

Utilização de Carvão e Subprodutos da Carbonização Vegetal na Agricultura: Aprendendo com as Terras Pretas de Índio

Vinícius de Melo Benites
Wenceslau Geraldes Teixeira
Maria Emília Rezende
Alexandre Santos Pimenta

As Terras Pretas de Índio (TPI) são os mais intrigantes perfis de solos observados no ambiente amazônico. Muitos pesquisadores têm se dedicado ao estudo desse fenômeno em todo o mundo, como pode ser observado neste livro e em outras publicações sobre o tema (Lehmann et al. 2003, Glaser et al. 2001). A maioria dos trabalhos trata da investigação das características das terras pretas e de como estas provavelmente foram formadas. A elucidação da gênese dos horizontes antrópicos nas TPIs contém informações valiosas que podem gerar novas tecnologias e novas soluções para a agricultura tropical. Aspectos relacionados à fertilidade desses solos vão aos poucos se tornando mais claros, e a replicação de algumas condições observadas nesses ambientes começam a apontar como um caminho viável. Alguns trabalhos tratam da replicação das terras pretas por meio do manejo do solo e da vegetação nas condições amazônicas (Steiner et al. 2007; Glaser et al. 2001). Contudo, a partir da constatação de que a matéria orgânica de origem pirogênica, presente em grande quantidade nesses solos, é um dos elementos chave na preservação da elevada fertilidade e na boa estruturação e condição físico-hídrica deles; novas perspectivas podem ser trilhadas, tanto para os solos amazônicos quanto para outros solos tropicais de baixa fertilidade.

Vários autores têm caracterizado a matéria orgânica encontrada nas Terras Pretas de Índio (TPI) e demonstrado que grande parte da porção humificada tem origem na transformação de resíduos em carvão (Glaser et al. 2002, Tony neste livro). Estes resíduos foram adicionados ao solo de forma intencional ou acidental, em virtude da atividade antrópica das populações pré-colombianas que viviam nessas áreas (vide capítulos Kern, Woods,). As substâncias húmicas encontradas nas TPIs apresentam, como característica, elevada aromaticidade, o que lhe confere alta estabilidade no solo, e ainda alta reatividade em função, sobretudo, de grupos carboxílicos presentes nestas moléculas (Cunha et al, 2007). Essas características são fortemente desejáveis quando se pretende produzir um condicionador orgânico para ser utilizado em solos tropicais, resultando em boa persistência e elevada capacidade de troca catiônica. A alta atividade biológica observada nas Terras Pretas de Índio sugere que a transformação dos resíduos da carbonização deve ser mediada por organismos, seja pela ação direta sobre o carvão ou ainda pela liberação de enzimas capazes de transformar quimicamente esses substratos.

A partir da constatação de que é possível sintetizar substâncias húmicas de alta estabilidade e de alta reatividade a partir de carvão vegetal e seus subprodutos, surgiu a idéia de aproveitar as enormes quantidades de subprodutos da carbonização vegetal que são produzidos no Brasil, o maior produtor mundial de carvão vegetal (ABRACAVE, 2007). Além disso, a própria utilização direta do carvão como condicionador de solo já representa um potencial gigantesco a ser explorado. Outros subprodutos, como o ácido pirolenhoso, têm sido usados como estimulantes vegetais, redutores de pH de caldas e como bioativadores de solos (Miazaka et al. 2001, Numaka et al. 1994). Talvez todos esses fatores possam estar atuando conjuntamente, influenciando a elevada fertilidade e capacidade de produção vegetal das Terras Pretas de Índio.

A Carbonização Vegetal

A carbonização vegetal é um processo conhecido há pelo menos 10.000 anos, porém esse processo evoluiu muito pouco durante todo esse tempo. Ela pode ser definida como o processo cujo objetivo é aumentar o teor de carbono na madeira por meio de tratamento térmico. Nesse caso, observa-se uma perda seletiva de hidrogênio e oxigênio, com a conseqüente concentração de carbono (Oliveira et al, 1982b). Para que isso aconteça, é necessária a ocorrência de vários processos, tanto físicos como químicos. Alguns autores relatam que o processo de carbonização pode ser entendido ao se estudar o comportamento dos três principais componentes da madeira: a celulose, as hemiceluloses e a lignina (Oliveira et al, 1982a). Compreendendo o comportamento desses componentes, será possível entender como se realiza a carbonização.

Durante o processo de carbonização da madeira, o carvão é apenas uma fração dos produtos que podem ser obtidos. Caso sejam utilizados sistemas apropriados para a coleta, também podem ser aproveitados os condensados pirolenhosos (alcatrão vegetal) e os gases não condensáveis. A prática mais completa e eficiente, quando além do carvão vegetal (resíduo) são aproveitados os condensados e os gases não condensáveis da madeira, denomina-se “destilação seca”, que pode ser implantada a partir da utilização de fornos especiais com recuperadores de fumaça.

Em termos de rendimento, a carbonização vegetal bem conduzida pode gerar até 40kg de carvão vegetal a partir de 100kg de madeira seca; ou seja, um rendimento de 40%. Neste mesmo processo, são gerados cerca de 61kg de água incluindo uma umidade inicial de 30% e 13kg de óleo. Parte deste óleo apresenta-se solúvel em água formando o ácido pirolenhoso. Também podem ser recuperados ou utilizados como fonte de energia 16kg de gases não condensáveis (CH_4 , CO_2 , CO e H_2) (Fig. 1).

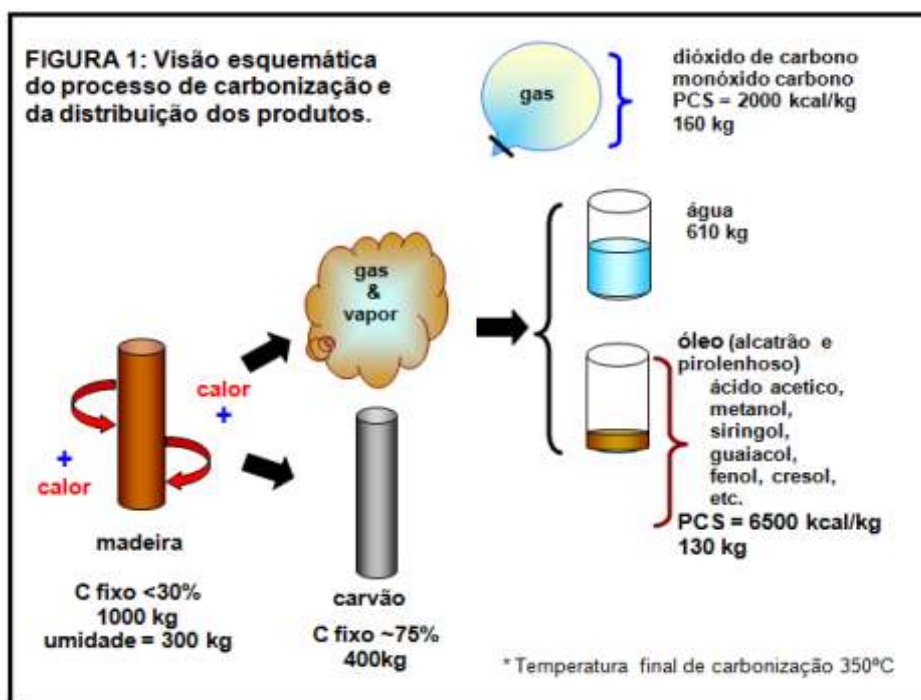


Fig. 1. Esquema de produção de carvão vegetal, subprodutos e gases não condensáveis a partir da carbonização controlada de madeira.

Físico Química da Carbonização Vegetal

Todo o processo de carbonização tem sido alvo de inúmeras pesquisas para conhecimento dos mecanismos e processos que levam à transformação da madeira em carvão. Quando se coloca uma peça de madeira sob a ação do calor, ocorre a destruição de seus principais componentes, resultando na formação de carvão e diversos outros compostos, dos quais mais de 213 já foram identificados (Oliveira et al, 1982a). Para explicar como ocorre a formação desses componentes e quais são os mecanismos e reações que acontecem durante a carbonização, vários modelos têm sido desenvolvidos. A carbonização é um processo que depende do tempo e da temperatura. Assim, pode-se dizer que a formação de “tiços”, material parcialmente carbonizado, dá-se provavelmente pela não-exposição da peça de madeira à temperatura durante um tempo adequado, gerando, assim, zonas não pirolisadas (OLIVEIRA et al., 1982a).

Cada um dos componentes da madeira participa, de maneira diferente, do processo de carbonização, gerando diferentes produtos, devido à natureza de sua composição química. A degradação da celulose processa-se rapidamente em um curto intervalo de temperatura cerca de 50°C provocando drásticas mudanças no seu comportamento, com a perda de cerca de 77% do seu peso. As hemiceluloses começam a perder peso em temperaturas próximas a 225°C, sendo o componente menos estável da madeira, uma vez que a sua degradação é quase completa na temperatura de 325°C, perdendo peso continuamente sob a ação do calor (OLIVEIRA et al., 1982a). A lignina é o componente químico mais importante da madeira quando se objetiva a produção de carvão vegetal, pois o rendimento gravimétrico do processo está diretamente relacionado ao conteúdo de lignina na madeira. Esse componente começa a degradar-se em temperaturas mais baixas, a partir de 150°C. Ao contrário da celulose e das hemiceluloses, cuja degradação é mais lenta, ela continua perdendo peso em temperaturas superiores a 500°C, dando como resultado um resíduo carbonoso, conhecido como carvão vegetal. Tal perda é bem menor que a ocorrida com a celulose e as hemiceluloses (OLIVEIRA et al., 1982a).

- Os fenômenos da carbonização podem ser divididos da seguinte maneira (CETEC, 1982):
- **Zona A:** até 200°C, é caracterizada pela produção de gases não condensáveis, tais como vapor d'água, CO₂, ácido fórmico e acético;
- **Zona B:** Compreendida na região de temperatura entre 200 e 280°C. Nela são produzidos os mesmos gases da Zona A. Nesse caso, há diminuição substancial no vapor d'água e aparecimento de CO. As reações que acontecem nessa região são de natureza endotérmica;
- **Zona C:** de 280 a 500°C. A carbonização ocorre por meio de reações exotérmicas. A temperatura a que as reações exotérmicas ocorrem não está bem identificada. Os produtos obtidos nessa etapa são sujeitos a reações secundárias, incluindo combustíveis e alcatrão, CO e CH₄;
- **Zona D:** acima de 500°C. Nessa região já existe o carvão. Nela, acontecem várias reações secundárias, catalisadas pelo leito de carbonização.

O Tabela 1 ilustra a evolução da carbonização em termos de produtos obtidos em temperaturas crescentes de carbonização (OLIVEIRA, 1982a).

Características e Propriedades do Carvão e de Subprodutos da Carbonização Vegetal

Carvão

O carvão vegetal é um material orgânico com elevado teor de carbono, concentrado por efeito do aquecimento. Dependendo da temperatura final de carbonização, o carvão pode apresentar diferente composição (Trompowsky et al., 2005). Em contraponto ao elevado teor de carbono, o carvão vegetal

apresenta baixo teor de nitrogênio, o que resulta em uma elevada relação C:N. O oxigênio é o segundo elemento mais abundante e o seu teor está inversamente relacionado á temperatura final de carbonização praticada. Existem ainda as cinzas, que são formadas por elementos minerais oriundos principalmente de cascas. Nas cinzas, predominam o potássio, o cálcio, o fósforo e o sódio. A composição das cinzas é fortemente relacionada à química dos solos onde se desenvolveu a madeira original.

Tabela 1. Evolução teórica da carbonização da madeira.

Fases da carbonização	Temperatura (°C)	Teor de carbono fixo	Gases não condensáveis			
			CO ₂	CO	H ₂	Hidrocarbonetos
			% em base seca			
Secagem	150-200	60	68,0	30,0	-	2,0
Gases oxigenados	200-280	68	66,5	30,0	0,2	3,3
Início da fase dos hidrocarbonetos	280-380	78	35,5	20,5	6,5	37,5
Fase dos hidrocarbonetos	380-500	84	31,5	12,3	7,5	48,7
Dissociação e contração	500-700	89	12,2	24,6	42,7	20,5
Fase do H ₂	700-900	91	0,5	9,7	80,9	8,9

Fonte (CETEC, 1982).

O carvão apresenta uma estrutura porosa, uma vez que a água e os compostos voláteis contidos na madeira foram eliminados, deixando espaços vazios. Cerca de 70 a 80% do volume do carvão vegetal é formado por poros. Logo, o carvão apresenta baixa densidade, variando de 0,3 a 0,4kg dm⁻³. Quimicamente o carvão é formado por uma estrutura policíclica aromática com alto grau de condensação (Fig. 2).

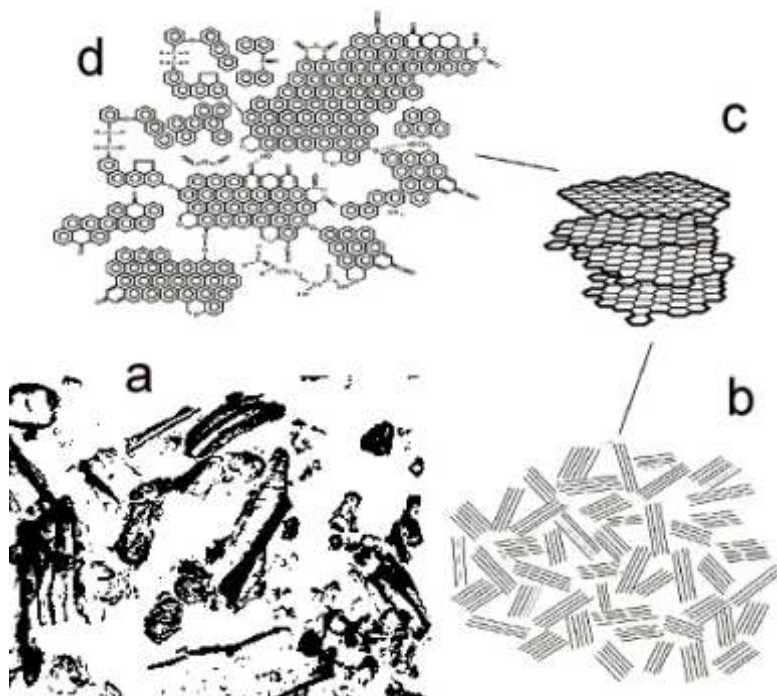


Fig. 2. Desenho esquemático mostrando: (a) microfotografia eletrônica de fragmentos de carvão encontrados em amostra de solos (Skjemstad, 1996); (b) estrutura lamelar do carvão; (c) aspecto quase grafítico das lamelas de carvão e (d) estrutura aromática policíclica condensada de carvão vegetal.

A composição e a estrutura química do carvão confere a ele uma grande persistência no solo. Em estudos de datação de fragmentos de carvão encontrados em solos, é comum a observação de amostras com milhares de anos (Gouveia et al., 1999). Em virtude de sua conformação porosa, alguns trabalhos têm demonstrado a utilização de fragmentos de carvão no solo como micro-habitat para organismos do solo (Pietikainem et al., 2000). Alguns trabalhos ainda sugerem o efeito positivo dos carvões sobre propriedades físico-hídricas de solos, aumento de sua capacidade de retenção de umidade (Piccolo et al., 1997, Teixeira et al. neste volume)

Alcatrão vegetal

O alcatrão vegetal é um produto obtido a partir da recuperação e condensação dos gases (fumaça) produzidos durante a carbonização vegetal. A recuperação de produtos químicos a partir do alcatrão vegetal tem, como etapa inicial, a destilação fracionada. Normalmente, são separadas quatro frações e um resíduo designado como piche vegetal. Os cortes de destilação são realizados com base na temperatura de vapor dos destilados, e os rendimentos médios obtidos em cada separação estão apresentados no Tabela 2.

Tabela 2. Cortes e rendimentos médios em destilação de alcatrão vegetal.

Descrição	% do alcatrão bruto
Fração A: até 105 oC (ácido pirolenhoso)	10,4
Fração B: 105-180 oC (óleo leve)	10,6
Fração C: 180-240 oC (óleo médio)	20,9
Fração D: acima de 240 oC (óleo pesado)	4,6
Resíduo (piche)	44,0
Perdas (calculadas por diferença)	9,5
Total	100,0

Fonte: (Carazza e Okuma, 2000).

Os óleos encontrados no alcatrão têm utilização na indústria química e alimentícia. Ao se examinar os constituintes do alcatrão, verifica-se que muitos deles ocorrem naturalmente em produtos de origem vegetal e podem ser utilizados como aditivos (flavorizantes) em alimentos produzidos industrialmente (Carazza e Okuma, 2000). Esse tem sido atualmente o principal uso comercial dessas frações do destilado de alcatrão.

O resíduo da destilação fracionada do alcatrão, também denominado piche de alcatrão, apresenta características estruturais parecidas com as encontradas em substâncias húmicas extraídas de solos ricos em carbono pirogênico (Novotny et al, 2003). Esses compostos são solúveis em meio alcalino e precipitam em pH ácido, à semelhança dos ácidos húmicos; porém são fortes inibidores da atividade microbiana (Coelho et al., 2003), utilizados, inclusive, no tratamento de madeira. O espectro de C^{13} RMN da fração ácido-húmica, extraída de uma amostra de piche de alcatrão de eucalipto, mostra que a diferença básica entre o piche e os ácidos húmicos extraídos de solos pirogênicos é devido à grande quantidade de grupos O-alkil presentes no alcatrão e à falta de grupos carboxílicos (Fig. 3). Dessa forma, a partir da demetilação e da formação de grupos funcionais carboxílicos no alcatrão vegetal, é possível moléculas semelhantes aos ácidos húmicos pirogênicos. Não apenas os carvões, mas também os subprodutos da carbonização vegetal são prováveis precursores das substâncias húmicas em solos ricos em material pirogênico como nos horizontes antrópicos das TPIs.

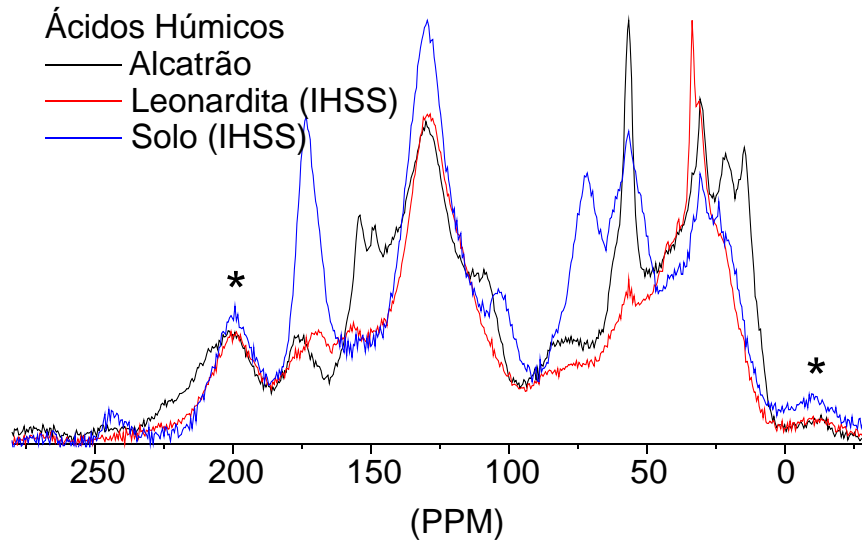


Fig. 3. Espectros de ^{13}C -RMN de ácidos húmicos padrões da IHSS e extraídos do alcatrão (Novotny et al. 2003).

Ácido pirolenhoso

O ácido pirolenhoso é a primeira fase a evaporar durante a destilação. Formado, em sua maior parte, por cerca de 92% de água, contém ainda 8% de compostos orgânicos, dos quais o ácido acético é o composto predominante (Almeida, 1982). Em razão disso é também chamado de vinagre de madeira. Entretanto, uma série de outros compostos orgânicos também está presente no ácido pirolenhoso (Fig. 4).

COMPOSTOS NA MATÉRIA ORGÂNICA DO BIOPIROL

ÁCIDO FÓRMICO	18%	<chem>OC=O</chem> Formic acid	<chem>CC(=O)O</chem> Acetic acid
ÁCIDO ACÉTICO	50%		
ACETONA	~ 4%	<chem>CC(=O)C</chem> Propan-2-one	<chem>CCC(=O)O</chem> Propionic acid
ÁCIDO PROPIÔNICO	~ 4%		
CICLOTENO	0,7%	<chem>CC1=COC1=O</chem> Cicloteno 2-Methyl-furan-3-one	<chem>Oc1ccccc1</chem> Phenol
FENOL	1%		
		<chem>Cc1ccccc1O</chem> 2-Methyl-phenol	<chem>Cc1cccc(O)c1</chem> 3-Methyl-phenol
			<chem>Cc1ccc(O)cc1</chem> 4-Methyl-phenol
GUAIACOL	1,70%	<chem>COC1=CC=C(O)C=C1</chem> 2-Methoxy-phenol	<chem>COC1=CC(=C(O)C=C1)OC</chem> 2,6-Dimethoxy-phenol
SIRINGOL	~2%		

Fig. 4. Compostos orgânicos componentes do ácido pirolenhoso e suas respectivas concentrações (Almeida, 1982).

A Produção de Carvão Vegetal e Subprodutos da Carbonização Vegetal no Brasil

O Brasil é responsável por 38,5% da produção mundial, havendo produzido cerca de 18 milhões de m³ de carvão vegetal originado de florestas cultivadas no ano de 2007, com um valor estimado de 1,9 bilhões de reais. Esse carvão tem, como destino principal, a indústria siderúrgica para a produção de ferro gusa e aço (AMS 2008). O processo de produção e uso do carvão vegetal no Brasil é reconhecido como um processo de desenvolvimento limpo, por promover a fixação de carbono atmosférico na forma de florestas cultivadas, condição esta reconhecida por órgãos internacionais no repasse de recursos na forma de créditos de carbono (Plantar, 2002). Além do carvão são produzidos o alcatrão e o extrato pirolenhoso, que já são obtidos comercialmente por meio de lavadores de fumaça, tais componentes são industrializados para produção de diversos produtos para fins agrícolas, para a indústria química e alimentícia. Embora existam experiências no sentido de melhorar o aproveitamento da fumaça, o volume processado ainda é muito baixo, correspondendo a bem menos de 1% do total produzido pela indústria carvoeira brasileira. O Brasil teria potencial de produção de 2,5 milhões de toneladas, equivalentes a 10 milhões de barris de petróleo.

Outro importante subproduto da carbonização vegetal é o fino de carvão gerado no processo, que, em alguns casos, representa até 15% do carvão produzido. No Japão, o fino de carvão associado ao ácido pirolenhoso tem sido usado como adubo orgânico a algumas décadas (Kishimoto e Sugiura, 1985; Du et al., 1998).

O desenvolvimento de processos que permitam transformar o carvão e seus subprodutos em compostos com características apropriadas para o uso como condicionantes do solo e adubos orgânicos, como reatividade e estabilidade, não só é altamente desejável como também estratégico para o setor florestal brasileiro. Um produto com tais características pode agregar valor ao carvão vegetal, tanto por criar um uso inovador para um produto tradicional, quanto por ser objeto de captação de recursos destinados ao mecanismo de desenvolvimento limpo, uma vez considerada sua capacidade de transferência de carbono da atmosfera para compartimento estável, que é a matéria orgânica do solo. Esse processo, além de uma alternativa econômica, representa um benefício ambiental por incentivar a recuperação da fumaça, evitando os prejuízos por ela causados. O produto gerado apresenta constituição exclusivamente orgânica e é derivado de um recurso renovável, características que o elegem como apto a ser utilizado em sistemas orgânicos de produção. Existe ainda tecnologia adequada à produção de carvão e subprodutos em pequenas propriedades familiares, o que abre uma boa alternativa para geração de renda para essa parcela da população.

Potencial Produção de Fertilizantes e Condicionadores de Solos a partir de Carvão e Subprodutos da Carbonização Vegetal

A maior parte dos solos brasileiros agricultáveis são ácidos, com baixa capacidade de retenção de nutrientes e baixa fertilidade. O solo é, portanto, um fator limitante para a produtividade e sustentabilidade de sistemas de produção agrícola em ambientes tropicais. A matéria orgânica do solo apresenta um importante papel no incremento da capacidade de retenção de nutrientes, estruturação e retenção de umidade em solos tropicais, além de representar um importante compartimento para a fixação do carbono atmosférico. Porém, devido ao manejo agrícola, esses compostos podem ser degradados, perdendo sua função como condicionador das propriedades físicas e químicas, além de liberar gases causadores do efeito estufa. Portanto a estabilidade e a reatividade da matéria orgânica são fatores fundamentais na escolha de um adubo orgânico, tanto sob o ponto de vista agrícola quanto sob o ponto de vista das mudanças climáticas globais.

Em alguns solos tropicais, onde se observa histórico de queima da vegetação, podem ser encontrados compostos orgânicos pirogênicos na fração humificada, como no caso das Terras Pretas Arqueológicas na Amazônia (Glaser et al., 2001), em solos sob Cerrado (Roscoe et al., 2001) ou em áreas sob vegetação rupestre de altitude na Mantiqueira e no Espinhaço (Benites et al., 2001). Os compostos orgânicos encontrados nesses solos têm, em comum, características como alta resistência à termodegradação, além de apresentarem cargas eletroquímicas, devido à presença de grupos funcionais, as quais contribuem para o aumento da capacidade de troca de cátions (CTC) e para a estruturação do solo, por meio da interação com a matriz mineral. Dada sua alta estabilidade e reatividade, esses compostos apresentam grande importância como condicionadores de solos tropicais, a sua maioria fortemente intemperizados, onde a fração argila apresenta baixa CTC e estão submetidos a condições climáticas que favorecem a mineralização da matéria orgânica.

A gênese da matéria orgânica de alta estabilidade nesses solos, que está relacionada ao carbono pirogênico, tem sido atribuída a transformações químicas e bioquímicas de resíduos carbonificados, resultantes da queima natural ou induzida da biomassa vegetal. Em outras palavras, pode-se dizer que esses compostos são derivados de carvões e subprodutos de queima incorporados ao solo após um incêndio natural ou proveniente da ação antrópica. Diversos trabalhos mostram que, pela ação de enzimas (Crawford e Gupta, 1993, Hofrichter e Fritsche, 1997) ou pela oxidação química de carvões (Kumada, 1983, Skjemstad et al., 1996, Golchin et al., 1997), podem ser formados compostos de alta reatividade, que apresentam grupos funcionais capazes de reter água e nutrientes no solo (Piccolo et al., 1996) e que conservam a estrutura policíclica aromática que lhes confere estabilidade. Substâncias húmicas têm sido produzidas comercialmente a partir de carvões minerais em vários países (Rausa et al., 1994), e sua comercialização tem ganhado espaço cada vez maior no mercado mundial. O Brasil importa esses produtos que são utilizados principalmente na fruticultura e olericultura irrigada, os quais são usados como condicionadores de solo, aumentando a eficiência do uso de fertilizantes e reduzindo o consumo de água para irrigação.

Síntese de Ácidos Húmicos a partir de Carvão Vegetal

É possível obter compostos semelhantes aos ácidos húmicos encontrados em solos ricos em carbono pirogênico, a partir do tratamento químico de amostras de carvão vegetal (Trompowsky et al., 2005). Amostras de carvão vegetal, quando tratadas com ácido nítrico a quente e posteriormente extraídas com hidróxidos, resultam em material húmico de alta aromaticidade e ricos em grupos carboxílicos (Araújo, 2004; Trompowsky et al., 2005). Ácidos húmicos derivados do tratamento ácido de carvão vegetal de *Mimosa tenuiflora* e *Aspidospema pyrifolium*, duas espécies nativas do Brasil, apresentam grupos funcionais em quantidade compatível com a encontrada em ácidos húmicos extraídos de Terra Preta de Índio (Tabela 3).

Tabela 3. Teores de grupos funcionais totais, carboxílico (COOH) e fenólicos (OH) de ácidos húmicos sintetizados a partir de carvão vegetal e de ácido húmico extraído de Terra Preta de Índio.

	Tratamento ¹ °C	COOH	OH cmol.kg ⁻¹	Acidez Total
<i>Mimosa tenuiflora</i> ² (Jurema Preta)	400	220,20	53,67	273,87
	450	256,08	44,63	300,71
	500	380,65	69,89	450,54
<i>Aspidospema pyrifolium</i> ² (Pau Pereiro)	400	460,31	74,72	535,02
	450	403,59	60,69	464,29
	500	468,51	77,41	545,93
AH Terra Preta de Índio ³		444,50	217,50	662,00

¹Temperatura final de carbonização na obtenção do carvão vegetal do qual foi sintetizado o ácido húmico, ²extraído de Araújo, 2004; ³extraído de Cunha et al. (2007).

Nas amostras sintetizadas a partir de carvão vegetal, observa-se o predomínio dos grupos carboxílicos, que são os grupos de maior atividade em solos tropicais ácidos. O espectro de Ressonância Magnética Nuclear do C^{13} do ácido húmico sintetizado a partir do carvão mostra que essa molécula é basicamente formada por uma estrutura aromática associada a grupos funcionais contendo O na forma carboxílica (Fig. 5).

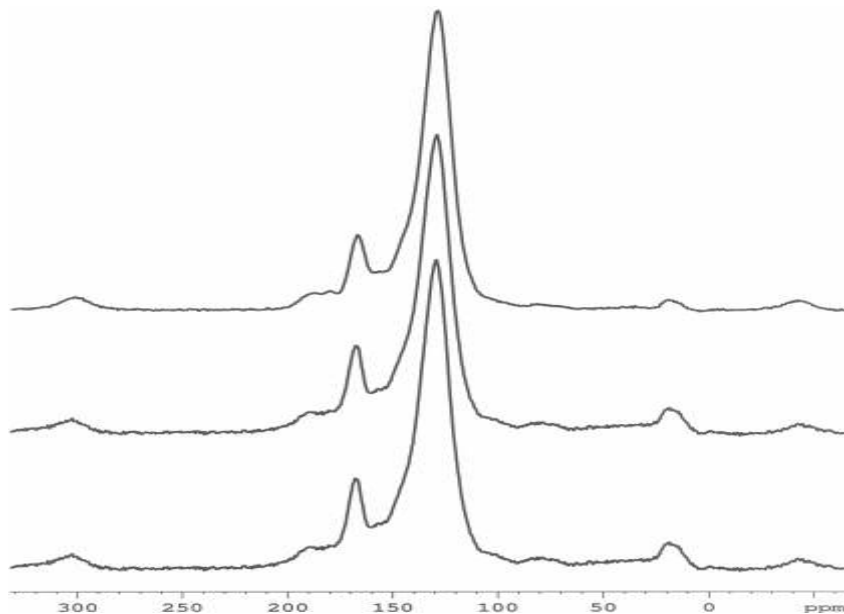


Fig. 5. Espectro ^{13}C CP-MAS RMN de ácidos húmicos obtidos a partir do tratamento ácido de carvão de *Eucalyptus saligna* produzido a diferentes temperaturas de carbonização (400°C em baixo, 450°C no meio e 500°C acima) (Trompowsky et al, 2005).

Dessa forma, pode-se sugerir que a estrutura dessas moléculas seja formada simplesmente por um núcleo aromático policondensado, quase grafítico e com grupos carboxílicos em sua periferia (Fig. 6). À semelhança das substâncias húmicas encontradas nas TPI, os ácidos húmicos de carvão são estáveis e ao mesmo tempo reativos, representando um material orgânico de grande interesse para utilização como condicionador de solos, ou para associação com nutrientes minerais, formando fertilizantes organo-minerais.

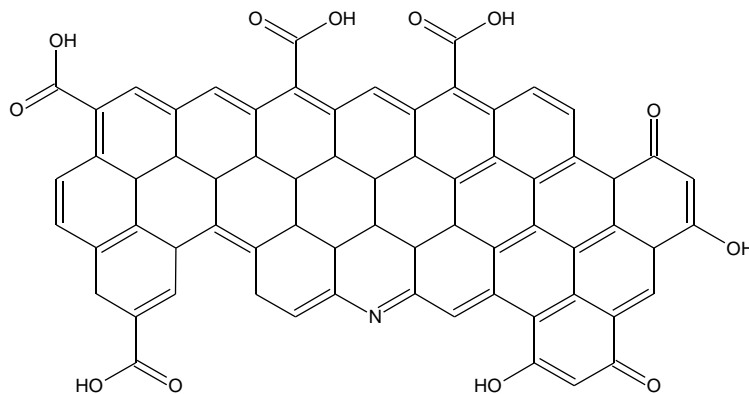


Fig. 6. Desenho esquemático da estrutura química de um ácido húmico sintetizado a partir de carvão vegetal.

Utilização de Carvão na Produção de Fertilizantes Orgânicos e Substratos

Produção de condicionadores orgânicos

Experimentos avaliando a biodegradação de resíduos ligno-celulósicos (ex: aparas de grama, pó de coco) demonstraram o efeito sinérgico do fino de carvão sobre o desenvolvimento de actinomicetos (Coelho et al., 2003). Em substratos contendo fino de carvão, observou-se maior crescimento de actinomicetos que em substratos sem fino de carvão. Considerando-se que o experimento foi conduzido em ambiente fechado, uma das hipóteses para o efeito positivo do carvão pode estar relacionada à alta capacidade do carvão em reter metabólitos orgânicos, reduzindo, assim, a toxidez causada no meio pela própria atividade dos microorganismos.

A partir desses resultados foram conduzidos experimentos de compostagem em escala piloto, utilizando-se o fino de carvão como aditivo aos resíduos orgânicos ligno-celulósicos. Nesse trabalho, observou-se que as pilhas em que o carvão foi utilizado, não só apresentaram uma melhor capacidade de retenção de umidade, mas também uma melhor aeração proporcionada por esse material, o que impediu a formação de aglomerados que causam bolsões de anaerobiose, retardando o processo. Após o período de maturação das pilhas, os tratamentos com carvão obtiveram um maior rendimento de produto após peneiramento, uma vez que o carvão facilitou a desagregação das partículas. Como resultado, obteve-se um produto de cor escura e odor agradável, com características químicas e físicas apropriadas ao uso como condicionadores de solo e substrato agrícola (Tabela 4). À semelhança das Terras pretas de Índio, esse material teve, na sua constituição, resíduos vegetais e carvões.

Tabela 4. Características químicas do substrato agrícola obtido a partir da compostagem de aparas de grama, carvão e fosfato bicálcico (Benites, 2006).

pH	M.O.	N	P	K	Ca	Mg	S	Na
g/kg								
7,6	310,22	12,78	7,08	9,83	19,45	2,01	5,35	0,68
Mn	Fe	Zn	Cu	Cr	Co	Cd	Pb	Mo
Mg/kg								
943	7870	59	18	6,6	1,0	0,9	21	1,4

M.O. - Matéria Orgânica obtida por calcinação.

Utilização de Fino de Carvão como Substrato para Mudas

As características do fino do carvão mencionadas acima fez com que se desenvolvesse um trabalho para avaliar seu uso como substrato para produção de mudas. Conceitua-se como “substrato” o meio em que se desenvolvem as raízes das plantas cultivadas fora do solo *in situ* (Kämpf, 2000). Considera-se, como sua função primordial, prover suporte às plantas nele cultivadas (Kämpf, 2000 e Röber, 2000), podendo ainda regular a disponibilidade de nutrientes (Kämpf, 2000) e de água (Fonteno, 1996). Os melhores substratos devem apresentar, entre outras importantes características, fácil disponibilidade de aquisição e transporte, ausência de patógenos, riqueza em nutrientes essenciais, pH adequado, boa textura e estrutura (Silva et al., 2001). As propriedades físicas e químicas dos substratos podem variar muito. Dessa forma, é importante conhecê-los para poder adaptá-las às diferentes circunstâncias de uso (Verdonk et al., 1981). Entre as características físicas importantes na determinação da qualidade de um substrato destacam-se: densidade, porosidade total, espaço de aeração, boa retenção de água a baixas tensões de sucção.

Esse trabalho desenvolvido por Souza et al. (2006) teve como objetivo avaliar o efeito do uso do carvão como substrato alternativo e da aplicação de extrato pirolenhoso em diferentes substratos para produção de mudas de cajuru (*Arrabidaea chica* Verlot.) cultivadas em viveiro. O experimento foi desenvolvido no delineamento completamente casualizado em esquema fatorial 5^2 correspondendo a cinco tipos de substratos (Plantmax®, terriço, carvão, areia e areia+carvão), com e sem aplicação do extrato pirolenhoso em uma concentração de 0.3% em quatro aplicações em intervalos semanais. O experimento teve três repetições e cada parcela experimental foi composta de nove tubetes. Aos 60 dias após o plantio, foram realizadas avaliações do desenvolvimento das plantas. Os substratos foram avaliados quanto à capacidade de retenção da água. As amostras foram saturadas e então sucessivamente submetidas a uma pressão de 1.0; 1.5; 1.8; 2.0 e 2.3 pF na mesa de tensão. Os resultados mostraram que as mudas de cajuru tiveram um maior crescimento no substrato carvão (Tabela 5).

Tabela 5 - Valores médios da altura, do número de rebrotos, do peso seco da parte aérea e do peso seco das raízes de Cajuru (*Arrabidaea chica* Verlot.), com 90 dias após a instalação do experimento.

Substratos	Altura (cm)	N. Rebrote (unidade)	Parte Aérea (g)	Raiz (g)
Terriço	24.40 b	2.19 bc	2.032 bc	0.323 b
Carvão	30.43 a	2.21 bc	2.415 a	0.407 a
Plantmax	27.01 ab	3.21 a	2.153 ab	0.357 ab
Areia	15.39 d	2.67 ac	1.556 d	0.188 c
Areia+carvão	18.87 c	2.77 ac	1.795 bd	0.220 c

Médias seguidas da mesma letra na vertical não apresentam diferenças pelo Teste de Tukey ($p < 0.05$).

A adição de carvão na areia permitiu um crescimento das mudas de cajuru, entretanto o substrato areia não se mostrou adequado. As mudas de cajuru apresentaram um menor número de rebrotos no substrato carvão e terriço em relação ao substrato areia, areia + carvão e Plantmax (Tabela 5). A quantidade de matéria seca da parte aérea e do sistema radicular foram maiores no substrato carvão e Plantmax em comparação com outros substratos testados. O substrato areia + carvão e areia foram os que apresentaram as menores quantidades de matéria seca da parte aérea.

Na Figura 7, são apresentadas as curvas de retenção de umidade dos substratos testados. O Plantmax e o carvão apresentam características semelhantes quanto à retenção de água, suas curvas são paralelas e sempre se mantêm acima dos demais substratos, indicando uma maior retenção de água em toda a faixa de tensão estudada. A areia foi o substrato que menos reteve água em todas as tensões.

Próximos Passos para a Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação

A possibilidade da transformação de uma parte do carbono presente nos resíduos orgânicos vegetais em formas mais estáveis, através de métodos de pirólise, abre perspectivas para utilização desses novos produtos como condicionadores do solo com potencial de aumentar a qualidade de solos pobres ou degradados, seja no aumento da capacidade de troca de cátions e conseqüente aumento da retenção e eficiência de nutrientes adicionados, como também no aumento da qualidade física do solo pelo aumento da capacidade de reter água facilmente disponível para as plantas e aumentar a agregação do solo. O desenvolvimento de tecnologia específica de carbonização visando à utilização do produto como condicionador do solo e as avaliações agrônômicas e ambientais da utilização desses produtos no solo constituem um desafio para a pesquisa em várias partes do mundo.

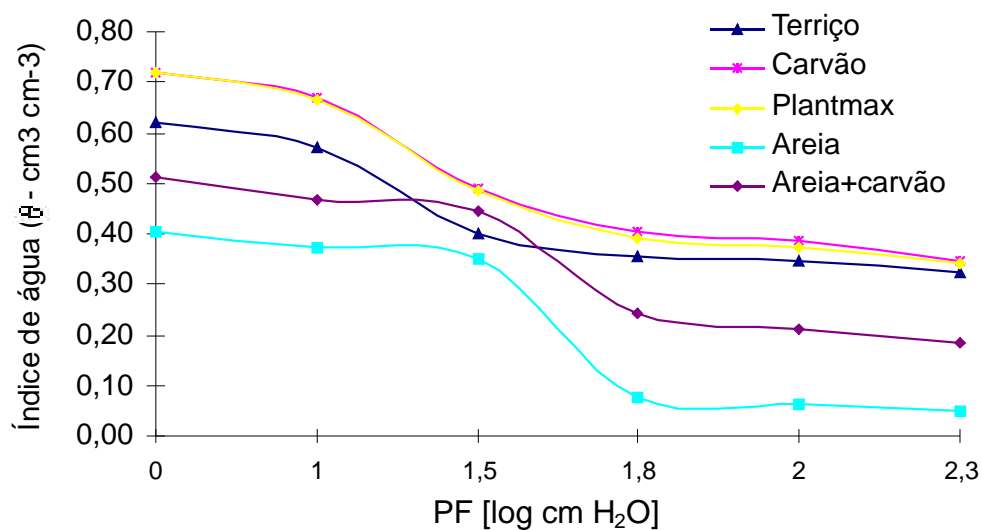


Fig. 7. Curva da retenção de água em diferentes substratos para produção de mudas.

Um efeito adicional da incorporação ao solo de carbono estabilizado de origem vegetal é a redução de emissões e seqüestro de carbono para a atmosfera, com conseqüentes benefícios para a mitigação das reduções causadas pelas práticas agrícolas e como forma de atenuar os efeitos das mudanças climáticas globais.