

CAPÍTULO IV

SURFACTANTES DE ORIGEM MICROBIANA PARA APLICAÇÕES INDUSTRIAIS

*Elisa Maria de Oliveira
Victor Hugo Gomes Sales
Emerson Adriano Guarda
Wardsson Lustrino Borges
Marcelo Silva Andrade
Tiago Marcolino de Souza*

*Neste capítulo apresentamos de forma introdutória informações sobre surfactantes, biossurfactantes, microrganismos produtores de biossurfactantes (em especial do gênero *Pseudomonas*), bem como, as principais propriedades e suas aplicações industriais.*

Introdução

De acordo com Banat (2000) os compostos tensoativos ou surfactantes foram introduzidos na civilização pelos fenícios e, inicialmente eram produzidos a partir de gordura animal e óleo vegetal, sendo posteriormente sintetizados quimicamente. Os surfactantes são moléculas anfipáticas constituídas por grupos hidrofílicos e hidrofóbicos que agem nas interfaces de líquidos e em superfícies sólidas modificando a tensão superficial e interfacial. A porção polar do surfactante é frequentemente uma cadeia hidrocarbonada enquanto a porção apolar pode ser iônica (aniônica ou catiônica), não iônica ou anfotérica (NITSCHKE; PASTORE, 2002).

Esses compostos constituem uma importante classe de produtos químicos largamente utilizados na indústria moderna, com aplicações na indústria farmacêutica, cosmética, petroquímica e alimentícia, uma vez que atuam como dispersantes e/ou solubilizantes de compostos orgânicos que apresentam baixa solubilidade em água, devida a capacidade desses reduzir a tensão superficial e interfacial entre líquidos, sólidos e gases, permitindo a mistura ou dispersão imediatamente como emulsões em água (BANAT, 2000). Além dessas características, esses compostos podem apresentar outras propriedades, tais como: detergência, umectabilidade, poder espumante e atividade antimicrobiana (BODOUR; MILLER-MAIER, 1998).

A eficácia dos surfactantes segundo Mulligan (2005) é determinada através da capacidade do surfactante reduzir a tensão interfacial (energia livre entre as fases) e superficial (energia livre da superfície por unidade de área, ou seja, energia necessária para trazer uma molécula do interior do líquido para a superfície). Essa eficácia pode ser medida através da Concentração Micelar Crítica (CMC), que é definida como concentração mínima de surfactante que permitirá a formação de micelas e conferirá as propriedades de detergência e solubilização ao composto tratado.

A grande maioria dos surfactantes em uso atualmente são da base petroquímica. Entretanto, com os avanços na área de biotecnologia e também com o aumento da preocupação com meio ambiente, pesquisas com biossurfactantes vem sendo impulsionadas, pois esses metabólitos apresentam alta diversidade química e de propriedades, baixa toxicidade, maior seletividade, biodegradabilidade com melhor compatibilidade ambiental, boa atividade em condições extremas de pH e salinidade, além de serem sintetizados a partir de matérias-primas renováveis (DESAI; BANAT, 1997; COSTA et al., 2006). Quando comparados com os surfactantes sintéticos, os biossurfactantes são ecologicamente mais aceitos, devido a sua baixa toxicidade e biodegradabilidade na natureza, sendo tão eficientes quanto os surfactantes sintéticos (PEIXOTO, 2008).

De acordo com Barbosa, Gondin e Paz (2007) os biossurfactantes são metabólitos sintetizados por uma variedade de microrganismos, apresentando diferentes estruturas químicas e propriedades surfactantes, ou seja, apresentam diferentes funções naturais com diferentes aplicações industriais. De acordo com Banat (2000), Maier & Soberón-Chavez (2000), Desai & Banat (1997) há diversas aplicações industriais promissoras. No segmento alimentício, por exemplo, os biossurfactantes são utilizados no desenvolvimento de diferentes produtos que atendem os pré-requisitos funcionais para serem novos aditivos alimentares (BLOOMBERG, 1999).

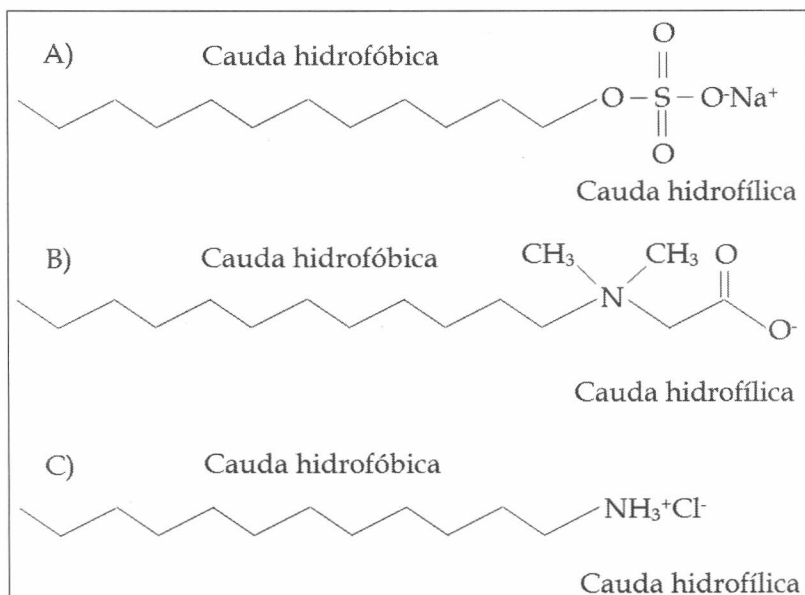
Os biossurfactantes podem também ser aplicados em formulações de fármacos e cosméticos, produtos alimentícios, agrícolas, em processos especiais de recuperação de petróleo, recuperação e proteção ao meio ambiente (SAEKI et al., 2009; THANOMSUB et al., 2006), bem como, na remoção de íons metálicos tóxicos em processo de tratamento de efluente por flotação (ZOUBOULIS et al., 2003). Os biossurfactantes são produzidos por microrganismos para que esses cresçam em substratos hidrofóbicos, disponibilizando os nutrientes ali presentes para o seu metabolismo. De acordo com Barbosa (2011) e Strelec (2006) a produção desses metabólitos está ligada a fatores de virulência e a formação de biofilme. Devido à vasta aplicabilidade dos biossurfactantes, diversos estudos estão sendo desenvolvidos com o objetivo de gerar novas tecnologias para melhorar as linhagens de microrganismos, bem como, os processos de produção (NITSCHKE; PASTORE, 2002).

Surfactantes

O termo surfactante segundo Barros et al. (2007) vem da contração da expressão *Surface active agent*, que significa agente de atividade superficial. Esses compostos de acordo com Silva et al. (2009) possuem a capacidade de reduzir a tensão superficial e interfacial em fluidos imiscíveis. A tensão superficial está relacionada com as forças de atração e repulsão entre as moléculas de um fluido. Para manter as moléculas coesas na superfície líquida, estas exercem uma força de atração intermolecular forte sobre as moléculas mais próximas da superfície, denominada tensão superficial (VERA, 2017).

Dentro de uma importante classe química, os surfactantes são amplamente utilizados em diversos setores industriais. Os surfactantes apresentam duas porções distintas, uma porção hidrofóbica (apolar) e uma porção hidrofílica (polar). A porção apolar é constituída geralmente por uma cadeia hidrocarbonada (ex. cadeias alifáticas, grupos policíclicos ou aromáticos). A porção polar, pode ser iônica, não iônica ou anfotérica (ex. ésteres sulfatados ou sulfatos de ácido graxos e sais de amônio quaternário (PEIXOTO, 2008; LIMA, 2007; NITSCHKE; PASTORE, 2002). A Figura 1 apresenta a estrutura de alguns surfactantes.

Figura 1 – Exemplos de surfactantes sintéticos utilizados na indústria. Estrutura do: A) Dodecil sulfato de sódio (surfactante aniônico); B) Cloreto de dodecilamônio (surfactante catiônico) e C) N-dodecil-N, N dimetilbetaína (surfactante anfótero)



Os surfactantes por apresentarem em sua estrutura química grupos polares (grupo hidrofílico) e apolares (grupo hidrofóbico) tendem a se distribuir nas interfaces entre fases fluidas com diferentes graus de polaridade (óleo/água e água/óleo). A redução da tensão superficial e interfacial se deve a formação de um filme molecular, ordenado nas interfaces, o que caracteriza a esses compostos propriedades únicas. Estas propriedades fazem os surfactantes serem adequados para uma ampla gama de aplicações industriais envolvendo: detergência, emulsificação, lubrificação, capacidade espumante, capacidade molhante, solubilização e dispersão de fases. A maior utilização dos surfactantes se concentra na indústria de produtos de limpeza (sabões e detergentes), na indústria de petróleo e na indústria de cosméticos e produtos de higiene (BUENO; SILVA; GARCIA-CRUZ, 2010; BARROS et al., 2007).

A tensão superficial entre as interfaces dos sistemas (ar/água, óleo/água), conforme exemplo na Figura 2, podem ser medidas facilmente utilizando um tensiômetro (DESAI; BANAT, 1997). Van Hamme e Urban (2009) afirmam que, quando um surfactante é adicionado a esses sistemas em concentrações crescentes, observa-se uma redução da tensão superficial até um valor crítico. Essa quantidade de surfactante é conhecida com Concentração Micelar Crítica (CMC), e é usada para medir a eficiência do surfactante. A partir da CMC, a adição de surfactante não afeta significativamente a tensão superficial do sistema (Figura 3).

Figura 2 – Tensão superficial entre as interfaces em um sistema bifásico

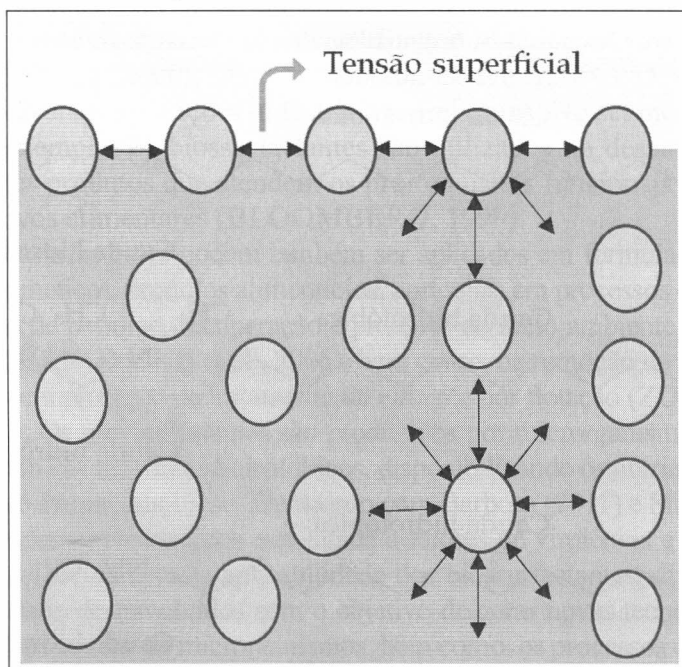
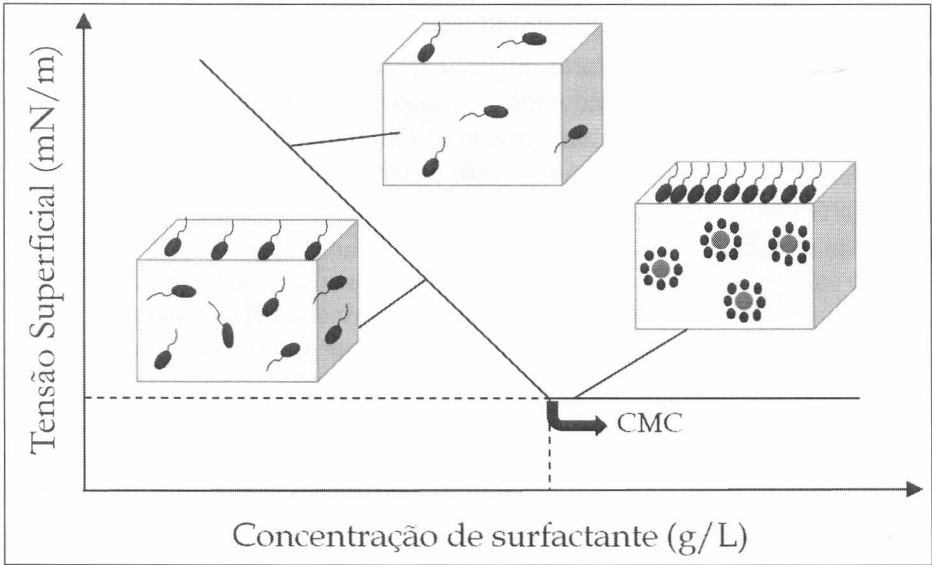


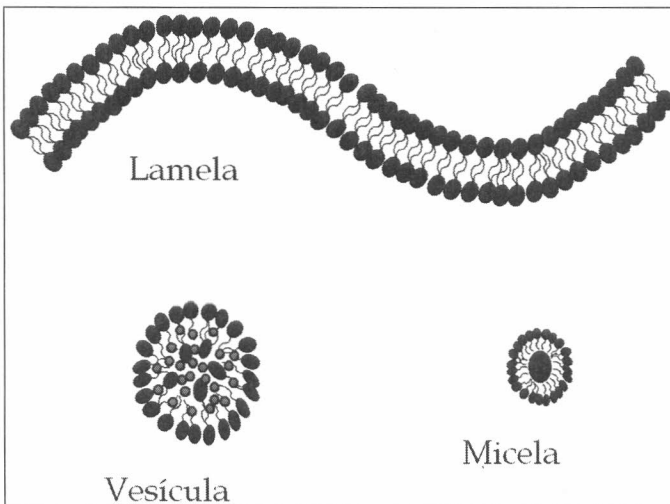
Figura 3 – Ação do surfactante e formação de micelas (Concentração Micelar Crítica, CMC)



Fonte: Adaptado de Santos et al. (2016).

Uma vez que a Concentração Micelar Crítica do surfactante adicionado ao sistema tenha sido atingida (Figura 3), as moléculas se associam formando micelas, vesículas esféricas ou irregulares e lamelas (bicamadas contínuas), conforme pode ser observado na Figura 4.

Figura 4 – Estruturas básicas formadas por biossurfactantes



Fonte: Adaptado de Champion et al. (1995).

Com a adição do surfactante em meio aquoso, a porção hidrofóbica do mesmo se agrupa sobre a superfície do líquido, a fim de minimizar as interações energéticas das moléculas polares da água. Esse processo ocorrerá até a superfície líquida saturar, a partir de então, as pontes de hidrogênio que promovem a alta tensão superficial do líquido são rompidas, e a tensão superficial (líquido-ar) ou interfacial (líquido-líquido) tendem a baixar (SOBERÓN-CHÁVEZ; MAIER, 2011; VAN HAMME; URBAN, 2009; MULLIGAN, 2009). Na Tabela 1 é apresentada a relação de alguns surfactantes de uso comum e sua concentração micelar crítica.

Tabela 1 – Concentração Micelar Crítica (CMC) e número de agregação (N) para surfactantes de uso comum

Surfactante (Abreviação)	CMC (mmol L ⁻¹)	N
Aniônico		
Dodecil sulfato de sódio (SDS)	8,1	62
Octil sulfato de sódio (SOS)	1,36	20
Catiônico		
Cloreto de hexadecil-trimetil-amônio (CTAC)	1,3	78
Brometo de dodecil-trimetil-amônio (DTAB)	15	50
Anfotérico		
N-dodecil sulfatna (SB-12)	1,2	-
Não iônico		
Poliexietileno-1-octifenol (Triton X-100)	0,2	143

Fonte: Adaptado de Tavares (1997).

Apesar dos primeiros surfactantes terem sido obtidos a partir de gorduras animais e óleos vegetais (fontes renováveis), atualmente a grande maioria é sintetizada a partir de derivados do petróleo (BUENO; SILVA; GARCIA-CRUZ, 2010). Contudo, com a atual preocupação com o meio ambiente, vem crescendo a necessidade de buscar novas fontes de surfactantes de origem microbiana. Os surfactantes de origem microbiana (biossurfactantes) possuem baixo impacto ao meio ambiente, devido a sua natureza biodegradável (LIMA, 2007; NITSCHKE; PASTORE, 2002).

Biossurfactantes

Nos últimos anos houve um aumento no interesse em isolar microrganismos produtores de biossurfactante com baixa CMC, baixa toxicidade e alta atividade emulsificante (CAMPOS et al., 2013). De acordo com Silva et al. (2014),

diversos microrganismos, como bactérias, leveduras e alguns fungos filamentosos, são capazes de produzir biossurfactantes com diferentes estruturas moleculares e atividade superficial. Os biossurfactantes são classificados de acordo com a sua composição química e sua origem microbiana, as principais classes incluem os glicolípídeos, lipopeptídeos e lipoproteínas, fosfolípídeos e ácidos graxos, surfactantes poliméricos e surfactantes particulados.

O mercado mundial de biossurfactantes em 2017 foi de US \$ 4,20 bilhões e deverá atingir US \$ 5,52 bilhões até 2022, ou seja, uma expectativa de crescimento de 5,6% de 2017 a 2022. Esse crescimento está relacionado com a crescente conscientização dos consumidores, fomentada pelas organizações reguladoras internacionais. Existe uma crescente demanda por parte de diversos segmentos industriais, para o desenvolvimento de soluções verdes, em busca de produtos de uso final (100% de biodegradáveis), com baixo custo. No entanto, quando comparado aos surfactantes químicos convencionais, os biossurfactantes ainda apresentam um custo maior, principalmente devido o processo de produção. Esse fator tem causado uma grande restrição no uso desses no mercado global (BUSINES WIRE 2018).

Microrganismos produtores de biossurfactantes

Os biossurfactantes foram primeiramente isolados de espécies de *Pseudomonas aeruginosa*, descritos por Jarvis e Johnson (1949). Atualmente sabe-se que os biossurfactantes podem ser sintetizados por bactérias e fungos a partir de vários substratos, incluindo açúcares, glicerol, óleos, hidrocarbonetos e resíduos agrícolas (KHOPADE et al., 2012).

Os metabólitos mais amplamente estudados são os ramnolípídeos. Na literatura é descrito que os melhores produtores de biossurfactante são do gênero *Pseudomonas* e *Bacillus*, como exemplo *B. subtilis* (AL-WAHAIBI et al., 2014; GUDIÑA et al., 2015) *B. licheniformis* (EL-SHESHTAWY et al., 2015) e *P. aeruginosa* (MENDES et al., 2015). Contudo, atualmente várias leveduras são descritas como produtora de biossurfactante, principalmente as do gênero *Candida*, como a *C. ingens* (AMÉZCUA-VEGA et al., 2007), *C. bombicola* (FELSE et al., 2007; DAVEREY; PAKSHIRAJAN, 2011), *C. rugosa* (CHANDRAN; DAS, 2011), *Candidas phaerica* (LUNA et al., 2013) e *Candida lipolytica* (SARUBBO et al., 2001; MENDES et al., 2015). Outros exemplos são citados por Santos et al. (2016): *Candida lipolytica*, *Yarrowia lipolytica*, *Saccharomyces cerevisiae* e *Kluyveromyces lactis*, que apresentam bons resultados na produção de biossurfactante além de possuírem o status de GRAS (*Generally Recognized as Safe*), ou seja, geralmente reconhecidas como seguras. Na Tabela 2 é apresentada uma lista com as classes de biossurfactantes e microrganismos envolvidos na sua produção.

Alguns microrganismos sintetizam biossurfactante a partir de substratos solúveis e insolúveis, como o *Paenibacillus alvei* ARN63 (NAJAFI et al., 2011), *Candida sphaerica* (LUNA et al., 2012), *Trichosporon montevidense* (Monteiro et al., 2011) e *Pseudomona aeruginosa* UCP0992 (SILVA et al., 2010), além de fungos como *Aspergillus ustus* MSF3 (KIRAN et al., 2009).

Tabela 2 – Principais classes de biossurfactantes e microrganismos envolvidos

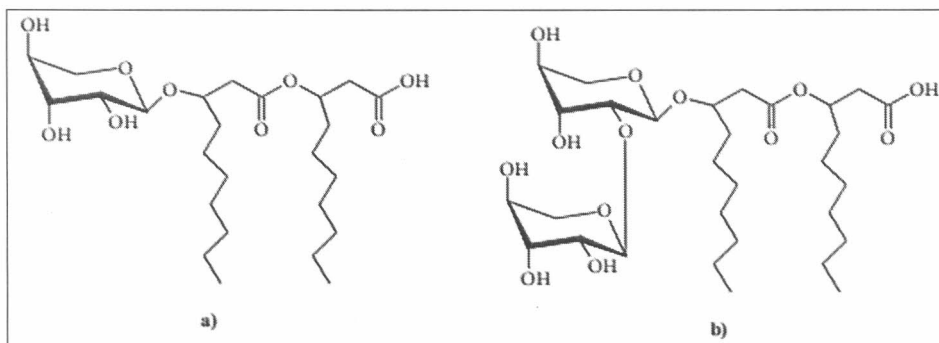
Tipo de biossurfactante	Microrganismo
Glicolipídeos	
Ramnolipídeos	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>
Soforolipídeos	<i>Torulopsis bombicola</i> , <i>T. apicola</i>
Trehalolipídeos	<i>Rhodococcus erythropolis</i> , <i>Mycobacterium</i> sp.
Lipopeptídeos e lipoproteínas	
Peptídeo-lipídeo	<i>Bacillus licheniformis</i>
Viscosina	<i>Pseudomonas fluorescens</i>
Serrawetina	<i>Serratia marcescens</i>
Surfactina	<i>Bacillus subtilis</i>
Subtilisina	<i>Bacillus subtilis</i>
Gramicidina	<i>Bacillus brevis</i>
Polimixina	<i>Bacillus polymyxa</i>
Ácidos graxos, lipídios neutros e fosfolipídeos	
Ácidos graxos	<i>Corynebacterium lepus</i>
Lipídeos neutros	<i>Nocardia erythropolis</i>
Fosfolipídeos	<i>Thiobacillus thiooxidans</i>
Surfactantes poliméricos	
Emulsan	<i>Acinetobacter calcoaceticus</i>
Biodispersan	<i>Acinetobacter calcoaceticus</i>
Liposan	<i>Candida lipolytica</i>
Carboidrato-lipídeo-proteína	<i>Pseudomonas fluorescens</i>
Manana-lipídeo-proteína	<i>Candida tropicalis</i>
Surfactantes particulados	
Vesículas	<i>Acinetobacter calcoaceticus</i>
Células	Várias bactérias

Fonte: Adaptado de Nitschke & Pastore (2002).

Segundo Muller & Hausman (2001) os ramnolipídeos são biossurfactantes glicolipídeos, produzidos por várias espécies de bactérias que apresentam em sua estrutura ramnose e ácido β -hidroxidecanoico. Sua descrição foi realizada parcialmente pela primeira vez por Bergstrom et al. (1946), que denominou o glicolipídeo oleoso produzido por *Pseudomonas pyocyanea* (reclassificada posteriormente em *Pseudomonas aeruginosa*) como ácido piolípídico, e identificou suas unidades estruturais como sendo a ramnose e o ácido β -hidroxidecanoico. Três anos depois Jarvis e Johnson (1949) determinaram a real proporção dessas unidades estruturais no ácido piolípídico, demonstrando que através de uma ligação glicosídica, dois ácidos β -hidroxidecanoico encontram-se ligados a duas moléculas de ramnose.

Segundo Abdel-Mawgoud et al. (2010), os principais ramnolipídeos produzidos por *Pseudomonas aeruginosa* são o ramnosil- β -hidroxidecanoil- β -hidroxidecanoato (monorramnolipídeo) e o ramnosil-ramonosil- β -hidroxidecanoil- β -hidroxidecanoato (dirramnolipídeo). As estruturas moleculares desses ramnolipídeos são apresentadas na Figura 5.

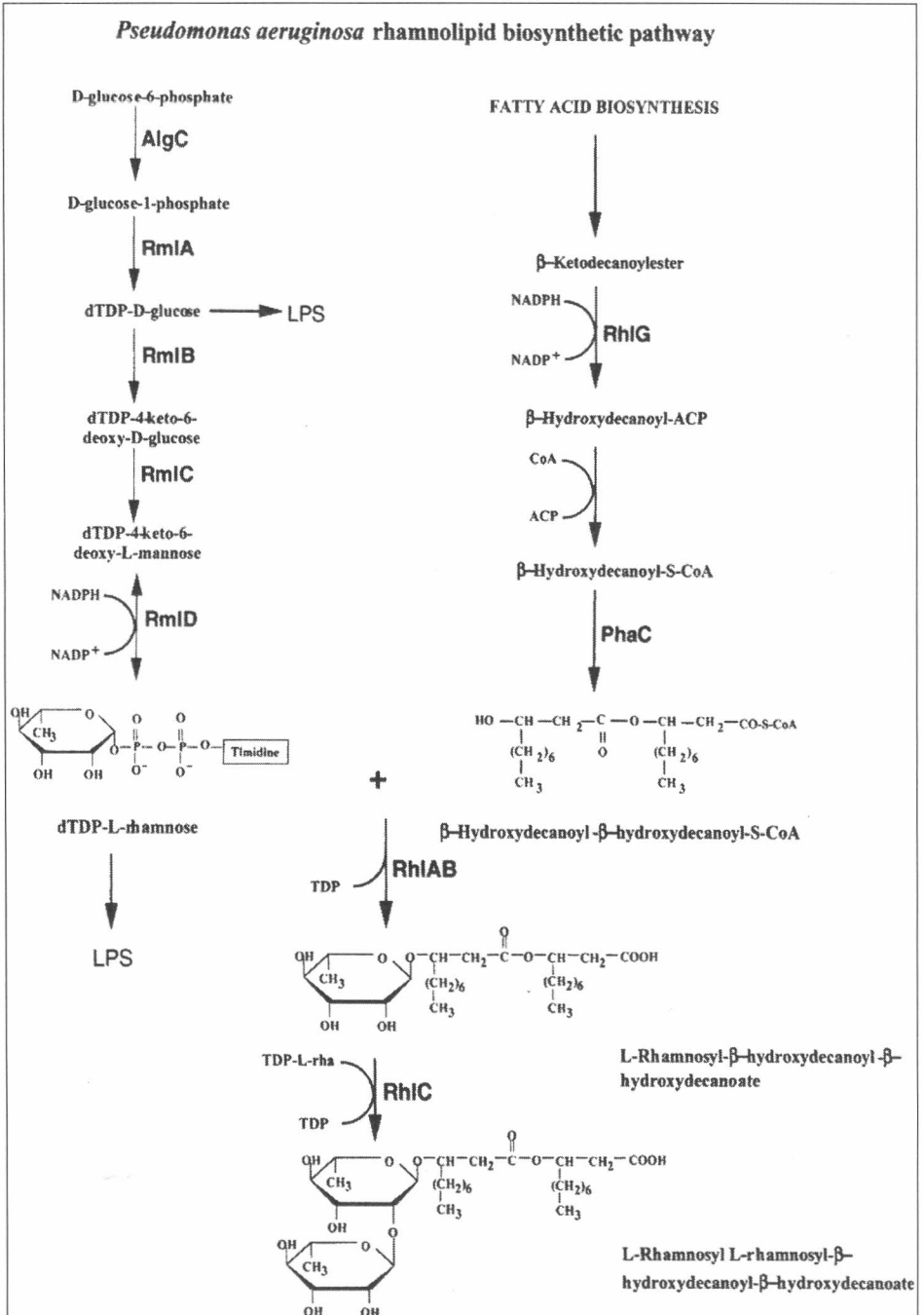
Figura 5 – Estrutura de biossurfactantes:
a) Monorramnolipídeo; b) Dirramnolipídeo



Fonte: Silva (2008).

A biossíntese destas moléculas tensoativas de ramnolipídeos ocorre por meio de duas reações sequenciais de transferência de rhamnosil. Cada uma dessas reações é catalisada por uma rhamnositransferase específica (Rt 1 e Rt 2, respectivamente), com a ação de desoxi-timidina-difosfato-L-ramnose (dTDP-L-Rhamnose) como o doador de rhamnosil e β -Hydroxydecanoil- β -hidroxidecanoato ou monorhamnolipídeo atuando como os respectivos recipientes (MAIER; SOBERÓN-CHAVES, 2000 *apud* BURGUER et al., 1963; 1966), conforme pode ser observado na Figura 6.

Figura 6 – Rotas metabólicas para produção de ramnolipídeos pela *Pseudomonas aeruginosa* PAO1



Fonte: Maier & Soberón-Chaves (2000).

Propriedades dos biossurfactantes

A exata função fisiológica dos biossurfactantes não foi totalmente elucidada. Entretanto, algumas funções vêm sendo atribuídas a essas moléculas, tais como: a emulsificação e solubilização de hidrocarbonetos ou compostos insolúveis em água; transporte de hidrocarbonetos; aderência-liberação de células a superfícies e atividade antibiótica (NITSCHKE; PASTORE, 2002).

De acordo com Desai e Banat (1997) e Nitschke e Pastore (2002) embora os biossurfactantes apresentem composição química e propriedades diversas, algumas características são comuns. Essas características tornam os biossurfactantes comparáveis ou superiores aos surfactantes sintéticos em termos de eficiência (VAN DYKE; LEE; TREVORS, 1991). Os biossurfactantes apresentam ainda a vantagem de serem sintetizados a partir de substratos renováveis. De acordo com Nitsche e Pastore (2002) modificações da estrutura química e das propriedades físicas dos biossurfactantes podem ser realizadas por meio de manipulações genéticas, biológicas ou químicas que permitiria o desenvolvimento de produtos para necessidades específicas.

Bognolo (1999) afirma que são muitas as características dos biossurfactantes que tornam essas moléculas vantajosas em relação aos surfactantes. Na Tabela 3 são discriminadas as características e as vantagens dos biossurfactantes quando comparados aos surfactantes.

Tabela 3 – Propriedades e vantagens dos biossurfactantes em relação aos surfactantes convencionais

Propriedade	Vantagens
Atividade superficial e interfacial	São mais eficientes e mais efetivos do que os surfactantes convencionais, pois produzem menor tensão superficial em menores concentrações.
Tolerância a altos valores de temperatura e pH	Alguns biossurfactantes apresentam elevada estabilidade térmica e alterações de pH, podendo ser utilizados em ambientes com condições mais drásticas. Exemplo: O lipopeptídeo de <i>B. licheniformis</i> JF-2 é estável a temperaturas em torno de 75°C por até 140 h e em pH entre 5 e 12.
Tolerância a altas concentrações de sal	Suportam concentrações de 10% de NaCl enquanto uma concentração salina de 2-3% é suficiente para inativar surfactantes.
Biodegradáveis	São facilmente degradáveis na água e no solo, o que os torna adequados para aplicações como biorremediação e tratamento de resíduos
Baixa toxicidade	Sua baixa toxicidade permite o uso em alimentos, cosméticos e produtos farmacêuticos

Fonte: Adaptado de Nitschke & Pastore (2002).

A surfactina, da classe dos lipopeptídeos, é um exemplo de biossurfactante que vem sendo muito estudado na última década (BARROS et al., 2007). Esse biossurfactante possui baixa CMC, ou seja, elevado poder de reduzir a tensão superficial, além de apresentar diversas funções biológicas, tais como: ação bactericida e fungicida; função antiviral; agente antitumoral; Inibidor da formação de coágulos fibrinosos; antimicoplasmático; e veículo para a administração de drogas via pulmonar.

Aplicações industriais dos biossurfactantes

O interesse global na produção de biossurfactantes está relacionado a ampla aplicação dessas moléculas em diferentes setores industriais, como: farmacêutico, de cosméticos, de limpeza, de higiene pessoal, médico-hospitalar, alimentício, de tintas e têxtil (SHESHTAWY et al., 2015), de proteção ao meio ambiente e de agricultura (BANAT et al., 2010; RUFINO et al., 2011). Outras aplicações incluem ainda a biorremediação e dispersão no deramramento de óleos, remoção e mobilização de resíduos de óleo em tanques de estocagem, e a recuperação melhorada de petróleo.

A grande diversidade de aplicações dos biossurfactantes está relacionada há algumas propriedades, tais como: detergência, lubrificação, capacidade espumante, solubilização, dispersão de fases, adesividade bacteriana e antibiótica, que são imprescindíveis para aplicação desses nos segmentos industriais citados anteriormente (BANAT et al., 2010; RUFINO et al., 2011).

Na área médica foi evidenciada a importância do uso dos biossurfactantes por apresentarem atividade antibacteriana, antiviral e anti-inflamatória (PRIYA; USHARANI, 2009; CHEN et al., 2011; GEIN et al., 2011; ARAUJO et al., 2016; KATZ et al., 2018). Alguns trabalhos reportam a inibição na adesão de algumas bactérias patogênicas a partir do uso de moléculas tensoativas (Raminolípídeos e Surfactina), tais como: *Listeria monocytogenes* (ARAUJO et al., 2011), *Staphylococcus aureus*, *Listeria monocytogenes* e *Salmonella enteritidis* (GOMES; NITSCHKE, 2012) e inibição na formação de biofilme de *Pseudomonas putida* (KATZ et al., 2018). Magalhães e Nitschke (2013) também demonstraram à atividade antimicrobiana de rhamnolípídeos contra *Listeria monocytogenes* e sua interação sinérgica com a nisina.

Na área agrícola a exploração do uso de biossurfactantes pode ser útil na melhoria da qualidade e produtividade. Segundo Nitschke & Pastore (2002) os biossurfactantes são usados na agricultura especialmente em formulações de herbicidas, pesticidas e no controle biológico de fitopatógenos.

Os biossurfactantes podem ser usados diretamente para emulsificar e aumentar a solubilidade de contaminantes hidrofóbicos no solo. De acordo com Nitschke & Pastore (2002) e Bezza, Evans e Chirwa (2016) o uso de biossurfactantes demonstraram o aumento da biodisponibilidade de compostos aromáticos pouco solúveis, tais como os compostos policíclicos (HPA), fenantreno e nafaleno, resultando em um aumento nas taxas de mineralização e solubilização, bem como a degradação de pesticidas organoclorados como DDT e ciclodienos.

Os biossurfactantes podem ser ainda utilizados na limpeza de tanques de óleos, em substituição aos surfactantes convencionais. Segundo Banat et al. (1991) a utilização de biossurfactantes promoveu a recuperação de 90% dos hidrocarbonetos presentes em resíduos. A Tabela 4 é apresentado um resumo das funções e aplicações industriais dos biossurfactantes.

Tabela 4 – Aplicações dos biossurfactantes para uso comercial

Indústria	Aplicação	Função dos biossurfactantes
Meio ambiente	Biorremediação; Operação de limpeza de derramamento de óleo; Descontaminação de solo.	Emulsificação de óleos, redução da tensão interfacial, dispersão de óleos, solubilização de óleos, molhamento, espalhamento, detergência, formação de espuma, inibição de corrosão em óleos e equipamentos, lavagem do solo.
Petróleo	Recuperação melhorada; Desemulsificação.	Emulsificação de óleos, redução da tensão interfacial, desemulsificação de emulsões de óleo, solubilização de óleos, redução de viscosidade, dispersão de óleos, molhamento de superfícies sólidas, espalhamento, detergência, formação de espuma, inibição de corrosão em óleos combustíveis e equipamentos.
Indústria	Aplicação	Função dos biossurfactantes
Mineração	Remoção de metais pesados; Remediação de solos; Flotação.	Molhabilidade e agente espumante, remoção de íons metálicos de soluções aquosas, solo e sedimentos, sequestrantes de metais pesados e inibição de corrosão em óleos
Alimentícia	Emulsificação e desemulsificação; Ingrediente funcional	Solubilização de óleos aromatizados, controle de consistência, emulsão, agente molhante, espalhamento, detergência, espuma, espessante.
Medicina	Microbiológica; Farmacêutica e terapêutica.	Agentes antiaderentes, agentes antifúngicos, agentes antibacterianos, agentes antivirais, vacinas, terapia genética, moléculas imunomoduladoras.
Agricultura	Biocontrole; Fertilizantes.	Molhagem, dispersão, suspensão de pesticidas em pó e fertilizantes, emulsão de soluções de pesticidas, facilitação de mecanismos de biocontrole de micróbios, eliminação de patógenos de plantas e aumento da biodisponibilidade de nutrientes para micróbios benéficos associados a plantas.

Indústria	Aplicação	Função dos biossurfactantes
Cosméticos	Produtos de beleza e saúde	Emulsificação, agentes espumantes, solubilização, agentes molhantes, produtos de limpeza, agentes antimicrobianos, mediadores da ação enzimática.
Higienização	Detergentes para lavagem	Detergentes e desinfetantes para lavagem, molhagem, espalhamento, inibição de corrosão.
Têxteis	Preparação de fibras; Tingimento e impressão; Acabamento de têxteis	Molhamento, penetração, solubilização, emulsão, detergência e dispersão, molhagem e emulsificação em formulações de acabamento, amaciamento.
Nanotecnologia	Síntese de nanopartículas	Emulsificação, estabilização

Fonte: Adaptado de Santos et al. (2016).

Considerações finais

Os biossurfactantes apresentam muitas vantagens quando comparados com os surfactantes derivados de petróleo, além de apresentarem potencial para aplicações em diversas áreas industriais, tais como: de meio ambiente, de petróleo, alimentícia, de mineração, em processos de higienização, na área médica, na nanotecnologia entre outras. Contudo, tem sua utilização limitada devido ao alto custo de produção, que pode ser significativamente reduzido através da bioprospecção de novas cepas produtoras, da otimização de processos industriais e do uso de fontes alternativas de nutrientes, facilmente disponíveis e de baixo custo.

REFERÊNCIAS

- ABDEL-MAWGOUD, A. M.; LÉPINE, F.; DÉZIEL, E. Rhamnolipids: diversity of structures, microbial origins and roles. **Applied Microbiology**, v. 86, p. 1323-1336, 2010.
- AL-WAHAIBI, Y. et al. Biosurfactant production by *Bacillus subtilis* B30 and its application in enhancing oil recovery. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**, v. 1, n. 114, p. 324-30, 2014.
- AMÉZCUA-VEGA, C. et al. Effect of culture conditions on fatty acids composition of a biosurfactant produced by *Candida ingens* and changes of surface tension of culture media. **Bioresource Technology**, v. 98, p. 237-240, 2007.
- ARAÚJO, L. V. et al. Rhamnolipid and surfactin inhibit *Listeria monocytogenes* adhesion. **Food Research International**, v. 44, n. 1, p. 481-488, 2011.
- ARAUJO, Livia Vieira de. Rhamnolipid and surfactin: Antiadhesion/antibiofilm and antimicrobial effects. **Food Control**, v. 63, p. 171-178, 2016.
- BANAT, I. M. et al. Microbial biosurfactants production, applications and future potential. **Applied Microbiology Biotechnology**, v. 87, p. 427-444, 2010.
- BANAT, Ibrahim M. Les biosurfactants, plus que jamais sollicités. **Biofutur**, v. 200, n. 198, p. 44-47, 2000.
- BARBOSA, A. P. A.; GONDIM, A. L. N.; PAZ, M. C. F. Remoção do Corante Preto Pirazol por *Pseudomonas aeruginosa*. **Anais... II CONEPI – Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte Nordeste de Educação Tecnológica**, 2007.
- BARBOSA, Luiz Cláudio de Almeida. **Introdução à Química Orgânica**. São Paulo: Prentice Hall, 2004.
- BARBOSA, S. A. **Desenvolvimento de biodetergentes utilizando biosurfactantes como matéria-prima**. 126f, 2011. Tese (Doutorado em Biotecnologia) da rede RENORBIO – Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia, São Cristovão, Sergipe.

BARROS; Francisco Fabio Cavalcante et al. Surfactina, Propriedades químicas, tecnológicas e funcionais para aplicação em alimentos. **Química nova**, v. 30, n. 2, p. 409-414, 2007.

BERGSTROM, S.; THEORELL, H., DAVIDE, H. On a metabolic product of *P. pyocyanea*, pyolipidic acid, active against *Mycobacter tuberculosis*. **Ark Kem Mineral Geo**, v. 23, p. 1-12, 1946.

BEZZA, Fisseha Andualem; EVANS, M.; CHIRWA, Nkhalambayausi. Biosurfactant-enhanced bioremediation of aged polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in creosote contaminated soil. **Chemosphere**, v. 144, p. 635-644, 2016.

BLOOMBERG, G. Designing proteins and emulsifiers. **Lebensmittel technologies**, v. 24, p. 130-131, 1999.

BODOUR, A. A.; MILLER-MAIER, R. M. Application of a modified drop-collapse technique for surfactant quantitation and screening of biosurfactant-producing microorganisms. **Journal of Microbiological Methods**, v. 32, p. 273-280, 1998.

BOGNOLO, G. Biosurfactants as emulsifying agents for hydrocarbons. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 152, n. 1-2, p. 41-52, 1999.

BUENO, S. M.; SILVA A. N.; GARCIA-CRUZ, C. H. Estudo da produção de biosurfactante em caldo de fermentação. **Química Nova**, v. 33, n. 7, p. 1572-1577, 2010.

BURGUER, M. M.; GLASER, L. BURTON, R.M. The enzymatic synthesis of rhamnose-containing glycolipids by extracts of *Pseudomonas aeruginosa*. **Journal of Biological Chemistry**, v. 238, p. 2595-2602, 1963.

BURGUER, M. M.; GLASER, L. BURTON, R.M. Formation of rhamnolipids of *Pseudomonas aeruginosa*. **Methods Enzymology**, v. 8, p. 441-445, 1966

BUSINES WIRE. **Global Biosurfactants Market 2017-2022: Focus on Glycolipids (Sophorolipids, Rhamnolipids), Lipopeptides, Phospholipids & Polymeric Biosurfactants – Research and Markets**. Disponível em: <<https://www.businesswire.com/news/home/20180102005421/en/Global-Biosurfactants-Market-2017-2022-Focus-Glycolipids-Sophorolipids>>. Acesso em: 15 jan 2018.

CAMPOS, J. M. et al. Microbial biosurfactants as additives for food industries. **Biotechnology Progress**, v. 29, p. 1097-1108, 2013.

CHAMPION, J. T. et al. Electron microscopy of rhamnolipid (biosurfactant) morphology: effects of pH, cadmium and octadecane. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 170, n. 2, p. 569-574, 1995.

CHANDRAN, P.; DAS, N. Characterization of sophorolipid biosurfactant produced by yeast species grown on diesel oil. **International Journal of Science and Nature**, v. 2, n. 1, p. 63-71, 2011.

CHEN, M. L. et al. Adsorption of sophorolipid biosurfactants on their own and mixed with sodium dodecyl benzene sulfonate, at the air/water interface. **Langmuir**, 27:8854-8866, 2011.

DAVEREY, A.; PAKSHIRAJAN, K. Pretreatment of synthetic dairy wastewater using the sophorolipidproducing yeast *Candida bombicola*. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, v. 163, p. 720-728, 2011.

DESAI, J. D.; BANAT, I. M. Microbial production of surfactant and their commercial potential. **Microbiology and Molecular Biology Reviews**, v. 61, p. 47-64, 1997.

EL-SHESHTAWY, Aiad I. et al. Production of biosurfactant from *Bacillus licheniformis* for microbial enhanced oil recovery and inhibition the growth of sulfate reducing. **Egyptian Journal of Petroleum**, v. 24, p. 155-162, 2015.

EL-SHESHTAWY, Aiad I. Production of biosurfactant from *Bacillus licheniformis* for microbial enhanced oil recovery and inhibition the growth of sulfate reducing. **Egyptian Journal of Petroleum**, v. 24, p. 155-162, 2015.

FELSE, P. A. et al. Sophorolipid biosynthesis by *Candida bombicola* from industrial fatty acid residues. **Enzyme and Microbial Technology**, v. 40, p. 316-323, 2007.

GEIN, S. V. et al. In vitro cytokine stimulation assay for glycolipid biosurfactant from *Rhodococcus ruber*: role of monocyte adhesion. **Cytotechnology**, v. 63, n. 6, p. 559-566, 2011.

GOMES, Milene Zezzi do Valle; NITSCHKE, Marcia. Evaluation of rhamnolipid and surfactin to reduce the adhesion and remove biofilms of individual and mixed cultures of food pathogenic bacteria. **Food Control**, v. 25, p. 441-447, 2012.

GUDIÑA, E. J. et al. Bioconversion of agro-industrial by products in rhamnolipids toward applications in enhanced oil recovery and bioremediation. **Bioresource Technology**, v. 177, p. 87-93, 2015.

JARVIS, F. G.; JOHNSON, M. J. A glyco-lipid produced by *Pseudomonas aeruginosa*. **Journal of the American Chemical Society**, v. 71, p. 4124-4126, 1949.

KATZ, Haim et al. Rhamnolipid-enhanced *Pseudomonas putida* biofilm formation on hydrophilic surfaces with toluene as the bacterium's sole carbon source. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 127, p. 87-94, 2018.

KHOPADE, A. et al. Production and characterization of biosurfactant from marine *Streptomyces* species B3. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 367, p. 311-318, 2012.

KIRAN, G. S. et al. Optimization and production of a biosurfactant from sponge associated marine fungus *Aspergillus ustus* MSF3. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**, v. 73, n. 2, p. 250-256, 2009.

LIMA, Crintian Jacquer Bolner. **Produção de biossurfactantes por *Pseudomonas aeruginosa* empregando óleo de soja residual**. 2007. 190f. Tese (Doutorado) Pós-Graduação em Engenharia Química-Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG.

LUNA, J. M. et al. Characterisation, surface properties and biological activity of a biosurfactant produced from industrial waste by *Candida sphaerica* UCP0995 for application in the petroleum industry. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**, v. 102, p. 202-209, 2013.

LUNA, J. M. et al. Properties of the Biosurfactant Produced by *Candida sphaerica* cultivated in low-cost substrates. **Chemical Engineering Transactions**, v. 27, p. 67-72, 2012.

MAGALHÃES, Luana, NITSCHKE, Marcia. Antimicrobial activity of rhamnolipids against *Listeria monocytogenes* and their synergistic interaction with nisin. **Food Control**, v. 29, p. 138-142, 2013.

MAIER, R. M.; SOBERÓN-CHAVEZ, G. *Pseudomonas aeruginosa* rhamnolipids: biosynthesis and potential applications. **Applied Microbiology Biotechnology**, v. 54, n. 5, p. 625-633, 2000.

MENDES, A. et al. Physico chemical properties of rhamnolipid biosurfactant from *Pseudomonas aeruginosa* PA1 to applications in micro emulsions. **Journal of Biomaterials and Nanobiotechnology**, v. 6, p. 64-79, 2015.

MONTEIRO, A. S. et al. Inhibition of *Candida albicans* CC biofilms formation in polystyrene plate surfacesv by biosurfactant produced by *Trichosporon montevidense* CLOA72. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**, v. 84, p. 467-476, 2011.

MULLER, M. M.; HAUSMANN, R. Regulatory and metabolic network of rhamnolipid biosynthesis: Traditional and advanced engineering towards biotechnological roduction. **Applied of Microbiology**, v. 91, p. 251-264, 2001.

MULLIGAN, C. N. Enviromental applications for biosurfactants. **Environmental pollution**, v. 133, p. 183-198, 2005.

MULLIGAN, C. N. Recent advances in the environmental applications of biosurfactants. **Current Opinion in Colloid & Interface Science**. v. 14, p. 372–378, 2009

NAJAFI, A. R. et al. Enhancing biosurfactant production from an indigenous strain of *Bacillus mycoides* by optimizing the growth conditions using a response surface methodology. **Chemical Engineering Journal**, v. 163, p. 188-194, 2011.

NITSCHKE, Marcia; PASTORE, Glauca Maria. Biossurfactantes: propriedades e aplicações. **Química Nova**, v. 25, n. 5, p. 772-776, 2002.

PEIXOTO, Renata de Melo. **Bioprospeção de microrganismos do gênero *Pseudomonas* produtores de biossurfactantes**. 2008. 98f. Dissertação (Mestrado) do Instituto de Ciencias Biomédicas – Universidade de São Paulo, São Paulo-SP.

PIRÔLO, Maria Paula Santos. **Estudo da produção de biossurfactantes utilizando hidrocarbonetos**. 2006. 73f. Dissertação (Mestrado em Microbiologia Aplicada) do Instituto de Biociência do Campus de Rio Claro, Universidade Estadual Paulista. Rio Claro-SP.

PRIYA, T.; USHARANI, G. Comparative study for biosurfact ant production by using *Bacillus subtilis* and *Pseudomonas aeruginosa*. **Botany Research International**, v. 2, n. 4, p. 284-287, 2009.

RUFINO, R.D. et al. Antimicrobial and anti-adhesive potential of a biosurfactant Rufisan produced by *Candida lipolytica* UCP 0988. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**, v. 84, p. 1-5, 2011.

SAEKI, H. et al. Oil spill remediation by using the remediation agent JE1058BS that contains a biosurfactant produced by *Gordonia* sp. strain JE-1058. **Bioresource Technology**, v. 100, p. 572-577, 2009.

SAEKI, H.; SASAKI, M.; KOMATSU, K.; MIURA, A.; MATSUDA, H. Oil spill remediation by using the remediation agent JE1058BS that contains a biosurfactant produced by *Gordonia* sp. strain JE-1058. **Bioresource Technology**, v. 100, p. 572-577, 2009.

SANTOS, D. K. et al. Biosurfactants: Multifuncional Biomolecules of the 21st Century. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 17, n. 3, p. 401-432, 2016.

SARUBBO, L. A. et al. Bioemulsifier production in batch culture using glucose as carbon source by *Candida lipolytica*. **Applied Microbiology Biotechnology**, v. 95, p. 59-67, 2001.

SILVA, N. M. P. R. et al. Screening of *Pseudomonas* species for biosurfactant production using low-cost substrates. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 3, p. 132-139, 2014

SILVA, Patrícia Andréa Cordeiro. **Influência dos Parâmetros Físico-Químicos nas Propriedades e na Produção de Biossurfactantes Isolados do Gênero *Cândida***. 2008. 77f. Dissertação (Mestrado) Universidade Católica de Pernambuco, Pernambuco.

SILVA, S. N. R. L. et al. Glycerol as substrate for the production of biosurfactant by *Pseudomonas aeruginosa* UCP0992. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**, v. 79, n. 1, p. 174-183, 2010.

SILVA, Thayse Alves de Lima et al. Potencial Tecnológico de uma nova Linhagem de *Pseudomonas fluorescens* na produção de biosurfactante utilizando petróleo como substrato. **Exacta**, v. 7, n. 1, p. 31-37, 2009.

SOBERÓN-CHAVÉZ, G.; MAIER, R. M. Biosurfactants: A general overview. Cap 1. In: SOBERÓNCHÁVEZ, G. **Biosurfactants: From genes to applications**, 2011. 216p.

STRELEC, T. **Isolamento de bactérias produtoras de biossurfactantes ramnolipídios polihidroxicanoatos e avaliação da relação metabólica no processo de síntese.** 2006. 123f. Dissertação (Mestrado) do Instituto Butantan da Universidade de São Paulo, São Paulo-SP.

TAVARES, Marina F. T. Mecanismos de separação em eletroforese capilar. **Química Nova**, v. 20, n. 5, p. 493-511, 1997.

THANOMSUB, B. et al. Chemical structures and biological activities of rhamnolipids produced by *Pseudomonas aeruginosa* B189 isolated from milk factory waste. **Bioresource Technology**, v. 97, p. 2457-2461, 2006.

VAN DYKE, M.I.; LEE, H.; TREVORS, J.T. Applications of microbial surfactants. **Biotechnology advances**, v. 9, n. 2, p. 241-252, 1991

VAN HAMME, J. D.; URBAN, J. Biosurfactants in bioremediation. In: SINGH, A.; KUHAD, R. C.; WARD, O. P. **Advances in applied bioremediation.** Springer: New York, 2009. 378p. Cap. 4.

VERA, Ellen Cristina Souza. **Produção biotecnológica de biossurfactante por *Lactococcus lactis* CECT-4434 a partir de resíduos agroindustriais e avaliação de suas propriedades.** 2017. 132f. Tese (doutorado) Faculdade de Ciências Farmacêuticas da Universidade de São Paulo. São Paulo-SP.

ZOUBOULIS, A. I. et al. The use of biosurfactants in flotation: application for the removal of metal ions. **Minerals Engineering**, v. 16, p. 1231-1236, 2003.