

EFEITOS DO ÁLCOOL, TEMPERATURA E AGITAÇÃO RENDIMENTO DE ÉSTERES INDIVIDUAIS NA PRODUÇÃO DE BIODIESEL

Benjamim Henrique de Lima e Silva ¹
Amanda de Sena Gusmão ²
Suzana Pedroza da Silva ³

RESUMO

O biodiesel é um biocombustível formado por uma mistura de aquil ésteres de ácidos graxos. A composição de ésteres metílicos de ácidos graxo é um dos principais determinantes das propriedades do combustível biodiesel. Neste trabalho avaliou-se o efeito do tipo de álcool, da temperatura e da velocidade de agitação no rendimento individual dos ésteres graxos que compõem o biodiesel. Para isto, um planejamento fatorial de experimento 2³ sem ponto central foi montado. Os níveis das variáveis independentes estudadas foram tipo de álcool: metanol ou etanol; temperatura: 20 ou 60 °C e velocidade de agitação: 200 ou 600 rpm. Os procedimentos experimentais foram realizados em um reator tipo de batelada, operando isotermicamente por 50 minutos. O óleo utilizado foi o de soja refinado. Hidróxido de sódio na concentração 0,5% (m/m) foi usado como catalisador. A proporção álcool:óleo foi 6:1. As melhores condições de produção para todos os ésteres foram com álcool etílico, temperatura de 60 °C e velocidade de agitação de 600 rpm. Os efeitos da temperatura e da velocidade de agitação foram mais relevantes. Incrementos nas faixas de 13,40 – 18,64 % e 11,03 – 14,66 % foram observados respectivamente, com a elevação dessas variáveis dos níveis “-” para os níveis “+”. O efeito da alteração do tipo de álcool foi menos significativo, sendo relevante apenas para os ésteres C18:1 e C18:2, que tiveram seus rendimentos aumentados em 6,25% e 6,77%, respectivamente.

Palavras-chave: Biodiesel, Ésteres graxos, Planejamento fatorial, Rendimento.

INTRODUÇÃO

O biodiesel é um biocombustível ambientalmente limpo que possui propriedades físicas semelhantes às dos combustíveis diesel, sendo, portanto, uma alternativa promissora a esse combustível fóssil (ROOSTA E BARDOOL, 2019; SURASIT *et al.*, 2017). As vantagens do

¹ Doutor em Engenharia Química, Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, henrique.benjamim@gmail.com;

² Graduada em Química, Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE, amandinha-sena@hotmail.com;

³ Professora adjunta, Universidade Federal do Agreste de Pernambuco - UFape, Suzana.pedroza@ufape.edu.br.

biodiesel incluem biodegradabilidade, não toxicidade, menores níveis de emissão de poluentes, alto índice de cetano, teor de enxofre insignificante, menor emissão de óxido de nitrogênio, renovabilidade e alta suscetibilidade à combustão (CONCEIÇÃO *et al.*, 2019; DAS *et al.*, 2018).

A transesterificação alcalina é o processo mais amplamente empregado para a produção comercial de biodiesel. Envolve aquecer o óleo a uma temperatura designada com álcool e um catalisador básico. A conversão reduz a alta viscosidade dos óleos e gorduras, possibilitando a queima em motores diesel (SANI *et al.*, 2016).

O biodiesel é uma mistura de ésteres aquílicos, contendo geralmente em maior quantidade palmitato, oleato, linoleato e linolenato de metila ou etila, a depender do álcool utilizado. As propriedades desse combustível decorrem de sua composição química em ésteres de FA derivados das moléculas de triacilglicerol na matéria-prima. Ácidos graxos (FA) são cadeias alifáticas tipicamente lineares que diferem no comprimento e grau de insaturação. (DUNN *et al.*, 2019).

A estrutura dos compostos graxos afeta as propriedades do biodiesel em termos de densidade, número de cetano, valor calorífico e propriedades de baixa temperatura. Os FA insaturados apresentam baixa estabilidade oxidativa e emitem mais NO_x do que os ácidos graxos saturados. Por outro lado, os FA saturados exibem propriedades indesejáveis em baixa temperatura (GIAKOUMIS E SARAKATSANIS, 2018). Ésteres graxos saturados cristalizam facilmente nos motores causando problemas. Eles também afetam negativamente as propriedades de fluidez do biodiesel em baixas temperaturas (WANG *et al.*, 2019).

Apesar dessas pobres propriedades em baixa temperatura, a menor emissão de NO_x e a estabilidade oxidativa fizeram o mundo procurar por biodiesel derivado de FA saturados. Alguns estudos relataram que o aumento da saturação leva à diminuição das emissões de gases de efeito estufa e alto número de cetano (TAMILSELVAN *et al.*, 2020).

A partir do que foi reportado na literatura, fica evidente que um “equilíbrio” entre o conteúdo de componentes saturados e insaturados é crítico, considerando-se que as propriedades do biodiesel são invariavelmente dependentes do seu perfil de ésteres graxos (AVAGYAN E SINGH, 2019).

Uma questão lógica surge aqui é: poderia as condições de operação do processo de transesterificação alcalina influenciar no rendimento dos ésteres graxos individuais? Com o propósito de responder a essa questão, um planejamento fatorial 2³ foi elaborado para avaliar os efeitos provocados nessas variáveis pelo tipo de álcool (etanol ou metanol), velocidade de

agitação (200 ou 600 rpm) e temperatura (20 e 60 °C). O conhecimento da influência desses fatores operacionais no rendimento individual de cada éster é importante para determinação de suas características, e constituirá base para tomada de decisão e previsão das propriedades do biodiesel, a partir das condições de operação.

As variáveis independentes estudadas neste trabalho estão entre aquelas que têm maior impacto no custo de produção do biodiesel, pois são determinantes no rendimento e no tempo de operação (MÜLLER, 2019). O álcool usado fornece o tipo de grupo de cabeça de éster, que influencia fortemente as propriedades de fluxo a frio do biodiesel (FALLEN *et al.*, 2011). Os álcoois mais comumente usados no processo são metanol e etanol. Embora o metanol seja amplamente utilizado devido a sua acessibilidade e preços baixos (ROOSTA e BARDOOL, 2019), o uso de etanol é indicado a fim de se melhorar a performance do biodiesel em baixas temperaturas (WANG *et al.*, 2019).

As evoluções cinéticas dos processos usando etanol e metanol são relatados como muitos diferentes. Na metanólise, observa-se atrasos de 2-3 minutos para se iniciar a reação. Isso é atribuído à baixa solubilidade do metanol na fase óleo, necessitando-se de agitação vigorosa para que a reação seja iniciada. No entanto, o processo de metanólise é mais rápido que a etanólise, pois, embora o etanol seja mais apolar, o que diminui a resistência à transferência de massa inicial, ele melhora a miscibilidade mútua dos ésteres, intermediários e o glicerol, onde se encontra o catalisador residual, promovendo saponificação, que dificulta a etapa de separação dos produtos (ISSARIYAKUL e DALAI, 2014).

A agitação do sistema é umas variáveis mais importantes do processo, devido à baixa miscibilidade entre as fases reagentes óleo-álcool e produtos biodiesel-glicérol, conforme observaram Doell *et al.* (2008). O catalisador se encontra na fase álcool, logo a reação está limitada pela concentração dos triglicerídeos presentes nessa fase. Assim, o processo deve ocorrer sob agitação intensa visando minimizar as limitações de transferência de massa (LIKOZAR e LEVEC, 2014).

Aumento na temperatura geralmente diminui o tempo de reação e aumenta o rendimento do processo. A transesterificação alcalina pode ser operada à temperatura ambiente, sendo normalmente operada próximo do ponto de bolha do álcool (MUSA, 2016).

METODOLOGIA

Para avaliação dos rendimentos dos ésteres graxos individuais na produção de biodiesel por transesterificação alcalina, foi elaborado um planejamento fatorial 2^3 sem ponto central. As variáveis estudadas foram temperatura (20 ou 60 °C); velocidade de agitação (200 ou 600 rpm); e tipo de álcool (metanol ou etanol). A Tabela 1 detalha tais variáveis e seus níveis.

Foram realizados um total de 16 experimentos (8 experimentos em duplicata) com óleo de soja refinado obtido no comercial local de Recife-PE. Em todos os experimentos, a proporção óleo:álcool (RA:O) foi de 6:1; e o catalisador utilizado foi hidróxido de sódio (NaOH), marca Dinâmica, pureza 97%, na proporção de 0,5% (m/m) em relação à massa do óleo. Os álcoois utilizados foram ambos da marca Dinâmica, com pureza de 99,5% (etanol) e 99,8% (metanol). Os processos foram realizados em um reator de mistura de vidro encamisado com capacidade de 1,0 litro (Figura 1).

Tabela 1 - Variáveis e níveis do planejamento 2^3 realizado

Fator	-1	+1
Temperatura (°C)	20	60
Velocidade de agitação (rpm)	200	600
Álcool	Metanol	Etanol

Fonte: Os Autores (2021).

Em todas as operações, o óleo foi, inicialmente, adicionado ao reator e então aquecido até a temperatura investigada. A solução de alcóxido foi preparada à parte, adicionando-se o catalisador ao álcool, que também foi pré-aquecido. Tendo o óleo atingido a temperatura determinada, adicionou-se a solução de alcóxido ao óleo, iniciando-se a reação. O tempo de processo foi de 50 minutos em todos os casos. Ao final dos processos, amostras de 5,0 mL foram retiradas do reator e centrifugadas, por 25 minutos com velocidade de rotação de 3×10^3 rpm, em uma centrífuga marca Sigma, Modelo Sigma 203. Em seguida, as fases orgânicas foram recolhidas e lavadas com 10,0 mL de água destilada resfriada saturada com cloreto de sódio e centrifugadas novamente para separação de fases. Esse processo foi repetido duas vezes. Então as fases orgânicas de cada amostra foram diluídas em n-heptano (99%, marca CHEM-LAB), 30,00 mg/10 mL, para serem analisadas por cromatografia gasosa.

Figura 1 – Estrutura utilizada para operação de transesterificação



Fonte: Os Autores (2021)

As análises do teor de ésteres por cromatografia gasosa foram realizadas em um cromatógrafo a gás, marca Shimadzu. As condições de análises foram aquelas expostas no item 3.5. A programação do forno foi de 110 °C durante 1 minuto; subindo 7 °C/min até 175 °C, permanecendo nesta temperatura por 8 minutos; depois subiu 10 °C/min até 2100 °C, permanecendo por 2 minutos. A temperatura do detector foi de 230 °C e a do vaporizador, 200 °C.

A avaliação do planejamento foi realizada com auxílio do software *Statistica 8*®. Os experimentos foram realizados em duplicata e a ordem de realização foi aleatória

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Da estruturação do planejamento fatorial, temos então os três efeitos principais: tipo de álcool (A), temperatura (T) e velocidade de agitação (N), três interações de dois fatores, A-T, A-N e T-N; e uma interação de três fatores, A-T-N. Com o auxílio do software *Statistica 8*® foram calculados os valores dos efeitos e seus respectivos erros padrões, mostrados na Tabela 2 abaixo. As interações dos três fatores não se mostraram estatisticamente significantes, no nível de confiança avaliado (95%), em nenhum dos casos analisados; e por isso foram omitidas da Tabela 2.

Tabela 2 - Efeitos calculados para o planejamento 2^3 e seus erros padrões

	A (%)	T (%)	N (%)	A-T (%)	A-N (%)	T-N (%)
C16:0	1,69 ±0,59	14,98 ±0,59	11,03 ±0,59	0,81 ±0,59	4,67 ±0,59	-1,94 ±0,59
C18:0	2,92 ±0,65	18,64 ±0,65	14,66 ±0,65	-3,29 ±0,65	2,82 ±0,65	5,33 ±0,65
C18:1	6,25 ±0,65	13,40 ±0,65	12,02 ±0,65	-0,79 ±0,65	3,47 ±0,65	0,98 ±0,65
C18:2	6,77 ±0,55	13,93 ±0,55	11,90 ±0,55	-0,97 ±0,55	4,14 ±0,55	0,60 ±0,55
C18:3	3,99 ±0,63	14,92 ±0,63	11,92 ±0,63	-1,91 ±0,63	2,48 ±0,63	0,54 ±0,63

Fonte: Os Autores (2021).

C16:0 – palmitato; C18:0 – estearato; C18:1 – oleato; C18:2 – linoleato; e C18:3 – linolenato. A – álcool; T – temperatura; N – velocidade de agitação.

Utilizando os valores dos erros padrão do efeito (S_{efeito}), foi determinado, para cada éster graxo, o intervalo de confiança para os efeitos através da equação: $I.C. = t_{(95\%, 8 GL)} \times S_{efeito}$. O valor tabelado para $t_{(95\%, 8 GL)}$ é 2,31, o que nos forneceu os valores de $I.C.$ listados na Tabela 3.

Tabela 3 – valores dos intervalos de confianças, $I.C.$, dos efeitos para cada éster graxo.

	C16:0	C18:0	C18:1	C18:2	C18:3
$I.C.$	1,4	1,5	1,51	1,23	1,45

Fonte: Os Autores (2021).

C16:0 – palmitato; C18:0 – estearato; C18:1 – oleato; C18:2 – linoleato; e C18:3 – linolenato.

Identificados todos os valores dos efeitos, para cada éster graxo, com seus respectivos intervalos de confiança, mostraram-se significativamente diferentes de zero:

- C16:0 – os efeitos da temperatura e da velocidade de agitação, bem como da interação entre esses dois fatores; além do efeito de interação A-N;
- C18:0 – os efeitos da temperatura e da velocidade de agitação, além de todos os efeitos de interação de dois fatores;
- C18:1 – todos os efeitos principais, além do efeito de interação A-N;
- C18:2 – todos os efeitos principais, além do efeito de interação A-N;
- C18:3 – todos os efeitos principais, além dos efeitos de interação A-N e A-T.

Os efeitos de interação de dois fatores, embora estatisticamente significativos em alguns casos, não são relevantes na perspectiva operacional dos processos devido suas baixas magnitudes. Dessa forma, serão discutidos apenas os efeitos principais de cada fator.

A análise dos efeitos principais mostraram que a alteração do tipo de álcool implica aumento do rendimento em todos ésteres graxos em todos os casos. Com tal alteração, os maiores incrementos foram aqueles obtidos para os ésteres C18:1 e C18:2 (Tabela 2).

Dentre as variáveis independentes estudadas, a temperatura foi a que se mostrou mais relevante. Em todos os casos, o aumento da temperatura resultou em aumento dos rendimentos dos ésteres. Sendo o efeito mais relevante para o éster C18:0, e o menos relevante o observado para o C18:1 (Tabela 2). Isso pode ser analisado a partir do fator de que a maior mudança nas propriedades ocorre ao passar da cadeia de FA saturados para a cadeia de FA monoinsaturada. As transições subsequentes para ainda mais ligações duplas têm menos efeito, conforme relatado por Knothe e Razon (2017).

A velocidade de agitação também apresentou resultados bastantes relevantes. O aumento da velocidade de agitação incrementou os rendimentos de todos os ésteres graxos individuais. Aqui o C18:0 foi o mais afetado, enquanto que para os demais ésteres os resultados foram estatisticamente iguais: um aumento na velocidade de agitação de 200 para 600 rpm implica aumento de rendimento de aproximadamente 11 %.

Apesar de os efeitos de interação dos três fatores não ter sido significativo estatisticamente no nível de confiança avaliado, os resultados mostraram que, para todos os ésteres, as condições ótimas de rendimento foram com as variáveis no nível “+” (etanol, 60 °C e 600 rpm), enquanto que os menores valores foram obtidos quando as condições de operação foram: metanol, 20 °C e 200 rpm. A elevação das condições dos níveis “-” para os níveis “+” de todas as variáveis foi mais determinante para o éster C18:0, cujo rendimento aumentou em 33 %. O menos afetado foi o éster C16:0, com aumento de rendimento de 26 %.

O éster C18:0 foi o mais afetado pela velocidade de agitação. Em todas as operações em que a velocidade de agitação foi de 200 rpm, esse éster foi o que apresentou os menores valores de rendimentos. Nas condições ótimas, os ésteres C18:2 e C16:0 foram aqueles que apresentaram os maiores valores de rendimento. O menor valor de rendimento para o C16:0 foi nas condições: etanol, 20 °C e 200 rpm (~54%). Foram nessas condições também que os ésteres C18:0 teve menor desempenho reacional (~52%). Os demais ésteres tiveram menor desempenho reacional nas condições: metanol, 20 °C e 200 rpm.

Embora seja desejável que o biodiesel apresentem maiores teores C18:1, uma vez que são os fornecem maior estabilidade oxidativa e melhor performance em motores em baixa temperatura (CLEMENTE e KINNEY, 2005; FALLEN *et al.*, 2011; KNOTHE, 2008), esses ésteres C18:1 estiveram entre aqueles que apresentaram os menores valores de rendimento nos experimentos executados, estando à frente apenas do éster C18:0.

Devido à complexidade inerente ao meio reacional da transesterificação alcalina de oleaginosas, que inclui, além dos efeitos químicos indutivos e estéricos, efeitos da distribuição de FA nos triglicerídeos e efeitos de mistura e solubilização, não foi possível neste trabalho uma análise mais detalhada que pudesse correlacionar os resultados obtidos com as estruturas dos FA. Sugere-se estudos mais abrangentes que incluam mecanismos individuais de interação química e física de cada FA com os álcoois, considerando-se os efeitos de mistura e reação química.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O planejamento 2³ aplicado ao processo de transesterificação alcalina de óleo de soja com vistas à produção de biodiesel. As variáveis independentes estudadas foram temperatura, velocidade de agitação e tipo de álcool. Como variável dependente, estudou-se os rendimentos dos ésteres graxos individuais que compõem o biodiesel. Os resultados indicaram que, para todos os ésteres graxos, as condições ótimas são álcool etílico, 60 °C e 600 rpm. Nessas condições, o éster C18:2 foi o que apresentou maior rendimento (89 %). O menor rendimento alcançado foi o do éster C18:0 (51,6 %) nas condições álcool metílico, 20 °C e 200 rpm.

Observou-se que o aumento na temperatura resulta em um incremento na faixa de 13,40 – 18,64 % nos rendimentos dos ésteres graxos. Já o aumento da velocidade de agitação implica aumento no rendimento dos ésteres na faixa de 11,03 – 14,66 %. A alteração do tipo de álcool, de metanol para etanol, resultou em um melhoramento tímido, sendo relevante apenas para os ésteres C18:1 e C18:2, que tiveram seus rendimentos aumentados em 6,25% e 6,77%, respectivamente.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à **Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior** (CAPES) e ao **Projeto EBW+** (Euro-Brazilian Windows +) pelo apoio financeiro a

este trabalho. Este trabalho também foi apoiado por: Financiamento Base - UIDB / 50020/2020 do Laboratório Associado LSRE-LCM - financiado com fundos nacionais através da FCT / MCTES (PIDDAC). São também devidos os agradecimentos aos professores Dr. Alírio Rodriguez e Dr. Rui Faria da Universidade do Porto, Portugal.

REFERÊNCIAS

AVAGYAN, A. B.; SINGH, B. *Biodiesel: Feedstocks, Technologies, Economics and Barriers*. Cingapura: Springer, 2019. 137 p. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-5746-6>

CLEMENTE, T. E.; KINNEY, A. J. Modifying soybean oil for enhanced performance in biodiesel blends. **Fuel Processing Technology**, v. 86, p. 1137–1147, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2004.11.008>

CONCEIÇÃO, J. N.; MARANGONI, B. S.; MICHELS, F. S.; OLIVEIRA, I. P.; PASSOS, W. E.; TRINDADE, M. A. G.; CAIRES, A. R. L. (2019) Evaluation of molecular spectroscopy for predicting oxidative degradation of biodiesel and vegetable oil: Correlation analysis between acid value and UV–vis absorbance and fluorescence. **Fuel Processing Technology**, v. 183, p.1–7. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2018.10.022>

DAS, M.; SARKAR, M.; DATTA, A.; SANTRA, A. K. (2018) An experimental study on the combustion, performance and emission characteristics of a diesel engine fuelled with diesel-castor oil biodiesel blends. **Renewable Energy**, v. 119, p. 174–184. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.12.014>

DOELL, R.; KONAR, S. K.; BOOCOCK, D. G. B. Kinetic parameters of a homogeneous transmethylation of soybean oil. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, v. 85, n. 3, p. 271–276, 2008. <https://doi.org/10.1007/s11746-007-1168-8>.

DUNN, R. O.; WYATT, V. T.; WAGNER, K.; NGO, H.; HUMS, M. E. The Effect of Branched-Chain Fatty Acid Alkyl Esters on the Cold-Flow Properties of Biodiesel. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, v. 96, p. 805–823. 2019. <https://doi.org/10.1002/aocs.12226>

FALLEN, B. D.; PANTALONE, V. R.; SAMS, K. E.; KOPSELL, D. A.; VAUGHN, S. F.; MOSER, B. R. Effect of Soybean Oil Fatty Acid Composition and Selenium Application on Biodiesel Properties. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, v. 88, p. 1019–1028, 2011. <https://doi.org/10.1007/s11746-010-1746-z>

GIAKOUMIS, E. G.; SARAKATSANIS, E. K. Estimation of biodiesel cetane number, density, kinematic viscosity and heating values from its fatty acid weight composition. **Fuel**, v. 222, p. 574–585, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.02.187>

ISSARIYAKUL, T.; DALAI, A. K. Biodiesel from vegetable oils. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 31, p. 446–471, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.11.001>.

KNOTHE, G. “Designer” biodiesel: optimizing fatty ester composition to improve fuel properties. **Energy & Fuels**, v. 22, n. 2, p. 1358–1364, 2008. <https://doi.org/10.1021/ef700639e>

LIKOZAR, B; LEVEC, J. Effect of process conditions on equilibrium, reaction kinetics and mass transfer for triglyceride transesterification to biodiesel: experimental and modeling based on fatty acid composition. **Fuel Processing Technology**. v. 122, p.30–41, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.01.017>

MOSTAFAEI, M. Prediction of biodiesel fuel properties from its fatty acids composition using ANFIS approach. **Fuel**. v. 229, p. 227-234, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.04.148>

MÜLLER, T. E. Biodiesel Production Systems: Reactor Technologies. In TABATABAEI, M.; AGHBASHLO, M. (Ed.), *Biodiesel from production to combustion*. Cham: Springer, 2019, p. 15-27. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-00985-4>

MUSA, I. A. The effects of alcohol to oil molar ratios and the type of alcohol on biodiesel production using transesterification process. **Egyptian Journal of Petroleum**, v. 25, n. 1, p. 21–31, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2015.06.007>

PALSAMI TAMILSELVAN, P.; SASSYKOVA, L.; PRABHAHAR, M. BHASKAR, K.; KANNAYIRAM, G.; SUBRAMANIAN, S.; PRAKASH, S. Influence of saturated fatty acid material composition in biodiesel on its performance in internal combustion engines. **Materials Today: Proceedings**, v. 33, p. 1181–1186, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.626>

ROOSTA, A.; BARDOOL, R. A predictive correlation for dynamic viscosity of fatty acid methyl esters and biodiesel. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, v. 96, p. 741–750, 2019. <https://doi.org/10.1002/aocs.12243>

SANI, Y. M.; DAUD, W. M. A. W.; AZIZ, A. R. A. Biodiesel Feedstock and Production Technologies: Successes, Challenges and Prospects. In FANG, Z. (Ed.), *Biodiesel: feedstocks, production and applications*. Croatia: IntechOpen, 2016, p. 78-101. <https://doi.org/10.5772/52790>.

SURASIT, C.; YOOSUK, B.; POHMAKOTR, M.; TANTIRUNGROTECHAI, J. (2017) Biodiesel synthesis from palm fatty acid distillate using tungstophosphoric acid supported on cesium-containing Niobia. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, v. 94, p. 465–474. <https://doi.org/10.1007/s11746-016-2937-z>

WANG, W.; LI, F.; LI, Y. Kinetics and the fluidity of the stearic acid esters with different carbon backbones. **Green Processing and Synthesis**, v. 8, p. 776–785, 2019. <https://doi.org/10.1515/gps-2019-0046>