



GOVERNO DO ESTADO DE CEARÁ
FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE REGIONAL DO CARIRI – URCA
CENTRO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS E DA SAÚDE – CCBS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DIVERSIDADE BIOLÓGICA E
RECURSOS NATURAIS – PPGDR

EUGENIO BARROSO DE MOURA

**PALEOINCÊNDIOS NA FORMAÇÃO CRATO, CRETÁCEO INFERIOR DA BACIA
DO ARARIPE: EVIDÊNCIAS A PARTIR DO REGISTRO DE *MACRO-CHARCOAL***

CRATO-CE

2024

EUGENIO BARROSO DE MOURA

**PALEOINCÊNDIOS NA FORMAÇÃO CRATO, CRETÁCEO INFERIOR DA BACIA
DO ARARIPE: EVIDÊNCIAS A PARTIR DO REGISTRO DE *MACRO-CHARCOAL***

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Diversidade Biológica e Recursos Naturais da Universidade Regional do Cariri-URCA, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Diversidade Biológica e Recursos Naturais.

Linha de pesquisa: Taxonomia, Sistemática e Evolução da Diversidade Biológica.

Orientadora: Profa. Dra. Flaviana Jorge de Lima

Coorientador: Dr. André Jasper

CRATO-CE

2024

Eu, _____, autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Ficha Catalográfica elaborada pelo autor através do sistema
de geração automático da Biblioteca Central da Universidade Regional do Cariri - URCA

Moura, Eugenio Barroso de

M929p PALEOINCÊNDIOS NA FORMAÇÃO CRATO, CRETÁCEO
INFERIOR DA BACIA DO ARARIPE: EVIDÊNCIAS A PARTIR DO REGISTRO
DE MACRO-CHARCOAL / Eugenio Barroso de Moura. Crato-ce, 2024.

113p. il.

Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Diversidade Biológica e Recursos
Naturais da Universidade Regional do Cariri - URCA.

Orientador(a): Prof.^a Dr.^a Flaviana Jorge de Lima

Coorientador(a): Prof. Dr. André Jasper

1.Incêndios vegetacionais, 2.Lenhos carbonizados, 3.Gimnospermas,
4.Coníferas, 5.Âmbar; I.Título.

CDD: 577

EUGENIO BARROSO DE MOURA

PALEOINCÊNDIOS NA FORMAÇÃO CRATO, CRETÁCEO INFERIOR DA BACIA DO ARARIPE: EVIDÊNCIAS A PARTIR DO REGISTRO DE *MACRO-CHARCOAL*

Dissertação de mestrado em Diversidade Biológica e Recursos Naturais, apresentada à Universidade Regional do Cariri-URCA, como parte requisitos para obtenção do título de Mestre.

APROVADO(A) EM: 30 / 10 / 2024

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Flaviana Jorge de Lima (Presidente da Banca) – Orientadora
Universidade Federal de Pernambuco-UFPE

Assinatura: _____

Profa. Dra. Etienne Fabbrin Pires Oliveira (Membro Externo)
Universidade Federal do Tocantins-UFT

Assinatura: _____

Prof. Dr. Luiz Marivando Barros (Membro Interno)
Universidade Regional do Cariri-URCA

Assinatura: _____

Prof. Dr. João Tavares Calixto Júnior (Suplente Interno)
Universidade Regional do Cariri-URCA

Assinatura: _____

Prof. Dr. Edilson Bezerra dos Santos Filho (Suplente Externo)
Universidade Regional do Cariri-URCA

Assinatura: _____

*“Dedico aos meus pais, Francisco (Chico)
e Antônia, e à minha esposa, Francilene”*

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, aos meus pais, Manoel Francisco de Moura e Antônia Unias Barroso de Moura, por terem sido em minha vida, mais do que pais; foram e são amigos, meu espelho, símbolo de honestidade, compromisso e responsabilidade.

Agradeço também à minha esposa Francilene Julia Batista por estar sempre ao meu lado, por nunca ter deixado de acreditar que todo esforço sempre valeria a pena.

Agradeço também:

- À CAPES pela concessão de bolsa, o que possibilitou que me dedicasse exclusivamente aos estudos e à realização deste projeto;
- À Universidade Regional do Cariri (URCA), pela oportunidade de ter feito parte desta instituição;
- Ao Laboratório de Paleontologia da URCA (LPU) por ter me acolhido;
- Aos profs. Dr. Álamo Saraiva, Dr. João Calixto Júnior, Dra. Flaviana Moraes, Dra. Elizangela Beneval, Dra. Francileide Vieira Figueiredo; Ma. Elaine Cristina, Prof. Luis Henrique, que sempre regaram em mim a semente da Biologia;
- À Profa. Dra. Flaviana Jorge de Lima pela orientação, dedicação e indicação do melhor caminho a ser seguido;
- Ao Dr. André Jasper pela coorientação e pela contribuição para com esta dissertação;
- Aos colegas do Laboratório de Paleontologia da URCA;
- Aos colegas de graduação do curso de Licenciatura em Ciências Biológicas;
- À Universidade Federal do Ceará pela disponibilidade na metalização das amostras;
- À profa. Dra. Naiara Cipriano pela parceria e contribuição nas análises dos materiais.

*“...sofra agora para viver o resto da vida
como um campeão”.*

Muhammad Ali

RESUMO

O presente estudo relata o registro de *macro-charcoal* na Bacia do Araripe como indicativo de eventos de perturbação ambiental na forma de incêndios vegetacionais. Teve como objetivo central contribuir com a base global sobre a ocorrência de incêndios vegetacionais do Cretáceo Inferior, na Bacia do Araripe, especificamente para a Formação Crato, bem como a descrição de novos espécimes de *macro-charcoal* com estruturas associadas a âmbar. Foram realizadas análises detalhadas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) nos espécimes fósseis que apresentaram *macro-charcoal* e âmbar, para tanto foram retirados pequenos fragmentos dos espécimes, obedecendo os planos de corte: longitudinal tangencial, longitudinal radial e transversal, metalizados com uma fina camada de 20 nm de prata e visualizado em MEV. O estudo adiciona dados inéditos sobre a ocorrência de paleoincêndios, documentando o primeiro registro de *macro-charcoal* associado a âmbar na Formação Crato. As análises mostraram detalhes anatômicos bem preservados, como traqueídes com pontoações areoladas, campos de cruzamentos, raios homocelulares, lúmens dos traqueídeos e principalmente a homogeneização das paredes celulares, considerado como característica distintiva para lenhos carbonizados. Algumas dessas estruturas, como traqueídes, pontoações areoladas, campo de cruzamentos, lúmens dos traqueídeos apresentaram-se preenchidos por resina fossilizada (âmbar). Além disso, os lenhos carbonizados exibiram compostos resinosos visíveis a olho nu, que foram exsudados pela própria planta, de forma natural e/ou em resposta aos danos causados pelo fogo. Essa descoberta possibilita traçar afinidades taxonômicas quanto à origem desses lenhos, dada a carência de elementos concretos sobre a sua origem. Diante dos resultados obtidos pelas análises em MEV que mostraram grande afinidade com o grupo das gimnospermas, especificamente coníferas e aliados ao fato dos âmbares da Bacia do Araripe, até o momento, serem restritos a algumas coníferas, abre luz para um refinamento taxonômico mais preciso da origem botânica desses fósseis.

Palavras-chave: Incêndios vegetacionais, lenhos carbonizados, gimnospermas, coníferas, âmbar.

ABSTRACT

The present study reports the occurrence of macro-charcoal in the Araripe Basin as an indication of environmental disturbance events in the form of vegetational wildfires. Its main objective was to contribute to the global database on the occurrence of vegetational wildfires in the Early Cretaceous in the Araripe Basin, specifically for the Crato Formation, as well as the description of new specimens of macro-charcoal with structures associated with amber. Detailed analyses were conducted using Scanning Electron Microscopy (SEM) on fossil specimens containing macro-charcoal and amber. For this purpose, small fragments were extracted from the specimens following cutting planes: tangential longitudinal, radial longitudinal and transverse. These fragments were coated with a thin 20 nm layer of silver and visualized under SEM. The study provides unprecedented data on the occurrence of paleo-wildfires, documenting the first record of macro-charcoal associated with amber in the Crato Formation. The analyses showed well-preserved anatomical details, such as tracheids with bordered pits, cross-fields, homocellular rays, tracheid lumens, and, most notably, the homogenization of the cell walls, which is considered a distinctive feature of carbonized wood. Some of these structures, such as tracheids, bordered pits, and tracheid lumens, were filled with fossilized resin (amber). Additionally, the carbonized woods exhibited resinous compounds visible to the naked eye, which were exuded by the plant naturally and/or in response to fire damage. This discovery enables the tracing of taxonomic affinities regarding the origin of these woods, given the lack of concrete elements about their origin. Based on the SEM results, which showed a strong affinity with the gymnosperm group, specifically conifers, and considering that the ambers from the Araripe Basin are currently restricted to certain conifers, the findings pave the way for a more precise taxonomic refinement of the botanical origin of these fossils.

Keywords: Vegetation wildfires, charred wood, gymnosperms, conifers, amber.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1:	Mapa geológico da Bacia do Araripe.....	22
Figura 2:	Afloramento da Formação Crato.....	25
Figura 3:	<i>Macro-charcoal</i> da Formação Crato. (A) Espécime LPU 1560; (B) Imagens de MEV, mostrando a homogeneização das paredes celulares, traqueídes e pontoações unisseriadas.....	27
Figura 4:	Mapa da Localização Geográfica da Bacia do Araripe. (A) Mapa simplificado mostrando a localização da Bacia do Araripe na América do Sul; (B) Mapa da Bacia do Araripe.....	30
Figura 5:	Material utilizado para identificação, mensuração, fotografias, análises preliminares dos espécimes e retirada dos fragmentos para análises em MEV.....	31
Figura 6:	Modelo SU3500, HITACHI do Microscópio Eletrônico de Varredura-MEV pertencente à Universidade Regional do Cariri- URCA.....	33
Figura 7:	Modelo ilustrativo da metalizadora QT 150 ES (Quorum, Edimburgo, Reino Unido).....	34
Figura 8:	Representação esquemática de seção da madeira, mostrando em detalhe os planos de cortes. X- Transversal, R- Longitudinal Radial e T- Longitudinal Tangencial.....	36
Figura 9:	Espécime LPU-C 1369. Exibe lenho carbonizado medindo 25 cm de comprimento x 13 cm de largura e âmbar medindo 6 cm de comprimento x 2 cm de largura indicado pelo retângulo vermelho. setas brancas indicam os locais de retirada dos fragmentos para análises em MEV.....	38
Figura 10:	Imagens em microscópio óptico do fragmento de âmbar do espécime LPU-C 1396, exibindo betumes (setas vermelhas), restos do lenho carbonizado (setas pretas), inclusões indeterminadas (seta branca) e fissuras internas (seta azul).....	39
Figura 11:	Fotografias realizadas em MEV do espécime LPU-C 1396: (A) seção longitudinal radial exibindo a homogeneização das paredes celulares (w); (B) seção longitudinal radial com traqueídes (t) fragmentadas exibindo âmbar em formato de bastonete e pontoações areoladas unisseriadas (p) preenchidas por âmbar; (C) seção longitudinal radial com pontoações areoladas (p) bisseriadas e traqueídes (t) preenchidas por âmbar (setas pretas); (D) seção longitudinal radial com traqueídes	

(t) preenchidas por âmbar em formato alongado preservado mesmo após a fragmentação dessas traqueídes (seta preta) e a preservação das pontoações (p) em forma de “molde” preenchido por âmbar (seta branca); (E) seção longitudinal radial com campos de cruzamentos fragmentados expondo o âmbar e fibras (f); (F) vista geral em seção transversal, exibindo o preenchimento dos lúmens dos traqueídeos por âmbar (setas pretas) e detalhe da homogeneização das parede celular (w); (G) detalhe de F, exibindo as paredes celulares homogeneizadas (w), lúmens dos traqueídeos preenchidos por âmbar (seta preta) e espaços intercelulares. Os lúmens presentes nessa amostra, apresentam-se em sua maioria, de forma arredondada; (H) vista geral mostrando o âmbar preenchendo parte da amostra, de uma extremidade a outra (seta branca).....41

Figura 12: Detalhes da homogeneização das paredes celulares observadas em seção transversal (Figuras 12 A-B), seção longitudinal tangencial (Figura 12 C) e em seção radial (Figura 12 D).....42

Figura 13: Espécime LPU-C O24 medindo 5,5 cm de comprimento x 5,5 cm de largura (medida do centro do espécime), apresentando âmbar bem visíveis aderidos por grande parte do espécime.....43

Figura 14: Imagens em microscópio óptico do âmbar do espécime LPU-C 024, exibindo restos do lenho carbonizado (setas pretas), betumes (seta vermelha) e inclusões indeterminadas (seta branca).....44

Figura 15: Fotografias realizadas em MEV do espécime LPU-C 024: (A) seção longitudinal radial exhibe traqueídes (t) com pontoações areoladas (p) com e sem o preenchimento por âmbar, pontoações medindo cerca de 8µm de diâmetro; (B) seção longitudinal radial exhibe pontoações areoladas (p) e homogeneização das paredes celulares (w); (C) seção longitudinal tangencial exhibe traqueídes (t), com pontoações areoladas (p) preenchidas por âmbar e paredes celulares homogeneizadas(w); (D) seção longitudinal radial exhibe traqueídes (t) preenchidas por âmbar (seta branca), pontoações areoladas (p) e fibras (f); (E) seção transversal mostrando lúmens traqueídeos com e sem o preenchimento por âmbar; (F) detalhes de E mostrando as paredes celulares homogeneizadas (w) e lúmens dos traqueídeos; (G) vista geral mostrando o âmbar de uma extremidade a outra da amostra (seta branca); (H) seção transversal exibindo âmbar preenchendo grande parte dos lúmens traqueídeos da amostra.....46

Figura 16: Espécime LPU-C 062 p/cp, com lenho carbonizado medindo 41,5 cm de comprimento x 8 cm de largura. Exibindo apenas alguns fragmentos de âmbar (setas brancas).....48

Figura 17: Fotografias realizadas em MEV do espécime LPU-C 062: (A-B) espécime LPU-C 062 p/cp exibindo lenho carbonizado e fragmentos de âmbar; (C) detalhes dos fragmentos de âmbar; (D) Seção longitudinal tangencial exibindo pontoações (p) sem a presença de âmbar, com dimensões de 11µm de diâmetro e raio unisseriado; (E) seção longitudinal radial exibindo pontoações areoladas (p) com e sem a presença de âmbar com cerca de 14µm e paredes celulares homogeneizadas (w); (F) seção longitudinal radial exibindo raios homocelulares, com dezoito células de altura; (G) Seção longitudinal radial mostrando âmbar em formato alongado, preservado mesmo com a fragmentação do lúmen do traqueídeo (setas pretas) e pontoações areoladas (p); (H) seção transversal mostrando os lúmens dos traqueídeos sem a presença de âmbar e detalhes da homogeneização das paredes celulares (w).....50

Figura 18: Espécime MPSC PL 4265 p/cp, com *macro-charcoal* medindo 10 cm de comprimento x 3 cm de largura. Exibindo apenas alguns fragmentos de âmbar associado ao *charcoal* (setas brancas) (Figuras A-B).....51

Figura 19: Fotografias realizadas em MEV do espécime MPSC PL 4265 p/cp: (A-B) Espécime MPSC PL 4265 p/cp exibindo fragmentos de âmbar (setas brancas); (C) Detalhes dos fragmentos de âmbar (seta preta); (D) Seção longitudinal tangencial exibindo traqueídes (t) com pontoações areoladas (p) preenchidas por âmbar, com cerca de 15 µm de diâmetro; (E) seção longitudinal radial exibindo pontoações areoladas (p), com cerca de 11µm de diâmetro e raios unisseriados (r); (F) seção longitudinal radial, mostrando a homogeneização da parede celular (w); (G) seção longitudinal radial exibindo detalhes das traqueídes (t) e pontoações (p) em forma de molde preenchidos por âmbar, bem fragmentados; (H) Seção transversal, com lúmens dos traqueídeos preenchidos por âmbar e paredes celulares homogeneizadas (w).....53

Figura 20: Compilação dos dados de Rockenback (2021), com resina preenchendo estruturas anatômicas do lenho In Natura, carbonizado e *macro-charcoal*.....60

Figura 21: Microfotografias de madeira de coníferas em relação à folhosa. (A) Microfotografia eletrônica de lenho de tensão de folhosa (*Populus sp.*); (B)

Microfotografia eletrônica da madeira de compressão de conífera (<i>Pseudotsuga menziesii</i>).....	61
---	----

Tabela 1: Resumo dos principais representantes da paleoflora gimnospérmica da Formação Crato. Elaborado de acordo com Lima <i>et al.</i> , (2012) e Saraiva <i>et al.</i> , (2021).....	23
--	----

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

LPU-	Laboratório de Paleontologia da Universidade Regional do Cariri
MEV-	Microscópio Eletrônico de Varredura
MPPCN-	Museu de Paleontologia Plácido Cidade Nuvens
UFC-	Universidade Federal do Ceará
URCA-	Universidade Regional do Cariri
F-	Fibras
P	Pontoações
R-	Raios
T-	Traqueídes
W-	Paredes celulares (walls)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	17
2. OBJETIVOS.....	21
2.1 Objetivo geral.....	21
2.2 Objetivos específicos.....	21
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	22
3.1 Paleoflora da Bacia do Araripe.....	22
3.2 Formação Crato.....	24
3.2.1 Registros de <i>macro-charcoal</i> na Formação Crato.....	25
3.2.2 Registros âmbar na Formação Crato.....	27
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	29
4.1 Material estudado.....	29
4.2 Procedimentos metodológicos.....	30
4.3 Confirmação da presença de fósseis com características de <i>macro-charcoal</i> e âmbar na Formação Crato.....	34
4.4 Caracterização morfoanatômica por MEV.....	35
4.5 Correlação taxonômica entre <i>macro-charcoal</i> e âmbar.....	35
5. RESULTADOS.....	37
5.1. <i>Macro-charcoal</i> da Formação Crato.....	37
5.1.1 Espécime LPU-C 1396.....	37
5.1.2 Espécime LPU-C 024.....	42
5.1.3 Espécime LPU-C 062 p/cp.....	47
5.1.4 Espécime MPSC PL 4265.....	51
6. DISCUSSÃO.....	54
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	62
REFERÊNCIAS.....	63
ANEXOS.....	71

1 INTRODUÇÃO

Ao longo do tempo geológico a Terra tem sido palco de uma série de transformações que abrangem desde flutuações de temperaturas, variações na oxigenação atmosférica e outros eventos de grande magnitude (Belcher, 2013; Jones; Chaloner, 1991; Patterson *et al.*, 1987; Sander; Gee, 1990; Scott, 2021). Essas transformações não apenas geraram distúrbios ambientais, mas também resultaram em eventos catastróficos, como as mudanças paleoclimáticas que culminaram, entre outros eventos, na ocorrência de incêndios vegetacionais (Scott, 2010).

Estudos realizados por Belcher (2013); Jones; Chaloner (1991); Patterson *et al.* (1987); Sander; Gee (1990) e Scott (2021), sugerem que a eclosão de incêndios vegetacionais ao longo da história da Terra foi moldada por uma rede de condições ambientais adversas, destacando que as mudanças paleoclimáticas desempenharam um papel fundamental na ocorrência de incêndios vegetacionais, influenciados por uma combinação complexa de fatores, entre os quais, a composição do oxigênio (com níveis estimados entre 13% e 35%), a relação entre fogo, clima e o tipo de vegetação.

As plantas, por serem organismos sésseis, são particularmente sensíveis às mudanças climáticas (Bernardes-De-Oliveira *et al.*, 2018). Ao longo do processo evolutivo elas foram as principais impactadas, e com isso, foram apresentando adaptações e resistências às perturbações ambientais (Bernardes-De-Oliveira *et al.*, 2018; Chaloner; McElwain, 1997), entre as quais podemos destacar: a espessura da epiderme, formato e quantidade de estômatos, forma e tamanho foliar, presença de anéis de crescimento em caules e resistência ao fogo (Bernardes-De-Oliveira *et al.*, 2018; Heringer; Jacques, 2001; Lehn; Leuchtenberger, 2008; Steuter; McPherson, 1995).

As plantas fósseis são consideradas excelentes *proxies* para reconstruir paleoambientes e climas continentais (Chaloner; Creber, 1990; Chaloner; McElwain, 1997; Francis *et al.*, 2008; Poole; Cantrill, 2006; Uhl, 2006). Elas foram preservadas na crosta terrestre de diversas maneiras e sob a atuação de diferentes tipos de processos físico-químicos, inerentes a sua fossilização (Gastaldo, 1989). Associado a estas diferenças na fossilização das plantas, uma série de eventos deposicionais também desempenharam um papel importante, resultando em uma variedade de

formas fósseis (Gastaldo, 1989; Gee; Gastaldo, 2005). Devido às inúmeras maneiras de preservação das plantas, os paleobotânicos empregam diferentes técnicas para extrair o máximo de informação sobre seus fósseis (Taylor *et al.*, 2009).

Tafonomicamente falando, a preservação de organismos e estruturas biológicas apresenta diversas formas, conforme detalhado por Foote; Miller (2007), incluindo a preservação em âmbar, carbonificação, congelamento, permineralização, substituição, recristalização, molde e traços fósseis. Além das técnicas de preservação de organismos e suas atividades mencionadas, é possível identificar no registro fóssil evidências de mudanças climáticas por meio dos fósseis de *macro-charcoal* (Belcher, 2013; Scott, 2000, 2006, 2010, 2021).

Conforme mencionado por Jones; Chaloner (1991), o *macro-charcoal* é formado a partir da combustão incompleta do material vegetal, sendo, portanto, um excelente *proxy* para indicar a ocorrência de incêndios vegetacionais. Este é de fácil preservação e muito resistente à degradação, capaz de preservar-se ao longo de extensos períodos (Belcher, 2013; Jasper *et al.*, 2016; Lima *et al.*, 2019; Scott, 2009). Essa característica do *macro-charcoal* é uma ferramenta valiosa para reconstrução dos eventos passados de incêndios vegetacionais, proporcionando uma percepção sobre as condições climáticas e ambientais que moldaram a Terra ao longo do tempo.

Os registros de *macro-charcoal* indicam que o Cretáceo Inferior, pelo menos em alguns momentos, esteve sujeito a regimes de incêndios vegetacionais (Dos Santos *et al.*, 2016; Lima *et al.*, 2019; Scott, 2000, 2010). Este período é considerado um mundo de alto fogo “high-fire” (Brown *et al.*, 2013) por um conjunto de fatores, que inclui as altas temperaturas, os níveis de oxigenação atmosférico, as taxas de CO₂ e os períodos de estiagem (Belcher, 2013; Brown *et al.*, 2013; Jones; Chaloner, 1991; Scott, 2021).

Nos últimos anos, diversos estudos vêm sendo realizados sobre a ocorrência de *macro-charcoal* para o Hemisfério Sul (Benício *et al.*, 2019; Dos Santos *et al.*, 2016; Jasper *et al.*, 2011a, b, c; Lima *et al.*, 2019), sugerindo que incêndios eram comuns no Gondwana conforme Abu Hamad; Jasper; Uhl, (2012). Contudo, quando se refere aos registros para o Cretáceo Inferior, estes ainda são bastante escassos (Dos Santos *et al.*, 2016; Lima *et al.*, 2019). Essa escassez pode estar relacionada a fatores como os mencionados por Benício *et al.* (2019) e Scott (2010): (I)

desconhecimento desses fósseis em campo e (II) falta de pesquisas especializadas na área.

Em relação aos registros de paleoincêndios em formações geológicas do Cretáceo brasileiro, há registros apenas nas bacias do Araripe (Nordeste) (Lima *et al.*, 2019; Martill *et al.*, 2012; Moura *et al.*, 2022, 2023; Rebelato, 2022) e a do Takutu (Norte) (Dos Santos *et al.*, 2016). Existem outros relatos da ocorrência de paleoincêndios para o Brasil, porém em períodos distintos, como por exemplo o Permiano (paleozoico) na Bacia do Paraná (Benício *et al.*, 2019; Jasper *et al.*, 2011a, b, c; 2012; Rockenback, 2021).

Os estudos para a Bacia do Araripe feitos por Martill *et al.* (2012) registraram a presença de *meso-charcoal* sob a forma de traqueídes, sendo o primeiro registro da ocorrência de paleoincêndios vegetacionais na Formação Romualdo. Lima *et al.* (2019) documentaram tais registros nas três formações do Grupo Santana (Crato, Ipubi e Romualdo) em um estudo abrangente, onde os autores fornecem evidências concretas da multiplicidade dos eventos de incêndios vegetacionais durante o Cretáceo Inferior na Bacia do Araripe. Moura *et al.* (2022, 2023) também documentaram ocorrências de paleoincêndios na Formação Ipubi por meio de análises em *macro-charcoal*, e Rebelato (2022) analisou *macro-charcoal* na Formação Barbalha fornecendo evidências de incêndios nesta formação. Com isso, documentam-se registros de paleoincêndios nas quatro principais formações do Grupo Santana na Bacia do Araripe.

Estudos sobre *macro-charcoal*, principalmente do Cretáceo Inferior, vem mostrando uma afinidade desses fósseis com o Grupo das gimnospermas (Benício *et al.*, 2019; Brown *et al.*, 2013; Lima *et al.*, 2019; Scott, 2000, 2006, 2010). No entanto, visto a falta de dados específicos para determinar o grupo botânico e possíveis alterações causadas pela ação do fogo, essa posição taxonômica é dada apenas por afiliação taxonômica. Os registros documentados na literatura para a Bacia do Araripe, também do Cretáceo Inferior, seguem essa mesma origem botânica, com afiliação ao grupo das gimnospermas, principalmente das coníferas Lima *et al.* (2019).

Assim como os registros de *macro-charcoal* têm afinidade gimnospermica, os registros de resinas fossilizadas para a Bacia do Araripe, também seguem essa tendência. Até o momento, os únicos registros documentados na literatura têm sua origem botânica associada a esse grupo, mais precisamente para as famílias

Araucariaceae, Cheirolepidiaceae, Cupressaceae e Podocarpaceae (Paula-Freitas *et al.*, 2019; Pereira; Carvalho; Azevedo, 2007; Pereira *et al.*, 2011, 2019; Seyfullah *et al.*, 2020).

A inferência de uma origem gimnospérmica para esses fósseis é respaldada por estudos conduzidos por Lima *et al.* (2019); Martill *et al.* (2012) no contexto de paleoincêndios e por Paula-Freitas *et al.* (2019), Pereira; Carvalho; Azevedo (2007); Pereira *et al.* (2011, 2019); Seyfullah *et al.* (2020) em seus estudos sobre os âmbares do Araripe. A associação entre essas duas vertentes de estudos amplia a compreensão tanto dos registros de *macro-charcoal* quanto de âmbar, fornecendo informações valiosas sobre a diversidade e ecologia das gimnospermas durante o Cretáceo Inferior da Bacia do Araripe.

Para um entendimento mais detalhado dos regimes de incêndios durante o Cretáceo Inferior e uma identificação taxonômica mais precisa quanto a origem botânica desse material fóssil, relatamos no presente estudo novos registros de *macro-charcoal* na Formação Crato como evidência direta de incêndios vegetacionais. Além disso, observa-se a presença de estruturas morfológicas associadas a âmbar que por vezes foram atribuídas a minerais como a calcita (Uhl *et al.*, 2004) preenchendo os lúmens dos traqueídeos ou a resina carbonizada (âmbar) (Scott *et al.*, 2000; Rockenbach, 2021).

Nesse contexto, o presente estudo fornece evidências concretas da ocorrência de incêndios vegetacionais da Formação Crato, da Bacia do Araripe, adicionando dados inéditos à base global sobre a ocorrência de incêndios vegetacionais durante o Cretáceo Inferior e fornecendo mais informações sobre a origem botânica desse material.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Contribuir para a base de dados sobre a ocorrência de incêndios vegetacionais e das dinâmicas paleoambientais do Cretáceo Inferior por meio da descrição de espécimes de *macro-charcoal* associado a âmbar da Formação Crato

2.2 Objetivos específicos

- Analisar espécimes de *macro-charcoal* com estruturas associadas a âmbar provenientes dos afloramentos da Formação Crato depositados na coleção do Museu de Paleontologia Plácido Cidade Nuvens e Laboratório de Paleontologia da Universidade Regional do Cariri;
- Definir as características morfoanatômicas dos *macro-charcoal* estudados através da obtenção de imagens no Microscópio Eletrônico de Varredura-MEV;
- Correlacionar os fragmentos de *macro-charcoal* das associações estudadas com os grupos sistemáticos a que pertencem;
- Correlacionar os dados coletados na área de estudo com outras associações paleoflorísticas do Cretáceo Inferior.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Paleoflora da Bacia do Araripe

A Bacia do Araripe (Figura 1), é uma das maiores bacias intracratônicas interioranas, localizada no Nordeste do Brasil. Com uma área de cerca de 12 mil km², estende-se pelos estados do Ceará, Pernambuco e Piauí (Saraiva *et al.*, 2021; Valença *et al.*, 2003). Esta bacia sedimentar é considerada um *Fossil-Lagerstätten* devido à excepcional preservação e diversidade de seus fósseis, que compreendem plantas, icnofósseis, invertebrados vertebrados, entre outros registros (Saraiva *et al.* 2021).

A paleoflora da Bacia do Araripe é bastante diversa, representada principalmente por samambaias, licófitas, gimnospermas e angiospermas (Saraiva *et al.*, 2021). No entanto, há uma predominância das gimnospermas, tanto no registro palinológico como no registro macrofóssil (Lima *et al.*, 2012). A diversidade paleoflorística faz dessa bacia sedimentar uma das únicas floras do Gondwana que tem sido estudada de forma contínua ao longo dos anos (Friis *et al.*, 2011).

Figura 1: Mapa geológico da Bacia do Araripe.

Fonte: Assine, (2007).

A Bacia do Araripe possui seus principais representantes fósseis nas quatro formações do Grupo Santana (Barbalha, Crato, Ipubi e Romualdo) Saraiva *et al.* (2021). Dentre essas, destaca-se a Formação Crato, que possui um registro paleobotânico relativamente abundante. O registro de pteridófitas é o mais limitado, com destaque para *Ruffordia goeppertii* (Dunker) Seward (1894). A macroflora gimnospérmica é representada principalmente pelas espécies das famílias Araucariaceae, Cheirolepidiaceae, Podocarpaceae e Welwitschiaceae (discriminadas na tabela 1). Entre as angiospermas, os principais representantes incluem *Jaguariba wiersemaniana*, *Pluricarpellatia peltada*, *Endressinia brasiliana*, *Schenkeriphyllum glandulirum*, *Araripia florífera*, *Iara iguassu*, *Hexagyne philippiana*, *Klitzschophyllites flabelatus*, *Spixiarum kipea*, *Cratomilax jacksoni* e *Cratolirion bognerianum* (Saraiva *et al.*, 2021).

A tabela 1 destaca os principais representantes do grupo das gimnospermas da Formação Crato. A ênfase nesse grupo se justifica pela afinidade dos fitofósseis de *macro-charcoal* encontrados anteriormente nessa formação com as gimnospermas, principalmente com as coníferas (Lima *et al.*, 2019). Assim como pelo fato dos registros das resinas fossilizadas (âmbar) dessa formação estarem restritos a este grupo (Pereira *et al.*, 2011; Seyfullah *et al.*, 2020).

Tabela 01 - Resumo dos principais representantes da paleoflora gimnospérmica da Formação Crato. Elaborado de acordo com Lima *et al.* (2012); Saraiva *et al.* (2021).

Espécie	Família/ Grupo	Referências
<i>Coníferas</i>		
<i>Duartenia araripensis</i>	Coniferales	Mohr <i>et al.</i> (2012)
<i>Pseudofrenolopsis capillata</i>	Cheirolepidiaceae	Sucerquia, Bernardes-de-Oliveira & Mohr (2015)
<i>Pseudofrenolopsis salesii</i>	Cheirolepidiaceae	Batista <i>et al.</i> (2018)
<i>Tomaxellia biforme</i>	Cheirolepidiaceae	Archangelsky (1966)
cf. <i>Araucaria</i> sp.	Araucariaceae	Duarte (1993)
<i>Araucarites vulcanoi</i>	Araucariaceae	Duarte (1993)
<i>Araucariostrobus</i> sp.	Araucariaceae	Krasser (1921)
<i>Brachyophyllum obesum</i>	Araucariaceae	Heer (1881)

<i>Brachyphyllum castilhoi</i>	Araucariaceae	Duarte (1985)
<i>Brachyphyllum sattlerae</i>	Araucariaceae	Batista <i>et al.</i> (2020)
<i>Podozamites lanceolatus</i>	Podocarpaceae	Schimper (1870)
<i>Lindleycladus</i> sp.		Harris (1979)
Gnetales		
<i>Cratonia cotyledon</i>		Rydin <i>et al.</i> (2003)
<i>Priscowelwitschia austroamericana</i>	Welwitschiaceae	Dilcher <i>et al.</i> (2005)
<i>Welwitschiostrobus murili</i>	Welwitschiaceae	Dilcher <i>et al.</i> (2005)
<i>Welwitschiostrobus brasiliense</i>	Welwitschiaceae	Dilcher <i>et al.</i> (2005)
<i>Ephedra paleoamericana</i>	Ephedraceae	Kerkhoff & Dutra. (2007)
<i>Cearania heterophylla</i>	?	Kunzmann <i>et al.</i> (2009)
<i>Cariria orbiculiconiformes</i>	?	Kunzmann <i>et al.</i> (2011)
<i>Itajuba yansanae</i>	?	Ricardi-Branco <i>et al.</i> (2013)
<i>Friedsellowia gracilifolia</i>	?	Löwe <i>et al.</i> (2013)
Incertae sedis		
<i>Novaolinda dubia</i>		Kunzmann <i>et al.</i> (2007)

Fonte: Autor.

3.2. Formação Crato

A Formação Crato (Figura 2), destaca-se como uma unidade geológica notável pela abundância de fósseis continentais, especialmente de animais e plantas depositados em sedimentos datados do Cretáceo Inferior (Viana; Neumann, 2002). Os registros fósseis dessa formação têm sido cruciais para reconstrução da paleoflora e paleofauna da Bacia do Araripe devido à sua abundância e diversidade (Fambrini *et al.*, 2020; Lima *et al.*, 2012; Saraiva *et al.*, 2008, 2021).

De acordo com Neumann (1999), as rochas da Formação Crato revelam um sistema lacustre, predominantemente composto por calcários micríticos laminados, argilosos e folhelhos papiráceos calcíferos (Fambrini *et al.*, 2020; Saraiva *et al.*, 2021). A Formação Crato é constituída por seis unidades, denominadas informalmente de C1 a C6, intercaladas por arenitos, siltitos e folhelhos (Neumann;

Cabrera, 1999). A flora que compunham esses níveis variava de coníferas (C1), samambaias, coníferas e angiospermas (C2-3), samambaias e coníferas (C4), coníferas (C5-6) (Neumann *et al.*, 2003).

Figura 02: Afloramento da Formação Crato no Município de Nova Olinda, mostrando a extração da “pedra cariri”.



Fonte: Flaviana Lima.

Nesta formação também são encontrados fósseis que abrangem uma variedade de organismos como peixes, répteis voadores (pterossauros), insetos, entre outros. Um aspecto notável é a excelente preservação de alguns fósseis, com impressões de tecidos moles Sayão *et al.* (2015); Saraiva *et al.* (2021). A diversidade fóssil encontrada nessa formação contribui significativamente para nossa compreensão da paleoecologia e evolução das espécies que habitavam essa região (Silva; Neumann, 2003).

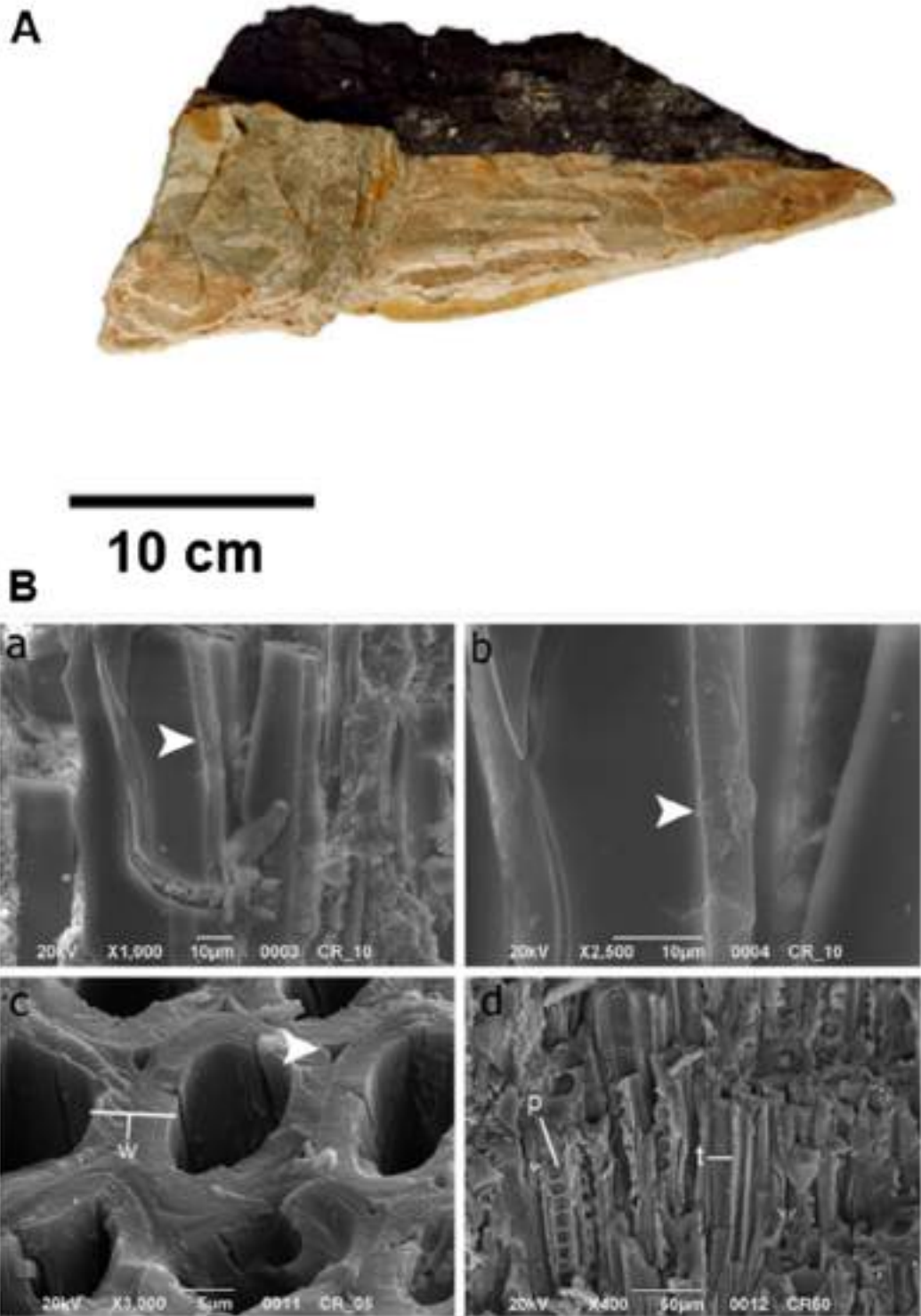
3.2.1 Registros de macro-charcoal na Formação Crato.

Além do registro macrofóssil e palinológico, a paleobotânica dessa formação documenta outros registros ligados às plantas, como a interação inseto-planta

(Santos Filho *et al.*, 2017) e o registro de incêndios vegetacionais por meio de *macro-charcoal* (Lima *et al.*, 2019). Embora relativamente escasso, a presença de *macro-charcoal* nesta formação confirma que, pelo menos em algum momento, o paleoambiente dessa formação esteve sob regime de fogo.

O estudo realizado por Lima *et al.* (2019) relata registros de paleoincêndios nas três formações do Grupo Santana (Crato, Ipubi e Romualdo). No que se refere às amostras de *macro-charcoal* da Formação Crato (Figura 3) analisadas no referido estudo, elas exibiram características, como coloração negra, brilho sedoso, manchas ao toque e relativa inércia, além de detalhes anatômicos bem preservados e a homogeneização das paredes celulares, consideradas diagnósticas para comprovação de *macro-charcoal* (*sensu* Scott, 2010).

Figura 03: *Macro-charcoal* da Formação Crato. (A) Espécime LPU 1560; (B) prancha das Imagens de MEV, mostrando homogeneização das paredes celulares, traqueídes e pontoações unisseriadas.



Fonte: Retirado de Lima *et al.* (2019).

3.2.2 Registros de âmbar da Formação Crato.

A Formação Crato possui os principais registros de resinas fossilizadas (âmbar) da Bacia do Araripe. Dos nove registros documentados na literatura, sete são provenientes desta formação, conforme relatado por Castro; Campanha (1970);

Cardoso *et al.* (1999, 2001); Martill *et al.* (2005); Pereira; Carvalho; Azevedo (2007, 2011); Seyfullah *et al.* (2020). Os dois restantes abrangem outras formações, como a Formação Barbalha (Paula-Freitas *et al.*, 2019) e a Formação Ipubi (Pereira *et al.*, 2019).

Autores como Castro; Campanha (1970), Cardoso *et al.* (1991, 2001) e Martill *et al.* (2005) apenas relataram ocorrências de âmbar, sem fornecerem análises químicas mais detalhadas ao contrário do que fez Pereira; Carvalho; Azevedo (2007); Pereira *et al.* (2011) e Seyfullah *et al.* (2020) ao empregarem análises químicas, por meio da cromatografia gasosa acoplada à espectroscopia de massas (GC-MS). Os estudos mencionados confirmaram uma afinidade desses âmbares com as gimnospermas, principalmente coníferas das famílias Araucariaceae, Cheirolepidiaceae, Cupressaceae e Podocarpaceae.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

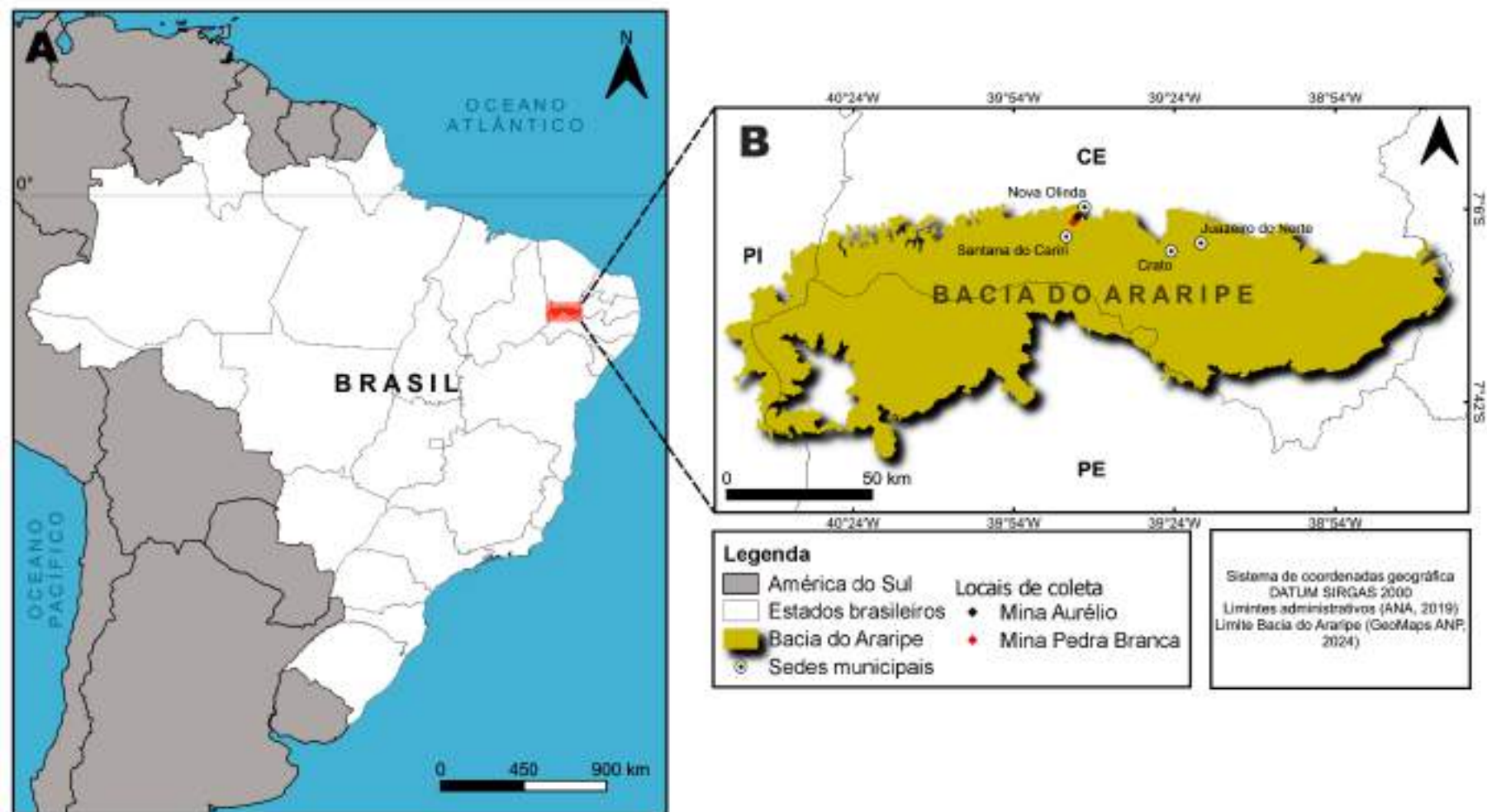
4.1 *Material estudado*

O material estudado foi coletado em afloramentos da Formação Crato, localizados nos Municípios de Nova Olinda e Santana do Cariri, Ceará, Brasil. Este material está sob a guarda do Laboratório de Paleontologia da Universidade Regional do Cariri (LPU), em Crato-CE e do Museu de Paleontologia Plácido Cidade Nuvens (MPPCN), em Santana do Cariri-CE.

No total, foram selecionados quatro espécimes para análises, três deles, provenientes do acervo do LPU, coletados nas Minas do Aurélio e Pedra Branca, em Nova Olinda e Santana do Cariri-CE, respectivamente e um proveniente do acervo do MPPCN que foi adquirido durante a operação "Santana Raptor" da Polícia Federal, destinada a combater o tráfico de fósseis na Bacia do Araripe. Devido à forma ilegal de sua extração, o espécime proveniente do MPPCN não possui uma definição concreta do local de coleta, contudo as características da rocha (calcário laminado) são típicas dos afloramentos da Formação Crato. Vale salientar que esse exemplar, previamente resguardado pelo museu, encontra-se sob a tutela do LPU, por empréstimo, servindo como fonte de estudo para a referida pesquisa.

Para um melhor entendimento dos locais de coletas do material, foi produzido um mapa com as devidas coordenadas dos dois afloramentos da Formação Crato nas cidades de Nova Olinda e Santana do Cariri: "Mina do Aurélio" (07°.07'.21,9" S 39°.42'.01" W) e "Pedra Branca" (07°.08'.23" S 39°.42'.47" W), proporcionando uma definição mais precisa dos locais de coleta (Figura 4).

Figura 4: Mapa de Localização Geográfica da Bacia do Araripe. (A) Mapa simplificado mostrando a localização da Bacia do Araripe na América do Sul. (B) Mapa da Bacia do Araripe indicando os locais de coleta.



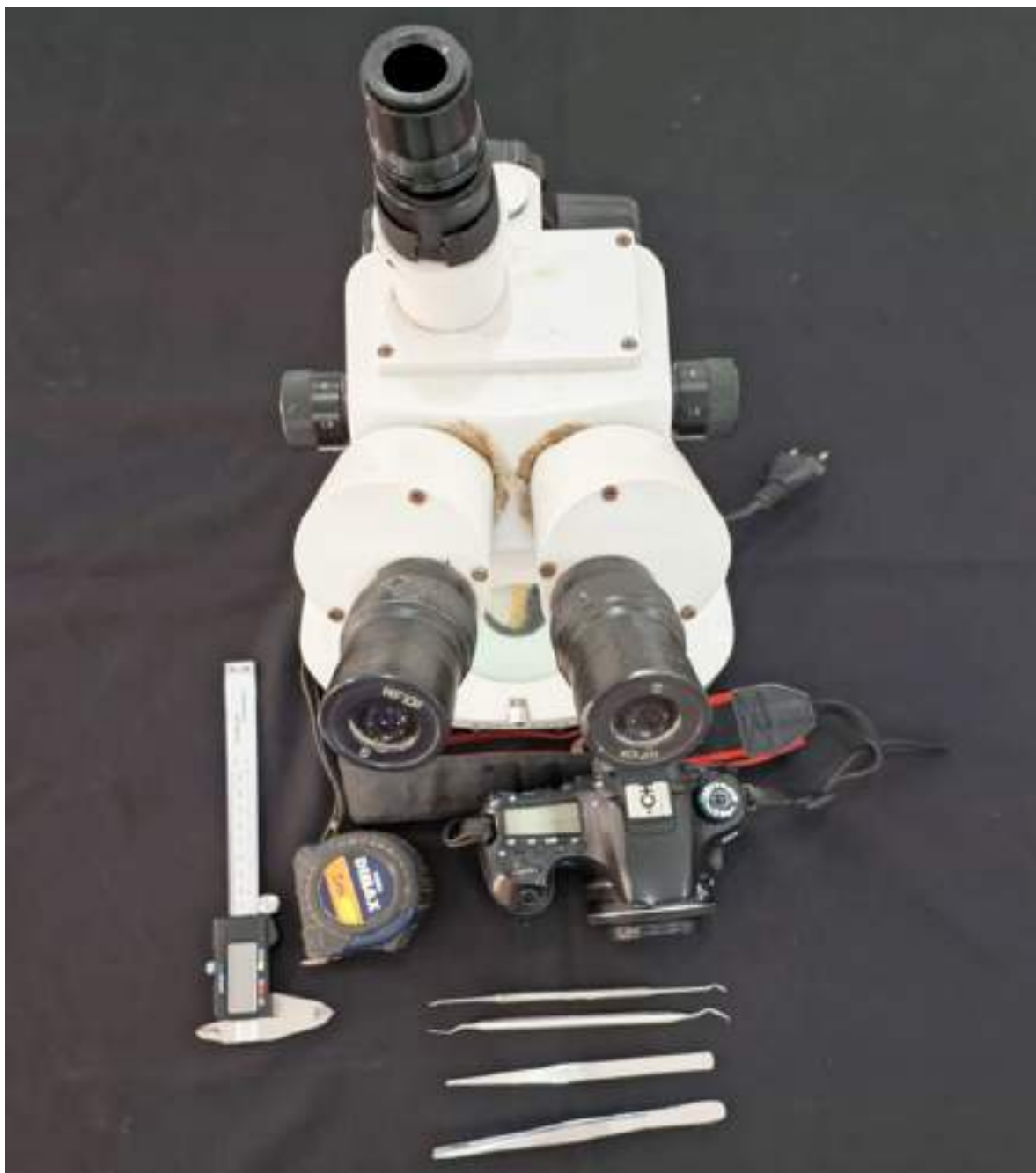
Fonte: autor.

4.2 Procedimentos metodológicos

Os procedimentos metodológicos iniciaram-se com a separação das rochas contendo os fósseis, que foram posteriormente conduzidas ao laboratório. Lá, foram submetidas a um processo abrangente, que incluiu identificação, separação, medidas e fotografias. Nessa etapa, foi usado uma câmera Canon EOS 60D-DS, lupa e microscópio ótico (modelo opton com ampliação de 4x) para facilitar a observação e documentações preliminares das características morfológicas. Para uma mensuração mais precisa dos tamanhos dos espécimes foi utilizado paquímetro digital e trena para medição (Figura 5). Após a triagem e escolha das amostras com características de *macro-charcoal* associado a âmbar, estas foram separadas e tombadas com as siglas LPU-C seguida de numeração individual específica.

As imagens foram obtidas utilizando um Microscópio Eletrônico de Varredura-MEV, modelo (SU3500 Hitachi, Tóquio, Japão), da Universidade Regional do Cariri-URCA (Figura 6). Para esta etapa, foram retirados fragmentos de *macro-charcoal*, fixados em suportes de alumínio utilizando fita de carbono dupla face e cobertas com uma camada de 20 nm de prata numa metalizadora, modelo (QT150 ES Quorum, Edimburgo, Reino Unido) (Figura 7). Essa etapa foi realizada em colaboração com a Central Analítica da Universidade Federal do Ceará (UFC). As imagens de MEV foram adquiridas em baixo vácuo, com uma pressão na câmara do microscópio de 30 Pa, utilizando um detector de elétrons retroespalhados (BSE-3D) e uma tensão de aceleração do feixe de elétrons de 15 kV.

Figura 05: Material utilizado para identificação, mensuração, fotografias, análises preliminares dos espécimes e retirada dos fragmentos para análises em MEV.



Fonte: Autor.

Figura 06: Modelo SU3500, HITACHI do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) pertencente a Universidade Regional do Cariri-URCA.



Fonte: foto cedida por Naiara Cipriano.

Figura 07: Modelo ilustrativo da metalizadora QT150 ES (Quorum, Edimburgo, Reino Unido).



Fonte: <https://www.scai.uma.es/areas/micr/tem/tem.html>, foto ilustrativa.

4.3 Confirmação da presença de *macro-charcoal* e âmbar na Formação Crato

Para confirmar a presença de *macro-charcoal* associado a âmbar na Formação Crato, os espécimes com essas características foram submetidos a análises preliminares utilizando lupas e microscópio óptico. A identificação foi realizada com base nas características distintivas de *macro-charcoal*, como coloração negra, brilho sedoso e propensão a manchas ao toque e relativa inércia (Scott 2010). Para os âmbares, foram analisadas as características típicas desses fósseis, como aspecto vítreo, variação de coloração de amarelo, castanho a

avermelhado e luminescência marcante (Pereira *et al.*, 2011; 2019; Seyfullah *et al.*, 2020).

4.4 Caracterização morfoanatômica por MEV

A caracterização morfoanatômica dos espécimes foi conduzida por meio de imagens obtidas por MEV. As amostras selecionadas foram preparadas e analisadas utilizando essa técnica de alta resolução para explorar detalhes microscópicos das estruturas, possibilitando uma descrição mais precisa das características anatômicas desses fósseis.

As análises por MEV foram realizadas para proporcionar uma visualização detalhada das microestruturas dos espécimes. Visto que, essa técnica oferece uma capacidade de ampliação muito superior à dos microscópios ópticos tradicionais, possibilitando uma análise mais aprofundada das estruturas microscópicas dos espécimes estudados. Para esta etapa, as amostras foram submetidas a cortes em planos transversal, longitudinal tangencial e radial como esquematizado na figura 8, para uma melhor visualização de suas estruturas anatômicas. Após os cortes, os fragmentos foram fixados em suportes de alumínio (*stubs*) com fita dupla face de carbono e metalizados com prata.

4.5 Correlação taxonômica de *macro-charcoal* e âmbar

A correlação taxonômica de *macro-charcoal* e âmbar com os grupos taxonômicos a que pertencem foram realizadas por meio de comparações das características morfológicas e anatômicas observadas com descrições e imagens de fósseis previamente documentados na literatura, assim como a relação intrínseca das principais famílias produtoras de resinas. Essa correlação foi complementada com observações do âmbar visível a olho nu nos espécimes, com atribuições taxonômicas previamente documentadas na literatura. Essas análises permitiram uma atribuição taxonômica mais precisa dos espécimes estudados, uma vez que para a Bacia do Araripe, os âmbares são pertencentes ao grupo das gimnospermas, especialmente coníferas das famílias Araucariaceae, Cheirolepidiaceae, Podocarpaceae e Cupressaceae como evidenciam Paula-Freitas *et al.* (2019); Pereira *et al.* (2007, 2011, 2019); Seyfullah *et al.* (2020). Já os registros de *macro-charcoal* são também classificados como pertencentes a este grupo, porém

por uma afiliação taxonômica devido à escassez de informações mais detalhadas (Lima *et al.*, 2019).

Essa metodologia integrada proporciona uma contribuição significativa para o entendimento das dinâmicas paleoambientais e da ocorrência de incêndios vegetacionais no Cretáceo Inferior. Além disso, amplia nosso entendimento sobre a paleobiologia e paleoecologia associadas aos fósseis de *macro-charcoal* da Formação Crato.

Figura 8: Representação esquemática de seção da madeira, mostrando em detalhe os planos de cortes. X- Transversal, R- Longitudinal Radial e T- Longitudinal Tangencial.



Fonte: Botosso (2011, com adaptações).

5 RESULTADOS

Os espécimes analisados neste estudo, exibem âmbar bem visíveis a olho nu, bem como características associadas ao *macro-charcoal*, como cor negra, brilho sedoso, propensão a manchas ao toque e relativa inércia, assim como detalhes anatômicos bem preservados quando observados sob MEV e a homogeneização das paredes celulares, considerado um critério diagnóstico para o *macro-charcoal* (Scott, 2010). Os resultados apresentados aqui, foram construídos a partir das análises tanto em microscópio óptico quanto MEV. Para tanto foram analisadas as estruturas anatômicas do *macro-charcoal*.

5.1 *Macro-charcoal* da Formação Crato

5.1.1 *Espécime LPU-C 1396*

O espécime LPU-C 1396 encontra-se preservado em uma rocha calcária de coloração bege, com o lenho carbonizado medindo aproximadamente 25 cm de comprimento por 13 cm de largura. Exibe as características típicas observáveis a olho nu, como, coloração negra, brilho sedoso e propensão a manchas ao toque, além de algumas fragmentações em suas bordas e relativa inércia. Apresenta também âmbar (resina fossilizada), medindo 6 cm de comprimento por 2 cm de largura, disposto uniformemente na parte mais central do espécime (Figura 9).

O fragmento de âmbar apresenta grande parte coberto por incrustação de cor amarelada, quando exposto à luz ultravioleta mostra forte luminescência, predominando-se a coloração nos tons de castanho a avermelhado e aspecto vítreo. Ao ser analisado em microscópio óptico, o âmbar apresentou algumas inclusões, como restos do lenho carbonizado, betumes, fraturas internas e outras inclusões indeterminadas.

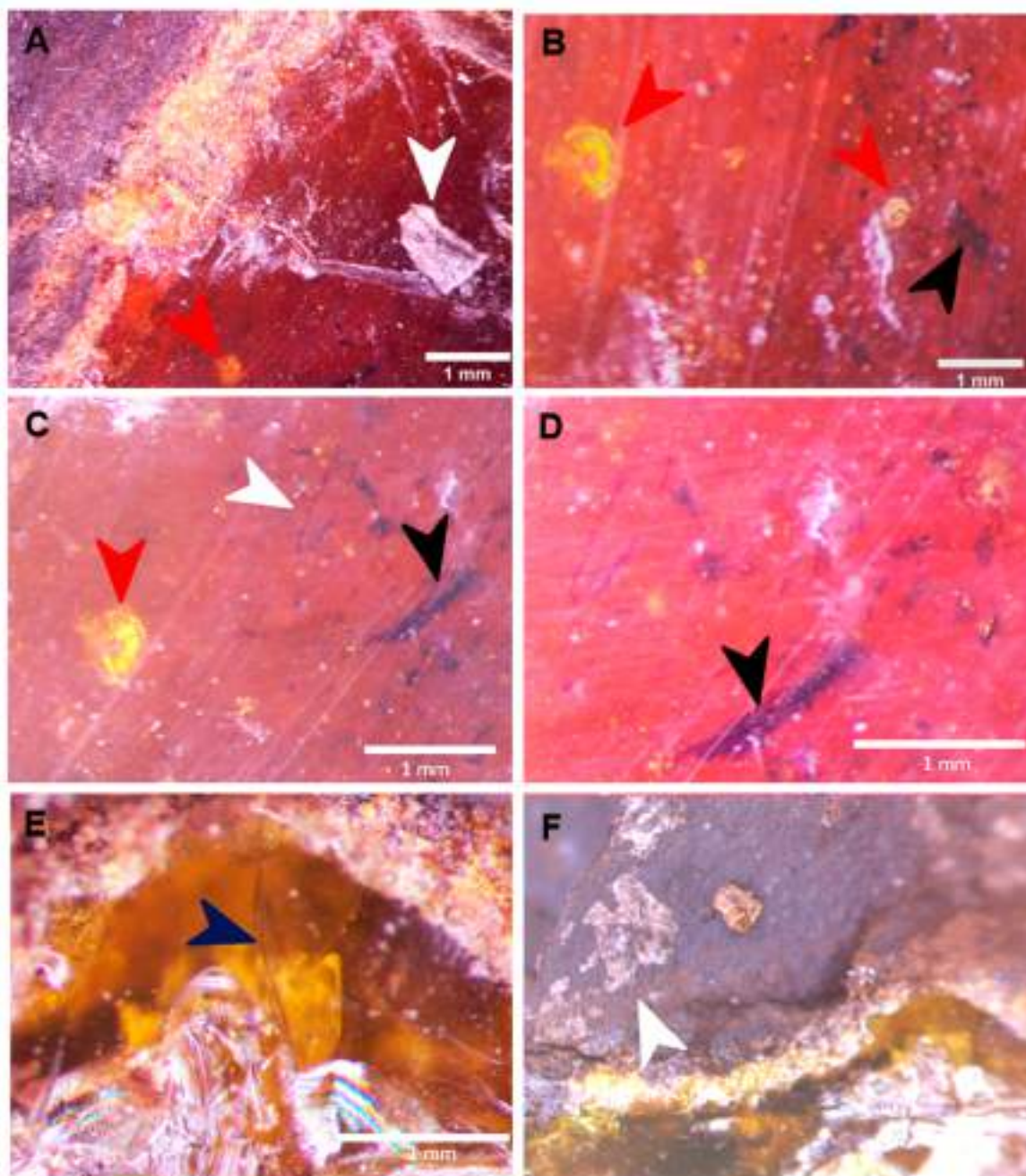
Figura 09: Espécime LPU-C 1369. Exibe lenho carbonizado medindo 25 cm de comprimento x 13 cm de largura e âmbar medindo 6 cm de comprimento x 2 cm de largura indicado pelo retângulo em vermelho. Setas brancas indicam os locais da retirada dos fragmentos para análises em MEV.



Fonte: autor.

O composto em forma de betume de cor amarela foi, possivelmente, exsudado da madeira em uma temperatura menor no momento da combustão, entre 270 °C e 290 °C (Cardoso, 2017 que descreve diferentes etapas de temperaturas para a combustão do material vegetal). Pode-se inferir também que a resina foi exsudada antes de sua maturação completa e/ou em resposta aos danos mecânicos causados pelo fogo. Ademais, sugere-se que, à medida que a temperatura aumentou, a resina diluiu, percorreu o lenho e espaços vazios deixados por outros compostos líquidos, típicos de madeira viva (verde) liberados no momento da combustão.

Figura 10: Imagens em microscópio óptico do fragmento de âmbar do espécime LPU-C 1396, exibindo betumes (setas vermelhas), restos do lenho carbonizado (setas pretas), inclusões indeterminadas (seta branca) e fissuras internas (seta azul).



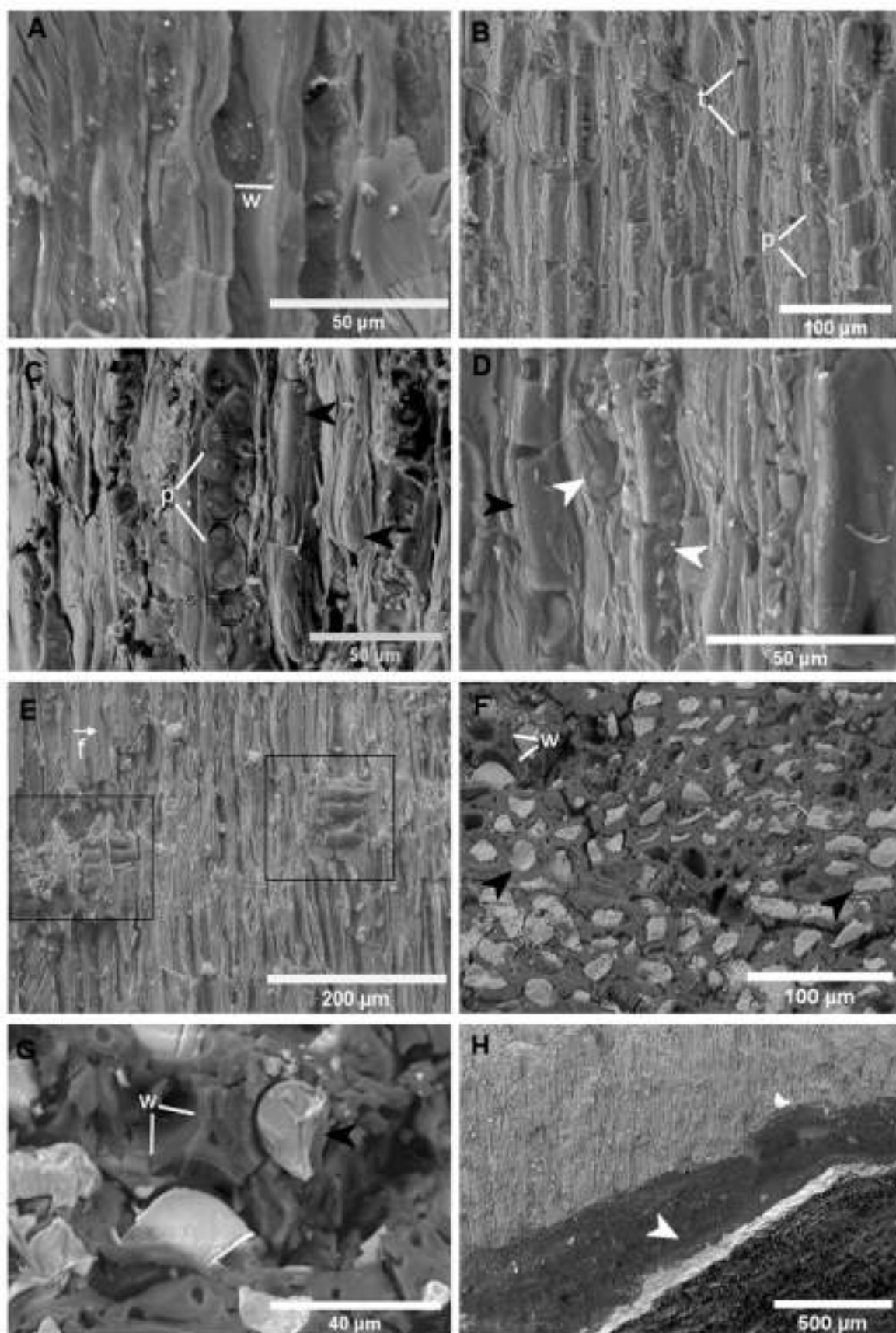
Fonte: autor.

Quando analisado sob MEV, o espécime LPU-C 1396 exibiu em seção longitudinal radial, paredes celulares homogeneizadas (Figura 11 A), traqueídes preenchidas por âmbar em formato de bastonete (Figura 11 B). Em seção longitudinal radial, exibiu traqueídes com pontoações areoladas em arranjo bisseriado também preenchidas por âmbar, com aberturas circulares com dimensões de aproximadamente 13 μm diâmetro (Figura 11 C) e âmbar preenchendo as traqueídes e pontoações preservados em forma de molde (Figura

11 D). Em seção longitudinal radial, o espécime exibiu também campos de cruzamentos preenchidos por âmbar e fibras (Figura 11 E). Em seção transversal exibiu âmbar preenchendo os lúmens traqueídeos (Figura 11 F-G). A homogeneização da parede celular também foi observada em seção longitudinal tangencial e longitudinal radial (Figura 11 F-G).

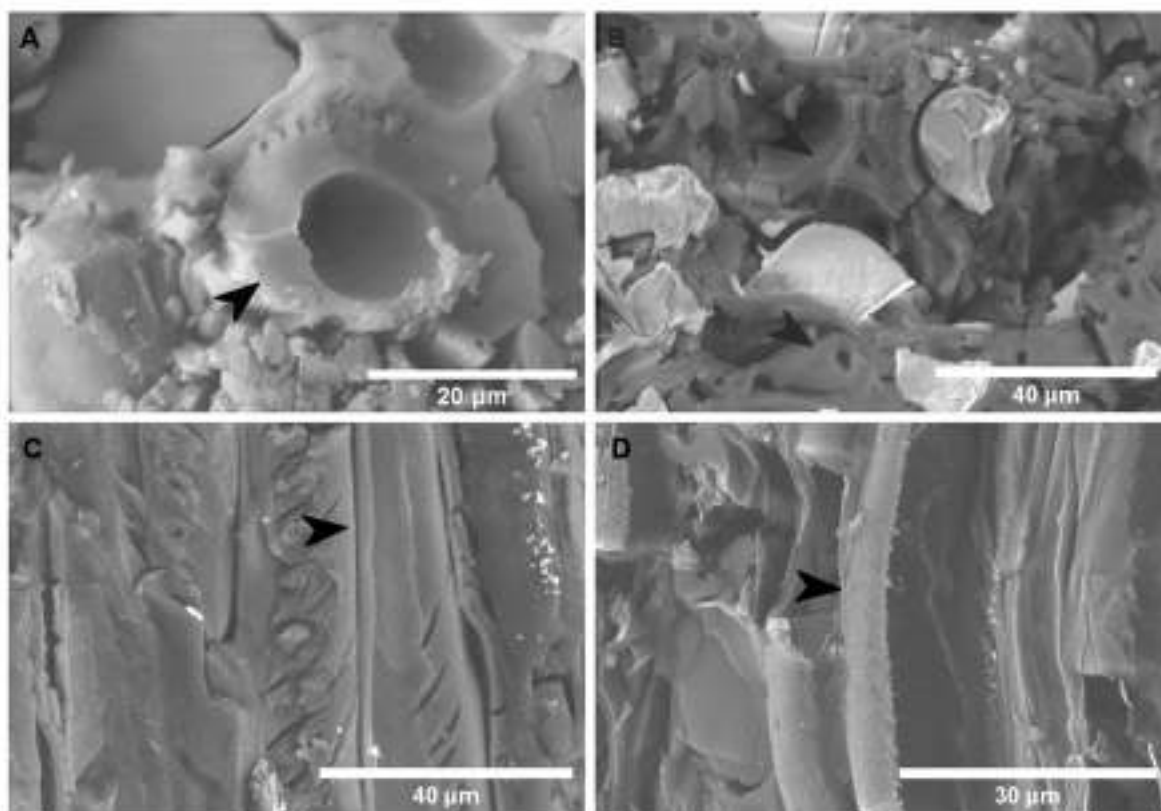
Este espécime, exibiu as paredes celulares bem homogeneizadas, que pode ser observada em seção longitudinal tangencial, radial e transversal (Figura 12 A-D), confirmando que se trata realmente de *macro-charcoal*, conforme critérios diagnósticos estabelecidos por Scott, (2010).

Figura 11: Fotografias realizadas em MEV espécime LPU-C 1396: (A) seção longitudinal radial exibindo a homogeneização das paredes celulares (w) (B) seção longitudinal radial com traqueídes (t) fragmentadas exibindo âmbar em formato de bastonete e pontoações areoladas (p) unisseriadas preenchidas por âmbar; (C) seção longitudinal radial com pontoações areoladas (p) bisseriadas e traqueídes (t) preenchidas por âmbar (setas pretas); (D) seção longitudinal radial com traqueídes (t) preenchidas por âmbar em formato alongado preservado mesmo após a fragmentação dessas traqueídes (seta preta) e a preservação das pontoações (p) em forma de “molde” preenchido por âmbar (setas brancas); (E) seção longitudinal radial com campos de cruzamentos fragmentados expondo o âmbar e fibras (f); (F) vista geral em seção transversal, exibindo o preenchimento dos lúmens traqueídeos por âmbar (setas pretas) e detalhe da homogeneização das paredes celulares (w); (G) detalhe de F, exibindo as paredes celulares homogeneizadas (w), lúmens traqueídes preenchidos por âmbar (seta preta) e espaços intercelulares. Os lúmens presentes nessa amostra, apresentam-se em sua maioria, de forma arredondada; (H) vista geral mostrando o âmbar preenchendo parte da amostra, de uma extremidade a outra (seta branca).



Fonte: Autor.

Figura 12: Detalhes da homogeneização das paredes celulares observadas em seção transversal (Figuras 12 A-B), seção longitudinal tangencial (Figura 12 C) e em seção longitudinal radial (Figura 12 D).

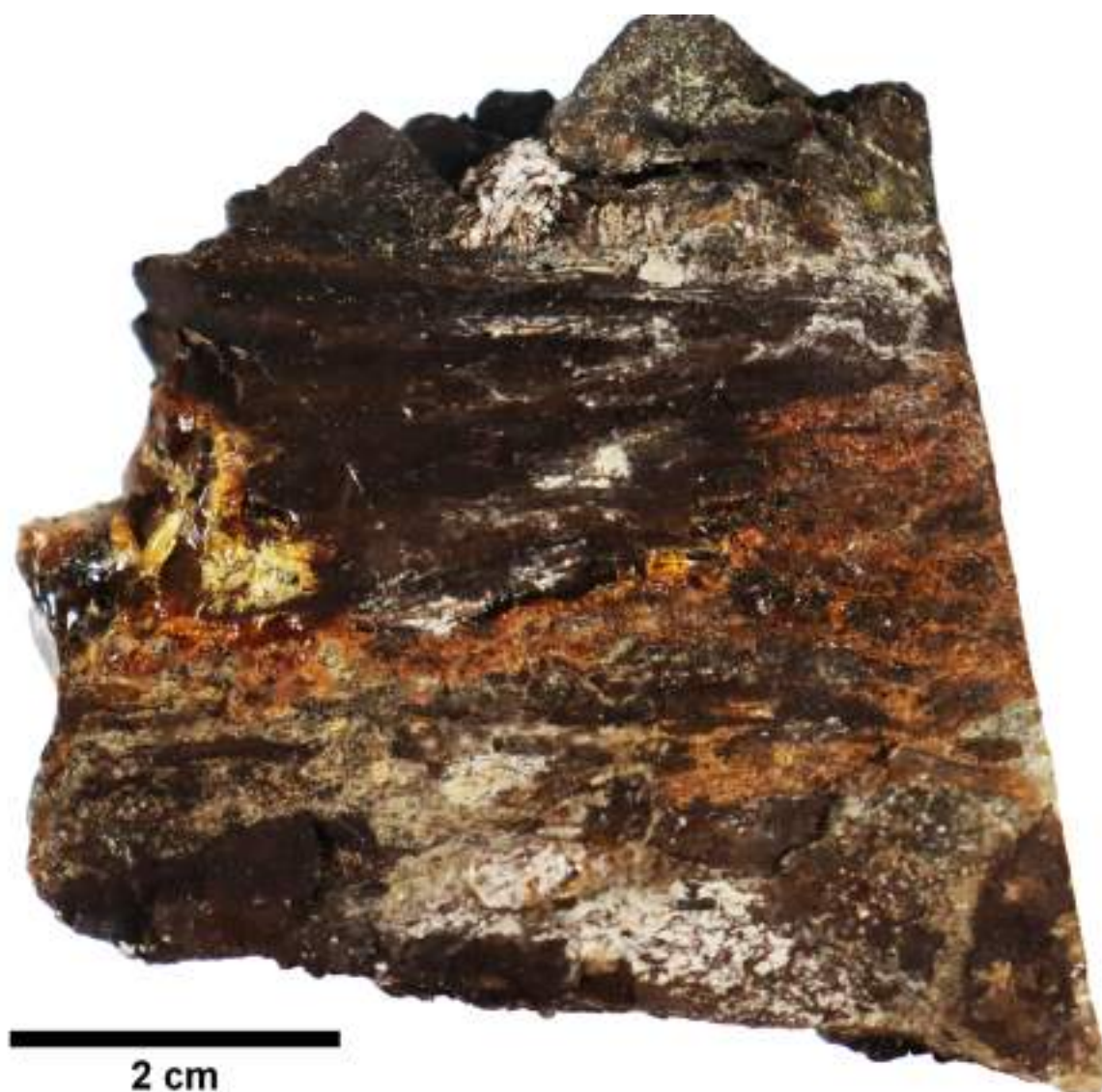


Fonte: Autor.

5.1.2 Espécime LPU-C 024

O espécime LPU-C 024 encontra-se totalmente isolado da matriz rochosa, mede aproximadamente 5,5 cm de comprimento x 5,5 cm de largura (medidas do centro do espécime). Ele compartilha algumas características típicas de *macro-charcoal* observáveis a olho nu, como, coloração negra, brilho sedoso, propensão a manchas ao toque e relativa inércia, assim como âmbar aderido por grande parte do espécime que lhe confere uma certa rigidez (Figura 13).

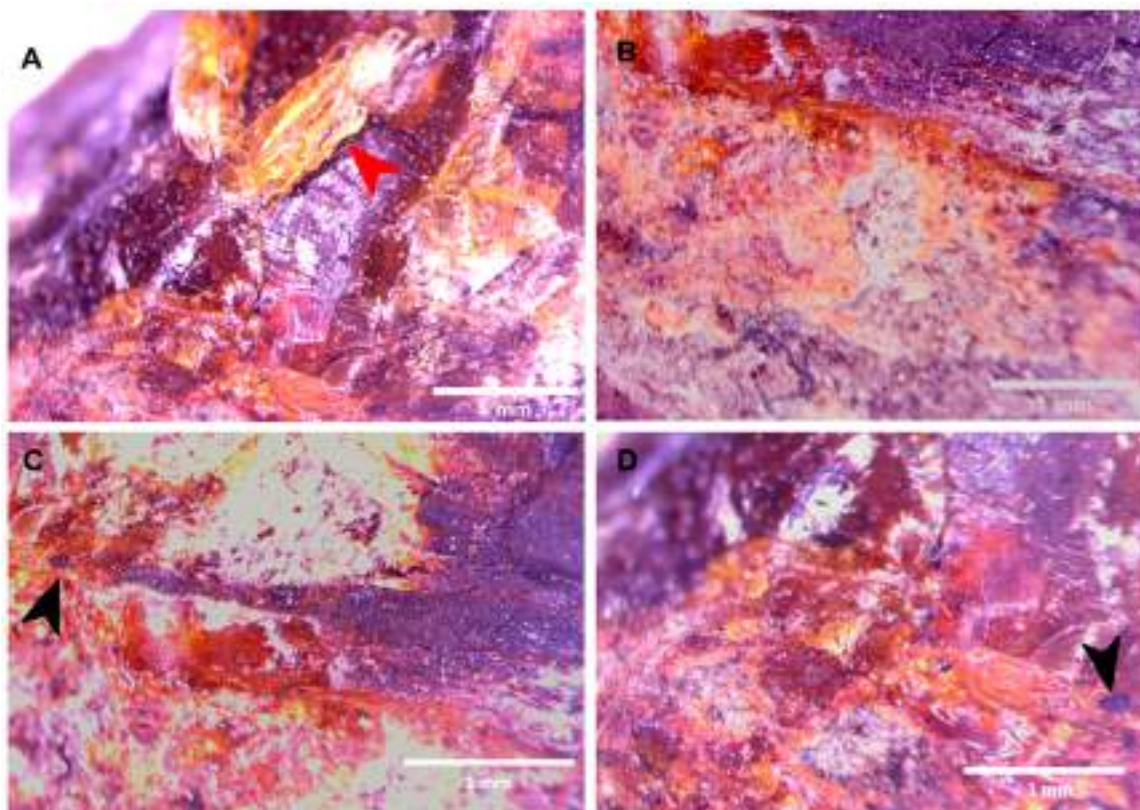
Figura 13: Espécime LPU-C O24 medindo 5,5 cm de comprimento x 5,5 cm de largura (medida do centro do espécime), apresentando âmbar bem visível aderido por grande parte do espécime.



Fonte: autor.

O âmbar está presente em grande parte neste espécime, possivelmente por ter se diluído e escorrido pelo lenho no momento da combustão, recobrindo e aderindo ao lenho carbonizado, compostos presentes, como o betume e inclusões indeterminadas que ficaram preservadas (Figura 14 A-D). Quando exposto à luz, este apresentou forte luminescência e uma coloração predominante nos tons de castanho a avermelhados.

Figura 14: Imagens em microscópio óptico do âmbar do espécime LPU-C 024, exibindo restos do lenho carbonizado (setas pretas), betumes (seta vermelha) e inclusões indeterminadas (seta branca).

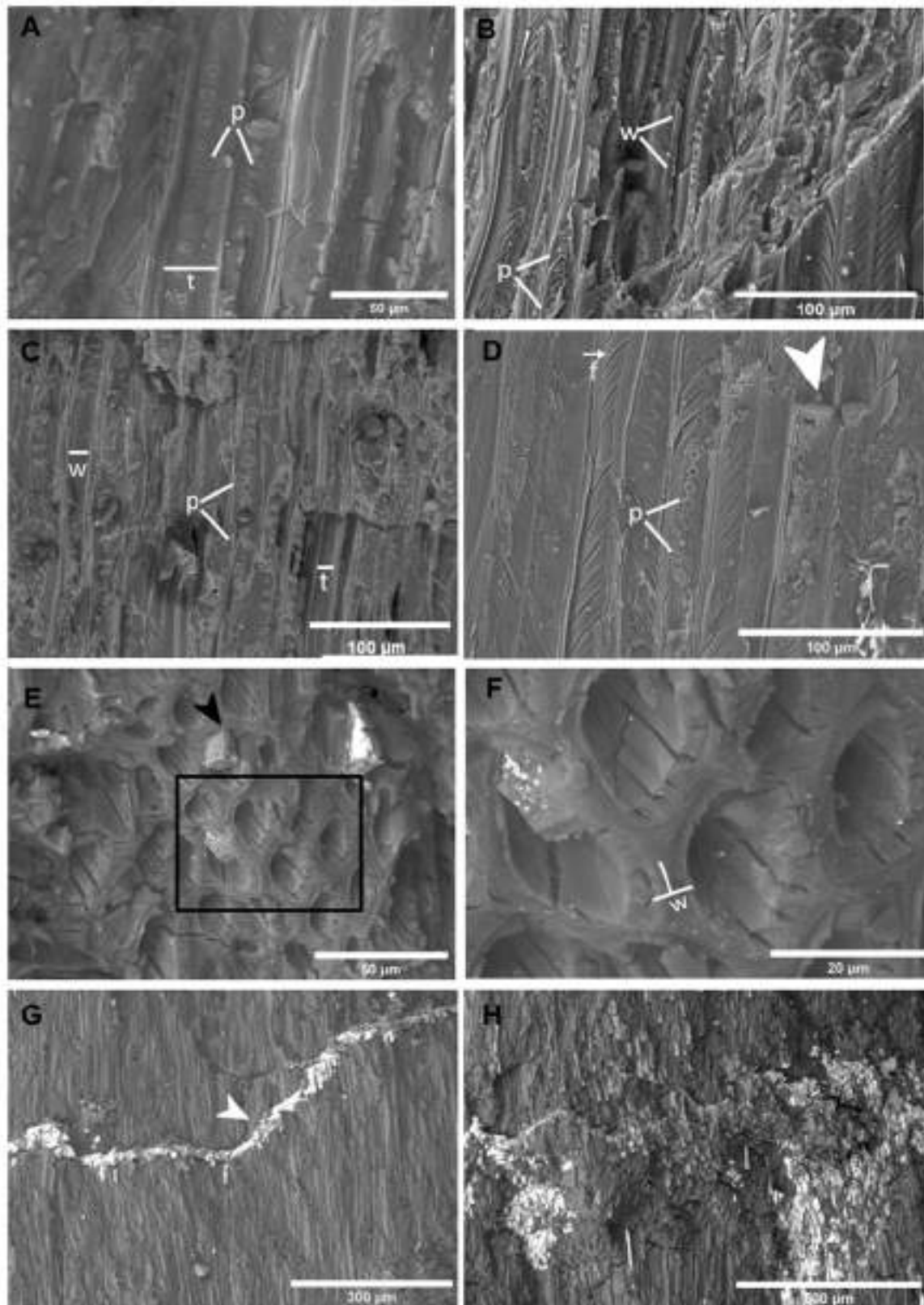


Fonte: Autor.

Sob MEV, o espécime LPU-C 024 exibiu em seção longitudinal tangencial e longitudinal radial estruturas anatômicas como traqueídes (t) com pontoações areoladas (p) em arranjo unisseriado, com aberturas circulares com cerca de 8 μm de diâmetro, em sua maioria preenchidos por âmbar, (Figura 13 A-D). Em seção transversal, é observado os lúmens dos traqueídeos com e sem a presença de âmbar e a homogeneização das paredes celulares (w) (Figura 13 E-F). Também em seção transversal, em vista mais geral é observado o âmbar de uma extremidade a outra da amostra, assim como os lúmens traqueídeos, em parte preenchidos por âmbar (Figura 12 G-H). A homogeneização das paredes celulares, foram observadas nas seções longitudinal radial (Figura 13 E) e transversal (Figuras 13 F-G).

Figura 15: Fotografias realizadas em MEV espécime LPU-C 024 (A) seção longitudinal radial exibe traqueídes (t) com pontoações areoladas (p) com e sem o preenchimento por âmbar, pontoações medindo cerca de 8 μm de diâmetro; (B) seção longitudinal radial exibe pontoações areoladas (p) e homogeneização das

paredes celulares (w); (C) seção longitudinal tangencial exhibe traqueídes (t) com pontoações areoladas preenchidas por âmbar e paredes celulares homogeneizadas (w); (D) seção longitudinal radial exhibe traqueídes (t) preenchidas por âmbar (seta branca), pontoações areoladas (p) e fibras (f); (E) seção transversal mostrando lúmens dos traqueídeos com e sem o preenchimento por âmbar; (F) detalhes de E mostrando as paredes celulares homogeneizadas (w) e lúmens dos traqueídeos; (G) vista geral mostrando o âmbar de uma extremidade a outra da amostra (seta branca); (H) seção transversal exibindo âmbar preenchendo grande parte dos lúmens dos traqueídeos da amostra.

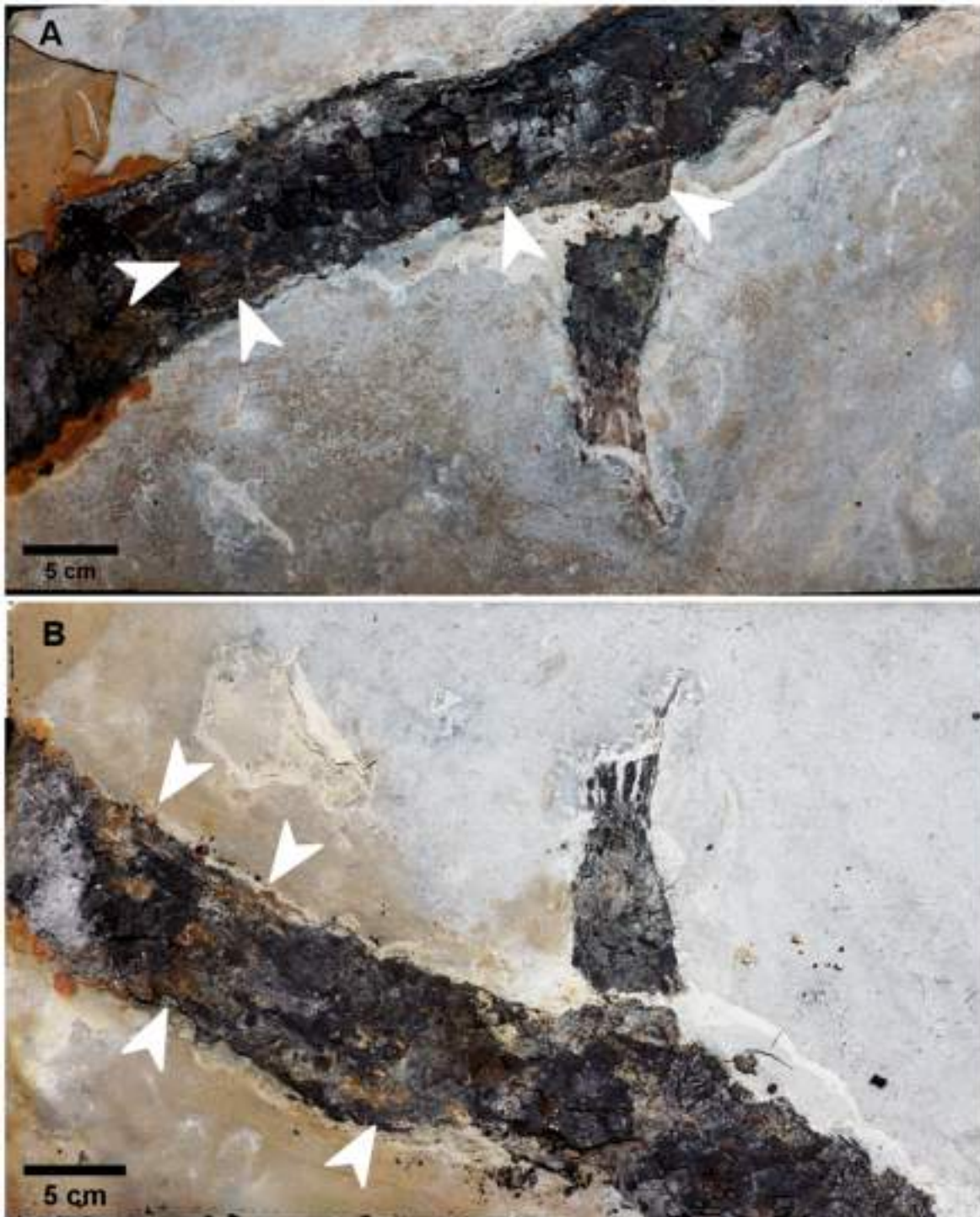


Fonte: Autor.

5.1.3 Espécime LPU-C 062 p/cp

O espécime LPU-C 062 p/cp encontra-se preservado em uma rocha calcária de coloração cinza, medindo aproximadamente 41,5 cm de comprimento x 8 cm de largura, medidas do lenho carbonizado. Apresenta características distintivas como, coloração negra, brilho sedoso, propensão a manchas ao toque e relativa inércia. Este difere dos demais espécimes por apresentar apenas fragmentos de resinas visíveis a olho nu (setas brancas) (Figuras 14 A-B). Devido a sua dimensão e por conter apenas fragmentos de âmbar, não foi possível sua observação em microscópio óptico, sendo realizado, portanto, apenas as fotografias dos fragmentos, usando uma lupa de aumento de braço articulado para facilitar a visualização (Figura 15 C) e as análises posteriores realizadas em MEV.

Figura 16: Espécime LPU-C 062 p/cp, com lenho carbonizado medindo aproximadamente 41,5 cm de comprimento x 8 cm de largura, exibindo apenas alguns fragmentos de âmbar (setas brancas) (Figuras A-B).

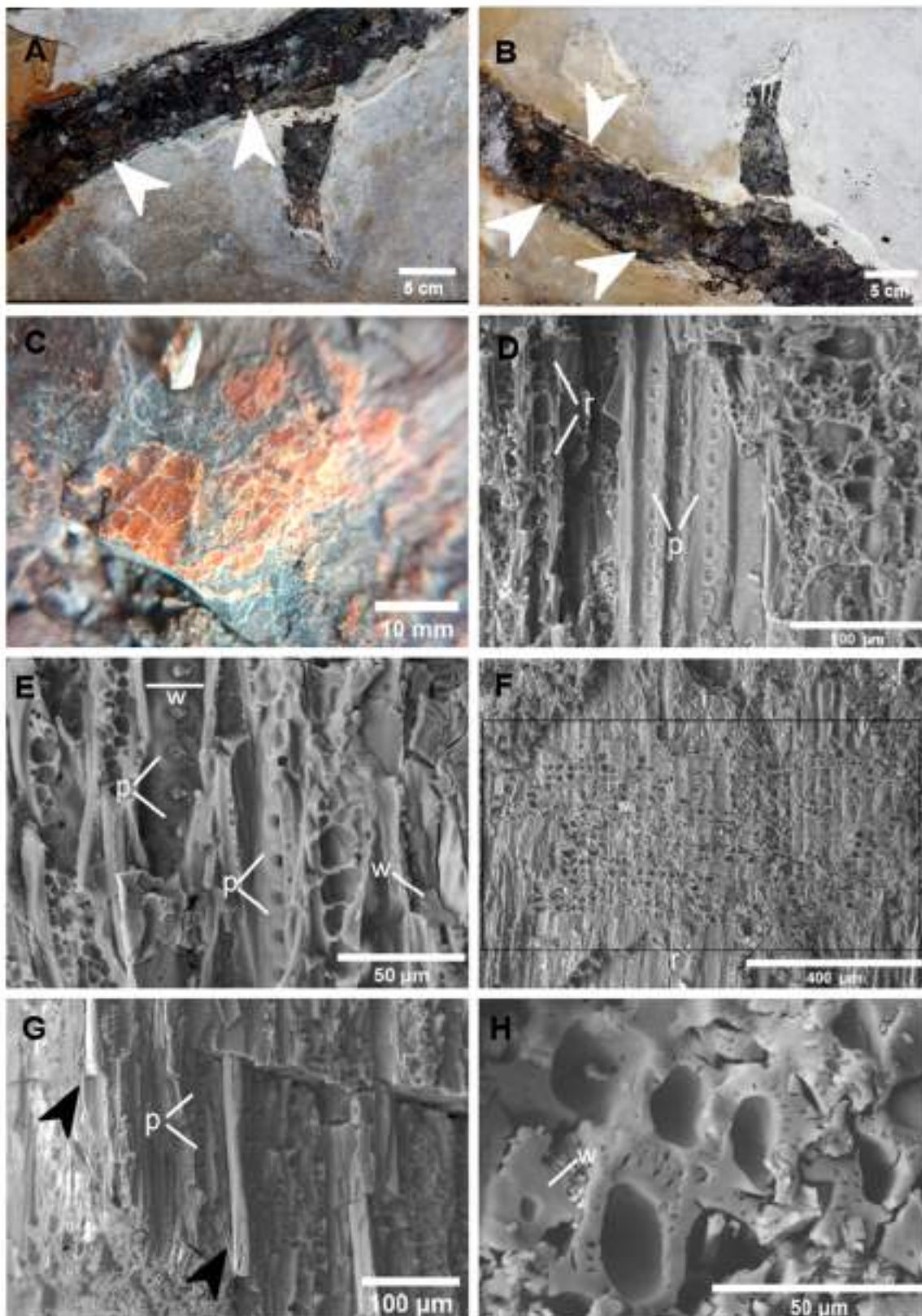


Fonte: autor.

Ao ser analisado sob MEV, o espécime exibiu em seção longitudinal tangencial traqueídes (t) com pontoações areoladas (p) com e sem a presença de âmbar. Estas pontoações exibem dimensões aproximadas entre 11 μ m e 14 μ m (Figuras 15 D-E) e raios unisseriados (r) (Figura 15 D). Vale destacar que a pequena

quantidade de âmbar visível a olho nu se refletiu nas análises em MEV, com apenas algumas pontoações preenchidas por âmbar (Figura 15 D-E) e nos lúmens traqueídeos, presentes na (Figura 15 G). Quando analisados em seção longitudinal radial a amostra exibiu certa quantidade de raios parenquimatosos homocelulares, com dezoito células de altura, (Figura 15 F). Em seção longitudinal radial, observou-se também âmbar preservado mesmo com a fragmentação dos lúmens celulares (Figura 15 G). A homogeneização da parede celular (w) foi observada em seção longitudinal tangencial (Figura 15 E) e na seção transversal (Figura 15 H).

Figura 17: Fotografias realizadas em MEV espécime LPU-C 062 p/cp (A-B) espécime LPU-C 062 p/cp exibindo lenho carbonizado e fragmentos de âmbar; (C) detalhes dos fragmentos de âmbar; (D) seção longitudinal tangencial exibindo pontoações (p) sem a presença de âmbar, com dimensões aproximadas de 11µm diâmetro e raio unisseriado; (E) seção longitudinal radial exibindo pontoações areoladas (p) com e sem a presença de âmbar, pontoações com cerca de 14µm e paredes celulares homogeneizadas (w); (F) seção longitudinal radial com raios homocelulares, com dezoito células de altura; (G) seção longitudinal radial mostrando âmbar em formato alongado, preservado mesmo com a fragmentação do lúmen do traqueídeo (setas pretas) e pontoações areoladas (p); (H) seção transversal mostrando os lúmens dos traqueídeos sem a presença de âmbar e detalhes da homogeneização das paredes celulares(w).

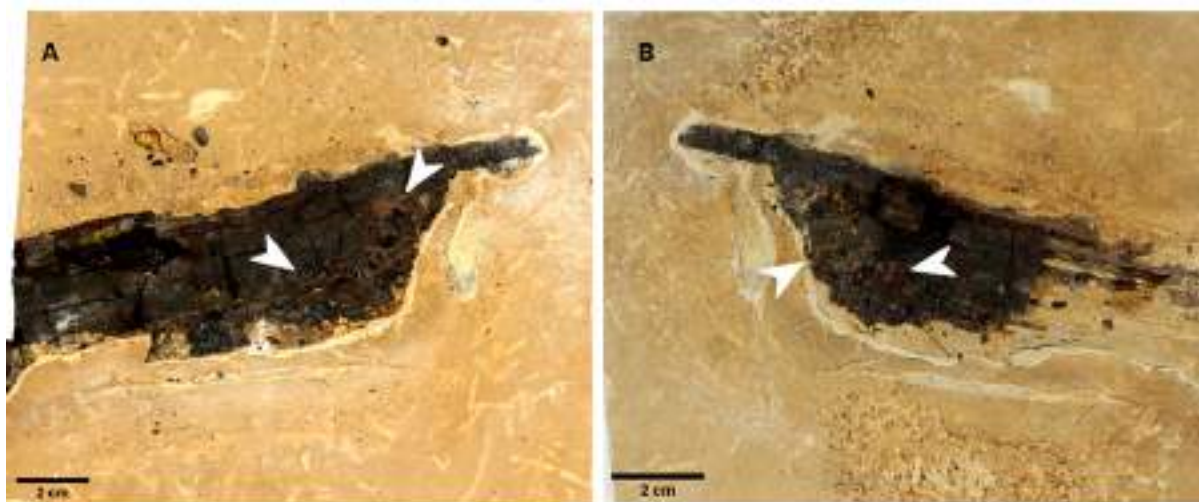


Fonte: autor.

5.1.4 Espécime MPSC PL 4265 p/cp

O espécime MPSC PL 4265 p/cp encontra-se preservado em uma rocha calcária de coloração bege, com o lenho carbonizado medindo aproximadamente 10 cm de comprimento x 3 cm de largura, também exibe a olho nu, as características associadas a *macro-charcoal*, como, coloração negra, brilho sedoso, propensão a manchas ao toque e relativa inércia, assim como alguns fragmentos de âmbar (setas brancas) (Figura 16 A-B). O âmbar exibe coloração nos tons de castanho a avermelhado, contudo, devido à pequena quantidade não foi possível a visualização detalhada em microscópio.

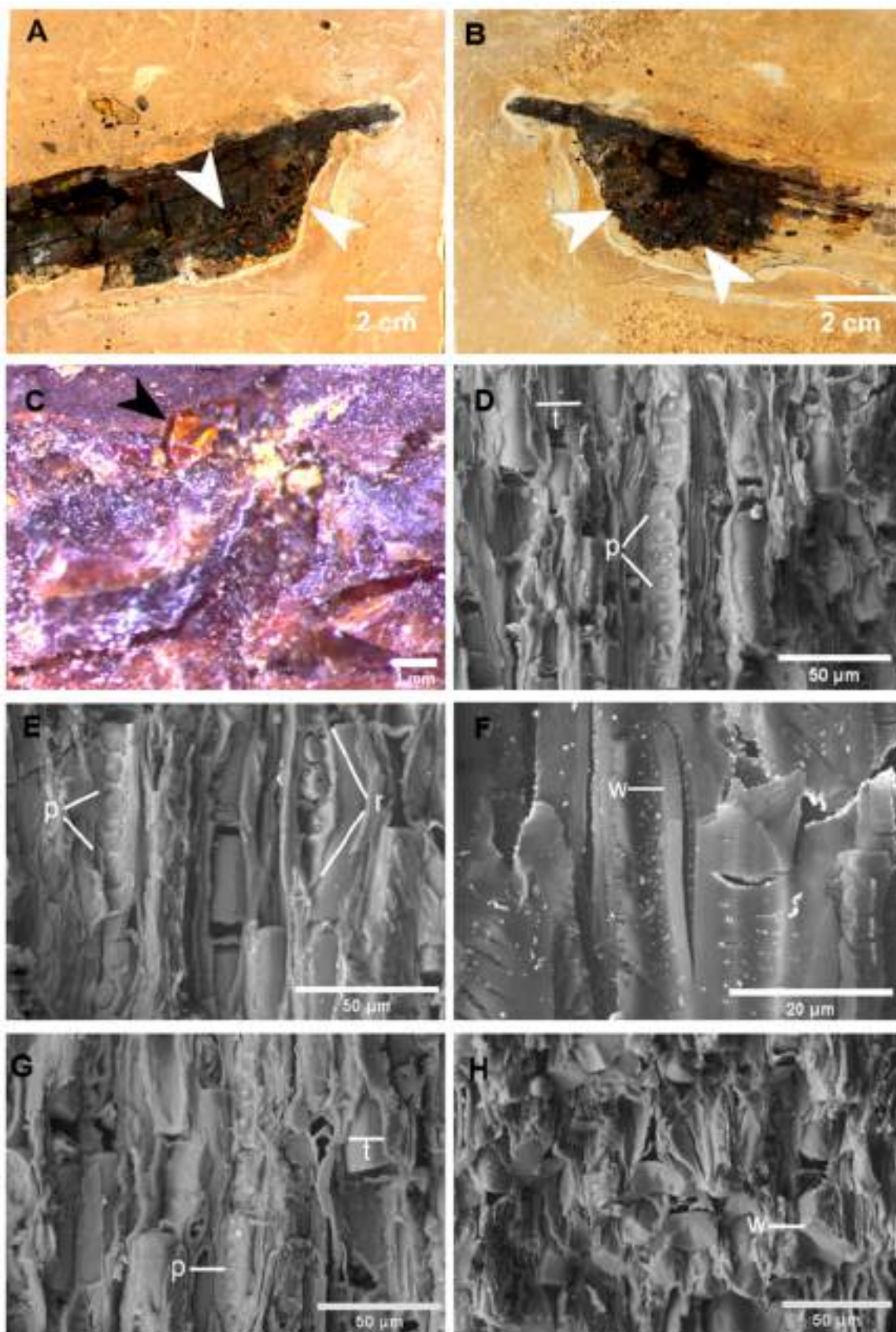
Figura 18: Espécime MPSC PL 4265 p/cp com *macro-charcoal* medindo 10 cm de comprimento x 3 cm de largura. Exibindo apenas alguns fragmentos de âmbar (setas brancas) (Figuras A-B).



Fonte: autor.

Sob MEV, este espécime apresentou em seção longitudinal tangencial, traqueídes com pontoações areoladas unisseriadas, algumas destas preenchidas por âmbar, com dimensões entre 15 μm e 11 μm de diâmetro (Figura 16 D-E respectivamente) e raio unisseriado (Figura 16 E). Em seção longitudinal radial, exibiu a homogeneização da parede celular (Figura 16 F), também exibiu traqueídes e algumas pontoações que ficaram apenas as impressões do molde preenchidas por âmbar, bem fragmentados (Figura 16 G). Em seção transversal, exibiu os lúmens celulares preenchidos por âmbar, assim como detalhes da parede homogeneizada (Figura 16 H).

Figura 19: Fotografias realizadas em MEV espécime MPSC PL 4265 p/cp (A-B) espécime MPSC PL 4265 p/cp exibindo fragmentos de âmbar (setas brancas); (C) detalhes dos fragmentos de âmbar (seta preta); (D) seção longitudinal tangencial exibindo traqueídes (t) com pontoações areoladas (p) preenchidas por âmbar, com cerca de 15 μm de diâmetro; (E) seção longitudinal radial exibindo pontoações areoladas (p), com cerca de 11 μm de diâmetro e raios unisseriados (r); (F) seção radial, mostrando a homogeneização da parede celular (w); (G) seção longitudinal radial exibindo detalhes das traqueídes (t) e pontoações (p) em forma de molde preenchidos por âmbar, bem fragmentados; (H) seção transversal, com lúmens dos traqueídeos preenchidos por âmbar e paredes celulares homogeneizadas (w).



Fonte: Autor.

6. DISCUSSÃO

Este estudo contribui com novas informações para a base global de dados sobre a ocorrência de incêndios vegetacionais durante o Cretáceo Inferior, apresentando novos registros de paleoincêndios na forma de *macro-charcoal* para a Bacia do Araripe, especificamente para a Formação Crato. Além disso, traz um dado novo ao apresentar o primeiro registro da preservação associada entre *macro-charcoal* e âmbar para essa bacia sedimentar. Essa descoberta amplia a compreensão entre os processos de combustão e a preservação de materiais orgânicos, proporcionando uma visão inédita sobre a origem botânica do carvão e o impacto causado pelo fogo no paleoambiente dessa formação, que teria afetado principalmente as gimnospermas, o grupo dominante na época conforme destacado em Lima *et al.*, 2012; Saraiva *et al.*, 2021).

A importância desta descoberta fica evidente pelas lacunas existentes na literatura com relação a este tema, conforme mencionado por Jasper *et al.* (2013); Lima *et al.* (2019); Scott (2000, 2010). Os resultados apresentados nesse estudo fortalecem a atribuição dos carvões cretáceos ao grupo das gimnospermas, uma definição que até então é sustentada apenas por uma afiliação taxonômica devido à falta de detalhes que permite um refinamento botânico mais preciso.

O achado revela um evento raro da preservação de material vegetal carbonizado e resina fóssil (âmbar). De acordo com a literatura, o único registro documentado para o Cretáceo, foi relatado por Brasier; Cotton; Yenney (2012) para Formação Ashdown, próximo a Hasting em Sussex, com relatos sobre inclusões orgânicas atribuídas a âmbar preenchendo os lúmens dos traqueídeos de coníferas. Ademais, pode-se destacar o relato feito por Rockenback (2021) para a Bacia do Paraná (Paleozoico) Brasil, onde a autora realizou testes em espécies de coníferas atuais e comparou com exemplares fósseis. Outros estudos, como El Atfy *et al.*, (2017); Uhl *et al.*, (2004) já mencionaram a possível presença de resinas fossilizadas, porém de forma incerta, muitas vezes associando essas estruturas presentes em fósseis de *macro-charcoal* a minerais aderidos, como calcita (Uhl *et al.*, 2004).

Os registros de *macro-charcoal* do Cretáceo Inferior ainda são bastante escassos (Benício *et al.*, 2019). No entanto, este cenário pode estar sendo mascarado pelos poucos estudos dedicados e/ou pela falta de reconhecimento do carvão em campo (Bond; Scott, 2010; El Atfy *et al.*, 2016). Essa escassez impacta

em uma base sólida quanto à sua origem, assim como na falta de dados sobre a presença de compostos presentes nesses fósseis, como resinas.

É importante considerar que o Cretáceo Inferior experimentou períodos de altos níveis de CO₂ (Haworth *et al.*, 2005) e clima quente em alguns períodos (Spicer, 2003), fatores que aliados com a composição do oxigênio, que em alguns períodos ultrapassou 21% foram propícios para a ocorrência de incêndios (Brown *et al.*, 2013). Trabalhos, como os de Belcher (2013); Gee, (1990); Jones; Chaloner, (1991); Patterson *et al.* (1987); Sander; Scott (2021) têm explorado essa relação entre o fogo, o clima e o tipo de vegetação.

Os novos registros de *macro-charcoal* documentados neste estudo para a Formação Crato, da Bacia do Araripe, acrescentam aspectos significativos à compreensão da ocorrência de incêndios vegetacionais durante o Cretáceo Inferior, que é considerado um período de “alto fogo” (Brown *et al.*, 2013). A presença desse material fóssil nessa formação é essencial para entendermos esses eventos paleoclimáticos que ocorreram no seu ambiente e a partir da ocorrência mais sistemática, confirma a multiplicidade de eventos de incêndios vegetacionais, conforme sugerido por Lima *et al.* (2019).

Baker (2022); Belcher; Hudspith (2017); Jasper *et al.* (2011); Scott (2010) discute que os registros de *macro-charcoal* fornecem evidências concretas de incêndios vegetacionais que ocorreram ao longo dos períodos. O comportamento desses incêndios pode ter sido influenciado por fatores como as mudanças climáticas, mudanças nas taxas de oxigênio atmosférico e pelo tipo vegetacional (Baker, 2022; Belcher; Hudspith, 2017). Zhang *et al.* (2020) corrobora com a ideia que os incêndios vegetacionais estiveram ligados principalmente a mudanças climáticas, induzidos pelos níveis elevados de CO₂, aumento dos relâmpagos (Belcher *et al.*, 2020) e aumento na disponibilidade de combustível (Denis *et al.*, 2017; Fletcher *et al.*, 2019).

Os resultados desse estudo, focaram em fósseis com características de *macro-charcoal*, que foram confirmados a partir dos critérios estabelecidos por Scott (2010). Ele divide os carvões em três categorias: *micro-charcoal* (menos de 180 µm), *meso-charcoal* (de 180 µm a 1 mm) e *macro-charcoal* (maiores que 1 mm). Scott, (2010) destaca também, as características macroscópicas associadas a lenho carbonizado, como coloração negra, brilho sedoso, relativa inércia e propensão a manchas ao toque e, caracteres distintivos, com destaque para a homogeneização

das paredes celulares. Os aspectos mencionados por Scott (2010) corroboram com os registros de *macro-charcoal* apresentados neste estudo, onde estes espécimes variam de aproximadamente 41,5 cm de comprimento por 8 cm de largura no espécime de maior dimensão a 10 cm de comprimento por 3 cm de largura no menor espécime. Essa variação demonstra a diversidade desses fósseis nessa formação. E o fato desses lenhos serem relativamente grandes, sem muitas fragmentações de bordas, sugerimos aqui uma origem parautóctone para esse material, conforme corrobora Lima *et al.* (2021).

A presença de *macro-charcoal* na Formação Crato evidencia que, pelo menos durante alguns períodos do Cretáceo Inferior, seu paleoambiente esteve sob regimes de incêndios vegetacionais. De acordo com Baker (2022); Belcher; Hudspith (2017); Jasper *et al.* (2011); Scott (2010) os incêndios vegetacionais foram ocasionados por uma série de perturbações ambientais, como a queda de raios, períodos de estiagem, níveis de oxigenação e o combustível disponível.

Os espécimes analisados neste estudo, apresentam características que suportam uma origem gimnospérmica, corroborando com análises prévias realizadas na Bacia do Araripe por (Lima *et al.*, 2019; Martill *et al.*, 2012; Moura *et al.*, 2022, 2023; Rebelato, 2022). Essa caracterização também encontra respaldo em registros de *macro-charcoal* de outras regiões e períodos, convergindo com os resultados mencionados nos estudos de (Brown *et al.*, 2013; El Atfy *et al.*, 2019; Jasper *et al.*, 2010, 2011 a, b, c; 2012, 2017, 2021; Lima *et al.*, 2021; Rockenback, 2021; Scott, 2000, 2006, 2010; Scott; Glasspool, 2007; Uhl *et al.*, 2019). A convergência das observações feitas por esses autores com os *macro-charcoals* da Bacia do Araripe reforça a interpretação da origem botânica desses fósseis, contribuindo para a compreensão mais ampla da distribuição, preservação e origem desse material fóssil.

Vale salientar que a exclusão de uma possível origem angiospérmica foi fundamentada nas análises feitas, as quais reforçam uma afinidade gimnospérmica e com base em estudos que reforçam esse domínio fitofossilífero eocretáceo por gimnospermas na Bacia do Araripe (Sucerquia, 2006). Essa conclusão baseou-se nas características anatômicas dos espécimes típicas de gimnospermas, corroboradas pela literatura sobre *macro-charcoal* e pela presença de âmbar, que no registro fóssil da Bacia do Araripe, até então, é restrito a esse grupo. Além disso, soma-se o fato de que nessa bacia, até o momento, não há registro de

macro-charcoal e/ou âmbar de origem angiospérmica que possam servir de base correlata. Autores como Paula-Freitas *et al.* (2019); Pereira; Carvalho; Azevedo, 2007; Pereira *et al.* (2011, 2019); Seyfullah *et al.* (2020), reforçam essa ideia ao afirmarem, por meio de análises por cromatografia gasosa acoplada a espectroscopia de massas (GC-MS), que a resina fóssil na Bacia do Araripe é de origem gimnospérmica, principalmente Araucariaceae, Podocarpaceae, Cheirolepidiaceae e Cupressaceae.

Estudos conduzidos por autores como (Benício *et al.*, 2018; Jasper *et al.*, 2011 a, b, c, 2012, 2017; Lima *et al.*, 2019; Martill *et al.*, 2012; Rebelato, 2022; Scott, 2000, 2010) corroboram com uma origem gimnospérmica para o *macro-charcoal*. No entanto, é importante ressaltar que, de acordo com esses estudos, essa origem é apoiada por uma afiliação taxonômica. Os novos dados apresentados neste estudo adicionam informações significativas que reforçam essa origem botânica, ao apresentar o primeiro registro inequívoco da preservação associada *macro-charcoal* e âmbar do Cretáceo Inferior na Bacia do Araripe, especificamente na Formação Crato. Esse dado inédito fortalece o desenvolvimento de uma base sólida do conhecimento sobre a origem botânica do *macro-charcoal*, considerando que os novos dados apresentados aqui trazem caracteres anatômicos típicos de algumas coníferas.

Essa proposição ganha respaldo quando adiciona aos registros de *macro-charcoal*, a presença de âmbar como destaca Rockenbach (2021). Esse embasamento contribui para afinidades taxonômicas mais precisas quanto à origem botânica do *macro-charcoal*, considerando a associação de *macro-charcoal* e âmbar na Bacia do Araripe.

Para confirmar a presença de âmbar nos fósseis de *macro-charcoal* seguiu-se critérios estabelecidos, por autores como (Brasier; Cotton; Yenney, 2012; Castro; Campanha, 1970; Paula-Freitas, 2019; Pereira; Carvalho; Azevedo, 2007; Pereira *et al.*, 2011, 2019; Seyfullah *et al.*, 2020). Para tanto, foram observadas características típicas de resinas fossilizadas, como a sua coloração, que vai de tons de vermelho, amarelo a castanho, aspecto vítreo e fissuras. As características mencionadas por esses autores corroboram com as características dos âmbares presentes nos espécimes de *macro-charcoal* analisadas neste estudo, que ficaram preservadas mesmo com o impacto do fogo.

Embora existam poucos estudos sobre a presença de resinas preservadas impregnadas em carvão, preenchendo suas estruturas celulares, como os dados apresentados por Brasier; Cotton; Yenney (2012), outros autores já mencionaram a presença de compostos resinosos associados a carvões em períodos distintos, como permiano (Degani-Schmidt; Guerra-Sommer; Freitas, 2018; Rockenbach, 2021) e Triássico (Williford *et al.*, 2014).

A observação de Brasier; Cotton; Yenney (2012), onde alguns aglomerados de células dentro dos tecidos lenhosos hospedeiros são preenchidos com uma camada de resina altamente opaca e reflexiva, em vez de transparente, convergem com os dados mencionados neste estudo. Isso é mais evidente no espécime LPU-C 024, no qual é possível observar uma forte reflectância. Quando visto sob MEV, é possível observar várias estruturas preenchidas por âmbar, corroborando com os resultados mencionados por Rockenbach (2021).

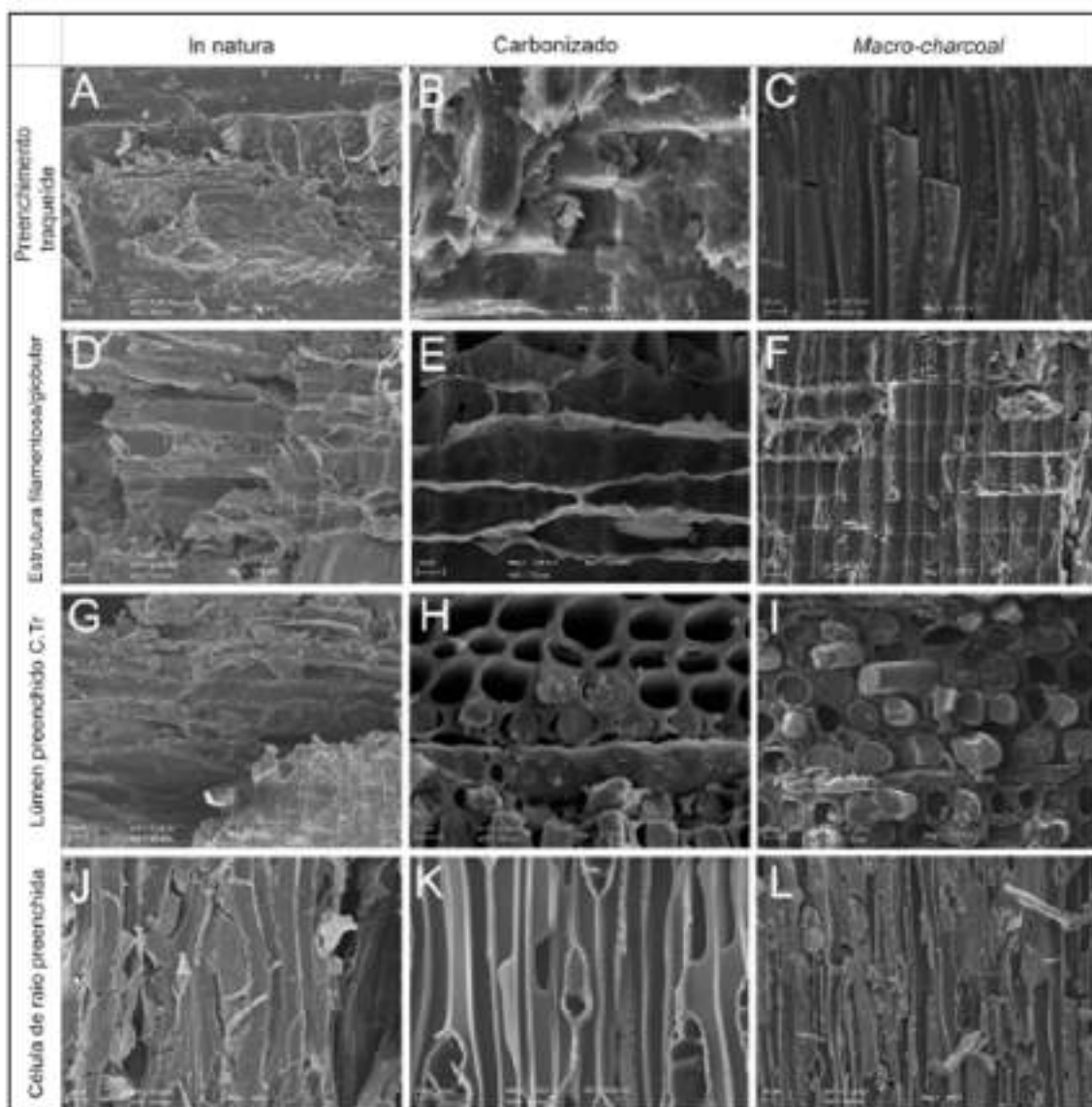
Além disso, Rockenbach (2021) apresenta uma descrição morfológica de estruturas não-celulares atribuindo a preservação de resinas em lenho de *Araucaria angustifolia*. Para confirmar a natureza dessas estruturas como realmente sendo âmbar associado ao *macro-charcoal*, Rockenbach (2021) conduziu testes por meio de queima artificial em um lenho de *A. angustifolia* atual, em que o lenho possuía resina. O processo de combustão foi realizado em diferentes temperaturas e em todas foi possível observar a presença de lúmen celular com a preservação de resinas (ver Rockenbach, 2021).

Essas observações são apoiadas sob a perspectiva de Cardoso (2017) que destaca as diferentes etapas da decomposição térmica do lenho em relação às temperaturas. Entre 20 °C e 110 °C, o lenho absorve calor, resseca a madeira e emite vapor úmido. Entre 100 °C e 270 °C, os traços finais de água são liberados e o lenho começa a se decompor, junto são liberados monóxido de carbono, dióxido de carbono, ácido acético e metanol. A faixa de 270 °C e 290 °C, marca a decomposição exotérmica do lenho, com a contínua liberação de gases mistos e de betume. Entre 290 °C e 400 °C acontece o domínio do alcatrão, à medida que a temperatura vai aumentando (McParland *et al.*, 2007). Beaumont (1985) afirma que a transformação completa do lenho em carvão vegetal ocorre por volta dos 400 °C. Nessa temperatura, o lenho perde massa, reduz consideravelmente o peso e suas dimensões McParland *et al.* (2007), enquanto o carbono se ordena na parede celular, tornando o tecido mais resistente à degradação Ascough *et al.* (2010).

O processo de carbonização é considerado como um rápido processo de fossilização, com alterações físicas, químicas e morfológicas (Rockenbach, 2021). Esse processo fornece ao material vegetal inércia e certa resistência a degradação, permitindo sua preservação por longos períodos (Belcher, 2013; Jasper *et al.*, 2016, Lima *et al.*, 2019; Scott, 2009). A combustão pode influenciar na produção e exsudação da resina, conforme apontado por Seyfullah *et al.* (2018) a produção/exsudação da resina está associada, principalmente, a três fatores: (I) infestação de insetos, (II) desastres ecológicos, por exemplo tsunamis e incêndios florestais e (III) danos físicos: lesões de menor escala, por exemplo danos causados por herbivoria e/ou parasitismo. Assim, a ocorrência de incêndios vegetacionais, por exemplo, pode estimular e/ou acelerar a produção e exsudação da resina como resposta de defesa da planta contra os danos físicos.

Os espécimes apresentados neste estudo, possuem características semelhantes às mencionadas no estudo de Rockenbach (2021). Além das estruturas típicas de *macro-charcoal*, eles exibem estruturas como lúmens dos traqueídeos com pontoações areoladas preenchidas por âmbar, campo de cruzamentos, raios, fibras e traqueídes. Destaca-se também os moldes das pontoações e dos campos de cruzamentos preservados preenchidos por âmbar similares aos dados apresentados por Rockenbach (2021) (Figura 20). Há também consonância com os dados de Brasier; Cotton; Yenney (2012), que descrevem a presença de resina fossilizada revestindo os lúmens celulares de madeira carbonizada datada do Cretáceo. Eles discutem que a combustão do lenho teria provocado a exsudação da resina como mecanismo de resposta contra a ação do fogo, e com os dados de Scott *et al.* (2000) que confirmam a presença de compostos resinosos em *Pinus sylvestris* após o processo de carbonização, sugerindo, também uma resposta aos danos mecânicos causados pela combustão.

Figura 20: Compilação dos dados de Rockenbach (2021), com resina preenchendo estruturas anatômicas do lenho In Natura, carbonizado e *macro-charcoal*.



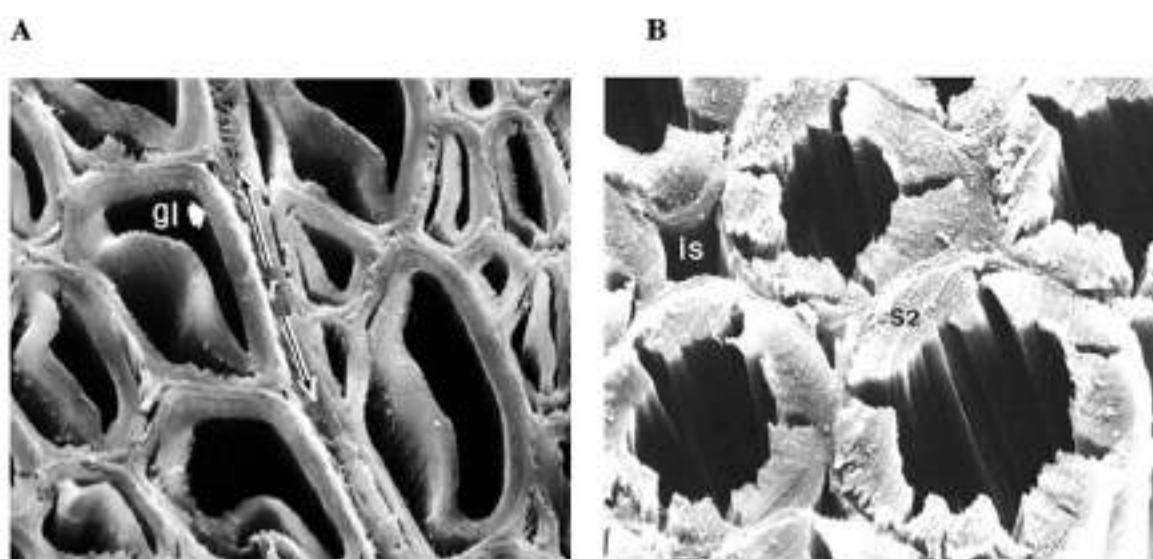
Fonte: Retirado de Rockenback (2021 com adaptações).

É possível observar, a partir dos resultados obtidos, que os espécimes apresentados aqui possuem muitas características de coníferas, conforme os dados mencionados por Siegloch; Marchiori (2015), assemelhando-se com *Araucariaceae*, *Podocarpaceae* e *Cheirolepidiaceae*. Essas características incluem traqueóides axiais, raios, parênquima axial, campos de cruzamentos (Burger; Richter, 1991; Cutler *et al.*, 2011), a forma do arranjo das pontoações e raios homocelulares, presente principalmente em *Podocarpaceae* e *Cupressaceae* (Siegloch; Marchiori, 2015).

Pode-se destacar também, algumas estruturas presentes em espécies atuais de coníferas que também foram submetidas a queima e que mostra as diferenças

entre folhosas e coníferas destacadas no estudo de Klock (2000), tais como: ausências da camada s3, presença de grandes fendas ou cavidades na camada s2, aspecto arredondado dos traqueóides e espaços intercelulares (Figura 21), que podem ser igualmente observados nos resultados apresentados nesse estudo.

Figura 21: Microfotografias de madeira de coníferas em relação à folhosa. (A) Microfotografia eletrônica de lenho de tensão de folhosa (*Populus sp.*); (B) Microfotografia eletrônica da madeira de compressão de conífera (*Pseudotsuga menziesii*).



Fonte: Retirado de Clock (2000).

Os detalhes anatômicos exibidos por meio da microscopia eletrônica de varredura, como pontoações areoladas, pontoações em campo cruzado, parênquima axial, fibras e raios homocelulares, contribuem para uma confirmação mais refinada da origem botânica do *macro-charcoal* da Formação Crato.

É importante ressaltar que os lenhos carbonizados descritos neste estudo constituem no primeiro registro de *macro-charcoal* associado a âmbar na Formação Crato, Cretáceo Inferior na Bacia do Araripe. A combinação dos resultados entre essas duas áreas fornece uma base sólida para interpretar a origem botânica desses fósseis, além de oferecer uma visão mais completa e detalhada dos processos ecológicos e climáticos durante o Cretáceo Inferior.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos neste estudo fornecem novos dados sobre os eventos de incêndios vegetacionais durante o Cretáceo Inferior, com a descoberta inédita de *macro-charcoal* associado a âmbar na Bacia do Araripe, especificamente na Formação Crato. A preservação associada entre *macro-charcoal* e âmbar nesta formação é inédita, ampliando o entendimento da interação entre os processos de combustão e preservação de materiais orgânicos. Esses dados inéditos proporcionam uma compreensão detalhada sobre a origem botânica do carvão, bem como as dinâmicas paleoecológicas da Formação Crato.

As análises dos espécimes LPU-C1396, LPU-C 024, LPU-C 062, p/cp e MPSC PL 4265 p/cp revelaram características diagnósticas de *macro-charcoal* como as paredes celulares homogeneizadas. As estruturas anatômicas preservadas nesses espécimes são típicas de alguns grupos de gimnospermas, como coníferas. Particularmente, os espécimes LPU-C 1396 e LPU-C 024 apresentam âmbar mais robusto com inclusões do próprio lenho carbonizado, outras inclusões indeterminadas e betumes, sugerindo que a exsudação da resina ocorrera antes da maturação, com a madeira viva (verde) no momento da combustão e/ou como resposta aos danos físicos causados pela ação do fogo.

Esses dados fornecem evidências concretas da amplitude e distribuição dos eventos incêndios vegetacionais na Formação Crato, impactando substancialmente as gimnospermas, além disso, permitem inferências detalhadas sobre as condições climáticas e ambientais da época. Este estudo avança o conhecimento paleoecológico e evolutivo das plantas produtoras de resinas, assim como sobre os eventos de incêndios ocorridos na Bacia do Araripe, abrindo um leque de oportunidades para futuras pesquisas focadas nas dinâmicas dos paleoincêndios, suas consequências paleoecológicas e perspectivas sobre novos registros dessa associação *macro-charcoal* e âmbar na Bacia do Araripe. Nesse contexto, as famílias Araucariaceae, Cheirolepidiaceae, Cupressaceae e Podocarpaceae foram apontadas como as potenciais produtoras do *macro-charcoal* associado ao âmbar neste estudo. Para uma identificação taxonômica mais precisa, serão conduzidas análises complementares no âmbar cujos resultados serão apresentados em um estudo subsequente.

REFERÊNCIAS

- Abu Hamad, A. A., Jasper, A., Uhl, D. The record of Triassic charcoal and other evidence for palaeo-wildfires: signal for atmospheric oxygen levels, taphonomic biases or lack of fuel?. *International Journal of Coal Geology*. 2012.
- Ascough, P. L., Bird, M. I., Scott, A. C., Collinson, M. E., Cohen-Ofri, I., Snape, C. E., Le Manquais, K. Charcoal reflectance measurements: implications for structural characterization and assessment of diagenetic alteration. *Journal of Archaeological Science*. 2010.
- Batista, M. E. P., Kunzmann, L., Sá, A., Saraiva, A. A. F., Loiola, M. I. B.. A new species of *Brachyphyllum* from the Crato Formation (Lower Cretaceous), Araripe Basin, Brazil. *Ameghiniana*, p. 519-533, 2020.
- Baker, S. J. Fossil evidence that increased wildfire activity occurs in tandem with periods of global warming in Earth's past, *Earth-Science Reviews*, Volume 224, 2022.
- Beaumont, O. La combustion du bois. *Biomasse actualités*. 1985.
- Belcher, C. M. Fire phenomena in the Earth system: An interdisciplinary approach to fire science. John Wiley & Sons. 2013.
- Bernardes-De-Oliveira, M. E. C., Sucerquia, P. A., Mohr, B., Dino, R. Paleoclimatic indicators in the Crato Paleoflora, Late Aptian of the Northwestern Gondwana. 2018.
- Bernardes-De-Oliveira, M. E. C., Ricard-Branco, Dilcher, D., Franca-Barreto, A. M., Branco, F. R., Mohr, B., Fernandes, M. C. C. La flora del Miembro Crato, Formación Santana, Cretáceo Temprano de la Cuenca de Araripe, Nordeste del Brasil. In 10^o Congreso Geológico Chileno, Concepción. actas. 2003.
- Bica, J. B. Investigação de Paleoincêndios vegetacionais permianos no afloramento curva do Belvedere: Significado Paleoambiental para o Paleozoico Superior da Bacia do Paraná. 2014.
- Benício, J. R. W., Jasper, A., Spiekermann, R., Garavaglia, L., Pires-Oliveira, E. F., Machado, N. T. G., Uhl, D. Recurrent palaeo-wildfires in a Cisuralian coal seam: A palaeobotanical view on high-inertinite coals from the Lower Permian of the Parana' Basin, Brazil. 2019.
- Bond, W. J., Scott, A. C. Fire and the spread of flowering plants in the cretaceous. *New Phytologist*, 188, 1137–1150 <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2010.03418.x>. 2010.
- Bowman, D. M. J. S., Balch, J. K., Artaxo, P., Bond, W. J., Carlson, J. M., Cochrane, M. A., D'Antonio, C. M., Defries, R. S., Doyle, J. C., Harrison, S. P., Johnston, F. H., Keeley, J. E., Krawchuk, M. A. Kull, C. A., Marston, J. B., Moritz, M. A., Prentice, I. C., Roos, C. I., Scott, A. C., Swetnam, T. W., Van Der Werf, G. R., Pyne, S. J. Fire in the Earth System. 2009. **Science**.

Brasier, M., Cotton, L., Yenney, I. First report amber with spider webs and microbial inclusions from the earliest Cretaceous (c.140 Ma) of Hastings, Sussex. *Journal of the Geological Society*. 2012.

Brown, S. A., Scott, A. C., Glasspool, I. J. Cretaceous wildfires and their impact on the Earth system. *Cretaceous Research*, 36, 162-190. 2012.

Burger, L. M., Richter, H.G. *Anatomia da Madeira*. São Paulo: Ed. Nobel, 1991.

Chaloner, W. G., Creber, G. T. Do fossil plants give a climatic signal? *Journal of the Geological Society*, 147, 343–350. 1990. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.147.2.0343>.

Cardoso, D. S. Identificação de *charcoal* como evidências de paleoincêndios no triássico da Bacia do Paraná, 2017.

Castro, C., Menor, E. A., Campanha, V. A. Descoberta de resinas fósseis na Chapada do Araripe, Município de Porteira. Recife: Universidade Federal de Pernambuco, 12p. (Instituto de Geociências, Notas Prévias, Série C. 1970.

Chaloner, W. G., McElwain, J. The fossil plant record and global climatic change. *Review of paleobotany and palynology*, 1997.

Chaloner, W. G., Creber, G. T. Plant evolution and the fossil record. Cambridge University Press. 1990.

Cutler, D. F., Botha, C. E. J., Stevenson, D. W., Plant Anatomy: An Applied Approach. 2007.

Degani-Schmidt, I., Guerra-Sommer, M., Freitas, T. Preserved cytoplasm in charred Agathoxylon-type wood from the Permian of Brazilian Paraná Basin. *Revista Brasileira de Paleontologia*, v. 21, n. 2, p. 112-119, 2018.

Denis, E. H., Pedentchouk, N., Schouten, S. Pagani, M., Freeman, K. H. Fire and ecosystem change in the Arctic across the Paleocene–Eocene Thermal Maximum, *Earth and Planetary Science Letters*, Volume 467. 2017.

Dos Santos, A. C. S., Holanda, E. C. Souza, V., Guerra-Sommer, M. Manfro, J., Uhl, D., Jasper, A. Evidence of palaeo-wildfire from the upper Lower Cretaceous (Serra do Tucano Formation, Aptian Albian) of Roraima (North Brazil). *Cretaceous Research*. 2016.

Edwards, D., Axe, L. Anatomical evidence in the detection of the earliest wildfires. ***Palaos***. 2004.

El Atfy, H., Anan, T., Jasper, A., Uhl, D. Repeated occurrence of palaeo-wildfires during deposition of the Bahariya Formation (early Cenomanian) of Egypt. *Journal of Palaeogeography*, v. 8, n. 1, p. 1-14, 2019.

El Atfy, H., Havlik, P., Kruger, P. S., Manfroi, J., Jasper, A., Uhl, D. Pre-Quaternary wood decay 'caught in the act' by fire – examples of plant-microbe-interactions preserved in charcoal from clastic sediments. *Historical Biology*, v. 31, n.7, p. 952-961, 2017.

El Atfy, H. A., Sallam, H., Jasper, A., & Uhl, D. The first evidence of palaeo-wildfire comes from the Campanian (Late Cretaceous) of North Africa. *Cretaceous Research*, 57, 306–310.2016. <https://doi.org/10.1016/j.cretres.2015.09.012>.

Falcon-Lang, H.J., Fire ecology of the Carboniferous tropical zone. *Palaeogeog. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 164, 339–355. 2000.

Fambrini, G. L., Silvestre, D. D. C., Barreto Junior, A. M., Silva-Filho, W. F. D. Estratigrafia da Bacia do Araripe: estado da arte, revisão crítica e resultados novos. 2020.

Filho, E. B. S., Adami-Rodrigues, K., Lima, F. J., Bantim, R. A. M., Wappler, T., Saraiva, A. A. F. Evidence of plant-insect interaction in the Early Cretaceous flora from the Crato Formation, Araripe Basin, Northeast Brazil. *Historical Biology*. 2017.

Flannigan, M. D., Krawchuk, M.A., Groot, W. J., Wotton, B. M., Gowman, L. M., Implications of changing climate for global wildland fire. *Int. J. Wildl. Fire* 18, 483–507. 2009.

Fletcher, T. L., Warden, L., Sinninghe Damsté, J. S., Brown, K. J., Rybczynski, N., Gosse, J. C., Ballantyne, A. P. Evidência de incêndio no Plioceno Ártico em resposta à temperatura amplificada. *Clima do Passado*. 2019.

Foote, M., Miller, A. I. Principles of paleontology (Vol. 1). WH Freeman New York. 2007.

Francis, J. E., Poole, I. Cretaceous–Tertiary environments of the James Ross Basin, Antarctica. *Geological Society, London, Special Publications*, 258(1), 111-122. 2006.

Francis, J. E., Ashworth, D. J., Cantill, J. A., Crame, J., How, R., Stephens, A.-M., Tosolini, T. V. 100 million years of Antarctic climate evolution: evidence from fossil plants. In A. K. Cooper (Ed.), *Antártica: a keystone in a changing world* (pp. 112–203). Washington: The National Academic Press. 2008.

Friis, E. M., Pedersen, K. R., Crane, P. R. Cretaceous angiosperm flowers: innovation and evolution in plant reproduction. *Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology*, 232(2-4), 251-293. 2006.

Gastaldo, R. A. The genesis and geological significance of charcoal. *Journal of Sedimentary Research*, 59(1), 103-116. 1989.

Gee, C. T., Gastaldo, R. A. Factors influencing the distribution of charcoal among peat-forming plants from the late Paleozoic of North America. *International Journal of Coal Geology*, 64(2-3), 120-130. 2005.

Glasspool, I. J., Edwards, D., Axe, L. Charcoal in the Silurian as evidence for the earliest wildfire. *Geology*. 2004.

Haworth, M., Hesselbo, S. P. McElwain, J., Robinson, A., Brunt, J. W. Mid-Cretaceous pCO_2 based on stomata of the extinct conifer *Pseudofrenelopsis* (Cheirolepidiaceae). 2005.

Heringer, I., Jacques, A. V. A. Adaptação das plantas ao fogo: Enfoque na transição floresta- campo. 2001.

IAWA Committee (Richter, H.G., Grosser, D., Heinze, I.; Gasson, P. E., eds.). IAWA list of microscopic features for softwood identification. *IAWA Journal*. 2004.

Jasper, A. Uhl, D., Guerra-Sommer, M., Moosbrugger, V. Palaeobotanical evidence of wildfires in the late Paleozoic of South America: early Permian, Rio Bonito Formation, Paraná Basin, Rio Grande do Sul State, Brazil, 2008. *Journal of American Earth Sciences*.

Jasper, A., Guerra-Sommer, M., UHL, D., Machado, N. T. G., Secchi, M. I., Manfroi, J. Análise de carvão vegetal como evidência direta de paleoincêndios vegetacionais: registros no Permiano da Bacia do Paraná. In: Carvalho, I. S., 99 Srivastava, N. K., Stroschoen, J. R. O., Lana, C. C. Paleontologia: Cenários de Vida. 1 ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2011 a.

Jasper, A., Manfroi, J., Schmidt, E. O., Machado, N. T. G., Konrad, O., Uhl, D. Evidências paleobotânicas de incêndios vegetacionais no afloramento Morro Papaleó, Paleozoico Superior do Rio Grande do Sul, Brasil. *Geonomos*, 2011 b.

Jasper, A.; Uhl, D.; Guerra-Sommer, M.; Bernardes-de-Oliveira, M. E. C.; Machado, N. Upper Paleozoic charcoal remains from South America: Multiple evidence of fire events in the coal bearing strata of the Paraná Basin. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 2011 c.

Jasper, A. Uhl, D., Guerra-Sommer, Uhl, D., Bernardes-de-Oliveira, M.E. C., Ghosh, A.K., Tewari, R., Secchi, M. Palaeobotanical evidence of wildfires in the Upper Permian of India: Macroscopic charcoal remains from the Raniganj Formation, Damodar Valley Basin. 2012. *The Palaeobotanist*.

Jasper, A., Guerra- Sommer, M., Hamad, A., Abdalla, M. B., Bamford, M., Bernardes-de-Oliveira, M. E. C., Tewari, R., Uhl, D. The burning of Gondwana: permian fires on the Southern continent: a Palaeobotanical approach *Gondwana Research*. 2013.

Jasper, A., Uhl, D., Tewari, R., Guerra-Sommer, M., Spiekermann, R., Manfroi, J., Osterkamp, I. C., Benício, J. W., Bernardes-de-Oliveira, M. E. C., Pires, E. F., Stock da Rosa, A. A. Indo-Brazilian Late Palaeozoic wildfires: an overview on macroscopic charcoal. Incêndios vegetacionais Indo-Brasileiros no Neopaleozóico: uma revisão dos registros de carvão vegetal macroscópico. 2016.

Jasper, A.; Agnihotri, D.; Tewari, R.; Spiekermann, R.; Pires, E. F.; Da Rosa, A. A. S.; Uhl, D. Fires in the mire: Repeated fire events in Early Permian 'peat forming' vegetation of India. *Geological Journal*, v. 52, n. 6, p. 955–969, 2017.

Jasper, A., Pozzebon-Silva, Â., Carniere, J.S., Uhl, D. Paleozoic and Mesozoic palaeo-wildfires: An overview on advances in the 21st Century. 2021.

Jones, T. P., & Chaloner, W. G. Fossil charcoal, its recognition and palaeoatmospheric significance. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 97(1-2), 39-50. 1991.

Lehn, C. R., Leuchtenberger, C. Resistência ao fogo em uma população de *Cyathea atrovirens* (Langsd. & Fisch.) Domin (Cyatheaceae) no Estado do Rio Grande do Sul, Brasil. 2008.

Lima, F.J., Sayão, J. M., Ponciano, L. C. M. O., Weinschutz, L., Figueiredo, R. G., Rodrigues, T., Machado, R. A. B., Saraiva, A. A. F., Jasper, A., Uhl, D., Kellner, A. W. A. Wildfires in the Campanian of James Ross Island: a new macro-charcoal record for the Antarctic Peninsula. *Polar Research*, v.40, p.1-5, 2021.

Lima, F. J., Pires, E. F. Jasper, A. Uhl, D. Saraiva, A. A. F. Sayão, J. M. Fogo no Paraíso: Fire in the paradise: evidence of repeated palaeo-wildfires from the Araripe Fossil Lagerstätte (Araripe Basin, Aptian-Albian), Northeast Brazil. v.1, p.1-13. 2019

Lima. F. J., Contribuição a Paleobotânica do grupo Santana: novas espécies de macrofósseis e análise de *Charcoal*. 2017.

Lima. F. J., Saraiva. A. A. F., e Saião. J. M. Revisão da paleoflora das formações Missão Velha, Crato e Romualdo, Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil. *Estudos Geológicos*. 2012.

Martill, D. M., Robert, F. L., Andrade, J. A. F. G., Cardoso, A. H., An unusual occurrence of amber in laminated limestones: the Crato Formation Lagerstätte (Early Cretaceous) of Brazil. *Palaeontology*. 2005.

Martill, D. M., Loveridge, R. F., Heimhofer, U. A new era of long-term fire behavior in Mid-Cretaceous ecosystems?. *Paleontology*, 55(5), 1223-1229. 2012.

MacDonald, G. M., Larsen, C. P. S., Szeicz, J. M., Moser, K. A., The reconstruction of boreal forest fire history from lake sediments-a comparison of charcoal, pollen, sedimentological, and geochemical indexes. *Quat. Sci. Rev.* 10, 53–71. 1991.

McParland, L. C., Collinson, M. E., Scott, A. C., Campbell, G. The use of reflectance values for the interpretation of natural and anthropogenic charcoal assemblages. 2009. *Archaeol Anthropol Sci*.

McParland, L. C., Collinson, M. E., Scott, A. C., Campbell, G., Veal, R. Is vitrification in charcoal a result of high temperature burning of wood?. 2010. *Journal of Archaeological Science*.

Moura, E. B., Rebelato, G., Silva, F. R., Jasper, A., Lima, F. J. Novas evidências de paleoincêndios na Formação Ipubi, Cretáceo Inferior da Bacia do Araripe. *Paleontologia em destaque*. 2022.

Moura, E. B., Araújo, E. S., Oliveira, N. C., Silva, F. R., Jasper, A., Saraiva, A. A. F., Lima, F. J. Registros de *macro-charcoal* como evidências de paleoincêndios na Formação Ipubi, Cretáceo Inferior da Bacia do Araripe. XVI Simpósio brasileiro de paleobotânica e palinologia. 2023.

Murthy, S., Mendhe, V. A., Kavali, P. S., & Singh, V. P. Evidence of recurrent wildfire from the Permian coal deposits of India: Petrographic, scanning electron microscopic and palynological analyses of fossil charcoal. *Palaeoworld*, 29(4), 715-728. 2020.

Neumann, V. H. M. L. Estratigrafía, sedimentología, geoquímica y diagénesis de los sistemas lacustres Aptiense Albienses de la Cuenca de Araripe (Nordeste de Brasil). Tese de Doutorado. Universidade de Barcelona-Barcelona Espanha. 1999.

Neumann, V. H. M. L., Cabrera, L. Una nueva propuesta estratigráfica para la tectono secuencia post-rifte de la cuenca de Araripe, nordeste de Brasil. *V Simpósio Cretáceo Brasileiro*, 279-285. Serra Negra. 1999.

Neumann, V. H., Assine, M. L. Stratigraphic proposal to the post-rift I tectonic-sedimentary sequence of Araripe Basin, Northeastern Brazil. In *International Congress on Stratigraphy* (Vol. 2, No. 2015, p. 274). 2015.

Patterson, C., Hanks, L. M., Head, M. J. The influence of palaeoecology and taphonomy on the accumulation of microplankton in the fossil record. *Geological Society, London, Special Publications*, 26(1), 265-280. 1987.

Paula-Freitas, A. B. L., Borghi, L. Carvalho, Ismar. S. Âmbar na Formação Rio Batateira, Bacia do Araripe (Cretáceo Inferior), Brasil. 2019. *Paleontologia: Cenários de vida*

Pereira, R. Carvalho, I. S., Azevedo, D. A. Afinidades Paleobotânicas de âmbares cretácicos das bacias do Amazonas, Araripe e Recôncavo. *Geociências, UNESP*, 25(2):217-224. 2007.

Pereira, R., Carvalho, I. S., Fernandes, A. C. S., Azevedo, D. A., Composição molecular e origem paleobotânica de âmbares da bacia do Araripe, Formação Santana. *Química Nova*. 2009b.

Pereira, R., de Lima, F. J., Simbras, F. M., Bittar, S. M. B., Kellner, A.W.A., Saraiva, A. Á. F., Bantim, R.A.M., Sayão, J.M., Oliveira, G.R., Biomarker signatures of Cretaceous Gondwana amber from Ipubi Formation (Araripe Basin, Brazil) and their palaeobotanical significance, *Journal of South American Earth Sciences*. 2019. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.102413>.

Pereira, R., San Gil, R.A.S., Carvalho, I.S., Fernandes, A.C.S., Azevedo, D.A., Solid state ¹³C NMR analysis of Brazilian Cretaceous ambers. *Journal of the Brazilian Chemical Society*. 2011a.

Philippe, M., Bamford, M. K. A key to morphogenera used for Mesozoic conifer-like woods. *Review of Palaeobotany and palynology*. 2008.

Ponte, F. C., Appi, C. J. Proposta de revisão da coluna litoestratigráfica da Bacia do Araripe. In *Congresso Brasileiro de Geologia* (Vol. 36, No. 1990).

Poole, I., & Cantrill, D. J. Cretaceous and early Tertiary climates of Antarctica: evidence from fossil wood. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 231(1-2), 139-152. 2006.

Rebelato, M. G. Registro de paleoincêndios na Formação Barbalha (Grupo Santana), Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil: Uma abordagem sedimentológica, paleoecológica e geoquímica. 2022.

Rockenbach, M. G., & Lima, F. J. Cretaceous *macro-charcoal* from the Barbalha Formation, Araripe Basin, northeastern Brazil: Implications for understanding early angiosperm paleoecology and fire regimes. *Cretaceous Research*, 126, 104899. 2021.

Sander, P. M. & Gee, C. T. Fossil Charcoal: techniques and applications. 1990.

Saraiva, A. A. F., Lima, F. J., Barros, O. A., Bantim, R. A. M., Alves, A. M. S., Ribeiro, A. M. N., Alencar, D. R., Lima, S. F. B., Santana, E. M. G., Filho, E. S., Pinho, G. G. Guia de fósseis da Bacia do Araripe. 2021.

Saraiva, A. A. F. Caracterização paleoambiental e paleo-oceanográfico da formação Romualdo: bacia sedimentar do Araripe. 2008.

Sayão, J. M., Saraiva, A. Á. F., Brum, A. S., Bantim, R. A. M., De Andrade, R. C. L. P., Cheng, X., Kellner, A. W. The first theropod dinosaur (Coelurosauria, Theropoda) from the base of the Romualdo formation (Albian), Araripe Basin, Northeast Brazil. *Scientific reports*. 2020.

Scott, A. C. Carcoalified vegetation from the Pennsylvanian of yorkshire, England: Implications for the interpretation of Carboniferous wildfires. 2021.

Scott, A. C., Bowman, D. M. J. S.; Bond, W. J.; Pyne, S. J.; Alexander, M. E. Fire on earth: an introduction. West Sussex, Wiley Blackwell, 2014.

Scott, A. C. Charcoal recognition, taphonomy and uses in palaeoenvironmental analysis. **Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology**. 2010.

Scott, A. C. Forest fire in the fossil record. In: Cerdà, A., Robichaud, P. (Eds.), **Fire Effects on Soils and Restoration Strategies**. Science Publishers. 2009.

Scott, A. C. Charcoal recognition, taphonomy and uses in palaeoenvironmental analysis. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 232(2-4), 190-232. 2006.

Scott, A. C., Glasspool, I. J., & Jansson, I. M. Evidence for wildfire in the Carboniferous: Charcoal assemblages from the Viséan of Great Britain and Ireland. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 207(1-2), 107-118. 2004.

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

Scott, A. C., & Jones, T. P. The nature and influence of fire in Carboniferous ecosystems. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 106(1-4), 91-112.
 Scott, A. C. (1989). Observations on the nature and origin of fusain. *International Journal of Coal Geology*. 1994.

Seyfullah, L., Schmidt, A. R., Roberts, E., Ragazzi, E. Revealing the diversity of amber source plants from the Early Cretaceous Crato Formation, Brazil. 2020.

Siegloch, A. M. Marchiori, J. N. C. Anatomia da madeira de treze espécies de coníferas. *Brazilian Journal of Wood Science*. 2015.

Silva, L. S, Neumann. V. H. Formação Crato da Bacia do Araripe: um reservatório análogo ao calcário traíri (Formação Paracuru), Bacia do Araripe. 2003.

Sousa, J. M. Paleobotânica: o que os fósseis vegetais revelam. 2015.

Sucerquia, P. A. R. Gimnospermas eocretáceas da Formação Crato, Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil. 2006.

Steuter, A. A., McPherson, G. R. Fire as physical stress, In: Bedunah, D. J., Sosebee, R. E. *Wildland plants physiological ecology and developmental morphology*. Denver: Society for Range Management. 1995.

Taylor, E. L., Taylor, T. N., & Krings, M. *Paleobotany: the biology and evolution of fossil plants*. Academic press. 2009.

Uhl, D., Lausberg, S., Noll, R., Stapf, K. R. G., Wildfires in the Late Palaeozoic Europe — an overview of the Rotliegend (Upper Carboniferous–Lower Permian) of the Saar-Nahe Basin (SW-Germany). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 207, 23–35. 2004.

Uhl, D. Fossil plants as palaeoenvironmental proxies e some remarks on selected approaches. *Acta Palaeobotanica*. 2006.

Uhl, D. Abu Hamad, A. M. B. Jasper. A. Montenari, M. Permian and Triassic wildfires and atmospheric oxygen levels. 2008.

Valença, L. M. M., Neumann, V. H., & Mabesoone, J. M. An overview on Callovian Cenomanian intracratonic basins of Northeast Brazil: onshore stratigraphic record of the opening of the southern Atlantic. *Geologica Acta*. 2003.

Williford, K. H.; Grice, K.; Holman, A.; McElwain, J. C. An organic record of terrestrial ecosystem collapse and recovery at the Triassic–Jurassic boundary in East Greenland. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 127, p.251-263. 2014.

Zhang., W, C., Lü, D., Hay, W. W, Wang, T., Cao, S., Precession-scale climate forcing of peatland wildfires during the early Middle Jurassic greenhouse period. 2020.

ANEXOS

Resumos publicados em Anais de Congressos realizados enquanto discente do Programa de Pós-Graduação em Diversidade Biológica e Recursos Naturais-PPGDR- URCA e o artigo submetido à revista *CURRENT BIOLOGY*.

1. Resumo publicado na Reunião Anual Regional da Sociedade Brasileira de Paleontologia- PaleoNE 2022.

Cidade: Crato-Ceará. Universidade Regional do Cariri-URCA.



2. Resumo publicado no XVI Simpósio Brasileiro de Paleobotânica e Palinologia- "Ciência e perspectiva climática".

Cidade: São Leopoldo- Rio Grande do Sul. Universidade do Vale do rio dos Sinos- UNISINOS.



3. Resumo publicado na Reunião Anual Regional da Sociedade Brasileira de Paleontologia- PaleoNE 2023.
 Cidade: Teresina-Piauí. Universidade Federal do Piauí-UFPI.



4. Produções em co-autoria publicada enquanto discente do Programa de Pós-Graduação em Diversidade Biológica e Recursos Naturais- PPGDR-URCA.



PALEOAMBIENTE DA FORMAÇÃO IPUBI, CRETÁCEO INFERIOR, BACIA DO ARARIPE: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

F. R. SILVA¹, E. B. MOURA², N. S. B. MENDES¹, C. C. M. SILVA¹, F. J. LIMA¹

¹Universidade Federal de Pernambuco, Núcleo de Biologia, Rua Alto do Reservatório s/n, Bela Vista, Vitória de Santo Antão-PE. ²Universidade Regional do Cariri, Departamento de Ciências Biológicas, Rua Cel. Antônio Luiz 1161, Pimenta, Crato-CE. francadeverson.silva@ufpe.br, eugenio.moura@urca.br, nathalya.barreto@ufpe.br, camila.carliamedeiros@ufpe.br, flaviana.jorge@ufpe.br

O entendimento dos paleoambientes é de amplo interesse científico para que possamos compreender como a vida se comportava nos tempos remotos. É através desses trabalhos que podemos reconstruir ambientes passados e estudá-los, esperando identificar sua fauna, flora e geologia remota, buscando compreender como se comportavam e nos auxiliando para compreendermos o presente e futuro. A Formação Ipubi representa uma sucessão siliciclástica do Cretáceo Inferior pertencente ao Grupo Santana da Bacia do Araripe. Localizada no Nordeste do Brasil, esta bacia é considerada a mais extensa das bacias interiores desta região, oriunda da fragmentação do Supercontinente Gondwana. Muitas pesquisas paleontológicas são realizadas na Bacia do Araripe e em suas distintas formações. Contudo, estudos acerca da composição e reconstituição do paleoambiente da Formação Ipubi ainda são temas de debates e incertezas. Alguns autores buscam compreender o paleoambiente desta formação, através de análises das suas rochas e dos seus fósseis. Em detalhe, buscam informações através dos diferentes tipos de fossilização ali presentes, de biomarcadores e também de compostos orgânicos, a modo de determinar a origem desse material e suas características do paleoambiente deposicional. Neste trabalho foram analisados 7 (sete) artigos científicos que falam sobre o paleoambiente da Formação Ipubi. A priori, foi feito um levantamento de informações acerca de paleoambientes da Formação Ipubi, para busca de trabalhos como fonte, utilizando os seguintes descritores: Paleoambiente, Formação Ipubi, Bacia do Araripe, estratigrafia, fósseis e contexto geológico. Por meio de leitura exploratória do material encontrado em uma abordagem qualitativa, esses estudos foram selecionados através de buscas em periódicos, baseando-se na viabilidade e validade dos artigos. Com base nos trabalhos analisados, conclui-se a importância de cada um em seus respectivos nichos. A análise de macro carvão vegetal (*macro-charcoal*) encontrados de gimnospermas, decorrentes de paleoincêndios ocorridos na época, contribuem para a compreensão da paleoflora daquele período. Os diferentes tipos de fossilização que ocorreram, os biomarcadores e os compostos orgânicos presentes em plantas fósseis, como na espécie *Brachyphyllum castilhoi*, determinam que a matéria original da planta foi substancialmente substituída por pirita, substância rara em fósseis da Bacia do Araripe, dando notoriedade a essa substância no processo de preservação de fósseis.

A
B
C
D
E
F
G
H
I
J
K
L
M
N
O
P
Q
R
S
T
U
V
W
X

ANÁLISES PRELIMINARES DE INCLUSÕES EM COPRÓLITOS DA FORMAÇÃO ROMUALDO (ALBIANO), BACIA DO ARARIPE

MARLA ALINE PEREIRA DINO¹, ELANE SOARES ARAÚJO¹, EUGENIO BARROSO DE MOURA¹,
 NAIARA CIPRIANO OLIVEIRA², FÁBIO HIDEKI YAMADA¹, ANTÔNIO ALAMO FEITOSA SARAIVA^{1,2},
 RENAN ALFREDO MACHADO BANTIM^{1,2}

¹Universidade Regional do Cariri, Departamento de Ciências Biológicas, Programa de Pós-Graduação em Diversidade Biológica e Recursos Naturais, R. Carolina Suecúria, s/n, Pombas, 63105-010, Crato, CE, Brasil;

²Museu de Paleontologia Plácido Cidade Nuvens, Universidade Regional do Cariri, R. Plácido Cidade Nuvens, 326, 63190-000, Santana do Cariri, CE, Brasil.

aline.dino@urca.br, elane.soares@urca.br, eugenio.moura@urca.br, naiara.cipriano@urca.br,
 fabio.yamada@urca.br, alamoacariri@yahoo.com.br, renan.bantim@urca.br

A Formação Romualdo, pertencente ao Grupo Santana, é uma das mais importantes e conhecidas unidades fossilíferas do Cretáceo, isso se dá devido ao seu rico e excepcional conteúdo fossilífero preservado em concreções carbonáticas. Nestas concreções são encontrados fósseis de peixes e de coprólitos, além de répteis, plantas, entre outros. Os coprólitos são fezes fossilizadas e podem fornecer informações importantes de animais já extintos, como também podem auxiliar na reconstrução de paleoambientes, na relação predador-presa, nos hábitos alimentares e também no comportamento de várias espécies, além de fornecer informações sobre parasitas (paleoparasitologia). Dessa forma, este estudo se dá em a análise de pequenas inclusões encontradas nos espécimes LPU 01, LPU 14, LPU 28, LPU 29, LPU 30 e LPU 31, coletados na escavação realizada no Sítio Café das Antigas, na cidade de Crato – CE e que se encontram depositados no Laboratório de Paleontologia da URCA – LPU com número de tombo provisório, a fim de estabelecer o seu potencial produtor e sua provável presa. As análises estão sendo realizadas com o objetivo de descrever as características morfológicas dos espécimes estudados e das inclusões neles encontradas. Estas foram desenvolvidas com o auxílio de uma lupa estereoscópica para melhor visualização tanto da morfologia dos espécimes, que se apresentaram em forma cilíndrica e indefinida, de modo que ainda não se tornou possível apontar o seu produtor, como das inclusões encontradas. As amostras ainda serão levadas ao MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura), com o objetivo de melhorar a visualização das inclusões. Dessa forma, os coprólitos até aqui analisados, apresentaram inclusões de coloração marrom clara, que foram apontadas como sendo possíveis fragmentos de escamas de peixes. A partir da continuidade das análises, pretende-se refinar o estudo destas inclusões com o intuito de uma classificação mais apurada, assim como realizar algumas preparações mecânicas com a finalidade de separar o coprólito da concreção e também dissociar as inclusões das amostras de coprólitos, para uma melhor exibição das estruturas encontradas, objetivando-se a identificação precisa do produtor e presa em potencial. [FUNCAP].

5. Carta de submissão do manuscrito à revista *CURRENT BIOLOGY*.

01/10/2024, 07:41

E-mail de Webmail da URCA - Submission Confirmation for Macro-charcoal and amber in the Early Cretaceous of the Araripe



EUGENIO BARROSO DE MOURA <eugenio.moura@urca.br>

Submission Confirmation for Macro-charcoal and amber in the Early Cretaceous of the Araripe Basin: first occurrence in the Crato Formation

Current Biology Editorial Office <cm@editorialmanager.com>

30 de setembro de 2024 às 23:41

Responder a: Current Biology Editorial Office <current-biology@cell.com>

Para: Eugenio Barroso Moura <eugenio.moura@urca.br>

Dear Dr. Moura,

Thank you for submitting your manuscript entitled "Macro-charcoal and amber in the Early Cretaceous of the Araripe Basin: first occurrence in the Crato Formation" to Current Biology.

Your manuscript will be given a reference number once an Editor has been assigned.

NB. In the event of publication, authors of Articles and Reports will be asked to pay the charges of \$550 for the first colour figure and \$275 for each additional colour figure to partially defray the cost of separating and printing colour figures.

Best wishes,

Olga Gorickaja
Maxine Herman-Oakley

Olga Gorickaja
Editorial and Features Administrator
Tel: +44 (0) 20 7424 4208
Email: o.gorickaja@elsevier.com

Maxine Herman-Oakley
Senior Editorial and Features Administrator
Tel: +44 (0) 20 7424 4510
Email: maxine.oakley@elsevier.com

In compliance with data protection regulations, you may request that we remove your personal registration details at any time. (Use the following URL: <https://www.editorialmanager.com/current-biology/login.asp?e=1>). Please contact the publication office if you have any questions.