

APLICAÇÃO DE ESCÓRIA DE SIDERURGIA EM PASTAGEM DE *Urochloa brizantha* NA AMAZÔNIA



10.56238/edimpacto2025.015-00

Eduardo do Valle Lima

Professor Titular da Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA):

Campus da UFRA em Capanema - PA

Doutor em Agronomia /Agricultura pela UNESP / Faculdade de Ciências Agronômicas – Câmpus de Botucatu - SP

E-mail: eduardo.valle_lima@yahoo.com.br

Patrícia da Silva Leitão Lima

Professora Associada II da Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA):

Campus da UFRA em Capanema - PA

Doutora em Agronomia / Proteção de Plantas pela UNESP / Faculdade de Ciências Agronômicas – Câmpus de Botucatu - SP

E-mail: patleitao@yahoo.com.br

RESUMO

A escória de siderurgia é um resíduo da produção do ferro-gusa (indústria do aço), que apresenta em sua composição o Si, na forma de silicato de cálcio e de magnésio. Tem potencial para ação corretiva da acidez dos solos, podendo também ser empregado como fertilizante silicatado. Avaliar a aplicação de escória em pastagem de *Urochloa brizantha*, em diferentes doses, e seus efeitos na planta é o objetivo. Todavia, para o aproveitamento das diferentes escórias, inicialmente devem ser caracterizadas quimicamente. Escolhida aquela como maior potencial para ser utilizada como fertilizante silicatado, foi estabelecido a campo um delineamento experimental de blocos ao acaso, com quatro repetições, sendo os tratamentos constituídos por quatro doses de escória selecionada (0, 200, 400 e 600 kg ha⁻¹). Na sequencia as respostas morfofisiológicas foram avaliadas. A maior concentração de Si foi verificada na escória de alto forno (espectrofotômetro de absorção atômica), sendo a utilizada como adubo silicatado. A aplicação da escória foi de forma manual e em cobertura após rebaixamento do pasto. Antes do florescimento, foram retirados folhas, jovens e adultas, das parcelas sem e com a dose máxima. As amostras foram processadas segundo técnicas para análise microscópica eletrônica de varredura e microanálise espectroscópica de raios-x por dispersão de energia. A maior dose proporcionou o aumento do número de corpos silicosos e do teor de Si em tricomas tectores aculeiformes na lâmina foliar, como respostas morfofisiológicas da mesma frente a elevada disponibilidade do elemento no solo. A dose que proporcionou melhor desempenho ficou entre 200 e 400 kg ha⁻¹.

Palavras-chave: Silício. Braquiária. Deposição de sílica. Corpos silicosos. Tricomas.

1 INTRODUÇÃO

O silício é um dos elementos mais abundantes da crosta terrestre, superado apenas pelo oxigênio, fazendo parte da composição da maioria dos minerais, estando presente, em maior ou menor quantidade, em praticamente todos os tipos de solos (Silva; Bohnen, 2001). O Si, por meio da adubação silicatada, mesmo não sendo considerado como um elemento essencial pode permitir uma indução de resistência temporária nas plantas de *Urochloa brizantha* ao ataque de determinados insetos, tornando-se um elemento benéfico para as plantas.

Como se sabe, algumas espécies, especialmente gramíneas, têm a capacidade de acumular silício no tecido vegetal, principalmente na parede celular, dando a essas plantas uma maior resistência estrutural às suas células (Soratto et al., 2007). Praticamente, todo o Si absorvido é translocado das raízes para as folhas e, com a saída da água pela transpiração, polimeriza na parte externa da parede celular (principalmente nas células da epiderme), transformando-se em um mineral amorfo de sílica (Silva; Bohnen, 2001). Este processo de silificação das células epidérmicas funcionaria como uma barreira física efetiva contra o ataque de insetos, diminuindo os danos causados pela ocorrência de pragas (Silva; Bohnen, 2001).

Dessa forma, o acúmulo de Si na parte aérea pode contribuir para uma maior resistência das plantas de *Urochloa* ao ataque, por exemplo, de cigarrinha das pastagens. Muitos trabalhos demonstram a sua importância para diversas outras culturas, especialmente para o arroz e a cana-de-açúcar (Pereira et al., 2003). A indução de resistência temporária em plantas tem boas perspectivas, principalmente por ser de custo mais baixo e de causar menor impacto ambiental do que o uso de inseticidas (Albuquerque et al., 2007). Essa resistência induzida em plantas pela presença do silício, de forma prática e econômica, pode ser obtida por meio da aplicação de produtos químicos ou minerais, como a utilização da escória de siderurgia. Várias escórias tem sido aplicadas na agricultura para suprir as plantas com Si em vários continentes. Todavia, poucos estudos vêm sendo realizados, no Brasil, para verificar a viabilidade destes subprodutos.

Em todo o mundo, a atividade industrial gera resíduos sólidos que podem representar riscos ao ambiente. Em razão destes riscos ambientais, faz-se necessário definir um destino adequado a estes resíduos, e se possível empregá-los em outras atividades essenciais ao homem (Prado; Fernandes, 2001). A utilização de resíduos industriais e urbanos na agropecuária como fonte de nutrientes ou como corretivos da acidez é uma tendência decorrente da necessidade de minimizar os efeitos nocivos do acúmulo de nutrientes nos centros de produção (Marciano et al., 2001). Desde que apresente características corretivas ou fertilizantes e não contamine o solo e os mananciais hídricos, um subproduto ou resíduo qualquer pode perfeitamente ser empregado nas atividades agropecuárias (Araújo et al., 2007).

Nos processos de fundição do minério de ferro para produção do ferro-gusa e do aço, têm-se como resultado uma grande quantidade de escória e outros resíduos sólidos (Prado; Fernandes, 2001). Assim, as escórias de siderurgia podem ser oriundas de diferentes processos industriais. Portanto, cada resíduo gerado deverá apresentar em sua composição diferentes teores de silicato de cálcio e de magnésio, o que lhe conferem propriedades corretivas da acidez do solo distintas (Prado et al., 2007), assim como para a disponibilização de silício as plantas. Assim, a utilização de materiais alternativos como as escórias de siderurgia, podem auxiliar na melhoria da fertilidade do solo e no crescimento dos pastos cultivados, com consequente aumento na produção de massa seca de gramíneas forrageiras.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 CARACTERIZAÇÃO DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DE ESCÓRIAS ORIUNDAS DE DIFERENTES PROCESSOS SIDERÚRGICOS NO ESTADO DO PARÁ

O Brasil produz em média 3,5 milhões de toneladas de ferro-gusa, onde cerca de 24% são provenientes de siderúrgicas dos estados do Pará e Maranhão, que somados respondem pela segunda maior produção do País (Brasil, 2017). A atividade siderúrgica representa um importante segmento da economia do Pará e tem na produção de ferro-gusa um de seus destaques, uma vez que o estado é um dos maiores produtores do País (Brasil; Nascimento, 2019). A escória é o principal resíduo gerado no processo de produção de ferro-gusa e, muitas vezes, tem sido acumulada nos pátios ou aterros das indústrias, ocasionando problemas de ordem ambiental (Brasil; Nascimento, 2019).

Em todo o mundo, a atividade industrial gera resíduos sólidos que podem representar riscos ao ambiente (Coelho, 2013). Por isto, se faz necessário definir um destino adequado a estes resíduos e, se possível, emprega-los em outras atividades essenciais ao homem (Prado; Fernandes, 2001). A utilização de resíduos industriais na agricultura como corretivos da acidez ou como fonte de nutrientes é uma tendência decorrente da necessidade de minimizar os efeitos nocivos do acúmulo nos centros de produção (Marciano et al., 2001). Assim, desde que apresente características corretivas ou fertilizantes e não contamine o solo e os mananciais hídricos, um resíduo qualquer pode perfeitamente ser empregado nas atividades agrícolas.

O parque siderúrgico de Marabá / PA tem como principal produção a fabricação do ferro-gusa, mas também há indústria realizando o refino (aciaria). Deste modo, existe a possibilidade de se fazer o aproveitamento dos diferentes resíduos (escórias), oriundos do processo siderúrgico, na agricultura. Nos processos de fundição de ferro-gusa e aço, têm-se como subproduto uma grande quantidade de escórias como resíduos sólidos (Prado; Fernandes, 2001). Do total de ferro-gusa produzido são gerados de 10% a 15% de escória (Prado et al., 2001), os quais, muitas vezes, são acumulados e com destino incerto, gerando sério problema ambiental (Sobral et al., 2011). De modo geral, a escória de siderurgia, além de apresentar em sua composição o Si, é constituída quimicamente por silicato de cálcio e de

magnésio, o que pode lhe conferir propriedade corretiva da acidez do solo semelhante à do calcário (Prado; Fernandes, 2001). Contudo, no Brasil ainda pouco se utiliza a escória na agricultura, mesmo com a redução das reservas naturais de nutrientes e os altos custos de fertilizantes e corretivos (Prezotti; Martins, 2012).

O silício na crosta terrestre somente é superado pelo oxigênio, fazendo parte da composição da maioria dos minerais, estando praticamente em todos os tipos de solos (Silva; Bohnen, 2001). O Si não é considerado um elemento essencial a vida das plantas, apesar de muitos trabalhos demonstrarem a sua importância para diversas culturas como um elemento útil e potencializador. O emprego de escórias de siderurgia, com a finalidade de adubação silicatada, aumenta a absorção dos nutrientes essenciais, proporciona a tolerância ou resistência das plantas ao ataque de pragas, reduz a transpiração e melhora a fotossíntese (Ma; Yamaji, 2006).

A composição da escória varia em decorrência da constituição química da matéria-prima e dos diferentes processos siderúrgicos. Portanto, a caracterização química dos diferentes tipos de escórias oriundas do processo siderúrgico, constitui-se como a primeira informação mais importante à definição de sua correta indicação, seja como material corretivo alternativo, seja como fertilizante silicatado, auxiliando, nos dois casos, na melhoria da fertilidade do solo e consequente aumento da produtividade vegetal. No Pará são escassos os trabalhos a respeito do aproveitamento de resíduos de siderúrgicas como insumo agrícola (Brasil; Nascimento, 2019), o que ensejou o desenvolvimento desta pesquisa.

O presente estudo, num primeiro momento, teve como objetivo caracterizar a composição química de três tipos de escórias de siderurgia produzidas por uma siderúrgica no município de Marabá / PA, visando à melhor destinação dos resíduos industriais para utilização na agricultura como corretivo de acidez e, ou como fertilizante silicatado, que será utilizado no próximo trabalho.

2.1.1 Metodologia

Após contato prévio com as siderúrgicas do polo siderúrgico da cidade de Marabá / PA, foi efetuada uma visita técnica a maior siderúrgica da região que beneficiava o minério de ferro extraído do município de Parauapebas / PA, que é localizado na maior província mineral do mundo; Serra dos Carajás, notadamente no que diz respeito a extração de ferro. Esta usina siderúrgica apresentava a chamada produção integrada, na qual o processo siderúrgico é constituído pelas três etapas (redução, refino/aciaria e conformação: lingotamento, laminação e trefilação). Destas etapas no processo de produção, coletou-se amostra de escória oriunda de 1 – Alto Forno; onde ocorre a transformação do minério de Fe em ferro gusa, amostra de escória oriunda de 2 – Forno Elétrico; onde ocorre a mistura do ferro gusa, sucata de ferro e cal e amostra de escória oriunda de 3 - Forno de Panela; cuja função no refino é a de baixar o teor impurezas.

O ferro gusa é um tipo de ferro fundido produzido a partir de minério de ferro em equipamento chamado de alto forno. Na Figura 1 é possível observar de forma simplificada o vazamento de escória, que é o principal resíduo gerado durante o processo de produção de ferro-gusa. Pela sua insolubilidade e menor densidade, a escória sobrenada no ferro gusa é conduzida por canais até lugar próprio de resfriamento. Esta escória é resultado da mistura de ganga do minério (SiO_2 , Al_2O_3), fundentes (CaO , MgO) e cinzas do carvão vegetal, o que proporciona elevados teores de sílica (SiO_2) e de óxido de cálcio (CaO), além de óxidos de alumínio (Al_2O_3), de magnésio (MgO) e de ferro (FeO) (Brasil; Nascimento, 2019).

Figura 1. Aspecto geral do processamento de minério de ferro a ferro gusa (A), vazamento de escória como resíduo (B), resfriamento do resíduo (C) e apresentação da escória britada e peneirada (D), oriunda de siderúrgica da região de Marabá / PA

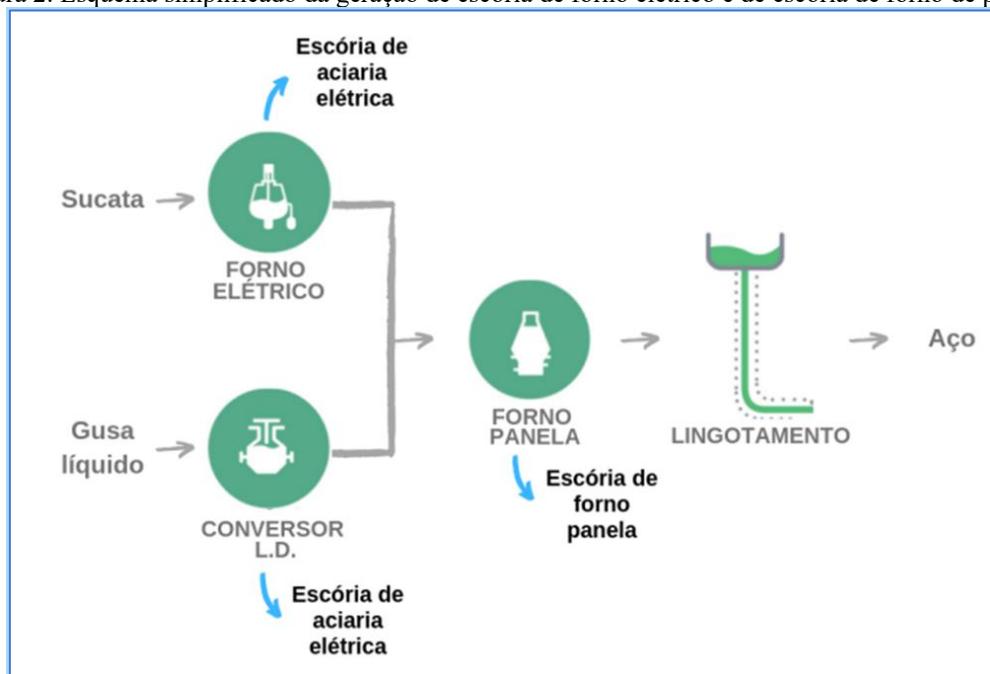


Fonte: Elaborado pelos autores em visita técnica a siderúrgica para coleta de amostras de escória.

Observa-se na Figura 2, o esquema simplificado de beneficiamento de uma siderúrgica com produção integrada, imediatamente após ao processamento de alto forno visto na Figura 1. Numa sequência lógica tem-se o chamado forno a arco elétrico e a aciaria à oxigênio, cujas funções básicas destes equipamentos são de transformar o ferro gusa e sucatas em aço líquido, gerando como subproduto a chamada escória de aciaria ou de forno elétrico. Dando seguimento ao processamento industrial integrado, tem-se o forno de panela, que faz a interface entre a fusão e o lingotamento, gerando também um outro subproduto denominado de escória de forno de panela. A escória de forno panela, também é conhecida por escória de refino redutor, cuja geração se dá a partir da adição de desoxidantes e de cal, para a eliminação do oxigênio e do enxofre do aço líquido e o ajuste da composição do aço, pela adição de ferroligas (Mendes, 2016). Essas três escórias supracitadas são

vazadas em um pátio e, ou descarregada em locais onde possa resfria e solidificar em forma cristalina, para posterior britagem. Ressalta-se que as escórias de refino oxidante e redutor, como é o caso da escória de forno de panela, diferem das escórias de redução, oriundas de alto-forno, porque participamativamente do processo, enquanto que as últimas incorporam as impurezas (Geyer, 2001).

Figura 2. Esquema simplificado da geração de escória de forno elétrico e de escória de forno de panela



Fonte: Apresentado por Geyer (2001).

A primeira caracterização da composição química das escórias oriundas dos diferentes processos siderúrgicos (1 – Alto Forno; 2 – Forno Elétrico; e 3 - Forno de Panela), foram realizadas a partir de uma média histórica de determinações quanto aos teores de SiO₂, CaO, MgO, NaO, K₂O, NaO, P₂O₅, S, FeO, Al₂O₃, MnO, TiO, V₂O₅, F e Cr₂O₃, feitas e fornecidas pela própria empresa siderúrgica. A mesma, como prática rotineira, já realiza algumas determinações dos elementos acima, por meio de leituras diárias, utilizando um espectrofotômetro de absorção atômica. No presente trabalho estes dados foram processados, determinando-se as concentrações médias percentuais dos elementos contidos nos resíduos siderúrgicos, assim como os seus desvios padrões e o coeficiente de variação.

Durante a visita técnica, além dos dados obtidos com a própria siderúrgica, foram coletas amostras das três escórias após resfriamento e britagem. No pátio da empresa, para cada monte de escória específica, foram retirados no meio dos montes, cinco pontos diferentes de coletas (amostras simples), que juntas e misturadas formaram as amostras compostas referentes a cada uma das escórias estudadas. As mesmas antes de serem encaminhadas para as análises laboratoriais, foram somente peneiradas através de uma peneira com malha de 2,0 mm (ABNT nº.10 Mesh), seguindo metodologia descrita pela (Embrapa, 1999), para que as escórias atingissem granulometria semelhante à dos corretivos agrícolas Comerciais (Brasil, 2006), e que pudessem sofrer determinação de silício

(Korndörfer et al., 2004). Assim, após tamisação, as amostras coletadas foram adequadamente embaladas, e encaminhadas para serem efetuadas algumas determinações.

No laboratório de fertilizantes e corretivos pertencente a Faculdade de Ciências Agrárias (FCA), da Universidade Estadual de São Paulo (UNESP), Câmpus de Botucatu / SP, foram efetuadas as análises granulométricas e as análises químicas de reação alcalina nas escórias. Determinou-se a taxa de reatividade (RE), baseado na granulometria das partículas, seu poder de neutralização (PN), baseado na pureza química do material originário, e calculou-se o poder relativo de neutralização total (PRNT), que é resultado da multiplicação entre RE x PN, dividido por 100. Para o calcário, o PRNT constitui-se num índice a ser utilizado na determinar da quantidade de corretivo a ser aplicado no solo para redução da acidez.

Paralelamente, as amostras também foram enviadas ao Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura do Museu Paraense Emílio Goeldi (MPEG), para obtenção das eletromicrografias e realização das microanálises por Espectroscopia de Raios X por Dispersão de Energia (EDS- Energy Dispersive Spectroscopy). Neste caso, para a microanálise espectroscópica de raios-x por dispersão energia (EDS) e obtenção das eletromicrografias, as amostras foram aderidas sobre suportes metálicos através de fita de carbono dupla face. As microanálises foram feitas com detector de raios-X Gresham de Si (Li), modelo Sirius 10/7.5, com resolução de 133 eV e janela Be, processador de sinal digital Q-500 e software próprio IXRF, acoplado ao microscópio eletrônico de varredura (MEV) modelo LEO 1450 VP. Foi utilizado aceleração eletrônica e distância de trabalho de 20 Kv e 15mm, respectivamente. As eletromicrografias foram obtidas no mesmo MEV, operando com as mesmas condições das análises por EDS. Foram avaliados 5 pontos de 5 amostras para cada uma das três escórias.

2.1.2 Resultados e Discussão

No Quadro 1, encontram-se apresentados os resultados das características químicas das escórias de siderurgia, determinadas pela própria empresa siderúrgica, a partir de uma média histórica de análises, visando identificar seus potenciais para aproveitamento destes resíduos industriais. Neste aspecto, no Brasil, ainda há muita resistência quanto ao aproveitamento dos resíduos industriais, apesar da Lei nº 12.305/2010, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos versar sobre a prevenção e a redução na geração de resíduos sólidos, tendo como alternativa um conjunto de instrumentos que permitem o aumento da reciclagem e da reutilização desses resíduos (Brasil; Nascimento, 2019).

Quadro 1. Caracterização química das escórias de siderurgia, oriundas de alto forno, forno elétrico e forno de panela, obtidas de uma usina siderúrgica que apresentava produção integrada da região de Marabá / PA

	SiO₂	CaO	MgO	K₂O	NaO	P₂O₅	S
%							
	<i>Escória de Alto Forno ⁽¹⁾</i>						
Média	41,44	25,86	4,15	3,82	0,33	3,06	0,09
DP*	1,20	2,33	1,10	1,38	0,02	0,98	0,02
CV (%)	2,90	9,02	26,59	36,22	6,46	31,94	18,55

(1) Série histórica de 21 observações						
	Escória de Forno Elétrico (2)					
Média	30,40	48,76	8,96	0,03	0,03	9,41
DP*	4,94	8,91	1,91	0,02	0,04	8,15
CV (%)	16,25	18,28	21,33	74,49	151,69	86,65
(2) Série histórica de 87 observações						
	Escória de Forno de Panela (3)					
Média	17,97	24,07	9,16	0,07	0,13	0,28
DP*	2,65	2,87	1,35	0,03	0,06	0,05
CV (%)	14,73	11,93	14,77	46,12	43,23	18,44
(3) Série histórica de 203 observações						
FeO	Al ₂ O ₃	MnO	V ₂ O ₅	TiO	F	Cr ₂ O ₃
			%			
Escória de Alto Forno (1)						
Média	0,20	18,53	4,11	0,18	0,70	-
DP*	0,27	1,33	0,89	0,00	0,05	-
CV (%)	135,54	7,19	21,75	2,29	7,83	-
(1) Série histórica de 21 observações						
	Escória de Forno Elétrico (2)					
Média	4,91	4,24	3,06	0,18	0,36	0,21
DP*	8,84	1,21	3,13	0,01	0,12	0,51
CV (%)	179,91	28,47	102,43	5,80	32,51	244,4
(2) Série histórica de 87 observações						
	Escória de Forno de Panela (3)					
Média	43,92	4,18	4,59	0,22	0,70	0,83
DP*	7,12	0,66	0,49	0,00	0,09	0,28
CV (%)	16,21	15,74	10,68	1,65	13,15	33,76
(3) Série histórica de 203 observações						

*Desvio-Padrão, considerando-se nível de significância de 5%

Fonte: Elaborado pelos autores com base nos dados históricos fornecidos pela empresa siderúrgica estudada, num período sequencial de aproximadamente 2 meses de análises das escórias vasadas durante o processo produtivo industrial

A reutilização de resíduos, como os apresentados no Quadro 1 são, sem dúvida, fundamentais, seja do ponto de vista econômico ou ambiental e, muitas vezes, social (Sobral et al., 2011), pois diariamente diferentes escórias são descartadas na forma de resíduos sólidos nos pátios das siderúrgicas sem destinação pré-definida. Este problema ambiental poderia ser amenizado com parte de sua destinação para utilização na agricultura, como corretivo da acidez dos solos e, ou fornecedor nutrientes às plantas, notadamente o silício, desde que sejam avaliados os riscos de contaminação que podem causar.

A caracterização química desses resíduos pode dar uma ideia da possibilidade de contaminação dos solos (Quadro 1), onde poucos trabalhos de pesquisa no Brasil, por exemplo, avaliaram a biodisponibilidade de metais pesados pela aplicação de escória ao solo (Brasil; Nascimento, 2019). Nas três escórias caracterizadas no estudo, o ferro (Fe) e o manganês (Mn) apresentaram baixas concentrações disponíveis na forma óxidos para poderem causar problemas como metais pesados (Quadro 1). Alguns trabalhos com escória de aciaria têm apresentado resultados que indicam concentrações de metais pesados abaixo dos níveis estabelecidos pela legislação. Mesmo com a aplicação de uma alta dose de escória no solo ($4,0 \text{ t ha}^{-1}$) (Coelho, 2013), verificou apenas traços dos elementos Fe e Mn no solo, o que não se constituiu em contaminação. Deve-se lembrar que estes metais pesados (Fe e Mn), quando atendem em termos de quantidade disponível aos critérios de

essencialidade à nutrição de plantas, passam a atuar como micronutrientes, ou seja, elementos essenciais a vida das plantas, mas em pequenas quantidades.

O cromo (Cr), um outro metal pesado, não foi sequer identificado como elemento traço nas três escórias analisadas (Quadro 1), não sendo problema. Da mesma forma, não foi constado a presença de flúor (F) nas escórias de siderurgia (Quadro 1), um ametal que pode causar fitotoxicidade em concentrações excessivas. Outros elementos traços que poderiam causar potencial preocupação, como o sódio (Na), o vanádio (V) e o titânio (Ti), também apresentaram baixas quantidades (Quadro 1), não sendo considerados perigosos aos sistemas terrestres (Coelho, 2013). Todos os elementos traços identificados no Quadro 1, estão presentes em concentrações relativamente baixas, os quais nos solos, em vegetais e nas águas podem ou não serem essenciais para o crescimento e desenvolvimentos de plantas e animais.

Considerando também o potencial das escórias de siderurgia como fornecedoras de macronutrientes, elementos essenciais a vida exigidos em maior quantidade para as plantas, no Quadro 1 as escórias apresentaram valores muito baixos de fósforo (P_2O_5), potássio (K_2O) e enxofre (S), não se caracterizando como um material com potencial para o suprimento desses nutrientes para as plantas, assim como relatado por (Coelho, 2013). Por outro lado, os resíduos apresentam concentrações relativamente altas de cálcio (Ca) sendo, em maior quantidade para a escória de alto forno e para a escória de forno elétrico, respectivamente (Quadro 1). Já o magnésio (Mg) (Quadro 1), apresentou valores bem menos expressivos do que os de Ca. As concentrações de Mg foram semelhantes entre a escória de forno elétrico (8,96) e a escória de forno de panela (9,16), onde se forem apresentados os valores arredondados, sem as casas decimais, não haveria diferença. Estes valores superam mais do que o dobro do valor constatado para a escória de alto forno (4,15).

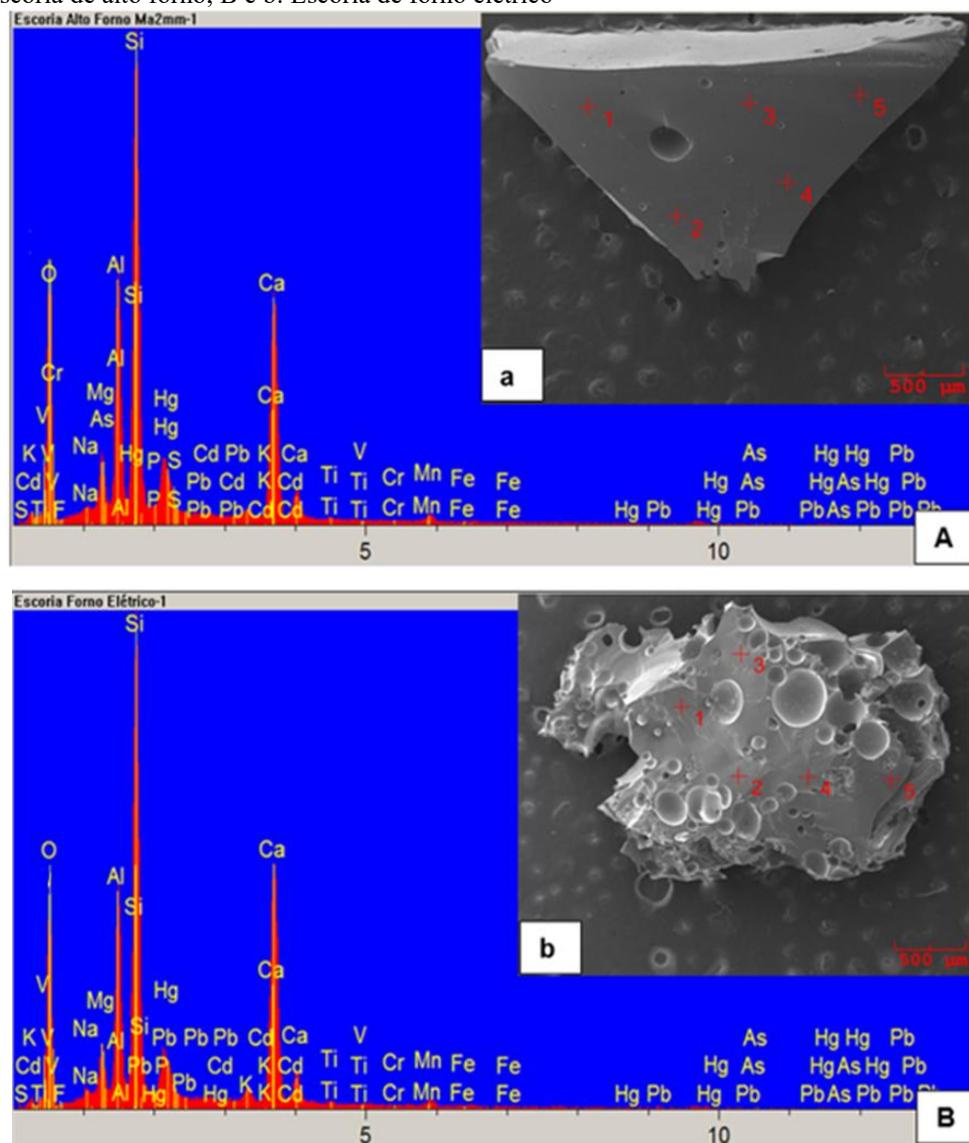
O silício, na forma de dióxido de silício (SiO_2), também foi identificado em altas concentrações nos resíduos, com maior destaque, em ordem decrescente, nas escórias de alto forno, forno elétrico e forno de panela, estando este último com menos da metade de Si do que a escória de alto forno que apresentou a maior quantidade (Quadro 1). Estas altas concentrações de SiO_2 total observados nas escórias, indicando a possibilidade de os resíduos poderem ser utilizados como fontes de Si para as plantas. O Si, apesar de não ser classificado como elemento essencial a vida dos vegetais, tem um importante papel nas relações planta-ambiente, pois pode proporcionar a determinadas culturas melhores condições para suportar adversidades climáticas, edáficas e biológicas, tendo como resultado final um aumento e maior qualidade na produção (Ma; Yamaji, 2006). Estresses causados por temperaturas extremas, veranicos, metais pesados ou tóxicos, por exemplo, podem ter seus efeitos reduzidos com o uso do Si. Benefícios do uso do Si se manifestam não apenas em plantas conhecidas como acumuladoras (arroz, cana e pastagem), mas também em plantas não acumuladoras, como tomate e plantas da vegetação do Cerrado (Brasil; Nascimento, 2019).

Por apresentar constituintes neutralizantes da acidez do solo e bases como cálcio (Ca), magnésio (Mg) e silício (Si) (Tabela 1), as escórias possuem potencial de uso agrícola como alternativa ao calcário, especialmente em regiões que possuem poucas jazidas de calcário agrícola em exploração, como é o caso do estado do Pará (Vidal; Prado, 2011), ou quando a maior parte do calcário extraído é destinado à fabricação de cimento (Correa Neto et al., 2024). Além das características corretivas de acidez, pela composição química da escória, os altos teores de SiO₂ verificados, também denotam a capacidade de fornecimento de Si para os vegetais (Quadro 1). Todavia, como o parque siderúrgico de Marabá no Pará, na sua maioria, é constituído por usinas não integradas, onde o processo de fabricação consta apenas de uma etapa, notadamente a fabricação de ferro gusa, há uma maior disponibilidade de escória oriunda de Alto Forno.

Portanto, pela sua maior disponibilidade e pelas suas características químicas apresentadas, como maior concentração de SiO₂ e a segunda maior concentração de CaO, a escória de alto forno foi selecionada para melhor avaliação da sua potencialidade não só como fertilizante silicatado, mas também como corretivo de acidez dos solos. Também, o presente trabalho aprofunda as avaliações para a escória de forno elétrico, pelo seu maior conteúdo de CaO e segundo maior conteúdo de SiO₂. A escória de forno de panela, por apresentar um menor volume disponível na região e com a menor concentração de Si (Quadro 1), não foi considerada nas análises para avaliar seu potencial para correção de acidez dos solos. É sabido que naturalmente a escória de forno de panela, pelo fato de ter a função de refino, apenas baixa a concentração de impurezas daquilo que já foi processado anteriormente no forno elétrico, justificando alguns de seus menores valores apresentados (Quadro 1).

Com as microanálises espectroscópicas de raios-x por dispersão de energia (EDS) e obtenção das eletromicrografias das duas escórias selecionadas para estas análises, é possível verificar na Figura 3, que os maiores picos de absorbância foram para o Si, Ca e Al, respectivamente, os quais correspondem às elevadas concentrações médias destes elementos também detectados nas amostras analisadas pela empresa siderúrgica (Quadro 1). Os elevados picos de oxigênio (O) indicam que os elementos estão na forma de óxidos. Ressalta-se que a absorbância é diretamente proporcional à concentração. Assim sendo, isto justifica o porquê dos resultados apresentados na Figura 3 corroborarem aos observados no Quadro 1, quanto a concentração dos elementos contidos nas escórias de alto forno e de forno elétrico. Os espectros e as eletromicrografias de varredura são referentes ao ponto 1 das amostras 1 (Figura 3).

Figura 3. Espectros das análises por EDS (A-B) com as respectivas eletromicrografias de varredura (a-b) das escórias de siderurgia. A e a: Escória de alto forno; B e b: Escória de forno elétrico



Fonte: Elaborado pelos autores com base nos resultados originais da pesquisa

As maiores concentrações de silício encontradas na escória de alto forno e na escória de forno elétrico (Figura 3), respectivamente, caracterizam estes materiais como de alto potencial para utilização como adubo silicatado. Desta forma, considerando a Instrução Normativa nº 5, de 23 de fevereiro de 2007 (Brasil, 2007a), as duas escórias avaliadas, por apresentarem concentrações de Si e Ca totais superiores a 10% (Quadro 1), podem ser classificadas como fertilizantes de escórias silicatadas, apresentando também características de corretivo da acidez do solo, que precisam serem melhores estudadas. Contudo, a associação destes benefícios não pode pôr em risco a qualidade ambiental, mais especificamente a do solo. Como observado no Quadro 1 e Figura 3, há também consideráveis concentrações de Al_2O_3 (óxido de alumínio), que não devem ser negligenciadas, principalmente em solos tropicais onde predominam na fração argila, pois quanto há a formação de Al^{3+} , o mesmo é tóxico às raízes das plantas e fonte geradora de acidez na forma de íons H^+ produzidos.

Como parâmetro de referência para outros produtos corretivos, além do calcário agrícola, é feita a análise da soma de óxidos de Ca e Mg ($\text{CaO} + \text{MgO}$), sendo possível inferir se um resíduo da indústria siderúrgica apresenta propriedades químicas para utilização como material de correção da acidez dos solos. Neste sentido, verifica-se no Quadro 1 que somente a escória de forno elétrico apresentou somatória de Ca + Mg igual a 57,72%, acima da exigência mínima de 38% estabelecida pela legislação brasileira de corretivos (Brasil, 2007b). A maior concentração de óxido de cálcio e da soma de $\text{CaO} + \text{MgO}$ apresentado pela escória oriunda de forno elétrico provavelmente deve-se ao fato de que neste forno, para o processo de fusão, em cada 1 tonelada de ferro-gusa e sucata de ferro, são utilizados, aproximadamente, 40 kg de cal, responsável pela formação da escória na captação das impurezas neste banho. A escória de alto forno, com $\text{CaO} + \text{MgO}$ igual a 30,01% e a escória de forno de panela igual a 33,23%, apesar de indicarem um bom potencial para correção da acidez dos solos, por estes valores abaixo dos 38%, limitariam os registros destes resíduos no Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), como corretivos da acidez do solo, alternativos ao uso do calcário agrícola.

A reação de neutralização da acidez do solo proporcionada pela aplicação da escória ocorre pela dissociação do CaSiO_3 e do MgSiO_3 em Ca, Mg e SiO_3 . O silicato de cálcio é 6,78 vezes mais solúvel que o carbonato de cálcio, presente nos calcários (Alcarde, 1992). O SiO_3 é quem reage com o H^+ da solução do solo formando H_4SiO_4 , reduzindo assim sua acidez. Assim como o calcário, a reatividade da escória varia conforme a sua granulometria em contato com o solo (Prezotti; Martins, 2012). Desta forma, efetuou-se a analise granulométrica das escórias de alto forno e de forno elétrico (Quadro 2), da mesma forma como é feito para o calcário. Foram analisandas as porcentagens das partículas das escórias passantes em três peneiras (ABNT nº 10, 20 e 50 Mesh), utilizadas em comparação ao que a legislação em vigor exige para o calcário agrícola (Brasil, 2007b). As duas escórias selecionadas obtiveram mais de 95% de suas partículas passando através da peneira de número 10 (2 mm) (Quadro 2). Somente a escória de alto forno apresentou acima de 70% de partículas passantes na peneira de número 20 (0,84 mm), como preconiza a legislação para o calcário. Contudo, o último critério granulométrico não foi atendido para nenhuma das escórias, que era a necessidade de ter no mínimo 50% das partículas passantes na peneira de número 50 (0,30 mm). Estas partículas de granulometria inferior a 0,30 mm caracterizariam para o calcário uma taxa de reatividade igual a 100 num curto período de 3 meses de reação no solo.

Quadro 2. Porcentagem de partículas passantes em peneiras utilizadas nas determinações da reatividade, poder de neutralização e poder relativo de neutralização total, para caracterização de material corretivo da acidez dos solos das escórias de siderurgia, oriundas de alto forno e forno elétrico obtidas de uma usina siderúrgica da região de Marabá / PA

Amostra	% passante nas Peneiras*			**Resultados em %		
	Pen 10	Pen 20	Pen 50	RE	PN	PRNT
Escória de Alto Forno	99,97	78,07	40,77	67,53	50,00	34,00
Escória de Forno Elétrico	99,98	69,90	34,07	61,58	52,00	32,00

*Material passado em três peneiras de granulometrias diferentes; ABNT nº 10 Mesh = 2,0 mm; ABNT nº 20 Mesh = 0,84 mm; e ABNT nº 50 Mesh = 0,30 mm

** RE = reatividade; PN = poder de neutralização; e PRNT = Poder Relativo de Neutralização Total.

Fonte: Elaborado pelos autores com base nos resultados originais da pesquisa

A legislação atual (Brasil, 2006), também exige como parâmetros de referência para classificar resíduos sólidos industriais como outros corretivos de acidez, além do calcário, valores mínimos de poder relativo de neutralização - PN de 67% e de poder relativo de neutralização total - PRNT de 45%, para seu uso como corretivo de solo. Para as duas escórias analisadas (Quadro 2), verifica-se que os valores de PN são menores do que 67% e os de PRNT são inferiores a 45%, não atendendo aos padrões determinados pela legislação (Brasil, 2006). Embora as garantias mínimas não tenham sido atendidas (Tabela 2), os valores de PN (poder de neutralização em % de CaCO₃ equivalente) foram acima de 50% e, o PRNT foram acima de 32%, para os dois resíduos, indicam que as escórias apresentam elevado potencial de correção da acidez do solo, mesmo não podendo obter registro do Mapa para comercialização como produto corretivo.

No contexto supracitado, é possível de forma industrial fazer ajustes no resíduo escória de siderurgia para que se tenha um produto com os parâmetros necessários atualmente exigidos para ser classificado como material corretivo da acidez dos solos. Como o PRNT é oriundo da multiplicação do PN pela reatividade - RE do corretivo, dividido por 100 (Quadro 2), seria possível somente mexer com a RE das escórias (grau de finura), no que trata diretamente da sua granulometria. Já o PN, como diz respeito a pureza química do material de origem, não podendo ser alterado sem aditivação química.

Assim, antes das análises efetuadas, como os vazamentos de escórias siderúrgicas aqui estudadas, após resfriamento, passaram somente por britagem em moinho de martelo e tamisação em peneira de 2 mm (ABNT nº 10 Mesh), novos estudos poderiam ser realizados aumentando o grau de moagem destes materiais, principalmente com a utilização de moinhos de bola que teriam a capacidade de aumentar o grau de finura e consequentemente elevar a percentagem de partículas passantes na peneira de 0,30 mm (ABNT nº 50 Mesh), havendo a elevação da RE próximo a 100%. O aumento da RE até uma granulometria adequada permitirá também a elevação dos valores de PRNT acima de 45% que é o mínimo exigido para aceitar as escórias como material corretivo da acidez dos solos, como um calcário agrícola. Com uma maior moagem caberia a realização de novas análises de caracterização química das escórias de siderurgia quanto a disponibilidade de SiO₂, CaO e MgO. Além disto, estudos

para identificar teores de resíduos insolúveis (RI = 12% a 41%) seria importante pois podem limitar a obtenção de valores mais elevados de PN e PRNT, respectivamente.

A possibilidade de uso das escórias como corretivo e fertilizante ganha destaque com a ampliação crescente do parque siderúrgico e com as maiores dificuldades de aquisição de calcários e fertilizantes em virtude dos preços dos produtos acrescidos do frete (Sousa et al., 2025). A tendência atual, todavia, é de se tornar cada vez mais difícil e onerosa para o agricultor a obtenção de calcário, em virtude de sua utilização em setores industriais mais lucrativos, como na fabricação de cimento (Correa Neto et al., 2024). Em regiões onde a ocorrência de jazidas de calcário é reduzida, a utilização de escórias na agricultura representa uma forma muito interessante de aproveitamento desse resíduo, que poderia ser usado como corretivo de acidez do solo e fonte de cálcio, magnésio e silício para as culturas (Brasil; Nascimento, 2019). Portanto, o uso de fontes alternativas de materiais que apresentam qualidade corretiva da acidez e fertilizante e que muitas vezes estão entulhados nos pátios das siderúrgicas pode ser uma solução não só para seu descarte, no caso das indústrias, mas também no sentido de redução dos custos da produção agrícola (Coelho, 2013).

2.2 RESPOSTAS MORFOFISIOLÓGICAS DE UROCHLOA BRIZANTHA CV. XARAÉS APÓS APLICAÇÃO DE ESCÓRIA DE SIDERURGIA

É crescente a atividade siderúrgica no Brasil, estando o país entre os maiores produtores mundiais de Fe, o que tem gerado mais de 6,25 milhões de toneladas de escórias a cada ano, as quais, muitas vezes, ficam acumuladas nos pátios das siderúrgicas (Pereira et al., 2010; Sobral et al., 2011). O município de Parauapebas (PA) encontra-se localizado na maior província mineral do mundo (Serra dos Carajás), notadamente no que diz respeito a extração de Fe. Assim, os resíduos da indústria do Fe e do aço, obtidos por diferentes processos, são facilmente encontrados nas siderúrgicas da região, principalmente no município de Marabá no sudeste do estado do Pará, onde se localiza o polo siderúrgico.

Na produção de ferro gusa em alto forno e de aço em forno de aciaria, as escórias são resultantes de processamento em altas temperaturas (acima de 1400°C), quando a sílica presente como impureza do minério ferroso reage com o calcário a ele adicionado como fundente (Sousa et al., 2010), gerando constituintes neutralizantes a base de Ca e Mg (silicatos de Ca e Mg), além do próprio Si que pode ser utilizado como fertilizante. Assim, as escórias de siderurgia são as fontes mais baratas e abundantes de silicatos (Stocco et al., 2010), já sendo usadas como corretivos de acidez nos Estados Unidos e Japão, também apresentando aumento na disponibilidade de Si e outros elementos (Pereira et al., 2010). O aproveitamento sustentável de um subproduto da indústria, cujo destino seria incerto, representa um benefício socioeconômico, minimizando o passivo ambiental gerado pelo acúmulo das escórias nas siderúrgicas, além de promover o desenvolvimento regional.

Depois da mineração, a pecuária vem como a segunda maior atividade econômica no sudeste do Pará. Todavia, a maioria da produção animal é realizada em sistemas extensivos, sendo as gramíneas mais cultivadas, as da espécie *Urochloa brizantha*, assentadas em solos de baixa fertilidade (Latossolos e Argissolos). O Brasil possui cerca de 100 milhões de hectares de pastagens cultivadas, muitas já com mais de 10 anos de pastejo, apresentando 60% em avançando estádio de degradação (Sávio et al., 2011). A escória constitui-se uma alternativa, pois, o acúmulo foliar de Si em gramíneas atenua os efeitos tóxicos do Al, Mn e Fe, formando uma barreira física para a redução da transpiração, promovendo resistência ao ataque de pragas e doenças (Faria et al., 2008; Sousa et al., 2010), além de proporcionar folhas mais eretas, aumentando a eficiência fotossintética quanto a captação de luz (Crusciol, 2006), evitando assim a degradação precoce e garantindo a perenidade dos pastos.

Existem alguns trabalhos que tratam do uso da escória apenas como corretivo de acidez e sua relação com a resposta das gramíneas, porém são escassos os que relatam o uso de silicatos como fonte de Si para as gramíneas forrageiras (Stocco et al., 2010). Diversos estudos têm demonstrado que as gramíneas respondem favoravelmente para a adubação silicatada, particularmente quando cultivada em solos com baixos teores de Si disponível (Sousa et al., 2010), apesar de que na região tropical, não existem informações bem definidas quanto aos níveis críticos de Si no solo e na planta (Faria et al., 2008). Mesmo dispondendo-se de poucos resultados experimentais, principalmente para as gramíneas forrageiras, as escórias vêm sendo empregadas tanto para a correção de acidez, como no fornecimento de Si. Neste contexto, os vegetais podem ser classificados quanto a absorção de Si em acumuladores, intermediários e não acumuladores. As gramíneas em geral são reconhecidas como acumuladoras de Si, a exemplo de *U. brizantha* (Sávio et al., 2011), devendo-se melhor estudar esta estratégia de acúmulo.

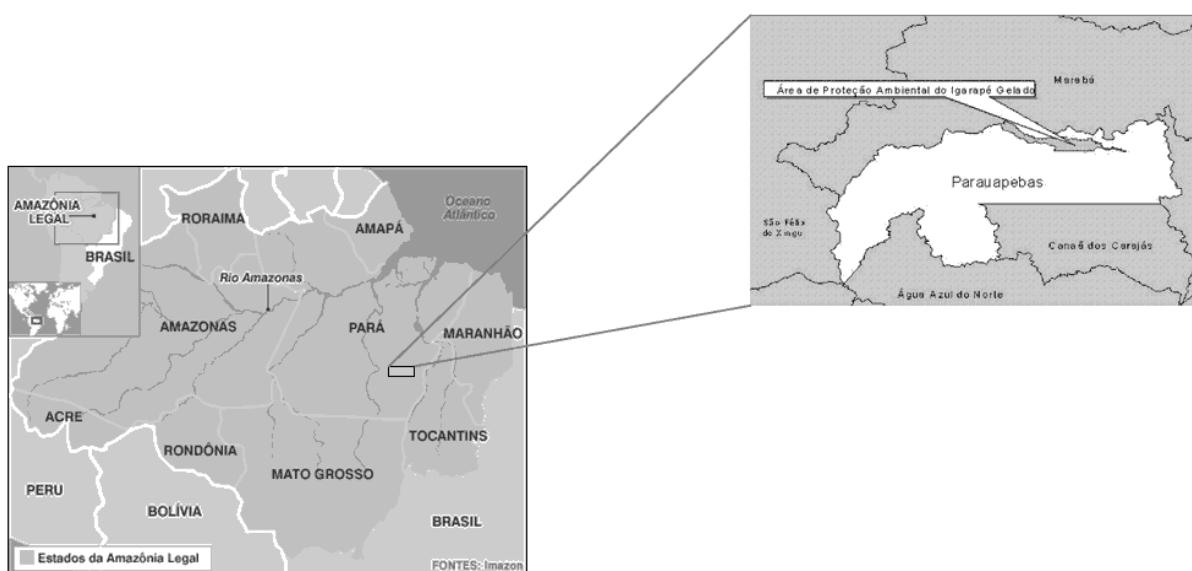
A sílica é um polímero amorfo de dióxido de silício hidratado ($\text{SiO}_2 \cdot \text{nH}_2\text{O}$), ocorrendo nas estruturas foliares sob a forma de incrustações minerais opalinas chamadas de corpos silicosos (Tomlinson, 1961). A presença e diversidade estrutural dos corpos de sílica são bem documentados em diferentes famílias vegetais, apesar de se questionar quais os mecanismos fisiológicos que os formam (Silva; Potiguara, 2009). Embora o acúmulo de sílica em gramíneas seja um fenômeno relativamente conhecido em condições naturais, sem a fertilização com escória, a quantificação de corpos silicosos e os teores de Si em tricomas, das partes aéreas das gramíneas forrageiras, em função da maior disponibilidade de Si no solo, não é conhecido, principalmente quando se trata de *U. brizantha* cv. Xaraés. Os tricomas participam de inúmeros mecanismos fisiológicos vegetais (Potiguara et al., 2013), devendo-se investigar o grau de participação na estratégia de acúmulo de Si nos tecidos foliares. Essas informações poderão auxiliar na explicação de qual é a relação da sílica biogênica nas plantas e suas funções no vegetal.

O presente trabalho objetivou avaliar os efeitos da aplicação de escória de siderurgia de alto forno na quantidade de corpos silicosos e no teor de Si dos tricomas da lâmina foliar de *Urochloa brizantha* cv. Xaraés, visando contribuir com a identificação das estratégias de acúmulo de Si via foliar.

2.2.1 Metodologia

O trabalho foi realizado em propriedade rural, com atividade de pecuária leiteira de produtores assentados na Área de Proteção Ambiental do Igarapé Gelado – APA, com 21.600 ha e perímetro de 141,8 km (Figura 4). A área experimental ficou localizada no sudeste do estado do Pará, no cruzamento do Igarapé Gelado com a Estrada de Ferro Carajás – EFC, de coordenadas geográficas iguais a latitude 06° 00' 10" S e longitude 49° 57' 43" W, distante 30 km do município de Parauapebas (PA).

Figura 4. Localização da Área de Proteção Ambiental do Igarapé Gelado.



Fonte: Imazon (2011).

O local é classificado como zona de Floresta Amazônica, com média de chuva em torno de 1.700 a 2.000 mm ano⁻¹ que concentra entre novembro a abril (70%). As temperaturas médias anuais são elevadas e em geral maiores que 23°C. A umidade relativa média é de aproximadamente 70% nos meses mais secos. O relevo é classificado em 8% como plano a suave ondulado. O experimento foi conduzido em Argissolo (EMBRAPA, 2013), que apresentava fertilidade, na profundidade de 0 - 0,20 m, igual a: pH (H₂O) = 5,40; P (Mehlich-1) = 3,58 mg dm⁻³; Na = 5,95 mmol_c dm⁻³; K⁺ (Mehlich⁻¹) = 93,00 mmol_c dm⁻³; Ca²⁺ (KCl 1 mol L⁻¹) = 21,67 mmol_c dm⁻³; Mg⁺² (KCl 1 mol L⁻¹) = 7,83 mmol_c dm⁻³; H+Al (Ca(OAc)₂ 0,5 mol L⁻¹) = 35,08 mmol_c dm⁻³; soma da bases trocáveis (SB) = 128,45 mmol_c dm⁻³; CTCtotal = 163,53 mmol_c dm⁻³ e saturação por bases (V%) = 78,55%.

O delineamento experimental empregado foi o de blocos ao acaso com quatro repetições. As parcelas, de 6 m de largura e 8 m de comprimento, foram constituídas pelos tratamentos: 1- sem

aplicação de escória; 2- 200 kg de escória ha^{-1} ; 3- 400 kg ha^{-1} e 4- 600 kg ha^{-1} . A escória de alto forno foi selecionada para ser empregada como fertilizante silicatado no presente experimento pela sua maior disponibilidade e característica química, como 41% de SiO_2 , 26% de CaO e 4% MgO . A escória de alto forno foi passada em peneira com malha de 2,0 mm (ABNT nº.10) para atingir granulometria semelhante aos corretivos e fertilizantes comerciais.

Amostras peneiradas de escória de alto forno foram embaladas e encaminhadas ao Laboratório de Fertilizantes e Corretivos da Faculdade de Ciências Agrárias da UNESP / Botucatu (SP) para a determinação do teor de umidade (5,40%), reatividade - RE (67,53%), poder de neutralização - PN (50,00%) e poder relativo de neutralização total - PRNT (34,00%). Em seguida, a amostra coletada da escória de alto forno foi enviada ao Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura do Museu Paraense Emílio Goeldi, para obtenção das eletromicrografias e realização das microanálises por Espectroscopia de Raios-X por Dispersão de Energia (EDS- Energy Dispersive Spectroscopy).

A aplicação da escória ocorreu de forma manual e em cobertura sobre o solo, no início do período chuvoso, após o rebaixamento do pasto, pelo pastejo controlado com vacas leiteiras, até atingir a altura ideal para a *U. brizantha*, que foi entre 0,25 a 0,35 m. Após a aplicação dos tratamentos (doses de escória), durante um período de 3 meses (em pleno período chuvoso), a área ficou vedada ao acesso de animais bovinos, até que a pastagem se encontrasse próxima ao ponto ótimo de corte, coincidindo produção de massa seca e valor nutritivo. Nesse estádio, anterior ao início do florescimento, foi efetivamente avaliado o efeito da adubação silicatada realizada, para posteriormente haver um novo rebaixamento do pasto.

As análises foram feitas com folhas jovens e adultas ($n=5$) coletadas da região mediana das touceiras de *U. brizantha* cv. Xaraés das parcelas sem escória e com dose máxima de 600 kg de escória ha^{-1} . Amostras foram fixadas em FAA70 (formaldeído PA, ácido acético PA e álcool etílico 70%, 1:1:18, v/v) por 24 horas (Johansen, 1940), lavadas e conservadas em álcool etílico 70% (Potiguara et al., 2013), para posterior observação em microscópio eletrônico de varredura (MEV).

Para a análise em (MEV) e microanálise espectroscópica de raios-X por dispersão de energia (Energy Dispersive Spectroscopy - EDS), amostras foliares desidratadas pela série etílica crescente de Johansen (1940), foram secas em aparelho de ponto crítico de CO_2 , aderidas sobre suportes metálicos através de fita de carbono dupla face e metalizadas com camada de ouro de aproximadamente 20 nm de espessura por 150 segundos em corrente de 25 mA (Potiguara et al., 2013). As eletromicrografias foram obtidas em microscópio eletrônico de varredura modelo LEO 1450 VP, utilizando-se detectores de elétrons secundários (ES) e de elétrons retroespalhados (ERE), com aceleração eletrônica e distância de trabalho de 15 Kev e 15 mm respectivamente. As escalas micrométricas foram obtidas ao mesmo tempo da captura das eletromicrografias e projetadas nas mesmas condições ópticas.

Análises químicas por EDS foram feitas para determinar o teor de silício nos tricomas e corpos silicosos foliares, assim como foi feito para a escória de siderurgia de alto forno, na determinação da sua composição química elementar. Para tanto, foi utilizado um detector de raios-X Gresham, modelo Sirius 10/7.5 acoplado ao MEV, operacionalizado nas mesmas condições de obtenção das eletromicrografias (Potiguara et al., 2013).

Para a contagem dos corpos silicosos, foram utilizados 10 campos da lâmina foliar de 0,021 mm², considerando-se as faces adaxial e abaxial para as regiões da nervura central, margem e semilimbo do ápice, meio e base foliares, totalizando 60 campos observacionais por região e 180 por lâmina foliar. A quantificação foi feita no próprio MEV Leo modelo 1450 VP, a um aumento de 695X estabelecido como padrão.

Os resultados das modificações estruturais foliares relacionadas com a aplicação de escória de siderurgia são apresentados na forma de eletromicrografias de varredura com respectivos espectros da análise por EDS *in situ* e gráficos do tipo colunas agrupadas, com os valores médios percentuais dos teores de Si e os respectivos ± erros padrões.

A determinação da matéria seca (M.S.) produzida pela pastagem foi realizada próximo ao ponto ótimo de corte, coincidindo produção de M.S. e valor nutritivo. Neste estádio, anterior ao início do florescimento, a matéria verde foi cortado acima de 0,25 m do solo. O material foi separado em folha e colmo, secos em estufa de circulação forçada de ar, acerca de 65°C.

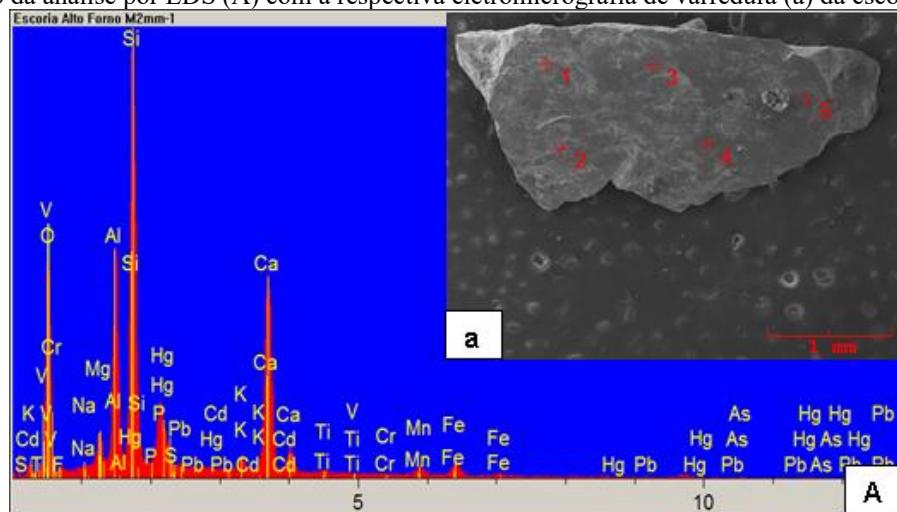
2.2.2 Resultados e Discussão

As respostas para o uso de escórias de siderurgia em pastagens como corretivo no solo estão sendo bastante estudadas. Entretanto, a finalidade do presente trabalho foi a de utilizar a escória de alto forno como uma fonte de Si e não como um material corretivo de acidez. Neste sentido, como a V% desejada para *U. brizantha* era de ficar entre 50 a 60 (Raij et al., 1997) e a V% do solo, no momento da aplicação da escória, se encontrava em 78%, pode-se afirmar que quaisquer modificações quantitativas ou qualitativas nas lâminas foliares deveu-se exclusivamente a atuação do Si no interior das plantas.

De modo geral, as fontes de Si na forma de silicato ligado a um cátion tem sido as de maior solubilidade e disponibilidade de Si às plantas (Pereira et al., 2010), como é o caso da escória de alto forno. Também, o período chuvoso nos três meses após a aplicação da escória sobre o solo, favoreceu a solubilização do material e a absorção de Si pelas plantas. Sendo assim, a escória de siderurgia de alto forno tem potencial para ser utilizada na agricultura, não somente como fornecedora de Ca e Mg ou apenas como material corretivo da acidez do solo, mas também como fonte de Si aos vegetais cultivados.

Ressalta-se na Figura 5 que, com as microanálises espectroscópicas de raios-X por dispersão de energia (EDS) e obtenção das eletromicrografias, os maiores picos de absorbância foram para o Si, onde a absorbância é diretamente proporcional à concentração. Isto caracteriza este material como de alto potencial para utilização como adubo silicatado. Também, não foi detectada elevada concentração de metais pesados ou outros elementos prejudiciais, não havendo perigo de contaminação ambiental pela escória de alto forno aplicada no solo.

Figura 5. Espectro da análise por EDS (A) com a respectiva eletromicrografia de varredura (a) da escória de alto forno.

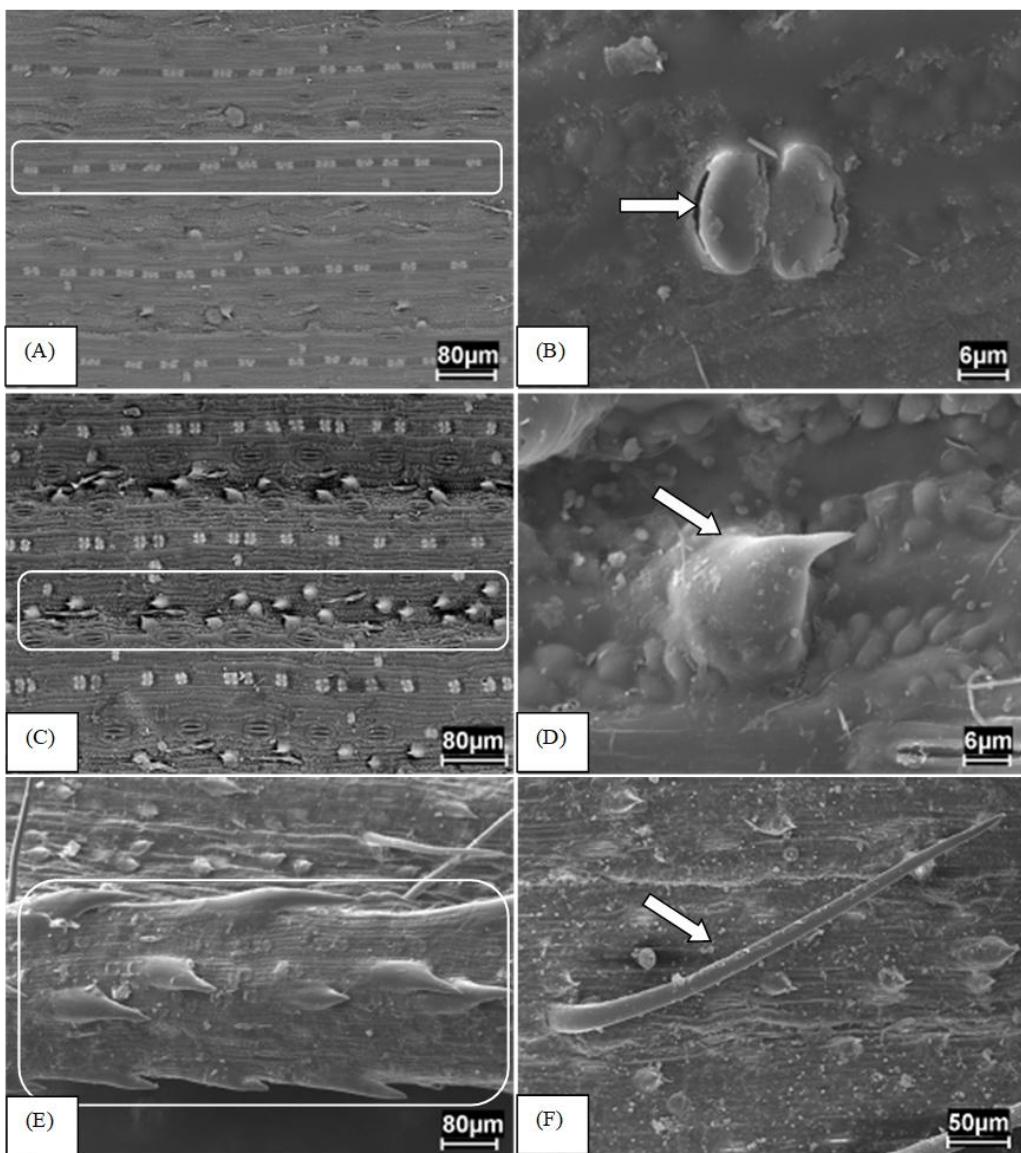


Fonte: Elaborado pelos autores com base nos resultados originais da pesquisa.

Apesar de não ser considerado um elemento essencial às plantas, o Si tende a se acumular nas lâminas foliares (Braga et al., 2009), jovens e adultas, mais especificamente no interior das células epidérmicas, independente da aplicação ou não de escória no solo. Com ou sem a aplicação de escória, é possível identificar a formação de corpos silicosos (CS), organizados em fileiras paralelas ao longo do eixo da folha (Figura 6A). Estes CS se mostram como partículas silicosas em forma de halteres (Figura 6B), localizados na superfície da lâmina foliar de *U. brizantha*, como também caracterizado por Potiguara et al. (2013), sendo uma substância ergástica característica da micromorfologia foliar de gramíneas (Metcalfe, 1960).

Portanto, os CS em forma de halteres são típicos de gramíneas e se constituem na principal forma de deposição e acúmulo de Si (Silva; Alquini, 2003), sendo assim, uma estratégia reconhecida e adotada por *U. brizantha* para acumular o excesso de Si que se encontrava disponível no solo e foi absorvido pela planta. A questão é saber se após atingido o limite genético de deposição de Si na forma de CS, com a alta disponibilidade deste elemento no solo pela adubação silicatada com a escória de alto forno, a gramínea forrageira utilizada neste experimento apresentaria uma estratégia adicional para poder acumular ainda mais silício.

Figura 6. Eletromicrografias de varredura da superfície de lâmina foliar de *Urochloa brizantha* cv. Xaraés. (A): Vista geral da face abaxial por ERE, destacando a organização dos corpos silicosos em halteres (demarcado por um retângulo). (B): Detalhe por ES de um corpo silicoso em haltere da face adaxial (indicado por uma seta). (C): Vista geral da face abaxial por ERE, destacando os tricomas tectores aculeiformes (demarcado por um retângulo). (D): Detalhe por ES de um tricoma tector aculeiforme da face adaxial (indicado por uma seta). (E): Detalhe por ES de tricomas tectores aculeiformes marginais (demarcado por um retângulo). (F): Detalhe por ES de um tricoma tector filiforme da face abaxial (indicado por uma seta). (B, C e D) = folhas jovens. (A, E e F) = folhas adultas. (A, C e D) = plantas não adubadas com escória. (B, E e F) = plantas adubadas com escória.



Fonte: Elaborado pelos autores com base nos resultados originais da pesquisa.

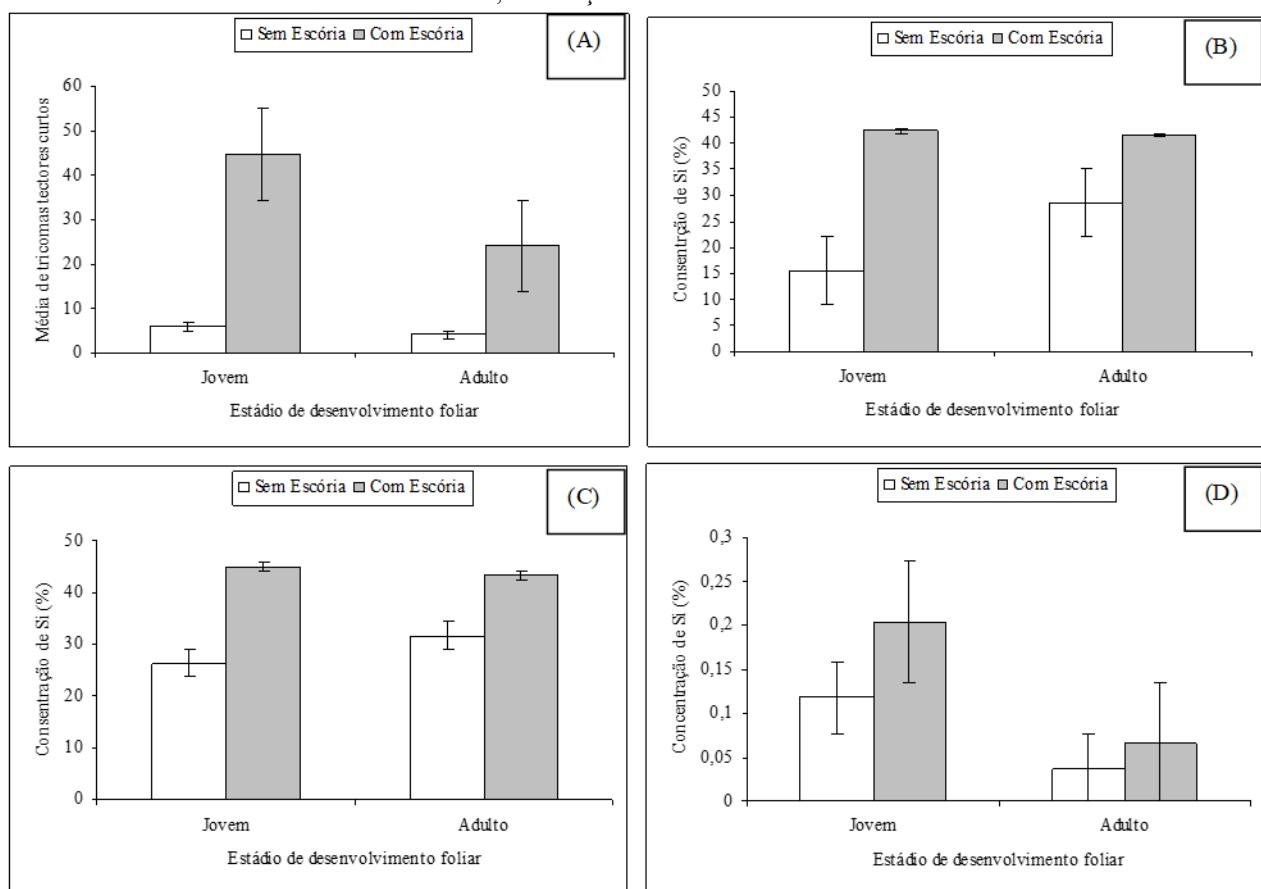
Ficou claro que havendo Si disponível, absorvido pelas plantas em maior quantidade, principalmente em solo adubado com escória como o do presente trabalho, o mesmo vai sendo metabolizado em biocomposto mineral e acumulado na forma de CS, talvez devido à ausência de um sistema excretor especializado (Haberlandt, 1925). Todavia, a ocorrência dos CS e a morfologia destas incrustações minerais são geneticamente determinadas e pouco influenciadas por fatores ambientais (Moller; Rasmussen, 1984). Sendo assim, há um limite para o depósito de Si sob a forma de CS (opala) (Metcalfe, 1983). A sílica biogênica nas plantas pode estar relacionada a refletância das folhas, a proteção mecânica contra o ataque de insetos e patógenos, o controle da transpiração excessiva

retenção de água, a prevenção do colapso tecidual subjacente em condições de seca e o balanço das trocas térmicas com o meio externo (Silva; Potiguara, 2009). Ademais, o Si acumulado na folha a permite que fique mais ereta, aumentando a área foliar exposta à luz solar, melhorando sua eficiência fotossintética (Crusciol, 2006).

Pela análise anatômica das folhas jovens e adultas de *U. brizantha* cv. Xaraés, foi possível também demonstrar a presença de outros depósitos de Si que ocorrem na forma de tricomas tectores aculeiformes (TA) (Figura 6C, D e E) e tricomas tectores filiformes (TF) (Figura 6F). Esses depósitos de Si localizam-se normalmente próximos à epiderme, na forma de apêndices, podendo ocorrer na parede celular (Braga et al., 2009). Constata-se também que os TA se distribuem por toda a superfície das folhas, mais especificamente entre as fileiras paralelas dos CS (Figura 6C), tanto na face abaxial, quanto na face adaxial (Figura 6D) e de forma restrita na margem das folhas (Figura 6E). Já os TF, em menor quantidade, encontra-se distribuído de forma aleatória em todo o limbo foliar (Figura 6F).

Verifica-se na Figura 7A que, independentemente do estádio de desenvolvimento foliar (jovens ou adultas), a aplicação de 600 kg de escória ha^{-1} proporcionou aumento na quantidade dos TA, indicando maior acúmulo de Si. As Figuras 7B e C corroboram com o fato anterior, mostrando que as concentrações de Si (%) naturalmente aumentaram nos TA em função da aplicação da dose máxima de escória ($600\text{ kg }ha^{-1}$). Este incremento também foi observado para TF (Figura 7D), independentemente se a folha era jovem ou adulta.

Figura 7. (A): Média de corpos silicosos em plantas de *U. brizantha* cv. Xaraés. (B – D): Concentração de Si (%) dos tricomas tectores. (B e C): tricomas aculeiformes, sendo (C) específico aos da margem e (D): tricomas filiforme. Para os tratamentos sem e com dose máxima de escória, em função do estádio de desenvolvimento foliar.



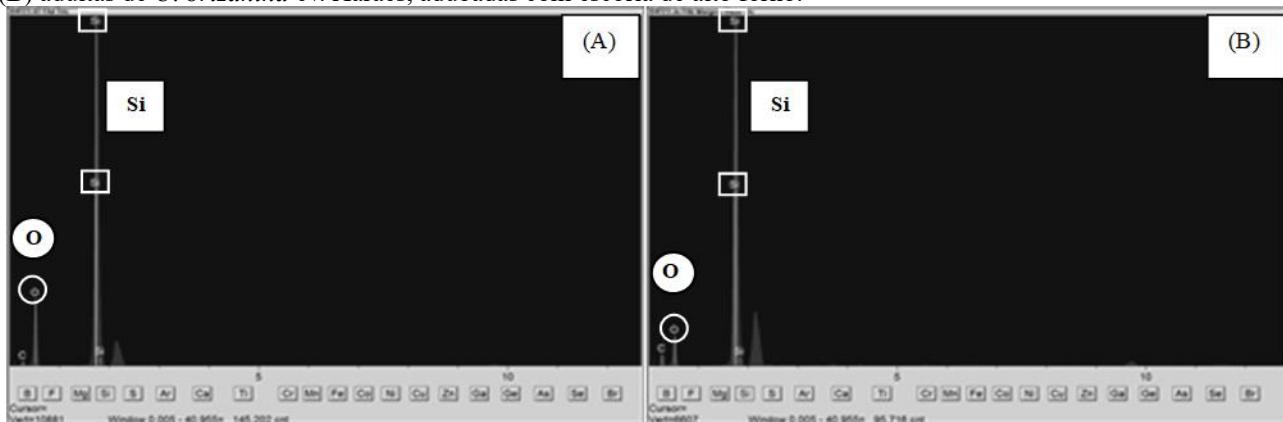
Nota: Os valores são média ± erros padrões.

Fonte: Elaborado pelos autores com base nos resultados originais da pesquisa.

Para os TA da margem foliar (Figura 7C), o acumulo de Si bastante pronunciado nas parcelas que receberam tratamento com escória (600 kg ha^{-1}), explica o fato de que as folhas de *U. brizantha* cv. Xaraés apresentaram margens com uma coloração arroxeadas e muito mais cortante do que as margens das folhas de parcelas sem o tratamento com escória, onde a coloração arroxeadas não foi verificada nas observações a campo. Chama atenção a estrutura na forma de “gota” dos TA (Figura 6D), cujas partes pontiagudas de sílica ficam projetadas para o lado externo da epiderme, nas margens foliares (Figura 6E). Estes apêndices pontiagudos que se agrupam em sequência, envolta da margem do limbo foliar, todos voltados para o ápice foliar, formando a reconhecida superfície cortante das folhas de gramíneas.

Na Figura 8, por meio do espectro da análise por EDS dos TA das margens de folhas jovens e adultas, que receberam adubação com escória, é possível verificar os maiores picos de absorbância para o Si, que correspondem às elevadas concentrações médias deste elemento apresentados na Figura 7C. Pela Figura 8, com o espectro da análise por EDS realizada nos TA, também foi possível detectar picos de O, indicando que o Si está na forma de dióxido.

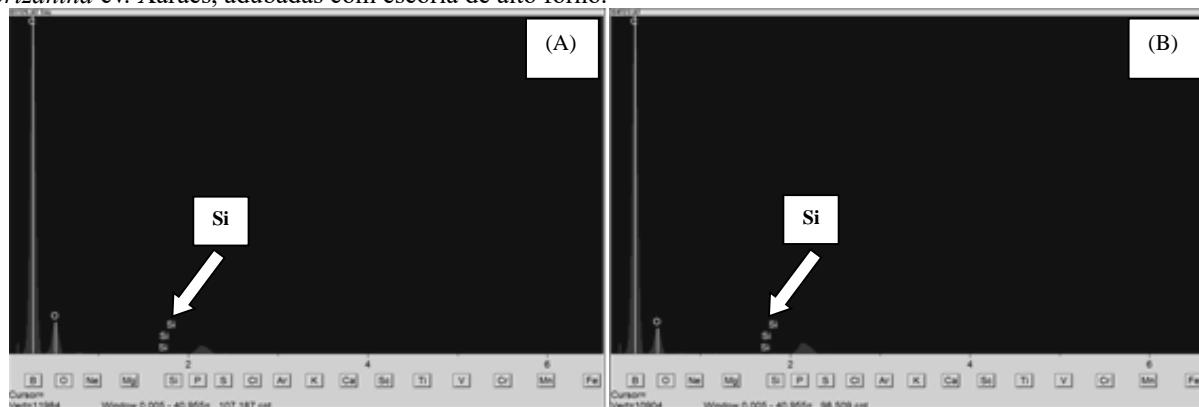
Figura 8. Espectros das análises por EDS realizadas nos tricomas tectores aculeiformes da margem de folhas (A) jovens e (B) adultas de *U. brizantha* cv. Xaraés, adubadas com escória de alto forno.



Fonte: Elaborado pelos autores com base nos resultados originais da pesquisa.

A constatação de que em *U. brizantha* cv. Xaraés, os TA acumulam Si, sugere que tais estruturas atuem como uma segunda estratégia ou estratégia alternativa suplementar para absorver, acumular e, ou de certa forma “descartar” o excedente de Si que estava disponível no solo e foi absorvido pelas plantas, já que foi constatado um limite de acúmulo desempenhado pelos CS. Até então, apenas os CS eram considerados como a principal estrutura de deposição e acúmulo de Si em gramíneas. Com relação aos baixos teores de Si dos TF (Figura 7D), independentes do estádio de desenvolvimento foliar e do tratamento, sugerem que este elemento esteja atuando como um componente estrutural de parede destes tricomas, indicando que os mesmos desempenham outras funções biológicas em *U. brizantha* cv. Xaraés, não relacionadas apenas ao depósito e acúmulo de Si. Na Figura 9, espectros das análises por EDS dos tricomas tectores filiformes de folhas jovens e adultas, confirmam a sua incapacidade de acumular Si em grande quantidade, mesmo havendo elevada disponibilidade do elemento no solo.

Figura 9. Espectros das análises por EDS realizadas nos tricomas tectores filiformes de folhas (A) jovens e (B) adultas de *U. brizantha* cv. Xaraés, adubadas com escória de alto forno.



Fonte: Elaborado pelos autores com base nos resultados originais da pesquisa.

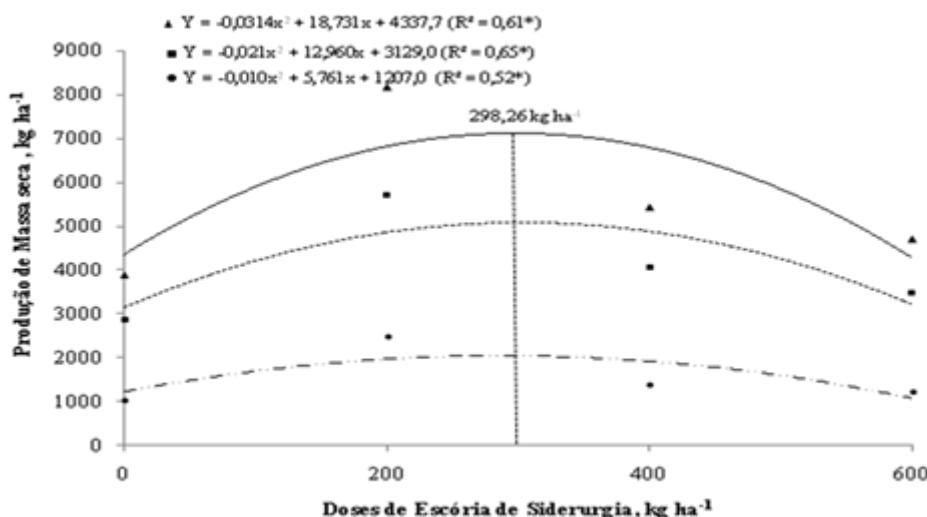
De modo geral, os tricomas desempenham inúmeras funções para os vegetais, podendo oferecer proteção física contra larvas fitófagas de alguns insetos, realizar a dispersão de colônias de afídios, eliminar substâncias alelopáticas que diminuem o vigor de plântulas as suas proximidades,

evitar a entrada de produtos químicos utilizados na agricultura, proporcionar um microambiente saturado de água entre os estômatos e o meio, evitando o dessecamento, e influenciar na ação direta dos raios solares que incidem na lâmina foliar (Potiguara et al., 2013). Além dos corpos silicosos e dos tricomas, na epiderme foliar, o Si também pode combinar-se com a celulose, pode estar presente nas células-guardas dos estômatos e podem ser encontrados nos elementos vasculares (Silva et al., 2005).

As funções dos CS e dos tricomas, quanto aos benefícios morfológicos e fisiológicos que podem agregar aos vegetais, vem sendo generalizadas por diversos autores, não havendo, por exemplo, discernimento claro e objetivo de quem, efetivamente, é responsável pelo aumento da eficiência fotossintética, resistência a pragas e doenças e maior tolerância a falta de água, com relação as duas estratégias de acúmulo de Si. Ressalta-se, contudo, a necessidade da ampliação de pesquisas que venham elucidar qual a função específica ou qual a participação exata dos CS e dos diferentes tipos de tricomas nas modificações quantitativas e qualitativas das plantas, ocorridas pela maior presença do Si disponível no solo. Ademais, também será importante verificar se estas mudanças estruturais constatadas no presente trabalho, acarretarão modificações no crescimento primário das plantas, no desenvolvimento e, consequentemente, na produtividade agrícola.

As alterações estruturais e químicas, de natureza quantitativa, verificadas nas lâminas foliares de *U. brizantha* cv. Xaraés, proporcionadas pela aplicação da escória de siderurgia, permitem sugerir mais estudos no sentido de verificar se as mesmas causariam alguma modificação quanto ao aumento na produção de massa seca, no valor nutritivo da forragem e da sua palatabilidade aos animais ruminantes, necessitando de, no mínimo, determinar-se as características bromatológicas da espécie, com e sem a aplicação de escória. Korndörfer et al. (2010) em condições de cerrado observaram que o silicato de cálcio foi eficiente para elevar as concentrações de Si, nas plantas de *U. brizantha* e *Megathirsus maximus*, mas não alterou a produção de massa seca das espécies. Em contrapartida, Lima et al. (2004), constataram que a aplicação de 700 kg ha⁻¹ de escória de alto forno em pastagens de *U. brizantha* proporcionou a elevação na produção de massa seca da parte aérea. No presente experimento, houve efeito da aplicação da escória ($P<0,05$) na M.S. de folha, colmo e total, apresentando um comportamento quadrático (Figura 10). Com a dose de 298,26 kg ha⁻¹ observou-se a maior produção de M.S., atingindo 7.131,66 kg ha⁻¹ de M.S. total.

Figura 10. Efeito da aplicação de doses de Escória de Siderurgia na produção de massa seca de colmo (●), folha (■) e total (▲) em *Urochloa brizantha* cv Xaraés. * ($P < 0,05$).



3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Das três escórias estudadas, pelo conteúdo de silício, podem ser classificadas como fertilizantes de escórias silicatadas, destacando-se a escória de alto forno e a escória de forno elétrico, não havendo a concentração de metais pesados ou outros elementos tóxicos;

A maior disponibilidade de Si pela aplicação de escória de alto forno, indicou que há um limite para a deposição do mesmo na forma de corpos silicosos, havendo os tricomas aculeiformes como estratégia alternativa para que a *Urochloa brizantha* continue absorvendo e acumulando o excedente de Si;

A escória de auto forno pode ser utilizada em pastagens de *Urochloa brizantha* cv. Xaraés, sendo a dose entre 200 e 400 kg ha⁻¹, aquela que proporciona a maior produção de massa seca.



REFERÊNCIAS

ALCARDE, J.C. 1992. Corretivos da acidez dos solos: características e interpretações técnicas. São Paulo: ANDA. 26 p. (Boletim Técnico, 6).

ARAÚJO, L.S.; MARÇAL, H.T.; CORREIA, J.P.T. Viabilidade do uso da escória transformada como corretivo de acidez do solo e fonte de silício para as plantas. In: CRUSCIOL, C.A.C.; VILLAS BOAS, R.L.; FERNANDES, D.M.; SORATTO, R.P.; KORNDÖRFER, G.H.; GUERRINI, I.A. (Eds.). Simpósio brasileiro sobre silício na agricultura, 4. Botucatu: FCA, UNESP, 2007. 111-114 p.

BRAGA, F. T.; NUNES, C. F.; FAVERO, A. C.; PASQUAL, M.; CARVALHO, J. G. de; CASTRO, E. M. de. Características anatômicas de mudas de morangueiro micro propagadas com diferentes fontes de silício. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.44, n.2, p.128-132, 2009.

BRASIL. 2006. Instrução Normativa nº 35, de 4 de julho de 2006. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 12 jul. 2006. Seção 1, p. 32. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/sislegis>>. Acesso em: 26 abr. 2011.

BRASIL. 2007a. Instrução Normativa nº 5, de 23 de fevereiro de 2007. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 01 mar. 2007. Seção 1, p. 10. Disponível em: Acesso em: 26 abr. 2011.

BRASIL. 2007b. Instrução Normativa nº 28, de 27 de julho de 2007. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 31 jul. Seção 1, p. 11. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/sislegis>>. Acesso em: 26 abr. 2011.

BRASIL. 2017. Ministério de Minas e Energia. Anuário Estatístico: Setor Metalúrgico. Brasília, DF: SGM. 95p.

BRASIL, E.C.; Nascimento, E.V.S. do. 2019. Aproveitamento agronômico de escória de siderurgia de alto-forno na correção da acidez do solo. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental. 34 p. (Documentos 444). ISSN 1983-0513)

COELHO, A.M. 2013. Procedimentos Metodológicos Para a Caracterização de Escórias de Siderurgia Para o Uso na Agricultura. Sete Lagoas, MG: Embrapa Milho e Sorgo. 12 p. (Comunicado Técnico 207). ISSN 1679-0162

CORREA NETO, A.I.S.; SOUSA, J.P.N. de; ELOY, A.V.M.; COIMBRA, D.J.; FARIA, K.A.A.; LIMA, E. do V. 2024. Mercado de calcário agrícola em Capanema/PA: estratégias para elevação da oferta e demanda. In: IV Conecta UFRA: Amazônia, Ciência & Sociedade. Belém: Universidade Federal Rural da Amazônia / Ed. Seven. ISBN: 978-65-272-0905-8 - DOI: 10.29327/9786527209058 <<https://www.even3.com.br/anais/iv-conecta-ufra/1005833-mercado-de-calcario-agricola-em-capanemapa--estrategias-para-elevacao-da-oferta-e-demanda/>>

CRUSCIOL, C. A. C. Silício para as gramíneas forrageiras. Revista Campo e Negócios, Uberlândia, v. 4, n. 1, p. 14-15, 2006.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA [EMBRAPA]. 1999. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. Brasília: Embrapa Solos / Embrapa Informática Agropecuária / Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia. 370p. ISBN: 9788573830668



EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. 3.ed. Brasília, 2013. 353p.

FARIA, L. de A.; LUZ, P. H. de C.; RODRIGUES, R. C.; HERLING, V. R.; MACEDO, F. B. Efeito residual da silicatagem no solo e na produtividade do capim-marandu sob pastejo. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 32, p. 1209-1216, 2008.

GEYER, R. M. T. 2001. Estudo sobre a potencialidade de uso das escórias de aciaria como adição ao concreto. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 170.

HABERLANDT, G. Physiological plant anatomy. Today e tomorrow's Delhi. p. 529-613, 1925.

IMAZON. Mapa da Amazônia Legal. 2011. Disponível em: <http://www.imazon.org.br/mapas/amazonia-legal/image_view_fullscreen>. Acesso em: 24 jun. 2014

JOHANSEN, D. A. Plant microtechnique. New York: MacGraw-Hill Book Co., 1940. 523p.

KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; CAMARGO, M. S. 2004. Silicatos de cálcio e magnésio na agricultura. 2.ed. Uberlândia, GPSi / ICIAG / UFU. 24p. Boletim Técnico, 1.

KORNDÖRFER, P. H.; SILVA, G. C.; TEIXEIRA, I. R.; SILVA, A. G.; FREITAS, R. S. Efeito da adubação silicatada sobre gramíneas forrageiras e características químicas do solo. Pesquisa Agropecuária Tropical, Goiânia, v. 40, n. 2, p. 119-125, 2010.

LIMA, E. do V.; OLIVEIRA, M.F. de; LIMA, P. da S.L. Persistência da palhada e liberação de nutrientes de *Brachiaria brizantha*, sem e com escória de siderurgia no sudeste do Pará. Brazilian Journal of Animal and Environmental Research, Curitiba, v. 7, n. 4, p. 1-18, 2024.

MA, J. F.; YAMAJI, N. 2006. Silicon uptake and accumulation in higher plants. Plant Science, 11(8): 392-397. ISSN: 0168-9452.

MARCIANO, C.R.; MORAES, S.O.; OLIVEIRA, F.C.; MATTIAZZO, M.E. 2001. Efeito do lodo de esgoto e do composto de lixo urbano sobre a condutividade hidráulica de um latossolo amarelo saturado e não-saturado. Viçosa: Revista Brasileira de Ciência do Solo, 25(1): 1-9. ISSN: 1806-9657.

MENDES, J.C. 2016. Viabilidade técnica do uso de Linear Alquil Benzeno de Sódio como aditivo incorporador de ar para matrizes cimentícias. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. 96p. <<https://www.sisbin.ufop.br>>

METCALFE, C. R. 1960. Anatomy of monocotyledons. Gramineae. Clarendon Press, Oxford, v.1.

METCALFE, C. R. Secretary mineral substances - silica. In: METCALFE, C. R.; CHALK, L. Anatomy of the dicotyledons. 2. ed. Oxford: Claredon, v. 2. p. 82-94, 1983.

MOLLER, J. D.; RASMUSSEN, F. L. S. Stegmata in Orchidales: character state distribution and polarity. Botanical Journal the Linnean Society, v. 89, p. 53-76, 1984.

PEREIRA, H. S.; GAMA, A. J. M; CAMARGO, M. S. de; KORNDÖRFER, G. H. Reatividade de escórias silicatadas da indústria siderúrgica. Ciência Agrotecnologia, Lavras, v. 34, n. 2, p. 382-390, 2010.

POTIGUARA, R. C. de V.; SILVA, R. J. F.; KIKUCHI, T. Y. S.; LUCAS, F. C. A.; MACEDO, E. G. Estruturas vegetais em microscopia eletrônica de varredura. Belém: Museu Paraense Emílio Goeldi, Universidade do Estado do Pará, 116 p, 2013.

PRADO, R. de M.; FERNANDES, F. M. 2001. Efeito da escória de siderurgia e do calcário na disponibilidade de fósforo de um Latossolo Vermelho-Amarelo cultivado com cana-de-açúcar. Brasília: Pesquisa Agropecuária Brasileira, 36(9): 1199-1204. ISSN: 0100-204X. Notas Científicas.

PRADO, R.M.; FERNANDES, F.M.; NATALE, W. 2001. Uso agrícola da escória de siderurgia como corretivo de acidez do solo: estudos na cultura da cana-de-açúcar. Jaboticabal: Fundação de Estudos e Pesquisas em Medicina Veterinária, Agronomia e Zootecnia. 67p.

PRADO, R. de M.; FONSECA, I. M.; VIDAL, A. de A.; SOUZA, F.V. de; NOGUEIRA, T.A.R. Acúmulo de silício em plantas de braquiária no segundo corte em função da aplicação de calcário, escória de siderurgia e nitrogênio. In: CRUSICOL, C.A.C.; VILLAS BOAS, R.L.; FERNANDES, D.M.; SORATTO, R.P.; KORNDORFER, G.H.; GUERRINI, I.A. (Eds.). Simpósio brasileiro sobre silício na agricultura, 4. Botucatu: FCA, UNESP, 2007. 18-21 p.

PREZOTTI, L.C.; MARTINS, A.G. 2012. Efeito da escória de siderurgia na química do solo e na absorção de nutrientes e metais pesados pela cana-de-açúcar. Viçosa: Revista Ceres, 59(4): 530-536, jul./ago. ISSN 0034-737X.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. FURLANI, A. M. C. Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo. 2.ed. Campinas: Instituto Agronômico e Fundação IAC, 1997, 285p. (Boletim Técnico, 100).

SÁVIO, F. L.; SILVA, G. C. da; TEIXEIRA, I. R.; BORÉM, A. Produção de biomassa e conteúdo de silício em gramíneas forrageiras sob diferentes fontes de silicato. Semina: Ciências Agrárias, Londrina, v. 32, n. 1, p. 103-110, 2011.

SILVA, L. M.; ALQUINI, Y. Anatomia comparativa de folhas e caules de *Axonopus scoparius* (Flugge) Kuhlm. e *Axonopus fissifolius* (Raddi) Kuhlm. (Poaceae). Revista Brasileira de Botânica, v. 26, n. 2, p. 185-192, 2003.

SILVA, L. P. da; SILVA, L. S. da; BOHNEN, H. Componentes da parede celular e digestibilidade in vitro de palha de arroz (*Oryza sativa*) com diferentes teores de silício. Ciência Rural, v.35, p.1205-1208, 2005.

SILVA, L.S.; BOHNEN, H. 2001. Rendimento e acúmulo de nutrientes pelo arroz em solução nutritiva com e sem a adição de silício. Viçosas: Revista Brasileira de Ciência do Solo, 25(3): 771-777. ISSN 1806-9657.

SILVA, R. J. F.; POTIGUARA, C. de V. Substâncias ergásticas foliares de espécies amazônicas de Oenocarpus Mart. (Arecaceae): caracterização histoquímica e ultra-estrutural. Acta Amazonica. v. 39, n. 4, p. 793-798, 2009.

SOBRAL, M.F.; NASCIMENTO, C.W.A.; CUNHA, K.P.V.; FERREIRA, H.A.; SILVA, A.J.; SILVA, F.B.V.R. 2011. Escória de siderurgia e seus efeitos nos teores de nutrientes e metais pesados em cana-de-açúcar. Campina Grande: Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 15(8): 867-872. ISSN 1415-4366.

SORATTO, R.P.; CRUSCIOL, C.A.C.; MORO, E.; MARTINS, P.O. Adubação nitrogenada e liberação de carbono, nitrogênio e silício da palhada de capim braquiária. In: CRUSCIOL, C.A.C.; VILLAS BOAS, R.L.; FERNANDES, D.M.; SORATTO, R.P.; KORNDORFER, G.H.; GUERRINI, I.A. (Eds.). Simpósio brasileiro sobre silício na agricultura, 4. Botucatu: FCA, UNESP, 2007. 171-174p.

SOUZA, J.P.N. de; CORREA NETO, A.I.S.; SANTOS, W.M.A. dos; SILVA, P.H.M. dos S.; SOUZA, E.V. de; LIMA, E. do V. 2025. Oferta e demanda brasileira de calcário agrícola em uma década (2012-2022). In: IV Conecta UFRA: Amazônia, Ciência & Sociedade. Belém: Universidade Federal Rural da Amazônia / Ed. Seven. ISBN: 978-65-272-0905-8 - DOI: 10.29327/9786527209058 <[>](https://www.even3.com.br/anais/iv-conecta-ufra/1005844-oferta-e-demanda-brasileira-de-calcario-agricola-em-uma-decada-(2012-2022))

SOUZA, R. T. X. de; KORNDÖRFER, G. H.; WANGEN, D. R. B.; Aproveitamento de silício proveniente de escória siderúrgica por cultivares de cana-de-açúcar. Bragantia, Campinas, v. 69, n. 3, p. 669-676, 2010.

STOCCHI, F. C.; PASSOS, R. R.; ANDRADE, F.V.; REIS, E. F. dos; LIMA, J. S. de S.; SANTOS, D. A.; MACHADO, R. V. Uso de escórias de siderurgia na produção de matéria seca e perfilhamento de duas gramíneas do gênero *Brachiaria* em um latossolo vermelho-amarelo. Biosci. J., Uberlândia, v. 26, n. 2, p. 240-248, 2010.

TOMLINSON, P. B. Anatomy of the monocotyledons-II: Palmae. Oxford University Press, New York. 462 p, 1961.

VIDAL, A.A.; PRADO, R.M. 2011. Aplicação de escória siderúrgica, calcário e ureia em Latossolo cultivado com arroz. Goiânia: Pesquisa Agropecuária Tropical, 41(2): 264-272, abr./jun. e-ISSN 1983-4063.