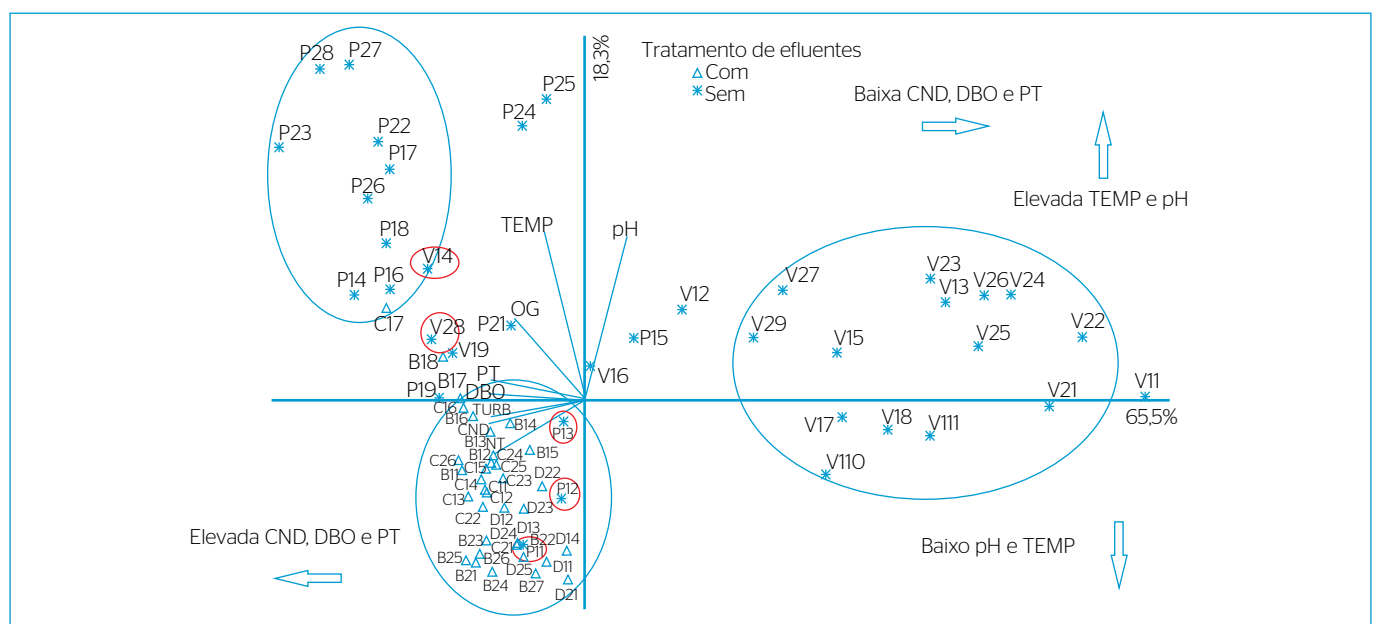


Figura 3 – Diagrama de ordenação da análise dos componentes principais aplicada às variáveis físicas e químicas (n=13) dos estabelecimentos lácteos (n=5), durante dois ciclos de produção, codificados no Quadro 2.

acidificantes, responsáveis pela estabilização da matéria orgânica e pela produção de ácidos para desenvolvimento das bactérias metanogênicas (PEREIRA; CAMPOS; MOTERANI, 2009).

Na segunda fase do tratamento, a manutenção de pH próximo do neutro é importante para as arqueas metanogênicas, pois tratamentos em duas fases podem ser realizados com o pH da primeira fase (acidogênico) entre 5,0 e 5,5, sem inibição das bactérias anaeróbias, mas com a segunda fase (metanogênica) com pH entre 6,8 e 7,5, pois as arqueas metanogênicas são mais sensíveis ao pH (ZHONG; STEVENS; HANSEN, 2015). No caso das ETEs dos laticínios estudados, o tratamento foi em estágio único e não houve controle do pH durante o tratamento.

Nos laticínios com ETE, a variação na composição dos efluentes foi menor, pois o tempo de detenção hidráulica promove a mistura e equaliza a TEMP; mas, mesmo com ETE, os efluentes continuam com alta carga orgânica e podem alterar as condições das águas receptoras. Para testar como essa carga orgânica altera as condições das águas dos rios, foi simulado como se comporta a DBO de um rio receptor de efluente lácteo.

A simulação do lançamento de efluente testou três condições de DBO de um efluente lácteo lançado no rio. Após a geração dos dados,

a DBO do efluente apresentou distribuição aleatória e uniforme sem tendência modal (Figura 7A). A frequência dos dados gerados em função da ER da DBO das três condições também tem distribuição uniforme (Figuras 7B, 7C e 7D). O formato dos histogramas é semelhante, mas estes apresentaram diferentes valores de DBO na abscissa. Quanto maior a ER da DBO do efluente, menor é a frequência de valores da DBO do rio fora do limite ($5 \text{ mg O}_2 \cdot \text{L}^{-1}$) para rios classe 2 (BRASIL, 2005). Na condição sem tratamento (ER = 0%) existe a probabilidade de 68% dos valores de DBO do rio estarem fora do padrão (Anexo 1).

A distribuição de frequência acumulada apresentou os valores da DBO do rio para as três condições de ER da DBO do efluente (Figura 8). Interpretando a Figura 8, podem ser obtidos os valores de DBO do rio em função da condição de tratamento ao associar a porcentagem da frequência acumulada com os valores da DBO. Por exemplo, se o tratamento de efluente tivesse uma ER da DBO de 60 a 70% (Figura 7D e Figura 8), atenderia a 96% dos valores da DBO preconizados pela Resolução CONAMA nº 357 (BRASIL, 2005).

Na análise de sensibilidade do modelo, os dados de entrada DBO e Vr, na condição 1, não foram significativos ($p > 0,05$). As demais

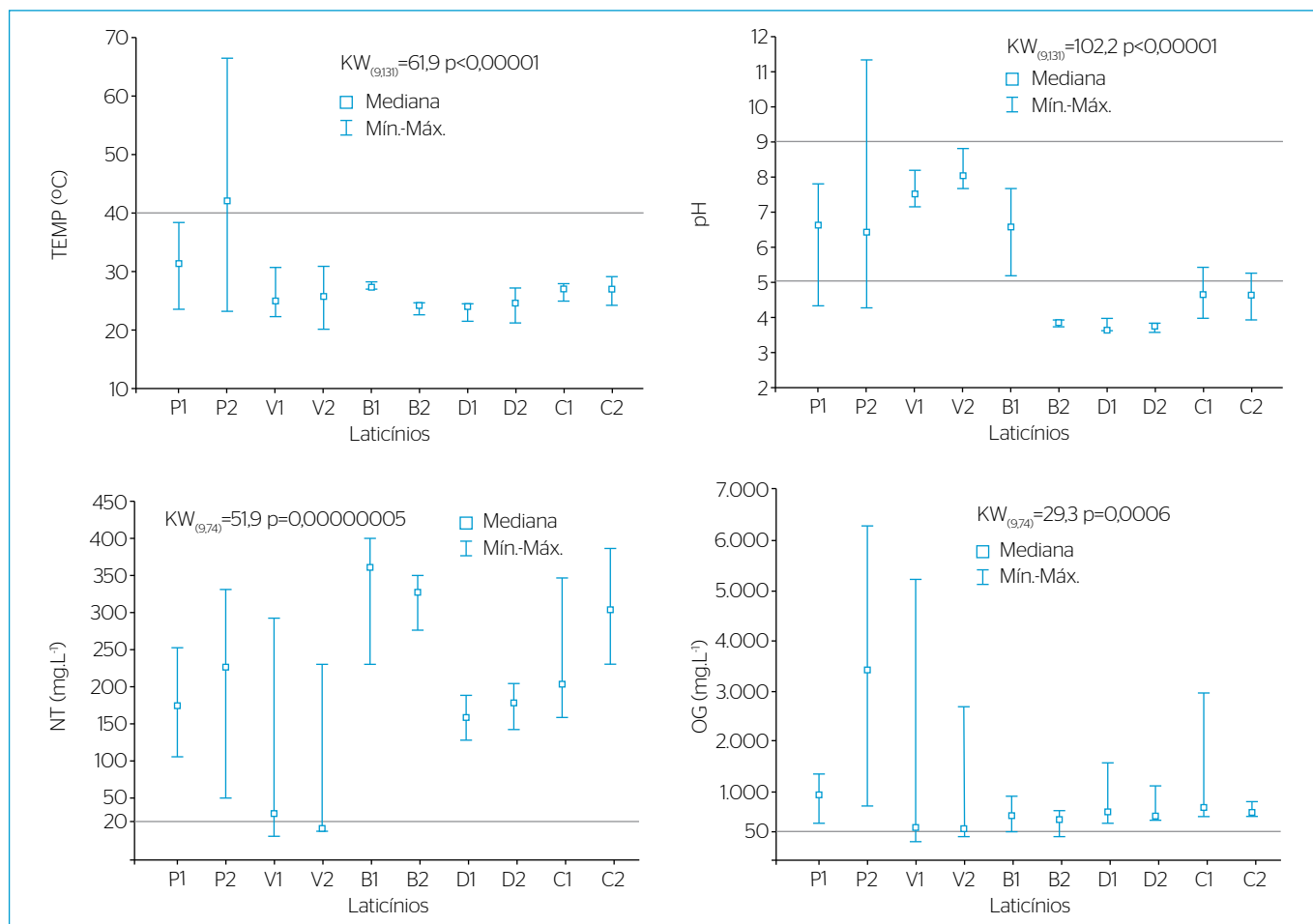


Figura 5 - Variação de temperatura, pH, nitrogênio total e óleos e graxas dos efluentes dos laticínios comparados com o padrão da Resolução CONAMA nº 430 (linha grossa) (BRASIL, 2011). Na abscissa, a letra é o código do laticínio, e o número ao lado da letra representa o dia da amostragem.

variáveis, em todas as condições de ER da DBO, foram importantes e significativas para a modelagem ($p < 0,05$).

Observou-se que ao trabalhar com dados primários houve a diminuição da incerteza dos resultados e a possibilidade de redução da faixa de variação

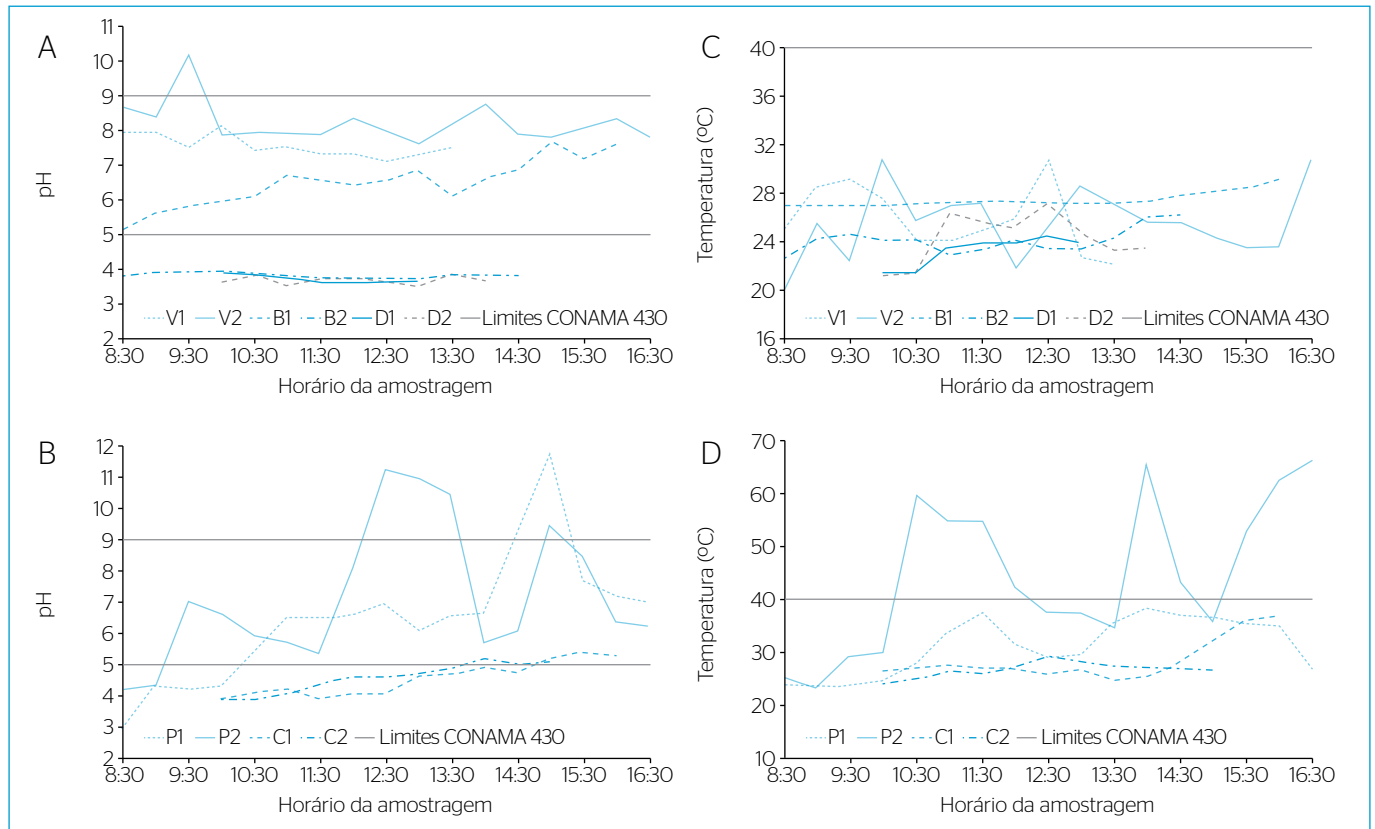


Figura 6 - Variação de pH e temperatura ao longo dos ciclos de produção diária, sendo (A) pH em laticínios de pequeno porte; (B) pH em laticínios de médio porte; (C) temperatura em laticínios de pequeno porte; (D) temperatura em laticínios de médio porte. Na legenda a letra representa o código do laticínio; e o número ao lado da letra, o dia da amostragem. A linha contínua representa os limites, de acordo com a Resolução CONAMA nº 430 (BRASIL, 2011).

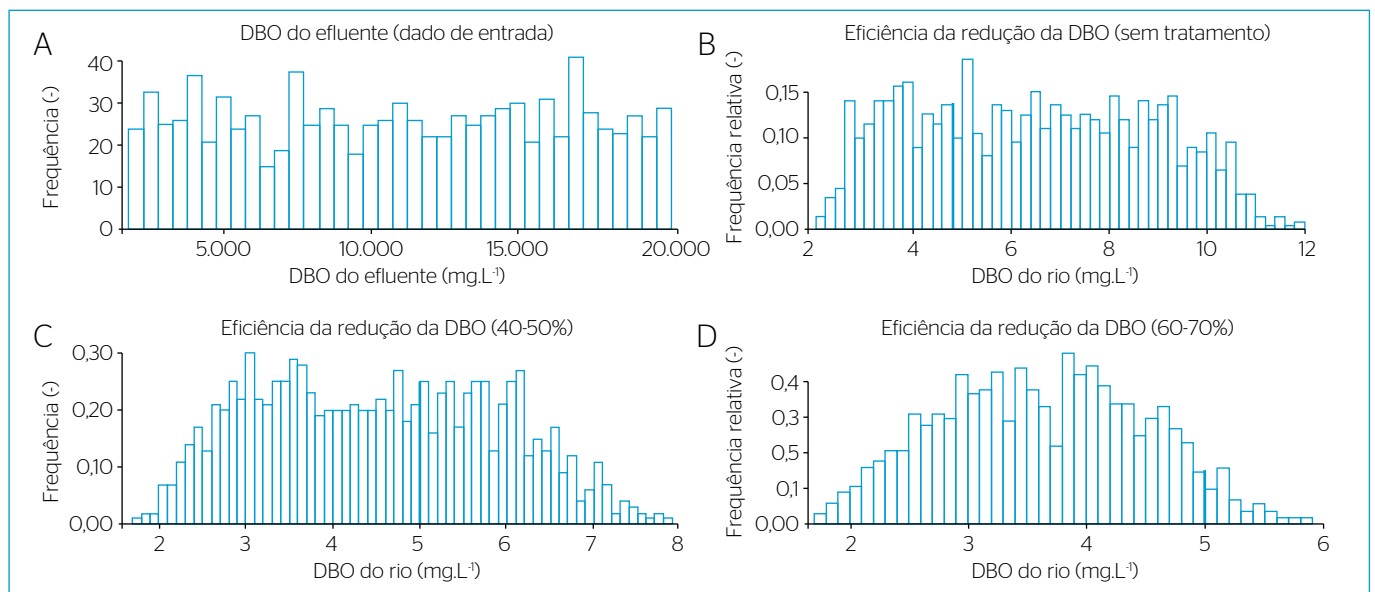


Figura 7 - Distribuição de frequência dos dados de entrada e saída da modelagem simulados mil vezes. (A) Frequência de demanda bioquímica de oxigênio do efluente; (B) sem tratamento de efluentes; (C) efluente tratado com eficiência de redução da demanda bioquímica de oxigênio de 40 a 50%; (D) efluente tratado com eficiência de redução da demanda bioquímica de oxigênio de 60 a 70%. A linha vertical em destaque representa o limite de 5 mg O₂/L de demanda bioquímica de oxigênio para rios classe 2 (BRASIL, 2005).

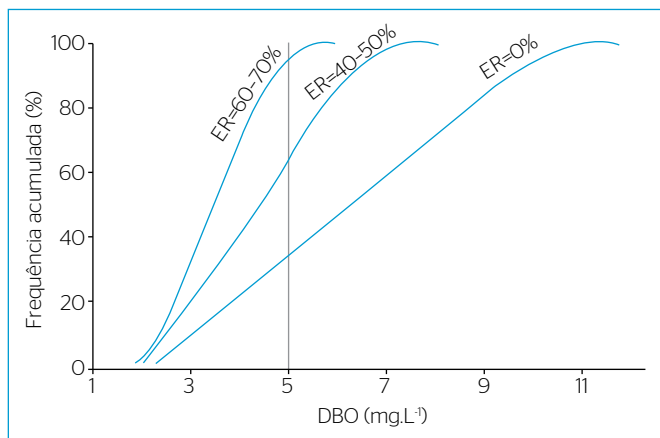


Figura 8 - Distribuição da frequência acumulada para demanda bioquímica de oxigênio do rio com lançamento de efluentes em três condições de eficiência de redução da demanda bioquímica de oxigênio.

adotada, tornando o modelo mais consistente. É importante destacar que a modelagem utilizando a técnica da incerteza possibilita maior segurança nas tomadas de decisões (RECKHOW, 1994), pois não fica condicionada a uma única eficiência de tratamento do efluente e pode reduzir custos de implantações e erros de projetos com menores consequências ambientais.

A descarga de efluentes dos estabelecimentos lácteos analisados é dependente da quantidade de leite processada diariamente, dos tipos de produtos fabricados, do coeficiente de consumo de água e do reaproveitamento de soro. Há ampla variação na composição dos efluentes entre os estabelecimentos, dentro do mesmo estabelecimento e, principalmente, nos laticínios sem tratamento de efluentes.

A Bacia do Rio Pomba tem produção média diária de 877.000 L de leite (IBGE, 2013). Se todo esse leite fosse processado nos 44 laticínios da bacia, e como cada litro de leite processado gera 0,9 L de soro (LEITE; BARROZO; RIBEIRO, 2012), sendo que somente 20% é aproveitado, seriam 631.440 L de soro descartado. Ao somar esse volume de soro e água consumida, seriam gerados 4,5 milhões de litros de efluentes a serem lançados nos rios.

Considerando que a DBO média dos efluentes analisados neste estudo foi de 5.247 mg.L⁻¹, o somatório da DBO seria 23,5 t.dia⁻¹, que equivale a DBO de 436.320 habitantes ou 70,5% da população da Bacia do Rio Pomba.

Das variáveis analisadas, foram selecionadas as mais importantes e representativas para avaliar a composição dos efluentes. A extrapolação da simulação para toda a Bacia Hidrográfica do Rio Pomba pode assumir grande importância no processo de impacto dos recursos hídricos, uma vez que ocorre a descarga de efluente sem tratamento ou com tratamento inadequado. Portanto, é necessária uma avaliação pelos gestores dos laticínios quanto ao controle de desperdício nas etapas de produção, consumo de água e tratamento adequado dos efluentes, associada ao destino adequado e mais nobre para o soro lácteo.

CONCLUSÃO

De acordo com os resultados apresentados, existe um passivo ambiental muito grande em relação ao tratamento de efluentes lácteos nos laticínios da Bacia do Rio Pomba. Muitas indústrias ainda lançam os efluentes sem tratamento nos cursos d'água, e aquelas indústrias que têm tratamento de efluentes não o fazem com eficiência, merecendo mais atenção e cuidado por parte dos técnicos e gestores.

O uso de ferramentas de simulação como a deste trabalho, desde que disponham de dados de entrada confiáveis, pode ser muito útil na escolha de uma determinada ação de controle ambiental, pois cenários desconhecidos podem ser avaliados sem custos adicionais e, ainda, com maior confiabilidade do que análises isoladas.

Se uma gestão integrada entre produção, produtividade, redução do consumo, geração de resíduos e maior reaproveitamento não for implantada nos laticínios, não será possível, por mais que se queira, atender às exigências legais e obter resultados ambientais satisfatórios. Portanto, há muito que se fazer, já que o que acontece a montante afeta o que está a jusante, pois, afinal, tudo é interligado, principalmente quando se trata de uma bacia hidrográfica.

REFERÊNCIAS

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA); AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (AWWA); WATER ENVIRONMENT FEDERATION (WEF). (2012) *Standard methods for examination of water and wastewater*. 22. ed. Washington. D. C.: American Public Health Association. 1.360 p.

AZZOLINI, J.C.; FABRO, L.F. (2013) Monitoramento da eficiência do sistema de tratamento de efluentes de um laticínio da região meio-oeste de Santa Catarina. *Unoesc & Ciência ACET*, v. 4, p. 43-60.

BRASIL. (1997) Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Política Nacional de Recursos Hídricos cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. *Diário Oficial da União*, Brasília.

_____. (2005) Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. *Diário Oficial da União*, Brasília.

_____. (2011) Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 430, de 16 de maio de 2011. *Diário Oficial da União*, Brasília.

- BRIÃO, V.B.; TAVARES, C.R.G. (2007) Effluent generation by the dairy industry: preventive attitudes and opportunities. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, v. 24, n. 4, p. 487-497. <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-66322007000400003>
- CARNEIRO, A.V.; CARVALHO, C.R.; SIQUEIRA, K.B.; HOTT, M.C. (2010) *O perfil da indústria de laticínios da Zona da Mata e Campos das Vertentes de Minas Gerais*. Juiz de Fora: Pólo de Excelência do Leite.
- CARVALHO, F.; PRAZERES, A.R.; RIVAS, J. (2013) Cheese whey wastewater: Characterization and treatment. *Science of the Total Environment*, v. 445-446, p. 385-396. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2012.12.038
- CASTRO, V.C. (2007) *Diagnóstico do consumo de água e geração de efluentes e de resíduos sólidos em um laticínio de pequeno porte*. Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologia de Alimentos) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- CILEITE. (2012) *Produção de leite e rebanho - Estados*. Disponível em: <<http://www.cileite.com.br/content/leite-em-números-produção>>. Acesso em: fev. 2013.
- GIROTO, J.M.; PAWLOWSKY, U. (2001) O soro de leite e as alternativas para o seu beneficiamento. *Brasil Alimentos*, p. 43-46.
- GOLTERMAN, H.L.; CLYMO, R.S.; OHNSTAD, M.A.M. (1978) *Methods for physical and chemical analysis of freshwaters*. Oxford: Blackwell Scientific Publications. 213 p.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). (2013) Censo Agropecuário de 2012/21013. Rio de Janeiro: IBGE. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br>>. Acesso em: 10 mar. 2013.
- _____. (2011) *Cidades*. Disponível em: <www.cidades.ibge.gov.br/>. Acesso em: maio 2013.
- LATTIN, J.; CARROLL, D.J.; GREEN, P.E. (2011) *Análise de dados multivariados*. São Paulo: Cengage Learning.
- LEITE, M.T.; BARROZO, M.A.D.S.; RIBEIRO, E.J. (2012) Canonical analysis technique as an approach to determine optimal conditions for lactic acid production by *Lactobacillus helveticus* ATCC 15009. *International Journal of Chemical Engineering*, v. 2012, p. 1-9. <http://dx.doi.org/10.1155/2012/303874>
- LUCAS, L.M.; CUNHA, S.B. (2007) Rede de drenagem urbana em área tropical: mudanças na morfologia do canal e níveis de poluição das águas-Rio dos Macacos-Rio de Janeiro-RJ. *GEIOUSP: Espaço e Tempo*, n. 22, p. 39-64. <http://dx.doi.org/10.11606/issn.2179-0892.geousp.2007.74065>
- MENDES, A.A.; CASTRO, H.F. (2004) Redução do teor de lipídeos presentes em efluentes das indústrias de produtos lácteos empregando lipases pancreáticas. *Revista Saúde e Ambiente*, v. 5, n. 1, p. 31-39.
- MENDONÇA, H.V.; RIBEIRO, C.B.M.; BORGES, A.C.; BASTOS, R.R. (2012) Remoção de nitrogênio e fósforo de águas residuárias de laticínios por sistemas alagados construídos operando em bateladas. *Ambiente e Água*, v. 7, n. 2. DOI: 10.4136/1980-993X
- MINAS GERAIS. (2004) Deliberação Normativa COPAM nº 74, de 9 de setembro de 2004. *Diário Oficial de Minas Gerais*, Belo Horizonte.
- MONTGOMERY, D.C.; RUNGER, G. C. (2011) *Applied Statistics and Probability for Engineers*. Fifth Edition. John Wiley & Sons.
- MOREIRA, A.; SILVA, A.; ANTUNES, M. (2000) Soro de leite: de resíduo a alimento. *Alimentos e Nutrição*, v. 4, p. 32-35.
- PATTNAIK, R.; YOST, R.S.; PORTER, G.; MASUNAGA, T.; ATTANANDANA, T. (2008) Improving multi-soil-layer (MSL) system remediation of dairy effluent. *Ecological Engineering*, v. 32, n. 1, p. 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2007.08.006>
- PEREIRA, E.L.; CAMPOS, C.M.M.; MOTERANI, F. (2009) Effects of pH, acidity and alkalinity on the microbiota activity of an anaerobic sludge blanket reactor (UASB) treating pigmanure effluents. *Ambiente & Água*, v. 4, n. 3, p.157-168. DOI: 10.4136/1980-993X
- PRAZERES, A.R.; CARVALHO, F.; RIVAS, J. (2012) Cheese whey management: a review. *Journal of Environmental Management*, v.110, p. 48-68. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.05.018>
- R CORE TEAM. (2014) *R: a language and environment for statistical computing*. Vienna: R Foundation for Statistical Computing.
- RECKHOW, K.H. (1994) Water quality simulation modeling and uncertainty analysis for risk assessment and decision making. *Ecological Modelling*, v. 72, p. 1-20. [https://doi.org/10.1016/0304-3800\(94\)90143-0](https://doi.org/10.1016/0304-3800(94)90143-0)
- RIVAS, J.; PRAZERES, A.R.; CARVALHO, F.; BELTRÁN, F. (2010) Treatment of cheese whey wastewater: combined coagulation-flocculation and aerobic biodegradation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, v. 58, n. 13, p. 7871-7877. DOI: 10.1021/jf100602j
- ROHLFES, A.L.B.; BACCAR, N.M.; OLIVEIRA, M.S.R.; MARQUARDT, L.E.; RICHARDS, N.S.P.S. (2011) Indústrias lácteas: alternativas de aproveitamento do soro de leite como forma de gestão ambiental. *Tecno-Lógica*, Santa Cruz do Sul, v. 15, n. 2, p. 79-83. DOI: <http://dx.doi.org/10.17058/tecnolog.v15i2.2350>
- SARAIVA, C.B.; MENDONÇA, R.C.S.; SANTOS, A.L.; PEREIRA, D.A. (2009) Consumo de água e geração de efluentes em uma indústria de laticínios. *Revista do Instituto de Laticínios Cândido Tostes*, Juiz de Fora, v. 64, n. 367, p. 10-18.
- SARAIVA, C.B.; PEREIRA, D.A. (2009) Subsídios para o uso sustentável da água em uma indústria de laticínio de pequeno porte: avaliação do consumo e geração de efluentes. *Revista Brasileira de Agroecologia*, v. 4, n. 2.
- SOUZA, A.F.C. (2006) *Utilização de técnicas de análise multivariada para identificação do perfil dos laticínios de micro e pequeno porte do Estado de Minas Gerais*. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

TAMANINI, R.; BELOTI, V.; SILVA, L.C.C.; ANGELA, H.L.; YAMADA, A.K.; BATTAGLINI, A.P.P.; FAGNANI, R.; MONTEIRO, A.A. (2012) Antagonistic activity against *Listeria monocytogenes* and *Escherichia coli* from lactic acid bacteria isolated from raw milk. *Semina: Ciências Agrárias*, Londrina, v. 33, n. 5, p. 1877-1886. DOI: 10.5433/1679-0359.2012v33n5p1877

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA). (2013) *Dairy: world markets and trade*. Disponível em: <<http://www.fas.usda.gov/psdonline/circulars/dairy.pdf>>. Acesso em: maio 2014.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). (2000) *Cleaner production assessment in dairy processing*. Dinamarca: COWI Consulting Engineers and Planners AS. 95 p. Disponível em:

<<http://www.unep.fr/shared/publications/pdf/2480-CpDairy.pdf>>. Acesso em: maio 2014.

VON SPERLING, M. (1993) *Análise da incerteza em estudos ambientais: aplicação na modelagem da qualidade da água de rios*. *Bio Engenharia Sanitária e Ambiental Encarte Técnico*, Ano II, n. 1, p. 2-10.

_____. (2007) *Estudos e modelagem da qualidade da água de rios*. Belo Horizonte: DESA/UFMG.

ZHONG, J.; STEVENS, D.K.; HANSEN, C.L. (2015) Optimization of anaerobic hydrogen and methane production from dairy processing waste using a two-stage digestion in induced bed reactors (IBR). *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 40, n. 45, p. 15470-15476.

Anexo 1 - Comando para simulação de lançamento de efluentes de laticínios usando o R.

```
# Distância de percurso do rio (km), altere o valor para distâncias diferentes.
distancia=12 # distância do ponto de lançamento até a foz.
# Gera os dados aleatórios entre 0 e 1 com o comando "runif" mil vezes.
Qr<-3,2+runif(1.000)*1 # Vazão do rio: 3,2 a 4,2 (m³.s⁻¹).
Qe<-0,0016+runif(1.000)*0,0004 # Vazão do efluente: 0,0016 a 0,0020 (m³.s⁻¹).
DBOr<-1,8+runif(1.000)*1,2 # DBO do rio: 1,8 a 4,0 (mg.L⁻¹).
DBOe<-1000+runif(1.000)*19000 # DBO efluente: 1.000 a 20.000 (mg.L⁻¹).
Vr<-0,45+runif(1.000)*0,2 # Velocidade do rio: 0,45 a 0,65 (m.s⁻¹).
Kd<-0,4+runif(1.000)*0,4 # Coeficiente de redução da DBO: 0,4 a 0,8 (1.d⁻¹).
ER<-X+runif(1.000)*Y # Eficiência de remoção de DBO (%). X=esperado
e Y=variação. Ex. sem tratamento X=0 e Y=0.

# Cálculo da concentração de DBOt após eventual tratamento(mg.L⁻¹).
DBOt<-(1-ER/100)*DBOe
# Cálculo da concentração de DBOm da mistura (mg.L⁻¹).
DBOm<-(Qe*DBOt+Qr*DBOr)/(Qe+Qr)
# Cálculo do tempo de percurso (d).
t<-distancia*1.000/(Vr*86.400)
# Cálculo da concentração de DBO no final do percurso (mg.L⁻¹).
DBOf<-DBOm*exp(-Kd*t)
# Comando para imprimir o histograma de frequência relativa.
hist(DBOf,main="Eficiência da redução da DBO (Sem tratamento)",nc=40, xlab="DBO (mg/L)",ylab="Frequência relativa(-)",freq=FALSE)
```

Adaptado de Von Sperling (1993).

