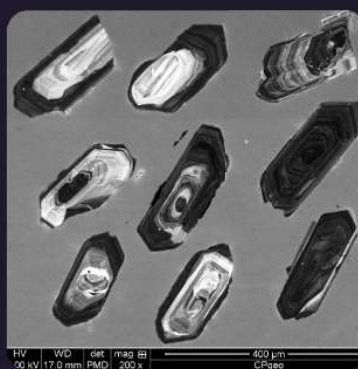


SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOLOGIA

# CONTRIBUIÇÕES À GEOLOGIA DO RIO GRANDE DO SUL E DE SANTA CATARINA

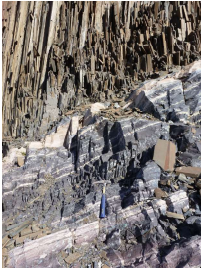
ANDRÉA RITTER JELINEK  
CARLOS AUGUSTO SOMMER



## IMAGENS DE CAPA E CONTRACAPA



Fotografia aérea do setor norte da Serra do Segredo, em Caçapava do Sul, RS, onde se destacam a Pedra do Segredo, em primeiro plano, e a Pedra da Abelha, logo à esquerda, geofórmulas esculpidas sobre conglomerados fluviais da Bacia do Camaquã. Ao fundo, alguns cerros formados por rochas metamórficas e o imponente alto de Caçapava, sobre granitoides diversos, rochas que registram diferentes momentos do Ciclo Brasileiro no sul do Brasil. A paisagem faz parte do Geoparque Caçapava Aspirante Unesco e é parcialmente inserida no Parque Natural Municipal da Pedra do Segredo. Imagem obtida por Felipe Guadagnin. Legenda de André Weissheimer de Borba e Felipe Guadagnin.



Contato entre rochas sedimentares da Bacia do Paraná e soleira de diabásio do Grupo Serra Geral. Pedreira Carollo, região de Montenegro, RS. Imagem e legenda de Carlos Augusto Sommer.

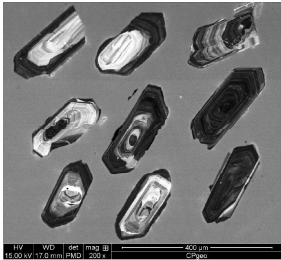


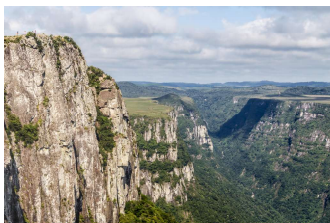
Imagem de catodoluminescência de cristais de zircão pertencentes ao Batólito de Florianópolis. Aumento de 200 vezes. Imagem e legenda de Andréa Ritter Jelinek.



Fotografia aérea oblíqua apresentando a morfologia da região correspondente ao extremo do Litoral Norte do RS, à direita observa-se a cidade de Torres/RS. Em primeiro plano observa-se a morfologia do campo de dunas localizado no Parque Estadual de Itapeva. Unidade essa localizada sobre o sistema Laguna-Barreira IV (holocênico). Logo após o baixio, na retaguarda do campo de dunas, ocorre a morfologia do sistema Laguna-Barreira III (pleistocênico). Ao fundo, com o relevo mais elevado, encontra-se a Formação Serra Geral pertencente à Bacia do Paraná. Imagem obtida por Eduardo H. R. Russo. Legenda de Eduardo Guimarães Barboza.



Minas do Camaquã, Mineração de cobre a céu aberto, Caçapava do Sul. Imagem e legenda de Carlos Augusto Sommer.



Derrames ácidos do Grupo Serra Geral, Bacia do Paraná, na região do Cânion Fortaleza, Parque Nacional da Serra Geral, Cambará do Sul, RS. Imagem licenciada de Depositphotos. Legenda de Carlos Augusto Sommer.



PUBLICAÇÃO ESPECIAL DO NÚCLEO RS/SC DA  
SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOLOGIA

**CONTRIBUIÇÕES À GEOLOGIA  
DO RIO GRANDE DO SUL E  
DE SANTA CATARINA**

**Editores**

Andréa Ritter Jelinek  
Carlos Augusto Sommer



Porto Alegre, RS, 2021.

É proibida a reprodução total ou parcial desta obra, sem autorização expressa dos autores ou da editora. A violação importará nas providências judiciais previstas no artigo 102, da Lei nº 9.610/1998, sem prejuízo da responsabilidade criminal. Os textos deste livro são de responsabilidade de seus autores.

ISBN E-book: 978-65-89013-03-7

Edição: 1ª

Ano: 2021

**Editora Compasso Lugar Cultura**

Responsável André Suertegaray Rossato

Porto Alegre - RS - Brasil

Telefones (51) 984269928

compassolugarcultura@gmail.com

www.compassolugarcultura.com

Editores:

Andréa Ritter Jelinek

Carlos Augusto Sommer

Diagramador: Gabriel Zambom

Revisão de Texto: Gustavo Saldivar

**Conselho Editorial Compasso Lugar Cultura**

Álvaro Heidrich

Carlos Henrique Aigner

Cláudia Luíza Zeferino Pires

Dakir Larara Machado da Silva

Dilermando Cattaneo da Silveira

Dirce Maria Antunes Suertegaray

Helena Copetti Callai

Jaeme Luiz Callai

João Osvaldo Rodrigues Nunes

Laurindo Antonio Guasselli

Maíra Suertegaray Rossato

Nelson Rego

Roberto Verdum

Rosa Maria Vieira Medeiros

Sinthia Batista

**Realização**

**Sociedade Brasileira de Geologia**

**Diretoria Núcleo RS/SC:**

Diretora Presidente: Andréa Ritter Jelinek

Diretor Vice-Presidente: Carlos Augusto Sommer

Diretor Secretário: Lucas Debatin Vieira

Diretor Financeiro: Breno Leitão Weichel

Diretora de Programação Técnico-Científica: Rosemary Hoff

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

J47c

Jelinek, Andréa Ritter.

Contribuições à Geologia do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina /Andréa Ritter Jelinek e Carlos Augusto Sommer, organização – Sociedade Brasileira de Geologia - Porto Alegre : Compasso Lugar-Cultura, 2021.

504 p., il. col.

ISBN E-book: 978-65-89013-03-7

<https://doi.org/10.29327/537860>

1. Geologia 2.Sociedade Brasileira de Geologia 3. Coletâneas de textos I. Jelinek, Andréa Ritter II. Sommer, Carlos Augusto III. Título

CDD 551

CDU 551.1/.4

Bibliotecária Responsável: Catarina Strapação Guedes Vianna CRB-10/2469

Índices para catálogo sistemático:

1. Geologia 551

# ***Macro-charcoal* como indicador de incêndios em turfeiras permianas no Sul da Bacia do Paraná**

Margot **Guerra-Sommer**<sup>1\*</sup>, Isabela **Degani-Schmidt**<sup>1</sup>, André **Jasper**<sup>2</sup>, José Rafael Wanderley **Benício**<sup>2</sup>, Miriam **Cazzulo-Klepzig**<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
<sup>2</sup> Programa de Pós-Graduação em Ambiente e Desenvolvimento, Universidade do Vale do Taquari

\* autor correspondente: [margot.sommer@ufrgs.br](mailto:margot.sommer@ufrgs.br)

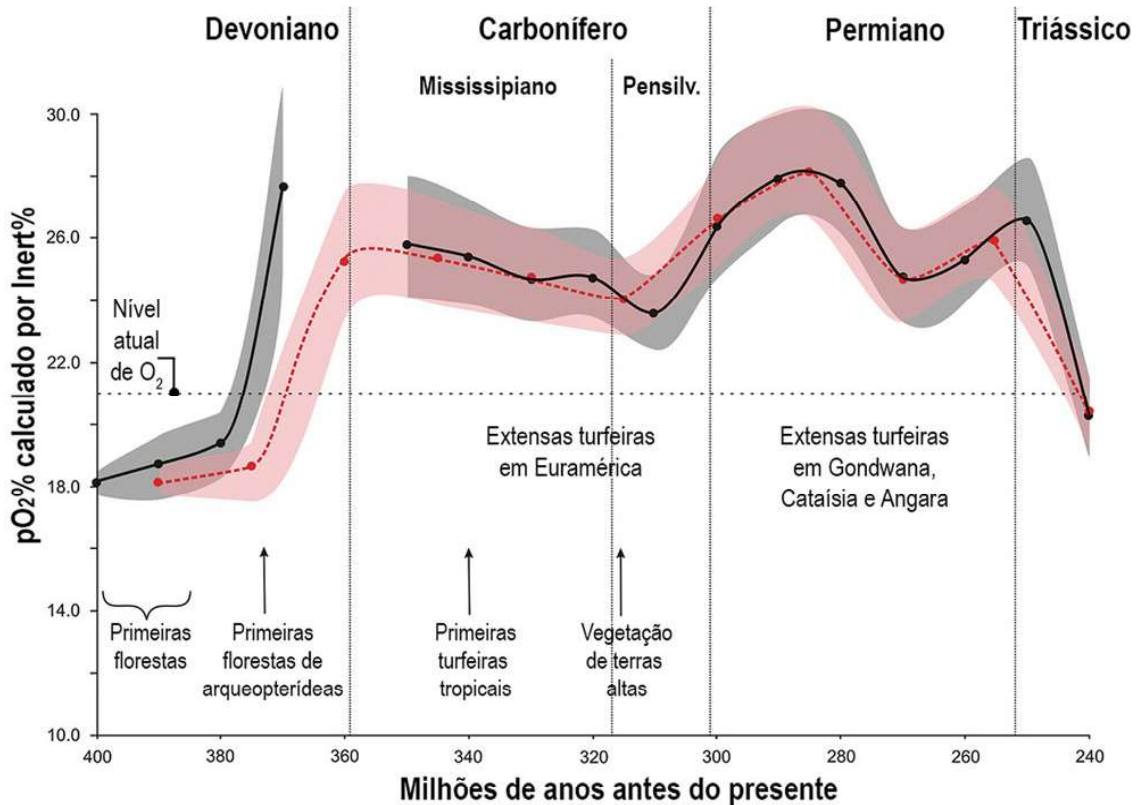
## **1 INTRODUÇÃO**

Evidências de incêndios vegetacionais, inferidas pela ocorrência de fragmentos de *charcoal* e de macerais do grupo das inertinitas, têm sido registradas, com maior ou com menor frequência, em depósitos sedimentares desde o Siluriano, com o advento das primeiras plantas de ambientes terrestres, indicando a presença de fogo em uma escala global nos últimos 400 milhões de anos (Preston & Schmidt, 2006; Glasspool & Scott, 2010).

Além da influência das variações climáticas, os níveis de O<sub>2</sub> atmosférico (pO<sub>2</sub>) foram um forte determinante das atividades de incêndio, em diferentes intervalos geológicos. As primeiras plantas terrestres do Siluriano, principalmente herbáceas, já eram passíveis de ignição, mas o fogo só se tornou frequente no Devoniano, quando as folhas e os caules lenhosos se tornaram mais complexos, sendo formados por tecido condutor especializado (Glasspool & Scott, 2010).

A alta representação global de *charcoal* em camadas de carvão e em sedimentos a elas associados nas faixas tropicais, durante o Mississipiano-Pensilvaniano, no continente Euroamericano, indicou que incêndios foram intensos e frequentes, nesse intervalo. Isso poderia estar associado aos altos níveis estimados de pO<sub>2</sub> (28%), em relação aos índices atuais (21%) (Fig. 1), o que teria potencializado a combustão do material vegetal, sob altas temperaturas e sob chuvas moderadas (Glasspool & Scott, 2010).

As turfeiras têm sido utilizadas como indicadores de alterações climáticas globais, por serem repositórios de dados climáticos pretéritos, contribuindo para o sequestro global de carbono, funcionando como reservatórios de água e abrigando biodiversidades endêmicas. As altas taxas de acumulação de material orgânico autóctone ou hipoaútóctone e a sensibilidade hidro-



**Figura 1** - Evolução dos sistemas de incêndios do Neopaleozoico. O cálculo das curvas de oxigênio foi baseado em teores de inertinita, em carvões agrupados a cada 10 milhões (linha preta) e a cada 15 milhões (tracejado vermelho) de anos (adaptado de Glasspool *et al.*, 2015).

climática (influência do clima sobre os corpos d'água continentais) guardam informações relacionadas à dinâmica da matéria orgânica, à evolução das paisagens, a mudanças climáticas e aos ciclos de poluição atmosférica locais, regionais e globais. Esses sistemas fornecem um registro de inúmeros indicadores (*proxies*), de origem biótica e abiótica, dos quais é possível extrair informações para as reconstruções ambientais (p. ex., Van Hoof *et al.*, 2008; Couwenberg *et al.*, 2011).

A ocorrência de incêndios vegetacionais no Permiano, durante aproximadamente 150 milhões de anos de domínio da Flora *Glossopteris*, no sul da Bacia do Paraná, paleogeograficamente localizada em latitudes temperadas, tem sido documentada, em diferentes ambientes, representados por fácies periglaciais, bem como por fácies relacionadas a ambientes de turfeiras fluvio-parálidas

pós-glaciais e, no topo da sequência permiana, em fases regressivas, de tendência continental (p. ex., Jasper *et al.*, 2011a, 2011b; Degani-Schmidt *et al.*, 2015; Manfroi *et al.*, 2015; Benício *et al.*, 2019a, 2019b).

Investigações em camadas de carvão e em sedimentos associados, em diferentes jazidas da Bacia do Paraná, suscitaram hipóteses de que incêndios florestais poderiam ter sido eventos recorrentes nestes ambientes, incluídos em cinturões temperados, em que, potencialmente, prevaleceriam condições sempre úmidas (Jasper *et al.*, 2011a; Degani-Schmidt *et al.*, 2015; Benício *et al.*, 2019a). Todavia, a presença de grandes quantidades de inertinita e de *charcoal* em carvões permianos do Gondwana, em cinturões climáticos temperados, foi atribuída, por Glasspool (2003), a diferentes fatores atuantes durante a deposição das turfeiras, tais como exposição subaérea, deposição em

clima frio e atividade fúngica.

Dessa forma, na tentativa de encontrar respostas a evidências de possíveis ocorrências de incêndios em ambientes de turfeiras desenvolvidas em latitudes temperadas, no intervalo Sakmariano-Artinskiano do Gondwana sul-brasileiro, análises detalhadas, de cunho anatômico e geoquímico, integraram-se a estudos prévios, de cunhos sedimentar, palinológico e paleobotânico, conduzidos em amostras provenientes de jazidas de carvão do sul da Bacia do Paraná (p. ex., Jasper *et al.*, 2011a, 2011b; Degani-Schmidt *et al.*, 2015; Benício *et al.*, 2019a).

Esses estudos, utilizando técnicas diversas (microscopia eletrônica de varredura (MEV) e microscopia ótica de luz transmitida e de luz incidente com fluorescência), demonstraram a eficiência do *charcoal* como *proxy* para inferir correlações entre os eventos de incêndio, os diferentes fatores climáticos e, também, os índices de O<sub>2</sub> atmosférico vigentes durante a deposição de turfeiras no sul da Bacia do Paraná, no intervalo Sakmariano-Artinskiano. Os resultados integrados, obtidos por Degani-Schmidt *et al.* (2015) e por Degani-Schmidt & Guerra-Sommer (2016a, 2016b) na jazida de carvão do Faxinal (RS) e aqueles obtidos por Benício *et al.* (2019a) na camada Barro Branco da jazida Santa Catarina (SC), aqui sintetizados, demonstram a efetividade das análises.

## 2 SÍNTESE GEOLÓGICA

A jazida de carvão do Faxinal (Fig. 2), incluída na supersequência Gondwana I, definida para a Bacia do Paraná por Milani *et al.* (2007), explorada a céu aberto e já exaurida, estava localizada no cinturão de afloramento sudeste da Formação Rio Bonito, no estado do Rio Grande do Sul (em 30° 15' 52,6" S, 51° 41' 53,8" W). O fechamento da mina ocorreu em 2009, após o esgotamento do carvão e a reabilitação do local.

As análises desenvolvidas por Degani-Schmidt *et al.* (2015) foram realizadas, especificamente, nas interfaces da camada de carvão superior (S) com uma camada intercalada de tonstein (Fig. 3A), datada de 285,42 ± 1,2 / -2,1 Ma, correspondente ao Artinskiano (Griffis *et al.*, 2018). O tonstein corresponde à deposição de cinza vulcânica sobre a turfeira (Simas *et al.*, 2013) e representa um evento geologicamente instantâneo (Prothero, 1990; DiMichele & Falcon-Lang, 2011). Com espessura média de 10 cm, o tonstein contém uma associação bem preservada de fitofósseis da Flora *Glossopteris* (Guerra-Sommer, 1988). A macroflora, preservada como compressões carbonificadas, é predominantemente gimnospérmica, e as folhas de glossopterídeas correspondem a 78% da associação (Guerra-Sommer, 1992; Boardman *et al.*, 2012).

A ocorrência de *charcoal* e de inertinitas em turfeiras permianas, no estado de Santa Catarina, foi registrada por Benício *et al.* (2019a), no afloramento Porongos (Fig. 2) localizado no município de Lauro Müller (28° 25' 21,4" S, 49° 26' 24,0" W). A camada de carvão Barro Branco, ali exposta, é composta por uma camada de carvão na base (informalmente denominada Banco), por siltitos e por arenitos, intercalados com finas camadas intermediárias de carvão (informalmente denominadas Coringa ou Quadração) e uma camada carbonácea, de espessura variável, na parte superior (informalmente chamada Forro). Esta camada tem uma distribuição geográfica ampla e contínua, com espessura média variando de 1,66 m a 2,27 m.

Datações absolutas não foram definidas para o intervalo de geração de carvão no estado de Santa Catarina. Holz *et al.* (2010) sugeriram que estas jazidas, incluídas no Membro Siderópolis da Formação Rio Bonito, em Santa Catarina e no Paraná, teriam idade Artinskiana. Essa idade relativa está de acordo com a idade de 286 ± 3 Ma (Artinskiano), obtida por Jurigan *et al.* (2019) para a

jazida de carvão de Figueira, no estado do Paraná, no nordeste da bacia, e está correlacionada ao intervalo de deposição da jazida de Faxinal (285,42 ± 1,2 / -2,1 Ma, conforme Griffis *et al.*, 2018).

O conjunto das características faciológicas indica que as turfeiras, que geraram as atuais jazidas de carvão na Bacia do Paraná, desenvolveram-se adjacentes a ambientes estuarinos, deltaicos e, principalmente, costeiros, relacionados a sistemas laguna-barreira (Holz, 2003). As comunidades vegetais representantes da Flora *Glossopteris*, preservadas em fácies sedimentares relacionadas a esses ambientes, estariam incluídas na faixa climática temperada, em latitude aproximada de 50°S, durante o período climático pós-glacial (Ziegler *et al.*, 2003; Lima-rino *et al.*, 2014). Essas associações litorâneas foram sepultadas pela inundação marinha, registrada como uma erosão superficial transgressiva, observada no topo dos estratos que contêm carvão (Holz *et al.*, 2010).

O intervalo de ocorrência de jazidas de carvão no sul da Bacia do Paraná foi relacionado com a zona informal *Glossopteris-Brasilodendron*, de Iannuzzi & Souza (2005), enquanto as palinofloras, em um conceito mais amplo, foram incluídas na zona *Vittatina costabilis*, dentro da estrutura palinoestratigráfica da Bacia do Paraná (Souza *et al.*, 2021).

### 3 MÉTODOS DE IDENTIFICAÇÃO E DE ANÁLISE DE CHARCOAL

Fragmentos de *charcoal* são resquícios da combustão incompleta de material vegetal, cujos compostos são volatilizados, remanesecendo um resíduo de alto conteúdo de carbono, tornando o material vegetal menos biodegradável e promovendo sua preservação durante a diagênese. O *charcoal*, por ser inerte, caracteristicamente apresenta boa

preservabilidade no registro geológico, e a anatomia vegetal permite identificação taxonômica do material (Scott, 2010).

A identificação de *charcoal* deve atender aos seguintes requisitos, estabelecidos por Scott (2010): sujar as mãos ao toque; ter coloração preta; trazer brilho acetinado; exibir textura quebradiça ou de pó; conter fraturamento em cubos de material lenhoso (macroscópicos) e em farpas/fibras alongadas ou pulverizadas (microscópicas); mostrar anatomia preservada (observada sob lupa de mão ou sob microscópio estereoscópico); e apresentar homogeneização da lamela média com as paredes celulares (sob MEV).

Scott (2010) definiu três tipos de *charcoal*, com base nas dimensões dos fragmentos. São eles: 1) *charcoal* macroscópico – maiores do que 1 mm; 2) *charcoal* mesoscópico – entre 180 µm e 1 mm; 3) *charcoal* microscópico – menores do que 180 µm.

A maior parte do *charcoal* macroscópico (*macro-charcoal*) é produzida por incêndios de superfície. Geralmente, partículas menores de *charcoal* são resultado de incêndios que atingem maiores temperaturas (incêndios de dossel), ou de material queimado em subsuperfície, como no caso de incêndios em turfeiras (Scott, 2010).

A abundância e a refletância de macerais do grupo da inertinita, enquanto componentes de camadas de carvão e de rochas associadas, identificados em amostras analisadas em microscopia óptica de luz incidente (Bustin *et al.*, 1989), são indicativas de subprodutos de incêndios florestais e sinônimos de *charcoal* (Scott & Glasspool, 2007).

Guo & Bustin (1998), Scott & Glasspool (2007) e McParland *et al.* (2009) demonstraram que existe correlação positiva entre temperatura de formação do *charcoal*



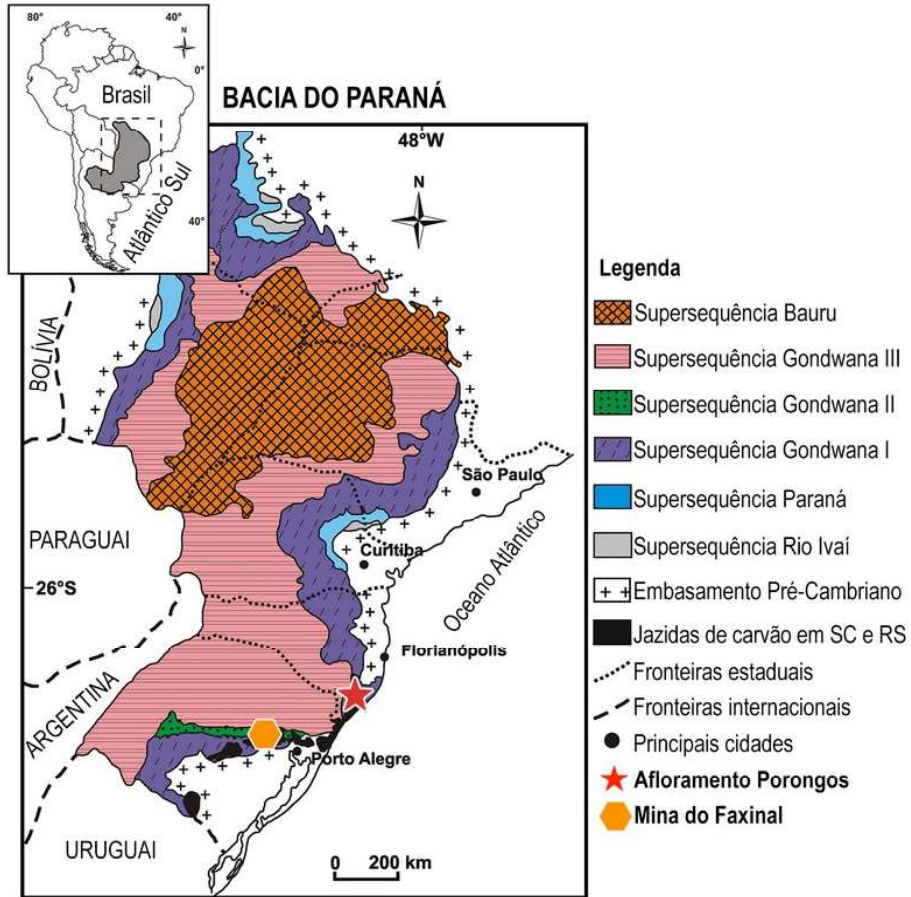


Figura 2 - Mapa de localização do afloramento Porongos (SC) e da mina do Faxinal (RS), e arcabouço estratigráfico da Bacia do Paraná (adaptado de Milani *et al.*, 2007).



Figura 3 - Nível de ocorrência de grandes fragmentos de lenhos queimados na mina do Faxinal (RS). A) Detalhe do tonstein, intercalado na camada de carvão S; B) Seção transversal de lenho queimado comprimido (Pb-4587A), em bloco polido, sob óleo, com objetiva de 10x, em luz branca refletida, mostrando organização em “sanduíche” inertinita-vitrinita-inertinita (fusênio transicional).

e valor de refletância da parede celular (inertinita), o que permite estimar a temperatura de queima. *Charcoals* com valores de refletância maiores do que 5%Ro requerem altas temperaturas de queima ou prolongado tempo de exposição ao calor para se formarem. Aqueles com refletâncias abaixo de 1%Ro podem ter sido formados sob temperaturas entre 300 °C e 400 °C. A temperatura de muitos tipos de incêndios fica nesse intervalo, concluindo-se que os *charcoals* produzidos por temperaturas mais baixas terão valores de refletância menores, no intervalo da semifusinita. Logo, a refletância da fusinita é adquirida antes do processo de carbonificação e, portanto, independe da idade, da litologia ou da diagênese/ambiente geológico (Scott, 1989).

#### **4 INCÊNDIOS EM AMBIENTES DE TURFEIRAS NO ARTINSKIANO, NO SUL DA BACIA DO PARANÁ**

##### **4.1 Jazida do Faxinal (RS)**

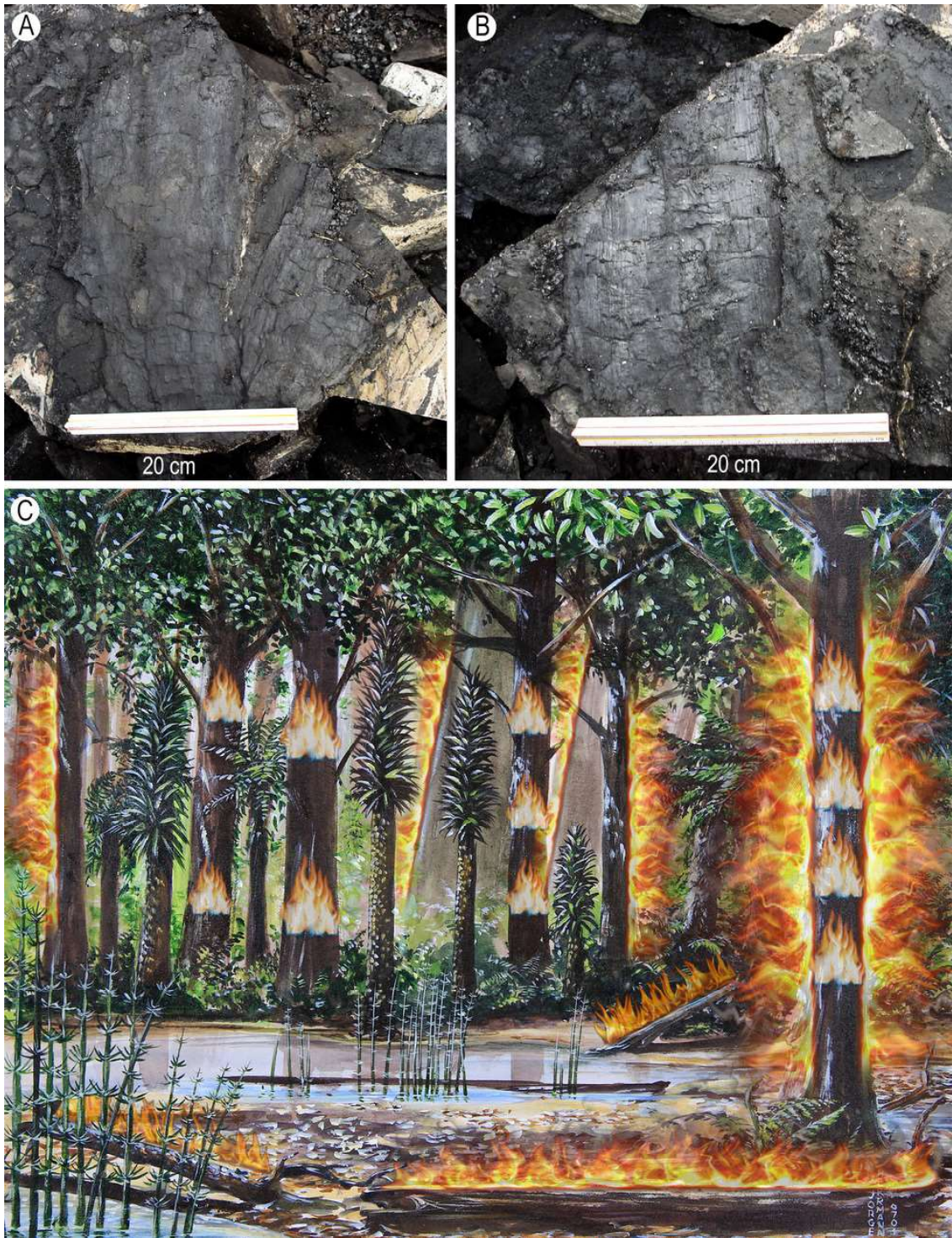
A impressionante associação de fragmentos de ramos e de caules altamente comprimidos, horizontalizados, frequentemente superpostos, que ocorriam continuamente ao longo de toda a área da mina a céu aberto do Faxinal (ca. 1,6 km<sup>2</sup>), com dimensões muito expressivas (40 cm de comprimento ou mais), preservados no carvão imediatamente subjacente ao tonstein (Fig. 3A, Fig. 4A, B, Fig. 5A), levou Degani-Schmidt *et al.* (2015) a investigarem a possibilidade de que esses fragmentos seriam resultantes de eventos de incêndios vegetacionais em ambientes de turfeira.

A observação desses fragmentos muito comprimidos (com espessuras de 2 cm, aproximadamente) por MEV evidenciou paredes celulares homogeneizadas em todos os espécimes, confirmando a categorização do material como *macro-charcoal*, de acordo

com os critérios de Scott (2010). A preservação de delicadas estruturas celulares, como células crivadas do floema secundário, ratifica a conclusão de que as temperaturas de queima se mantiveram brandas, tendo sido altas o suficiente apenas para promover a homogeneização da lamela média com as paredes celulares (Degani-Schmidt *et al.*, 2015).

Análises petrográficas em blocos polidos, sob óleo, demonstraram que esses grandes fragmentos comprimidos de lenhos queimados apresentavam uma organização em “sanduíche”, em seção transversal (fusênio transicional, *sensu* Jones *et al.*, 1993), sendo compostos por uma clara sequência de inertinita-vitrinita-inertinita (Fig. 3B). A transição entre a semifusinita estruturada e a vitrinita homogênea é brusca e os valores de refletância na transição decrescem, desde a porção inferior de semifusinita (0,840-0,609%Ro), até a vitrinita interna (0,554-0,596%Ro), aumentando novamente na transição para a semifusinita superior (0,632-0,834%Ro). Essa transição corresponde à carbonização da porção mais externa dos lenhos e à carbonificação da parte central, ou seja, a queima não atingiu o cerne dos lenhos, indicando que o incêndio alcançou as plantas enquanto ainda estavam em posição de vida.

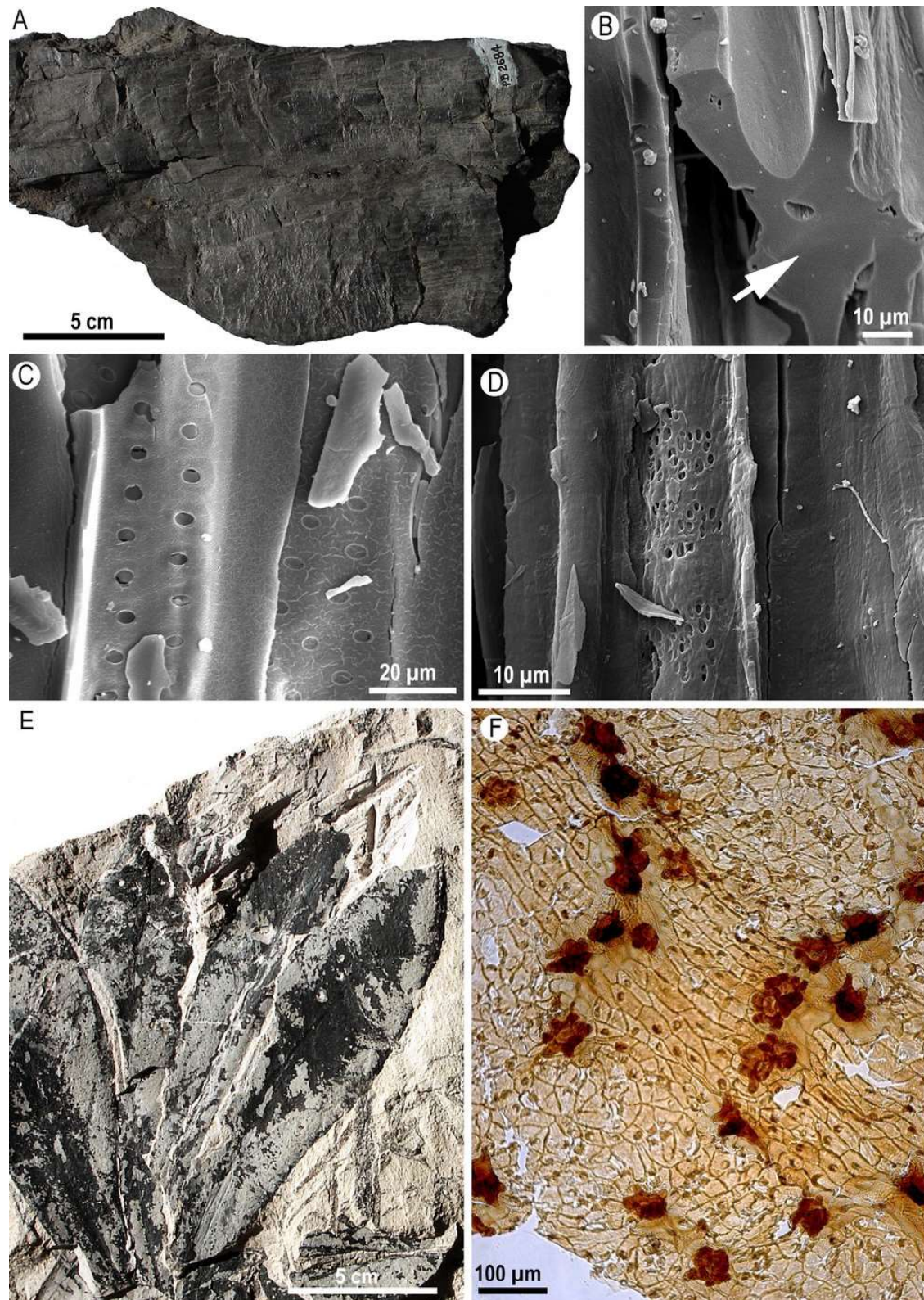
Os detalhes anatômicos preservados nos fragmentos de lenhos queimados (Fig. 5B-5D) permitiram a identificação de uma associação monotípica, com afinidade taxonômica ao gênero *Agathoxylon* Hartig, que corresponde a um padrão encontrado em diferentes grupos gimnospérmicos, tais como Cordaitales, Glossopteridales e Coniferales. Todavia, o domínio de pólenes com afinidade glossopterídea nas associações palinológicas (Cazzulo-Klepzig *et al.*, 2007) e a presença dominante de folhas de *Glossopteris* spp. na associação paleobotânica procedente do tonstein da Mina do Faxinal



**Figura 4** - Espécimes macroscópicos e reconstrução paleoambiental. A, B) Fragmentos de lenhos queimados comprimidos, de grandes dimensões, subjacentes ao tonstein; C) Reconstrução da comunidade vegetal geradora do depósito de carvão da mina do Faxinal, com base em palinologia e em paleobotânica (adaptado de Cazzulo-Klepzig *et al.*, 2007).

(Boardman *et al.*, 2012) constituem evidências indiretas de que os lenhos parcialmente queimados corresponderiam, com maior

probabilidade, a fragmentos de caules e de ramos de glossopterídeas. Nesse caso, o padrão anatômico comum a todos os espéci-



**Figura 5** - Espécimes macroscópicos e detalhes em microscopia. A) Fragmento de lenho queimado comprimido, proveniente do carvão abaixo do tonstein (Pb-2684); B) Célula do sistema condutor, mostrando paredes celulares homogeneizadas (seta) (Pb-4587b-56); C) Traqueídeos do xilema secundário, com pontuações bisseriadas, em vista radial (Pb-4587a-04); D) Floema secundário, com placas crivadas, em vista radial (Pb-4587b-56); E) Tufo de folhas glossopterídeas carbonificadas, incluídas no tonstein (Pb-2790); F) Cutícula foliar, em microscopia óptica de luz transmitida, com detalhe da ornamentação epidérmica (FXB-84).

mes analisados indica a presença de uma associação predominantemente monotípica de plantas (Degani-Schmidt & Guerra-Sommer, 2016a).

A preservação de floema, sob forma de *charcoal* (Fig. 5D), que corresponde a um tecido estruturalmente muito mais delicado do que o xilema, constitui-se em uma relevante evidência paleoecológica. As delgadas paredes celulares das células crivadas estão constantemente sujeitas a pressões hidrostáticas ao longo da vida da planta, favorecendo seu colapso instantâneo, mediante injúria. Portanto, a preservação de tecido tão delicado ratifica as inferências, relacionadas a baixas temperaturas de queima, em condições de relativa seca ambiental e de deposição relacionada a pouco ou nenhum transporte (Degani-Schmidt & Guerra-Sommer, 2016a).

Os padrões epidérmicos da associação de folhas glossopterídeas (Fig. 5E-5F), preservadas como compressões carbonificadas – não queimadas, portanto –, que ocorrem dispersas no tonstein, em níveis sobrepostos aos da ocorrência de lenhos queimados, também corroboram as inferências de uma comunidade arbórea predominantemente monotípica (Guerra-Sommer, 1992). O processo tafonômico, que gerou as compressões foliares, é considerado um “evento geológico instantâneo” (*sensu* Prothero, 1990), capaz de refletir as condições ambientais vigentes na turfeira no exato momento em que a cinza precipitou (DiMichele & Falcon-Lang, 2011).

Os grandes fragmentos de lenhos queimados, em Faxinal, se distinguem dos centimétricos e milimétricos fragmentos de *macro-charcoal*, presentes, de forma recorrente, em bandas densas, nos afloramentos de idade Asseliana, em Quitéria e em Curva do Belvedere, cuja faciologia é relacionável a pântanos lagunares e a terras baixas (Kubik et al., 2020). Esses *macro-charcoals* seriam provenientes, provavelmente, de incêndios

regionais, que ocorriam em fases cíclicas, e teriam sido transportados, por via aquática, até as áreas de deposição.

Dadas as características do material analisado, as projeções de temperatura de queima de 325-400°C, obtidas a partir de baixos valores de refletância da inertinita, são típicas de queima superficial (*sensu* Scott, 2010), indicando a ocorrência de incêndios autóctones, de superfície, em baixa temperatura. Análises quantitativas da distribuição de associações palinológicas na camada de tonstein e nos níveis de carvão a ela sotopostos e sobrepostos permitiram concluir que houve um aumento na dominância de grãos de pólen bissacados em relação a esporos pteridofíticos, após a queda da cinza vulcânica (Cazzulo-Klepzig et al., 2007; Simas et al., 2013). Tal evidência sugeriu que a vegetação gimnospérmica foi revigorada pela ação do fogo e pela perturbação vulcânica e não se abriu um novo nicho para recolonização. O reestabelecimento das comunidades vegetais, após a ocorrência de expressivo incêndio autóctone e após o evento de queda da cinza vulcânica, sugere que as perturbações ambientais tiveram um impacto de curto alcance (Degani-Schmidt et al., 2015).

O conjunto de evidências indicou que os incêndios ocorrentes no limite inferior do tonstein foram de superfície, em baixas temperaturas, e que o transporte do *macro-charcoal* foi praticamente inexistente, sendo a deposição desses fragmentos, relacionada, portanto, a processos autóctones. Também foram identificados fragmentos dispersos de *macro-charcoal*, mas de menores dimensões, ao longo da deposição da camada de tonstein e no carvão próximo ao limite superior dessa camada de cinza vulcânica, o que sugere processos hipoautóctones de transporte, que permitiram inferir ocorrências de incêndios nas áreas de entorno da turfeira (Jasper et al., 2011a; Degani-

Schmidt *et al.*, 2015).

A partir de estudo integrado, Degani-Schmidt *et al.* (2015) deduziram que, durante a deposição de turfeiras no Permiano Inferior do Gondwana, sob altos teores de O<sub>2</sub> paleoatmosférico, os ambientes de turfeira eram altamente suscetíveis a incêndios recorrentes (Fig. 4C). As plantas glossopterídeas se beneficiavam dessa dinâmica para manter sua dominância e sua abundância nas comunidades, por possuírem grande plasticidade adaptativa e capacidade de sobreviver a condições extremas, em ambientes altamente perturbados.

A intensa precipitação de cinza vulcânica, representada pela camada de tonstein, levou Jasper *et al.* (2011a) a sugerirem que eventos vulcânicos poderiam ter provocado a ignição dos incêndios nesse ambiente de turfeira. Entretanto, a cinza, apesar de introduzir, de forma pontual ou frequente, partículas e aerossóis na atmosfera, não foi o fator indutor dos incêndios ao se depositar sobre a superfície da turfeira, dada a sua baixa temperatura (Simas *et al.*, 2013). As análises dos grandes fragmentos autóctones/hipoautóctones de lenhos queimados, presentes nos limites inferior e superior do tonstein, intercalado na camada de carvão S, indicaram que a ignição, a atividade e a propagação dos incêndios estariam vinculadas à alta disponibilidade de pO<sub>2</sub> estimada para o período, associadas a descargas elétricas atmosféricas (Glasspool *et al.*, 2015) e a oscilações climáticas acentuadas, em ciclos extremos de seca e de inundações (Degani-Schmidt *et al.*, 2015).

#### **4.2 Camada de carvão Barro Branco, no afloramento Porongos (SC)**

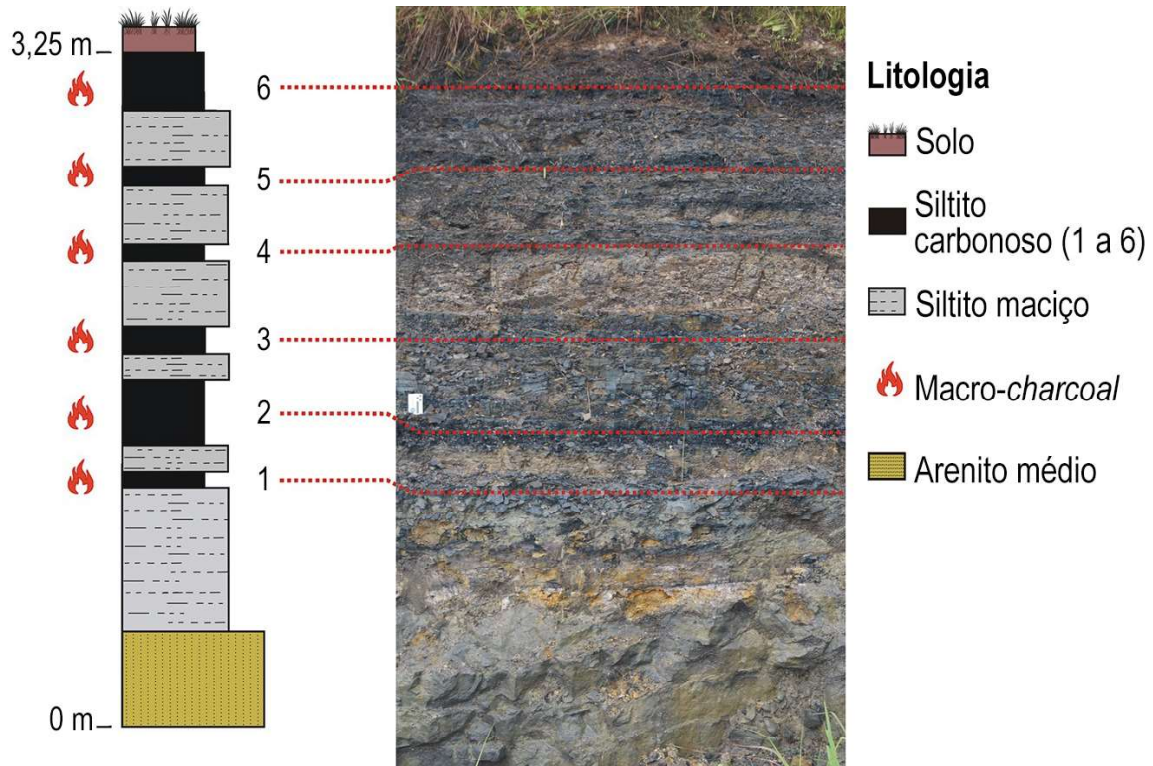
Benício *et al.* (2019a) desenvolveram análises integradas em cada um dos seis níveis de siltito carbonoso, ocorrentes na camada de carvão Barro Branco, na jazi-

da de carvão Santa Catarina, no afloramento Porongos, de idade Artinskiana (Fig. 6, Fig. 7), centradas na observação de *macro-charcoal* em MEV, associada a análises sob microscopia óptica de luz incidente em amostras do sedimento. Esse estudo integrado permitiu estimar as temperaturas de queima e estabelecer a correspondente classificação dos paleoincêndios, demonstrando a importância da combinação de métodos para uma reconstrução confiável de ocorrências desses eventos em áreas de deposição das turfás que geraram as camadas de carvão no Gondwana brasileiro.

##### **4.2.1 Características morfológicas e anatômicas do charcoal**

Os fragmentos de *macro-charcoal*, recuperados de cada um dos seis níveis estudados, possuíam entre 3 mm e 49 mm de largura e 5 mm e 111 mm de comprimento, além de bordas levemente abradidas (Fig. 7A), e estavam impregnados por pirita (Fig. 7B), apresentando-se levemente comprimidos, mas sem alteração na tridimensionalidade da anatomia vegetal (Fig. 7C-7D). O preenchimento dos lenhos carbonizados por pirita pode indicar alguma influência marinha no sistema deposicional.

A variação não significativa da anatomia dos lenhos, ao longo dos seis níveis, sugeriu que gimnospermas com xilema secundário identificado como *Agathoxylon*, muito comum nos depósitos do Paleozoico tardio e do Mesozoico de diferentes regiões geográficas de ambos os hemisférios (p. ex., Kurzawe & Merlotti, 2010; Jasper *et al.*, 2013; Philippe *et al.*, 2015), foram os componentes mais importantes da biomassa, responsáveis pela manutenção desses incêndios recorrentes. Degani-Schmidt *et al.* (2015), a partir da associação indireta entre os lenhos carbonizados de tipo *Agathoxylon* e as abundantes folhas de *Glossopteris* na ja-



**Figura 6** - Perfil da camada Barro Branco do afloramento Porongos (SC), com destaque para as seis camadas contendo *charcoal* (adaptado de Benício et al., 2019a).

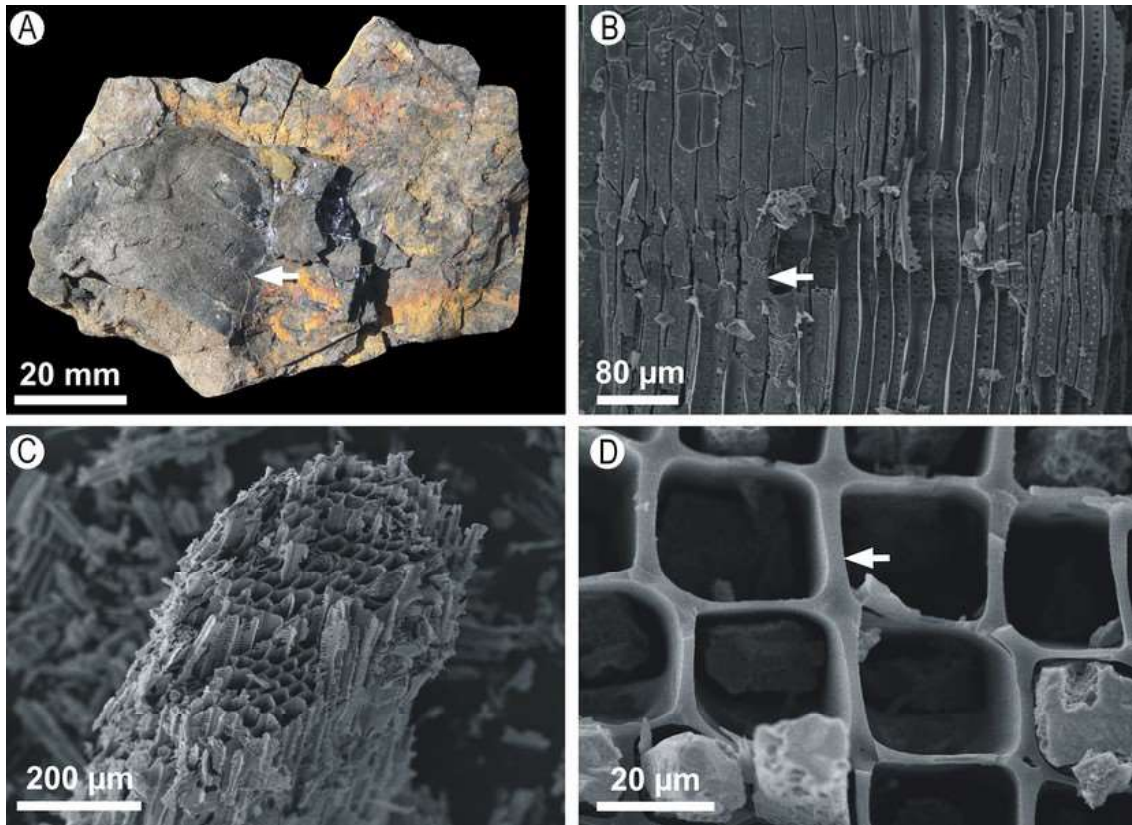
zida do Faxinal (no Artinskiano), sugeriram uma conexão biológica entre ambos.

A ocorrência nos seis níveis de siltito carbonoso de *macro-charcoal* com detalhes anatômicos bem preservados (Fig. 7B-7D), sob MEV, e com paredes celulares homogeneizadas indica que o fogo foi um elemento recorrente no sistema deposicional e que incêndios ocorriam nas proximidades do ambiente de formação de turfa que originou a camada de carvão Barro Branco. É importante salientar que, em cada nível, os fragmentos de *charcoal* não se dispõem em faixas contínuas, ricas em material carbonizado, não existindo, então, evidências de queima autóctone e lenta da própria turfa.

As abrasões observadas nas bordas da maioria do *macro-charcoal* indicam transporte desde a área-fonte do incêndio até a turfeira. As dimensões dos fragmentos heteromórficos, de até 111 mm de compri-

mento, sugerem transporte hipoautóctone, dentro do ambiente de deposição, via fluxo hidráulico (Scott, 2010), o qual pode ter exercido um viés seletivo em favor de restos de madeira carbonizados, em detrimento de *charcoal* de outros órgãos das plantas. Essa interpretação tafonômica é congruente com o alto conteúdo mineral presente em todos os seis níveis de siltito carbonoso, sugerindo que influxos de água frequentemente transportaram sedimentos de uma fonte externa para a turfeira. Todavia, o vento também pode ter agido e transportado partículas menores de *macro-charcoal* (de cerca de 3 mm de comprimento) até a turfeira.

A ausência de *charcoal* nas camadas de argila maciça, intermediárias aos siltitos carbonosos (Fig. 6), pode ser atribuída à ausência de incêndios durante a deposição destes horizontes sedimentares, ou a um viés tafonômico, uma vez que não foram documentados fitofósseis nessas camadas.



**Figura 7** - Amostra de mão e observação, em MEV, do *charcoal* proveniente do afloramento Porongos (SC). A) Amostra contendo fragmentos de *charcoal*, com bordos levemente arredondados (seta) (PBUMCN 1167); B) *Charcoal* impregnado por pirita (seta) (PBUMCN 1165); C) Vista transversal, demonstrando a preservação tridimensional da anatomia vegetal (PBUMCN 1168); D) Homogeneização das paredes celulares (seta) (PBUMCN 1165).

#### 4. 2. 2 Petrografia de carvão: temperatura de queima e classificação dos paleoincêndios

O somatório dos teores de inertinita, ao longo dos seis níveis de siltito carbonoso, variaram de 1%Ro, no nível carbonoso 4, a 18,2%Ro, no nível 3 (Tab. 1). A presença de inertodetrinita em todos os seis níveis estudados pode corresponder a *macro-charcoals* de pequenas dimensões, transportados pelo vento, até a turfeira (Benício *et al.*, 2019a).

A média dos valores de refletância da inertinita dos seis níveis variou de 1,88%Ro a 2,79%Ro, indicando uma temperatura média de queima estimada entre 405 °C e 513 °C para esses incêndios recorrentes (Tab. 1). No entanto, o valor máximo de refletância de 7,3%Ro, obtido no nível 6, indica

uma temperatura de queima muito elevada, de 1.045 °C.

Embora seja difícil classificar o tipo de incêndio que produziu o *charcoal*, dado que o material foi transportado, alguns fatores, tais como a temperatura predominante de queima (405 °C a 513 °C) e a dominância de fragmentos relativamente grandes nos seis níveis, sugerem a ocorrência de incêndios recorrentes de superfície com temperatura mais baixa (Scott, 2000). No entanto, incêndios de dossel de alta temperatura (1.045 °C) – intensos, mas rápidos –, que produzem menores quantidades de *charcoal*, e de menores dimensões, que podem ser transportados pelo vento (Scott, 2000), também podem ter desempenhado um papel subordinado na formação do *macro-charcoal*.



**Tabela 1** - Valores de refletância (%Ro) das vitrinitas e das inertinitas nos seis níveis carbonosos do afloramento Porongos (SC).

Nível	%Ro vitrinita					%Ro inertinita					Temp. queima (oC)		
	M	DP	Min	Max	n	M	DP	Min	Max	n	M	Min	Max
1	0,727	0,052	0,619	0,86	100	2,00	0,79	1,10	5,20	50	420	313	797
2	0,723	0,069	0,558	0,853	100	2,40	1,05	0,90	6,60	50	467	290	962
3	0,753	0,064	0,57	0,895	100	2,79	1,08	1,10	5,80	50	513	313	868
4	0,692	0,006	0,509	0,827	100	1,88	0,60	0,90	3,40	50	405	290	585
5	0,77	0,07	0,584	0,927	100	1,92	0,56	1,00	3,20	50	410	302	561
6	0,791	0,073	0,626	0,982	100	2,58	1,37	0,90	7,30	50	488	290	1045

M = média; DP = desvio-padrão; Min = mínimo; Max = máximo; n = número de medições

A baixa ocorrência de *macro-charcoal* e de inertinita em todos os níveis analisados pode ter sido decorrente do processo de transporte, dado que nem todos os restos carbonizados, produzidos por esses incêndios, teriam atingido a turfeira. Tais incêndios, por outro lado, podem ter sido seguidos de aumento no intemperismo, o que poderia explicar o alto conteúdo mineral presente não só nos siltitos carbonosos, como também em muitas outras jazidas de carvão do Gondwana, no Permiano (Scott, 2000).

A integração dos resultados obtidos por Benício *et al.* (2019a) indicou a ocorrência de incêndios recorrentes em áreas próximas às de deposição da turfeira que gerou a camada de carvão Barro Branco, envolvendo transporte do material carbonizado, preferencialmente, por via aquática, e, subordinadamente, por via aérea. A temperatura de queima oscilou entre, aproximadamente, 400 °C e 500 °C, atingindo, porém, patamares altos (1.045 °C) em nível restrito do processo deposicional. Os incêndios foram potencializados pelas condições de alto pO<sub>2</sub>, conforme valores estimados globalmente para o Permiano inferior (Glasspool *et al.*, 2015).

## REFERÊNCIAS

Benício, J. R. W., Jasper, A., Spiekermann, R., Garavaglia, L., Pires-Oliveira, E. F., Machado, N. T. G. & Uhl, D. 2019a. Recurrent palaeo-wildfires in a Cisuralian coal seam: A palaeobotanical view on high-inertinite coals from the Lower Permian of the Paraná Basin, Bra-

zil. *PloS one*, 14(3): e0213854.

Benício, J. R. W., Jasper, A., Spiekermann, R., Rockenbach, C. I., Cagliari, J., Pires-Oliveira, E. F. & Uhl, D. 2019b. The first evidence of palaeo-wildfire from the Itararé Group, southernmost portion of the Paraná Basin, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 93: 155-160.

Boardman, D. R., Iannuzzi, R., Souza, P. A. & Lopes, R. C. 2012. Paleobotanical and palynological analysis of Faxinal Coalfield (lower Permian, Rio Bonito Formation, Paraná Basin), Rio Grande do Sul, Brazil. *International Journal of Coal Geology*, 102: 12-25.

Bustin, R. M., Cameron, A. R., Grieve, D. A. & Kalkreuth, W. D. 1989. *Coal petrology: its principles, methods, and applications*, 3. ed. St. John's, Geological Association of Canada, 230 p.

Cazzulo-Klepzig, M., Guerra-Sommer, M., Menegat, R., Simas, M. W. & Mendonça Filho, J. G. 2007. Peat-forming environment of Permian coal seams from the Faxinal Coalfield (Paraná Basin) in southern Brazil, based on palynology and palaeobotany. *Revista Brasileira de Paleontologia*, 10(2): 117-127.

Couwenberg, J., Thiele, A., Tanneberger, F., Augustin, J., Bärish, S., Dubovik, D., Liashchynskaya, N., Michaelis, D., Minke, M., Skuratovich, A. & Joosten, H. 2011. Assessing greenhouse gas emissions from peatlands using vegetation as a proxy. *Hydrobiologia*, 674(1): 67-89.

Degani-Schmidt, I. & Guerra-Sommer, M. 2016a. Charcoalified *Agathoxylon*-type wood

- with preserved secondary phloem from the lower Permian of the Brazilian Paraná Basin. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 226: 20-29.
- Degani-Schmidt, I. & Guerra-Sommer, M. 2016b. Epidermal morphology and ecological significance of *Glossopteris pubescens* nom. nov. from the Brazilian Permian (Sakmarian). *Review of Palaeobotany and Palynology*, 232: 119-139.
- Degani-Schmidt, I., Guerra-Sommer, M., Mendonça, J. O., Mendonça Filho, J. G., Jasper, A., Cazzulo-Klepzig, M. & Iannuzzi, R. 2015. Charcoalified logs as evidence of hypautochthonous/autochthonous wildfire events in a peat-forming environment from the Permian of southern Paraná Basin (Brazil). *International Journal of Coal Geology*, 146: 55-67.
- DiMichele, W. A. & Falcon-Lang, H. J. 2011. Pennsylvanian 'fossil forests' in growth position (T0 assemblages): origin, taphonomic bias and palaeoecological insights. *Journal of the Geological Society*, 168(2): 585-605.
- Glasspool, I. 2003. Palaeoecology of selected South African export coals from the Vryheid Formation, with emphasis on the role of heterosporous lycopods and wildfire derived inertinite. *Fuel*, 82(8): 959-970.
- Glasspool, I. J. & Scott, A. C. 2010. Phanerozoic concentrations of atmospheric oxygen reconstructed from sedimentary charcoal. *Nature Geoscience*, 3(9): 627-630.
- Glasspool, I. J., Scott, A. C., Waltham, D., Pronina, N. V. & Shao, L. 2015. The impact of fire on the Late Paleozoic Earth system. *Frontiers in Plant Science*, 6: 756.
- Griffis, N. P., Mundil, R., Montañez, I. P., Isbell, J., Fedorchuk, N., Vesely, F., Iannuzzi, R. & Yin, Q. Z. 2018. A new stratigraphic framework built on U-Pb single-zircon TIMS ages and implications for the timing of the penultimate icehouse (Paraná Basin, Brazil). *GSA Bulletin*, 130(5-6): 848-858.
- Guerra-Sommer, M. 1988. *Padrões epidérmicos da Flora Glossopteris na Jazida do Faxinal (Formação Rio Bonito, Kunguriano, RS): implicações taxonômicas, bioestratigráficas, paleoecológicas e paleogeográficas*. Porto Alegre, 372p. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Guerra-Sommer, M. 1992. Padrões Epidérmicos de Glossopteridales da Taoflora do Faxinal (Formação Rio Bonito - Artinskiano-Kunguriano, Bacia do Paraná, Brasil). *Pesquisas em Geociências*, 19: 26-40.
- Guo, Y. & Bustin, R. M. 1998. FTIR spectroscopy and reflectance of modern charcoals and fungal decayed woods: implications for studies of inertinite in coals. *International Journal of Coal Geology*, 37(1-2): 29-53.
- Holz, M. 2003. Sequence stratigraphy of a lagoonal estuarine system – an example from the lower Permian Rio Bonito Formation, Paraná Basin, Brazil. *Sedimentary Geology*, 162(3-4): 305-331.
- Holz, M., França, A. B., Souza, P. A., Iannuzzi, R. & Rohn, R. 2010. A stratigraphic chart of the Late Carboniferous/Permian succession of the eastern border of the Paraná Basin, Brazil, South America. *Journal of South American Earth Sciences*, 29(2): 381-399.
- Iannuzzi, R. & Souza, P. A. 2005. Floral succession in the Lower Permian deposits of the Brazilian Paraná Basin: an up-to-date overview. *Bulletin - New Mexico Museum of Natural History and Science*, 30: 144-149.
- Jasper, A., Guerra-Sommer, M., Hamad, A. M. A., Bamford, M., Bernardes-de-Oliveira, M. E. C., Tewari, R. & Uhl, D. 2013. The burning of Gondwana: Permian fires on the southern continent – a palaeobotanical approach. *Gondwana Research*, 24(1): 148-160.
- Jasper, A., Uhl, D., Guerra-Sommer, M., Abu Hamad, A. & Machado, N. T. 2011a. Charcoal remains from a tonstein layer in the Faxinal Coalfield, Lower Permian, southern Paraná Basin, Brazil. *Anais da Academia Brasileira*

de Ciências, 83(2): 471-481.

Jasper, A., Uhl, D., Guerra-Sommer, M., Bernardes-de-Oliveira, M. E. C. & Machado, N. T. G. 2011b. Upper Paleozoic charcoal remains from South America: multiple evidences of fire events in the coal bearing strata of the Paraná Basin, Brazil. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 306(3-4): 205-218.

Jones, T. P., Scott, A. C. & Matthey, D. P. 1993. Investigations of "fusain transition fossils" from the Lower Carboniferous: comparisons with modern partially charred wood. *International Journal of Coal Geology*, 22(1): 37-59.

Jurigan, I., Ricardi-Branco, F., Neregato, R. & Santos, T. J. S. 2019. A new tonstein occurrence in the eastern Paraná Basin associated with the Figueira Coalfield (Paraná, Brazil): Palynostratigraphy and U-Pb radiometric dating integration. *Journal of South American Earth Sciences*, 96: 102377.

Kubik, R., Marynowski, L., Uhl, D. & Jasper, A. 2020. Co-occurrence of charcoal, polycyclic aromatic hydrocarbons and terrestrial biomarkers in an early Permian swamp to lagoonal depositional system, Paraná Basin, Rio Grande do Sul, Brazil. *International Journal of Coal Geology*, 230: 103590.

Kurzawe, F. & Merlotti, S. 2010. O complexo *Dadoxylon-Araucarioxylon*, Carbonífero e Permiano do Gondwana: estudo taxonômico do gênero *Araucarioxylon*. *Pesquisas em Geociências*, 37(1): 41-50.

Limarino, C. O., Césari, S. N., Spalletti, L. A., Taboada, A. C., Isbell, J. L., Geuna, S. & Gulbranson, E. L. 2014. A paleoclimatic review of southern South America during the late Paleozoic: a record from icehouse to extreme greenhouse conditions. *Gondwana Research*, 25(4): 1396-1421.

Manfroi, J., Uhl, D., Guerra-Sommer, M., Francischini, H., Martinelli, A. G., Soares, M. B. & Jasper, A. 2015. Extending the database of Permian palaeo-wildfire on Gondwana: char-

coal remains from the Rio do Rastro Formation (Paraná Basin), middle Permian, Rio Grande do Sul State, Brazil. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 436: 77-84.

McParland, L. C., Collinson, M. E., Scott, A. C. & Campbell, G. 2009. The use of reflectance values for the interpretation of natural and anthropogenic charcoal assemblages. *Archaeological and Anthropological Sciences*, 1(4): 249-261.

Milani, E. J., Melo, J. H. G., Souza, P. A., Fernandes, L. A. & França A. B. 2007. Bacia do Paraná. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 15(2): 265-287.

Philippe, M., Pacyna, G., Wawrzyniak, Z., Barbacka, M., Boka, K., Filipiak, P., Marynowski, L., Thévenard, F. & Uhl, D. 2015. News from an old wood – *Agathoxylon keuperianum* (Unger) nov. comb. in the Keuper of Poland and France. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 221: 83-91.

Preston, C. & Schmidt, M. 2006. Black (pyrogenic) carbon: a synthesis of current knowledge and uncertainties with special consideration of boreal regions. *Biogeosciences*, 3: 397-420.

Prothero, D. R. 1990. Interpreting the Stratigraphic Record. New York, W. H. Freeman, 410 p.

Scott, A. C. 1989. Observations on the nature and origin of fusain. *International Journal of Coal Geology*, 12(1-4): 443-475.

Scott, A. C. 2000. The Pre-Quaternary history of fire. *Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology*, 164(1-4): 281-329.

Scott, A. C. 2010. Charcoal recognition, taphonomy and uses in palaeoenvironmental analysis. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 291(1-2): 11-39.

Scott, A. C. & Glasspool, I. J. 2007. Observations and experiments on the origin and formation of inertinite group macerals.

*International Journal of Coal Geology*, 70(1-3): 53-66.

Simas, M. W., Guerra-Sommer, M., Mendonça Filho, J. G., Cazzulo-Klepzig, M., Formoso, M. L. L. & Degani-Schmidt, I. 2013. An accurate record of volcanic ash fall deposition as characterized by dispersed organic matter in a lower Permian tonstein layer (Faxinal Coalfield, Paraná Basin, Brazil). *Geologica Acta*, 11(1): 45-57.

Souza, P. A., Boardman, D. R., Premaor, E., Félix, C. M., Bender, R. R. & Oliveira, E. J. 2021. The *Vittatina costabilis* Zone revisited: New characterization and implications on the Pennsylvanian-Permian icehouse-to-greenhouse turnover in the Paraná Basin, Western Gondwana. *Journal of South American Earth Sciences*, 106: 102968.

Van Hoof, T. B., Wagner-Cremer, F., Kürschner, W. M. & Visscher, H. 2008. A role for atmospheric CO<sub>2</sub> in preindustrial climate forcing. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(41): 15815-15818.

Ziegler, A., Eshel, G., Rees, P. M., Rothfus, T., Rowley, D. & Sunderlin, D. 2003. Tracing the tropics across land and sea: Permian to present. *Lethaia*, 36(3): 227-254.