

O POTENCIAL DA LIGNINA NO CONTEXTO BRASILEIRO: UM DIAGNÓSTICO DE ESPECIALISTAS BRASILEIROS SOBRE TECNOLOGIAS E TENDÊNCIAS PARA 2030

Autores: Melissa Braga¹, Ana Cristina dos Santos^{1,2}, Mônica Caraméz Triches Dâmaso¹, Emerson Léo Schultz¹

¹ *Embrapa Agroenergia, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Brasília-DF*

² *Programa de Pós-Graduação em Propriedade Intelectual e Transferência de Tecnologia para a Inovação, Universidade de Brasília-DF*

RESUMO

A lignina é um componente macromolecular da biomassa lignocelulósica de grande potencial como precursor de vários produtos de interesse econômico. Com o intuito de indicar as perspectivas tecnológicas acerca da agregação de valor a esse componente e seus derivados no Brasil, uma pesquisa de opinião foi aplicada abordando os seguintes itens: i) fontes vegetais e processos de extração de lignina; ii) produtos e respectivos processos, e iii) desafios e oportunidades para o horizonte de 2030. De acordo com os especialistas consultados, a matéria-prima, fonte de lignina mais importante no Brasil, são as folhosas (ex.: eucalipto), em decorrência da associação da lignina ao processo Kraft das indústrias de celulose; e o bagaço de cana-de-açúcar, coproduto gerado nas usinas produtoras de etanol de segunda geração. Os processos de modificação estrutural da lignina, para atribuição de novas funcionalidades, foram considerados de maior importância para transformação da lignina, seguidos de hidrogenólise, pirólise e conversão oxidativa. Dentre os produtos derivados de lignina de maior interesse estão polímeros, fibras de carbono e nanopartículas. A pesquisa indicou que a oportunidade mais pronunciada de valorização da lignina é o aproveitamento de resíduos e coprodutos da agroindústria, enquanto as principais barreiras a serem transpostas para seu uso mais efetivo são: o aumento da seletividade nos processos de conversão, devido à variabilidade na composição química da lignina, e a viabilidade da produção industrial obedecendo especificações técnicas pré-definidas. Por ser fonte de demandas, percepções e expectativas de especialistas no assunto, este trabalho pode ser usado para identificar gargalos e oportunidades acerca da pesquisa em lignina, no contexto brasileiro.

Palavras-chave: Lignina. Pesquisa de opinião. Contexto brasileiro.

INTRODUÇÃO

A sustentabilidade de produtos e processos é uma necessidade urgente para a humanidade, diante da nossa grande dependência de matérias-primas de fontes não renováveis, assim

como o impacto negativo ao meio ambiente associado ao seu uso. A ampliação do uso de biomassas e a agregação de valor a resíduos ou a coprodutos de processos agroindustriais têm sido apontadas como as formas mais evidentes para garantir o suprimento de insumos para a indústria e, ao mesmo tempo, reduzir o desperdício e a poluição ambiental decorrente do mau uso ou do subaproveitamento das biomassas (NAQVI; YAN, 2015; VIRMOND *et al.*, 2013).

O termo biomassa é comumente empregado para se referir à matéria orgânica derivada de organismos vivos. A sua composição química pode variar a depender da espécie, da forma de cultivo ou da modificação genética, porém, de modo geral, é classificada em dois tipos: a lignocelulósica e a não lignocelulósica. O primeiro tipo caracteriza-se por ter em sua composição a celulose, hemicelulose, lignina, extrativos e cinzas, e pode ser de origem florestal ou agrícola. O segundo tipo não contém lignina em sua composição, a exemplo de algas e dos dejetos animais.

O componente mais abundante diferenciador entre dois tipos de biomassa é a lignina, uma macromolécula natural presente entre 7% e 30% na biomassa lignocelulósica (WELKER *et al.*, 2015). Trata-se do componente mais subutilizado frente ao seu potencial como fonte de intermediários fenólicos para a indústria química, materiais poliméricos e combustíveis. Atualmente, a lignina ainda é considerada um coproduto de vários processos industriais, em especial da indústria de papel e celulose, sendo usada prioritariamente como combustível em caldeiras para geração de vapor e/ou energia elétrica.

Com o intuito de compreender, revelar e antecipar as rotas tecnológicas capazes de explorar integralmente todo o potencial da lignina, vários trabalhos prospectivos vêm sendo realizados e publicados na atualidade (KARUNARATHNA; SMITH, 2020; MORENO; SIPPONEN, 2020; PRASAD *et al.*, 2022; SANTOS; BORSCHIVER; COUTO, 2015). Esses trabalhos evidenciam que, embora o potencial seja relevante economicamente, a complexidade da estrutura química heterogênea da lignina é um desafio a ser inicialmente compreendido para

que, posteriormente, sejam desenvolvidos protocolos de modificação mais eficientes e eficazes, capazes de conferir aos derivados da lignina as propriedades desejadas para cada aplicação.

Em trabalhos anteriores deste grupo, o mapeamento das iniciativas mais relevantes acerca da lignina revelou que o maior número de iniciativas industriais se concentra nos Estados Unidos e na Europa (SCHULTZ; BELÉM; BRAGA, 2022). No Brasil, destacam-se as iniciativas da Klabin S/A e da Suzano S/A com ligninas da indústria de celulose, para compor resinas fenólicas em diversos segmentos, em especial, compensados e abrasivos (KLABIN, 2023; SUZANO, 2023). Para além dessas iniciativas, constatou-se que a pesquisa básica ou fundamental, executada principalmente por Universidades, acerca de renováveis, é bastante ativa e reconhecida internacionalmente, principalmente no sentido de agregar valor à biodiversidade brasileira.

Neste trabalho, buscou-se uma melhor compreensão da condição da pesquisa em lignina realizada localmente, sob o ponto de vista de profissionais da indústria e pesquisadores, conforme sua experiência prática e seu conhecimento tácito, não expressos nos estudos bibliométricos e patentométricos realizados anteriormente. Especificamente, este trabalho apresenta o diagnóstico de especialistas brasileiros sobre tecnologias e tendências a respeito da lignina em termos de fontes de matérias-primas, processos e produtos, bem como os desafios para sua utilização industrial. Profissionais de pesquisa e desenvolvimento atuantes na temática no território brasileiro foram consultados, empregando a ferramenta prospectiva de pesquisa de opinião (em inglês, *survey*), na modalidade quantitativa.

METODOLOGIA

Os problemas e desafios que compuseram as perguntas da pesquisa de opinião foram identificados em estudos bibliométricos, patentométricos e *roadmaps* elaborados anteriormente por esta equipe (SCHULTZ; BELÉM; BRAGA, 2022). Nesses trabalhos, constatou-se que a pesquisa científica e o desenvolvimento tecnológico relacionados à lignina estão em crescimento, por meio de processos como a pirólise, a hidrodessoxigenação e os processos catalíticos de despolimerização, para a produção de compósitos fenólicos, em especial o fenol, o bio-óleo e os materiais compósitos. A pesquisa de opinião conduzida e aqui relatada expande os domínios desse trabalho, por meio de uma análise crítica da condição brasileira, sob o olhar de profissionais da indústria e pesquisadores brasileiros.

Dois blocos de perguntas foram aplicados aos participantes, abordando os seguintes subtemas: matérias-primas lignocelulósicas fontes de lignina e processos para a desconstrução da lignina e produtos originários desses processos (Quadro 1). Em cada bloco, os entrevistados foram convidados a priorizar as opções dadas, no que tange a diferentes tipos de matérias-primas, processos e produtos, bem como os principais desafios para agregação de valor à lignina no Brasil, no horizonte de dez anos. Essas opções foram apresentadas como perguntas fechadas, mas os entrevistados foram incentivados a indicar com perguntas abertas os itens adicionais não incluídos no questionário. As perguntas que compuseram o questionário serão apresentadas e discutidas à medida que os resultados forem apresentados.

Quadro 1 – Resumo do questionário aplicado aos especialistas. PF significa pergunta fechada e PA, pergunta aberta

Tema	Pergunta	Resposta
1. Matéria-prima	1.1. (PF) Qual é o grau de importância da fonte renovável de lignina?	<p>Escala Likert, para as seguintes opções:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Folhosas (Ex.: eucalipto) • Coníferas (Ex.: pinus) • Bagaço de cana-de-açúcar
	1.2. (PA) Algum comentário ou sugestão sobre 1.1?	Livre
	1.3. (PF) Qual é o grau de importância dos processos para a extração de lignina da biomassa lignocelulósica?	<p>Escala Likert, para as seguintes opções:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Organosolv • Ácido • Alcalino • Explosão a vapor • Bioquímico (enzimático ou microbiano) • Combinação de métodos de pré-tratamento • Auto-hidrólise
	1.4. (PA) Algum comentário ou sugestão sobre 1.3?	Livre

2. Produtos e processos	<p>2.1. (PF) Qual é o grau de importância dos processos de fracionamento da lignina?</p>	<p>Escala Likert, para as seguintes opções:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Combustão, para geração de vapor e, ou, eletricidade. • Gaseificação, para geração de CO, H₂, CH₄ e CO₂ • Pirólise, para geração de bio-óleo, carvão vegetal, extrato pirolenhoso e fibras de carbono. • Despolimerização por hidrólise ácida, para fabricação de monômeros ou dímeros. • Despolimerização por hidrólise básica, para fabricação de monômeros ou dímeros. • Hidrogenólise (ou conversão redutiva), para fabricação de fenóis, alquilfenóis, alquilbenzenos, hidrocarbonetos lineares ou ramificados, hidrocarbonetos cíclicos, • Conversão oxidativa, para a produção de álcoois, aldeídos e ácidos carboxílicos. • Modificação estrutural da lignina, para atribuição de novas funcionalidades com diferentes aplicações, como em processos de sorção e dessorção.
	<p>2.2. (PF) Quais são os derivados da lignina que você considera mais importantes?</p>	<p>Múltipla escolha, entre as seguintes opções:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Agentes emulsificantes/dispersantes. • Carvão ativado. • Fibras de carbono. • Agentes quelantes. • Alquil-benzenos. • Benzeno, tolueno e xileno (BTX). • Benzaldeídos. • Fenóis. • Álcoois aromáticos. • Ácidos aromáticos. • Hidrocarbonetos lineares. • Óleo de pirólise (bio-óleo) rico em aromáticos. • Quinonas. • Aromáticos não commodities (Ex.: vanilina). • Polímeros (poliuretano, adesivos, resinas, compósitos, blendas). • Nanopartículas. • Cargas ou veículos para liberação controlada para agroquímicos.
	<p>2.3. (PA) Quais são os outros produtos que você considera relevantes?</p>	<p>Livre</p>
	<p>2.4. (PF) Qual é o grau de importância dos desafios ou problemas para obtenção dos derivados da lignina citados acima?</p>	<p>Escala Likert, para as seguintes opções:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Garantir seletividade dos processos para equacionar a viabilidade técnica e econômica de sua produção em grande escala. • Considerando a natureza heterogênea da lignina, viabilizar a produção industrial, obedecendo especificações técnicas definidas. • Variabilidade da composição química (heterogeneidade e variabilidade), altamente influenciada pela fonte de matéria-prima. • Alta susceptibilidade à modificação na matriz polimérica da lignina nativa (ou natural). • Alta instabilidade da lignina fragmentada, gerando a repolimerização ou condensação, formando novas estruturas aleatórias. • Alta contaminação com sais, carboidratos, material particulado, voláteis e ampla distribuição de massa molecular da lignina obtida a partir da biomassa. • Alta massa molecular e estrutura amorfa, resultando em solubilidade limitada em solventes comuns, à temperatura ambiente. • Capacidade de os processos em despolimerizar e transformar os fragmentos poliméricos/oligoméricos em produtos de interesse (precursores ou não). • Ampla distribuição de massa molecular após o processo de isolamento e purificação. • Baixa reatividade dos produtos resultantes, quando se deseja empregá-los na síntese de outros produtos. • Baixa compatibilidade com blendas de polímeros.
	<p>2.5. (PF) Qual é o grau de importância das oportunidades para agregar valor à lignina?</p>	<p>Escala Likert, para as seguintes opções:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Aproveitamento de resíduos e coprodutos agroindustriais. • Elevado potencial econômico do produto ou derivados. • Geração de nova cadeia de valor. • Baixa toxicidade ao meio ambiente/ecotoxicidade. • Minimizar a dependência do petróleo. • Baixa toxicidade para o usuário. • Fonte alternativa de energia. • Funcionalidades não encontradas em outros produtos. • Redução do tempo para o produto se tornar disponível comercialmente. • Menor consumo de água.

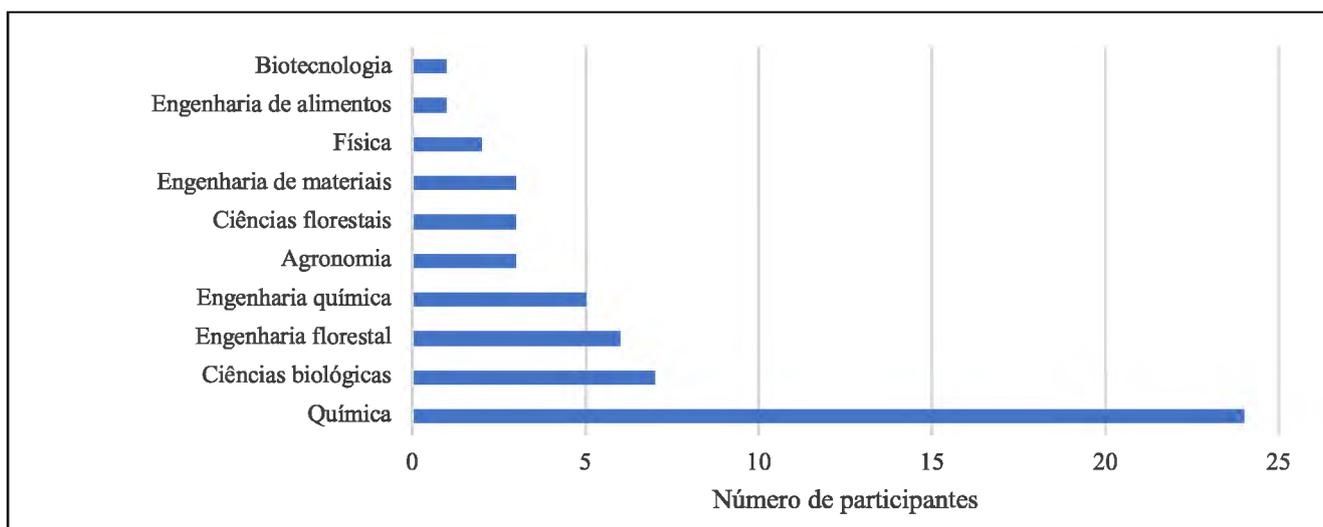


Gráfico 1 – Área de atuação dos entrevistados da Pesquisa de Opinião.

Autores de publicações científicas recentes e outros profissionais com atuação em lignina provenientes de setores público e privado foram convidados a participar desta pesquisa. Os convidados foram selecionados com base em duas fontes: autores de publicações científicas recentes em áreas tecnológicas afins e profissionais dos setores público e privado. A identificação dos autores das publicações científicas recentes foi realizada na base de dados *Web of Science* (Clarivate Analytics). Para tanto, a estratégia de busca combinou o termo “lignina” com organizações brasileiras no período de 2010 a 2020. Os autores correspondentes dos documentos recuperados foram identificados e listados como potenciais participantes. A seleção dos profissionais do setor produtivo foi feita a partir da base de dados de parceiros, clientes e participantes de eventos da Embrapa Agroenergia e em redes sociais profissionais. A consolidação das duas listas resultou em uma relação de 314 profissionais.

O questionário eletrônico foi elaborado empregando a ferramenta *online* do *software* LimeSurveyTM (disponível em www.limesurvey.org), consistindo exclusivamente de perguntas optativas, nas quais o participante classificou o grau de importância da proposta apresentada na pergunta, no formato de cinco níveis da escala Likert, sendo o nível 1 correspondente a “Não Importante” e o nível 5 a “Extremamente Importante”. O primeiro envio de questionário foi efetivado no dia 27 de maio de 2020, com prazo para resposta até o dia 11 de junho de 2020, posteriormente prorrogado para o dia 22 de junho de 2020.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

(Perfil dos entrevistados)

Dentre os 314 profissionais convidados, 55 participaram da pesquisa de opinião, o que corresponde a 18% do total de convidados. Considerando o vínculo empregatício desses entrevistados, 78% integram o quadro de docentes e pesquisadores de Universidades, 15% estão vinculados a Instituições de Ciência e Tecnologia (ICT) que não desenvolvem atividade de ensino, e 7% da indústria de celulose, etanol celulósico e de máquinas equipamentos.

Em termos de área de atuação, os profissionais da área de Química foram os mais participativos, conforme mostra o Gráfico 1, embora o convite tenha sido feito a um número similar de profissionais das diferentes áreas apresentadas nesse gráfico. Nesse sentido, na análise das respostas deve-se considerar esse perfil de participantes, cujo enfoque pode estar predominantemente direcionado em processos de conversão e produtos derivados da lignina.

Fontes renováveis de lignina

Várias espécies vegetais podem ser fonte de lignina. Porém, as mais significativas em termos de quantidade no território brasileiro são i) as folhosas (ex. eucalipto), ii) as coníferas (ex. pinus) e iii) bagaço de cana, resultante do processamento da cana-de-açúcar para a produção de açúcar e etanol. Segundo os entrevistados, as três fontes são importantes (Tabela 1), mas as fontes folhosas obtiveram maior percentual: “extremamente importante”.

Tabela 1 – Resultados do número de respostas referente ao grau de importância da fonte de lignina

Categoria/Opções	Percentual do número de respostas, %				
	Não Importante	Pouco Importante	Importante	Muito Importante	Extremamente Importante
Folhosas	0	4	7	18	71
Bagaço da cana-de-açúcar	2	4	13	18	64
Coníferas	0	6	20	27	47

Embora a justificativa para a escolha da fonte de lignina não fosse obrigatória, um dos fatores para a escolha dessas fontes, segundo algumas manifestações de entrevistados, deveu-se ao fato de a lignina do processo da extração de celulose ser atualmente subutilizada na queima para geração de energia térmica (WU *et al.*, 2017) e elétrica.

O segmento de papel e celulose é altamente concentrado no Brasil em poucas empresas, entre as quais destacam-se a Suzano, a Klabin, a International Paper Brasil, a Eldorado Brasil Celulose, a CMPC, a Cenibra, a Santher, a Veracel e a Bracel Bahia Specialty Cellulose (VALOR ECONÔMICO, 2019). Nesse segmento, a lignina é queimada com outros resíduos do processo, para a geração de energia. Contudo, alguns desses atores tornam públicas suas estratégias para agregar valor à lignina, a exemplo da Suzano e da Klabin que empregam a lignina Kraft para a produção de resinas fenólicas para o segmento de laminados e compensados, plásticos, abrasivos, refratários entre outros produtos (KLABIN, 2023; O PAPEL, 2016). A Cenibra também revela a busca de oportunidades de biorrefino e produção de químicos a partir da lignina via rotas biotecnológicas, em projetos em parceria com a Rede de Inovação da Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel (CENIBRA, 2019). Por sua vez, a International Paper Brasil, atualmente Sylvamo, busca híbridos com características diferenciadas, entre elas menores teores de extrativos e lignina, por meio da adição constante de diferentes espécies ao programa de melhoramento (SYLVAMO, 2022).

O bagaço de cana, atualmente apontado como o principal insumo no Brasil para a produção de etanol de segunda geração, ocupou a segunda posição em importância. O menor teor de lignina desse resíduo agrícola foi apontado como uma desvantagem em relação às demais fontes de lignina (folhosas e coníferas). Em contrapartida, alguns dos entrevistados argumentaram que a associação de processos de decomposição ou transformação do bagaço para a produção de etanol de segunda geração pode favorecer o uso deste resíduo já que, após a extração dos polissacarídeos fermentescíveis, a celulose e a hemicelulose, a lignina se torna um resíduo para o qual se deve encontrar destinação. Mesma lógica segue para outros resíduos agroindustriais ou culturas dedicadas para esse fim (culturas

energéticas), disponíveis na safra ou região onde ocorrerá o processo de transformação (WELKER *et al.*, 2015).

As coníferas, como o pinus, obtiveram menor grau de importância que as demais fontes vegetais. De fato, a área plantada no Brasil de pinus é muito menor que de eucalipto: 75,8% da área é composta pelo cultivo de eucalipto, com 7,53 milhões de hectares, e 19,4% de pinus, com aproximadamente 1,93 milhão de hectares. Além desses cultivos, existem cerca de 475 mil hectares plantados de outras espécies, entre elas a seringueira, acácia, teca e paricá (IBÁ, 2022). Ambas as espécies são empregadas na fabricação de papel, porém o desempenho do pinus em relação ao do eucalipto é inferior. O rendimento em polpa celulósica de pinus para papéis branqueados está entre 40% e 45%, contra 50% e 54% do eucalipto, e a densidade básica da madeira, dependendo da idade, pode variar. Considerando as espécies de eucalipto mais comuns no Brasil (EMBRAPA FLORESTAS, 2019), *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna*, *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus viminalis*, a densidade é de 0,505-0,810 g/cm³ (ICRAF, [s.d.]). As espécies mais comuns de pinus (EMBRAPA FLORESTAS, 2020), especificamente, as espécies de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* têm densidade entre 0,505 a 0,606 g/cm³ (ICRAF, [s.d.]).

Além dessas fontes de lignina, outras sugestões foram inseridas no campo para comentários, sendo exemplos as fibras de coco, podas de árvores, resíduos da indústria da extração de óleo de palmáceas como dendê e macaúba, entre outros resíduos agroindustriais. Nenhuma dessas sugestões foram apresentadas em quantidade significativa para integrarem a Tabela 1 de respostas.

Processos para extração da lignina

No que diz respeito à extração da lignina da biomassa lignocelulósica, foi requerido ao entrevistado que avaliasse o grau de importância dos oito processos apresentados, em termos de custo-benefício, sempre levando em consideração o horizonte temporal de 2030.

Conforme observado na Tabela 2, a opção que se sobressaiu com maior percentual de respostas marcadas como “extremamente importante” foi o de combinação de métodos de pré-tratamento (40%), seguido pelo processo alcalino (31%) e bioquímico (27%).

Tabela 2 – Resultados do número de respostas referente ao grau de importância atribuído aos processos de extração de lignina

Categoria/Opções	Percentual do número de respostas, %				
	Não importante	Pouco importante	Importante	Muito importante	Extremamente importante
Combinação de métodos de pré-tratamento	6	4	16	35	40
Alcalino	6	9	18	36	31
Bioquímico (enzimático ou microbiano)	11	20	26	16	27
Organosolv	7	11	29	33	20
Explosão à vapor	13	15	33	22	18
Ácido	13	18	24	31	15
Auto-hidrólise	7	22	35	24	13

Contudo, a Tabela 2 apresenta baixo grau de convergência de opiniões (<50%), resultando em uma maior distribuição de respostas em diferentes graus de importância, demonstrando assim que não há um consenso sobre qual é o pré-tratamento mais adequado.

Esta pode ter sido a razão pela qual a resposta que obteve maior grau de importância foi a combinação de processos. Tal resultado também está coerente com alguns trabalhos publicados recentemente que revelam que o pré-tratamento da biomassa lignocelulósica ainda é um grande desafio a ser superado e muitas questões técnicas ainda demandam por solução (GALBE; WALLBERG, 2019).

Pesquisa divulgada pela Comunidade Europeia, sobre tendências de algumas cadeias de valor associadas a produtos de base biológica, revelou que, embora o pré-tratamento organosolv remova eficientemente a lignina de materiais lignocelulósicos, o CAPEX/OPEX de uma planta organosolv é relativamente alto a ponto de que a implantação de uma planta certamente não seja esperada para os próximos anos (LADU; CLAVELL, 2018). No Brasil, as duas empresas que atuam industrialmente no pré-tratamento de biomassa lignocelulósica para a produção de etanol de segunda geração, GranBio e Raízen (*joint venture* do Grupo Cosan e da Shell), não foram bem-sucedidas para decompor a biomassa usando explosão a vapor, devido ao desgaste dos equipamentos causado pelas impurezas da biomassa. Agora buscam por tecnologias para o processamento adequado da biomassa (MARQUES, 2018).

Processos para transformação da lignina em diferentes classes de produtos

Uma vez extraída da matriz lignocelulósica, a macromolécula de lignina pode ser fonte de inúmeros produtos químicos, a depender tanto da sua composição química, altamente dependente da fonte vegetal de origem, quanto do processo para a decomposição dessa estrutura. Pautados nessas premissas, os entrevistados atribuíram graus de importância aos processos mais recorrentemente apresentados na literatura científica com a finalidade de agregar valor à lignina. Neste caso, a lignina passa de subproduto à matéria-prima para a obtenção de outros produtos de maior valor agregado.

A modificação estrutural da lignina se destacou, sendo atribuída como “Extremamente Importante” por 53% dos entrevistados (Tabela 3). Assim, a estrutura macromolecular se mantém, porém com ajustes de funcionalidade de superfície ou de porosidade, com o intuito de preparar catalisadores, armazenar energia ou a remover de poluentes (LIU; JIANG; YU, 2015; SUPANCHAIYAMAT *et al.*, 2019).

Exceto pela combustão da lignina para a geração de vapor e/ou eletricidade, as demais opções, de menor importância em relação à modificação estrutural, tratam de processos com maior grau de complexidade, com vistas a gerar produtos de menor massa molecular, intermediários importantes para a indústria química, geralmente em substituição aos petroquímicos.

Tabela 3 – Resultados das atribuições do grau de importância de processos para transformação da lignina em diferentes classes de produtos

Categoria/Opções	Percentual do número de respostas, %				
	Não importante	Pouco importante	Importante	Muito importante	Extremamente importante
– Modificação estrutural da lignina, para atribuição de novas funcionalidades com diferentes aplicações, como em processos de sorção e dessorção.	0	9	16	22	53
– Pirólise para geração de bio-óleo, carvão vegetal, extrato pirolenhoso e fibras de carbono.	2	7	27	27	36
– Hidrogenólise (ou conversão redutiva) para fabricação de fenóis, alquilfenóis, alquilbenzenos, hidrocarbonetos lineares ou ramificados, hidrocarbonetos cíclicos.	2	7	18	38	35
– Conversão oxidativa para a produção de álcoois, aldeídos e ácidos carboxílicos.	2	9	18	36	35
– Combustão para geração de vapor e/ou eletricidade.	11	15	26	22	27
– Despolimerização por hidrólise básica para fabricação de monômeros ou dímeros.	2	9	22	44	24
– Despolimerização por hidrólise ácida para fabricação de monômeros ou dímeros.	2	13	11	53	22
– Gaseificação para geração de CO, H ₂ , CH ₄ e CO ₂ .	7	16	31	29	16

A manifestação espontânea mais relevante nesta pergunta abordou a heterogeneidade da composição química da lignina a depender da fonte vegetal. Conforme explorado por outros autores, essa diferença nas composições afeta tanto o fracionamento após extração quanto a diversidade de produtos resultantes da decomposição de sua estrutura macromolecular (KAI; CHOW; LOH, 2018; LANG; SHRESTHA; DADMUN, 2018).

Quando questionados sobre os produtos mais importantes e promissores derivados da lignina, as estruturas poliméricas que integram frações de lignina de maior massa molar, com menor grau de ruptura das ligações químicas originais (ou naturais), ocuparam a primeira posição entre os produtos elencados, com 18% do total de seleções, seguido de fibras de carbono e nanopartículas, com 16% e 13% do total, respectivamente, conforme mostrado na Tabela 4. Tais resultados estão coerentes com os processos discutidos acima e que, para os próximos dez anos, não são esperados grande fragmentação da macromolécula extraída de matrizes lignocelulósicas.

Além dos produtos elencados na Tabela 4, os entrevistados sugeriram outras aplicações ou classes de produtos, a saber, antioxidantes para polímeros, ácidos alifáticos e biocombustíveis para aviação. Nenhuma dessas sugestões foram, quantitativamente, significativas para integrar as escolhas da Tabela 4.

Desafios relacionados aos processos de obtenção dos derivados de lignina

Nesta seção foram avaliadas as respostas relacionadas aos desafios da conversão química da lignina em produtos de maior valor agregado. Observa-se, com base nas respostas consolidadas, apresentadas na Tabela 5, que os desafios com maior grau de importância foram “garantir seletividade dos processos” (55%), seguido de “viabilizar a produção industrial” e “variabilidade da composição química”, ambos com 51% das atribuições classificadas no grau máximo de “extremamente importante”.

Analisando-se a soma das respostas classificadas como “importante”, “muito importante” e “extremamente importante”, o aspecto “garantir seletividade dos processos” teve 100 % das respostas nestes graus de importância, seguido pelo item “viabilizar a produção industrial” (98%). Dessa forma, os entrevistados não consideram se tratar de tópicos de baixa relevância no contexto brasileiro.

Segundo um dos entrevistados, não identificado aqui devido ao anonimato das respostas, “grande parte dos problemas elencados, como baixa reatividade, baixa compatibilidade com blendas de polímeros, alta massa molecular, variabilidade da composição química e alta susceptibilidade à modificação pelo processo de isolamento ou purificação são ‘problemas’ que podem ser contornados, se houver um

Tabela 4 – Produtos e percentual de seleções dos entrevistados

Produtos	Percentual, %
Polímeros (poliuretano, adesivos, resinas, compósitos, blendas)	18
Fibras de carbono	16
Nanopartículas	13
Agentes emulsificantes/dispersantes	10
Aromáticos não commodities (p. ex.: vanilina)	8
Fenóis	7
Cargas ou veículos para liberação controlada para agroquímicos	6
Carvão ativado	5
Óleo de pirólise (bio-óleo) rico em aromáticos	5
Álcoois aromáticos	3
Ácidos aromáticos	3
Agentes quelantes	2
Quinonas	2
Benzaldeídos	1
Benzeno, tolueno e xileno (BTX)	1

Tabela 5 – Resultados referentes aos desafios quanto aos processos de obtenção dos produtos derivados de lignina

Categoria/Opções	Percentual do número de respostas, %				
	Não importante	Pouco importante	Importante	Muito importante	Extremamente importante
– Garantir seletividade dos processos para equacionar a viabilidade técnica e econômica de sua produção em grande escala.	0	0	18	27	55
– Considerando a natureza heterogênea da lignina, viabilizar a produção industrial, obedecendo especificações técnicas definidas.	2	0	27	20	51
– Variabilidade da composição química (heterogeneidade e variabilidade), altamente influenciada pela fonte de matéria-prima.	0	4	16	29	51
– Alta susceptibilidade à modificação na matriz polimérica da lignina nativa (ou natural).	2	4	24	40	31
– Alta instabilidade da lignina fragmentada, gerando a repolimerização ou condensação, formando novas estruturas aleatórias.	2	13	29	29	27
– Alta contaminação com sais, carboidratos, material particulado, voláteis e ampla distribuição de massa molecular da lignina obtida a partir da biomassa.	0	18	22	35	26
– Alta massa molecular e estrutura amorfa, resultando em solubilidade limitada em solventes comuns, à temperatura ambiente.	2	6	36	33	24
– Capacidade dos processos em despolimerizar e transformar os fragmentos poliméricos/ oligoméricos em produtos de interesse (precursores ou não).	2	7	26	44	22
– Ampla distribuição de massa molecular após o processo de isolamento e purificação.	2	6	40	36	16
– Baixa reatividade dos produtos resultantes, quando se deseja empregá-los na síntese de outros produtos.	4	13	31	42	11
– Baixa compatibilidade com blendas de polímeros.	2	6	47	38	7

conhecimento profundo da estrutura de ligninas provenientes de diferentes processos de extração e de biomassas, o que pode ser alcançado por meio de uma caracterização estrutural completa por meio de técnicas analíticas modernas. Além disso, diversos processos como fracionamento por solventes orgânicos, precipitação seletiva por pH, modificações químicas etc. são alternativas para diminuir a heterogeneidade

dos fragmentos da estrutura da lignina, bem como torná-la compatível com outras matrizes poliméricas”. Esse comentário condiz com posições encontradas em publicações recentes (BOZELL *et al.*, 2018; WANG *et al.*, 2019) e reforça a importância do desenvolvimento de técnicas analíticas e da integração dos processos de extração, de conversão de produtos agregados e de purificação do produto.

Oportunidades de agregar valor à lignina

Quando questionados sobre as oportunidades de agregar valor à lignina, a maioria das respostas concentrou-se em “extremamente importante”, conforme mostra a Tabela 6. Entre as oportunidades com convergência >50% nesta escala de importância, encontram-se “Aproveitamento de resíduos e coprodutos agroindustriais” com 75% das respostas, “Elevado potencial econômico do produto ou derivados” com 69% das respostas e “Geração de nova cadeia de valor” com 67% das respostas. São, portanto, das principais razões pelas quais se deve explorar a temática no País.

As demais propostas, embora tenham obtido baixa convergência (<50%), demonstram um panorama otimista no Brasil, no horizonte de 2030, já que na Tabela 6 são apresentadas avaliações dos entrevistados variando entre da neutralidade à extrema importância, sendo poucos os entrevistados que avaliaram como de pouca ou sem importância as opções fornecidas (<13%). Por essa razão, acredita-se que inúmeras são as razões, para que tecnologias associadas à lignina evoluam no território brasileiro.

ABRANGÊNCIAS E LIMITES DO TRABALHO

A abordagem metodológica para o desenvolvimento deste trabalho amparou-se em três eixos: i) a escolha da ferramenta prospectiva, ii) o desenvolvimento da abordagem do assunto (definição dos temas e perguntas do questionário) e iii) a identificação dos especialistas.

Em termos de ferramenta prospectiva, optou-se pela pesquisa de opinião (*survey*) com questionário estruturado, com perguntas fechadas, aplicado remotamente, por meio eletrônico. Trata-se de um método amplamente empregado em prospectiva (*foresight*, em inglês), com o intuito de captar percepções e iniciativas acerca de uma determinada temática diante um público-alvo extenso (POPPER, 2008). Assim como qualquer ferramenta prospectiva, a pesquisa de opinião possui limitações. A principal delas reside no fato de questões fechadas restringem a opinião do entrevistado às opções fornecidas, não permitindo o desenvolvimento de suas ideias ou a exposição de alternativas que vão além das disponibilizadas no questionário. Como forma de suprir essa deficiência, optamos por deixar ao final de cada pergunta um campo aberto que permite a inclusão, pelo entrevistado, de itens identificados por ele como faltantes. A mesma abordagem metodológica foi adotada com sucesso em outros trabalhos que abordaram o tema de álcoois e ácidos carboxílicos (BRAGA *et al.*, 2022), microalgas e óleos vegetais (em fase de preparação para publicação).

Na fase de desenvolvimento da abordagem do assunto, sempre há um dilema para o condutor da pesquisa sobre o número, a abrangência e o conteúdo das questões. Se, por um lado, o questionário deve ser algo simples e de rápido preenchimento para incentivar a participação, por outro, deve consolidar o que existe de mais relevante no estado da arte a respeito do tema. As abordagens tecnológicas para agregar valor à lignina são, contudo, infinitas e impossíveis de serem previstas ou listadas

Tabela 6 – Resultados referentes às oportunidades de agregar valor à lignina

Categoria/Opções	Percentual do número de respostas, %				
	Não importante	Pouco importante	Importante	Muito importante	Extremamente importante
– Aproveitamento de resíduos e coprodutos agroindustriais.	0	0	9	16	75
– Elevado potencial econômico do produto ou derivados.	0	4	2	26	69
– Geração de nova cadeia de valor.	0	0	16	16	67
– Baixa toxicidade ao meio ambiente/ecotoxicidade.	4	6	18	16	56
– Minimizar a dependência do petróleo.	2	9	13	22	55
– Baixa toxicidade para o usuário.	4	9	18	16	53
– Fonte alternativa de energia.	9	11	9	24	47
– Funcionalidades não encontradas em outros produtos.	2	13	15	26	46
– Redução do tempo para que o produto fique disponível comercialmente.	2	13	20	29	36
– Menor consumo de água.	4	11	31	18	36

em um questionário. Para minimizar esse efeito restritivo da ferramenta, nós buscamos ampliar ao máximo as alternativas apresentadas, disponibilizando como alternativas as técnicas ou percepções expoentes sobre o tema, elaboradas a partir de sugestões dos especialistas da Embrapa Agroenergia ou fruto de outro trabalho prospectivo relacionado à lignina (SCHULTZ; BELÉM; BRAGA, 2022).

De fato, a maior limitação deste trabalho encontra-se na definição dos especialistas. A delimitação dos convidados em profissionais que executam atividades relacionadas especificamente à lignina no território brasileiro, a partir dos autores para correspondência de publicações indexadas na base de dados *Web of Science* ou de parceiros da Embrapa, limitou o público-alvo a 314 profissionais. No setor industrial, constatou-se apenas dois subsetores envolvidos com pesquisas para agregação de valor ao “coproduto lignina”: o de produção de celulose (nove empresas) e o de produção de etanol de segunda geração (duas empresas: Raízen, Granbio). Isso reduziu enormemente o universo de participantes em potencial da indústria. Soma-se a isso, segundo nossa experiência prática, o fato de que os profissionais da indústria não participam com frequência de pesquisas deste tipo, mesmo quando conduzida por instituições de renome como a Embrapa. Um dos motivos é, sem dúvida, a questão do segredo de negócio e a complexidade em se obter autorização de níveis hierárquicos superiores para a participação. A fim de minimizar esse impacto negativo na pesquisa, optamos pelo anonimato das respostas. Apesar disso, o número de respostas de profissionais desse setor foi de apenas quatro. Por esse motivo, as respostas da pesquisa obtiveram caráter predominantemente de pesquisa e ciência básica ou fundamental, visto que os demais 51 participantes se vinculam à Universidade ou a outras ICT.

Indiscutivelmente, a indústria é o *player* com maiores condições de escalonar processos e chegar em tecnologias (produtos e processos) comerciais. Mas neste trabalho optamos por não fazer distinção entre o vínculo profissionais dos convidados, pois, segundo o nosso julgamento, profissionais de ICT, Universidades, indústrias etc., cada um em seu campo de atuação, possuem competências técnicas para apontar os desafios nacionais relacionados à lignina.

Embora buscássemos a distribuição equitativa de formações ou área de atuação dos participantes, houve um desbalanceamento nas respostas e os profissionais da área de química foram os mais participativos. Nesse sentido, alertamos os leitores, no segundo parágrafo da seção dos “Resultados e Discussão”, sobre um possível viés nas respostas, no sentido de processos de conversão/transformação da lignina.

A opção de contato direto com o respondente para sanar dúvidas foi uma situação descartada por questões metodológicas. Desde o início, prezamos o anonimato dos respondentes e a facilidade de participação. Essa abordagem foi feita por duas razões: a primeira delas para que o entrevistado apresentasse a sua opinião enquanto pessoa física (não necessariamente a opinião corpora-

tiva) e a segunda é que dessa forma simples e rápida, um maior número de pessoas se sentisse motivado a participar da pesquisa.

A descrição minuciosa do passo a passo na seção “metodologia” permite ao leitor o delineamento resultado da estratégia traçada. Contudo, embora todos os caminhos trilhados estejam disponíveis ao leitor, pesquisas como esta diferem-se de experimentos de laboratório, pois estes podem ser reproduzidos se as condições experimentais forem seguidas à risca. Em se tratando de pesquisa de opinião, há um caráter subjetivo acentuado, moldado por um contexto temporal bastante específico, influenciado pela percepção dos respondentes naquele contexto.

A estratégia mais evidente para a continuidade deste trabalho seria a elaboração da matriz SWOT e a execução de um painel de especialistas. A primeira consolidaria os pontos levantados pelos entrevistados em termos de forças e fraquezas (ambiente interno, Brasil) face às oportunidades e ameaças (ambiente externo, internacional), enquanto a segunda traria os especialistas para um debate presencial acerca dos resultados dessa pesquisa.

CONCLUSÃO

Este trabalho teve como propósito oferecer uma contribuição ao desenvolvimento de tecnologias associadas ao fracionamento, isolamento e transformação da lignina, em especial em processos e produtos derivados, inseridos no contexto brasileiro em um horizonte temporal de dez anos, na medida em que apresenta um panorama das questões tecnológicas relacionadas à lignina, sob a percepção de profissionais que atuam no Brasil.

Segundo os especialistas consultados, em relação à matéria-prima, as folhosas, coníferas e bagaço de cana-de-açúcar apresentaram certo grau de relevância, variando da neutralidade à extrema importância como fonte de lignina. Contudo, a maior relevância do eucalipto evidencia a grande área plantada desse gênero no País e o seu amplo uso na indústria de celulose no Brasil. Desse modo, isso demonstra a importância de agregar valor à lignina Kraft da indústria de celulose, dado o mercado pouco desenvolvido desse coproduto.

Em se tratando da extração de lignina a partir de outras fontes vegetais, não há clara definição sobre qual processo é o mais adequado, segundo os entrevistados. Este é um retrato evidente da dificuldade encontrada globalmente para o fracionamento e isolamento da lignina, para a viabilização técnica e econômica da proposta de biorrefinaria.

Nesse sentido, em um horizonte de dez anos, polímeros devem ser o principal mercado para a lignina, seja na forma de resinas, blendas e (nano)compósitos, mantendo essencialmente a sua estrutura macromolecular, modificada quimicamente para manifestar alguma propriedade de interesse.

Quanto aos desafios relacionados com a obtenção de produtos derivados da lignina, os entrevistados destacaram a necessidade de garantir a seletividade dos processos para equacionar a viabilidade técnica e econômica de sua produção em grande

escala. Em relação às oportunidades de agregar valor à lignina, o aproveitamento de resíduos e coprodutos agroindustriais, a geração de nova cadeia de valor, e o elevado potencial econômico do produto ou derivados foram considerados os mais importantes, de acordo com os entrevistados.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal (FAP-DF), pelo apoio financeiro para a execução deste trabalho, sob a concessão número 236/2019. ■

REFERÊNCIAS

- BOZELL, J. J. *et al.* Lignin Isolation Methodology for Biorefining, Pretreatment and Analysis. In: BECKHAM, G. T. (Ed.). **Lignin Valorization - Emerging Approaches**. Croydon: Royal Society of Chemistry, 2018. p. 21-61.
- BRAGA, M. *et al.* Meeting Brazilian challenges for a bio-based economy: the case of alcohols and carboxylic acids. **Biomass Conversion and Biorefinery**, p. 1-19, 2022.
- CENIBRA. **Relatório de Sustentabilidade 2019**. Disponível em: <https://www.cenibra.com.br/wp-content/uploads/2020/06/RS-2019-PORT.pdf>. Acesso em: 7 ago. 2022.
- EMBRAPA FLORESTAS. **Eucalipto**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/florestas/transferencia-de-tecnologia/eucalipto/perguntas-e-respostas>. Acesso em: 12 dez. 2022.
- EMBRAPA FLORESTAS. **Pinus**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/florestas/transferencia-de-tecnologia/pinus/perguntas-e-respostas>. Acesso em: 12 dez. 2022.
- GALBE, M.; WALLBERG, O. Pretreatment for biorefineries: A review of common methods for efficient utilisation of lignocellulosic materials. **Biotechnology for Biofuels**, v. 12, n. 1, p. 1-26, 2019.
- IBÁ. **Relatório Anual**. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2022-compactado.pdf>. Acesso em: 12 dez. 2022.
- ICRAF. **Eucalyptus**. Disponível em: <http://db.worldagroforestry.org/wd/genus/eucalyptus>. Acesso em: 14 dez. 2022a.
- ICRAF. **Pinus**. Disponível em: <http://db.worldagroforestry.org/wd/genus/Pinus>. Acesso em: 12 dez. 2022b.
- KAI, D.; CHOW, L. P.; LOH, X. J. Lignin and Its Properties. In: LOH, X. J.; KAI, D.; LI, Z. (Eds.). **Functional materials from lignin: methods and advances**. London: World Scientific, 2018. v. 3, p. 1-28.
- KARUNARATHNA, M. S.; SMITH, R. C. Valorization of lignin as a sustainable component of structural materials and composites: Advances from 2011 to 2019. **Sustainability**, v. 12, n. 734, p. 1-15, 1 jan. 2020.
- KLABIN. **Centro de Tecnologia**. Disponível em: <https://klabin.com.br/pesquisa-inovacao/centro-de-tecnologia>. Acesso em: 7 ago. 2022.
- LADU, L.; CLAVELL, J. **D3.1 - Identification of technological trends in selected value chains** STAR4BBI. Berlin, 2 mar. 2018. Disponível em: <https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5b917193c&appId=PPGMS>. Acesso em: 15 out. 2022.
- LANG, J. M.; SHRESTHA, U. M.; DADMUN, M. The effect of plant source on the properties of lignin-based polyurethanes. **Frontiers in Energy Research**, v. 6, p. 1-12, 23 fev. 2018.
- LIU, W.-J.; JIANG, H.; YU, H. Q. Thermochemical conversion of lignin to functional materials: a review and future directions. **Green Chemistry**, v. 17, p. 4888-907, 2015.
- LU, H. *et al.* Integration of Biomass Torrefaction and Gasification based on Biomass Classification: A Review. **Energy Technology**, v. 9, n. 5, p. 2001108, 2021.
- MARQUES, F. Obstáculos no caminho. **Pesquisa Fapesp**, v. 268, p. 58-63, jun. 2018.
- MORENO, A.; SIPONEN, M. H. Lignin-based smart materials: A roadmap to processing and synthesis for current and future applications. **Materials Horizons**, v. 7, n. 9, p. 2237-257, 1 set. 2020.
- NAQVI, M.; YAN, J. Biorefinery: Production of Biofuel, Heat, and Power Utilizing Biomass. In: **Handbook of Clean Energy Systems**. [s.l.] John Wiley & Sons, Ltd., 2015. p. 1-16.
- O PAPEL. A Lignina da Suzano. **Cadernos Destaque do Setor**, p. 70-71, 2016.
- POPPER, R. Foresight methodology. In: GEORGHIOU, L. *et al.* (Eds.). **The handbook of technology foresight**. Cheltenham: Edward Elgar Publishing, 2008. p. 44-88.
- PRASAD, V. *et al.* Recent Advancements in Lignin Valorization and Biomedical Applications: A Patent Review. **Recent Patents on Nanotechnology**, v. 16, n. 2, p. 107-27, 2022.
- SANTOS, M. F. R. F.; BORSCHIVER, S.; COUTO, M. A. P. G. Biorrefinaria lignina in Brazil using the technology roadmap method. In: SHARMA, U. C.; PRASAD, R.; SIVAKUMAR, S. (Eds.). **Energy Science and Technology (Energy Management)**. Houston: Stadium Press LLC, 2015. v. 12, p. 321-48.
- SCHULTZ, E. L.; BELÉM, D. L.; BRAGA, M. **Mapa de rotas tecnológicas da conversão da lignina em intermediários químicos, combustíveis e materiais**. Brasília (DF): Embrapa, 2022. v. 45.
- SUPANCHAIYAMAT, N. *et al.* Lignin materials for adsorption: Current trend, perspectives and opportunities. **Bioresource Technology**, v. 272, p. 570-81, 2019.
- SUZANO. **Lignin**. Disponível em: <https://www.suzano.com.br/en/brands-and-products/lignin/>. Acesso em: 26 mar. 2023.
- SYLVAMO. **Resumo Público do Plano de Manejo Florestal**. Disponível em: <https://www.sylvamo.com/binaries/content/assets/sylvamo/certifications/resumo-pmf-2022---sylvamo-do-brasil.pdf>. Acesso em: 13 dez. 2022.
- VALOR ECONÔMICO. **Setor de Papel e Celulose**. Disponível em: https://especial.valor.com.br/valor1000/2020/ranking1000maiores/Papel_e_Celulose. Acesso em: 12 dez. 2022.
- VIRMOND, E. *et al.* Valorization of agroindustrial solid residues and residues from biofuel production chains by thermochemical conversion: a review, citing Brazil as a case study. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 30, n. 2, p. 197-230, 2013.
- WANG, H. *et al.* From lignin to valuable products—strategies, challenges, and prospects. **Bioresource Technology**, v. 271, p. 449-61, 1 jan. 2019.
- WELKER, C. *et al.* Engineering Plant Biomass Lignin Content and Composition for Biofuels and Bioproducts. **Energies**, v. 8, n. 8, p. 7654-676, 2015.
- WU, W. *et al.* Lignin Valorization: Two Hybrid Biochemical Routes for the Conversion of Polymeric Lignin into Value-added Chemicals. **Scientific Reports**, v. 7, p. 1-13, 2017.