

**AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DOS PARÂMETROS DE  
PROCESSO NA EXTRAÇÃO ALCALINA DE PROTEÍNAS DOS  
FARELOS DE MACAÚBA EMPREGANDO PLANEJAMENTO  
EXPERIMENTAL FATORIAL  
EVALUATION OF PARAMETERS EFFECTS ON PROTEINS ALKALINE  
EXTRACTION FROM MACAÚBA BRAN BY EXPERIMENTAL FACTORIAL  
DESIGN**



ISSN: 1984-3151

**Salvador Carlos Grande<sup>1</sup>; Erika Cristina Cren<sup>2</sup>**

- 1 Estudante de Doutorado em Engenharia Química da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG. Belo Horizonte, MG. [salvador.cgrande@gmail.com](mailto:salvador.cgrande@gmail.com).
- 2 Doutora em Engenharia de Alimentos. Unicamp, 2009. Professora do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de Minas Gerais – DEQ/UFMG. Belo Horizonte, MG. [erika.cren@gmail.com](mailto:erika.cren@gmail.com).

Recebido em: 18/03/2016 - Aprovado em: 24/05/2016 - Disponibilizado em: 31/05/2016

**RESUMO:** O presente trabalho apresenta um estudo acerca da extração alcalina de proteínas dos farelos de polpa e amêndoa de macaúba. A fim de avaliar a influência dos parâmetros de processo, a saber, concentração de NaCl da solução de extração, razão sólido:solução, temperatura e pH da solução de extração, sobre o rendimento de extração das proteínas dos farelos, um planejamento experimental fatorial ( $2^4$ ) foi conduzido. Os parâmetros foram avaliados em 2 níveis, além do ponto central. Para o farelo de amêndoa, a avaliação estatística dos efeitos dos parâmetros para a maximização do rendimento de extração, ao nível de significância de 95%, indicam que o pH e a razão sólido:solução são estatisticamente significativos. No entanto, para o farelo da polpa, os parâmetros que influenciam de forma significativa o rendimento do processo de extração, dentro das faixas investigadas, são a concentração de NaCl, a razão sólido: solução e o pH da solução de extração. Os resultados apontam que para ambos os farelos, a temperatura de extração, dentro da faixa investigada, não exerce influência sobre o rendimento. De um modo geral, o processo de extração alcalina de proteínas dos farelos de macaúba mostra-se promissor, sendo atingidos rendimentos de extração de até 99% e 92%, respectivamente. Mesmo na pior condição experimental de extração, para ambos os farelos, um rendimento acima de 50% foi obtido. Os resultados apresentados são de fundamental importância para futuros estudos que visam otimizar os parâmetros de processo para maximização do rendimento de extração de proteínas, inclusive em escala industrial.

**PALAVRAS-CHAVE:** Extração de proteínas. Farelos de macaúba. Planejamento experimental fatorial.

**ABSTRACT:** This work presents a study about alkaline extraction of proteins from macaúba bran. In order to evaluate the influences of the process parameters, namely, the concentration of NaCl solution, ratio solid:solution, temperature and the pH of extraction solution, on protein extraction yield from macaúba bran, an experimental factorial design ( $2^4$ ) was conducted. The parameters were evaluated in 2 levels, in addition to the central point. For the kernel bran of macaúba, the statistical evaluation of process parameter effects for the maximization of protein extraction yield, at a significance level of 95%, indicates that the pH and the ratio solid:solution are statistically significant. For the pulp bran of macaúba the parameters that influence significantly the extraction yield of proteins, within ranges investigated, are the concentration of NaCl solution, the ratio solid:solution and the pH of the extraction solution. For both types of bran, the extraction temperature, within range investigated, does not exercise influence, at a significance level of 95%, on the protein extraction yield. In general, the alkaline extraction of proteins from the pulp and the kernel bran of macaúba show to be promising, being achieved extraction yields of up to 99% and 92%, respectively. Even in the worst experimental condition of extraction, for both types of bran, a

*yield above 50% was obtained. The results obtained and presented are important for future studies aiming industrial application and so to optimize the process parameters of extraction for maximization of protein yield.*

*KEYWORDS: Protein extraction. Bran of macaúba. Experimental factorial design.*

---

## 1 INTRODUÇÃO

A partir da exploração de fontes alternativas de óleos vegetais, principalmente para atender a demanda do mercado de biocombustíveis, é gerado um montante diversificado e considerável de subprodutos resultantes da extração dos óleos vegetais, como as tortas e farelos. Para a soja, principal oleaginosa produzida no Brasil, uma quantidade de aproximadamente 57 bilhões de kg de torta por ano é produzida (ALMEIDA, 2014; MARIANO, 2014).

Esses resíduos, por apresentarem rica composição em biocomponentes, de alto valor agregado e nutricional, podem ser considerados potenciais fonte de proteínas, fibras, antioxidantes, entre outros componentes de interesse para as indústrias. No entanto, os farelos e tortas residuais das oleaginosas são geralmente aproveitados como ração animal ou adubo (MARIANO, 2014; NOBRE *et al.*, 2014).

De acordo com os trabalhos de Bora e Rocha (2004) e Munhoz (2013) os frutos de macaúba são potencial fonte de aminoácidos essenciais. Eles constaaram que a polpa de macaúba apresenta quantidades apreciáveis de fenilalanina e treonina, enquanto que a amêndoa de macaúba se destaca pela presença de isoleucina e fenilalanina, justificando, desta forma, o aproveitamento das tortas e farelos da macaúba como fonte alternativa de proteínas e aminoácidos essenciais para a alimentação humana.

Dessa forma, propor estudos acerca da caracterização da composição dos resíduos agroindustriais, como os farelos e tortas de oleaginosas, apontando potenciais aplicações industriais para os diversos biocomponentes que os constituem, além de possíveis processos de recuperação destas biomoléculas, se

torna importante, a fim de minimizar a geração de resíduos, o desperdício de recursos alimentícios em potencial, além de viabilizar a implantação de uma cadeia agroindustrial sustentável para a exploração de oleaginosas alternativas.

A cultura da macaúba vem sendo apontada como promissora fonte alternativa de óleos vegetais para a produção de biocombustíveis, principalmente devido à sua considerável produtividade em óleo, alcançando uma produção anual entre 3.500 kg.ha<sup>-1</sup> e 6.200 kg.ha<sup>-1</sup>, de acordo com NOBRE *et al.* (2014), produtividade esta comparável à da palma - oleaginosa maior produtora de óleo no mundo. A produtividade em óleo para a macaúba, se comparada com a produtividade em óleo para a soja, supera em pelo menos 9 vezes a produção deste óleo (ALMEIDA, 2014; MARIANO, 2014; NOBRE *et al.*, 2014).

As principais partes do fruto da macaúba fonte de óleos vegetais são a polpa e amêndoa, com teores de óleo médios, em base seca, de 31% e 40%, respectivamente (ALMEIDA, 2014; NOBRE *et al.*, 2014).

A partir do processamento dos frutos da macaúba para extração de óleos são gerados anualmente cerca de 6.900 kg.ha<sup>-1</sup> e 900 kg.ha<sup>-1</sup> de tortas de polpa e de amêndoa, respectivamente. Considerando os teores de proteínas presente nestas tortas, estima-se que anualmente um total de até 901 kg.ha<sup>-1</sup> de proteínas podem ser recuperados dos resíduos gerados na extração de óleos da macaúba (TEIXEIRA *et al.*, 2014). Comparando-se com a soja - principal oleaginosa fonte de proteínas vegetais - a geração de torta anual é estimada em 1.782 kg.ha<sup>-1</sup>, de onde se obtêm cerca de 891 kg.ha<sup>-1</sup> de 3 proteínas, ou seja, a macaúba, além do óleo, também é uma promissora

fonte alternativa de proteínas vegetais, destacando-se ainda a presença significativa de fibras e outros componentes nutricionais valiosos para a alimentação humana (ABDALLA *et al.*, 2008; MACHADO *et al.*, 2010; TEIXEIRA *et al.*, 2014).

Outra vantagem apontada para o emprego das tortas e farelos de macaúba na alimentação humana e/ou animal é a ausência de substâncias tóxicas, compostos antinutricionais e alergênicos, comumente presentes em algumas tortas e farelos de oleaginosas, a saber, pinhão manso, mamona e girassol, que necessitam de processos de detoxificação das tortas antes do uso, assim como os farelos de soja, canola e amendoim, que necessitam de tratamento térmico para melhorar a digestibilidade dos mesmos (REVELLO, 2014; RODRIGUES *et al.*, 2012).

Contudo, a investigação de processos que viabilizem o uso dos farelos de macaúba como matéria-prima fonte de proteínas torna-se relevante, para que, a exemplo do que ocorre para a cadeia produtiva da soja, o óleo e outros produtos, como os proteicos, possam ser obtidos, permitindo um aproveitamento integral e eficiente da matéria prima vegetal, com consequente valorização do farelo, uso sustentável dos recursos agrícolas, aumento da disponibilidade de fontes proteicas para alimentação humana, com reflexos sobre a redução dos custos de produção na cadeia de biocombustíveis (BARRETO, 2008; MACHADO *et al.*, 2010; TEIXEIRA *et al.*, 2014).

Para a extração de proteínas presentes nos farelos de oleaginosas, a solubilidade proteica em meio aquoso alcalino tem sido o princípio amplamente utilizado nos processos de extração. No entanto, a solubilidade das proteínas é influenciada por uma série de fatores associados ao sistema de extração, como o pH da solução extratora, temperatura e tempo de extração, razão sólido:solução de extração, tipo e concentração da solução extratora, grupo das proteínas que compõe

a matriz sólida, entre outras (BOYE; BARBARA, 2012).

Sendo assim, investigar como esses parâmetros podem influenciar o rendimento de extração é de grande relevância no desenvolvimento de processos industriais de extração.

Na literatura não são reportados estudos relativos ao processo de extração de proteínas de farelos de macaúba.

Contudo, o objetivo do presente trabalho foi avaliar os efeitos dos diferentes parâmetros de processo na solubilidade das proteínas de farelos de polpa e amêndoa de macaúba. Um planejamento experimental fatorial 2<sup>4</sup> foi empregado.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 MATÉRIA-PRIMA

As tortas da amêndoa e da polpa de macaúba foram cedidas pelo Laboratório de Termodinâmica Aplicada à Processos do Departamento de Engenharia Química – EEUFMG, resultantes da prensagem mecânica das partes dos frutos, em prensa do tipo expeller (marca Scott Tech, modelo ERT-60), para a extração de óleos, com subsequente desengorduramento das mesmas utilizando-se éter de petróleo, em equipamento soxhlet, obtendo-se, desta forma, os farelos. Esses, por sua vez, foram classificados quanto à sua granulometria, utilizando-se uma sequência de peneiras de 20, 35, 40, 50 e 70 mesh em mesa vibratória (marca Bertel, modelo série 0602). O material com a granulometria da peneira, em que a maior quantidade ficou retida foi selecionado para utilização nos ensaios de extração de proteínas. O tamanho das partículas de farelo utilizado ficou entre 0,250 mm e 0,297 mm. Sendo retido entre as peneiras de 50 e 70 mesh, respectivamente, cerca de 68% do farelo de polpa e 81% do farelo de amêndoa. Os farelos foram acondicionados em sacos plásticos e

congelados até o momento de uso. Todos os reagentes utilizados foram da marca VETEC, com padrão analítico.

## 2.2 COMPOSIÇÃO CENTESIMAL

Os farelos foram caracterizados quanto à composição centesimal em termos de umidade - método oficial Ba 2a-38 - empregando estufa de circulação forçada de ar (marca Sterilifer, modelo digital timer); teor de cinzas - método oficial Ba 5a-49 - em forno mufla (marca Lavosier, modelo 400 B); teor de óleo residual - método oficial Ba 3-38; teor de proteínas - método micro Kjeldahl Bc 4-91 - empregando fator de conversão de nitrogênio em proteína bruta de 6,25; teor de fibra alimentar total (solúvel e insolúvel) - método enzimático-gravimétrico 993.19. A diferença de 100 em relação à soma de umidade, cinza, óleo residual, proteína bruta e fibra total foi considerada como teor de carboidratos. Todas as determinações foram realizadas em triplicata, sendo obtidos desvios de no máximo 1,92%. Todas as metodologias empregadas são oficiais e descritas pela AOAC (2009). As análises foram realizadas no Laboratório de Termodinâmica Aplicada à Processos do Departamento da Engenharia Química - EEUFMG.

## 2.3 ENSAIOS DE EXTRAÇÃO DE PROTEÍNAS DOS FARELOS

Para a realização dos experimentos de extração de proteínas por rota química, metodologias propostas por Wu *et al.* (2009) e Ma, Wang e Wu (2010) foram utilizadas com adaptações. Para a extração, células de vidro encamisadas com capacidade de 60 mL foram utilizadas acopladas a um banho termostático (marca Cienlab, modelo CE-160) para controle da temperatura de extração. À célula foi adicionada proporção definida de farelo:solução (m:v). O pH do sistema foi monitorado e ajustado empregando-se um

pHmetro (marca Phmeter, marca PH S-38) e soluções de NaOH (2 M) ou de HCl (2 M). A agitação do sistema de extração foi mantida entre 200 e 250 RPM, durante 1 hora, empregando-se agitação magnética (marca Diag Tech, modelo DT311OH). Após o período de extração, o sistema contendo farelo e a solução de extração foi levado para centrifugação (marca Eppendorf, modelo Centrifuge-5430) em 7500 RPM por 20 minutos, na temperatura ambiente. O sobrenadante líquido foi coletado para análise do teor de proteínas solúveis, segundo o método de micro Kjeldahl, conforme metodologia anteriormente mencionada.

O rendimento de extração ou solubilização de proteínas foi obtido de acordo com a Eq. 1:

$$S(\%) = \frac{PS}{PA} * 100 \quad (1)$$

Onde S (%) rendimento ou solubilidade das proteínas, PS é o teor de proteínas no sobrenadante (%), PA é o teor de proteínas no farelo (%).

## 2.4 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Para o estudo da influência dos parâmetros de processo sobre a capacidade de extração de proteínas dos farelos de macaúba, trabalhos da literatura foram utilizados, a fim de fixar alguns parâmetros de estudo e definir as faixas de investigação para outros (BOYE; BARBARA, 2012; STENZEL *et al.*, 2009). Dessa forma, os parâmetros de processo investigados foram: concentração da solução de NaCl, proporção sólido:solução de extração, temperatura e pH da solução de extração. Os parâmetros foram investigados em 2 níveis de valores, além dos pontos centrais (Tabela 1), empregando-se um planejamento experimental fatorial 2<sup>4</sup> (Tabela 3). Um total de 19 ensaios foi realizado, para cada tipo de farelo de macaúba, a fim de avaliar

o efeito da variação dos parâmetros sobre o rendimento de extração de proteínas.

Tabela 1

Níveis de estudo para os parâmetros do planejamento experimental fatorial

Variáveis independentes	Variáveis Codificadas	Níveis		
		(-1)	(0)	(+1)
Concentração da solução de NaCl (M)	X1	0	0,50	1,0
Razão sólido:solução (m:v)	X2	1:20	1:50	1:80
Temperatura (°C)	X3	25	35	45
pH	X4	9	10,5	12

Fonte - Próprio autor

## 2.5 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

A análise estatística dos dados obtidos no planejamento experimental fatorial foi realizada empregando-se o *software* Statistica versão 7.0. O nível de significância considerado para análise de efeitos dos parâmetros de processo foi de 95%.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS FARELOS DE POLPA E AMÊNDOA DE MACAÚBA

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos para a composição centesimal das tortas desengorduradas ou farelos de macaúba.

Tabela 2

Composição centesimal dos farelos de polpa e amêndoa de macaúba (% m/m em base seca)

Componentes	Farelo de Amêndoa	Farelo de Polpa
Matéria seca	89,33±0,92	87,18±0,87
Proteínas	26,89±0,48	9,39±0,04
Cinzas	4,44±0,06	5,67±0,07
Lipídeos	4,20±0,06	4,87±0,52
Fibras insolúveis	47,28±0,24	25,75±0,41
Fibras solúveis	2,94±0,20	26,20±2,12
Carboidratos	14,25±0,63	28,12±1,05

Fonte - Próprio autor

Geralmente, matérias-primas vegetais com mais de 5% (m.b.s) de proteínas em sua composição são consideradas potenciais fontes de proteínas segundo Chiesa e Gnansounou (2011). Segundo os dados apresentados na Tabela 2, apesar do menor teor proteico encontrado para o farelo de polpa (9,39%), quando comparado ao teor de proteínas encontrado para o farelo de amêndoa (26,89%), no total, os farelos de macaúba possuem um teor em proteínas de cerca de 36%, o que classifica estes resíduos do processamento de óleos, como potencial fonte proteica vegetal.

Para os farelos de amêndoa de macaúba, teores de proteínas entre 13,65 e 37,97%, em base seca, foram reportados nos trabalhos de Dessimoni-Pinto *et al.* (2010) e Hiane *et al.* (2006). Verediano (2012) reportou teor de proteínas no farelo de polpa de 8,3 %, em base seca. Os valores encontrados na literatura são muito próximos dos apresentados na Tabela 2.

Outros dados reportados na literatura, para a composição centesimal do farelo de polpa, indicam teores, em base seca, de umidade entre 4,5 - 8,5%, proteínas de 5,57 - 8,9%, teor de óleo de 4,7 - 19,75%, cinzas de 3,5 - 4,32%, fibras totais de 46 - 58% e carboidratos de 20 - 53%. De um modo geral,

os valores reportados na Tabela 2 são coerentes aos dados reportados na literatura.

A variação observada entre os valores reportados na nessa e os apresentados na literatura, para a composição dos farelos de macaúba, se justifica devido à variabilidade das condições nas quais os materiais vegetais foram cultivados e expostos, como tipo de solo, clima, período de colheita dos frutos, idade das plantas, entre outras (BORA; ROCHA, 2004; DESSIMONI-PINTO *et al.*, 2010; HIANE *et al.*, 2006).

De um modo geral, pode-se dizer que o farelo de polpa é uma promissora fonte de fibras alimentares e carboidratos, somando juntos cerca de 80% da composição total do farelo. O farelo de amêndoa, por sua vez, pode ser considerado fonte promissora de proteínas e fibras insolúveis, somando cerca de 74% da composição total deste farelo.

### 3.2 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL FATORIAL 2<sup>4</sup> E AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DOS PARÂMETROS DE PROCESSO SOBRE O RENDIMENTO DE EXTRAÇÃO

Os resultados de rendimento de extração de proteínas, em diferentes condições experimentais do planejamento experimental fatorial 2<sup>4</sup>, para os farelos de polpa e amêndoa, são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3

Rendimentos obtidos no planejamento experimental fatorial 2<sup>4</sup> para a extração de proteínas dos farelos de polpa e amêndoa de macaúba.

Ensaio	Variáveis Codificadas				Rendimento em proteínas (%)	
	X1	X2	X3	X4	Amêndoa	Polpa
1	-1	-1	-1	-1	55,3±0,3	68,9±0,2
2	1	-1	-1	-1	59,5±0,8	63,3±1,2
3	-1	1	-1	-1	64,7±1,2	94,2±1,0
4	1	1	-1	-1	69,7±0,8	84,1±1,4
5	-1	-1	1	-1	49,7±0,6	76,6±1,1
6	1	-1	1	-1	60,6±0,4	59,4±0,7
7	-1	1	1	-1	61,9±1,6	98,2±0,8
8	1	1	1	-1	72,8±1,1	84,0±1,3
9	-1	-1	-1	1	83,3±1,1	90,9±1,6
10	1	-1	-1	1	61,9±1,8	59,3±1,7
11	-1	1	-1	1	85,0±1,5	98,9±1,1
12	1	1	-1	1	73,7±1,3	87,5±0,9
13	-1	-1	1	1	90,5±0,7	79,6±0,5
14	1	-1	1	1	67,3±0,4	65,6±1,6
15	-1	1	1	1	92,6±0,9	98,3±1,3
16	1	1	1	1	76,5±0,9	87,5±1,5
17	0	0	0	0	63,7±0,2	77,1±0,9
18	0	0	0	0	63,7±1,1	77,0±0,8
19	0	0	0	0	62,6±1,2	76,4±1,1

Fonte - Próprio autor

Observando os resultados apresentados na Tabela 3, para os dois farelos, nota-se que pelo menos 50% das proteínas presente nos farelos foram extraídas. O rendimento de extração de proteínas do farelo de polpa mostra-se ligeiramente superior ao observado para o farelo de amêndoa. Um rendimento de extração de até 99% é observado para o farelo de polpa, sendo obtido para a amêndoa um rendimento máximo de 93%. Resultado que demonstra o potencial do processo empregado, a extração química de

proteínas, como possível rota para recuperação de proteínas dos farelos de macaúba.

De um modo geral, os parâmetros de processo investigados influenciaram de forma diferente a extração de proteínas dos farelos de polpa e amêndoa, reforçando a importância de uma investigação específica para cada tipo de matéria prima com relação ao processo de extração e otimização dos parâmetros de operação.

Contudo, os maiores rendimentos são observados quando o parâmetro X1 (concentração da solução salina) tem valor mínimo (com destaque para o ensaio 15), para ambos os farelos, ou seja, a ausência de sal na solução de extração melhora a solubilização das proteínas e, por conseguinte a extração.

Corroborando o que foi observado, Wani *et al.* (2006) reportam rendimento máximo de 86,08% na extração de proteínas da farinha desengordurada das sementes de melancia, quando os seguintes parâmetros de processo foram utilizados; razão sólido:solução de 1:70 (m/v), concentração da solução NaOH de 1,2%, tempo de extração de 15 minutos, temperatura de 40 °C e ausência de sal na solução de extração, sendo todos os parâmetros considerados significativos para o processo de extração (95% de significância), nas faixas investigadas.

Por sua vez, Quanhong e Caili (2005) obtiveram um rendimento máximo de 7,84 g de proteína solúvel por 100 g de sementes de abóbora em condições de extração empregando razão sólido:solução de 1:30,2 (m/v), concentração de NaCl na solução de extração de 4,26% e tempo de processo de 18,1 minutos, todos os parâmetros investigados foram significativos para o processo, a 95% de significância.

A seguir serão apresentados e discutidos os resultados obtidos para a avaliação de efeito dos diferentes parâmetros de processo investigados, sobre o rendimento de extração de proteínas, para os farelos de polpa e amêndoa de macaúba.

### 3.2.1 FARELO DA AMÊNDOA DE MACAÚBA

O Diagrama de Pareto, Figura 1, apresenta os efeitos principais e de interação dos diferentes parâmetros de processo investigados, sobre o rendimento de extração de proteínas do farelo de amêndoa. Todos os parâmetros apresentaram efeito significativo, ao nível de confiança de 95%, sobre o rendimento de extração, em diferentes intensidades.

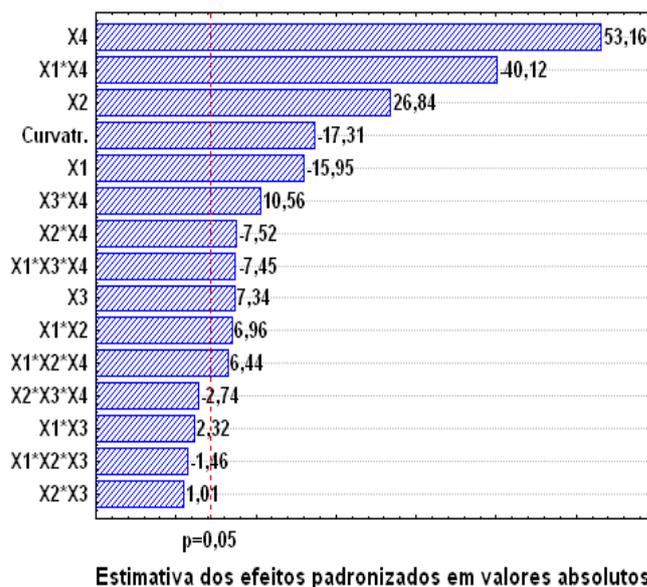


Figura 1 - Diagrama de Pareto para o farelo de amêndoa

Fonte - Próprio autor

Observa-se na Figura 1 que o parâmetro X4 (pH) foi o que mais exerceu influência sobre o rendimento de extração de proteínas do farelo de amêndoa de macaúba. Os demais parâmetros apresentaram influência decrescente, conforme a seguinte sequência, X2 > X1 > X3, ou seja, a temperatura exerceu menor efeito sobre a extração de proteínas.

Isso indica que a extração de proteínas pode ser conduzida a temperatura ambiente, o que pode gerar economia de energia no processo, além de manter a integridade e qualidade das proteínas, uma vez que temperaturas a partir de 55 °C podem desnaturar algumas proteínas alimentares (DAMODARAN *et al.*, 2010). Contudo, a solubilidade das proteínas aumenta

proporcionalmente com a temperatura, se temperaturas próximas de 40 °C forem utilizadas, conforme pode-se ver na Figura 2 (ANDUALEM; GESSESSE, 2013; MA; WANG; WU *et al.*, 2010).

Nota-se na Figura 1, que os parâmetros interagem entre si, de forma significativa para alguns casos, influenciando o rendimento de extração de forma mais complexa. A maior influência de interação entre parâmetros, no rendimento de extração, foi observada para a interação entre X1 e X4, sendo este efeito de interação maior que muitos efeitos principais de alguns parâmetros. Dessa forma, é necessário interpretar o efeito dos dois parâmetros conjuntamente.

Observado novamente os dados da Tabela 3, nota-se que ao diminuir o parâmetro X1 e aumentar o parâmetro X4, o rendimento de extração é maximizado. Esse comportamento decorre do efeito contrário que esses parâmetros exercem sobre a solubilização das proteínas, devido à natureza dos aminoácidos e à organização dos mesmos nas cadeias protéicas, influenciando o rendimento de extração. Devido ao efeito menor do parâmetro X1 (Figura 2), sobre o rendimento, diminuir ambos os parâmetros (X1 e X4) provocou a diminuição do rendimento de extração. Demonstrando que o parâmetro X1 deve ser mantido no mínimo valor investigado e o parâmetro X4 no máximo valor investigado para maximização do rendimento.

Contudo, pode-se perceber que o único parâmetro com influência negativa sobre o rendimento de extração foi a concentração salina da solução (X1), ou seja, o rendimento é maximizado quando este parâmetro tende ao valor mínimo investigado. O que corrobora as observações anteriormente feitas para o comportamento do parâmetro X1, sugerindo que o uso de sal nas soluções de extração não se faz necessário para a extração de proteínas do farelo de amêndoa (Figura 2).

De forma contrária, influenciam os demais parâmetros X2 (proporção sólido:solução), X3 (temperatura) e X4 (pH), ou seja, maximizam o rendimento de extração quando os parâmetros tendem aos valores máximos dos níveis estudados.

O perfil dos efeitos dos parâmetros de processo, nas faixas investigadas, sobre o rendimento de extração de proteínas do farelo de amêndoa pode ser visualizado na Figura 2.

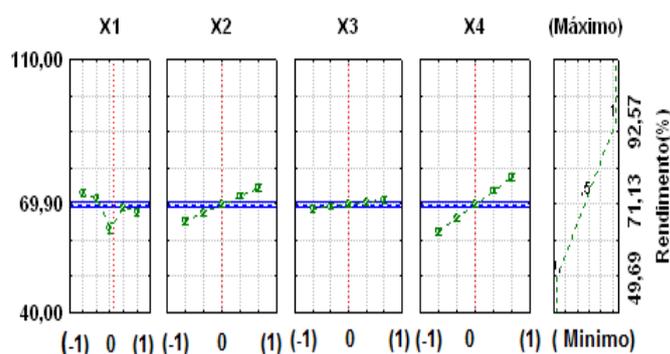


Figura 2 - Perfil dos efeitos dos parâmetros de processo sobre o rendimento de extração para o farelo de amêndoa  
Fonte - Próprio autor

Os comportamentos observados na Figura 2 estão diretamente relacionados com as propriedades das moléculas de proteínas e do meio de extração. Para a maioria das proteínas vegetais verifica-se o aumento de sua solubilidade em sistemas com baixa concentração de sais neutros, fenômeno chamado de efeito *salting in*, que ocorre devido à modificação da força iônica do meio, que interfere na ionização das proteínas e por isso na sua interação com a água e outras moléculas de proteínas (SULIMAN *et al.*, 2006; WANI *et al.*, 2006).

Quanto ao efeito do pH, a máxima solubilidade geralmente é observada em regiões alcalinas. Assim, dependendo dos tipos de proteínas que compõem a matriz vegetal, estas moléculas podem tornar-se ionizadas ou neutras conforme as características do meio. Quando ocorre maior interação entre solução –

proteína, através da formação de ligações de hidrogênio, gerando maior repulsão entre as moléculas, mais proteínas se tornam solúveis no meio de extração. Por isso, a intensidade do efeito desse parâmetro sobre o rendimento de extração é grande, conforme mostra a Figura 2. Assim, de um modo geral, os maiores rendimentos de extração proteica são obtidos na faixa investigada de pH entre 10,5 e 12, corroborando a literatura (DAMODARAN *et al.*, 2010; SULIMAN *et al.*, 2006).

No caso do efeito da temperatura, nota-se na Figura 2 que este parâmetro praticamente não exerce influência sobre o rendimento, dentro da faixa investigada, sendo o valor praticamente constante.

Com relação à proporção sólido:solução, este parâmetro influencia o processo de transferência de massa entre a matriz sólida e a solução. Quanto maior o gradiente de concentração entre as fases, mais eficiente será a transferência de massa. Contudo, a quantidade máxima de proteína transferida da fase sólida para a líquida é limitada pela saturação da solução de extração. Dessa forma, proporções muito pequenas entre as fases podem limitar o processo de extração (Figura 2). Por outro lado, o emprego de quantidades excessivas de solução pode acarretar em altos custos de processo (CHAN; YUSOFF; NGOH, 2014; DAMODARAN *et al.*, 2010).

Portanto, encontrar um ponto ótimo de operação para os parâmetros de processo é muito importante para a implantação do processo de extração em escala industrial. Para o farelo de amêndoa, a fim de otimizar os parâmetros de processo, sugere-se investigação dos parâmetros pH e proporção sólido:solução em faixas mais amplas.

### 3.2.2 FARELO DA POLPA DE MACAÚBA

O Diagrama de Pareto, Figura 3, apresenta os efeitos principais e de interação dos parâmetros de processo

investigados, sobre o rendimento de extração de proteínas do farelo de polpa. O único parâmetro que não apresentou efeito significativo, ao nível de confiança de 95%, sobre o rendimento de extração, foi a temperatura. Os demais parâmetros foram significativos e apresentaram efeito com diferentes intensidades sobre o rendimento.

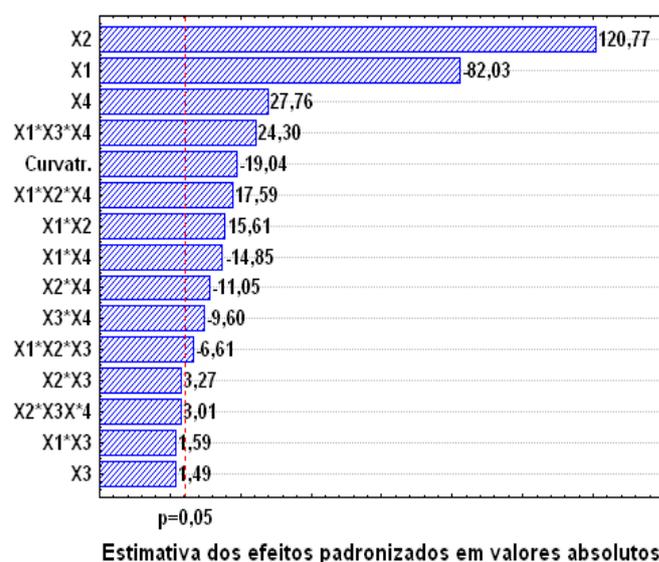


Figura 3 - Diagrama de Pareto para o farelo da polpa de macaúba  
Fonte - Próprio autor

Observa-se na Figura 3, que o parâmetro de maior influência sobre o rendimento de extração foi o X2 (proporção sólido:solução), seguido do parâmetro X1 (concentração da solução salina) e X4 (pH).

A temperatura de extração não apresentou efeito significativo no rendimento, e como observado para a extração de proteínas do farelo de amêndoa, a extração de proteínas do farelo de polpa pode ser conduzida à temperatura ambiente.

Além disso, percebe-se na Figura 3 que o único parâmetro com peso negativo sobre o rendimento de extração foi a concentração salina da solução (X1), mesmo comportamento observado para a extração de proteínas do farelo de amêndoa, sugerindo que o uso de sal nas soluções de extração não se faz necessário na extração de proteínas de ambos os farelos.

Contudo, os parâmetros X2 (proporção sólido:solução) e X4 (pH) maximizam o rendimento de extração quando os parâmetros tendem aos valores máximos dos níveis estudados, este comportamento também foi observado na extração de proteínas do farelo de amêndoa.

Nota-se ainda na Figura 3, que os parâmetros interagem entre si, de forma significativa para alguns casos, influenciando o rendimento de extração de forma mais complexa. O efeito das interações para a extração de proteínas do farelo de polpa foi diferente dos observados para o caso anterior. A maior modificação no rendimento de proteínas, provocada pela interação entre parâmetros do processo de extração, foi observado para a interação entre X1, X3 e X4, contudo, este efeito não foi maior que os observados para os parâmetros principais individualmente.

Considerando a variação dos parâmetros X1 e X4, uma vez que o parâmetro X3 não é significativo, ao diminuir o parâmetro X1 e aumentar o parâmetro X4, o rendimento de extração é maximizado. O mesmo ocorre, em menor proporção, se ambos os parâmetros forem diminuídos, comportamento oposto ao observado para a extração de proteínas do farelo de amêndoa, provavelmente devido ao efeito maior do parâmetro X1 (Figura 2) sobre o rendimento de extração de proteínas no farelo de polpa. No entanto, conforme anteriormente mencionado, o emprego de sal na solução de extração não se faz necessário para o processo de extração de proteínas dos farelos, quanto ao pH (X4), seu aumento maximiza o rendimento de extração.

O perfil dos efeitos dos parâmetros de processo, nas faixas investigadas, sobre o rendimento de extração de proteínas do farelo de polpa pode ser visualizado na Figura 4.

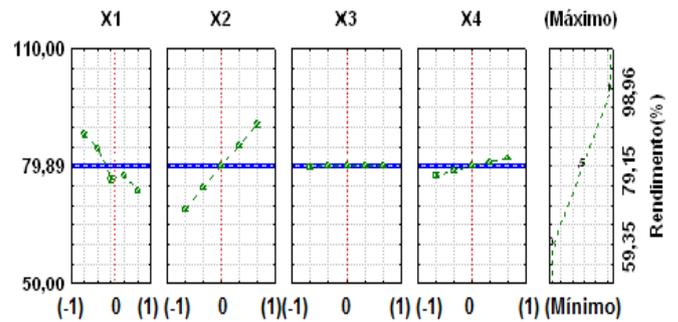


Figura 4 - Perfil dos efeitos dos parâmetros de processo sobre o rendimento de extração para o farelo de polpa

Fonte - Próprio autor

De um modo geral, nota-se que o comportamento a partir da variação dos parâmetros, dentro da faixa investigada, é semelhante para a extração de proteínas de ambos os farelos, sendo válida a abordagem feita anteriormente, também para a extração de proteínas do farelo de polpa.

Contudo, nota-se na Figura 4, que para a extração de proteínas do farelo de polpa, diferentemente do comportamento observado para a extração de proteínas do farelo de amêndoa, o parâmetro que mais influenciou para o aumento do rendimento de extração foi a proporção sólido:solução e não o pH da solução de extração.

A variação do pH exerceu menor efeito para o aumento do rendimento de extração. Dessa forma, é preferível que maiores proporções de sólido:solvente sejam empregadas no processo, para qualquer das faixas de pH investigadas. Esse comportamento pode estar relacionado ao menor teor de proteínas encontrado no farelo de polpa, se comparado ao de amêndoa. Além disso, os componentes principais do farelo de polpa, carboidratos e fibras, ao serem extraídos juntamente com as proteínas, também podem influenciar a solubilização das proteínas na solução, e, portanto, no processo de extração, conforme foi observado durante os experimentos, devido ao aumento da viscosidade da solução de extração.

No entanto, para ambos os processos de extração, o parâmetro proporção sólido:solução mostrou ser o mais significativo para o aumento do rendimento de extração, principalmente na maior proporção estudada, considerando as faixas investigadas. O mesmo comportamento foi observado em trabalhos na literatura, para a extração de proteínas de diferentes fontes vegetais (FIRATLIGIL-DURMUS; EVRANUZ, 2010; NEVES; SILVA; SILVA, 2006; QUANHONG; CAILI, 2005).

Diante dos resultados, apesar dos efeitos dos parâmetros de processo apresentarem uma mesma tendência de comportamento na extração de proteínas de ambos os farelos, é importante observar que a intensidade do efeito dos parâmetros foi diferente, devido às diferenças entre as matérias-primas estudadas, o que provavelmente influencia a otimização dos parâmetros de processo para maximização dos rendimentos de extração. Isso pode ser claramente notado na Tabela 3, pois o maior rendimento de extração de proteínas para o farelo de polpa não necessariamente é obtido nas mesmas condições onde o rendimento é ótimo para o farelo de amêndoa. O que reforça a importância do estudo de otimização de parâmetros de processo de forma individualizada, considerando as características e particularidades de cada tipo de matéria prima e processo.

#### **4 CONCLUSÃO**

Os resultados encontrados no presente trabalho, para a extração química de proteínas de farelos de macaúba, corroboram estudos semelhantes apresentados na literatura, e que empregam matérias-primas vegetais como sementes de frutos e outras oleaginosas. Para ambos os farelos investigados, um rendimento em proteínas extraídas de pelo menos

50% foi obtido. O rendimento máximo chegou a 99%, para o farelo de polpa e 93% para o farelo de amêndoa.

De acordo com a análise estatística dos resultados, os parâmetros com efeito significativo sobre o rendimento de extração, ao nível de confiança de 95%, foram a razão sólido:solução, pH, com efeito positivo, e concentração salina da solução de extração, com efeito negativo. A temperatura foi o único parâmetro não significativo no processo, dentro da faixa investigada.

De um modo geral, para ambos os farelos os parâmetros que mais afetaram a extração de proteínas foram, a saber, a razão sólido:solução e o pH, parâmetros estes que podem ser investigados em faixas de estudo mais ampla, a fim de otimizar estes parâmetros de operação para maximização dos rendimentos de extração química de proteínas dos farelos de macaúba.

Quanto aos demais parâmetros, a temperatura pode ser fixada na condição ambiente, pois maiores temperaturas não exercem efeito sobre o rendimento de extração, vinculando assim, economia de energia ao processo. Como solução de extração, a água sem adição de sais pode ser empregada, o que também associa economia com insumos para o processo.

Dessa forma, conclui-se que o processo de extração de proteínas dos farelos de polpa e amêndoa de macaúba, empregando-se rota química, mostra-se promissor e eficiente.

#### **AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem à CAPES pela bolsa de doutorado, à Fapemig, ao CNPq e ao DEQ-EEUFMG pelo auxílio financeiro para realização da pesquisa.

## REFERÊNCIAS

- ABDALLA, A. L. *et al.* Utilização de subprodutos da indústria de biodiesel na alimentação de ruminantes. **R. Bras. Zootec.**, v.37, p.260-258, 2008. Disponível em <[www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1516-35982008001300030](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-35982008001300030)>. Acesso em: 23 abr 2015. ISSN: 1806-9290.
- ALMEIDA, F. H. L. de. **Desenvolvimento, acúmulo de óleo e armazenamento de coco de macaúba.** 2014. 98f. Dissertação de Mestrado (Produção Vegetal) - Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal no Semiárido, UNIMONTES, Montes Claros, 2014. Disponível em <<http://www.macauba.ufv.br/>>. Acesso em: 22 ago 2015.
- ANDUALEM, B.; GESSESSE, A. Effects of Salt (NaCl) Concentrations on the Functional properties of defatted Brebra (*Milletia ferruginea*) Seed Flour. **Middle-East Journal of Scientific Research**, v.13, n. 7, p.889-897, 2013. ISSN 1990-9233.
- AOAC - **Official methods of analysis of the Association of Official analytical chemist.** Editor: Horwitz W. 13th Ed. Washington, DC., 2009.
- BARRETO, S. M. P. **Avaliação dos níveis de inclusão da torta de macaúba [*Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. Ex Mart.] na alimentação de caprinos.** 2008. 102f. Dissertação de Mestrado (Ciências Agrárias) – Universidade Federal de Minas Gerais, Montes Claros, 2008. Disponível em <[http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/NCAP8A8FMY/disserta\\_\\_o\\_silene.pdf?sequence=1](http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/NCAP8A8FMY/disserta__o_silene.pdf?sequence=1)>. Acesso em: 10 set 2014.
- BORA, P. S.; ROCHA, R. V. M. Macaiba palm: fatty and amino acids composition of fruits. **Cienc. Tecnol. Aliment.**, v.4, n. 3, p.158-162. 2004. ISSN 1135-8122.
- BOYE, J. I.; BARBARA, C. Protein Processing in Food and Bioproduct Manufacturing and Techniques for Analysis. In: Dunford, N. T. **Food and Industrial Bioproducts and Bioprocessing.** 3 Ed. John Wiley & Sons Ltd., 2012. Capítulo 3. p.375-392. ISBN: 978-0-8138-2105-4
- CHAN, C-H.; YUSOFF, R.; NGOH, G-C. Modeling and kinetics study of conventional and assisted batch solvent extraction. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 92, p.1169–1186. 2014. ISSN: 0263-8762.
- CHIESA, S.; GNANSOUNOU, E. Protein extraction from biomass in a bioethanol refinery – Possible dietary applications: Use as animal feed and potential extension to human consumption. **Bioresource Technology**, v.102, p.427–436, 2011. ISSN: 0960-8524.
- DAMODARAN, S.; PARKIN, N. L.; FENNEMA, O. R. **Química de alimentos.** 4. Ed. Porto Alegre: Artmed, 2010. 900 p. ISBN: 9788536322483.
- DESSIMONI-PINTO, N. A. V. *et al.* Características físico-químicas da amêndoa de Macaúba e seu aproveitamento na elaboração de barras de cereais. **Alim. Nutr.**, Araraquara, v.21, n.1, p.79-86, jan./mar. 2010. ISSN: 0103-4235.
- FIRATLIGIL-DURMUS, E.; EVRANUZ, O. Response surface methodology for protein extraction optimization of red pepper seed (*Capsicum frutescens*). **Science and Technology (LWT)**, v.43, p.226–231, 2010. ISSN: 0023-6438.
- HIANE, P. A. *et at.* Chemical and nutritional evaluation of kernels of bocaiuva, *Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. **Cienc. Tecnol. Aliment.**, Campinas, v.26, n.3, p. 683-689, jul.-set. 2006. Disponível em <<http://www.scielo.br/pdf/cta/v26n3/31775.pdf>>. Acesso em: 23 ago 2015.
- MA, T.; WANG, Q.; WU, H. Optimization of extraction conditions for improving solubility of peanut protein concentrates by Response Surface Methodology. **Food Science and Technology**, Beijing, v.43, p. 1450-1455, 2010. ISSN: 0023-6438.
- MACHADO, C. A. C. *et al.* Modelo de viabilização da produção do consórcio: macaúba (*Acrocomia aculeata*) e cana-de-açúcar (*saccharum officinarum*). In: XXX ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 30, 2010, São Carlos. **Maturidade e desafios da Engenharia de Produção: competitividade das empresas, condições de trabalho, meio ambiente.** 2010. São Carlos: UFSCAR, 2010. Disponível em <[http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2010\\_TN\\_STP\\_123\\_796\\_16944.pdf](http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2010_TN_STP_123_796_16944.pdf)>. Acesso em: 16 abr. 2015.
- MARIANO, R. G. B. **Fracionamento e biotransformação de óleos obtidos a partir de frutos do cerrado: macaúba (*acrocomia aculeata*) e pequi (*caryocar brasiliense Camb*).** 2014. 113 f. Tese de Doutorado (Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014. Disponível em <<http://tpqb.eq.ufrj.br/download/fracionamento-ebiotransformacao-de-oleos-obtidos-de-frutos-do-cerrado.pdf>>. Acesso em: 24 set. 2015.
- MUNHOZ, C. L. **Elaboração de barras de cereal com bocaiuva.** 2013. 105f, Tese de Doutorado (Saúde e Desenvolvimento) - Universidade Federal de Mato Grosso, Campo Grande, 2013. Disponível em

<C:/Documents%20and%20Settings/Lab.Quimica/Meus%20documentos/Downloads/tese%20CI%C3%A1udia%20Munhoz.pdf>. Acesso em: 24 set. 2015.

NEVES, V. A.; SILVA Jr, S. I.; SILVA, M. A. Isolamento da globulina majoritária, digestibilidade in vivo e in vitro das proteínas do tremoço-doce (*Lupinus albus* L.), var. Multolupa. **Ciênc. Tecnol. Aliment.**, Campinas, v.26, n.4, p.832-840, out.-dez. 2006. Disponível em <[http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S010120612006000400019&script=sci\\_abstract&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S010120612006000400019&script=sci_abstract&tlng=pt)>. Acesso em: 24 set. 2015. ISSN 1678-457X.

NOBRE, D. A. C.; TROGELLO, E.; BORGHETTI, R. A.; DAVID, A.M.S. S. Macaúba: palmeira de extração sustentável para biocombustível. **Colloquium Agrariae**, v. 10, n.2, p.92-105. Jul.-Dez. 2014. Disponível em <<http://revistas.unoeste.br/revistas/ojs/index.php/ca/article/viewFile/934/1210>>. Acesso em: 12 ago 2015. ISSN: 1809-8215.

QUANHONG, L.; CAILI, F. Application of response surface methodology for extraction optimization of germinant pumpkin seeds protein. **Food Chemistry**, v.92, p.701–706, 2005. ISSN: 0308-8146.

REVELLO, C. Z. P. **Avaliação do valor nutricional de resíduos do processamento da macaúba (*acrocomia aculeata*) e de seus produtos de Bioconversão**. 2014. 81f. Dissertação de mestrado (Ciência e Tecnologia Ambiental) - Universidade Federal da Grande Dourados. Dourados, 2014. Disponível em <<http://www.ufgd.edu.br/facet/mestrado-ciencia-tecnologia-ambiental/dissertacoes-defendidas>>. Acesso em: 24 set. 2015.

RODRIGUES, I. M.; COELHO, J. F. J.; CARVALHO, M. G. V. S. Isolation and valorization of vegetable proteins from oilseed plants: Methods, limitations and

potential. **Journal of Food Engineering**, v.109, p.337–346, 2012. ISSN: 0260-8774.

STENZEL, M.; *et al.* Influência do tamanho das partículas na solubilização enzimática da proteína do farelo de soja. **Acta Scientiarum Technology**, Maringá, v. 31, n. 2, p. 195-200, 2009. Disponível em <<http://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciTechno/article/view/696>>. Acesso em: 24 set. 2015. ISSN 1807-8664.

SULIMAN, M. A. *et al.* Solubility as influenced by pH and NaCl Concentration and functional properties of Lentil proteins isolate. **Pakistan Journal of Nutrition**, v.5, n.6, p.589-593, 2006. Disponível em <<http://www.pjbs.org/pjnonline/fin536.pdf>>. Acesso em: 24 set 2015. ISSN 1680-5194.

TEIXEIRA, U. H. G. *et al.* Potencial de utilização de co-produtos agroindustriais para suplementos. **Revista eletrônica nutritime**, v.11, n.2, p.3363-3386, març./abr. 2014. Disponível em <[http://www.nutritime.com.br/arquivos\\_internos/artigos/ARTIGO244.pdf](http://www.nutritime.com.br/arquivos_internos/artigos/ARTIGO244.pdf)>. Acesso em: 12 out 2015. ISSN 1983-9006.

VEREDIANO, F. C. **Aproveitamento da torta residual da extração do óleo da Polpa de Macaúba para fins alimentícios**. 2012. 114f. Dissertação de Mestrado (Engenharia Química) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas. Belo Horizonte, 2012. Disponível em <[http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/BUOS95SFH2/disserta\\_\\_o\\_\\_fernanda\\_verediano.pdf?sequence=1](http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/BUOS95SFH2/disserta__o__fernanda_verediano.pdf?sequence=1)>. Acesso em: 12 mai 2015.

WANI, A. A. *et al.* Effect of temperature, alkali concentration, mixing time and meal/solvent ratio on the extraction of watermelon seed proteins a response surface approach. **Biosystems Engineering**, v.94, n.1, p.67–73, 2006. ISSN: 1537-5110.