

REVISTA BRASILEIRA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS



BAGAÇO DE SORGO SACARINO [*SORGHUM BICOLOR* (L.) MOENCH]
SUBMETIDO A MÉTODOS DE PRÉ-TRATAMENTOS APLICADOS À PRODUÇÃO
DE ETANOL CELULÓSICO¹

BRUNO RAFAEL DE ALMEIDA MOREIRA², JOSÉ CLÁUDIO CARASCHI³,
RONALDO DA SILVA VIANA⁴

¹ Apresentado no Congresso de Energias Renováveis da UFSCar: 23 a 26 de maio de 2017 – Sorocaba-SP, Brasil

² Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Tecnológicas, Dracena, SP, Brasil, bruno_rafael.m05@hotmail.com

³ Professor Dr. Universidade Estadual Paulista (UNESP), Campus de Itapeva, SP, Brasil, caraschi@itapeva.unesp.br

⁴ Professor Dr. Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Tecnológicas, Dracena, SP, Brasil, ronaldo@dracena.unesp.br

RESUMO

O sorgo sacarino é uma das principais biomassas lignocelulósicas com potencial para produção de biocombustíveis. Diante do exposto, o objetivo da presente pesquisa consistiu em avaliar a solubilidade dos bagaços de cultivares de sorgo sacarino em métodos de pré-tratamentos, usualmente empregados na produção de etanol celulósico. As matérias-primas utilizadas para o desenvolvimento deste trabalho foram procedentes do processo de moagem de colmos das cultivares, BRS 508 e BRS 509, cultivadas na área experimental, da Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios – APTA, Andradina/SP, cujos caldos açucarados extraídos foram destinados às avaliações químico-tecnológicas inerentes à produção de etanol

de primeira geração. Aplicou-se o delineamento de blocos casualizados, sendo os tratamentos, constituídos por quatro repetições, arranjados em esquema fatorial 2x4, correspondente a: duas cultivares de sorgo sacarino e quatro métodos de pré-tratamentos (NaOH 1% m v⁻¹, NaOH 5% m m⁻¹, água quente e água fria). O conjunto de dados, referente às análises laboratoriais de caracterização físico-química parcial do complexo lignocelulósico e solubilidade, foi submetido aos testes de normalidade de Shapiro-Wilk, Fisher, Tukey e correlação linear de Pearson, todos aos níveis de 1 e 5% de probabilidade. A cultivar BRS 509 exibiu, em seu bagaço, propriedades físico-químicas relativamente mais desejáveis à tecnologia de produção de etanol celulósico, quando comparada à BRS 508. Conclui-se que os bagaços das cultivares de sorgo sacarino apresentaram maior capacidade de solubilização em NaOH 1%.

Palavras-chave: Bioenergia, Biomassa, Bioetanol.

**SOLUBILITY OF THE SWEET SORGHUM [*SORGHUM BICOLOR* (L.) MOENCH]
BAGASSE IN PRETREATMENT METHOD APPLIED TO PRODUCTION OF
CELLULOSIC ETHANOL**

ABSTRACT

The sweet sorghum is one of the main lignocellulosic biomasses with potential for the production of biofuels. The aim of the research was to evaluate the solubility of sweet sorghum cultivars bagasse in pretreatment methods usually applied in the production of cellulosic ethanol. The raw materials used for the development of this work come from the milling process of the shoots of sorghum cultivars, BRS 508 and BRS 509, cultivated in the experimental area of the Agribusiness Technology Agency, whose sugary broths were destined to the chemical-technological evaluations, aiming at the production of ethanol of first generation. The experimental design was a randomized complete block and the treatments were composed of four replicates, arranged in a 2x5 factorial scheme, corresponding to: two sweet sorghum cultivars and four pretreatment methods (1% NaOH, 5% NaOH, hot and cold water. The data, referring to the laboratory analyzes of partial physicochemical characterization of the lignocellulosic complex and solubility, were submitted to the normality tests of Shapiro-Wilk, Fisher, Tukey and Pearson's linear correlation, all at 1 and 5% levels of

probability. The cultivar BRS 509 exhibited, in its bagasse, physico-chemical properties relatively more desirable to the technology of cellulosic ethanol production, when compared to the BRS 508. It was concluded that the bagasse of the cultivars of sorghum showed higher solubilization capacity in 1% sodium hydroxide solution.

Keywords: Bioenergy, Biomass, Bioethanol.

INTRODUÇÃO

A população mundial está cada vez mais ciente dos riscos, atuais e potenciais, associados à manutenção de matrizes energéticas dependentes de combustíveis minerais. Nesse sentido, centros de pesquisa e desenvolvimento, em parceria com entidades governamentais, têm mobilizado recursos tecnológicos e capital financeiro, no intuito de estabelecer estratégias economicamente viáveis ao aproveitamento da biomassa lignocelulósica, para produção de etanol de segunda geração, visto que a lignocelulose constitui o recurso biológico renovável mais abundante do planeta, conforme reportado em inúmeros trabalhos, que abordam, sob perspectivas distintas, a corrida mundial pelo estabelecimento e consolidação da matriz energética celulósica (DIAS et al., 2012; RAELE et al., 2014).

Atualmente, censos estatísticos apontam as palhas de milho, trigo e arroz; bagaços e palhadas de cana-de-açúcar e sorgo sacarino; fibras de algodão, coco e bananeira; capim-elefante; sisal; sabugo e talo de milho como as principais biomassas lignocelulósicas com potencial para produção de etanol de segunda geração, tanto a nível nacional quanto internacionalmente (MILANEZ et al., 2015).

Originário do continente africano, o sorgo sacarino [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] é uma espécie vegetal de metabolismo C₄, tolerante às regiões de clima quente e ao déficit hídrico, que permite mecanização em todos os seus processos agrícolas (VINUTHA et al., 2014). Por possuir ciclo biológico relativamente curto, 110 a 120 dias, este cereal apresenta-se como alternativa amplamente viável ao complemento na produção de biocombustíveis, primeira e segunda geração, principalmente no que tange ao período de Janeiro a Abril, quando a produção de etanol sofre grande queda, no Brasil, devido à época de entressafra da cultura da cana-de-açúcar, aumentando o período operacional de núcleos sucroenergéticos em

até três meses, o que reduz, consideravelmente, a ociosidade da cadeia produtiva do álcool (ROHOWSKY et al., 2013).

Devido à natureza recalcitrante de seus tecidos fibrosos, o bagaço de sorgo sacarino, assim como a maioria dos resíduos lignocelulósicos empregados na produção de etanol de segunda geração, necessita de tratamento prévio, pois a hidrólise enzimática dificilmente atinge rendimentos satisfatórios em açúcares fermentescíveis, quando aplicada a matérias-primas intransigentes à solubilização (ZHENG et al., 2009).

Diversos métodos de pré-tratamentos, físicos, químicos, biológicos ou combinados, são propostos e desenvolvidos, atualmente, para reduzir a recalcitrância do complexo lignocelulósico de biomassas vegetais (FERREIRA, 2015). Os mais comumente citados, na literatura especializada, baseiam-se no emprego de soluções de álcali (KIM; HOLTZAPPLE, 2006), hidrólise ácida (CHEN et al., 2011), explosão à vapor (PITARELO et al., 2012), solvólise (LASER et al., 2002), oxidação úmida (HENDRICKS, ZEEMAN, 2009), líquidos iônicos (LI et al., 2010; NGUYEN et al., 2010) e ação biológica (BUABAN et al., 2010).

O conhecimento prévio a respeito da composição físico-química da biomassa é de grande valia ao desenvolvimento estratégico de tecnologias à produção de etanol 2G, visto que os teores de celulose, hemiceluloses e lignina, associados à acidez e condutividade elétrica do resíduo influenciam, desde a escolha da matéria-prima a ser industrializada até a etapa de destilação, impactando, preponderantemente, na produtividade dos procedimentos intermediários, correspondentes ao pré-tratamento, hidrólise enzimática e fermentação (ZHANG, 2008). Biomassas com baixo teor de lignina, por exemplo, comportam condições mais propícias ao processo de bioconversão, quando comparadas àquelas mais significadas, devido à menor recalcitrância de seus tecidos, permitindo o acesso às moléculas de celulose (SANTOS et al., 2012).

Constatada a escassez de informações científicas a respeito do potencial da biomassa de sorgo sacarino para produção de etanol 2G, a presente pesquisa teve por objetivo avaliar a solubilidade dos bagaços das cultivares, BRS 508 e BRS 509, em métodos de pré-tratamentos à base de soluções alcalinas e água, quente e fria, visto que este parâmetro determina as viabilidades, técnica e econômica, e o grau tecnológico a ser aplicado à matéria-prima, no momento da industrialização de biocombustível celulósico.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento desta pesquisa, empregaram-se os bagaços das cultivares de sorgo sacarino, BRS 508 e BRS 509, cultivadas na área experimental, da Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios – APTA, Andradina/SP, os quais foram processados em moinho de facas tipo Willey, ao passo em que as partículas resultantes foram classificadas em peneiras sobrepostas (40/60 mesh), conforme a Norma TAPPI T 264 cm-97.

O delineamento aplicado foi o de blocos casualizados, sendo os tratamentos, constituídos por quatro repetições, arranjados em esquema fatorial 2x4, correspondente a: duas cultivares de sorgo sacarino e quatro métodos de pré-tratamento (em hidróxido de sódio a 1% massa/volume (NaOH 1%), hidróxido de sódio a 5% massa/massa (NaOH 5%), água quente e água fria).

Os teores de celulose, hemiceluloses e lignina foram quantificados conforme a metodologia proposta por Sjöström e Alén (2013), e os níveis de pH e condutividade elétrica, de acordo com a Norma TAPPI T 212 om-98. Para a avaliação da solubilidade dos bagaços em soluções de hidróxido de sódio, em NaOH 1% e NaOH 5%, e em água, quente e fria, consideraram-se as Normas TAPPI T 212 om-02, TAPPI T 235 cm-00, TAPPI T 207 cm-99, respectivamente. As análises laboratoriais foram conduzidas em triplicatas.

O conjunto de dados obtido foi submetido aos testes de normalidade de Shapiro-Wilk, Fisher, Tukey e correlação linear de Pearson, todos aos níveis de 1 e 5% de probabilidade. Para a interpretação do grau de associação linear, Figueiredo Filho e Junior (2010) sugerem os escores $0,1 \leq r < 0,3$ (fraco); $0,3 \leq r < 0,7$ (moderado) e $0,7 \leq r < 1,0$ (forte). Entretanto, neste trabalho, adaptou-se a metodologia proposta pelos autores, visando deduções mais criteriosas, sendo os escores estratificados conforme descrito na Tabela 1. O programa estatístico utilizado foi o *Software R* versão 3.3.1. (DELGAARD, 2015; FERREIRA et al., 2013).

Tabela 1: Escores adaptados para interpretação da magnitude do coeficiente de correlação linear (r) de Pearson.

Intervalo	Grau de associação
$0,0 \leq r < 0,3$	desprezível

0,3 ≤ r < 0,5	fraco
0,5 ≤ r < 0,7	mediano
0,7 ≤ r < 0,9	forte
0,9 ≤ r ≤ 1,0	Muito forte

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da análise de variância e teste de comparações múltiplas, referentes à caracterização físico-química parcial dos bagaços das cultivares de sorgo sacarino, BRS 508 e BRS 509, são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Valores médios de teores de celulose (Cel), hemiceluloses (Hem), lignina (Lig) e níveis de potencial hidrogeniônico (pH) e condutividade elétrica (CE) dos bagaços das cultivares de sorgo sacarino, BRS 508 e BRS 509.

Cultivar	Composição química			Parâmetros físico-químico	
	Cel (%)	Hem (%)	Lig (%)	pH	CE (uS cm ⁻¹)
BRS 508	47,89 a	25,61 a	9,78 a	5,86 b	408,25 a
BRS 509	47,59 a	25,14 a	8,82 b	5,96 a	400,75 b
Média	47,74	25,38	9,30	5,91	404,50
Teste F	5,23 ^(ns)	0,38 ^(ns)	69,46 ^{**}	1728 ^{**}	66,31 ^{**}
CV (%)	0,72	1,89	1,75	0,02	0,33
p-value	0,81 [*]	0,98 [*]	0,86 [*]	0,53 [*]	0,64 [*]

Médias seguidas pela mesma letra minúscula, na coluna, não diferem entre si, pelo teste de Tukey, ao nível de 1% de probabilidade. * Significativo a 5%; ** Significativo a 1%; ^(ns) Não significativo a 1%; CV: Coeficiente de Variação; Teste F: Fisher.

O bagaço da cultivar BRS 508 exibiu maiores teores de celulose, hemiceluloses e lignina, quando comparado ao da cultivar BRS 509, não havendo diferença estatística significativa entre os primeiros componentes. Os resultados médios encontrados neste

trabalho convergiram, em partes, com os dados relatados por Silva et al. (2011) e Rocha et al. (2012), descritos na Tabela 3.

Tabela 3: Composição química parcial de matérias-primas lignocelulósicas com potencial para produção de etanol celulósico.

Matéria-prima	Composição química		
	Celulose (%)	Hemiceluloses (%)	Lignina (%)
Palha de cana	40 - 44	30 - 32	22 - 25
Bagaço de cana	32 - 48	19 - 24	23 - 32
Madeira dura	43 - 47	25 - 35	16 - 24
Madeira mole	40 - 44	25 - 29	25 - 31
Talo de milho	35	25	35
Espiga de milho	45	35	15
Fibra de algodão	95	2	0,3
Palha de trigo	30	50	15
Sisal	73,1	14,2	11
Palha de arroz	43,3	26,4	16,3
Forragem de milho	38,4	28	7 - 21
Fibra de coco	36,4	0,1 - 0,2	41 - 45
Fibra de bananeira	60 - 65	6 - 8	5 - 10
Palha de cevada	31 - 45	27 - 38	14 - 19
MÉDIA ⁽¹⁾	$40,42 \pm 2,62$	$20,05 \pm 2,48$	$19,79 \pm 0,31$

⁽¹⁾ Ferreira, 2015.

Guedes et al. (2010), observaram que biocombustíveis provenientes de biomassas ácidas e com maior potencial de geração de correntes livres são mais propensos a causar corrosão de peças metálicas de aço carbono, em relação àqueles produzidos a partir de materiais lignocelulósicos alcalinos e menos condutivos, comprometendo a vida útil do motor ao qual são empregados. Portanto, diante do exposto constatou-se que o bagaço da cultivar BRS 508, por ter evidenciado condutividade elétrica e acidez significativamente superiores, em relação ao da cultivar BRS 509, apresentou propriedades físicas menos desejáveis à tecnologia de produção de etanol celulósico.

As diferenças apresentadas pelos bagaços, quanto aos valores de lignina, pH e condutividade elétrica, eram previstas, visto que os mesmos são oriundos de cultivares com composições genômicas e metabolismos fisiológicos distintos. Segundo Balat (2011) os fatores genéticos, edáficos e climáticos são os principais responsáveis pelas alterações na composição físico-química de biomassas lignocelulósicas, tanto em termos qualitativos como quantitativamente.

Os resultados do desdobramento da análise de variância e teste de comparações múltiplas da solubilidade dos bagaços das cultivares de sorgo sacarino, BRS 508 e BRS 509, são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Desdobramento da análise de variância e teste de comparações múltiplas do percentual de solubilidade dos bagaços das cultivares de sorgo sacarino, BRS 508 e BRS 509, em métodos de pré-tratamento aplicados à produção de etanol celulósico.

Cultivar	Pré-tratamento					
	Álcali		Água		Média	Teste F
	NaOH 1%	NaOH 5%	Quente	Fria		
BRS 508	55,11 aA	48,73 aB	25,61 aC	21,84 bD	37,33	5777,07**
BRS 509	54,52 aA	47,64 aB	25,24 aC	24,01 aD	37,94	5035,34**
Média	54,82	48,19	25,43	22,93		
Teste F	3,20 ^(ns)	6,88 ^(ns)	1,28 ^(ns)	44,95**		
Teste F cultivar = 2,90^(ns)						

Teste F pré-tratamentos = 10794,60**

Teste F cultivar x pré-tratamentos = 17,80**

CV (%) = 1,15

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula, na linha, e minúscula, na coluna, não diferem entre si, pelo teste de Tukey, ao nível de 1% de probabilidade; p-value = 0,4155; ** Significativo a 1%; ^(ns) Não significativo a 1%; CV: Coeficiente de Variação; Teste F: Fisher.

Verificou-se que a solução de hidróxido de sódio a 1% permitiu aos bagaços das cultivares de sorgo sacarino, BRS 508 e BRS 509, percentuais significativos de solubilidade, diferindo preponderantemente dos demais métodos avaliados.

Com relação ao comportamento das cultivares, dentro de cada nível de pré-tratamento, a cultivar de sorgo sacarino BRS 509 exibiu solubilidade em água fria significativamente superior, em relação ao bagaço da cultivar BRS 508, não havendo diferença estatística significativa dentro dos demais níveis. Os resultados justificaram-se pela alta capacidade das substâncias alcalinas, como é o caso do hidróxido de sódio, de promover intensa deslignificação da biomassa, aumentando a reatividade das fibras e, consequentemente, reduzindo a recalcitrância da matéria-prima (NASCIMENTO, 2011). Quando submetida à ação de substâncias alcalinas, a estrutura química da lignina sofre ionização, de modo que os grupamentos hidroxilas alifáticos e fenólicos se rompem dando origem a grupos fenólicos de menor tamanho e peso molecular, os quais são responsáveis pelo aumento na solubilidade da biomassa lignocelulósica (BARCELOS, 2011; NOVO, 2012). Além de reduzir a inflexibilidade da lignina à solubilização, o pré-tratamento alcalino é efetivamente capaz de dissolver os diferentes componentes da hemicelulose (manose, xilose, arabinose e galactose). Complementarmente, o álcali, geralmente soda ou cal, tende a provocar “inchamento” na biomassa vegetal, de tal maneira que a cristalinidade da celulose decresce, enquanto ocorre incremento na solubilidade da matéria-prima (BALAT et al., 2008; HENDRICKS; ZEEMAN, 2009).

Nascimento (2011), estudando o pré-tratamento alcalino do bagaço de cana-de-açúcar para produção de etanol celulósico e obtenção de xilooligômeros, verificou que o bagaço “in natura” submetido ao pré-tratamento com álcali (NaOH 1%) exibiu menor solubilidade, em relação ao bagaço pré-tratado com álcali (NaOH 4%). Contudo, o aumento na concentração da solução de hidróxido de sódio, de 4,0 para 7%, reduziu consideravelmente a solubilidade do bagaço de cana, corroborando os resultados observados neste trabalho. Com relação à maior solubilidade dos bagaços em água quente, em detrimento do pré-tratamento à base de água fria, esta se deu pela capacidade das altas temperaturas favorecerem a remoção de grande parte dos componentes hemicelulósicos, embora mantenham intacta a estrutura da lignina, conforme retrata Souza et al. (2012).

Se por um lado, o aumento na concentração de hidróxido de sódio compromete a eficiência do pré-tratamento alcalino à base deste elemento químico, pelo outro, o grande consumo de água e a formação de hidrolisados muito diluídos a partir desta constituem os principais fatores limitantes dos métodos de pré-tratamentos que empregam a água quente (solvólise) e a água fria (CONDE-MEJÍA et al., 2012). Todavia, os pré-tratamentos que

operam à base de água apresentam a vantagem de não demandarem sistemas de reatores que oneram os custos operacionais, devido à baixa corrosividade desta substância e dos reagentes envolvidos nesta técnica de tratamento prévio de biomassas vegetais (BALAT, 2011; BRODEUR et al., 2011).

Os resultados do teste de Pearson, referentes às variáveis que estabeleceram correlação linear significativa, são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Grau de associação linear entre os atributos físico-químicos e entre os atributos físico-químicos e a solubilidade dos bagaços das cultivares de sorgo sacarino, BRS 508 e BRS 509, em métodos de pré-tratamentos aplicados à produção de etanol celulósico.

Variável (x)	Variável (y)	Pearson (r)
pH	Condutividade	-0,97*
pH	Solubilidade em água fria	0,94*
Lignina	Solubilidade em álcali (NaOH 1%)	0,93*
Condutividade	Solubilidade em álcali (NaOH 1%)	0,88*
Lignina	Solubilidade em água fria	-0,86*
pH	Solubilidade em álcali (NaOH 1%)	-0,85*
Celulose	Solubilidade em água quente	-0,80*
Lignina	Condutividade	0,76*
pH	Lignina	-0,72*

*Significativo a 5 %, pelo teste de correlação linear de Pearson.

O pH e a condutividade elétrica se correlacionaram inversamente, com grau de associação linear classificado como muito forte, indicando que biomassas alcalinas tendem a expressar condutividade elétrica inferior, em relação às biomassas ácidas. Segundo Krzyzanowski (1991), maiores concentrações de íons H^+ e de ácidos orgânicos excitam a formação de correntes elétricas entre os componentes moleculares e estruturais dos tecidos vegetais, enquanto que a presença de íons de OH^- inibem esse processo, elucidando a natureza biológica desta correlação.

De acordo com Costa et al. (2010), baixa condutividade elétrica é sinônimo de alta qualidade das fibras, enquanto que alta geração de correntes livres sugere menor vigor dos componentes estruturais. Com base nessa premissa, tornou-se possível compreender a razão

pela qual o bagaço da cultivar BRS 508 exibiu maior solubilidade na maioria dos métodos de pré-tratamento, visto que o mesmo associou-se ao pH mais ácido e, consequentemente, ao maior índice de condutividade elétrica, tornando-se mais suscetível à ação dos fatores externos representados, neste caso, pelo hidróxido de sódio e pela água quente.

O pH e a solubilidade em água fria se correlacionaram positivamente, com grau de associação linear classificado como muito forte, indicando o efeito sinérgico da alcalinidade sobre a capacidade de solubilização da biomassa em água fria, comprovando o motivo pelo qual o bagaço da cultivar BRS 509 evidenciou solubilidade em água fria significativamente superior, em relação ao bagaço da cultivar BRS 508, sob a mesma condição, uma vez que o mesmo apresentou pH mais alcalino.

De acordo com a correlação estabelecida entre o pH e a condutividade elétrica, a alcalinidade favorece a integridade da composição estrutural das fibras. Nesse sentido, o bagaço da cultivar BRS 508, por ter expressado pH mais ácido, deveria ter correspondido a maior solubilidade em água fria, se não fosse pelo fato do mesmo ter exibido maior teor de lignina, a qual constituiu correlação linear inversa com a solubilidade em água fria, com grau de associação linear classificado como forte, sugerindo que a sua presença reduz, em média, a solubilidade da biomassa em água fria. A natureza desta correlação justificou-se pelo potencial hidrofóbico da lignina, ocasionado pelas ligações de fenilpropano (BRODEUR et al., 2011; HENDRICKS; ZEEMAN, 2009; OGEDA; PETRI, 2010).

A lignina e a solubilidade em álcali (NaOH 1%) se correlacionaram positivamente, com grau de associação linear muito forte, indicando que o aumento no teor de lignina, implicada na maior capacidade de solubilização da biomassa em solução de hidróxido de sódio a 1%. Como já mencionado em outras oportunidades a lignina é sensível à ação de substâncias alcalinas, as quais são suficientemente capazes de condicionar a biomassa à intensa deslignificação, tornando-a mais solúvel em meio alcalino, explicando o caráter desta correlação (KUMAR et al., 2009; RABELO; MACIEL FILHO; COSTA, 2009). Com base nesta correlação tornou-se possível a compreensão a respeito da razão pela qual o bagaço da cultivar BRS 508 exibiu maior solubilidade em álcali (NaOH 1%), em relação ao bagaço da cultivar BRS 509, visto que o mesmo associou-se ao maior percentual mássico de lignina.

Por sua vez, o pH e a solubilidade em álcali (NaOH 1%) se correlacionaram negativamente, com grau de associação classificado como muito linear forte, permitindo a seguinte inferência: quanto mais alcalina a biomassa, menor a sua capacidade de solubilização

em hidróxido de sódio a 1%. Isso porque, a concentração excessiva de hidróxido de sódio favorece a integridade da matéria-prima, tornando-a menos solúvel (NASCIMENTO, 2011). Esta correlação legitimou os resultados do desdobramento da análise de variância, permitindo compreender o motivo pelo qual a fração lignocelulósica do bagaço da cultivar BRS 509 expressou menor solubilidade em hidróxido de sódio a 1%, em detrimento da fração lignocelulósica do bagaço da cultivar BRS 508, uma vez que a mesma apresentou pH mais alcalino.

O teor de celulose a solubilidade em água quente corroboraram correlação inversa, com grau de associação linear forte, indicando que quanto maior o teor de celulose na biomassa, menor a solubilidade desta em água quente. A natureza desta correlação é desconhecida, porém acredita-se que altos teores de celulose, incrementam a recalcitrância da matéria-prima, devido à maior quantidade relativa de cristais celulósicos, os quais contribuem à redução na capacidade de solubilização da lignocelulose (HENDRICKS; ZEEMAN, 2009). Todavia, esta inferência não é passível de generalização, necessitando de estudos mais aprofundados que sejam capazes de autenticá-la. A partir desta correlação tornou-se possível compreender o motivo pelo qual a fração lignocelulósica do bagaço da cultivar BRS 508 corroborou maior solubilidade em água quente, quando comparada à do bagaço da cultivar BRS 509, visto que a mesma exibiu menor teor de celulose em sua composição química.

A lignina e a condutividade estabeleceram correlação direta, com grau de associação linear forte, sugerindo que o aumento no teor de lignina, implica no aumento da condutividade elétrica da biomassa. São escassos os relatos na literatura que elucidam o efeito sinérgico da lignina sobre a condutividade elétrica das fibras. Contudo pressupõe-se que a fundamentação biológica desta correlação esteja relacionada à composição química da lignina, a qual é constituída basicamente por carbono, hidrogênio e oxigênio, de modo que a presença do segundo elemento seja suficientemente capaz de elevar os níveis de condutividade elétrica da biomassa. Pois, de acordo com Krzyzanowski (1991), os íons de hidrogênio favorecem a formação de correntes elétricas nos tecidos biológicos. Com base nessa premissa, deduziu-se que quanto maior o teor de lignina na composição química da biomassa, maior a concentração relativa de íons de H^+ dissociados na solução aquosa, durante a análise de condutividade, refletindo no aumento da geração de correntes elétricas livres captadas pelo condutivímetro.

O pH e o teor de lignina estabeleceram correlação inversa, com grau de associação linear forte, sugerindo que o aumento no nível de pH, promove redução no teor de lignina. Esta correlação justificou-se pela baixa capacidade da lignina de resistir a meios alcalinos. A associação linear inversa constituída entre o pH e teor de lignina, explicou o fato do bagaço da cultivar BRS 508 ter expressado maior percentual de lignina em sua composição química parcial, em relação ao bagaço da cultivar BRS 509, visto que o mesmo exibiu pH mais ácido.

Compreender as correlações e o grau de associação linear existente entre os parâmetros qualitativos da biomassa pode auxiliar no desenvolvimento de estratégicas, sejam elas genéticas, nutricionais, fisiológicas ou industriais, capazes de aperfeiçoar tanto a composição físico-química da matéria-prima lignocelulósica quanto os métodos de pré-tratamentos usualmente aplicado à tecnologia de produção de etanol celulósico.

CONCLUSÕES

A cultivar BRS 509 exibiu, em seu bagaço, proporções de atributos físico-químicos, principalmente pH e condutividade elétrica, mais desejáveis à tecnologia de produção de etanol celulósico.

Os bagaços das cultivares apresentaram maior capacidade de solubilização em solução de hidróxido de sódio a 1%, legitimando o potencial deste método ao pré-tratamento da biomassa de sorgo sacarino.

REFERÊNCIAS

- BALAT, M. Production of bioethanol from lignocellulosic materials via the biochemical pathway: a review. **Energy conversion and management**, v.52, n.2, p.858-875, 2011.
- BALAT, M.; BALAT, H.; ÖZ, C. Progress in bioethanol processing. **Progress in energy and combustion science**, v.34, n.5, p.551-573, 2008.
- BARCELOS, C. A.; SANTA ANNA, L. M. M.; MAEDA, R. N.; JUNIOR, N. P. Aproveitamento das frações sacarínea, amilácea e lignocelulósica do sorgo sacarino [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] para a produção de bioetanol. **Boletim Técnico da Petrobras**, v.54, n.3, p.29-46, 2011.

BRODEUR, G.; YAU, E.; BADAL, K.; COLLIER, J.; RAMACHANDRAN, K. B.; RAMAKRISHNAN, S. Chemical and physicochemical pretreatment of lignocellulosic biomass: a review. **Enzyme research**, v.2011, 2011.

BUABAN, B.; INOUE, H.; YANO, S.; TANAPONGPITAT, S.; RUANGLEK, V.; CHAMPREDA, V.; PICHYANGKURA, R.; RENGIPAT, S.; EURWILAICHITR, L. Bioethanol production from ball milled bagasse using an on-site produced fungal enzyme cocktail and xylose-fermenting *Pichia stipitis*. **Journal of Bioscience and Bioengineering**, v.110, p.18-25, 2010.

CHEN, W.; TU, Y.; SHEEN, H. Disruption of sugarcane bagasse lignocellulosic structure by means of dilute sulfuric acid pretreatment with microwave-assisted heating. **Applied Energy**, v.88, p.2726-2734, 2011.

CONDE-MEJÍA, C.; JIMENEZ-GUTIÉRREZ, A.; EL-HALWAGI, M. A. Comparison of pretreatment methods for bioethanol production from lignocellulosic materials, **Process Safety and Environment Protection**, v.90, p.189-202, 2012.

COSTA, A. R., FARONI, L. R. D. A., DE ALENCAR, E. R., CARVALHO, M. C. S., FERREIRA, L. G. Qualidade de grãos de milho armazenados em silos bolsa1. **Revista Ciência Agronômica**, v.41, n.2, p.200-207, 2010.

DALGAARD P. **ISwR: Introductory Statistics with R**. R package version 2.0-7, 2015.

DIAS, M. O.; JUNQUEIRA, T. L.; CAVALETTO, O.; CUNHA, M. P.; JESUS, C. D.; ROSSELL, C. E.; BONOMI, A. Integrated versus stand-alone second generation ethanol production from sugarcane bagasse and trash. **Bioresource technology**, v.103, n.1, p.152-161, 2012.

FERREIRA, E. B.; CAVALCANTI, P. P.; NOGUEIRA, D. A. **ExpDes.pt: Experimental Designs pacakge (Portuguese)**. R package version 1.1.2, 2013.

FERREIRA, J. Etanol de segunda geração: definição e perspectivas. **Conexão Eletrônica**, Três Lagoas, MS, v.12, n.1, p.1-11, 2015.

FIGUEIREDO FILHO, D. B.; JUNIOR, J. A. S. Desvendando os mistérios do coeficiente de correlação de Pearson (r). **Revista Política Hoje**, v.18. N.1, 2010.

GUEDES, C. L. B.; ADÃO, D. C.; QUESSADA, T. P.; BORSATO, D.; GALÃO, O. F.; MAURO, E.; ROCHA, J. D. Avaliação de biocombustível derivado do bio-óleo obtido por pirólise rápida de biomassa lignocelulósica como aditivo para gasolina. **Química Nova**, v.33, n.4, p.781-786, 2010.

HENDRIKS, A. T. W. M.; ZEEMAN, G. Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass. **Bioresource Technology**, v.100, p.10-18, 2009.

KIM, S.; HOLTZAPPLE, M. T. Effect of structural features on enzyme digestibility of corn stover. **Bioresource Technology**, v.97, n.4, p.583-591, 2006.

KRZYZANOWSKI, F. C.; FRANÇA NETO, J. B.; HENNING, A. A. Relatos dos testes de vigor disponíveis as grandes culturas. **Informativo ABRATES**, Brasília, v.1, n.2, p.15-50, mar. 1991.

KUMAR, R.; MAGO, G.; BALAN, V.; WYMAN, C. E. Physical and chemical characterizations of corn stover and poplar solids resulting from leading pretreatment technologies. **Bioresource Technology**, v.100, p.3948-3962, 2009.

LASER M.; SCHULMAN, D.; ALLEN, S. G.; LICHWA, J.; ANTAL JR, M.; LYND, L. R. A. Comparison of Liquid Hot Water and Steam Pretreatments of Sugar Cane Bagasse for Bioconversion to Ethanol. **Bioresource Technology**, v.81, p.33-44, 2002.

LI, X.; PAN, X. Hydrogels based on hemicellulose and lignin from lignocellulose biorefinery: a mini-review. **Journal of Biobased Materials and Bioenergy**, v.4, n.4, p.289-297, 2010.

MILANEZ, A. Y.; NYKO, D.; VALENTE, M. S.; SOUSA, L. C.; BONOMI, A. M. F. L. J.; JESUS, C. D. F. D.; JUNQUEIRA, T. L. De promessa à realidade: como o etanol celulósico pode revolucionar a indústria da cana-de-açúcar: uma avaliação do potencial competitivo e sugestões de política pública. **BNDES Setorial, Rio de Janeiro**, n.41, 2015.

NASCIMENTO, V. M. **Pré-tratamento alcalino (NaOH) do bagaço de cana-de-açúcar para a produção de etanol e obtenção de xilooligômeros**. 2011. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2011.

NGUYEN, T. A. D.; KIM, K. R.; HAN, S. J.; CHO, H. Y.; KIM, J. W.; PARK, S. M.; SIM, S. J. Pretreatment of rice straw with ammonia and ionic liquid for lignocellulose conversion to fermentable sugars. **Bioresource Technology**, v.101, n.19, p.7432-7438, 2010.

NOVO, L. P. **Determinação da relação dos parâmetros de solubilidade de Hansen de solventes orgânicos com a deslignificação organossolve de bagaço de cana-de-açúcar**. 2012. Dissertação (Mestrado em Química) – Instituto de Química de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2012.

OGEDA, T. L.; PETRI, D. F. Hidrólise enzimática de biomassa. **Química Nova**, v.33, n.7, p.1549-1558, 2010.

PITARELO, A. P.; SILVA, T. D.; PERALTA-ZAMORA, P. G.; RAMOS, L. P. Efeito do teor de umidade sobre o pré-tratamento a vapor e a hidrólise enzimática do bagaço de cana-de-açúcar. **Química Nova**, v.35, n.8, p.1502-1509, 2012.

RABELO, S. C.; MACIEL FILHO, R.; COSTA, A. C. A comparison between lime and alkaline hydrogen peroxide pretreatments of sugarcane bagasse for ethanol production. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, v.144, p.87-100, 2009.

RAELE, R.; BOAVENTURA, J. M. G.; FISCHMANN, A. A.; SARTURI, G. Scenarios for the second generation ethanol in Brazil. **Technological Forecasting and Social Change**, v.87, p.205-223, 2014.

ROCHA, G. J. M.; MARTIN, C.; SOARES, I. B.; MAIOR, A. M. S.; BAUDEL, H. M.; DE ABREU, C. A. M. Dilute mixed-acid pretreatment of sugarcane bagasse for ethanol production. **Biomass and Bioenergy**, v.35, n.1, p.663-670, 2011.

ROHOWSKY, B.; HÄSSLER, T.; GLADIS, A.; REMMELE, E.; SCHIEDER, D.; FAULSTICH, M. Feasibility of simultaneous saccharification and juice co-fermentation on hydrothermal pretreated sweet sorghum bagasse for ethanol production. **Applied Energy**, v.102, p.211-219, 2013.

SANTOS, F. A.; QUEIRÓZ, J. D.; COLODETTE, J. L.; FERNANDES, S. A.; GUIMARÃES, V. M.; REZENDE, S. T. Potencial da palha de cana-de-açúcar para produção de etanol. **Química Nova**, v.35, n.5, p.1004-1010, 2012.

SILVA, A. S. A.; LEE, S. H.; ENDO, T.; BON, E. P. Major improvement in the rate and yield of enzymatic saccharification of sugarcane bagasse via pretreatment with the ionic liquid 1-ethyl-3-methylimidazolium acetate ([Emim][Ac]). **Bioresource technology**, v.102, n.22, p.10505-10509, 2011.

SJÖSTRÖM, E.; ALÉN, R. (ED.). **Analytical methods in wood chemistry, pulping, and papermaking**. Springer Science & Business Media, 2013.

SOUZA, O.; SCHULZ, M. A.; FISCHER, G. A.; WAGNER, T. M.; SELLIN, N. Energia alternativa de biomassa: Bioetanol a partir da casca e da polpa de banana. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, n.8, p.915-921, 2012.

TECHNICAL ASSOCIATION OF PULP AND PAPER INDUSTRIES. **TAPPI T 207 cm-99**: Water solubility of wood and pulp. Atlanta, USA, 2000.

TECHNICAL ASSOCIATION OF PULP AND PAPER INDUSTRIES. **TAPPI T 235 cm-00**: Alkali solubility of pulp at 25° C. Atlanta, USA, 2002.

TECHNICAL ASSOCIATION OF PULP AND PAPER INDUSTRIES. **TAPPI T 252 om-98**: pH and electrical conductivity of hot water extracts of pulp, paper, and paperboard. Atlanta, USA, 2000.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRIES. **TAPPI T 212 om-02**: One percent sodium hydroxide solubility wood and pulp. Atlanta, USA, 2000.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRIES. **TAPPI T 264 cm-97**: Preparation of wood for chemical analysis. Atlanta, USA, 2000.

VINUTHA, K. S.; RAYAPROLU L.; YADAGIRI, K.; UMAKANTH, A. V.; PATIL, J. V.; RAO, P. S. Sweet Sorghum Research and Development in India: Status and Prospects. **Sugar Tech**, v.16, n.2, p.133-143, 2014.

ZHANG, Y. H. P. Reviving the carbohydrate economy via multi-product lignocellulose biorefineries. **Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology**, v.35, n.5, p.367-375, 2008.

ZHENG, Y. I.; PAN, Z.; ZHANG, R.; WANG, D. Enzymatic saccharification of dilute acid pretreated saline crops for fermentable sugar production. **Applied Energy**, v.86, n.11, p.2459-2465, 2009.