

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**  
Instituto de Geociências e Ciências Exatas  
Campus de Rio Claro

**PALEOECOLOGIA E TAFONOMIA DA FLORESTA PETRIFICADA DO TOCANTINS SETENTRIONAL  
(BACIA DO PARNAÍBA, PERMIANO)**

**Robson Louiz Capretz**

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Rosemarie Rohn Davies

Tese de Doutorado elaborada junto ao Curso de Pós-Graduação em Geologia Regional – Área de Concentração em Geologia Regional, para obtenção do título de Doutor em Geociências

Rio Claro (SP)

2010

## Ficha Catalográfica

COMISSÃO EXAMINADORA

Profa. Dra. Rosemarie Rohn Davies

Unesp | IGCE Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Campus Rio Claro

Profa. Dra. Fresia Soledad Ricardi Torres Branco

Unicamp | Instituto de Geociências

Prof. Dr. Roberto Ianuzzi

UFRGS | Instituto de Geociências

Prof. Dr. Joel Carneiro de Castro

Unesp | IGCE Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Campus Rio Claro

Prof. Dr. Luis Gustavo Ferreira de Oliveira

Uniararas | Centro Universitário Herminio Ometto de Araras

*"(...) and the Earth becomes my throne*

*I adapt to the unknown*

*Under wondering stars I've grown*

*By myself but not alone*

*I ask no one..."*

Hetfeld/ Ulrich, *Wherever I May Roam*

Metallica (1991)

*"Don't panic."*

Douglas Adams

*The Hitchiker's Guide to the Galaxy* (1979)

Dedico a Fabiana Maria Galli Wütrich, que com amor, carinho e atenção sobre-humanos, me ajudou e apoiou nestes momentos finais. Demorei muito tempo pra te encontrar, mas no fundo, eu sabia que estava te esperando.

## Agradecimentos

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela bolsa de estudos concedida (Processo 05/58444-5).

À minha orientadora Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Rosemarie Rohn Davies, que com extrema atenção, rigor e dedicação, vem formando paleontólogos de inestimável valor.

Ao Programa de Pós-Graduação em Geologia Regional, do Instituto de Geociências e Ciências Exatas (IGCE), Unesp, Campus de Rio Claro, pelos conhecimentos adquiridos.

Ao Instituto Natureza do Tocantins (Naturatins) pelo acesso à área de estudo, e em especial ao Sr. Abel, administrador do MNAFTO em 2007.

Ao meu grande amigo Prof. Dr. Décio Luis Semensatto Jr., pela amizade fraterna e sincera, a sua esposa Geórgia e ao pequeno Francisco.

A Tatiane Marinho Tavares, pelo auxílio na última etapa de campo, na catalogação da coleção de fósseis, pelas fotografias e pela amizade.

Ao prof. Dr. Dimas Dias-Brito, pela amizade e otimismo neste projeto com os fósseis de Tocantins.

Ao Dr. Ronny Röβler e ao Sr. Robert Noll pelo auxílio nos trabalhos de campo.

A Ricardo Miranda de Britez, Marcelo Reginato e à SPVS pelo auxílio na coleta dados de pteridófitas arborescentes do nosso projeto na Mata Atlântica.

A minha família, especialmente a Maria Inês Capretz, Dorival Andreoli (*in memoriam*), Yara Marçal de Mello Pimentel e Adolfo Pimentel.

Aos meus amigos Jennifer, Luis Gustavo, Elaine e Adolfo pela excepcional convivência durante os anos do doutorado em Rio Claro.

A Soffi, pela amizade e pelo presente mais belo que já recebi. A Paulo César e Mirela, pelo carinho e pelas portas abertas. A Nanda e Dhiogo, pela amizade na nublada Curitiba.

Aos earthwatchers André e Flávia, pela amizade em meio à Floresta Ombrófila Densa Submontana e sobrevivência em meio a inúmeros sotaques distintos.

## RESUMO

### ASPECTOS PALEOECOLÓGICOS E TAFONÔMICOS DA FLORESTA PETRIFICADA DO TOCANTINS SETENTRIONAL (BACIA DO PARNAÍBA, PERMIANO)

No presente estudo é descrita uma floresta do Eopermiano do Norte do Gondwana, dominada por pteridófitas arborescentes, gimnospermas, licófitas e esfenófitas. Esta rica assembléia fossilífera localiza-se no Monumento Natural das Árvores Fossilizadas do Tocantins (MNAFTO), na Bacia do Parnaíba, Norte do Brasil. Dois aspectos se destacam: a abundância dos fitofósseis e seu excepcional nível de preservação. Os vegetais fósseis guardam semelhanças com aqueles do mesmo período em Chemnitz (Alemanha), na Província Euroamericana, e com a Flora Gondvânica, na Bacia do Paraná (Brasil), entre outros. A análise dos padrões de orientação de 178 caules, junto com observações geológicas, sugere paleocorrentes no sentido Oeste-Leste predominantemente, originadas durante tempestades de monções, com área-fonte muito distante a Oeste, talvez em um contexto de leque aluvial distal. A vegetação das margens dos principais canais fluviais e suas planícies de inundação era dominada por pteridófitas arborescentes no estrato superior da floresta (dossel), com licófitas, esfenófitas e outras pteridófitas menores ocupando o estrato inferior (sub-bosque). Gimnospermas ocupavam regiões mais distantes das margens dos canais. A comparação entre pteridófitas arborescentes permianas (do MNAFTO) com pteridófitas arborescentes atuais (em remanescentes de Floresta Ombrófila Densa Submontana) permitiu discutir nichos ecológicos ocupados por estas plantas, a estrutura da floresta em ambos os casos, e a inferência da altura verdadeira dos fitofósseis, em uma aplicação inédita de técnicas alométricas a estudos paleontológicos.

Palavras-chave: Permiano, Tocantins, Bacia do Parnaíba, pteridófitas arborescentes, paleoecologia, tafonomia, paleocorrentes

## **ABSTRACT**

### **PALAEOECOLOGY AND TAPHONOMY OF THE NORTHERN TOCANTINS PETRIFIED FOREST (PARNAÍBA BASIN, BRAZIL, PERMIAN)**

This present study describes a Lower Permian forest in Northern Gondwana, composed by tree ferns, gymnosperms, lycophytes and sphenopsids. This fossil assemblage is located at Tocantins Fossil Trees Natural Monument (MNAFTO) at Parnaíba Basin, Northern Brazil. There are two remarkable aspects: the abundance of fossils and their exceptional level of preservation. The vegetation is similar to the plant fossils found at Chemnitz (Germany), to Euroamerican Flora sites, and to Gondwanian Flora at Paraná Basin (Brazil), among others. Orientation pattern analyses of 178 stems with geological observations suggest paleocurrents in West-East direction, in monsoon storms. The source area should be at West, several kilometers away, probably in a distal alluvial fan context. The forest in the margins of main fluvial channels was occupied by tree ferns at canopy, and lycophytes, sphenopsids and other small ferns at understory. Gymnosperms probably lived in more distant areas from the fluvial channels. The comparison between fossil tree ferns (from MNAFTO) and modern tree ferns (in Submontane Tropical Rain Forest remnants at the present) allowed discussions about ecological niche, forest structure and estimations of real height of fossil tree ferns, in a new way to apply allometric techniques to paleontological studies.

Key words: Permian, Tocantins, Parnaíba Basin, tree ferns, paleoecology, taphonomy, paleocurrents

## Sumário

1. Introdução	14
1.1 Objetivos	14
2. Métodos	16
2.1 Área de Estudo	16
2.1.1 Monumento Natural das Árvores Fossilizadas do Tocantins	16
2.1.2 Reserva Natural do Rio Cachoeira (Mata Atlântica, presente)	19
2.2 Etapas de campo	21
2.3 Coleta de dados tafonômicos	22
2.3.1 Mosaicos topográficos	27
2.4 Inventário florestal para comparação entre pteridófitas permianas e atuais	29
3. Revisão da literatura	30
3.1 Geologia do Monumento Natural das Árvores Fossilizadas do Tocantins	30
3.2 Fósseis vegetais do Permiano da Bacia do Parnaíba	36
3.3 Florestas Petrificadas	38
3.4 Estudos Tafonômicos	51
4. Resultados e Discussão	55
4.1 Considerações sobre a Geologia do MNAFTO	55
4.2 Estrutura das assembléias fossilíferas	68
4.3 Estudo da orientação dos caules	90
4.3.1 Sítios fossilíferos: I) Fazenda Peba	97
4.3.2 Sítios fossilíferos: II) Fazenda Andradina	100
4.3.3 Sítios fossilíferos: III) Fazenda Buritirana	106
4.4 Paleoambiente	111
4.5 Províncias paleofitogeográficas do Permiano	115
4.6 Considerações sobre a ecologia das pteridófitas permianas e atuais	128
5. Conclusões	154
Referências bibliográficas	156

## Índice de figuras

Figura 2.1.1. Mapa do Monumento Natural das Árvores Fossilizadas do Tocantins (MNAFTO), com destaque para os principais sítios fossilíferos	18
Figura 2.1.2. Mapa com a localização de Antonina, no litoral Norte do Paraná	20
Figura 2.3.1. Desenho esquemático demonstrando as medidas de comprimento total, diâmetro nas porções proximal e distal, e orientação azimutal de um caule <i>in loco</i>	23
Figura 2.3.2. Exemplo de medição do comprimento e orientação de caules fragmentados <i>in loco</i>	24
Figura 2.3.3. Desenho esquemático de corte transversal dos caules das pteridófitas arborescentes dos gêneros <i>Psaronius</i> e <i>Tietea</i> , contendo estelo e manto radicular	25
Figura 2.3.4. Fotografias dos métodos empregados em campo	26
Figura 2.3.1.1. Representação esquemática dos dois mosaicos fotográficos elaborados nas fazendas Buritirana e Andradina	28
Figura 3.1.1. Principais bacias sedimentares brasileiras	30
Figura 3.1.2. Coluna estratigráfica da Bacia do Parnaíba	32
Figura 3.2.3. Mapa geológico do Monumento Natural das Árvores Fossilizadas do Tocantins, Bacia do Parnaíba	35
Figura 3.3.1. Registros de “florestas petrificadas” ao redor do planeta, segundo seu período geológico correspondente	40
Figura 4.1.1. Paisagem com típicas mesetas nas porções Nordeste e Leste do MNAFTO	55
Figura 4.1.2. Estratificações cruzadas da Formação Sambaíba, Serra do Justino	56
Figura 4.1.3. Mina de gipsita a Nordeste do MNAFTO	57
Figura 4.1.4. Vista da Serra do Justino, com direção Noroeste, e interpretação da litoestratigrafia conforme as feições geomorfológicas	58
Figura 4.1.5. Perfil colunar da Fazenda Andradina, conforme Dias-Brito <i>et al.</i> (2007), com acréscimo de dados de paleocorrentes e do posicionamento aproximado dos fósseis	59
Figura 4.1.6. Afloramentos na Fazenda Andradina	60
Figura 4.1.7. Arenitos da Fazenda Andradina, com intercalações pelíticas irregulares, microestratificações cruzadas e mosqueamento, com caules <i>in loco</i>	61
Figura 4.1.8. Fácies pelíticas, parcialmente mosqueadas, e camada destacada de sílex, na rodovia TO-222, a Leste de Bielândia	62
Figura 4.1.9. Perfil colunar da Fazenda Buritirana, conforme Dias-Brito <i>et al.</i> (2007), com o acréscimo de informações sobre a ocorrência de caules permineralizados	63
Figura 4.1.10. Raro afloramento de arenito com estratificação cruzada acanalada na Fazenda Buritirana	64
Figura 4.1.11. Siltito com caule permineralizado achatado, na Fazenda Buritirana	65
Figura 4.1.12. Calcário dolomítico com nódulos e siltitos na porção topograficamente mais baixa da	65

Fazenda Buritirana, possivelmente pertencentes à Formação Pedra de Fogo	
Figura 4.1.13. Afloramento na Fazenda Peba, ao Norte da principal área de ocorrência de fósseis	66
Figura 4.2.1. Exemplo de exposição de caules na Fazenda Andradina	68
Figura 4.2.2. Exemplo de caule de Marattiales com capa de arenito, na Fazenda Buritirana	70
Figura 4.2.3. Exemplo de porção proximal de caule de Marattiales na Fazenda Buritirana, cujo estelo foi mais alterado do que o manto de raízes adventícias	71
Figura 4.2.4. Exemplo de pinas e pínulas aderidas a caule de Marattiales, na Fazenda Buritirana	72
Figura 4.2.5. Maior detalhe de pinas e pínulas aderidas a caule de Marattiales da figura anterior, na Fazenda Buritirana	72
Figura 4.2.6. Escassas pinas encontradas em arenito mosqueado na Fazenda Andradina	73
Figura 4.2.7. Pteridófitas arborescentes permineralizadas	74
Figura 4.2.8. Exemplos de fósseis encontrados no MNAFTO	75
Figura 4.2.9. Exemplar de <i>Grammatopteris</i> encontrado na Fazenda Peba	76
Figura 4.2.10. Porções basais de Marattiales encontrados na Fazenda Buritirana	76
Figura 4.2.11. Exemplo de manto de raízes adventícias de Marattiales, com gimnosperma epífita associada, na Fazenda Buritirana	77
Figura 4.2.12. Detalhe do manto de raízes adventícias de Marattiales, com gimnosperma epífita associada, na Fazenda Buritirana	78
Figura 4.2.13. Procedimento de medição do comprimento de um caule na Fazenda Peba	79
Figura 4.2.14. Histogramas para classes de comprimento e diâmetro para pteridófitas e gimnospermas encontradas no MNAFTO	82
Figura 4.2.3.15. Histogramas para classes de comprimento para os fitofósseis encontrados nos três principais sítios fossilíferos do MNAFTO	83
Figura 4.2.3.16. Porções distais de caules de <i>Tietea</i> com evidências de abrasão	85
Figura 4.2.3.17. Exemplos de caules permineralizados	86
Figura 4.2.3.18. Caules de <i>Tietea</i> em arenitos mosqueados de provável planície de inundação, dispostos perpendicularmente, com indícios de achatamento, na Fazenda Andradina	88
Figura 4.2.3.19. Caule de <i>Tietea</i> com formato cilíndrico localizado cerca de 1 m acima do nível da figura anterior	88
Figura 4.3.1. Exemplo de caules dispostos de modo paralelo e oblíquo, às margens da estrada TO-425, ao Sul de Bielândia	91
Figura 4.3.2. Exemplo de caules dispostos de modo paralelo e perpendicular, na Fazenda Andradina	91
Figura 4.3.3. Caules ou eixos caulinares de gimnospermas subparalelos na Fazenda Andradina	92
Figura 4.3.4. Três caules muito fragmentados, com paralelismo original mantido, na Fazenda Buritirana	92
Figura 4.3.5. Rosetas de orientação dos caules para os três sítios fossilíferos	93
Figura 4.3.6. Caules relativamente longos depositados em canal meandrante estreito e raso, segundo	94

Abbe & Montgomery (2003)	
Figura 4.3.7. Orientação de caule flutuante na água na presença de fluxo unidirecional em canal, segundo Saldi-Caromile <i>et al.</i> (2004)	95
Figura 4.3.8. Acumulações de caules conforme distintos locais, variando do tipo <i>braided</i> a menadrante, segundo Gurnell <i>et al.</i> (2002)	96
Figura 4.3.1.1. Rosetas de orientação dos caules na Fazenda Peba, segundo classes de tamanho	97
Figura 4.3.1.2. Mapas dos caules encontrados na Fazenda Peba	99
Figura 4.3.1.3. Caules de <i>Tietea</i> dispostos perpendicularmente, na Fazenda Peba	100
Figura 4.3.2.1. Rosetas de orientação dos caules na Fazenda Andradina, segundo classes de tamanho, e roseta de orientação dos planos de estratificação cruzada em afloramento próximo aos caules	101
Figura 4.3.2.2. Mapa dos caules encontrados na Fazenda Andradina	103
Figura 4.3.2.3. Mosaico fotográfico de caules fósseis encontrados na Fazenda Andradina	104
Figura 4.3.2.4. Caule de <i>Tietea</i> encontrado na Fazenda Andradina	105
Figura 4.3.3.1. Rosetas de orientação dos caules na Fazenda Buritirana, segundo classes de tamanho	106
Figura 4.3.3.2. Mapa dos caules encontrados na Fazenda Buritirana	108
Figura 4.3.3.3. Mosaico fotográfico de caules fósseis encontrados na Fazenda Buritirana	109
Figura 4.5.1. Distribuição dos continentes, principais características climáticas e terras emersas do Neocarbonífero ao Eopermiano (adaptado de Scotese 2001)	116
Figura 4.5.2. Distribuição dos continentes, principais características climáticas e terras emersas do Mesopermiano ao Neopermiano (adaptado de Scotese 2001)	117
Figura 4.5.3. Províncias paleofitogeográficas do Neocarbonífero e Eopermiano, com destaque para terras emersas, características climáticas e a localização das Bacias do Paraná e Parnaíba (adaptado de Scotese 2001)	119
Figura 4.5.4. Províncias paleofitogeográficas e floras mistas do Eopermiano (adaptado de Chaloner & Lacey 1973)	120
Figura 4.6.1. Fotografia de pteridófitas arborescentes (Cyatheaceae) no estrato inferior em remanescentes atuais de Floresta Ombrófila Densa Submontana	130
Figura 4.6.2. Fotografia de pteridófitas arborescentes (Cyatheaceae) em relação ao estrato superior de um trecho de Floresta Ombrófila Densa Submontana	131
Figura 4.6.3. Histogramas para classes de diâmetro e altura para <i>Cyathea corcovadensis</i> em remanescente de Mata Atlântica	133
Figura 4.6.4. Histogramas para classes de diâmetro e altura para <i>Cyathea leucofolis</i> em remanescente de Mata Atlântica	134
Figura 4.6.5. Histogramas para classes de diâmetro e altura para <i>Cyathea phalerata</i> em remanescente de Mata Atlântica	135
Figura 4.6.6. Histogramas para classes de diâmetro e altura para <i>Alsophila sternbergii</i> em remanescente	136

de Mata Atlântica

Figura 4.6.7. Histogramas para classes de diâmetro e comprimento para os fósseis de pteridófitas encontrados no MNAFTO	137
Figura 4.6.8. Gráficos de diâmetro <i>versus</i> altura para quatro espécies de pteridófitas atuais	140
Figura 4.6.9. Análise dos resíduos do modelo alométrico de <i>Cyathea phalerata</i>	142
Figura 4.6.10. Histogramas para classes de comprimento e de altura estimada a partir do modelo linear para as pteridófitas fósseis no total	144
Figura 4.6.11. Histogramas para classes de comprimento e de altura estimada a partir do modelo linear para as pteridófitas fósseis da Fazenda Peba	145
Figura 4.6.12. Histogramas para classes de comprimento e de altura estimada a partir do modelo linear para as pteridófitas fósseis da Fazenda Andradina	146
Figura 4.6.13. Histogramas para classes de comprimento e de altura estimada a partir do modelo linear para as pteridófitas fósseis da Fazenda Buritirana	147
Figura 4.6.14. Processo de estimativa de altura das pteridófitas fósseis do MNAFTO com base nas pteridófitas do presente	148
Figura 4.6.15. Fotografia de uma pteridófito fóssil ( <i>Tietea</i> , código 26) encontrada na Fazenda Buritirana, com diâmetro basal bem maior do que o diâmetro na porção distal	149
Figura 4.6.16. Desenho esquemático dos estratos verticais de florestas do presente e do Permiano	151

## Índice de tabelas

Tabela 3.2.1. Fósseis vegetais do Permiano da Bacia do Parnaíba	37
Tabela 4.2.1. Ocorrência dos fósseis vegetais nos três locais de estudo dentro do MNAFTO	73
Tabela 4.2.2. Distribuição dos caules segundo a média e o desvio padrão de seu comprimento, diâmetro na “base” e “ápice”, para cada local estudado	79
Tabela 4.2.3. Distribuição dos caules de pteridófitas e gimnospermas segundo a média e o desvio padrão de seu comprimento, diâmetro na base e ápice	80
Tabela 4.2.4. Número de caules com comprimento menor que 2m, nos três sítios fossilíferos	84
Tabela 4.6.1. Coeficientes de regressão linear para as quatro espécies de pteridófitas arborescentes do presente	138

## 1. Introdução

Embora seja conhecida desde os primeiros anos do Século XX, a flora paleozóica da Bacia do Parnaíba, conhecida atualmente por Floresta Petrificada do Tocantins Setentrional, possui urgente necessidade de caracterização de seus elementos florísticos (Mussa & Coimbra 1987), uma vez que reconstituições florísticas e ambientais ainda permanecem em aberto.

O Monumento Natural das Árvores Fossilizadas do Tocantins (MNAFTO) é uma Unidade de Conservação de Proteção Integral (Brasil 2000), criado com o intuito de proteger uma rica assembléia fossilífera presente na região entre Araguaína e Filadélfia, próximo ao rio Tocantins (Bacia do Parnaíba), que separa o Estado do Tocantins do Maranhão. Trata-se de um registro ímpar para a paleobotânica brasileira, em virtude da abundância de fósseis no local e de seu elevado nível de preservação dos exemplares. Merecem destaque no rol dos registros paleontológicos brasileiros as condições de preservação dos fitofósseis presentes ali, onde é possível até mesmo observar a organização celular dos espécimes.

As condições singulares expostas acima fomentam grande interesse na investigação da comunidade vegetal que existiu ali durante Permiano Inferior, das condições de sepultamento e preservação que propiciaram a conservação desta singular assembléia de vegetais permineralizados.

Através de estudos anteriores foi possível verificar que os fósseis vegetais encontrados na Bacia do Parnaíba apresentam semelhanças com exemplares encontrados no Sudeste da Alemanha, para o mesmo período geológico. Durante o Permiano Inferior brasileiro já se tinha conhecimento de uma rica flora na região setentrional do país, na Bacia do Paraná. O aparecimento desta nova flora, sua similaridade com floras tão distantes como esta da Alemanha, ao mesmo tempo em que havia outra flora próxima mais ao Sul, suscitam questões pertinentes sobre o grau de provincialismo durante o final do Paleozóico na América do Sul e Europa.

### 1.1 Objetivos

Dessa forma, a comunidade vegetal exposta através destes espécimes de Tocantins será objeto deste estudo, com destaque para os seguintes aspectos:

- Composição da comunidade vegetal do Permiano Inferior de Tocantins, e suas relações com a Floresta Petrificada de Chemnitz (Alemanha), com a Flora *Glossopteris* (Bacia do Paraná) e demais floras conhecidas para o período;
- Aspectos tafonômicos da Floresta Petrificada de Tocantins, abordando a quantidade de fósseis encontrados, sua condição de preservação e os fatores condicionantes desta condição;
- Reconstituição do ambiente que abrigava esta floresta, com possíveis cenários fluviais e características florestais da comunidade.
- Comparações entre a ecologia de pteridófitas arborescentes fósseis, dominantes durante o fim do Paleozóico, com a ecologia de pteridófitas arborescentes atuais, presentes nos estratos inferiores de florestas pluviais.

Este estudo tem, portanto, quatro linhas de abordagem: a paleocomunidade vegetal (com enfoque paleofitogeográfico), a tafonomia, a reconstituição do paleoambiente e a comparação ecológica entre vegetais fósseis e atuais.

Este tese está estruturada da seguinte forma: após a seção de Métodos, aparece a Revisão Bibliográfica. Os Resultados estão divididos em cada linha de abordagem escolhida, e contêm as discussões a respeito dos dados obtidos. Por fim, as principais conclusões são expostas.

As figuras desta tese têm uma numeração particular para cada seção. A seção “2.3 Coleta de Dados Tafonômicos”, por exemplo, é acompanhada pelas figuras 2.3.1 (a primeira desta seção específica), 2.3.2 (a segunda) e 2.3.3 (a terceira), e assim por diante. Esta forma de organização visa a melhor adequação aos inúmeros capítulos e seções, e facilitará a organização do texto na elaboração dos artigos a serem publicados.

## 2. Métodos

### 2.1 Área de Estudo

#### 2.1.1 Monumento Natural das Árvores Fossilizadas do Tocantins

Os fósseis estudados nesta tese compõem a Floresta Petrificada do Tocantins Setentrional. Localizam-se dentro dos limites legais do Monumento das Árvores Fossilizadas do Tocantins (MNAFTO), na porção Norte do Estado do Tocantins, entre as cidades de Araguaína e Filadélfia, próximo ao Rio Tocantins, que separa o Tocantins do Maranhão (figura 2.1.1).

O MNAFTO foi criado em 2000, por Medida Provisória nº 370 do Estado do Tocantins, para proteger uma rica assembléia fossilífera presente na área rural do município de Filadélfia, Nordeste do Tocantins.

O MNAFTO é uma Unidade de Conservação (UC) de Proteção Integral, de acordo com o Sistema Nacional de Unidades de Conservação – SNUC (Brasil 2000). Por lei federal, este tipo de UC permite a posse dos terrenos por terceiros, desde que as atividades econômicas desenvolvidas ali estejam de acordo com o objetivo determinado por lei. O texto do SNUC define como principal justificativa para a criação de Monumentos Naturais “(...) a preservação de sítios naturais raros, singulares ou de grande importância paisagística”. A existência de uma flora fóssil singular no contexto paleontológico brasileiro, com características de preservação e abundância peculiares como as da Floresta Petrificada do Tocantins, serviu como motivação para o estabelecimento do MNAFTO.

Atualmente o MNAFTO é administrado pelo Instituto Natureza do Tocantins (Naturatins), órgão ambiental do Governo do Estado de Tocantins. Sua área ultrapassa 32 mil hectares, e possui três principais localidades onde afloram os fósseis: as fazendas Peba, Andradina e Buritirana (figura 2.1.1). A UC é cortada no sentido Leste-Oeste por uma rodovia estadual asfaltada (designada como TO-222, que permite o acesso ao Estado do Maranhão, na cidade de Carolina). Há registros históricos de retirada ilegal de fósseis das áreas do MNAFTO, conforme relatos do Naturatins, Polícia Federal e DNPM. Grande quantidade de fósseis foi recuperada pelos órgãos competentes. Por questões burocráticas, a maior parte deste material (principalmente bases e caules de pteridófitas, esfenófitas e gimnospermas, várias com notável

potencial para estudos anatômicos) se encontra no pátio da sede do DNPM, do Naturatins ou foi depositada praticamente a esmo em locais dentro do Monumento Natural. O acesso a estas peças, mesmo para pesquisa científica, não é permitido enquanto correm trâmites jurídicos.

A Sudoeste da área de estudo, na região próxima ao município de Colinas do Tocantins, há registros de outros sítios fossilíferos, possivelmente relacionados com os fósseis do MNAFTO e com as unidades geológicas abordadas nesta tese. Pela importância do MNAFTO, pelos aspectos legais que tornam urgente sua preservação e sua consolidação como Unidade de Conservação efetiva (e a pesquisa científica como documentação de sua riqueza fossilífera), esta tese teve como foco exclusivamente os fósseis do Monumento Natural.

Informações a respeito da geologia da região são descritas na seção de Revisão da Literatura, e no capítulo de Resultados.

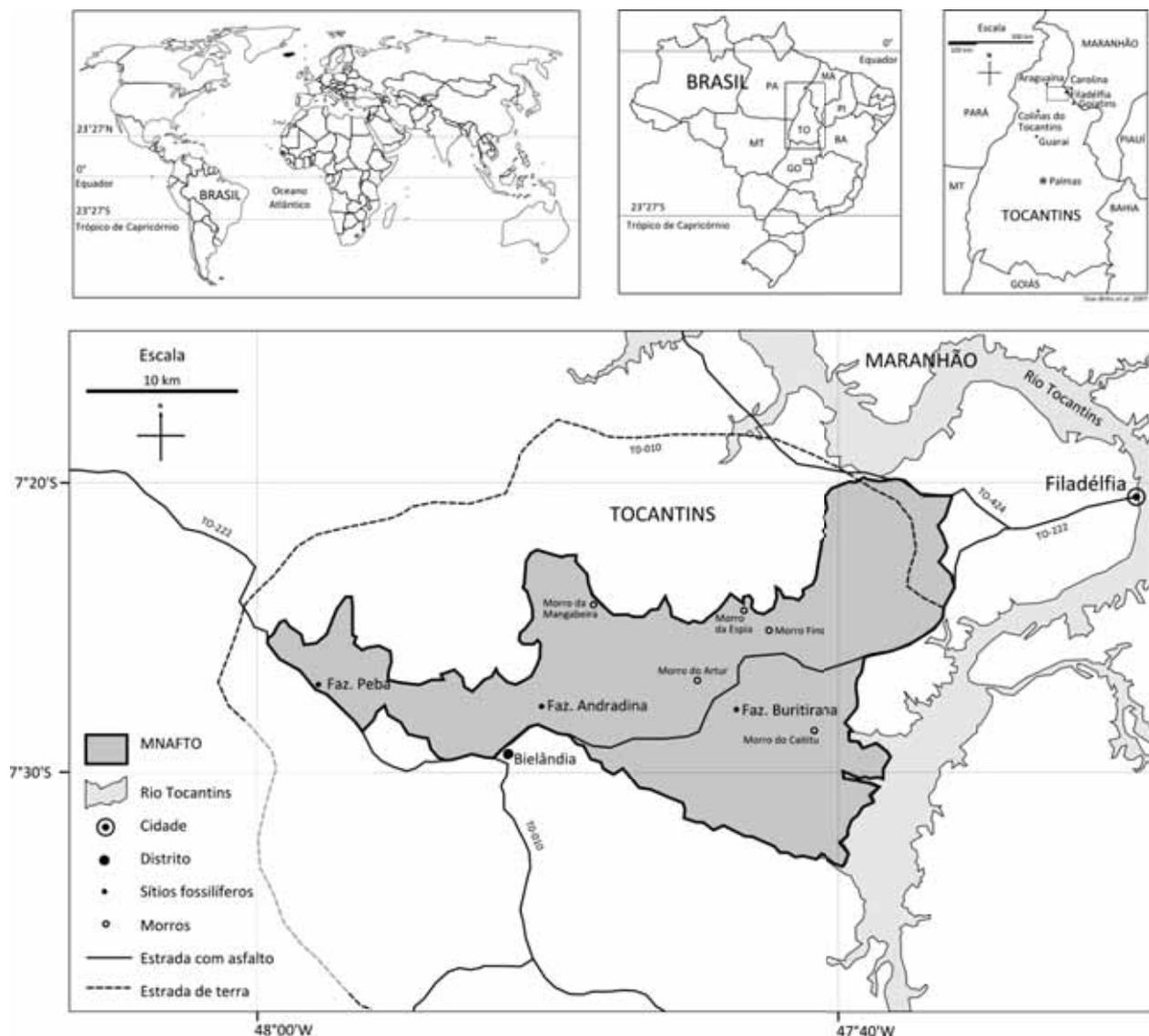


Figura 2.1.1. Mapa do Monumento Natural das Árvores Fossilizadas de Tocantins (MNAFTO), com destaque para os principais sítios fossilíferos

Os três sítios fossilíferos estudados se localizam em fazendas particulares, nas porções Oeste, Central e Leste do MNAFTO (figura 2.1.1).

A Fazenda Peba (coordenadas UTM 23M 0173756/9178658), próxima aos limites do lado Oeste do Monumento, apresenta menor densidade de fósseis. Alguns exemplares encontrados na região possuem excelentes condições de preservação. Há registros de intensa atividade ilegal na região, com registros de captura de contrabandistas e havendo pilhas de fósseis recuperados, ambos em operações da Polícia Federal.

A Fazenda Andradina (coordenadas UTM 23M 0186108/9173864), na região central do Monumento, fica próxima ao Distrito de Bielândia. Trata-se do sítio fossilífero mais prejudicado pelas coletas ilegais de fósseis, segundo informações fornecidas pelo Naturatins e pela Polícia Federal. Apesar deste histórico, ainda há muitos fósseis no local, especialmente próximos a afloramentos com estratificação cruzada, constituindo assim um importante caráter de reconstituição paleoambiental.

O último sítio fossilífero estudado encontra-se dentro dos limites da Fazenda Buritirana (coordenadas UTM 23M 0201992/9173788), na porção Leste do MNAFTO. Em razão do seu difícil acesso, não há registros de retirada ilegal de fósseis. A riqueza de fósseis salta aos olhos, com diversas espécies de pteridófitas (inclusive pinas e pínulas preservadas), esfenófitas e pequenos fragmentos de gimnospermas.

A descrição de cada sítio fossilífero em detalhe é apresentada na seção de Resultados, assim como suas principais espécies, suas características geológicas e seus principais afloramentos.

### **2.1.2 Reserva Natural do Rio Cachoeira (Mata Atlântica, presente)**

A fim de comparar as pteridófitas arborescentes permianas do MNAFTO com pteridófitas atuais, realizou-se um pequeno inventário de samambaias arborescentes em remanescentes de Mata Atlântica localizados na Reserva Natural do Rio Cachoeira, no município de Antonina (Paraná), na região Sul do Brasil.

A Reserva Natural do Rio Cachoeira localiza-se na Área de Preservação Ambiental (APA) de Guaraqueçaba, no litoral Norte do Paraná (figura 2.1.2). Possui uma área de 8.649 ha, entre paisagens no pé e na encosta da Serra do Mar, e a baía de Antonina. A área consiste em uma Reserva Particular do Patrimônio Natural (RPPN) de propriedade da Sociedade de Pesquisa em Vida Selvagem e Educação Ambiental (SPVS) desde 2000. Está inserida no maior remanescente de Mata Atlântica do país, uma vez que o bioma está reduzido atualmente a cerca de 7% de sua cobertura original.

A vegetação é classificada como Floresta Ombrófila Densa, com altitudes de 0 a 1200 m. Os locais visitados para coleta de dados utilizados neste estudo têm altitudes de 50 a 300 m, em remanescentes da chamada Floresta Ombrófila Densa Submontana (Veloso *et al.* 1991). O clima é classificado no tipo Af (t) de Koeppen, como zona tropical marginal de transição, com temperaturas médias de 25°C e precipitação intensa, distribuída ao longo do ano, sem períodos secos. Aproximadamente 40% das chuvas anuais concentram-se no verão, de Janeiro a Março.



Figura 2.1.2. Mapa com a localização de Antonina, no litoral Norte do Paraná; a área clara com linhas pontilhadas se refere à cobertura original de Mata Atlântica na região; a área sombreada se refere aos remanescentes florestais

## 2.2 Etapas de Campo

Para a constituição desta tese, os trabalhos de campo e coleta de amostras foram divididos em três etapas, ao longo de 2006 e 2007. As duas primeiras etapas tiveram como objetivo a observação e checagem de afloramentos e sítios fossilíferos descritos em diversos relatórios e artigos científicos (Rößler & Galtier 2002, 2003; Dias-Brito & Castro 2005). A terceira (e maior) etapa teve como objetivo a medição e coleta de fósseis, além da obtenção de dados tafonômicos utilizados aqui. As três etapas de campo consumiram aproximadamente trinta dias de trabalho.

Durante as etapas de campo, foram realizadas observações sobre as condições geológicas e geomorfológicas da área de abrangência da Unidade de Conservação, visitas aos principais sítios fossilíferos, análise dos fósseis *in loco*, coleta de exemplares (com a anuência por escrito do Naturatins e do DNPM) e medições do comprimento, diâmetro e orientação dos caules encontrados *in loco*.

A primeira visita a campo ocorreu em maio de 2006, e teve o objetivo o reconhecimento dos afloramentos fossilíferos. As ações em campo foram guiadas pelas descrições do local feitas por Dias-Brito & Castro (2005) em relatório de campo.

Em junho de 2006 foi feita uma nova etapa de campo, com a presença do diretor do Museu de História Natural de Chemnitz, Dr. Ronny Rößler, e do Sr. Robert Noll, paleobotânico especialista em vegetais permineralizados permianos. A colaboração dos dois especialistas, autores de importantes artigos científicos com floras do Permiano (com destaque para os estudos da Floresta Petrificada de Chemnitz, de grande similaridade com a assembléia do presente estudo), foi primordial para esta etapa e para o desenvolvimento das pesquisas do grupo de estudo de paleobotânica do IGCE/UNESP.

Nesta etapa foram coletados diversos exemplares que se encontram nos laboratórios de paleontologia da Unesp de Rio Claro.

A terceira etapa de campo, realizada em Julho de 2007, teve como ponto de partida as observações realizadas nas duas etapas anteriores, em todos os afloramentos previamente visitados, além de locais de interesse geológico da região. A ênfase desta etapa foi realizar os procedimentos detalhados de medição da orientação, comprimento e diâmetro dos exemplares fósseis *in loco*. A escolha dos sítios e dos fósseis foi feita a partir dos seguintes critérios:

marcado grau de orientação dos fósseis, abundância e nível de preservação dos exemplares (ou seja, evitaram-se locais onde os fósseis apresentam elevado grau de fragmentação e intemperismo) e sua posição *in loco* (levando em conta a área total do MNAFTO, o histórico das áreas, sua proximidade com afloramentos importantes para a reconstituição do paleoambiente, e a quantidade e concentração de fósseis).

### **2.3 Coleta de Dados Tafonômicos**

Os caules fósseis encontrados nos afloramentos das fazendas Andradina, Peba e Buritirana foram mapeados, identificados preliminarmente, medidos e fotografados.

Para cada um dos caules encontrados foi tomado seu comprimento total, o diâmetro na porção mais proximal (que a partir de agora será descrita como “base”) e distal (descritas como “ápice”, mesmo que não consista efetivamente no ápice real preservado), e sua orientação azimutal (figura 2.3.1).

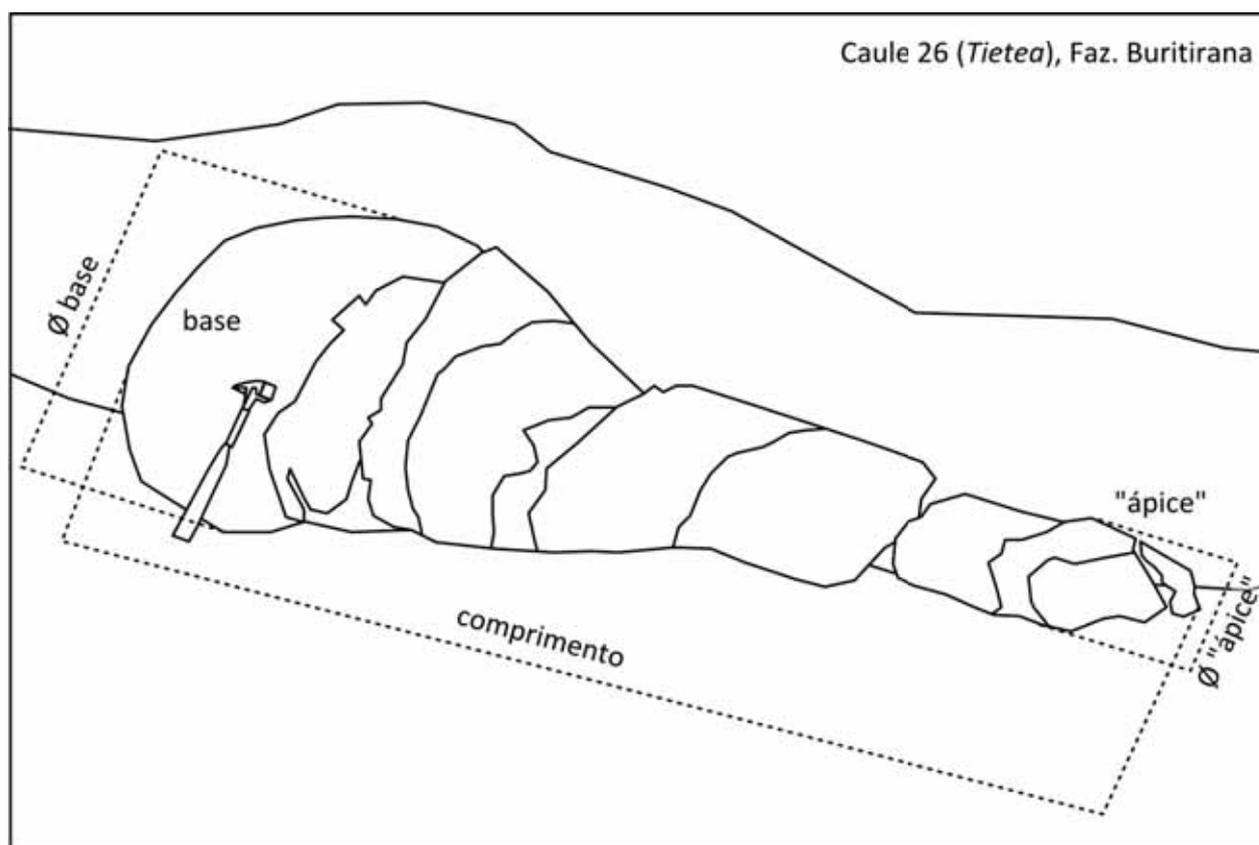


Figura 2.3.1. Desenho esquemático demonstrando as medidas de comprimento total, diâmetro nas porções proximal e distal

O comprimento total dos caules foi obtido a partir do que foi considerada a base daquele exemplar, até o seu "ápice", incluindo os fragmentos soltos em virtude dos processos de intemperismo. Uma vez expostos a céu aberto, os fósseis sofrem elevado grau de degradação pelo forte calor do Cerrado de Tocantins e pelas fortes chuvas (especialmente no inverno). Os caules se fragmentam, e os pedaços permanecem alinhados por um curto período (até que fortes enxurradas carreguem os fragmentos). Nas ocasiões onde foi possível constatar que aqueles fragmentos faziam parte originalmente de um mesmo caule, sem sinais de deslocamento, o seu comprimento total foi medido entre as partes mais distantes. Um exemplo destes casos pode ser visto na figura 2.3.2.

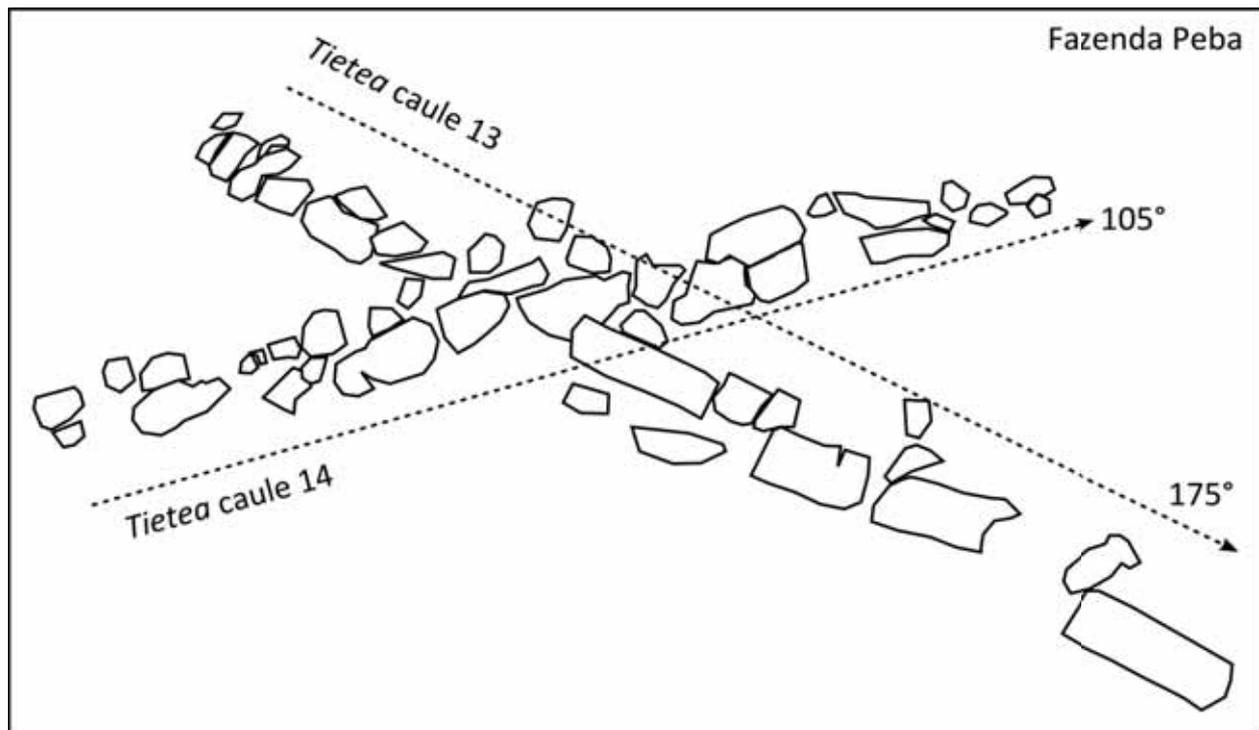


Figura 2.3.2. Exemplo da medição do comprimento e orientação de caules fragmentados *in loco*

A orientação azimutal dos caules obedeceu ao sentido base-ápice. Com o auxílio de uma bússola geológica Brunton foi tomada sua orientação em relação ao Norte geográfico, com a “visada” feita a partir da base, em direção ao ápice.

O mapeamento foi feito usando como ponto de referência a base de cada caule. Utilizou-se um GPS *Garmin* (modelo E-Trex), com coordenadas em UTM (“Projeção Universal Transversa de Mercator”, expressa em metros). O erro-padrão do sistema de GPS foi considerado nas análises dos dados. Foram tomados também, para cada caule, os dados de topografia fornecidos pelo sistema. Estes dados foram corrigidos nas análises por meio das calibrações realizadas diariamente com um altímetro barométrico. Considerando variações barométricas no decorrer do dia, as medidas de altitude em alguns pontos-chave da área de estudo (bifurcações de estradas, entradas das fazendas e afloramentos conhecidos) foram tomadas rapidamente após calibragem manual do altímetro.

Tais métodos foram utilizados, com algumas pequenas modificações no presente estudo, em outros estudos tafonômicos, como os de Roberts & Hendrix (2000) e Froggatt *et al.* (1981).

Para os caules fósseis de pteridófitas arborescentes (exemplares dos gêneros *Psaronius* e *Tietaea*) foram medidos adicionalmente a espessura do estelo e de seu manto radicular, quando as condições de preservação assim permitiam (figura 2.3.3).

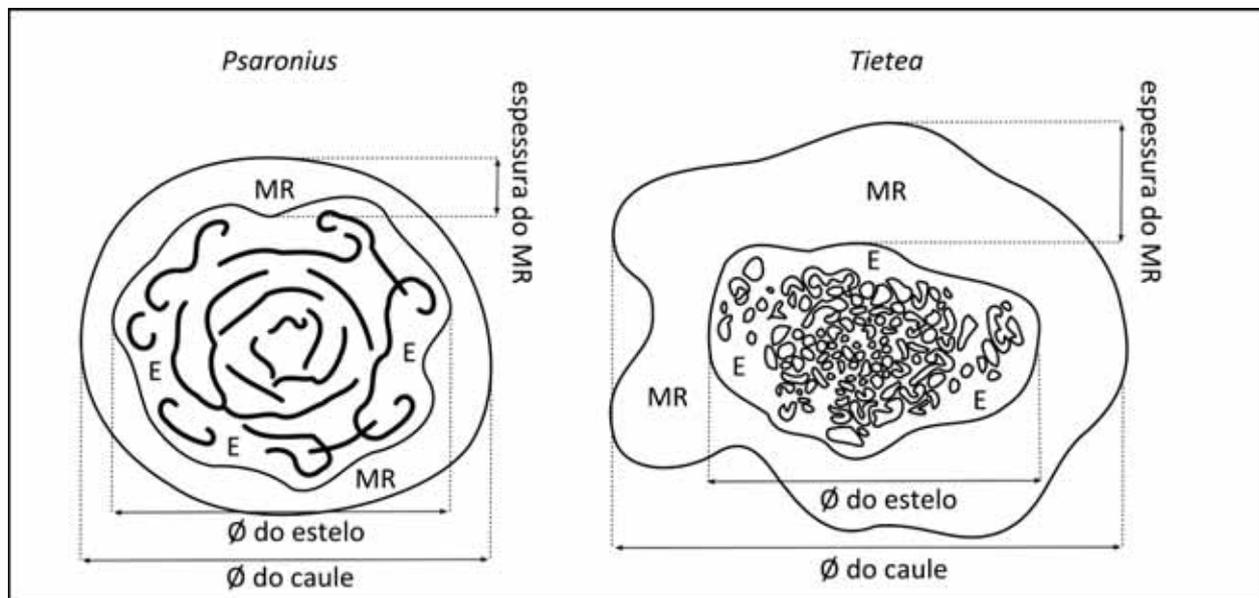


Figura 2.3.3. Desenho esquemático de corte transversal dos caules das pteridófitas arborescentes dos gêneros *Psaronius* e *Tietaea*, contendo estelo (E) e manto radicular (MR)

Evitou-se medir caules de esfenófitas e licófitas em razão do tamanho pequeno dos fragmentos encontrados, usualmente menores que 30 cm. Sua orientação pode ter pouca relação com o sentido das paleocorrentes, pois estes vegetais eram pequenos, leves e com baixa densidade.

Uma síntese dos métodos de campo utilizados nesta tese, incluindo a medida do comprimento e orientação dos caules, a espessura do manto radicular e do estelo dos fósseis de pteridófitas e da construção dos mosaicos fotográficos é mostrada na figura 2.3.4.

Dessa forma, somente os caules de pteridófitas e gimnospermas, encontrados mais completos, foram utilizados nos estudos tafonômicos. Análises estatísticas simples, como comparação de médias e análise de variância para os dados de medição dos caules foram feitas com o auxílio do *software* livre *R*. Para a construção dos diagramas em roseta, para investigar o padrão de orientação dos caules, foi utilizado o *software* *Rockworks*. Para construir diagramas preliminares e lidar com a base de dados espaciais dos caules mapeados foi utilizado o Sistema

de Informações Geográficas (SIG) *Spring*, distribuído pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).



Figura 2.3.4. Fotografias dos métodos empregados em campo: A) Medição do comprimento total dos caules; B) Diâmetro dos caules; C) Espessura do manto radicular de raízes adventícias; D) Medida de orientação azimutal dos caules, no sentido base-ápice

### 2.3.1 Mosaicos Fotográficos

Em virtude da quantidade de fósseis, muitas vezes concentrados em pequenas áreas dentro das fazendas, surgiu a intenção de documentar estes afloramentos. Obter uma visão clara da disposição dos fósseis nos locais de maior concentração, tal qual uma “foto aérea”, propiciaria uma análise tafonômica inédita nos estudos de paleobotânica e tafonomia no Brasil. Poucos locais poderiam receber uma análise como essa, senão o MNAFTO.

Dessa forma, os dois sítios fossilíferos de maior abundância de fósseis foram selecionados para a execução do que chamaremos a partir de agora de mosaicos fotográficos. Para a escolha do local exato de cada mosaico foram levadas em conta as seguintes características: número de caules disponíveis, comprimento dos exemplares com reduzido nível de intemperismo, e níveis de orientação evidentes. Os dois locais escolhidos localizam-se nas fazendas Andradina e Buritirana, reconhecidamente os locais de maior exuberância dos fósseis no MNAFTO.

Cada mosaico fotográfico consiste em um *grid* de fotografias dos fósseis, tomadas uma a uma, em posição ortogonal ao substrato, e reunidas em computador.

Para o posicionamento correto da câmera fotográfica (modelo Nikon D80) os terrenos foram subdivididos a cada 1 m, por meio de pregos galvanizados e linhas de *nylon*, em procedimento análogo à montagem de parcelas permanentes em estudos sobre Ecologia Florestal atual (como os descritos por Mueller-Dunbois & Ellenberg 1974, e utilizados por Capretz 2004). A cada 1 m<sup>2</sup> foi tomada uma fotografia em posição ortogonal, com distância focal de 18 mm e abertura das lentes constantes 1/800 s, cobrindo toda a quadrícula. Evitaram-se áreas onde não houvesse exemplares dos fósseis (como clarões, rochas ou árvores atuais). A cada fotografia, um número de controle da máquina fotográfica foi anotado. Estes números funcionaram como guias para a reunião das fotografias no computador. A tomada das fotos em cada sítio fossilífero consumiu aproximadamente 4 horas em campo.

O resultado final é um quadro onde é possível visualizar todos os caules, reproduzidos com fidelidade nas fotografias em visão de cima para baixo, tal qual uma fotografia aérea em escala bem menor. O tamanho e a disposição dos caules evidenciam, neste mosaico, a gama de variações investigada nas análises tafonômicas de cada local.

A representação dos dois *grids* fotografados, nas duas áreas de estudo escolhidas para este item, é apresentada na figura 2.3.1.1.

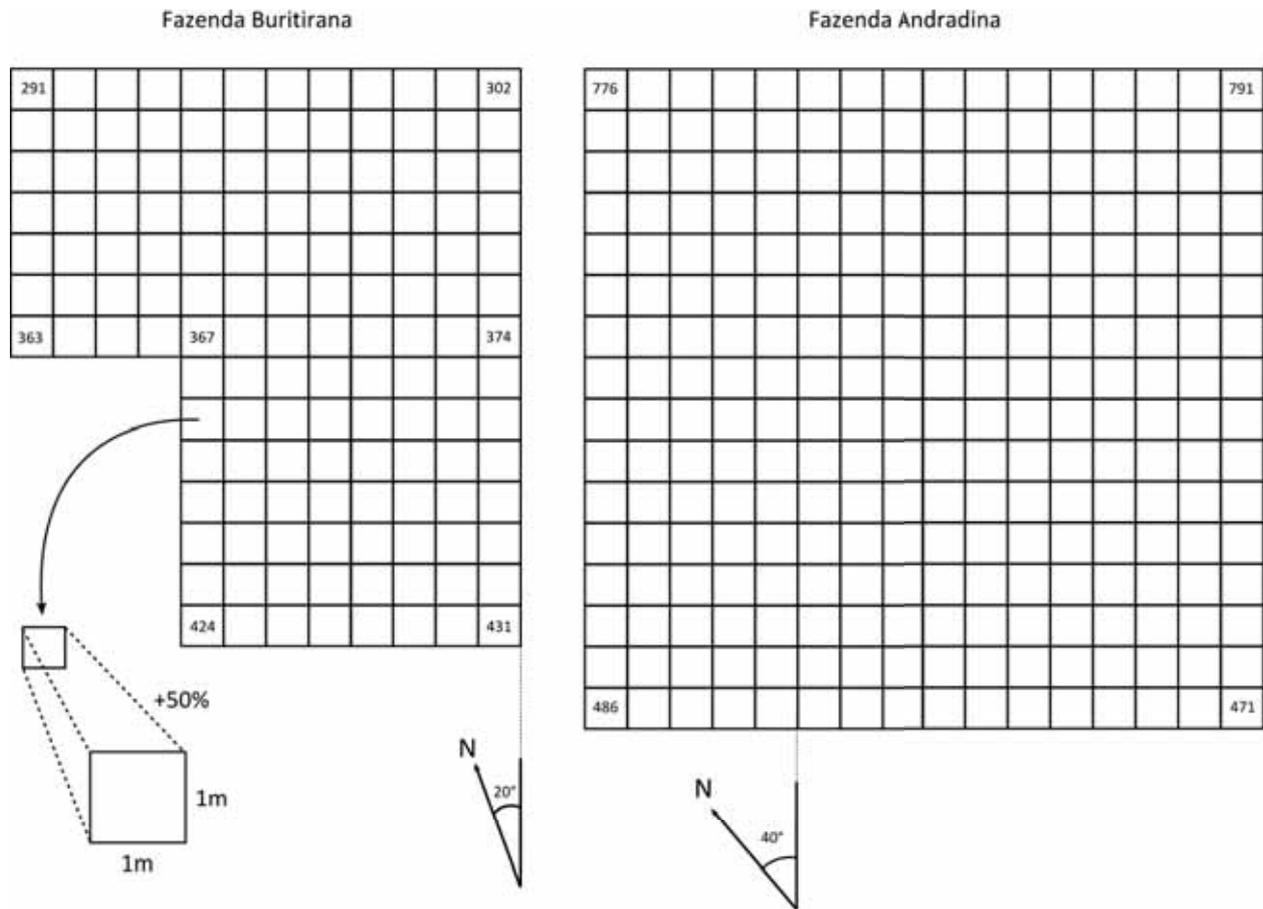


Figura 2.3.1.1. Representação esquemática dos dois mosaicos fotográficos elaborados nas fazendas Buritirana e Andradina. Cada quadrícula representa uma fotografia de 1 m<sup>2</sup>; os números mostrados dentro das quadrículas representam o código das fotos, utilizados como guia para a montagem do mosaico

As imagens finais foram trabalhadas para atenuar diferenças de brilho e contraste, decorrentes do período em que se desenvolveu a tomada das fotos e à luminosidade (conforme a passagem das nuvens e o intervalo de tempo decorrido). O trabalho computacional das imagens foi feito por meio do *software* livre (*GNU public license*) de desenho vetorial *Inkscape*.

## 2.4 Inventário florestal para comparação entre pteridófitas permianas e atuais

Com o objetivo de fornecer parâmetros para análise da estrutura da vegetação durante o Permiano Inferior, com base nas medições de tamanho realizadas nos fitofósseis do MNAFTO e descritas acima, uma etapa complementar de campo foi realizada em remanescentes de Mata Atlântica do litoral do Paraná. O objetivo foi encontrar e medir pteridófitas arborescentes comuns em florestas do presente, a fim de compará-las com as pteridófitas fósseis.

Os dados utilizados aqui são parte de um grande inventário florestal realizado desde 2008 na Reserva Natural do Rio Cachoeira, em 12 ha de florestas preservadas. O inventário foi feito por meio de doze parcelas permanentes de 1 ha cada. Cada árvore encontrada recebeu uma etiqueta de alumínio de identificação, teve sua circunferência na altura do peito (equivalente à altura de 1,3 m a partir do solo) medida, sua altura estimada, sua localização geográfica anotada, além de sua identificação botânica.

No presente estudo foram utilizados dados relativos a cinco espécies de pteridófitas arborescentes da família Cyatheaceae (Dittrich *et al.* 2005), a saber: *Alsophila setosa* Kaulf., *Alsophila sternbergii* (Sternb.) D.S. Conant, *Cyathea corcovadensis* (Raddi) Domin, *Cyathea leucofolis* Domin e *Cyathea phalerata* Mart.

Análises de regressão linear e não-linear foram realizadas com o auxílio do *software* livre *R*, e seus pacotes estatísticos apropriados.

### 3. Revisão da Literatura

#### 3.1 Geologia do Monumento Natural das Árvores Fossilizadas do Tocantins (MNAFTO)

Historicamente (Azcu *et al.* 2006) os fósseis vegetais encontrados na região de Araguaína, na região sudoeste da Bacia Sedimentar do Parnaíba, são atribuídos à Formação Pedra de Fogo (datado tradicionalmente como Permiano Superior), pertencente ao Grupo Balsas (figura 3.1.1). Entretanto, novos argumentos sugerem que os vegetais petrificados da região fazem parte da Formação Motuca. Esta unidade, usualmente atribuída ao Permiano Superior ao Triássico, possivelmente faça parte do Permiano Inferior.



Figura 3.1.1. Principais bacias sedimentares brasileiras (adaptado de Azcu *et al.* 2006)

Esta tese concorda com Faria Jr. (1979), Pinto & Sad (1986) e Dias-Brito *et al.* (2007), que levantaram esta questão com propriedade. O principal argumento utilizado é de que a parte superior da Formação Pedra de Fogo apresentaria rochas carbonáticas associadas a folhelhos, folhelhos calcíferos, arenitos, leitos de marga e sílex, organizados em estratos relativamente tabulares e aparentemente cíclicos. Os fósseis da Floresta Petrificada do Tocantins Setentrional estão preservados em depósitos areníticos avermelhados finos a médios (Dias-Brito *et al.* 2007), com estratificação cruzada de porte médio, sem rochas carbonáticas, como já havia sugerido Faria Jr. (1979). Estes arenitos formavam, até Pinto & Sad (1986), a parte superior da Formação Pedra de Fogo, e foram incorporados à base da Formação Motuca pelos referidos autores.

As fácies areníticas compõem um paleoambiente mais coerente com a presença dos fósseis vegetais e de seu ambiente, como bem apontaram Dias-Brito *et al.* (2007). Ainda assim, a Formação Motuca pode ser contextualizada de modo mais abrangente ao incluir a caracterização das unidades adjacentes, todas pertencentes ao Grupo Balsas (figura 3.1.2).

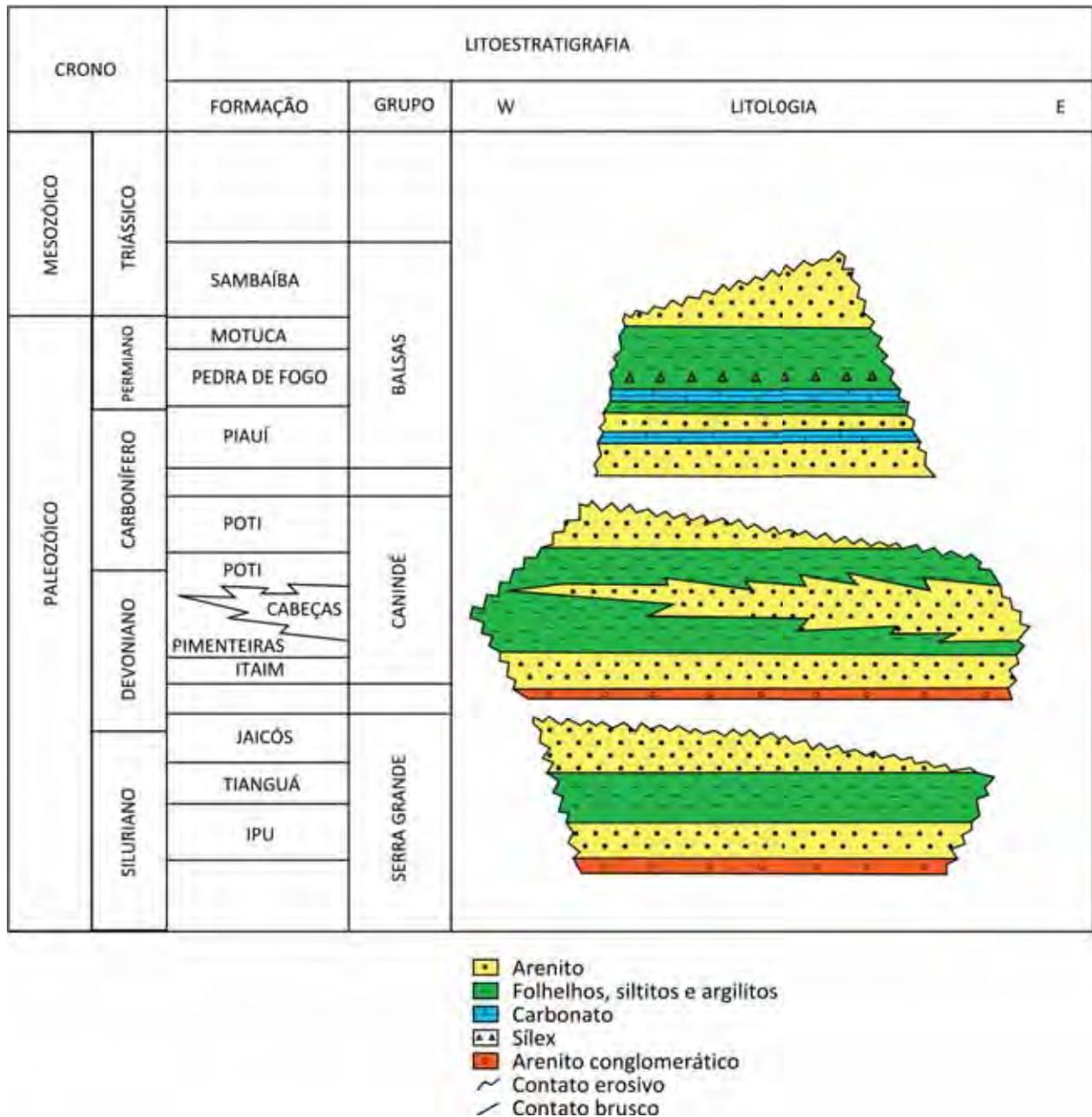


Figura 3.1.2. Coluna estratigráfica da Bacia do Parnaíba (adaptada de Góes & Feijó 1994)

Os sedimentos da Formação Pedra de Fogo são descritos na literatura como siltitos, folhelhos, arenitos e calcários, com espessura máxima de 189 m (Petri & Fúlfaro 1983). Apresentam sucessões cíclicas constituídas, da base para o topo, por arenitos, siltitos, calcarenitos oolíticos ou concrecionários, e folhelhos esverdeados com lentes de carbonato. Há também dolomitos vermelhos e anidrita (Petri & Fúlfaro 1983). Alguns depósitos de gipsita em Filadélfia foram atribuídos a esta unidade (Gebrim 1974).

A interpretação do paleoambiente da Formação Pedra de Fogo difere segundo os trabalhos consultados.

Petri & Fúlfaro (1983) sugerem que a maior parte da unidade corresponde a condições marinhas a costeiras, com exposições subaéreas, com regiões mais continentais na porção leste e sudeste da bacia (onde, teoricamente, teriam sido encontrados os fósseis deste estudo).

Dino *et al.* (2002) identificaram acritarcas (indicadores de condições marinhas) e algas do gênero *Botryococcus* (indicadores de água doce) na parte superior da Formação Pedra de Fogo. Sugerem estes autores que o paleoambiente poderia ser caracterizado como marinho costeiro sob condições de clima quente, variando de árido a semi-árido. Estromatólitos descritos por Faria Jr. & Truckenbrodt (1980) reforçariam este caráter.

Os fósseis descritos historicamente para a Formação Pedra de Fogo, além dos caules de pteridófitas e gimnospermas, são peixes e anfíbios. Segundo Cox & Hutchinson (1981) há peixes paleonisciformes, ctenacantiformes, xenacantiformes, holocéfalos e dipnóicos. Embora os vertebrados sejam usados para atribuir idade eopermiana à unidade (Petri & Fúlfaro 1983), há sugestões de idade neopermiana, segundo análise do crânio do anfíbio *Prionosuchus plummeri* Price de Cox & Hutchinson (1981).

Análises palinológicas realizadas por Dino *et al.* (2002) na parte superior da Formação Pedra de Fogo, no Membro Trisidela, sustentariam a idade neopermiana. Amostras de poços do sul e sudeste da Bacia do Parnaíba permitiriam realizar correlações palinológicas com o topo da Formação Andirá (Bacia do Amazonas), da Zona P-III do Gabão, e da Formação Flowerpot, em Oklahoma (EUA). Entretanto, a correlação com a Formação Powerplot poderia indicar também idade eopermiana. A análise palinológica dos referidos autores apontou grande frequência de esporos de pteridófitas. Sugerem assim tratar-se de uma flora de baixa diversidade e alta dominância.

A Formação Motuca, com espessura de aproximadamente 300 m, é constituída de arenitos em sua base, passando ascendentemente para pelitos vermelho-tijolo, lentes calcárias e anidrita, sobrepostos novamente por arenitos (Petri & Fúlfaro 1983, Góes & Feijó 1994). Os fósseis mais comuns, descritos na literatura, eram de restos de peixes e gastrópodos (Petri & Fúlfaro 1983). Segundo Góes & Feijó (1994), a Formação Motuca posicionava-se no Permiano

Superior. Conforme comentado adiante, considerando que os vegetais petrificados também fazem parte da Formação Motuca, a interpretação cronoestratigráfica deve mudar, podendo ser posicionada no Permiano Inferior.

Faria Jr. (1984) atribuiu a Formação Motuca, especialmente no trecho do MNAFTO, entre Araguaína e Filadélfia, a um ambiente do tipo *sabkha* continental. Góes & Feijó (1994) sugeriram um ambiente flúvio-deltaico, controlado por sistemas lacustres e eventuais influências marinhas. Lima Filho (1998) considerou a Formação Motuca muito similar à Formação Pedra de Fogo, com concentrações de evaporitos na base, mas diferindo pela presença de corpos arenosos de grande espessura na Formação Motuca.

A Formação Sambaíba localiza-se no topo do Grupo Balsas, sobrepondo a Formação Motuca no Norte do Tocantins. Com espessura superior a 400 m, a Formação Sambaíba é caracterizada por arenitos róseos avermelhados, com abundantes estratificações cruzadas e raras intercalações de sílex laminado (Petri & Fúlfaro 1983). Aparentemente é afossilífera. Em algumas áreas é coberta por basaltos triássicos. Petri & Fúlfaro (1983) argumentam não haver razões para posicionar a Formação Sambaíba no Triássico. Góes & Feijó (1994), entretanto, admitem esta possibilidade.

Faria Jr. (1984) considerou os arenitos com mega-estratificações cruzadas da Formação Sambaíba como característicos de depósitos eólicos, formando provavelmente campos de dunas, distribuídos em extensa planície continental. Góes & Feijó (1994) admitem ainda certa influência fluvial em cenário desértico.

A presente pesquisa, por fim, assume a posição tomada por Pinto & Sad (1986) e Dias-Brito *et al.* (2007), atribuindo os fitofósseis da Floresta Petrificada do Tocantins Setentrional à porção basal da Formação Motuca, com idade eopermiana. Perfis colunares da região do MNAFTO são descritos em Dias-Brito *et al.* (2007). Um mapa geológico da região, adaptado de Pinto & Sad (1986) e Dias-Brito *et al.* (2007) é mostrado na figura 3.1.3.

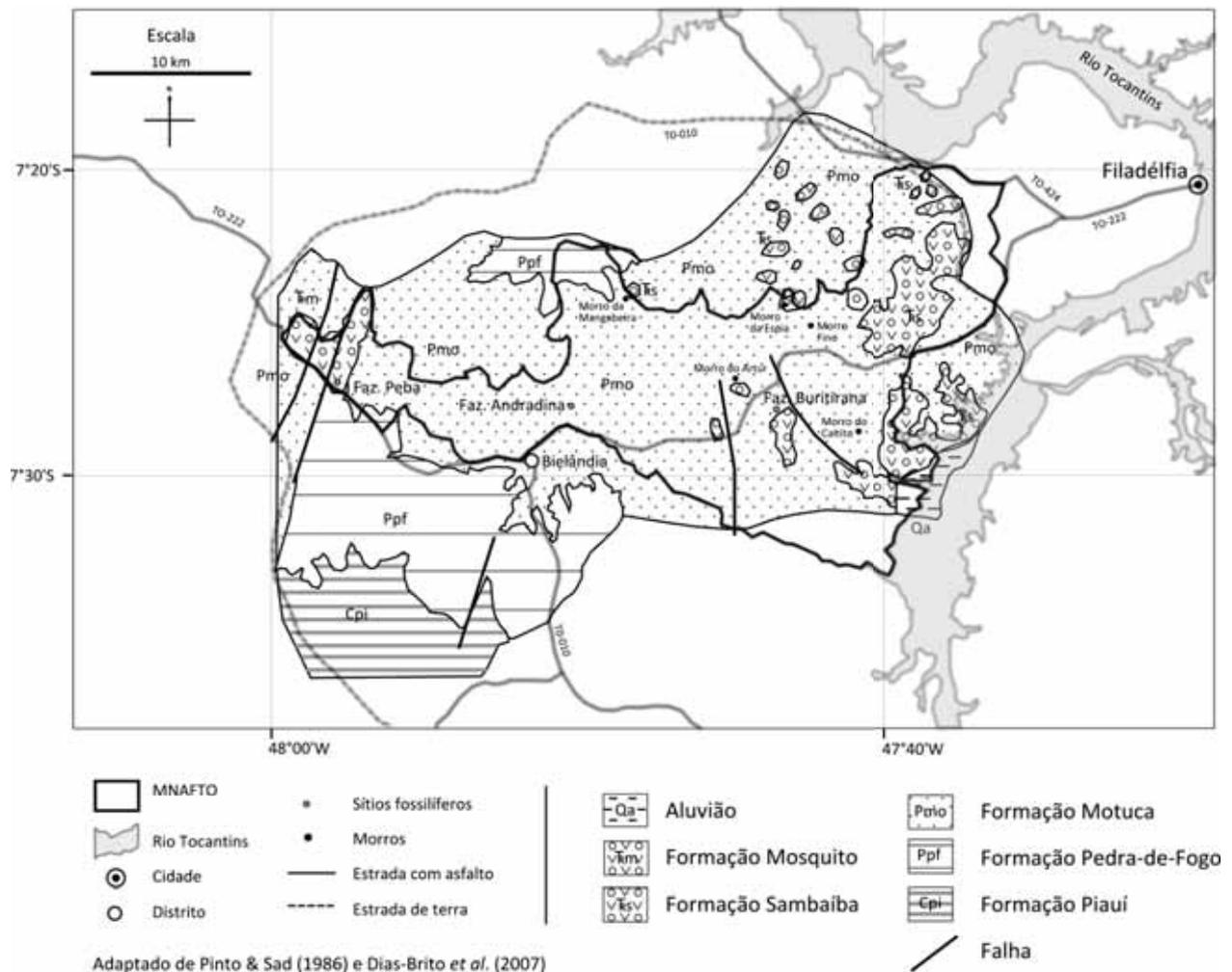


Figura 3.1.3. Mapa geológico do Monumento Natural das Árvores Fossilizadas do Tocantins, Bacia do Parnaíba (adaptado de Pinto & Sad 1986 e Dias-Brito *et al.* 2007).

### 3.2 Fósseis vegetais do Permiano da Bacia do Parnaíba

A primeira descrição formal deve-se a Brongniart (1872), ao introduzir a espécie *Psaronius brasiliensis* Brongniart, 1872. Trata-se da primeira espécie fóssil formalmente descrita no Brasil. Apesar da descoberta tão longínqua, poucos estudos foram desenvolvidos ao longo de todo o século XX.

Dolianiti (1972) foi um dos primeiros autores a enfatizar a importância dos fósseis vegetais da Bacia do Parnaíba. Segundo aquele autor, a região apresentaria floras “... *perfeitamente compatíveis com as bem conhecidas da Europa e América do Norte*”. Esta flora ocuparia uma região periférica em relação à Flora Euroamericana do Permiano, de clima marcadamente tropical. O ciclo sedimentar composto pelos registros das formações Poti, Piauí e Pedra de Fogo apresentaria registros da Flora *Adiantites*, típica do Carbonífero Inferior, com registros subseqüentes de *Calamites* e *Pecopteris* (durante o Carbonífero Superior) até alcançar a flora composta pelas pteridófitas arborescentes *Psaronius*, *Pecopteris* e pelas gimnospermas do Permiano Inferior. Nenhuma influência da Flora *Glossopteris*, no Permiano da Bacia do Paraná, é citada por aquele autor.

No início do século XXI novos estudos voltaram a abordar a Floresta Petrificada do Tocantins Setentrional com maior atenção. A equipe de paleontólogos do Museu de História Natural de Chemnitz (Alemanha), comandados pelo Dr. Ronny Rößler, publicou diversos artigos descrevendo espécies da região, com destaque para Rößler & Noll (2002), Rößler & Galtier (2002a, 2002b, 2003) e Rößler (2006).

Os registros dos táxons já descritos para a região são apresentados na Tabela 3.2.1. Tais informações foram obtidas pelo grupo de estudos em Paleobotânica do IGCE/UNESP, através de levantamento na literatura científica dos estudos realizados até o momento na Bacia do Parnaíba.

Tabela 3.2.1. Fósseis vegetais do Permiano da Bacia do Parnaíba

Fóssil	Órgão encontrado	Afinidade botânica	Hábito de vida	Local de registro	Autores	Outros registros
<i>Psaronius brasiliensis</i>	Caule	<b>Samambaia</b> , Ordem Marattiales	Arborescente	Entre Oieras e São Gonçalo do Amarante (TO)	Brongniart (1872)	Bacia do Paraná (Brasil)
<i>Psaronius arrojadoi</i>				Entre Araguaína e Filadélfia (TO)	Röbller & Noll (2002)	Alemanha, França, EUA, China
<i>Psaronius sinuosus</i>				Chapada do Jaboti (MA)	Pelourde (1914)	
<i>Psaronius</i> sp.					Herbst (1985)	
<i>Tietea singularis</i>	Caule	<b>Samambaia</b> , Ordem Marattiales	Arborescente	Araguaína (TO)	Herbst (1999)	
<i>Tietea derbyi</i>				Araguaína (TO)	Herbst (1999)	
<i>Scolecopteris</i>	Folha fértil	<b>Samambaia</b> , Ordem Marattiales	Provavelmente arborescente	Araguaína (TO)	Herbst (1986)	Bacia do Paraná (Brasil)
<i>Grammatopteris freitasii</i>	Caule	<b>Samambaia</b> , Ordem Marattiales	Arborescente	Carolina (MA)	Herbst (1992)	
<i>Dernbachia brasiliensis</i>	Caule	<b>Samambaia</b> , Ordem Filicales?	Arborescente pequena	Araguaína (TO)	Röbller & Noll (2002)	Alemanha, EUA, China
<i>Botryopteris nollii</i>	Caule	<b>Samambaia</b> , Ordem Filicales	Epífita	Entre Araguaína e Filadélfia (TO)	Röbller & Galtier (2003)	Alemanha, França, Bélgica, EUA, China
<i>Araguainorachis simplissima</i>	Ráquis ou pecíolo	Samambaia? Gimnosperma? Pteridosperma?	?	Rodovia Carolina-Riachão, Trevo para Araguaína	Mussa & Coimbra (1987)	
<i>Arthropitys cacundensis</i>	Caule	<b>Esfenófita</b> , Família Calamitaceae	Arborescente	Entre Araguaína (TO) e Carolina (MA), a Oeste de Bielândia	Coimbra & Mussa (1984)	Províncias Euroamericana e Angárica
<i>Arthropitys</i> sp.	Caule			Entre Araguaína e Filadélfia (TO)	Röbller & Noll (2002)	
<i>Sphenophyllum</i> sp.	Caule e ramo com folhas	<b>Esfenófita</b> , Ordem Sphenophyllales	Herbáceo	Entre Araguaína e Filadélfia (TO)	Röbller & Noll (2002)	Cosmopolita
<i>Dadoxylon</i> sp.	Caule	<b>Gimnosperma</b> , Ordem Cordaitales?	Arborescente	Entre Araguaína e Filadélfia (TO)	Röbller & Noll (2002)	Cosmopolita

(cont.) Tabela 3.2.1. Fósseis vegetais do Permiano da Bacia do Parnaíba

Fóssil	Órgão encontrado	Afinidade botânica	Hábito de vida	Local de registro	de Autores	Outros registros
<i>Amyelon bieloi</i>	Raiz	<b>Gimnosperma</b> , Ordem Cordaitales	Arbustivo ou arborescente	Entre Araguaína (TO) e Carolina (MA), a Oeste de Bielândia	Coimbra & Mussa (1984)	França, Inglaterra, EUA, China
<i>Carolinapitys maranhensis</i>	Caule	<b>Gimnosperma</b> , Ordem Cordaitales?	Arbustivo ou arborescente	Rodovia Carolina-Riachão, Trevo para Araguaína	Mussa & Coimbra (1987)	
<i>Cyclomedulloxylon parnaibense</i>	Caule	<b>Gimnosperma</b> , Ordem Pteridospermales?	Arbustivo ou arborescente	Rodovia Carolina-Riachão, Trevo para Araguaína	Mussa & Coimbra (1987)	
<i>Cycadoxylon brasiliense</i>	Caule	<b>Gimnosperma</b> , Ordem Pteridospermales (Cycadoxylaceae)	Arbustivo ou arborescente	Rodovia Carolina-Riachão, Trevo para Araguaína	Mussa & Coimbra (1987)	Cosmopolita
<i>Teresinoxylon euzebioi</i>	Raiz	<b>Gimnosperma</b> , Ordem Pteridospermales (Cycadoxylaceae)	Arbustivo ou arborescente	Teresina (PI)	Caldas <i>et al.</i> (1989)	

### 3.3 Florestas Petrificadas

A Floresta Petrificada do Tocantins Setentrional abriga uma singular assembléia fossilífera permiana, com espécies comuns a diferentes províncias paleofitogeográficas, como a Flora Euroamericana e Gondvânica (Rößler & Galtier 2002, 2003, Rößler & Noll 2002, Rößler 2006), em especial a Flora *Glossopteris*, na Bacia do Paraná (Rohn & Rösler 1986, Rohn & Rösler 2000, Tavares *et al.* 2006).

Além das espécies em comum, outra característica chama a atenção nos registros comparados: o elevado grau de preservação dos tecidos. Isto se deve ao processo de eodiagênese dos fósseis, por meio de processo de permineralização por sílica.

A denominação de “florestas petrificadas” é amplamente utilizada no meio científico. Inúmeros artigos consultados utilizam a expressão, embora raros sejam os casos em que os

processos diagenéticos e tafonômicos sejam elucidados. Citações de florestas petrificadas são comuns desde meados do Século XIX. Um dos primeiros artigos científicos sobre “madeiras petrificadas” é o de Crossman (1831), no Arizona.

A tradução literal para o termo *petrification* seria “(...) espécime submetido à progressiva ação de litificação” (Mussa 2004). Desse modo, a “petrificação” *sensu stricto* seria a total substituição da matéria orgânica por moléculas minerais (Buurman 1972).

Segundo Carson (1991) a silicificação é um processo que se dá por meio do aumento da concentração de sílica com o tempo, após o sepultamento dos vegetais. Esse processo seria concomitante à perda progressiva de água. Em casos mais avançados, a sílica pode preservar microestruturas celulares. Segundo este autor, a silicificação não é uma substituição, mas uma permineralização de fato, onde a estrutura orgânica age como uma “fôrma” para a deposição da sílica.

Rößler (2006) descreve o processo de silicificação dos fósseis encontrados em Chemnitz (Alemanha) como a ação de fluídos ricos em sílica, originários dos sedimentos vulcânicos, que preencheram células de fragmentos de caules e troncos, com a conseqüente geração de formas de polimorfos de quartzo densos (“*dense quartz polymorphs*”), preservando sua estrutura anatômica.

É impossível afirmar, com base na revisão da literatura científica a seguir, em quais estudos de fato houve permineralização por sílica, exceto nas raras ocasiões onde seu processo diagenético é descrito textualmente. Na maioria dos casos os autores não abordam esta questão. A expressão “floresta petrificada” *sensu lato* é utilizada para denominar a assembléia fossilífera quando seus fitofósseis são preservados tridimensionalmente.

Por meio dos artigos consultados, elaborou-se um mapa (figura 3.3.1) contendo a localização das florestas petrificadas descritas e assim citadas nos principais periódicos em paleobotânica recentes. Os registros são separados segundo o período geológico de ocorrência.

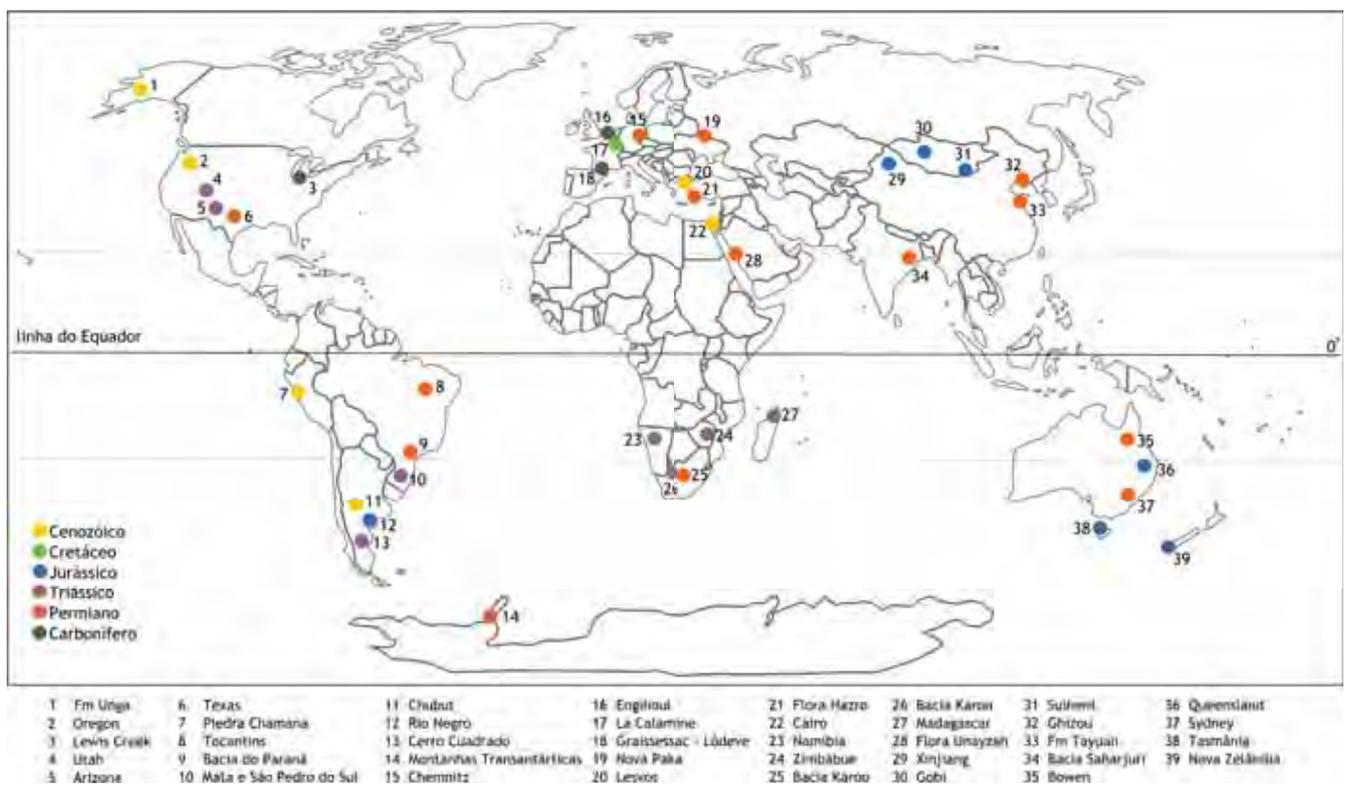


Figura 3.3.1. Registros de “florestas petrificadas” ao redor do planeta, segundo seu período geológico correspondente

## Devoniano

A mais antiga “flora petrificada” descrita na literatura é a conhecida Flora de Rhynie, no Devoniano da Escócia (Dernbach 1996, Dernbach & Tidwell 2002). Haas (1994) também relata fungos permineralizados na região, em artigo que aborda relações de micoparasitismo.

## Carbonífero

Três registros de fitofósseis permineralizados do Carbonífero merecem destaque na província Euroamericana: na Bélgica (Gerrienne *et al.* 1999), nos Estados Unidos (Brack 1970) e na França (Martín-Closas & Galtier 2005)

Uma floresta petrificada do Carbonífero (Namurian A na classificação europeia, correspondente ao limite entre Mississipiano e Pensilvaniano na classificação americana) da região de Engihoul (Bélgica) é descrita por Gerrienne *et al.* (1999). Espécimes dos gêneros *Dubiocarpon*, *Lepidophloios*, *Arthropitys* e *Psaronius* estão permineralizados em nódulos dolomíticos. Os autores deste artigo ressaltam que os registros de *Dubiocarpon*, *Arthropitys* e *Psaronius* são os mais antigos já registrados para os três gêneros.

No Carbonífero superior há descrições de cones “petrificados” de licófitas arborescentes da espécie *Ledidostrobus schopfii*, no Kentucky, Estados Unidos (Brack 1970). Não são apresentadas informações detalhadas sobre o processo de fossilização do material estudado.

Martín-Closas & Galtier (2005) descrevem uma assembléia fossilífera do Carbonífero superior da Bacia de Graissessac-Lòdeve, na França. Em ambiente lacustre-fluvial de baixa energia teria existido uma flora dominada pela licófito *Sigillaria brardii*, com *Psaronius*, *Pecopteris*, *Calamites*, *Sphenophyllum* e *Cordaites*. Uma relação ecológica entre pteridófitas, gimnospermas e licófitas é sugerida pelos autores: as pteridófitas ocupavam preferencialmente planícies de inundação e margens dos corpos d’água; sob suas copas as gimnospermas encontravam condições propícias para desenvolver-se; as licófitas ocupavam os pequenos pântanos e brejos.

## Permiano

A Floresta Petrificada do Tocantins Setentrional ocupa posição de destaque entre os registros paleobotânicos do Permiano. A região abriga uma rica assembléia fossilífera dominada por pteridófitas arborescentes (destaques para os gêneros *Psaronius* e *Tietea*, entre outros), além de gimnospermas (especialmente o gênero *Dadoxylon*) e esfenófitas (especialmente o gênero *Arthropitys*). Várias espécies foram registradas também na Província Euroamericana (com destaque para os fitofósseis encontrados em Chemnitz, Alemanha), e em outros registros da Flora Gondvânica (como *Psaronius brasiliensis* e *Tietea singularis*, na Bacia do Paraná).

Ricardi-Torres (1994), em seu estudo sobre fitofósseis do Permiano Inferior da Venezuela, encontrou similaridade florística com uma assembléia do Texas, Estados Unidos. A autora encontrou gêneros incomuns à Flora Gondvânica na Venezuela, e por isso propôs uma província de transição denominada de Gondwana Tropical. Outros autores apontaram similaridades entre elementos da flora permiana típica de latitudes maiores e de floras setentrionais (Rösler 1978, Archangelski 1978, Rohn & Rösler 1987)

Alguns autores discutem o conceito de “floras mistas”, muito empregado em estudos de similaridade entre províncias paleofitogeográficas na década de 1980. Lemoigne (1981) e Li (1986) fizeram importante revisão de floras mistas entre as províncias Euroamericana, Angárica, Cataísica e Gondvânica.

Mahershwari & Bajpal (1987) questionaram a utilização do termo. Os referidos autores argumentavam que diferentes biotas ocupavam diferentes zonas climáticas, algumas com diferenças muito grandes de temperatura em latitudes semelhantes (em seu estudo, um dos exemplos é que a atual região Norte da China, próxima ao Tibet, teria clima frio, e posicionaria-se a 20° ao Norte da Linha do Equador, enquanto a Flora Cataísica de modo geral experimentaria clima quente e úmido, no cinturão equatorial). Desse modo, diferenças ambientais com essa magnitude inviabilizariam uma verdadeira flora mista, com condição de estresse ambiental que impediriam diferentes espécies de conviver no mesmo ambiente.

O conceito de floras mistas da década de 1980 não difere de hipóteses lançadas no atual contexto de estudos paleofitogeográficos, sobretudo aquelas que tratam de paleo-ecótonos

(Pigg & McLoughlin 1997, DiMichele *et al.* 2001, Bamford 2004). Regiões que abrigavam exemplares comuns a duas ou mais províncias florísticas indicariam mais do que simples áreas de transição, mas verdadeiros ecótonos. Fatores ambientais estressantes propiciariam às espécies com maior tolerância maiores chances de ocupar seus nichos vagos (Odum 1953).

Exemplares petrificados do Permiano da Antártica, na província Gondvânica, foram descritos em uma série de estudos iniciados por Taylor *et al.* (1992), Pigg & Taylor (1993) e McManus *et al.* (2002). A similaridade das assembléias fossilíferas encontradas nas Montanhas Transantárticas Centrais, próximas ao Glacial Beardmore, com a flora da Bacia do Paraná é evidente quando se observa os gêneros descritos, pertencentes à chamada Flora *Glossopteris*.

Taylor *et al.* (1992) estudaram troncos permineralizados por sílica e impressões de folhas do gênero *Glossopteris*, além de caules e raízes do gênero *Vertebraria*. Posteriormente, quinze caules permineralizados encontrados em posição de vida foram analisados segundo seus anéis de crescimento. Os referidos autores concluíram tratar-se de uma floresta decídua, dominada por vegetais de rápido crescimento, em clima marcadamente sazonal.

Pigg & Taylor (1993) relatam o primeiro registro conhecido de ramos unidos a folhas permineralizados para o gênero *Glossopteris*. O caráter arborescente destes vegetais seria evidente em função da disposição das folhas, de forma helicoidal, e de seu caráter decíduo apontado anteriormente por Taylor *et al.* (1992).

McManus (2002) posicionou esta flora das Montanhas Transantárticas Centrais no Permiano superior. Seu principal argumento foi a ausência de vegetais da chamada Flora *Dicroidium*, típica do Triássico.

Pigg & McLoughlin (1997) argumentam que registros da Flora *Glossopteris* em depósitos do Permiano superior da Bacia de Bowen, Queensland, e na Bacia de Sidney (ambas na Austrália), são similares àqueles do Permiano superior da Antártica, e que dessa forma ambas as assembléias compunham a mesma província fitogeográfica.

Adendorff *et al.* (2003) revisaram o gênero *Liknopenalon*, presente entre o Permiano inferior e o Permiano médio desde a África do Sul até a Austrália. Bamford (2004) estudou os sedimentos do Grupo Ecca, no Permiano médio da África, com grande frequência de exemplares de *Glossopteris*. Além de esfenófitas, licófitas e pteridófitas encontradas, a referida

autora destaca duas madeiras fósseis: a primeira, *Prototaxylon africanum* (Walton) Krüsel & Dolianiti, é considerada uma das poucas glossopterídeas extintas no fim do Permiano; a segunda, *Australoxylon teixeirae* Marguerier, também se faz presente até o fim do período. O gênero *Australoxylon* apresentava na ocasião 21 espécies descritas para o Permiano do Gondwana.

Na Índia, Banerjee (2005) estudou folhas de *Glossopteris* perpendiculares a caules e raízes de *Vertebraria*, ambos encontrados *in situ*, em sedimentos permianos da Bacia Saharjuri. Os exemplares apresentavam-se envoltos em camada arenosa, abaixo de um folhelho carbonoso, fossilizados por carbonificação. A referida autora salienta ser este o registro mais importante de *Glossopteris* em posição ereta até os dias atuais. Relatou também ter encontrado no mesmo local indivíduos jovens e plântulas (*seedlings*) relacionadas a *Glossopteris*, descritos como *Deogharia nautiyalii*, igualmente em posição ereta e com folhas cotiledonares remanescentes.

A Flora *Glossopteris* também tem registros importantes de vegetais petrificados no Brasil. Merece destaque a série de estudos realizados por Diana Mussa sobre os macro-fósseis da Formação Irati (Mussa *et al.* 1978, Mussa 1980, Mussa 1989b), na Bacia do Paraná.

Recentemente, Merlotti (2000) e Rosa Alves & Guerra-Sommer (2000) estudaram lenhos fósseis estratificados da Formação Irati e Serra Alta do Permiano superior do Rio Grande do Sul. Mussa & Garcia (2000) estudaram caules e ramos das formações Rio Bonito e Irati, com a descrição anatômica de pteridospermas. Rohn & Rösler (2000) abordaram a bioestratigrafia do leste da Bacia do Paraná, em especial as formações Teresina e Rio do Rasto.

Embora não haja citação literal como “florestas petrificadas” na Bacia do Paraná, alguns fósseis silicificados foram encontrados de forma esparsa na região (Mussa & Coimbra 1984, Tavares *et al.* 2006, Tavares & Rohn 2009, Faria *et al.* 2009, Faria & Ricardi-Branco no prelo).

Mussa & Coimbra (1987) compararam tafofloras das bacias do Parnaíba e do Paraná, por meio de espécimes dos gêneros *Tietea*, *Cyclomedulloxylon*, *Cycadoxylon* e *Araguainorachis*.

Mussa (1988) fez a revisão dos caracteres diagnósticos do gênero *Dadoxylon*, e em estudo subsequente, comparando com gêneros de pteridospermas dos gêneros *Taxopitys*, *Kaokoxyton*, *Solidoxylon* e *Krauselapitys* (Mussa 1989a).

Na província Euroamericana, merecem destaque os fósseis de Chemnitz, na Alemanha (Rößler & Noll 2002, Rößler & Galtier 2002, 2003, Rößler 2006), e do Texas, Estados Unidos (DiMichele *et al.* 2001).

A Floresta Petrificada de Chemnitz (Rößler 2006), na Bacia de Erzgebirge, Sudeste da Alemanha, apresenta notável similaridade com a Floresta Petrificada do Tocantins Setentrional. Trata-se de uma floresta inteira fossilizada, em posição de vida. A sua origem está relacionada com um massivo evento vulcânico de 278 milhões de anos, no Permiano inferior. Os vegetais foram imediatamente sepultados pela seqüência piroclástica (*Zeisigwald Tuff Horizon*), formando uma camada de aproximadamente 800 metros de depósitos sedimentares e vulcânicos, classificados na Formação Leukersdorf.

A maioria dos fitofósseis de Chemnitz é encontrada *in situ*, em posição de vida. Praticamente toda a comunidade vegetal foi preservada. Entre as pteridófitas, diversas espécies são encontradas, sendo os principais gêneros *Psaronius*, *Scolecopteris* e *Grammatopteris*. Entre as esfenófitas, destaque para o gênero *Calamites*. Diversas espécies de pteridospermas e gimnospermas (incluindo *Dadoxylon*) completam a rica assembléia fossilífera.

Uma floresta petrificada do Permiano inferior foi objeto de estudo de DiMichele *et al.* (2001) no Texas, Estados Unidos. Espécies típicas do período, como *Walchia* sp., foram encontradas ao lado de exemplares de coníferas dos gêneros *Ulmannia* e *Pseudovoltzia*, comuns a floras do Permiano superior da Alemanha e Inglaterra, e do gênero *Podozamites* sp., de floras mesozóicas. Tais observações evidenciariam a transição de florestas sempre-verdes permianas, ricas em pteridófitas, para uma vegetação mais seca de marcante caráter sazonal, rica em gimnospermas, que dominariam paisagens mesozóicas. O paleoambiente é interpretado como um sistema de canais influenciados por marés. Os vegetais fósseis encontrados no Texas foram associados com fósseis de peixes, répteis e anfíbios em depósitos fluviais e costeiros das formações San Angelo e Blaine. A presença de invertebrados marinhos propiciou correlações bioestratigráficas mais precisas, posicionando os depósitos no Artinskiano (Cisuraliano, Permiano inferior).

Estudos complementares sobre as florestas petrificadas do Permiano do Texas foram feitos com propriedade por DiMichele *et al.* (2001), abordando similaridades entre vegetais da assembléia fossilífera datada do Permiano Inferior com floras do Permiano Superior e do

Mesozóico. Parte de suas discussões se concentra nos acontecimentos do limite Permiano-Triássico, ocasião da maior extinção em massa da história do planeta.

Alguns dos fitofósseis encontrados na Floresta Petrificada do Tocantins Setentrional também foram registrados em outras províncias paleofitogeográficas que não a Euroamericana e a Gondvânica.

Folhas e caules silicificados dos gêneros *Dadoxylon* e *Pecopteris*, além de exemplares de *Cordaites*, *Neuropteridium*, *Fascipteris* e *Marattiopsis*, foram encontrados na região central da Arábia Saudita, em sedimentos datados do Permiano superior da chamada Flora Unayzah (Lemoigne 1981). Similaridade florística entre essa assembléia com outra encontrada na Turquia, denominada de Flora Hazro, é apontada pelo autor.

Hill *et al.* (1985) descreveram exemplares de *Oasimia*, um novo gênero de pteridófita da Ordem Marattiales na Flora Unayzah. Pteridófitas semelhantes teriam sido encontradas no Permiano da China, no extremo Leste da Rússia e no Sudeste asiático.

No Norte da China, Hilton *et al.* (2001) relatam ter encontrado frondes permineralizadas em estágio reprodutivo de pteridófitas do gênero *Pecopteris*, *Psaronius*, *Botryopteris* e *Dadoxylon*. Todos os gêneros são encontrados também na assembléia fossilífera permiana do Tocantins. A fossilização dos vegetais descritos na China foi relacionada com eventos vulcânicos em ambiente deltaico.

Li *et al.* (1994) estudaram folhas permineralizadas de *Gigantonoclea guizhouensis* na Província de Guizhou, no Sudoeste da China. Os sedimentos pertencem à Formação Wangjiazhai, rica em megafósseis do Permiano superior.

## Triássico

O Parque Nacional da Floresta Petrificada do Arizona, Estados Unidos, é conhecido pela exuberância de seus fitofósseis. Os principais espécimes são encontrados em sedimentos não-marinhos do Triássico superior, na Formação Chinle (Heckert & Lucas 1998, Dubiel *et al.* 1999). Trata-se de arenitos com estratificação cruzada e conglomerados, pertencentes ao Membro

Sonsela, e em menor grau ao chamado "*Black Forest Bed*". A maioria dos fitofósseis encontrados se refere ao gênero *Araucarioxylon*. De acordo com estes autores, o ambiente poderia ser descrito como um sistema fluvial de baixa sinuosidade. Therrien & Fastovsky (2000) atribuem aos sedimentos da Formação Chinle clima semi-árido, com chuvas sazonais. Dubiel *et al.* (1991) descreve o padrão climático como típico de monções.

Ash (1999) estudou espécimes de *Sphenopteris arizonica* na floresta petrificada do Arizona. O autor relata ser este um dos poucos *taxa* sobreviventes desde o Paleozóico. Em artigo posterior, Ash (2001) destaca que 1/5 dos vegetais descritos na Formação Chinle consiste em pteridófitas ou grupos afins. Este fato teria como causa o clima regional, descrito pelo referido autor como subtropical úmido com regime de chuvas de monções, de modo a concordar com Dubiel *et al.* (1991).

A Floresta Petrificada de Snyder Quarry, no Triássico superior do Novo México (Estados Unidos) foi objeto de estudo de Tanner *et al.* (2003), que interpretaram o paleoambiente como uma ampla planície de inundação de baixo gradiente altitudinal.

Importantes registros de fitofósseis do Triássico brasileiro foram feitos por Minello (1994a, 1994b, 1994c) e Guerra-Sommer & Scherer (2000). A região de São Pedro do Sul e Mata, no Rio Grande do Sul, apresenta o maior registro de fósseis vegetais da região Sul do Brasil.

Minello (1994a) aponta que a região sofre com comerciantes ilegais de fósseis há tempos. O alto nível de preservação celular dos espécimes levou Minello (1994b) a estudar sua diagênese por sílica. Com base na identificação dos espécimes dos gêneros *Coniferophyta*, *Araucarioxylon* e *Rhexoxylon*, Minello (1994c) sugeriu clima árido, e atribuiu hábitos mesomórfico a xeromórfico aos vegetais.

Troncos silicificados do arenito Mata foram estudados por Guerra-Sommer & Scherer (2000). Os sedimentos pertencem às formações Santa Maria e Caturrita, no Triássico médio e superior, e são interpretados como um antigo sistema fluvial entrelaçado. Os autores discutem que os fósseis petrificados pertencem à Flora *Dicroidium*, especialmente em áreas mais proximais. Em áreas mais distais os vegetais apresentam afinidade maior à Flora *Rhex*.

Bamford (2004) revisou diversas floras petrificadas na Bacia de Karoo, na África do Sul. Encontrou registros que vão desde o Carbonífero até o Cretáceo inferior. A principal ocorrência de fitofósseis encontra-se em sedimentos da Formação Molteno, no Triássico superior, e Formação Kirkwood, no Cretáceo inferior.

## Jurássico

Keller & Hendrix (1997) estudaram troncos silicificados do Jurássico superior do Deserto de Gobi, na Mongólia. Os vegetais foram sepultados durante um evento vulcânico. Os referidos autores encontraram 72 troncos em posição de vida e 49 troncos caídos no local. A análise de anéis de crescimento permitiu concluir que o regime de chuvas era sazonal, e que a água era um importante fator limitante para os vegetais.

Troncos petrificados do Jurássico superior de Xinjiang, na Bacia de Junggar, no Noroeste da China, foram estudados por McKnight *et al.* (1990). Descobertos em 1965, os fósseis aparecem em dois horizontes, um com troncos derrubados, e outro com troncos em posição de vida, ambos na Formação Shishu.

No Jurássico da América do Sul merecem destaques os estudos da Floresta Petrificada de Cerro Cuadrado, na Patagônia (Argentina). Stockey (1977) deu atenção aos caules silicificados de *Pararaucaria patagônica*, inicialmente descritos em 1924. A silicificação se deu em depósitos de cinzas vulcânicas. As ótimas condições de preservação propiciaram o estudo de mecanismos de dispersão de propágulos e fechamento dos cones após a polinização. Hernandez-Castillo & Stockey (2002) estudaram cones, plântulas e madeira fóssil de *Araucaria mirabilis* encontradas em Cerro Cuadrado.

## Cretáceo

Duas outras ocorrências de florestas petrificadas na Argentina merecem destaque: fósseis do Cretáceo da Província de Rio Negro, estudados por Artabe *et al.* (2004), e do Paleoceno inferior da Província de Chubut, estudados por Brea *et al.* (2005).

Caules bem preservados de Cycadales foram encontrados em sedimentos do Cretáceo da Província de Rio Negro. Artabe *et al.* (2004) descreveram espécimes silicificados dos gêneros *Brunoa* e *Worsdellia*. Os autores concluíram tratar-se de um sistema fluvial meandrante com fácies de canais e planícies de inundação, com progressiva influência marinha.

## Cenozóico

Brea *et al.* (2005) analisaram anéis de crescimento de troncos de gimnospermas encontrados na Província de Chubut, no Paleoceno inferior. Uma das conclusões dos autores foi a de que o clima da região apresentava verão seco e inverno chuvoso. Os vegetais provavelmente viviam em ambiente fluvial a deltaico.

Roberts & Hendrix (2000) encontraram mais de 200 troncos soterrados por cinzas vulcânicas em sedimentos da Formação Two Medicine, no Cretáceo do Estado de Montana, Estados Unidos. Sedimentos encontrados abaixo das cinzas apresentam estratificação cruzada, indicando que os vegetais viviam em planícies de inundação fluviais.

Woodcock & Meier (2003) estudaram fósseis de angiospermas em sedimentos vulcânicos do Eoceno médio dos Andes peruanos, na Floresta Petrificada de Piedra Chamana. Os autores traçam um paralelo entre esta assembléia com a evolução de florestas pluviais tropicais da América do Sul. Os fitofósseis teriam vivido em terras baixas, constituindo uma floresta baixo-montana, em período imediatamente anterior ao soerguimento dos Andes.

Dois registros de florestas petrificadas do Oligoceno foram encontrados. Wilson *et al.* (1999) encontraram troncos em posição de vida em arenitos com vestígios vulcânicos na

Formação Unga, no Alasca. Eventos vulcânicos também estão relacionados com fósseis silicificados descritos por Svetoslav & Manchev (2005) na chamada Depressão Nanovitsa, na Bulgária.

Por fim, quatro registros de florestas petrificadas do Mioceno merecem destaque. Orsen & Reidel (2003) trabalharam com as florestas petrificadas de Ginkgo e de Saddle Mountains, no Basalto Wanapum, e de Untanum, no Basalto Grande Ronde, as três no Estado de Columbia (Estados Unidos). Koufos *et al.* (2003) citam a exuberância da Floresta Petrificada da Ilha de Lesvos, na Grécia. Ao lado da Floresta Petrificada do Arizona, constitui as duas florestas petrificadas mais conhecidas atualmente. Os troncos silicificados foram encontrados *in situ*, e compreendem diversos gêneros de angiospermas, gimnospermas e pteridófitas.

Após todos os estudos consultados para a elaboração deste painel sobre “florestas petrificadas”, nota-se que o uso da expressão carece de maior rigor. De modo geral, todas as assembléias fossilíferas com exemplares preservados tridimensionalmente são classificadas dessa forma.

Embora os registros de fitofósseis petrificados com maior nível de preservação celular sejam predominantemente depositados em eventos vulcânicos, a maioria dos estudos consultados relata assembléias fossilíferas em depósitos sedimentares continentais. Dos 33 artigos consultados e listados acima, apenas oito relatam fósseis vegetais em cinzas vulcânicas, com destaque às florestas petrificadas de Chemnitz (Rößler 2006) e de Cerro Cuadrado, Argentina (Stockey 1977), e aos troncos silicificados do Deserto de Gobi (Keller & Hendrix 1997) e da Formação Two Medicine, Estados Unidos (Roberts & Hendrix 2000).

Das vinte e cinco assembléias fossilíferas encontradas em depósitos sedimentares, de acordo com esta revisão, várias são interpretadas como ambientes fluviais, com destaque aos fósseis em depósitos lacustres da Bacia de Graissassec-Lòdeve (Martín-Closas & Galtier 2005), aos vegetais permineralizados em ambiente fluvial de baixa sinuosidade da Floresta Petrificada do Arizona (Dubiel *et al.* 1991), aos troncos silicificados em um ambiente fluvial entrelaçado do arenito Mata, no Rio Grande do Sul (Guerra-Sommer & Scherer 2000), e aos vegetais silicificados que viveram em um sistema fluvial meandrante da Província de Rio Negro (Artabe *et al.* 2004), Argentina.

Em vários registros a interpretação do paleoambiente sugere forte caráter sazonal, com destaque para os fitofósseis estudados por Taylor *et al.* (1992) na Antártica, aos vegetais silicificados estudados por DiMichele *et al.* (2001) no Permiano do Texas, e aos vegetais que sobreviveram em regime de monções da Floresta Petrificada do Arizona (Dubiel *et al.* 1991).

### 3.4 Estudos Tafonômicos

O estudo de processos tafonômicos consiste na investigação do grau de preservação e fidelidade das informações disponíveis no registro fossilífero (Efremov 1940, Simões & Holz 2004). Conceitos clássicos em tafonomia, como bioestratinomia, diagênese e reconstituição de paleoambientes foram revistos com propriedade por Fernandez-Lopez (1995) e Martín-Closas & Gomez (2004). A consulta a métodos tafonômicos foi necessária para escolher as ferramentas mais adequadas de análise dos caules estudados nesta tese.

Diversos estudos sobre a orientação de caules foram realizados em tafofloras ao redor do mundo. São artigos de referência os estudos de Froggatt *et al.* (1981) na Nova Zelândia, de Roberts & Hendrix (2000) nos Estados Unidos, de Fielding & Alexander (2001) na Austrália, de Martín-Closas & Galtier (2005) na França, de Banerjee (2005) na Índia, e de Gastaldo *et al.* (2005) na África do Sul.

Na escassa literatura sobre orientação de caules em rochas sedimentares, notou-se que estudos de orientação quase sempre envolveram assembléias de vegetais pouco diversificadas. Banerjee (2005), por exemplo, encontrou mais de 50 ramos de *Glossopteris* em um afloramento de aproximadamente 30 km<sup>2</sup> no Carbonífero da Bacia Saharjuri, Índia. Os espécimes descritos variavam de 10 cm a 2 m de comprimento, com diâmetros variando de 4 a 10 cm. Roberts & Hendrix (2000), em estudo tafonômico em sedimentos vulcânicos nos Estados Unidos, encontraram cerca de 200 ramos, sendo que somente a metade pôde ser medida nos afloramentos. Froggatt *et al.* (1981), em estudo tafonômico próximo ao limite Permiano-Triássico da Nova Zelândia, mediram cerca de 100 troncos orientados, com diâmetros variando de 1 m a 5 m.

O caráter autóctone/alóctone/para-autóctone de registros fossilíferos é assunto freqüentemente tratado em tafonomia. A presença de fósseis no seu local original de vida permitiria análises completas sobre a comunidade e seu meio abiótico. Röβler (2006) descreve, por exemplo, como um evento vulcânico no Permiano de Chemnitz (Alemanha) preservou em posição de vida toda uma comunidade florestal. Para registros de caráter para-autóctone (ou seja, com transporte a curtas distâncias) as análises são menos precisas, embora em diversas ocasiões seja razoável supor que o ambiente final de deposição dos organismos guarde semelhanças com o ambiente de vida original.

Para assembléias alóctones, com poucas informações a respeito de seu nível de transporte, as análises devem se concentrar na composição da biota e na seqüência deposicional (Martín-Closas & Gomez 2004). Rösler (1975) já demonstrava preocupação em relação a assembléias alóctones: ao comparar floras brasileiras e argentinas do Permiano, o autor ressalta que a aparente “pureza” das assembléias pode ser decorrente da seleção de folhas de glossopterídeas durante o transporte. Tal fato poderia levar a interpretações equivocadas da vegetação.

Diversos estudos foram feitos sobre a orientação de fitofósseis em sistemas fluviais, com destaque para McKnight *et al.* (1990), Heckert & Lucas (1998), Guerra-Sommer & Scherer (2000) e Dubiel *et al.* (2001).

A Floresta Petrificada do Arizona, no Triássico dos Estados Unidos, foi estudada por Heckert & Lucas (1998) e Dubiel *et al.* (2001). Os caules foram encontrados em arenitos com estratificação cruzada do Membro Sonsela da Formação Chinle. Os referidos autores interpretaram o ambiente como um sistema fluvial de pouca sinuosidade (graças às interpretações das paleocorrentes, a partir da medição da orientação dos troncos fósseis), com clima típico de monções.

No Brasil, Guerra-Sommer & Scherer (2000) estudaram troncos silicificados do Triássico médio a superior da Formação Santa Maria. Troncos orientados foram encontrados em grande número. A dificuldade em relacioná-los com alguma unidade litológica específica deu margem à interpretação de que poderia tratar-se de uma assembléia alóctone. Os autores interpretaram o paleambiente como um sistema fluvial entrelaçado, e que a abundância de macrofitofósseis

seja resultante de um evento catastrófico, como uma grande tempestade com grandes inundações.

Assine *et al.* (2003) estudaram paleocorrentes em sedimentos da Formação Tatuí, no Permiano da Bacia do Paraná. Os autores encontraram 12 troncos silicificados em arenitos finos a médios, nas margens de uma rodovia próxima a Tupi, entre as cidades de Piracicaba e Santa Bárbara D'Oeste. Com base na orientação dos caules os autores puderam identificar a área-fonte dos sedimentos. O paleoambiente é interpretado como canais tributários em ambientes costeiros.

McKnight *et al.* (1990) encontraram pelo menos quinze troncos silicificados depositados na planície de inundação de paleocanais na Floresta Petrificada de Xinjiang, no Jurássico superior da China. Os troncos foram encontrados posicionados paralelamente ao rio. Os diagramas de roseta construídos na análise permitiram que os autores interpretassem o ambiente como canais fluviais meandantes amplos e rasos, com baixa sinuosidade e moderado gradiente altitudinal. O clima deveria ser predominantemente úmido, com precipitação sazonal, onde um evento de larga escala, como grandes tempestades ou monções, teria sido responsável pela morte e sepultamento dos vegetais.

Keller & Hendrix (1997) estudaram vinte e três troncos permineralizados no Deserto de Gobi, Jurássico da Mongólia. A morte e o sepultamento dos vegetais estariam relacionados com um evento vulcânico. Os autores salientam que poucos troncos apresentavam padrões definidos de orientação. As plantas viveriam em uma floresta úmida, com clima típico de monções.

De fato, diversas regiões na Ásia Central teriam experimentado, durante o Jurássico, padrões regionais de clima típico de monções. McKnight *et al.* (1990) e Keller & Hendrix (1997) chegaram a conclusões semelhantes em duas assembléias fossilíferas distintas.

Roberts & Hendrix (2000) estudaram a orientação dos troncos sob cinzas vulcânicas na Floresta Petrificada de Montana, Estados Unidos. Seu objetivo era determinar a direção de origem do material vulcânico. A maior parte dos troncos teria sido apenas derrubada, sem transporte significativo.

Froggart *et al.* (1981) estudaram troncos sepultados em cinzas vulcânicas no fim do Século II d.C., na Nova Zelândia. Observando um fenômeno recente, os autores pretendiam desenvolver ferramentas de análises tafonômicas para registros mais antigos. Os autores conseguiram medir o comprimento e volume do fluxo piroclástico, e encontraram caules de até 5 m de comprimento sepultados. Poucos vegetais foram preservados integralmente, sendo possível observar diversas raízes e ramos separados dos troncos. Tal fato estaria relacionado com o caráter turbulento do fluxo piroclástico. Foram medidos aproximadamente 100 caules. Os autores tiveram êxito em relacionar a orientação dos caules com a direção do fluxo piroclástico, desde a região proximal até a região distal do evento vulcânico.

Fielding & Alexander (2001) estudaram os mecanismos de adaptação de plantas atuais em sistemas fluviais, no Noroeste da Austrália, para traçar um paralelo com estudos de floras do passado. Os autores observaram padrões claros de adaptação, como o crescimento inclinado dos vegetais que viviam no leito e nas margens dos rios, padrões complexos de ramificação, alterações nas folhas da copa, alterações no córtex e intensa regeneração de raízes. Estas alterações se relacionam claramente com a força da correnteza e com os padrões de inundação regulares, em função do regime marcadamente sazonal de precipitação. Os autores sugeriram que troncos fósseis *in situ* podem ser importantes para diagnosticar o padrão de sistemas fluviais e de climas com regimes regulares de precipitação.

Por fim, Burnham *et al.* (2005) trouxeram a questão da biodiversidade de floras aos estudos tafonômicos. Segundo os autores, os atuais modelos de reconstituição climática levam em conta parâmetros típicos de florestas temperadas, e não de florestas tropicais. Grande parte das paleofloras de interesse localizava-se em latitudes baixas, próximas ao Equador. Na busca por parâmetros e modelos aplicáveis a estudos em paleobotânica, os autores ressaltam a estreita relação entre o padrão de chuvas com a morfologia foliar. Semelhante estudo foi desenvolvido por Glasspool *et al.* (2004), no estudo da morfologia foliar de gigantopterídeas da Flora Cataísica.

## 4. Resultados e Discussão

### 4.1 Considerações sobre a geologia do MNAFTO

Para que realizar o estudo tafonômico e paleoecológico dos fósseis do MNAFTO são necessárias algumas considerações a respeito dos depósitos sedimentares que os contêm. Diversas observações em campo confirmaram as descrições apresentadas em Dias-Brito & Castro (2005), posteriormente publicadas em Dias-Brito *et al.* (2007).

A paisagem é caracterizada por extensa área plana, com altitudes entre 200 e 250 m, e platôs ou mesetas com bordas íngremes com até 500 m de altitude (figura 4.1.1), especialmente nas porções Nordeste e Leste da área do MNAFTO.

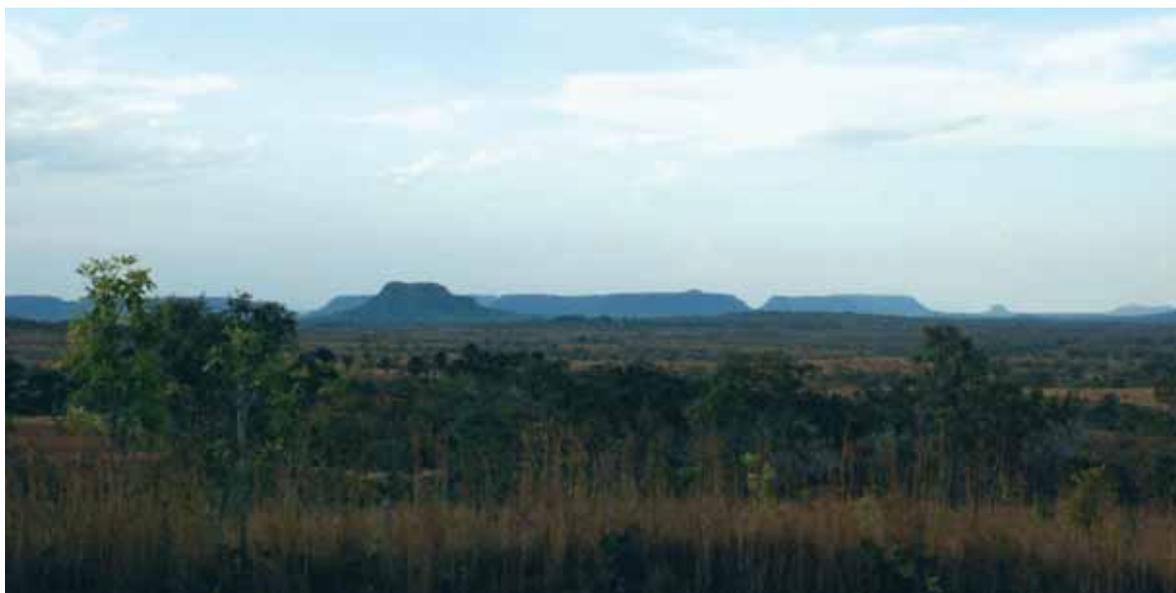


Figura 4.1.1. Paisagem com típicas mesetas nas porções Nordeste e Leste do MNAFTO

O patamar inferior abrange as ocorrências da floresta petrificada, e corresponde à área aflorante da Formação Motuca. Conforme o mapa geológico proposto por Dias-Brito *et al.* (2007), a Formação Pedra de Fogo aflora apenas em uma pequena região ao Norte do MNAFTO (como mostrado na figura 3.1.3, na seção Métodos/Área de Estudo).

As encostas íngremes dos platôs mostram afloramentos de arenitos com grandes estratificações cruzadas, de origem eólica, da Formação Sambaíba. O acesso ao topo dos morros não é fácil, conforme informações passadas por moradores da região. A Serra do

Justino, localizada fora dos limites do MNAFTO, oferece uma trilha até o topo. O desnível topográfico da base ao topo é de cerca de 250 m. Foram realizadas algumas medidas e observações de estratificações cruzadas na subida do morro, que indicaram ventos a Noroeste e ocasionalmente a Sudeste (figura 4.1.2).



Figura 4.1.2. Estratificações cruzadas da Formação Sambaíba, Serra do Justino

Pinto & Sad (1986) consideraram que a Formação Sambaíba continuaria também no topo dos platôs. Foi possível observar, entretanto, que as partes mais altas da Serra do Justino apresentam afloramentos de basaltos alterados, que podem ser atribuídos à Formação Mosquito, de idade neotriássica. É provável, assim, que basaltos também ocorram em outros platôs da região, o que explicaria sua forma aplainada. Não foi encontrado o contato entre as formações Motuca e Sambaíba, no sopé da serra, devido aos remanescentes de vegetação e o colúvio que recobre os estratos.

Foi visitada uma mina de gipsita próxima à Serra do Justino, a poucos quilômetros ao Norte da rodovia TO-222, que liga Araguaína a Filadélfia. De acordo com Dias-Brito *et al.* (2007), a gipsita faz parte da Formação Motuca. Em um pequeno morro próximo à pedreira já aflora a Formação Sambaíba, de modo que os evaporitos devem posicionar-se quase no topo da Formação Motuca (figura 4.1.3). Os dados disponíveis até o momento permitem concluir que os depósitos fossilíferos estejam em posição estratigráfica abaixo dos evaporitos citados.

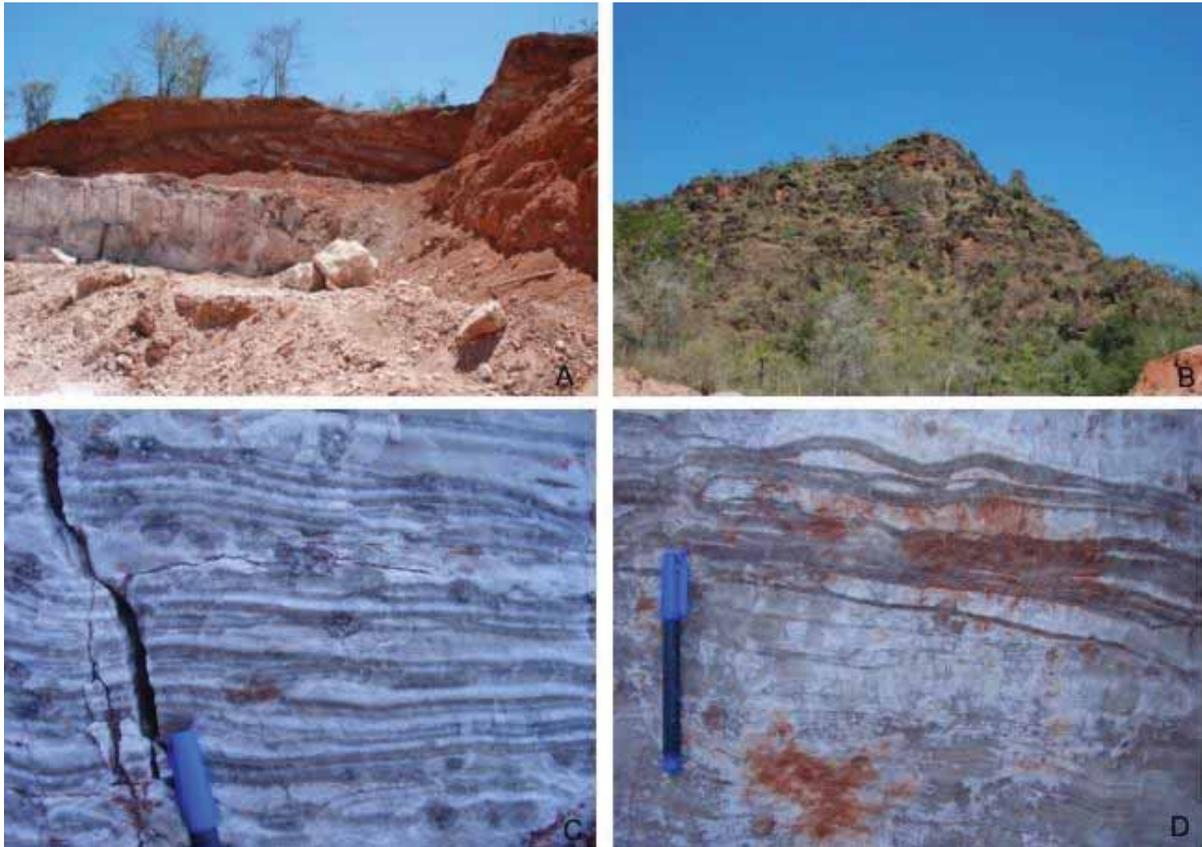


Figura 4.1.3. Mina de gipsita a Nordeste do MNAFTO: A) Frente de lavra; B) Morro ao lado da mina, com afloramentos da Formação Sambaíba; C e D) Detalhes da gipsita bandada e com nódulos

A figura 4.1.4 mostra de modo esquemático a relação entre as feições geomorfológicas e a litoestratigrafia do MNAFTO.

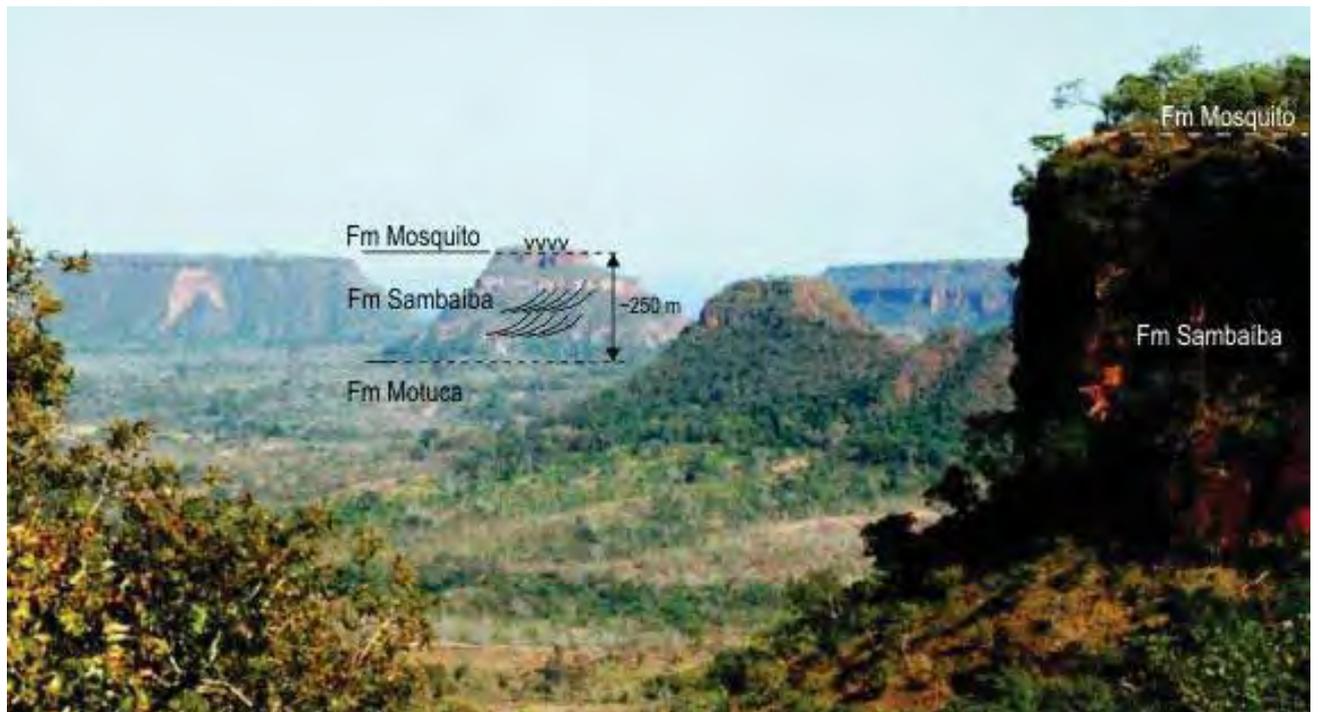


Figura 4.1.4. Vista da Serra do Justino, com direção Noroeste, e interpretação da litoestratigrafia conforme as feições geomorfológicas

Na Formação Motuca, em geral, as camadas são sub-horizontais, com fósseis distribuídos em um intervalo de aproximadamente 20 m.

Na Fazenda Andradina (coordenadas UTM 0186165/9173864), localizada na parte central do MNAFTO, próxima ao distrito de Bielândia e à rodovia TO-222, ocorre as melhores exposições de arenitos com estratificações cruzadas da Formação Motuca. Dias-Brito & Castro (2005) apresentaram perfil colunar representativo da área (publicada em Dias-Brito *et al.* 2007), que foi complementado com dados de medidas do rumo do mergulho das estratificações cruzadas, do posicionamento dos caules *in loco* e algumas novas observações sobre a litologia, como apresentado na figura 4.1.5.

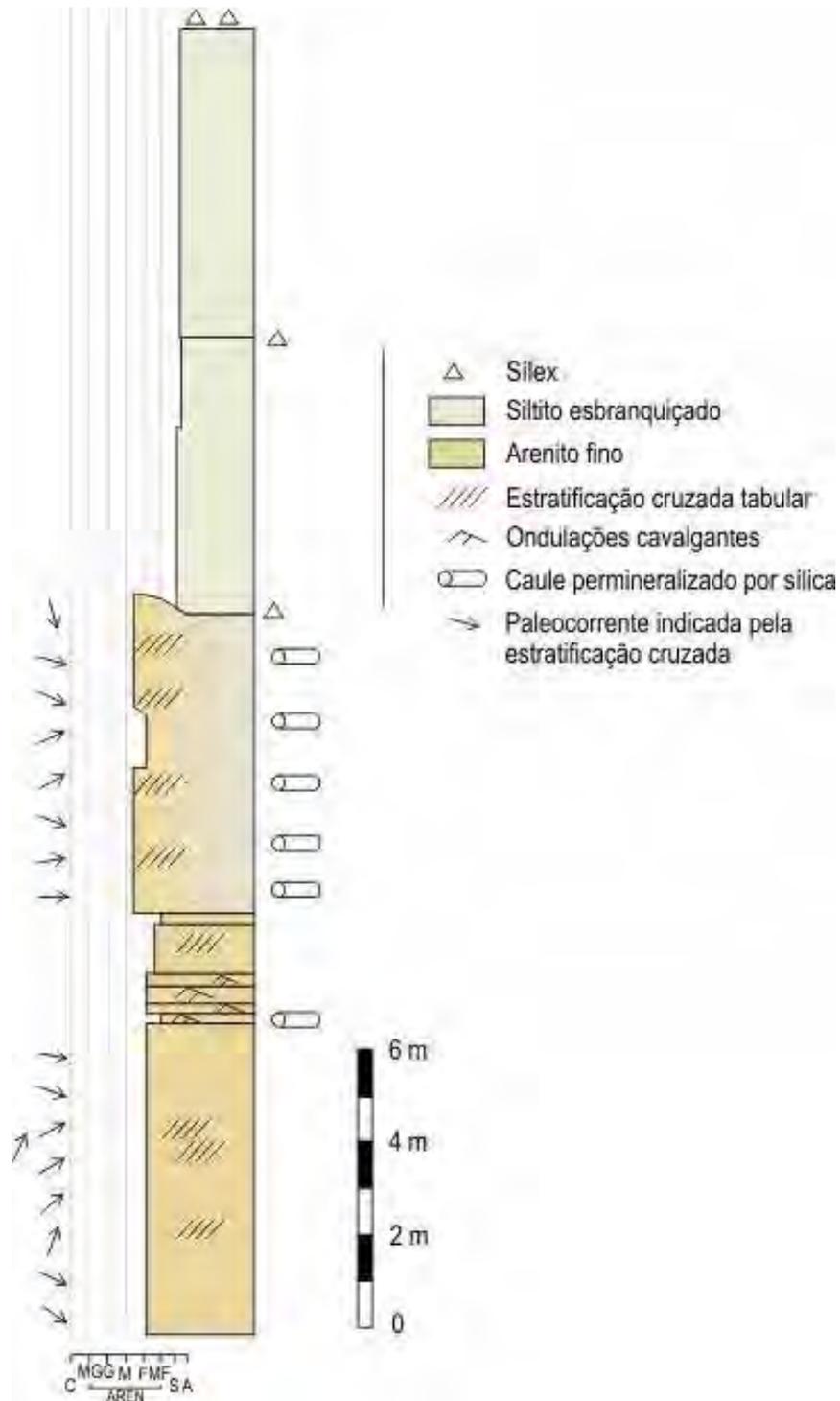


Figura 4.1.5. Perfil colunar da Fazenda Andradina, conforme Dias-Brito *et al.* (2007), com acréscimo de dados de paleocorrentes e do posicionamento aproximado dos fósseis

Há dois pacotes de arenitos com estratificações cruzadas, cada um com cerca de 6 a 8 m de espessura (figuras 4.1.5 e 4.1.6).

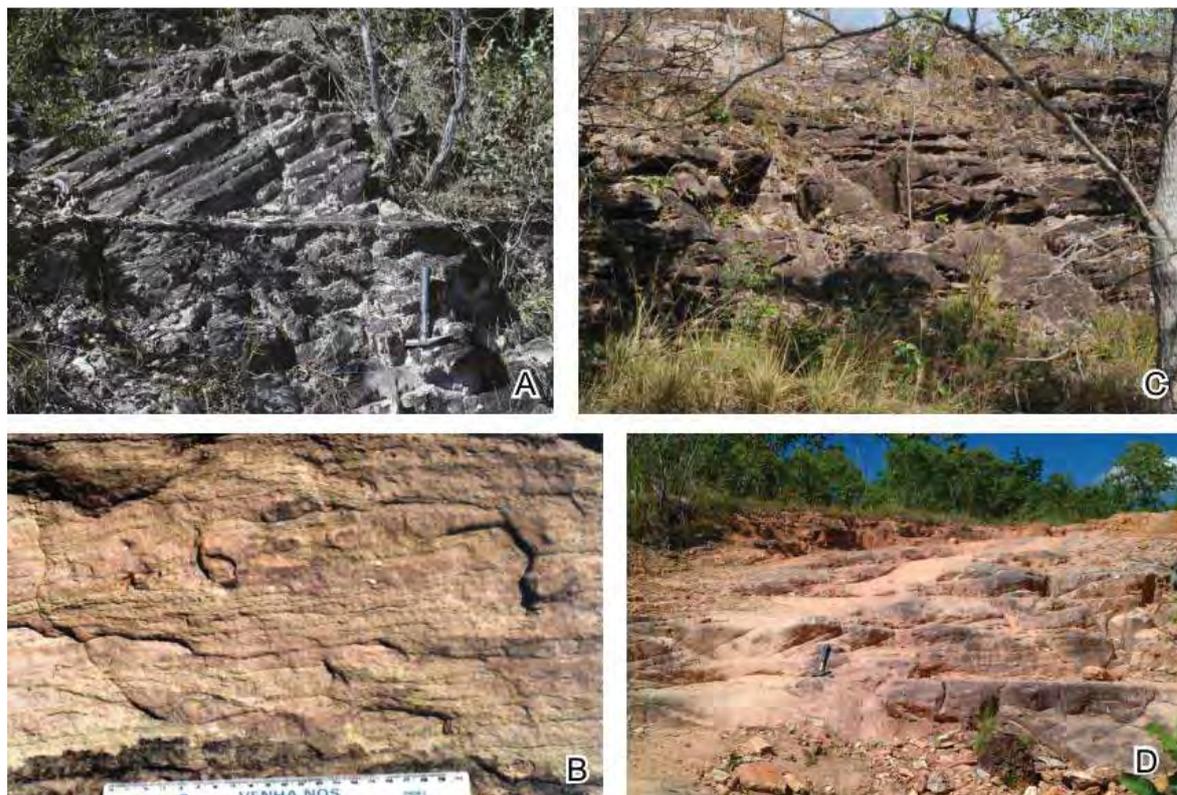


Figura 4.1.6. Afloramentos na Fazenda Andradina: A) Arenito com estratificação cruzada tabular, na porção topograficamente mais baixa da fazenda; B) Arenito com ondulações cavalgantes, um pouco acima do primeiro intervalo; C e D) Arenitos com estratificação cruzada em posição estratigráfica intermediária

O pacote inferior, aflorante na parte Norte-Nordeste da fazenda (com coordenadas UTM 23M 0186439/9174418), apresenta arenito fino esbranquiçado (escuro nas superfícies intemperizadas) com estratificação cruzada tabular, e orientações das paleocorrentes sucessivamente para Sudoeste, Nordeste e Sudeste (figura 4.1.6. A). Ascendentemente, os *sets* das estratificações cruzadas ficam mais espessos e menos inclinados. Não foram encontrados caules nestes arenitos. A seguir surgem os primeiros arenitos com registros de caules, e em área fora da fazenda, às margens da estrada para a Fazenda Santa Maria (coordenadas 23M 0186695/9174594) aparecem camadas delgadas alternadas de arenitos muito finos e arenitos finos, com ondulações cavalgantes (como mostrado na figura 4.1.6. B).

O segundo pacote de arenito aflora na porção Sudeste da fazenda. Subdivide-se em camadas entre 0,5 e 0,9 m de espessura (gradativamente menores rumo ao topo) com estratificação cruzada tabular a tangencial, apontando sucessivamente para Leste, Sudeste,

Nordeste e Sudeste (figuras 4.1.6 C e D). A granulação dos arenitos é média, com grãos bem arredondados e selecionados.

A uma distância lateral de aproximadamente 30 m a partir do segundo pacote de arenitos (coordenadas UTM 23M 0186165/9173864), surgem caules parcialmente *in loco* em arenitos mosqueados, como apresentado na figura 4.1.7.



Figura 4.1.7. Arenitos da Fazenda Andradina, com intercalações pelíticas irregulares, microestratificações cruzadas e mosqueamento, com caules *in loco*

Estes arenitos apresentam cores variadas, esbranquiçadas a róseas, e porções ferruginizadas. Geralmente são maciços, ou com pequenas intercalações de pelitos irregulares (com espessuras em torno de 1 cm, e espaçamento entre 7 e 8 cm), ou totalmente irregulares,

e localmente arenitos com microestratificações cruzadas muito imaturos, sem matéria orgânica.

Acima dos dois pacotes de arenitos com estratificações cruzadas (e dos arenitos/pelitos mosqueados em posição lateral ao segundo pacote), segundo Dias-Brito *et al.* (2007), há siltitos e níveis de sílex (figura 4.1.5). O afloramento melhor preservado com esta fácies foi observado nas margens da rodovia TO-222, no trecho entre Filadélfia e Bielândia, próximo à Fazenda Andradina. Ali ocorre intervalo espesso de siltito/arenito mosqueado (~3 m), delgada camada de sílex, seguida por outra camada mosqueada (~1 m) e siltito argiloso mais homogêneo (figura 4.1.8).



Figura 4.1.8. Fácies pelíticas, parcialmente mosqueadas, e camada destacada de sílex, na rodovia TO-222, a Leste de Bielândia

Na Fazenda Buritirana, as exposições da Formação Motuca são bem menos preservadas que as exposições da Fazenda Andradina. Dias-Brito & Castro (2005) e Dias-Brito *et al.* (2007), entretanto, puderam levantar um perfil colunar, reproduzido aqui na figura 4.1.9 com pequenas modificações.

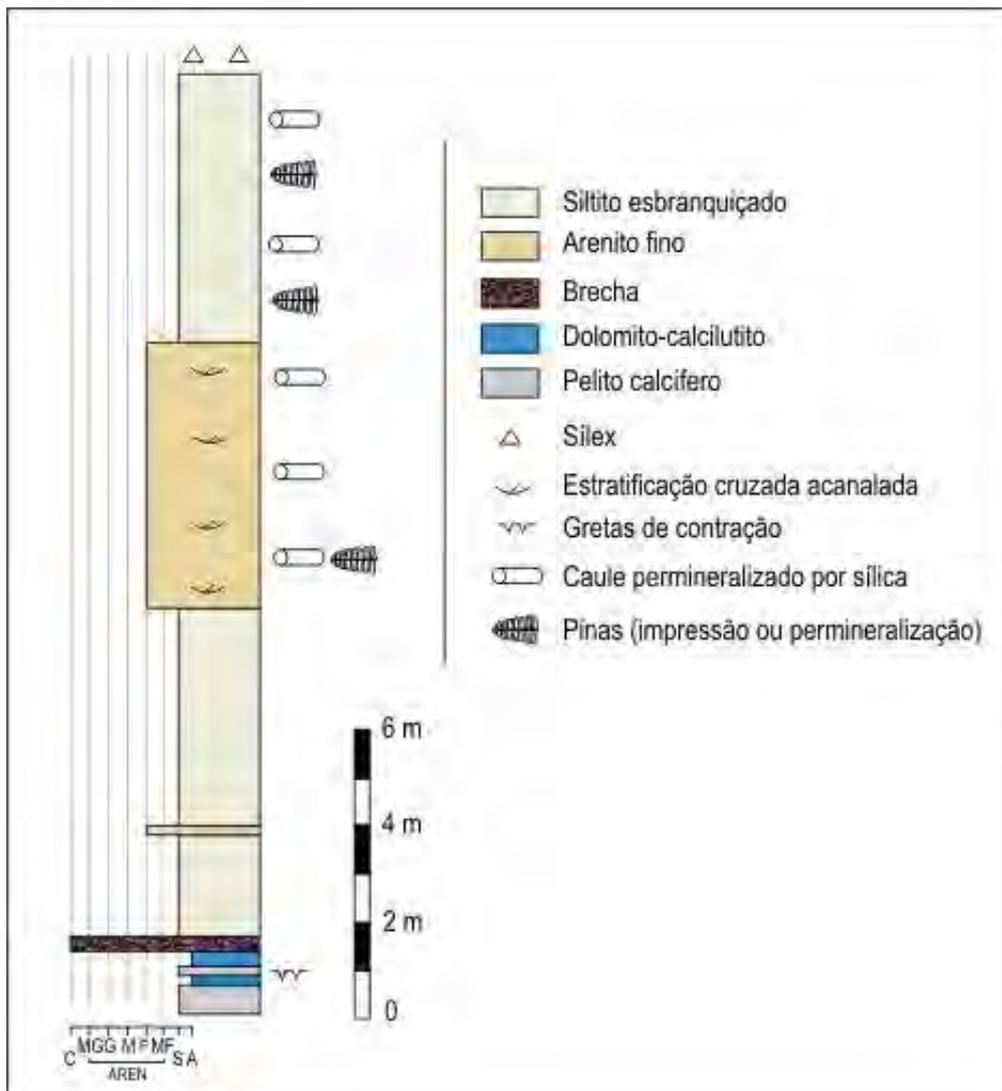


Figura 4.1.9. Perfil colunar da Fazenda Buritirana, conforme Dias-Brito *et al.* (2007), com o acréscimo de informações sobre a ocorrência dos caules permineralizados

As estratificações cruzadas reconhecidas em um único afloramento (com coordenadas UTM 23M 0201209/9174330) são acanaladas, com paleocorrentes no rumo Sudeste (figura 4.1.10).



Figura 4.1.10. Raro afloramento de arenito com estratificação cruzada acanalada na Fazenda Buritirana

Na Fazenda Buritirana, há importante proporção de siltitos de coloração cinza muito clara a ligeiramente esverdeada, com caules permineralizados e impressões mais preservadas de pinas de pteridófitas (figura 4.1.11). Na porção topograficamente mais baixa da Fazenda Buritirana, às margens de um córrego (23M 0201906/9173734), afloram calcários dolomíticos (figuras 4.1.9 e 4.1.12), que possivelmente podem ser atribuídos à Formação Pedra de Fogo.



Figura 4.1.11. Siltito com caule permineralizado achatado, na Fazenda Buritirana



Figura 4.1.12. Calcário dolomítico com nódulos e siltitos na porção topograficamente mais baixa da Fazenda Buritirana, possivelmente pertencentes à Formação Pedra de Fogo

Na Fazenda Peba não foram encontrados bons afloramentos próximos à principal área de ocorrência dos fósseis (23M 0173532/9179084). Contudo, um afloramento foi observado ao norte dos registros fossilíferos, como apresentado na figura 4.1.13.

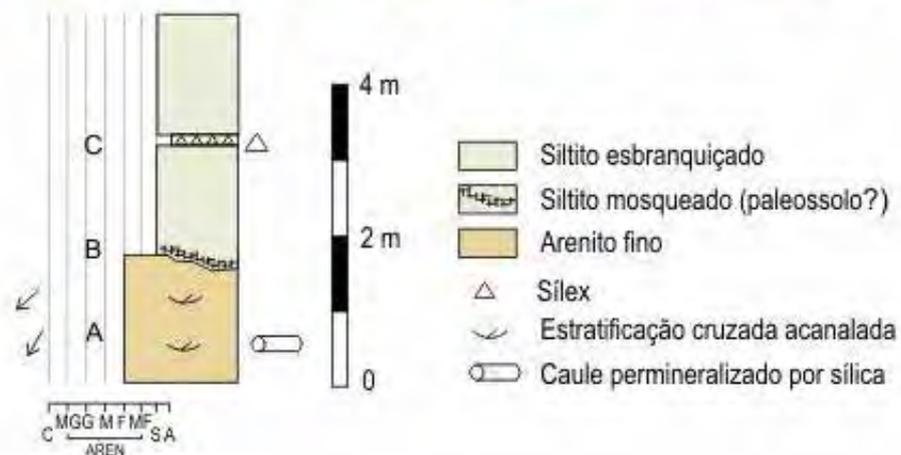
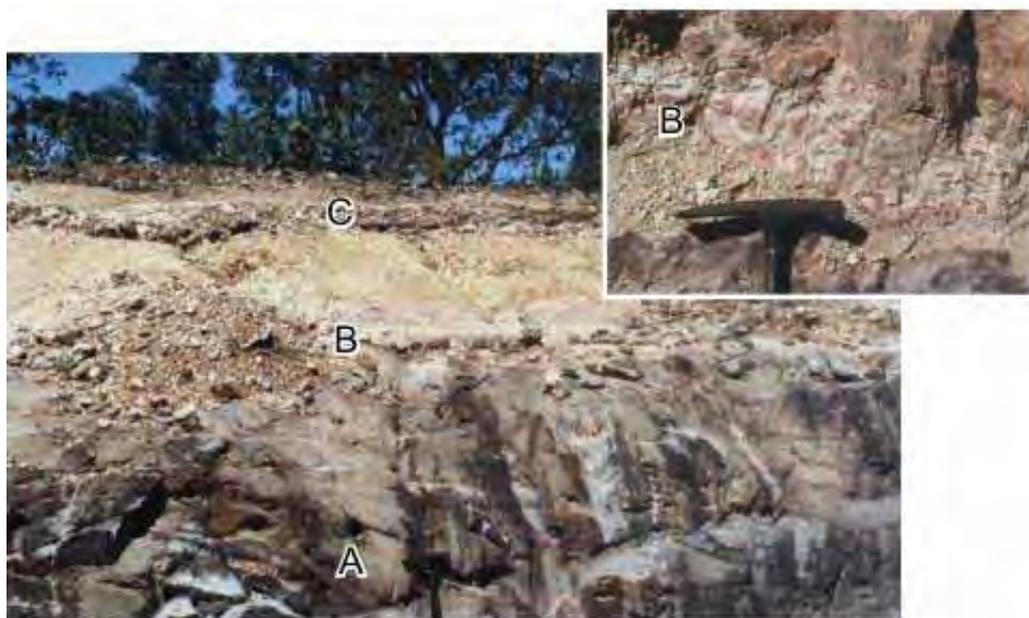


Figura 4.1.13. Afloramento na Fazenda Peba, ao Norte da principal área de ocorrência de fósseis: A) Arenito com estratificação cruzada, com pequeno caule; B) Intervalo mosqueado sobreposto por siltito maciço; C) Silex

O afloramento da Fazenda Peba mostra um arenito com estratificação cruzada na parte inferior (com paleocorrente medida para Sudoeste), seguido de uma porção mosqueada avermelhada/esverdeada, interlaminados por siltito (com cerca de 20 cm), uma camada de siltito maciço homogêneo alterado esverdeado (com 1,3 m), e uma delgada camada de sílex (~15 cm). O conjunto é sobreposto por outros siltitos. O arenito com estratificação cruzada apresenta um pequeno eixo caulinar *in loco*, paralelo à estratificação cruzada, e perpendicular ao rumo do fluxo.

Em outras áreas do MNAFTO os afloramentos da Formação Motuca são pouco representativos. Ao Sul de Bielândia (coordenadas UTM 23M 018424/9168736), fora dos limites do MNAFTO, foram observadas estratificações cruzadas indicando paleocorrentes para Sudeste, Sul e Sudoeste. Esta camada é a primeira constituída por arenito, acima de pelitos escuros, e prováveis evaporitos da Formação Pedra de Fogo.

A ausência de seixos ou brechas nos depósitos associados aos vegetais fósseis, em todo o MNAFTO, sugere que o paleorelevo era bastante plano, com a área-fonte distante. O relativo arredondamento dos grãos dos arenitos da Formação Motuca não descarta a possibilidade de retrabalhamento aquoso dos sedimentos eólicos.

Os arenitos com estratificação cruzada devem representar barras de canal fluvial. Na Fazenda Andradina, as estratificações cruzadas indicam fluxo médio aproximadamente para Leste (Sudeste a Nordeste). Nas outras fazendas, os dados de orientação são escassos e talvez não sejam representativos. Os arenitos com ondulações cavalgantes originaram-se por fluxos hiperpicnais, e podem representar depósitos de rompimento de diques marginais de canais (crevasses). Os depósitos mosqueados lembram paleossolos imaturos. Os pelitos mais maciços devem representar sedimentação em corpos d'água mais permanentes. A falta de laminação dos pelitos pode refletir em intensa bioturbação, ou áreas de várzea de lagos efêmeros.

## 4.2 Estrutura das assembléias fossilíferas

Ao estudar florestas atuais, ecólogos frequentemente medem e identificam todos os vegetais em uma área amostral, a fim de saber mais sobre a estrutura das populações e da comunidade (Mueller-Dunbois & Ellenberg 1974, Begon *et al.* 2006). Os dados coletados na área de amostragem permitem extrapolações para toda a floresta em questão. A medição dos indivíduos (geralmente altura, diâmetro, área basal, posição geográfica) é utilizada como base para análises sobre a estrutura e dinâmica da floresta (Batista & Maguire 1998). No caso deste estudo, as medições em campo permitiram investigar a estrutura dos vegetais encontrados, e elaborar comentários a respeito da estrutura das florestas que ocupavam aquelas terras no Permiano.

Nos sítios fossilíferos estudados, os fósseis jazem sobre o substrato, ou encontram-se parcialmente dentro de depósitos, em posição horizontal, como mostrado na figura 4.2.1.

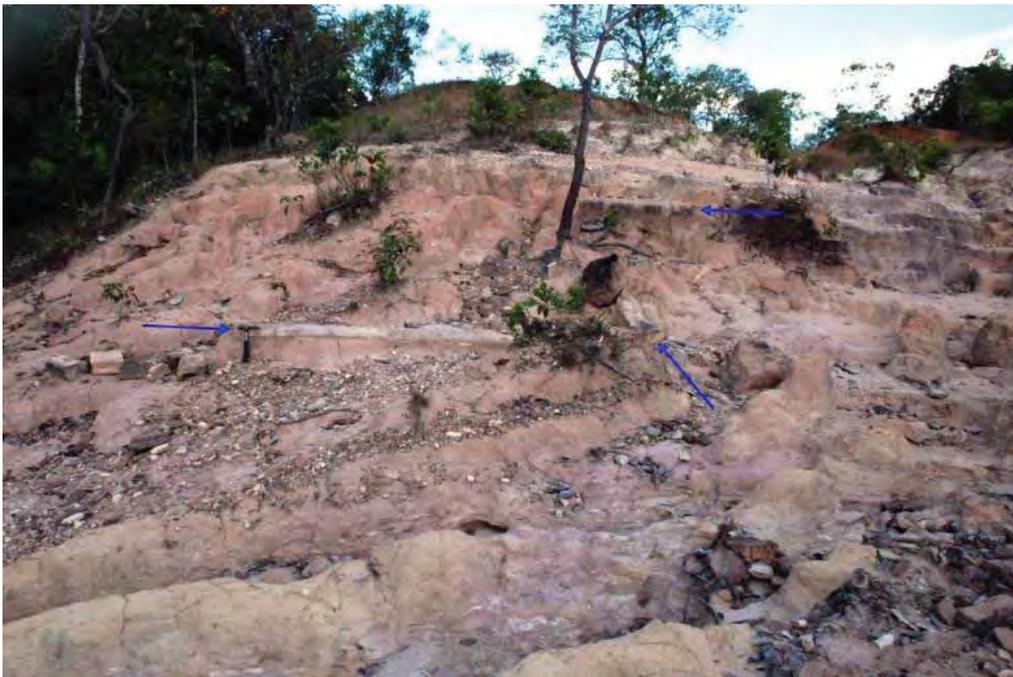


Figura 4.2.1. Exemplo de exposição de caules na Fazenda Andradina; abaixo da seta do lado esquerdo encontram-se fragmentos soltos do caule

Todos os caules expostos à superfície apresentam fraturas ortogonais ao eixo, com espaçamento médio de 10 a 20 cm, podendo chegar a 1 m. Os fragmentos encontram-se

alinhados ou parcialmente deslocados ou rotacionados. No Estado do Tocantins observa-se amplitudes térmicas de até 14°C, com estações chuvosas (até 1800 mm concentrados no verão) e períodos de estiagem bem pronunciados (no inverno), segundo Silva & Almeida (2007). As diferenças diárias de temperatura causam o fraturamento dos caules. Chuvas fortes promovem pequenos deslocamentos ou mesmo a remoção total dos fragmentos mais leves. Assim, a ação do intemperismo é muito rápida, o que representa um risco a este patrimônio paleontológico nacional.

A velocidade do processo pode ser constatada, por exemplo, na Fazenda Andradina. Durante uma das etapas de campo em 2006, foi removida uma camada de 2 a 3 cm de arenito que recobria um caule de gimnosperma, com o objetivo de fotografá-lo. Nesta ocasião, o caule não apresentava quaisquer fraturas visíveis a olho nu. Na etapa seguinte de campo, em 2007, este mesmo caule já possuía nítidas fraturas, com alguns fragmentos deslocados em relação à sua posição original.

Rößler (2006) comentou que muitos caules sobre o substrato estavam originalmente em camadas já removidas pela erosão. Devido à sua resistência à alteração química, os caules ficariam concentrados sobre a superfície durante o gradual rebaixamento erosivo do terreno. Esta possibilidade pode ser válida para diversos caules encontrados na região, mas não se aplica certamente aos caules alinhados. Somente caules recentemente expostos ao intemperismo parecem preservar seu relativo alinhamento. Deste modo, tem-se segurança de que vários fragmentos alinhados representam a posição original de sepultamento dos caules, inclusive com a posição estratigráfica original. As porções basais dos caules, com espessos mantos de raízes adventícias e grande peso, devem estar aproximadamente no ponto em que foram depositados, embora possam ter derivado em parte da erosão das camadas subjacentes.

Para caracterizar adequadamente o registro fóssilífero do MNAFTO, são necessárias considerações sobre a fossilização. As principais hipóteses foram comentadas na seção de Florestas Petrificadas (seção 3.3). Aqui cabe salientar que comumente existe uma capa de arenito, de 2 a 10 cm de espessura, em torno dos caules, especialmente na Fazenda Buritirana (figura 4.2.2).



Figura 4.2.2. Exemplo de caule de Marattiales com capa de arenito, na Fazenda Buritirana

Não há evidências de vulcanismo contemporâneo à deposição dos caules nas proximidades da Bacia do Parnaíba. Portanto, a sílica no processo de permineralização deve ter derivado da alteração química de minerais silicásticos. O processo foi discutido por Tavares & Rohn (2009). Condições extremamente alcalinas, causadas por intensa evaporação da água, devem ter permitido a presença de sílica em solução. Soluções silicosas chegavam aos poros dos depósitos com caules, levemente soterrados, possivelmente na zona freática. Os caules lentamente começavam a se decompor, liberando gás carbônico e outros gases. O gás carbônico dissolvido na água formava ácido carbônico, que baixava o pH até níveis não compatíveis com a sílica em solução. Desse modo, a sílica precipitava nos tecidos e células vegetais. O mesmo processo pode ter promovido a cimentação dos grãos de areia em torno do caule, formando a capa de arenito.

Foi possível notar que a porção com raízes adventícias das Marattiales normalmente está mais preservada que o estelo (figura 4.2.3), o que sugere que a permineralização nem sempre foi completa nas porções mais centrais dos caules. Pequenas cavidades no estelo podem ter facilitado a alteração química.



Figura 4.2.3. Exemplo de porção proximal de caule de Marattiales na Fazenda Buritirana, cujo estelo foi mais alterado do que o manto de raízes adventíceas

Alguns caules da Fazenda Buritirana, e raros caules da Fazenda Andradina, apresentam um lado recoberto por pinas e pínulas de samambaias, além de outros pequenos fragmentos vegetais permineralizados por sílica (figuras 4.2.4 e 4.2.5). As folhas encontram-se diretamente em contato com a superfície dos caules, ou existem camadas de arenito entre eles. Não foi observada conexão orgânica entre folhas e caules. A permineralização das folhas e caules, incluindo a cimentação do arenito por sílica, deve ter ocorrido de modo concomitante.

Pinas e pínulas também foram encontradas soltas sobre o terreno na Fazenda Buritirana. Provavelmente estas pinas se soltaram dos caules pela ação do intemperismo. Algumas impressões de pinas foram observadas em siltitos. Na Fazenda Andradina, raras pinas e pínulas foram observadas em arenito mosqueado (figura 4.2.6).



Figura 4.2.4. Exemplo de pinas e pinulas aderidas a caule de Marattiales, na Fazenda Buritirana



Figura 4.2.5. Maior detalhe de pinas e pinulas aderidas a caule de Marattiales da figura anterior, na Fazenda Buritirana

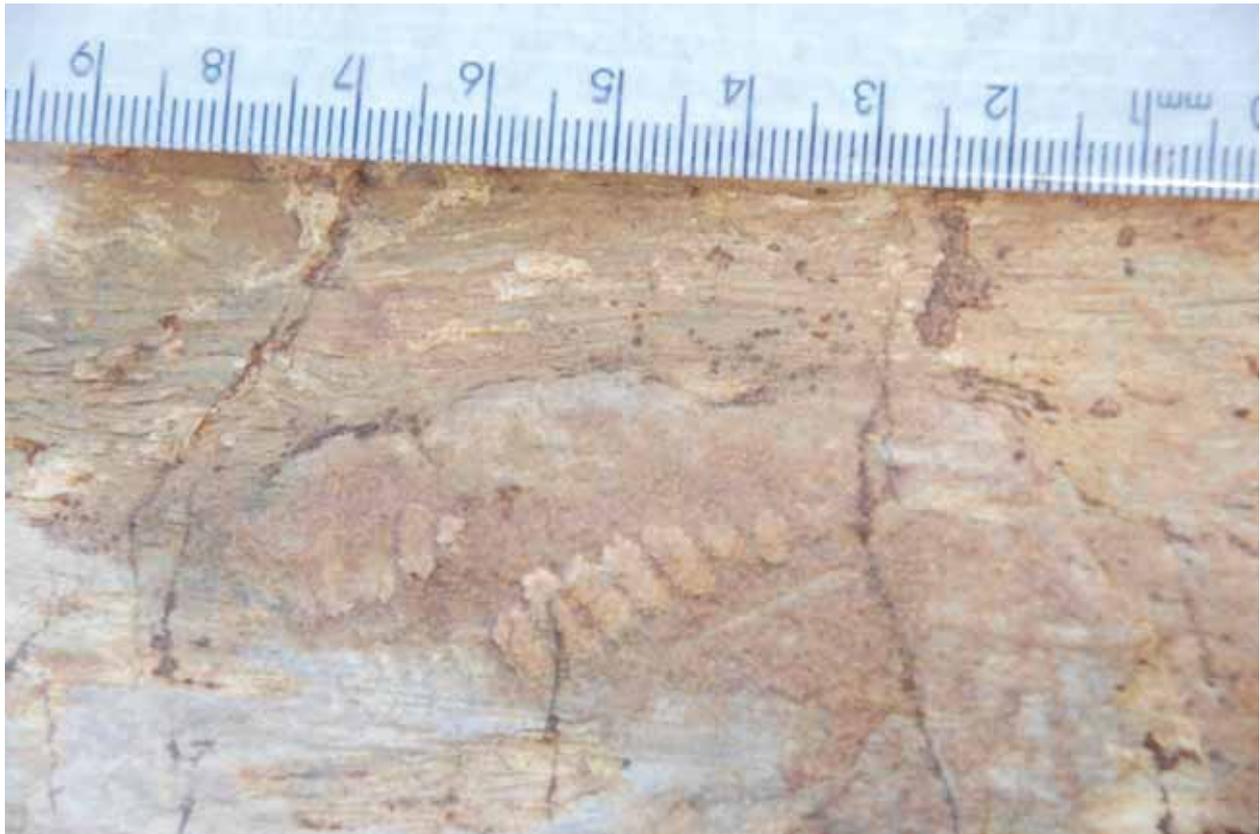


Figura 4.2.6. Escassas pinas encontradas em arenito mosqueado na Fazenda Andradina

Nos três principais sítios fossilíferos foram encontrados, medidos, identificados e mapeados 178 caules fósseis. Deste total, 120 foram identificados como pteridófitas e 58 como gimnospermas. A composição dos três diferentes sítios varia bastante. Embora os fósseis de pteridófitas estejam presentes nos três locais de estudo, fósseis de gimnospermas ficaram restritos a apenas dois. A distribuição destas ocorrências é apresentada na tabela 4.2.1.

Tabela 4.2.1. Ocorrência dos fósseis vegetais nos três locais de estudo dentro do MNAFTO

	Peba	Andradina	Buritirana
Pteridófitas	40	26	54
Gimnospermas	2	56	0

As pteridófitas correspondem principalmente ao gênero *Tietea* (figura 4.2.7). Os caules encontrados do gênero *Psaronius* apresentam elevado nível de fragmentação, e são bem menos abundantes (figura 4.2.8 B). Por essa razão, tornou-se difícil medir a orientação azimutal

para muitos de seus caules. Ainda mais raros são os exemplares de *Grammatopteris* (figura 4.2.8 A) e *Dernbachia* (figuras 4.2.8 C e 4.2.9). Também foram encontradas esfenófitas (figura 4.2.8 F), raras licófitas (figura 4.2.8 D) e, conforme discutido anteriormente, pinas e pínulas de samambaias (figura 4.2.8 E e G).

Na Fazenda Andradina encontrou-se o maior número de gimnospermas e alguns caules de esfenófitas, sendo particularmente importante um exemplar com rizoma de aproximadamente de 2 m de comprimento (figura 4.2.8 F). Uma única amostra com pinas e pínulas de pteridófito foi encontrada neste local (figura 4.2.6).

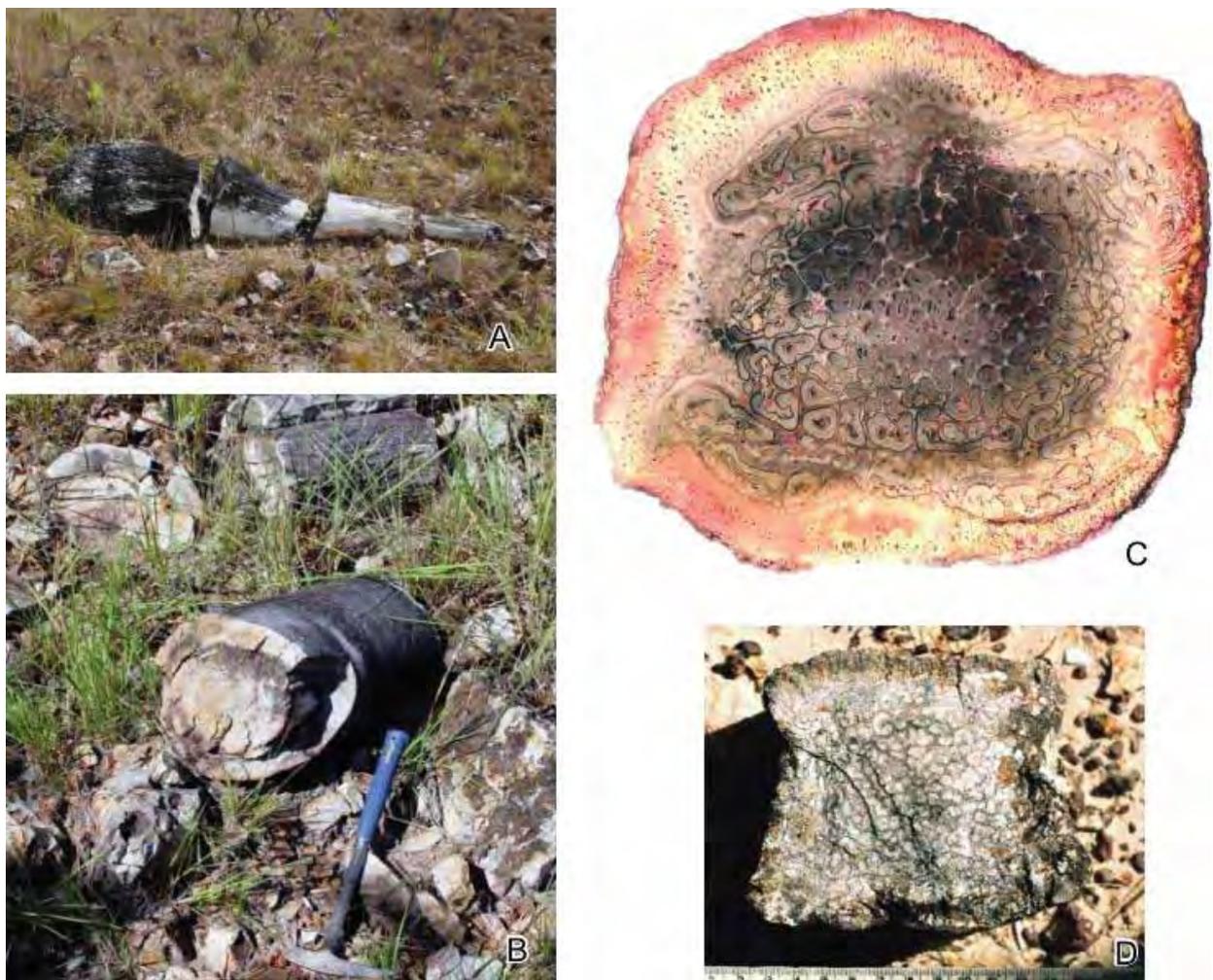


Figura 4.2.7. Pteridófitas arborescentes permineralizadas: A) Caule apresentando porção basal preservada, com manto de raízes adventícias; B) *Tietea* com capa de arenito; C) *Tietea* em seção polida, mostrando meristelos e manto de raízes adventícias; D) Porção apical de *Tietea*, onde a seção é quadrangular e o manto de raízes adventíceas é ausente

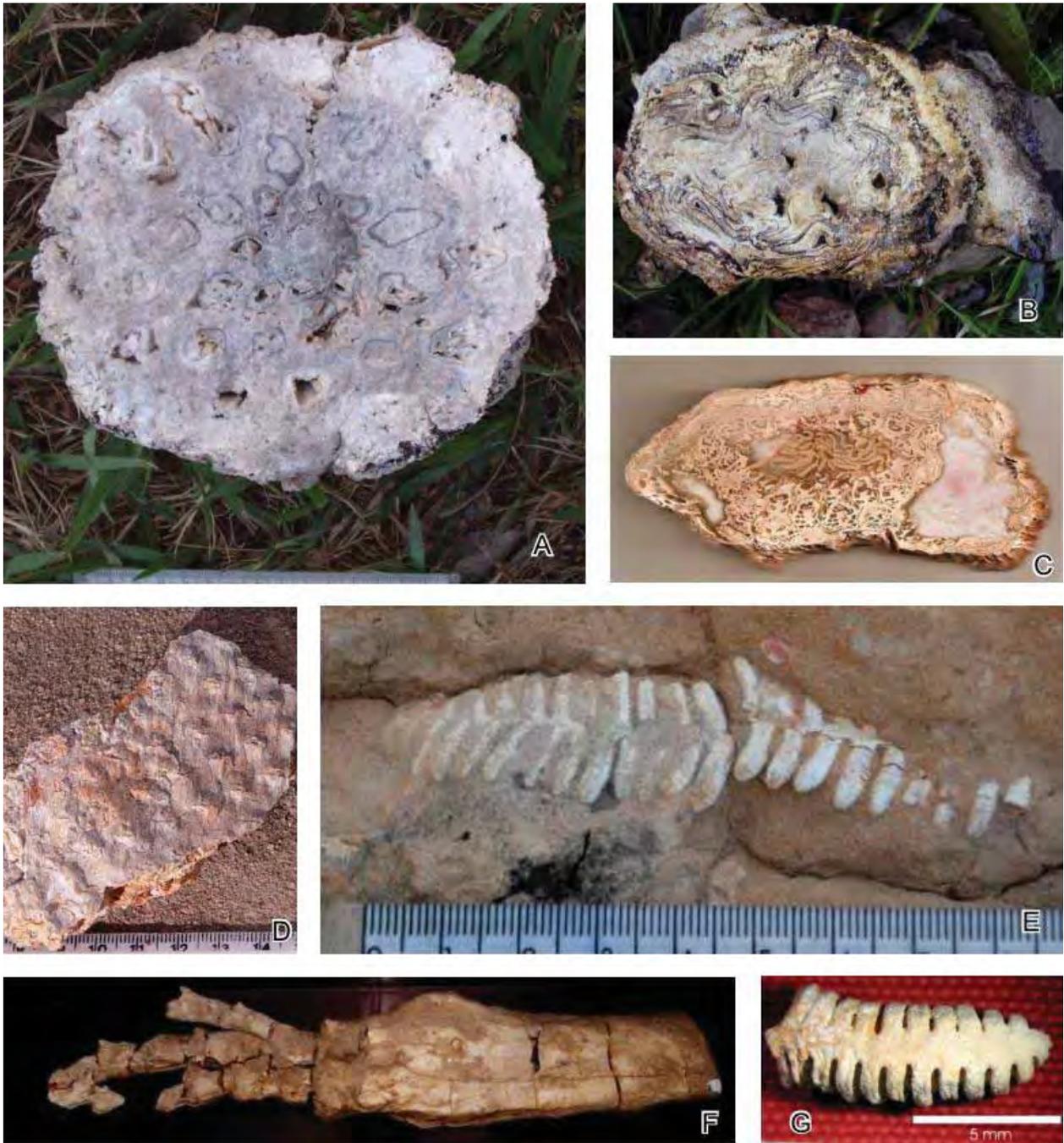


Figura 4.2.8. Exemplos de fósseis encontrados no MNAFTO: A) *Grammatopteris*; B) *Psaronius*; C) *Dernbachia*; D) Licófito; E) Pina de pteridófito; F) Esfenófito com rizoma; G) Pínula de samambaia preservada tridimensionalmente, com extrema proteção dos sinângios pelo limbo foliar

Na Fazenda Buritirana foram encontrados alguns fragmentos de gimnospermas, as raras licófitas, um grande rizoma de esfenófitas e as folhas de pteridófitas. Todos os caules de gimnospermas eram pequenos demais para serem medidos. Por outro lado, neste local foi registrada a maior quantidade de porções basais de Marattiales (figura 4.2.10).



Figura 4.2.9. Exemplar de *Grammatopteris* encontrado na Fazenda Peba



Figura 4.2.10. Porções basais de Marattiales encontrados na Fazenda Buritirana

As porções basais de Marattiales apresentam um espessamento formado por seu manto radicular, com a função de auxiliar na sustentação das pteridófitas arborescentes (figura 4.2.10). Algumas bases ultrapassavam 1 m de diâmetro, segundo medidas realizadas em campo. No manto de raízes adventícias ocorrem ocasionalmente gimnospermas epífitas (figuras 4.2.11 e 4.2.12).



Figura 4.2.11. Exemplo de manto de raízes adventícias de Marattiales, com gimnosperma epífita associada, na Fazenda Buritirana



Figura 4.2.12. Detalhe do manto de raízes adventícias de Marattiales, com gimnosperma epífita associada, na Fazenda Buritirana

Na Fazenda Peba dominam caules de Marattiales, com baixa diversidade da assembléia fossilífera. Como exceção foi encontrado um exemplar de *Grammatopteris* (figura 4.2.9). O nível de preservação dos fósseis é alto, com células bem preservadas.

Assim como a composição de espécies entre os três sítios apresenta diferenças entre si, o mesmo acontece em relação ao tamanho dos fitofósseis. As variáveis utilizadas para esta comparação foram o comprimento total e o diâmetro proximal (base) e distal (ápice). As medições foram realizadas para todos os caules aparentemente *in loco* no depósito sedimentar ou com fragmentos alinhados por distância significativa (figura 4.2.13).



Figura 4.2.13. Procedimento de medição do comprimento de um caule na Fazenda Peba

Os valores mostrados na tabela 4.2.2 correspondem às médias e seus respectivos desvios-padrão de todos os caules encontrados em cada local.

Tabela 4.2.2. Distribuição dos caules segundo a média e o desvio padrão (entre parênteses) de seu comprimento (C), diâmetro na “base” (Dbase) e “ápice” (Dapice), para cada local estudado

Local	C (m)	Dbase (cm)	Dapice (cm)
Peba	3,08 (2,15)	22,70(8,79)	15,91(7,08)
Andradina	1,70(1,14)*	16,58(7,35)	11,75(5,78)
Buritirana	2,74(1,98)	23,35(11,88)	14,90(5,65)

\* Diferença significativa para intervalos de confiança de 95%

As análises estatísticas incluídas nesta tese foram realizadas por meio da plataforma estatística *R*. A análise de variância e o teste *t-Student* dois a dois (Krebs 1999) mostraram que diferenças significativas foram observadas somente para os fósseis da Fazenda Andradina.

Nenhuma diferença significativa estatisticamente foi observada em relação ao comprimento dos caules da Fazenda Peba e Buritirana, tampouco em relação aos dados de diâmetro nos três locais.

Os dados referentes ao comprimento, diâmetro basal e apical de pteridófitas e gimnospermas encontradas nos três locais de estudo são apresentados na tabela 4.2.3. Por meio de um teste *t-Student* de comparação de médias (Krebs 1999) é possível afirmar que as pteridófitas eram estatisticamente maiores que as gimnospermas, no período e local estudados.

Tabela 4.2.3. Distribuição dos caules de pteridófitas e gimnospermas segundo a média e o desvio padrão (entre parênteses) de seu comprimento (C), diâmetro na base (Dbase) e ápice (Dapice)

Fóssil	C (m)	Dbase (cm)	Dapice (cm)
Pteridófitas	2,67 (1,92)*	22,53(9,85)	15,47(5,95)
Gimnospermas	1,64 (1,23)*	14,85(7,34)	9,97(5,41)

\* Diferença significativa para intervalos de confiança de 95%

Para pteridófitas e gimnospermas há uma diminuição tênue entre o diâmetro da base e do ápice, embora o teste estatístico não tenha indicado diferenças significativas. Para pteridófitas, especialmente no gênero *Tietea*, as porções apicais apresentam aspecto quadrangular, sem recobrimento do manto radicular, com cicatrizes dos pecíolos.

O maior exemplar de pteridófitas encontrado (caule 57) foi do gênero *Tietea*, na Fazenda Buritirana. Este caule apresenta 10,9 m de comprimento, diâmetro de 60 cm na base, e 22 cm de diâmetro no ápice. O maior exemplar de gimnosperma (caule 147) foi encontrado na Fazenda Andradina, apresentando 6,98 m de comprimento, com diâmetro de 19 cm de na base, e 14 cm de diâmetro na região próxima a seu ápice.

Entre os fitofósseis encontrados na Fazenda Andradina, 68% foram identificados como gimnospermas, conforme mostrado na tabela 4.2.1. Como as gimnospermas mostraram tamanho estatisticamente menor (tabela 4.2.3) que as pteridófitas, a composição da sua assembléia, dominada por gimnospermas, atuou como fator determinante para a diferença observada na média do comprimento de seus caules (tabela 4.2.2).

Histogramas de classes de comprimento e diâmetro foram elaborados para pteridófitas e gimnospermas (figura 4.2.14) encontradas. Para estes gráficos foram utilizados todos os dados referentes a estas espécies, sem separá-los por local onde foram encontrados. O objetivo era verificar diferenças intrínsecas às espécies (ou seja, que dependem da biologia de cada grupo vegetal) independentemente do local onde os fósseis foram encontrados. Tanto pteridófitas quanto gimnospermas apresentam freqüência para as duas primeiras classes de comprimento (até 2 m).

Estudos sobre Ecologia Florestal utilizam freqüentemente histogramas de classes de tamanho para diagnosticar populações vegetais (Capretz 2004). O padrão mais comum é aquele onde as duas primeiras classes apresentam mais indivíduos, decrescendo com as classes maiores. Ele é chamado de “J Invertido” (*Reverse J*). Ecólogos interpretam estes dados em função da ontogenia e fenologia das espécies: a produção de frutos e sementes/propágulos, aliada a altas taxas de germinação, dão origem a grande número de indivíduos jovens; em função da competição, herbivoria ou uso de recursos ambientais disponíveis (limitantes ou não), apenas parte destas plantas consegue chegar aos estágios seguintes e/ou à idade reprodutiva – é o que se chama recrutamento; poucos indivíduos adultos atingem grandes alturas, e é por essa razão que há menor freqüência nas classes finais dos histogramas (Begon *et al.* 2006).

Histogramas de classes de comprimento foram elaborados para os dados de cada sítio fossilífero (figura 4.2.15). Maior freqüência de indivíduos nas duas primeiras classes de comprimento também foi observada nos histogramas das fazendas Andradina e Buritirana, concordando com o histograma elaborado para todo o MNAFTO (figura 4.2.14). Tais classes correspondem aos indivíduos menores que 2 m. Na Fazenda Peba, excepcionalmente, foram encontrados menos indivíduos na primeira classe, correspondente a fósseis menores que 1m, se comparados com as outras duas áreas. Ainda assim, padrão semelhante ao “J Invertido” foi observado para os três locais de coleta de dados.

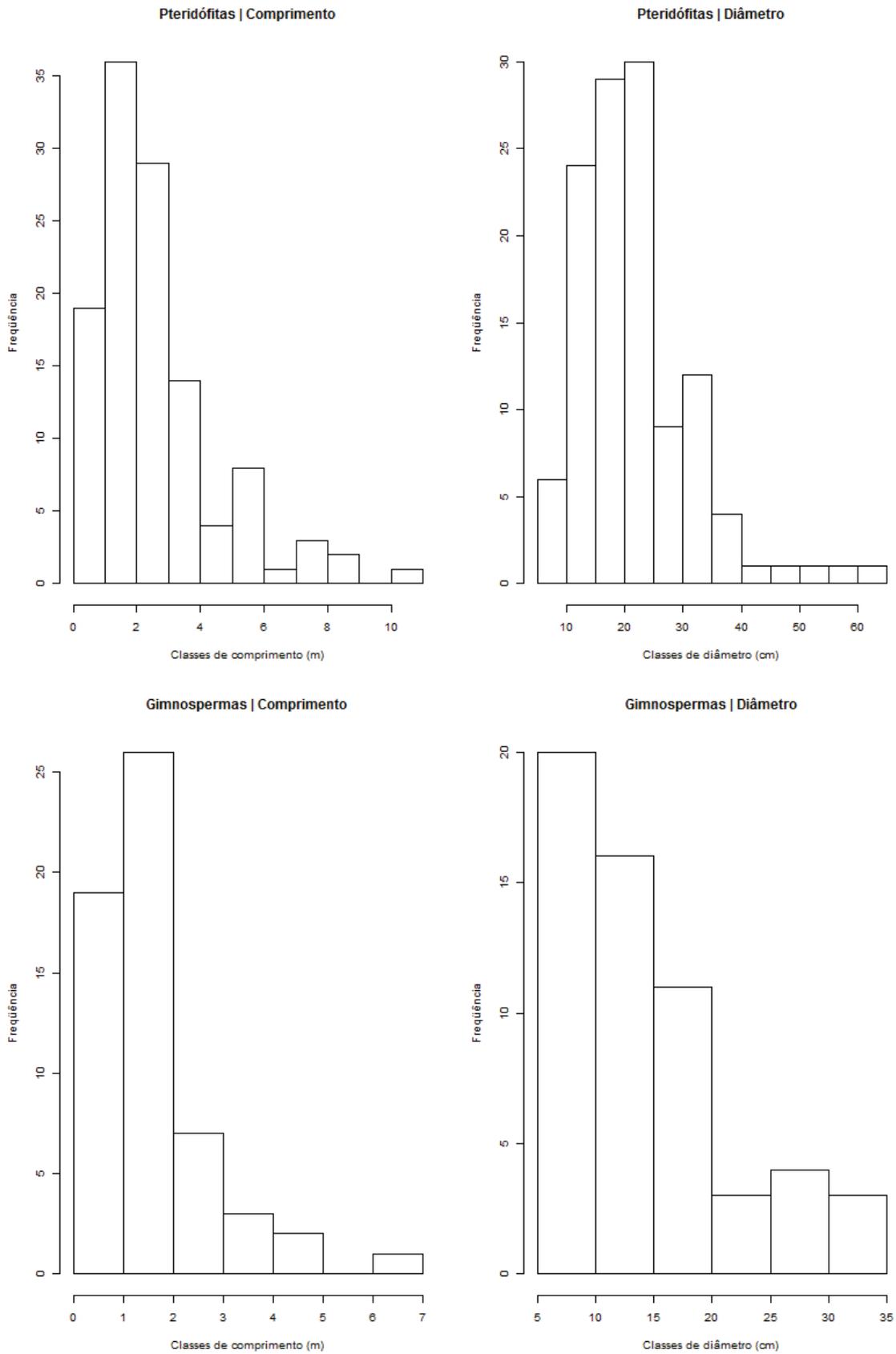


Figura 4.2.14. Histogramas para classes de comprimento (m) e diâmetro (cm) para pteridófitas e gimnospermas encontradas no MNAFTO

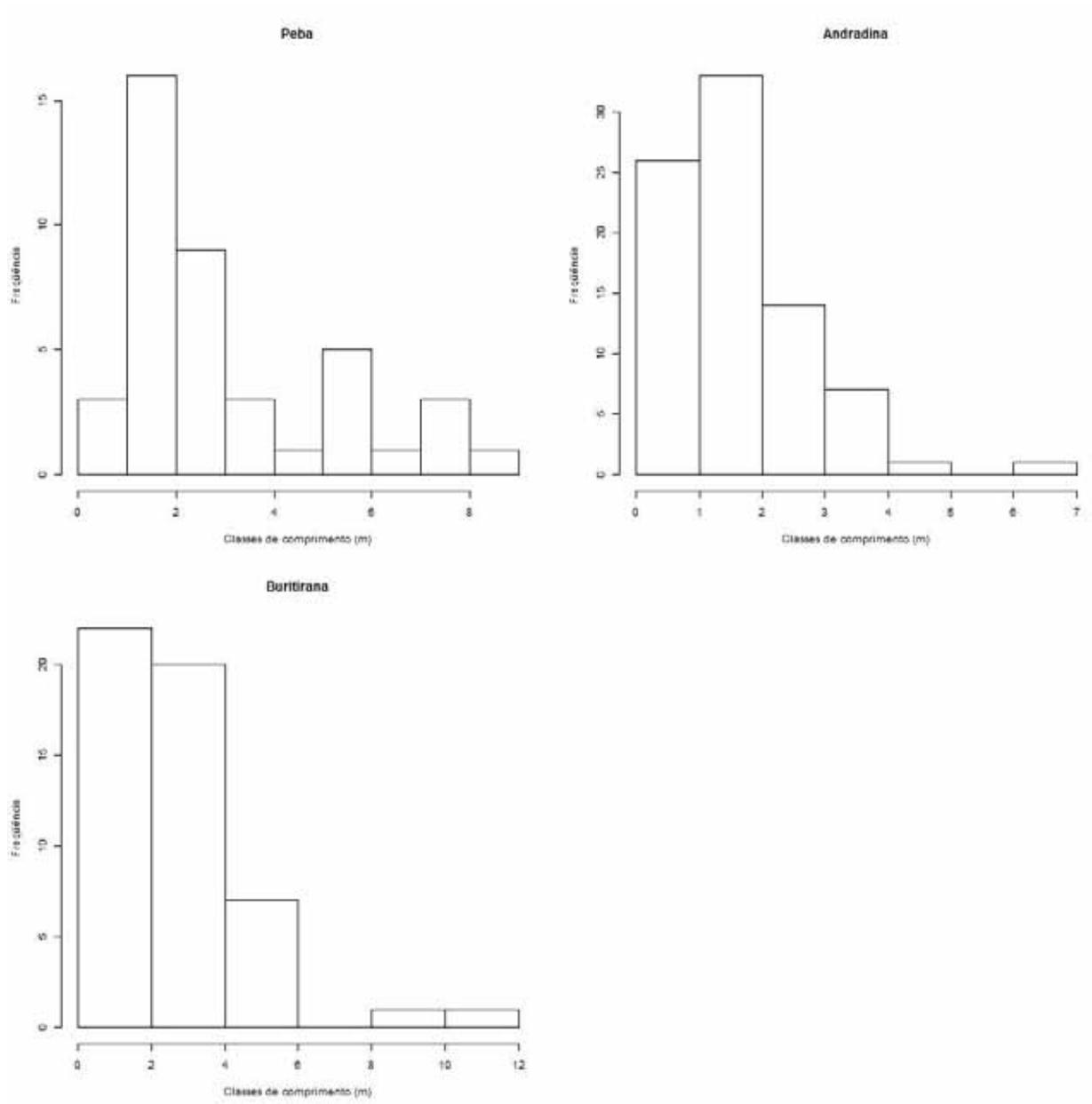


Figura 4.2.15. Histogramas para classes de comprimento (m) para os fitofósseis encontrados nos três principais sítios fossilíferos do MNAFTO

A tabela 4.2.4 mostra que do total de 178 caules medidos, 103 (58%) são classificados nas duas primeiras classes de comprimento, com comprimento inferior a 2 m.

Tabela 4.2.4. Número de caules com comprimento menor que 2 m, nos três sítios fossilíferos

	Peba	Andradina	Buritirana
Caules < 2m	19	59	25
Caules ≥ 2m	23	23	29

Quando se estuda uma floresta do passado, os dados precisam ser interpretados com cuidado. Variações ontogenéticas das populações, bem como a estrutura da comunidade, podem interferir na qualidade dos resultados obtidos. As dimensões dos fósseis são menores do que os tamanhos originais, devido a processos de fragmentação que ocorreram em duas etapas: durante o transporte e sepultamento dos vegetais no ambiente deposicional, e durante o intemperismo recente.

Características morfológicas dos caules, inclusive raízes e ramos conectados, interferem decisivamente na forma com que são transportados durante eventos de inundação, tempestades ou ao longo de rios. Grandes troncos em geral apresentam menor nível de transporte, uma vez que podem ancorar no leito do rio, nas margens ou em outras árvores ainda de pé (Gurnell *et al.* 2002, Saldi-Caromile *et al.* 2004).

O grau de preservação dos fósseis também pode revelar processos anteriores ao sepultamento no ambiente deposicional, e fornecer subsídios para a reconstituição do canal fluvial e de outros paleoambientes. Geralmente, quanto menor a fragmentação, menor é o transporte. Há evidências de abrasão na extremidade distal de alguns caules (figura 4.2.16), provavelmente causada por choques contra barras arenosas nos canais fluviais.



Figura 4.2.16. Porções distais de caules de *Tietea* com evidências de abrasão

Espécies com densidade de madeira alta podem comportar-se da mesma forma que árvores com maior resistência a danos físicos. No caso das pteridófitas arborescentes do estudo, especialmente *Tietea* e *Psaronius*, o manto de raízes adventícias protege quase integralmente seu caule. Estes indivíduos podem simplesmente tombar pela tempestade ou fluxo, e ser transportadas sem muitos danos aparentes.

Se o comprimento dos fósseis pode levar a pequenos enganos a respeito das classes de tamanho, o diâmetro pode ser mais útil, uma vez que dificilmente os danos físicos se manifestam longitudinalmente aos troncos. Segundo Baudrick & Grant (2000), a dimensão “crítica” dos caules pode ser medida através de seu diâmetro, que é quase sempre proporcional ao tamanho do caule, à idade do vegetal e às características intrínsecas da espécie biológica. Tais autores apontam que troncos maiores que 1 m de comprimento, com aproximadamente 10 cm de diâmetro, podem ser classificados como grandes, independentemente da dimensão do canal fluvial.

Nas áreas estudadas, 68% dos caules usados nas análises da Fazenda Andradina eram maiores que 1 m de comprimento; este valor chega a 85% na Fazenda Buritirana, e 95% na Fazenda Peba. Quando se considera o valor de 10 cm de diâmetro, vê-se que 100% dos 178 caules estudados estão acima deste patamar. Tal fato reforça a eficiência dos métodos empregados, dos critérios observados de inclusão de caules para observação *in loco*, e a riqueza e abundância dos registros fossilíferos do MNAFTO.



Figura 4.2.17.Exemplos de caules permineralizados: A) *Tietea* com forma aproximadamente cilíndrica; B) *Tietea* com achatamento; C) Esfenófita (*Arthropitys cacundensis*, holótipo do Museu Nacional sob o código Pb.1625, *in* Coimbra & Mussa 1984) com forma cilíndrica original, com cavidade preenchida por sedimentos; D) *Arthropitys* com achatamento e cavidade fechada devido à compactação; E) Gimnosperma com forma cilíndrica original

Considerando o diâmetro, vale a pena mencionar que entre os 178 caules medidos, 33 (18%) apresentaram sinais de compressão vertical (figura 4.2.17). As pteridófitas apresentaram mais ocorrências de caules achatados (31 exemplares), distribuídas especialmente nas fazendas Pebas (12 registros) e Buritirana (19). Duas gimnospermas apresentaram evidências de compressão, ambas encontradas na Fazenda Andradina.

De modo geral, os vegetais fósseis mantiveram sua morfologia aproximadamente cilíndrica, indicando que a permineralização ocorreu enquanto a pressão exercida pelos sedimentos sobrepostos era pequena. Os registros de caules achatados normalmente correspondem aos exemplares preservados em siltitos (figura 4.1.11), que se compacta muito mais que os arenitos, ou foram encontrados rolados, sem informação sobre a matriz. A deformação dos caules evidencia alternativamente que os caules ainda não estavam totalmente permineralizados quando houve a sobreposição por grande volume de sedimentos.

As figuras 4.2.18 e 4.2.19 mostram três caules de *Tietea* encontrados em afloramento na Fazenda Andradina. Os dois inferiores estão achatados, e o caule posicionado cerca de 1m acima apresenta forma cilíndrica. Todos foram observados em fácies de arenitos finos mosqueados, em uma provável planície de inundação. É possível questionar se o processo deposicional dos três caules ocorreu em etapas distintas ou em um único evento. A segunda hipótese é mais provável, já que os caules inferiores parecem ter sido soterrados por volume de sedimentos maior que o caule superior.



Figura 4.2.18. Caules de *Tietea* em arenitos mosqueados de provável planície de inundação, dispostos perpendicularmente, com indícios de achatamento, na Fazenda Andradina



Figura 4.2.19. Caule de *Tietea* com formato cilíndrico localizado cerca de 1 m acima do nível da figura anterior

O estágio de senescência das plantas também pode contribuir para danos físicos. Indivíduos em estágio mais avançado de idade poderiam sofrer mais quebras no transporte do que indivíduos mais jovens (Baudrick & Grant 2000).

Algumas espécies biológicas podem ser mais suscetíveis a quebras ou apodrecimento. O apodrecimento dos vegetais pode contribuir para quebras físicas, diminuição da densidade e da preservação dos fósseis (MacDonald & Jefferson 1985). Tal fator também pode contribuir para a reconstituição ambiental: vegetais com diferentes níveis de preservação podem sugerir que tenha ocorrido deposição em diferentes eventos, correspondente a tempos distintos. Posteriormente, poderia ter ocorrido retrabalhamento, propiciando a acumulação de vegetais em diferentes estágios de alteração em um mesmo local.

No caso dos vegetais do MNAFTO, os vegetais que eventualmente começaram a se decompor antes da última fase de transporte provavelmente não foram preservados. Diferentemente do *time averaging* em conchas, nos quais podem ocorrer sucessivos retrabalhamentos, é pouco provável que num horizonte fossilífero tenha ocorrido acumulação de caules em tempos distintos. O estado de preservação relativamente similar de todos os caules, inclusive com estruturas celulares excepcionais, é um argumento válido para considerar que os vegetais estudados de cada horizonte pertenceram a uma comunidade relativamente contemporânea. Gurnell *et al.* (2002) ressaltam que em eventos de grandes tempestades, com subsequente inundação, o soterramento dos vegetais é bastante rápido, contribuindo assim para a sua preservação.

É este o princípio adotado no presente estudo: somente as singulares condições ambientais da área do MNAFTO no Eopermiano, em uma região atingida por tempestades eventuais de grande monta, em um regime de chuva de monções, permitiram a excelente preservação dos fitofósseis, seja em quantidade de exemplares, seja na preservação de seus tecidos.

### 4.3 Estudo da orientação dos caules

Arnold (1967) já apontava que até o fim da década de 1970 eram raros os estudos com troncos silicificados no Permiano. Estes seriam mais comuns em registros do Mesozóico e Cenozóico.

Até a década de 1980, poucos eram os estudos sobre a orientação de troncos vegetais em sistemas fluviais (MacDonald & Jefferson 1985). A literatura sobre a orientação de caules vegetais era inconclusiva (Potter & Pettjohn 1977) até então, com diversas interpretações para padrões unidirecionais ou bimodais. A maioria dos estudos de orientação abordava sedimentos marinhos, especialmente com a orientação de moluscos e crinóides. Para fósseis vegetais, as interpretações eram contraditórias. Nas últimas décadas este tema atraiu mais interesse, com alguns artigos de relevância tratando dos processos de morte, transporte e deposição de vegetais em sistemas fluviais (MacDonald & Jefferson 1985, Gurnell *et al.* 2002, Assine *et al.* 2003).

No MNAFTO as primeiras observações em campo logo tornaram evidente a existência de caules localmente orientados em posição paralela ou perpendicular (figuras 4.3.1 a 4.3.3). Tal fato incentivou investigações em áreas maiores, para determinar se haveria um padrão consistente de orientação. Com base na literatura consultada (vide seção Revisão da Literatura/Estudos Tafonômicos), consolidou-se a percepção de que o MNAFTO oferece condições excepcionais no estudo de paleocorrentes: quase nenhuma outra região do globo expõe caules longos em área tão ampla e, adicionalmente, com indícios de orientação controlada pelo ambiente deposicional.

Conforme explicado no capítulo anterior, praticamente todos os caules apresentam fraturas ou encontram-se fragmentados por ação do intemperismo. Fragmentos pequenos podem ter sido removidos da posição original por ação das enxurradas. Assim, foram considerados apenas os caules mantidos nas camadas sedimentares, ou os fragmentos suficientemente próximos para identificá-los como pertencentes a um mesmo indivíduo. Fragmentos curtos, ligeiramente separados uns dos outros, mas com certo alinhamento, foram considerados como um caule único nas análises de orientação (figura 4.3.4).

Para estudar o padrão de orientação dos caules foram confeccionadas rosetas de orientação (Assine *et al.* 2003, Dubiel *et al.* 2001, Heckert & Lucas 1998, Keller & Hendrix 1997, McKnight *et al.* 1990). Para isso foram utilizados intervalos de classe de 10°.



Figura 4.3.1. Exemplo de caules dispostos de modo paralelo e oblíquo, às margens da estrada TO-425, ao Sul de Bielândia (UTM 23M 0184705/9170382)



Figura 4.3.2. Exemplo de caules dispostos de modo paralelo e perpendicular, na Fazenda Andradina



Figura 4.3.3. Caules ou eixos caulinares de gimnospermas subparalelos na Fazenda Andradina



Figura 4.3.4. Três caules muito fragmentados, com paralelismo original mantido, na Fazenda Buritirana

Como as duas primeiras classes de comprimento foram representativas para todos os sítios paleontológicos, bem como para pteridófitas e gimnospermas, decidiu-se utilizá-las como critério para estudos detalhados da orientação dos caules. De fato, caules com comprimento máximo de 2 m podem apresentar comportamento diferente de caules maiores, sobretudo no contexto do transporte destes vegetais de seu local de vida até a área onde foram sepultados. O tamanho dos caules é fator preponderante no seu transporte por corpos d'água de grande correnteza e volume.

As rosetas construídas para os três principais sítios fossilíferos são mostradas na figura 4.3.5. Nota-se o evidente padrão Leste-Oeste (E-W) para os caules da Fazenda Peba. Na Fazenda Andradina o padrão de orientação é Nordeste - Sudoeste (NE-SW). Os caules da Fazenda Buritirana mostraram orientação predominantemente Sudeste (SE).

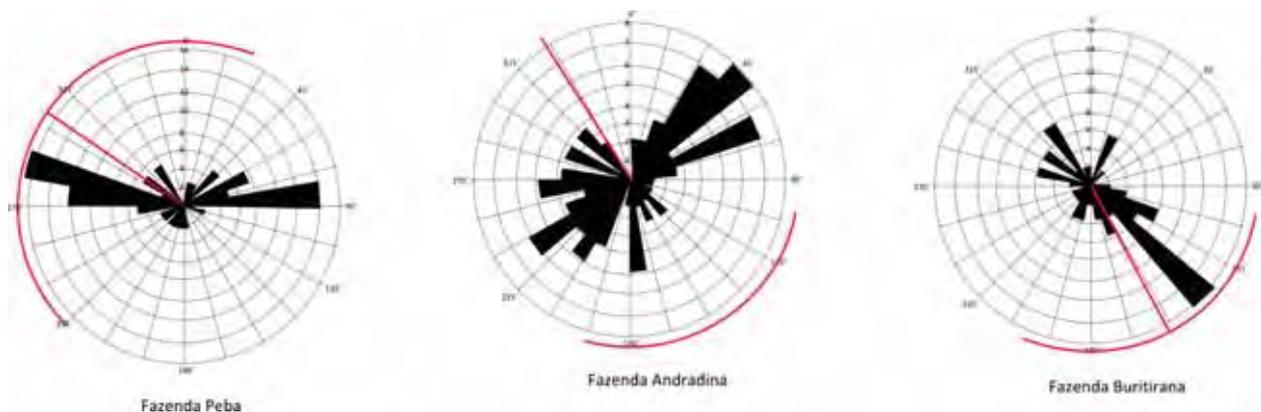


Figura 4.3.5. Rosetas de orientação dos caules para os três sítios fossilíferos

Os resultados indicados pelas rosetas suscitam discussões interessantes. Gurnell *et al.* (2002) ressaltam que orientações unidirecionais de caules e troncos indicam claramente canais fluviais amplos, de alta energia (à montante). Caules alinhados paralelamente aos cursos d'água são excelentes indicadores do tamanho dos canais. Abbe & Montgomery (2003) também abordaram o assunto no estudo de ambientes fluviais modernos. Os canais precisam ser suficientemente largos e profundos para que os caules possam girar livremente na superfície da água até encontrarem a posição mais estável de transporte. Em canais muito estreitos e rasos, se os caules forem proporcionalmente longos, ocorrem colisões dos caules com as margens, com as barras de meandro e entre os próprios caules, de modo que sua deposição resulta em

posições caóticas (figura 4.3.6). No MNAFTO, a orientação dos caules é muito mais paralela e a densidade de caules por área é muito menor do que no exemplo da literatura.

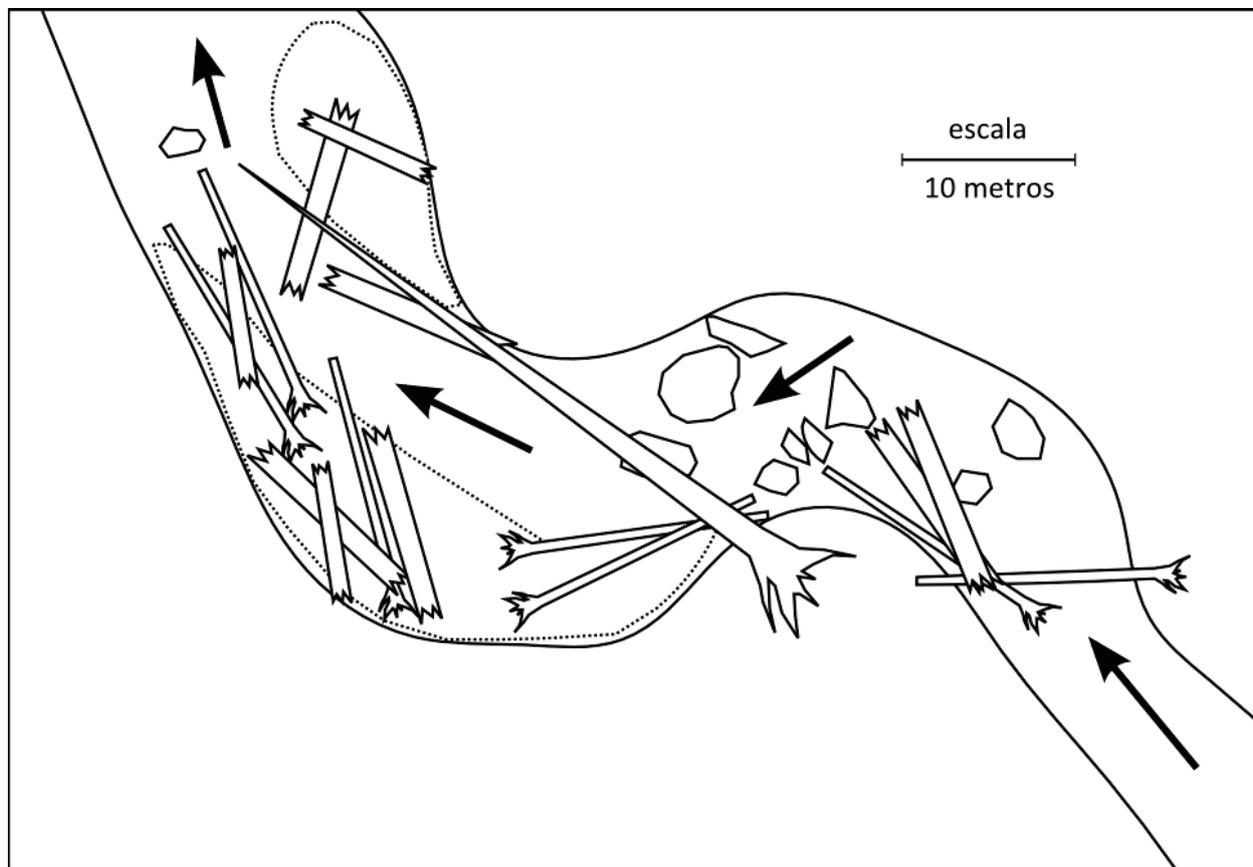


Figura 4.3.6. Caules relativamente longos depositados em canal meandrante estreito e raso, adaptado de Abbe & Montgomery (2003)

De acordo com MacDonald & Jefferson (1985) e Gurnell *et al.* (2002), além da espécie e tamanho das plantas, outro fator torna-se relevante para o seu transporte: sua morfologia. Plantas com troncos de formatos irregulares oferecem maior resistência à corrente, e da mesma forma que ocorre com grandes troncos, elas podem ancorar-se nas margens ou no leito do canal (Saldi-Caromile *et al.* 2004). Espécies com troncos mais regulares e simétricos são normalmente transportados paralelamente ao canal fluvial, oferecendo menor resistência à corrente. Isto vale também para as copas e as raízes de vegetais. Estudos tafonômicos e observações em canais modernos apontam uma tendência de que a parte distal das plantas (a copa) é prioritariamente carregada pelo fluxo, em direção à jusante (MacDonald & Jefferson 1985, Wnuk & Pfefferkorn 1987). Esta orientação é verificada especialmente nos casos em que

o caule é relativamente reto, sem ramos volumosos no ápice, e ainda possui raiz conectada (Saldi-Caromile *et al.* 2004). Devido à inércia, as porções mais pesadas dos caules ficam para trás (montante) e o ápice aponta para a jusante (figura 4.3.7).

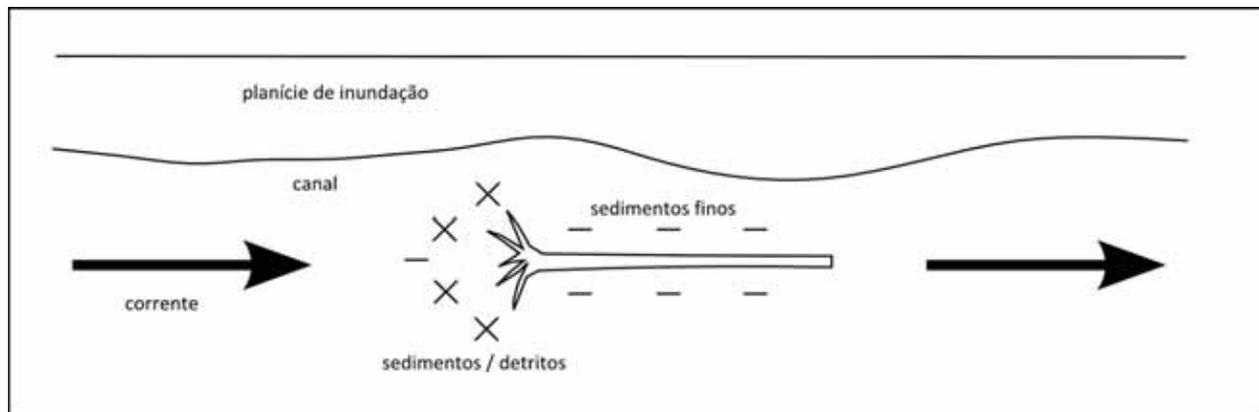


Figura 4.3.7. Orientação de caule flutuante na água na presença de fluxo unidirecional em canal, adaptado de Saldi-Caromile *et al.* (2004)

No caso das pteridófitas do MNAFTO, especialmente os caules do gênero *Tietea*, destaca-se sua morfologia quase cilíndrica. Muitos indivíduos, com manto de raízes adventícias conectadas, assemelham-se ao caule esquematizado na figura 4.3.7. Alguns representantes de *Tietea* têm morfologia um pouco mais cônica, porém provavelmente indiferente quanto à orientação de transporte. O fato de que foram encontradas algumas partes apicais de *Tietea* arredondadas devido à abrasão corrobora a interpretação de que seu transporte deve ter ocorrido com o ápice apontado para jusante. Somente nesta posição o ápice poderia ter sofrido choques com obstáculos no canal.

Gurnell *et al.* (2002) apresentaram interessante esquema para comparar a orientação de caules em canais do tipo *braided* com os meandantes (figura 4.3.8). Nos primeiros, os caules isolados acumulam-se nas barras de canal em posições ligeiramente paralelas e com as partes apicais orientadas para jusante. Nos locais com maiores acumulações de caules, ainda nos canais do tipo *braided*, suas posições são caóticas porque uns constituem obstáculos para os outros. Nos canais meandantes, os caules depositam-se principalmente nas margens dos canais, nas barras de meandro, e também apresentam posições caóticas.

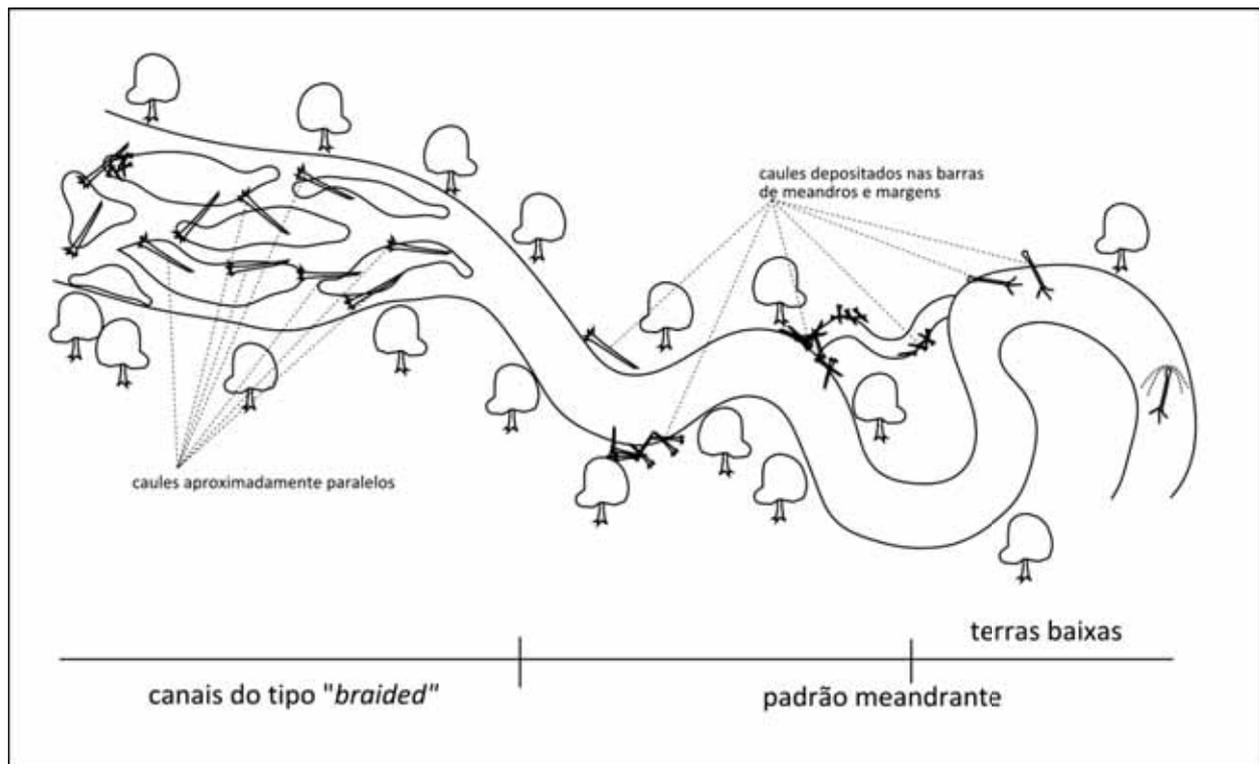


Figura 4.3.8. Acumulações de caules conforme distintos canais, variando do tipo *braided* a meandrante, adaptado de Gurnell *et al.* (2002)

Wnuk & Pfefferkorn (1987) salientam que padrões unidirecionais são mais comuns em eventos de grande magnitude, como tempestades sobre áreas florestadas.

A seguir são apresentadas com detalhe as rosetas de orientação em cada sítio fóssilífero, bem como as observações feitas em campo para cada área.

### 4.3.1 Sítios fossilíferos: I) Fazenda Peba

A Fazenda Peba, próxima do limite Oeste do MNAFTO, possui menor riqueza de fósseis, se comparado com os outros dois sítios fossilíferos.

As rosetas elaboradas para este sítio mostram evidente orientação Leste-Oeste (E-W) dos caules (figura 4.3.1.1). As rosetas para caules pequenos (menores que 2 m de comprimento) e grandes (com tamanho superior a 2 m) são muito semelhantes.

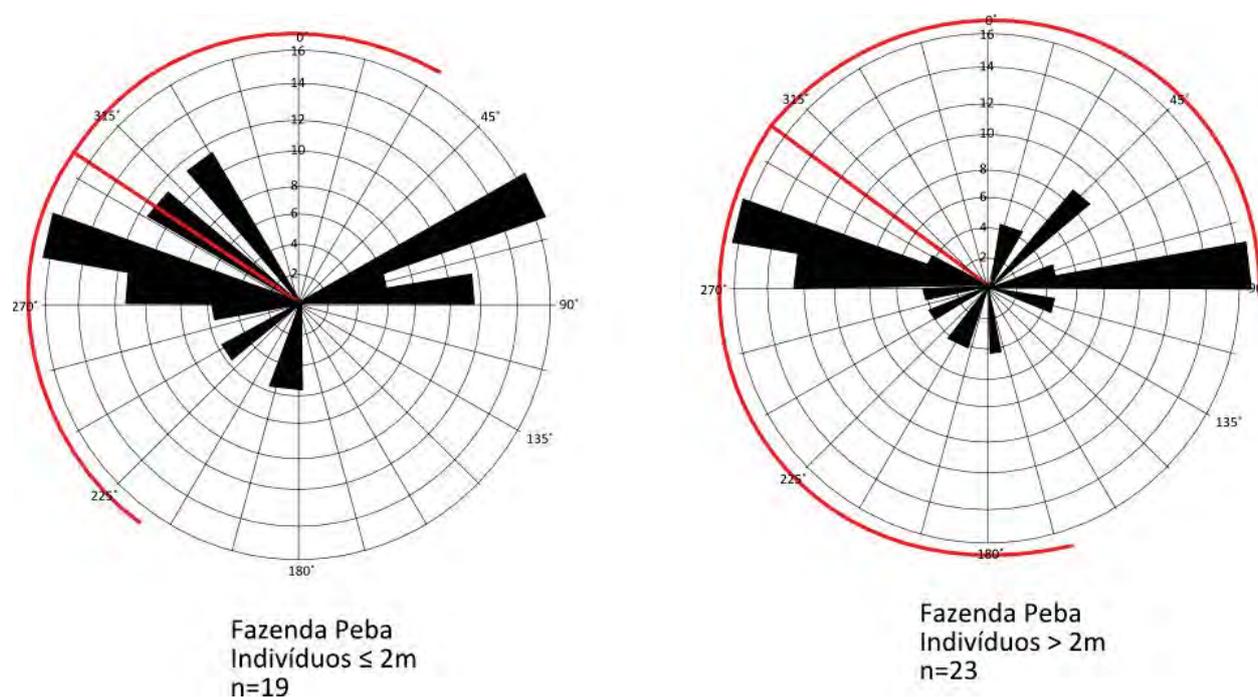


Figura 4.3.1.1. Rosetas de orientação dos caules na Fazenda Peba, segundo classes de tamanho

A orientação observada para os caules neste local é evidentemente unidirecional. Caules orientados a Leste e a Oeste poderiam ter se quebrado, perdendo a parte basal, sendo levados simplesmente pelo fluxo mais forte, posicionando-se paralelamente às margens do canal.

O único afloramento com estratificação cruzada preservada na Fazenda Peba indica paleocorrente para SW (vide capítulo 4.1). Contudo, este dado é muito local, pouco representativo e de um ponto distante da área onde foram analisados os caules.

Foi construído um mapa com a localização de cada um dos fósseis encontrados na Fazenda Peba. O mapa é mostrado na figura 4.3.1.2, com o respectivo código numérico de identificação do caule. O comprimento dos traços representa o comprimento medido em

campo. As setas representam a região distal. Referências a observações geológicas e a figuras apresentadas ao longo deste estudo são mostrados espacialmente nesta figura.



Dois caules de pteridófitas foram encontrados em curiosa posição perpendicular, mostrados na figura 4.3.1.3. Trata-se dos caules numerados com os códigos 13 e 14, mostrados também na figura 4.3.1.2.



Figura 4.3.1.3. Caules de *Tietea* dispostos perpendicularmente, na Fazenda Pebá

#### 4.3.2 Sítios fossilíferos: II) Andradina

A Fazenda Andradina apresenta proporcionalmente maior diversidade e abundância de fósseis que a Fazenda Pebá. Nas proximidades dos caules amostrados, foram encontrados afloramentos com estratificação cruzada, que foram utilizados na análise dos resultados conjuntamente com a orientação azimutal observada para os caules.

As rosetas elaboradas para este sítio são reproduzidas na figura 4.3.2.1. A direção preferencial dos caules é Nordeste - Sudoeste (NE-SW). Este padrão se repetiu tanto para as rosetas dos caules pequenos (< 2 m) quanto para as rosetas dos caules maiores.

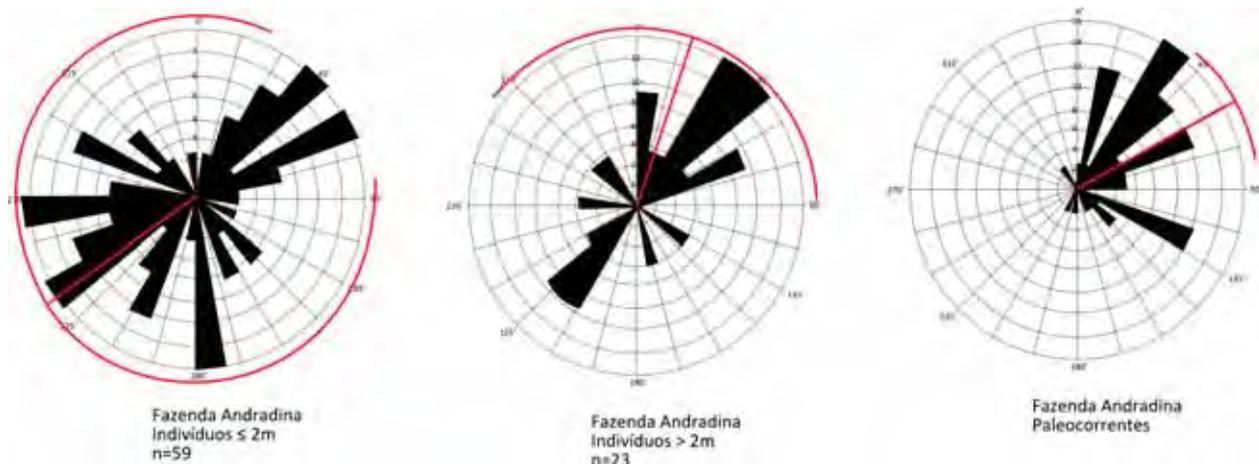


Figura 4.3.2.1. Rosetas de orientação dos caules na Fazenda Andradina, segundo classes de tamanho, e roseta de orientação dos planos de estratificação cruzada em afloramento próximo aos caules

Os caules mostraram uma orientação preferencialmente unidirecional, com sentido ao NE, e secundariamente a SE, graças às observações dos afloramentos de estratificação cruzada (mostrados na seqüência de figuras 4.3.2.2 até 4.3.2.5) realizados no local. Estes resultados mostram uma pequena variação em relação à direção preferencial dos caules na Fazenda Peba (direcionados preferencialmente para E).

Os arenitos com estratificação cruzada indicam paleocorrentes principalmente para NE e secundariamente para SE (vide capítulo 4.1). As primeiras são bastante consistentes com a direção principal apresentada pelos caules. Contudo, alguns caules aparentemente apontam para rumos diametralmente opostas, a favor e contra a paleocorrente. Alguns caules podem ter sido transportados com folhas e pecíolos ainda anexados. Em razão da dinâmica dentro dos canais, as frondes poderiam exercer influência sobre o modo com que estes vegetais teriam sido transportados, na medida em que oferecem maior superfície de contato com o canal e, portanto, maior atrito.

Nos caules amostrados, entretanto, não há frondes preservadas. Sua ausência nos caules na Fazenda Andradina pode ser interpretada em função da decomposição das pinas e pínulas após a deposição dos vegetais, uma vez que se acredita que estavam anexadas aos caules durante o curto transporte. Outras folhas, já desconectadas dos caules, podem ter sido carregadas para jusante e destruídas no trajeto. Algumas raras pínulas foram encontradas em arenito mosqueado, conforme mostrado na figura 4.2.6, em área próxima à provável planície

de inundação. A Fazenda Buritirana (a seguir), localizada à jusante da Fazenda Andradina, de fato apresenta maior quantidade de pinas e pínulas preservadas.

Caules longos não são muito freqüentes na Fazenda Andradina (figura 4.3.2.2). O alto grau de fragmentação dos exemplares sugere fluxo intenso, traduzido em velocidade grande da correnteza. São relativamente raros os exemplares preservados com as raízes ou a base conectados. A falta de raízes durante o transporte seria uma explicação alternativa para a orientação dos caules para lados opostos. Em um estudo tafonômico em Mack Creek, Gurnell *et al.* (2002) registram que menos de 6% dos caules e troncos encontrados tinham raízes conectadas.

A localização de todos os caules medidos na Fazenda Andradina, bem como porções basais de Marattiales e a localização dos afloramentos com estratificação cruzada podem ser observados no mapa mostrado na figura 4.3.2.2. O mapa também mostra espacialmente registros fossilíferos apresentados em figuras ao longo do estudo, além da área escolhida para a construção do mosaico de fotografias, mostrado a seguir na figura 4.3.2.3.

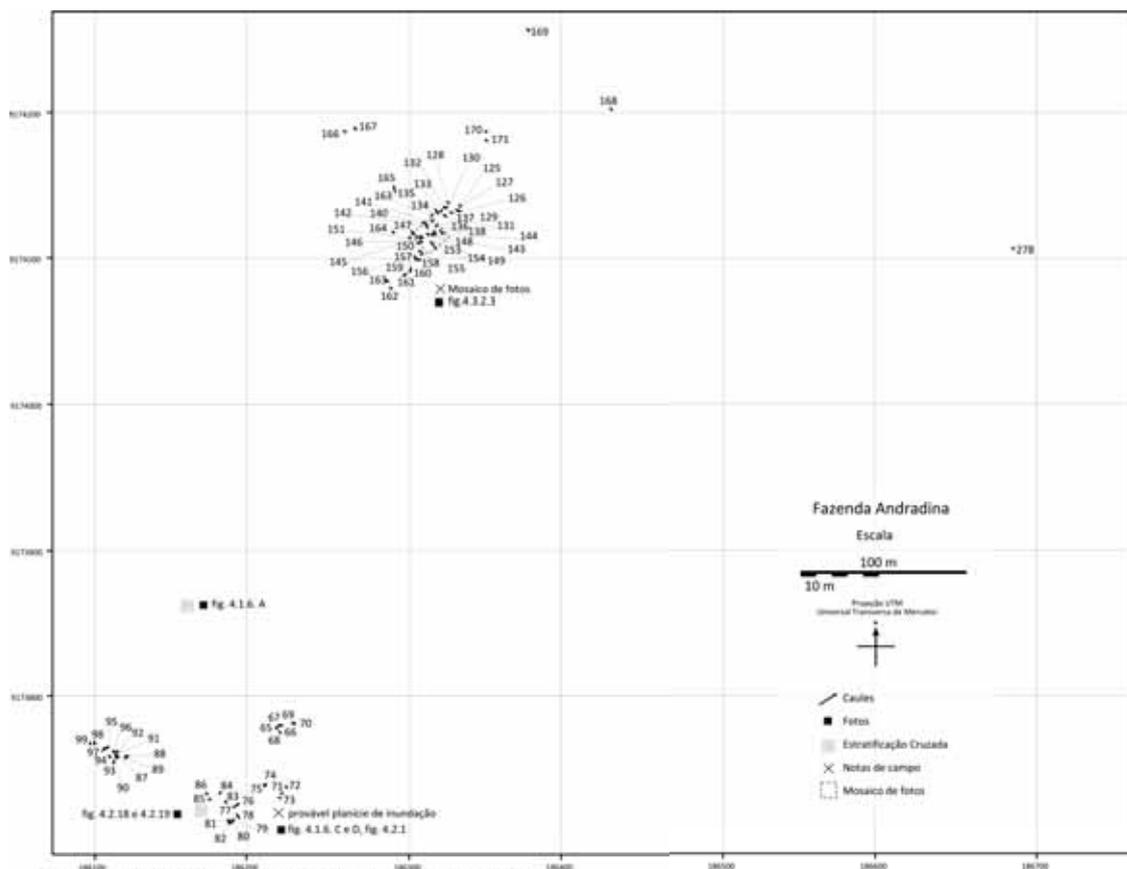


Figura 4.3.2.2. Mapa dos caules encontrados na Fazenda Andradina



Figura 4.3.2.3. Mosaico fotográfico de caules fósseis encontrados na Fazenda Andradina

A composição florística deste local é dominada por gimnospermas (tabela 4.2.1 mostrada anteriormente no início da seção Resultados/Estrutura das assembléias fossilíferas). Este foi o único sítio fossilífero onde as gimnospermas dividiram a dominância com as pteridófitas. Interpreta-se que o fluxo era mais intenso do que na Fazenda Buritirana (descrita a seguir), propiciando que a água alcançasse locais mais distantes do canal fluvial principal, onde provavelmente as gimnospermas se localizavam. Poucas foram as pteridófitas fósseis encontradas neste sítio fossilífero (figura 4.3.2.4).



Figura 4.3.2.4. Caule de *Tietea* encontrado na Fazenda Andradina

### 4.3.3 Sítios fossilíferos: III) Buritirana

A Fazenda Buritirana, próxima ao limite Leste do MNAFTO, não apresenta histórico significativo de extração ilegal de fósseis, especialmente em função da dificuldade de deslocamento. Trata-se da localidade de maior diversidade e abundância de fósseis.

A orientação dos caules neste local é predominantemente na direção Sudeste (SE), de acordo com as rosetas construídas (figura 4.3.3.1). O padrão dos caules pequenos é menos definido do que os caules grandes, em razão da sua mobilidade dentro da correnteza e de provável transporte por fatores intempéricos.

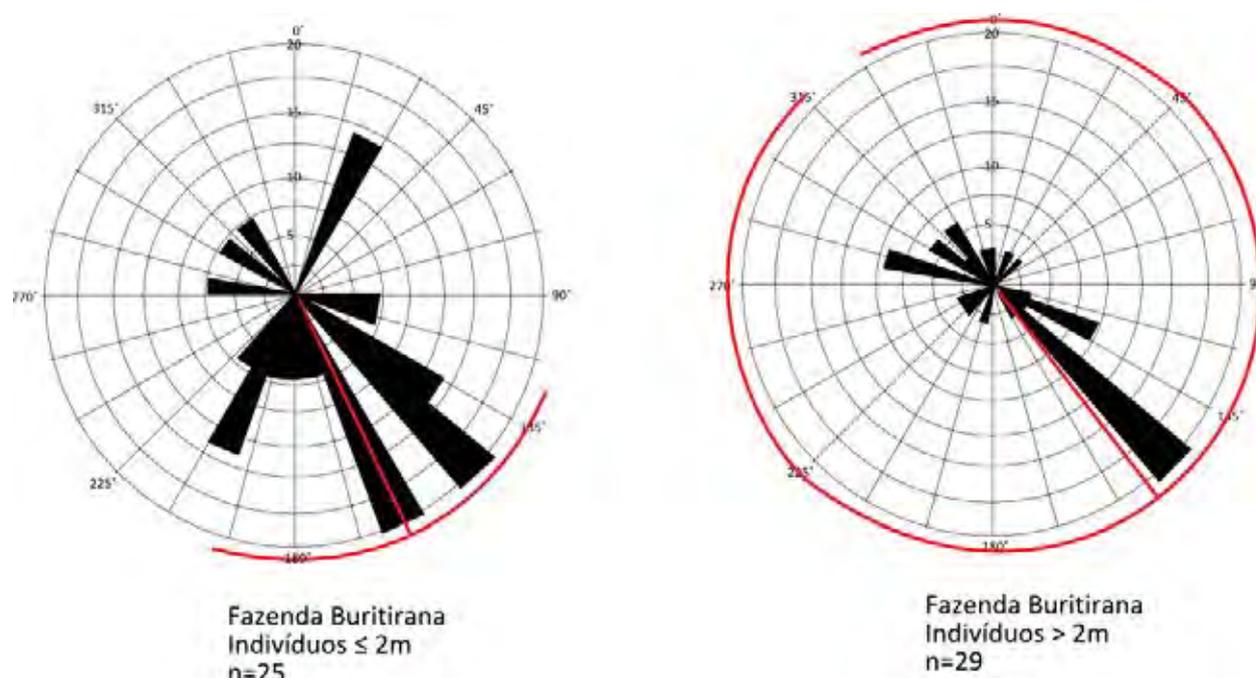


Figura 4.3.3.1. Rosetas de orientação dos caules na Fazenda Buritirana, segundo classes de tamanho

A convergência do padrão de orientação dos fitofósseis na Fazenda Buritirana (figura 4.3.3.1), as muitas bases de Marattiales encontradas e a ausência de gimnospermas permitem supor que houve pouco (ou praticamente nenhum) transporte a partir do seu local de vida.

Na Fazenda Buritirana, em eventos de grandes tempestades, as samambaias arborescentes simplesmente tombavam. Aqui a correnteza não tinha tanta energia quanto nos outros dois sítios fossilíferos, e por isso não teria a capacidade de quebrar ou fragmentar os

caules. Muitas vezes os vegetais tombavam por cima das frondes, protegendo pinas e pínulas da decomposição e do fluxo em si.

O mapa dos caules encontrados e medidos na Fazenda Buritirana é mostrado na figura 4.3.3.2, com respectivos códigos numéricos de identificação, localização dos afloramentos com estratificação cruzada e com as bases de Marattiales encontradas.

Terras mais baixas têm uma vocação natural a receber grande monta de sedimentos e material carregado de terras mais altas (Gurnell *et al.* 2002). Em pequena escala, a velocidade baixa da corrente faz com que poucos galhos ou ramos sejam transportados, e a maioria é depositada e soterrada abaixo d'água. Da mesma forma, grande quantidade de material vegetal é armazenada nas áreas marginais, como bancos côncavos, bordas de ilhas vegetadas e margens de canais secundários ou temporários. Quanto maior for o contato entre canais ativos e planícies de inundação vegetadas, maior será a quantidade potencial de madeira a ser depositada.

Este parece ser o caso da Fazenda Buritirana. Na estiagem, pequenos córregos mantinham-se por meio da influência de lençóis freáticos. Nas chuvas, grandes áreas eram alagadas, formando uma ampla planície inundada sem grande profundidade (devido a baixa variação topográfica). As principais espécies de pteridófitas encontradas no local habitavam provavelmente as margens dos canais principais e ocasionalmente áreas úmidas próximas a eles. As gimnospermas provavelmente ocupavam áreas mais distantes e/ou terras mais altas, e é por essa razão que não haveria registros deste grupo neste sítio fossilífero.

O mosaico construído para a Fazenda Buritirana é mostrado na figura 4.3.3.3.





Figura 4.3.3.3. Mosaico fotográfico de caules fósseis encontrados na Fazenda Buritirana

A respeito dos mosaicos fotográficos, vale fazer aqui um comentário sobre a metodologia.

Collinson (1986) aponta a necessidade de estudar sistemas fluviais em escala local e regional, fazendo uso de imagens de satélite ou fotografias aéreas. Especialmente em um sistema de leques aluviais, é possível que apenas em uma escala de centenas de quilômetros quadrados seja possível fazer observações sobre os processos que regulam todo o sistema.

Uma analogia ao uso de fotografias aéreas foi feita no presente estudo para investigar o padrão de orientação dos caules em dois dos três principais sítios fossilíferos dentro dos limites do MNAFTO. Nas fazendas Andradina e Buritirana foram confeccionados mosaicos fotográficos (figuras 4.3.2.3 e 4.3.3.3) dos dois maiores afloramentos de fitofósseis, com o objetivo de fornecer uma melhor opção de observação da disposição dos caules em microescala.

Wnuk & Pfefferkorn (1987) utilizaram semelhante método em escala próxima à utilizada neste estudo. Os autores utilizaram um grid de 24 m<sup>2</sup> para mapear a orientação de fósseis em afloramento na Bacia de Bernice, no Carbonífero da Pensilvânia, Estados Unidos. Os maiores caules encontrados (da pteridosperma *Neuropteris*), naquele estudo, atingiriam 5 m de comprimento.

#### 4.4 Paleoambiente

A interpretação dos paleoambientes, em contexto mais regional, esbarra com o volume ainda pequeno de informações. O MNAFTO corresponde a uma área muito pequena em comparação as dimensões da Bacia do Parnaíba. A literatura sobre o Grupo Balsas pouco contribui para uma discussão em contexto paleogeográfico amplo. Os conhecimentos paleoambientais sobre esta unidade suscitam mais perguntas do que respostas conclusivas, agravando-se pela tradicional afirmativa de que os caules petrificados são atribuídos à Formação Pedra de Fogo. Ainda que os caules pertençam de fato à Formação Motuca, permanecem dúvidas quanto sua relação estratigráfica com os evaporitos e outras litologias. Nenhum dado sobre a orientação das estratificações cruzadas na região foi divulgado na literatura até o momento. Ressalta-se que as considerações apresentadas aqui se referem à escala local do Sudoeste da Bacia do Parnaíba. Importante ressaltar que, embora ocorra a impressionante exposição de caules no MNAFTO, poucas são as exposições verticais de rochas sedimentares na área.

No MNAFTO as rochas sedimentares apresentam textura muito fina, sem a presença de seixos ou clastos maiores. A granulação máxima observada foi de areia fina. Se a região fosse mais acidentada, seria possível observar clastos de argilitos retrabalhados em planícies de inundação. A região, assim, deveria ser muito plana no tempo geológico estudado. A área-fonte poderia estar muito distante.

A orientação consistente, marcadamente unidirecional, nos caules em todos os sítios fossilíferos (e de forma mais marcada na Fazenda Buritirana) derruba a idéia de um sistema fluvial meandrante. No caso de rios estreitos e com muitos meandros, o padrão de orientação resultante seria mais caótico e aleatório do que o observado (Keller & Swanson 1979). Adicionalmente, os canais meandrantés gerariam grande acumulação de caules em suas margens (Gurnell *et al.* 2002). A presença de estratificação cruzada em vários pontos dentro do MNAFTO corresponderia a barras de meandro, ou a um sistema intrincado de canais associados em extensa planície.

Wnuk & Pfefferkorn (1987) apontam que o padrão unidirecional dos caules é uma evidência clara de grandes áreas florestadas varridas por violentas tempestades, com grandes períodos de inundação por meio do extravasamento de canais fluviais e a sedimentação em inúmeros depósitos marginais.

MacDonald & Jefferson (1985) realizaram uma série de experimentos de corrente (*flume experiments*) em laboratório, para abordar aspectos do transporte de caules e fragmentos vegetais por rios. Em velocidades muito baixas (próximas a um sistema lacustre) os caules assumiam trajetórias muito irregulares; em velocidades médias a altas os caules eram transportados quase paralelamente às paredes do canal artificial, com a parte distal sempre apontada para jusante. Essa observação concorda com os estudos de Wnuk & Pfefferkron (1987), quanto à direção e o sentido de transporte de caules, sempre com a parte distal (copa) apontada para jusante.

Chuvas torrenciais são típicas de regiões com clima marcadamente sazonal, especialmente em climas de monções (Borchert 1999, Lodge *et al.* 1994). Conforme a discussão no próximo capítulo, trabalhos paleoclimáticos de caráter global sobre o Permiano sugerem que o Oeste da Pangea apresentava clima de monções, com chuvas torrenciais até estiagens pronunciadas. Esta interpretação coaduna, entre outros aspectos, com o processo de permineralização por sílica dos caules, que teria envolvido fases com muita evaporação da água. Também condiz com a falta de preservação de matéria orgânica (como carvão) e com determinadas feições xeromórficas das frondes de Marattiales (Tavares *et al.*, 2008). Contudo, as dimensões relativamente grandes de muitos caules de Marattiales analisados, entre outras características inerentes às pteridófitas, descartam a hipótese de estiagens extremamente secas. O clima possivelmente era semi-árido.

Na estiagem, pequenos córregos mantinham-se por influência de lençóis freáticos rasos, em relevo quase plano. Pequenos lagos podem ter existido, relativamente perenes no sistema, ocupando canais fluviais abandonados, onde se estabeleceram faunas bentônicas de moluscos. Alguns vegetais chegavam aos lagos, possivelmente também sob a influência de tempestades, e eram sepultados por sedimentos finos. As dimensões relativamente grandes dos caules de Marattiales no MNAFTO sugerem que muitos vegetais tiveram tempo para crescer entre uma tempestade e outra.

Considerando-se que a Bacia do Parnaíba era intracratônica e, portanto, apresentava subsidência muito lenta, é normal que apenas episódios excepcionais tenham deixado algum registro sedimentar. As condições normais do dia-a-dia não devem estar bem representadas. Neste contexto, é surpreendente que os caules tenham sido preservados sem retrabalhamento. O pequeno espaço para a acomodação de sedimentos nas bacias intracratônicas paleozóicas

normalmente causava inúmeros retrabalhamentos dos depósitos sedimentares. Portanto, pode-se considerar a ocorrência da Bacia do Parnaíba como sendo excepcional.

Apesar da área relativamente extensa do MNAFTO, a orientação geral dos caules não se modifica muito de uma fazenda para a outra. Pode-se afirmar que existe uma tendência de orientação Oeste-Leste (W-E) no MNAFTO, sugerindo-se um fluxo principal para Leste (E), com pequenos desvios locais. Assim, as fazendas Peba, Andradina e Buritirana estariam ordenadas de montante para jusante num sistema sedimentar mais amplo.

É bastante atraente a interpretação de que a região sul da Bacia do Parnaíba ou áreas mais extensas ficavam sujeitas a intensas tempestades. Os fortes fluxos de água gerados nas tempestades causavam escavações rápidas no terreno e preenchimentos dos canais. A água certamente extravasava para fora dos canais e atingia a área de inundação. A rápida enxurrada seria a responsável por carregar sedimentos e arrancar vegetais. As principais espécies de pteridófitas encontradas no MNAFTO provavelmente habitavam as áreas mais baixas da planície, mais atingidas pelas enxurradas. As gimnospermas provavelmente ocupavam áreas mais distantes dos fortes fluxos de água, o que deve explicar a sua menor abundância nas assembléias fossilíferas. As inundações podem ter afetado enormes áreas das planícies, mas as águas não chegavam a ficar profundas devido à baixa variação topográfica.

Em geral, os episódios de tempestade acarretavam em sepultamento raso dos caules nos sedimentos (nas barras de canal fluvial ou nas planícies de inundação). Desta forma, os caules eram permineralizados por sílica sem sofrer deformação.

A Fazenda Peba, mais próxima à área-fonte, teria mantido a direção principal do fluxo para Leste (E). Na Fazenda Andradina, em posição intermediária na área de estudo, o fluxo deveria ter sido intenso o suficiente para alcançar áreas laterais mais distantes onde viviam gimnospermas, arrastadas junto com as pteridófitas. Na parte mais distal, exemplificada pelas observações feitas na Fazenda Buritirana, o fluxo tinha menor energia ou área estudada era mais marginal ao fluxo, fazendo com que os vegetais praticamente tombassem, sem muito transporte.

Observando a área delimitada do MNAFTO, seus afloramentos e a orientação dos caules fósseis, é possível supor que a região consistia na parte mais distal de um amplo sistema de leques aluviais, cuja área-fonte poderia estar distante a dezenas ou centenas de quilômetros a Oeste. São necessários mais dados de paleocorrentes em outras áreas da Bacia do Parnaíba para substanciar tal interpretação.

Leques aluviais são descritos como áreas com acentuada sedimentação à jusante de áreas topograficamente elevadas, em pontos onde canais confinados se expandem lateralmente (Collinson 1986, Daniels & Rhoads 2003, O'Connor *et al.* 2003). A expansão dos fluxos causa redução da profundidade e velocidade da corrente, com conseqüente perda na eficiência da deposição. Leques aluviais apresentam grande variação em sua escala espacial: vão de algumas dezenas de metros até enormes cones de dezenas de quilômetros. No Paleozóico, bacias intracratônicas registram depósitos possivelmente atribuíveis a leques aluviais muito distais, talvez alcançando a escala de centenas de quilômetros. Seus processos condicionantes variam em função de fatores como a litologia da área-fonte, clima e quantidade de água. A arquitetura dos leques aluviais é, por fim, um produto da evolução complexa, resultando em uma ampla gama de morfologias distintas (Martínez *et al.* 2010).

No caso de amplos leques aluviais, pequenas variações nos padrões de orientação, tais como verificadas em cada sítio do MNAFTO, são esperadas de acordo com a escala espacial da área de estudo (aproximadamente 40 km x 20 km, em uma área de cerca de 800 km<sup>2</sup>). Cada sítio fossilífero está distante aproximadamente 10 a 15 km entre si.

Segundo Collinson (1986), é possível que em regiões mais distais de leques aluviais ocorram áreas de relativa aridez. Isso se deve à diferença na quantidade de água (*discharge*) nas épocas de chuvas (com inundações de grande monta) e estiagem, e às características climáticas de cada região.

Nas áreas mais distais a aridez era salientada, em função dos canais ficarem mais restritos localmente, e dependerem do sistema de lençóis freáticos e de áreas úmidas em suas margens. Sedimentos típicos de clima semi-árido retratariam os locais entre os pequenos corpos d'água, sem grande presença de vegetais (exceto talvez gimnospermas, mais adaptadas à escassez momentânea de água).

#### 4.5 Províncias paleofitogeográficas do Permiano

Reconstruções paleofitogeográficas são baseadas em dados incompletos, devido à natureza dos dados paleontológicos (Wnuk 1996). Fósseis vegetais são preservados em poucos tipos de ambientes, e por essa razão parte da riqueza e abundância de espécies de plantas é completamente desconhecida à luz da ciência moderna. Problemas na sistemática de fósseis, no nível de preservação das assembléias fossilíferas, no conhecimento descontínuo ao longo da escala de tempo geológico e certa imprecisão no estudo de unidades geológicas são fatores que interferem diretamente no estudo de províncias fitogeográficas do passado.

A identificação de fósseis que coexistiram de modo contemporâneo, a partir de reconstituições de ambientes mais prováveis segundo os registros geológicos, e a comparação com padrões de distribuição e comportamento dos biomas atuais, parece ser a ferramenta mais precisa para estudar paleofitogeografia. O entendimento da composição de cada comunidade depende de "*ocorrências fortuitas*" (Wnuk 1996), como assembléias fossilíferas excepcionalmente preservadas (a exemplo do MNAFTO), embora a diversidade de biocenoses em qualquer parte do passado geológico será sempre subestimada.

A visão tradicional de quatro principais unidades florísticas no Permiano perdurava durante todo o século XX, com destaque para estudos sobre a Flora Gondvânica, no Gondwana meridional (Austrália, Antártica, Índia, Sul da África e da América do Sul), a Flora Euroamericana (América do Norte e Europa), Angárica (Rússia e Leste Europeu) e Cataísica (Ásia Menor). O provincialismo florístico ocorrida desde o Eocarbonífero e acentuou-se gradualmente durante o Neocarbonífero, em decorrência da glaciação no Gondwana (Ianuzzi & Rösler 2000, Stephenson *et al.* 2008). A diferenciação das floras reflete não apenas o gradiente térmico latitudinal (Peyser & Pulsen 2008), como também a umidade relativa: as regiões banhadas pelo Mar de Tétis eram mais úmidas, enquanto o lado ocidental da Pangea, em áreas subtropicais, tornava-se cada vez mais seco (Rees *et al.* 1999).

As figuras 4.5.1 e 4.5.2 mostram a distribuição dos continentes desde o Eocarbonífero ao Neopermiano, adaptado de Scotese (2001).

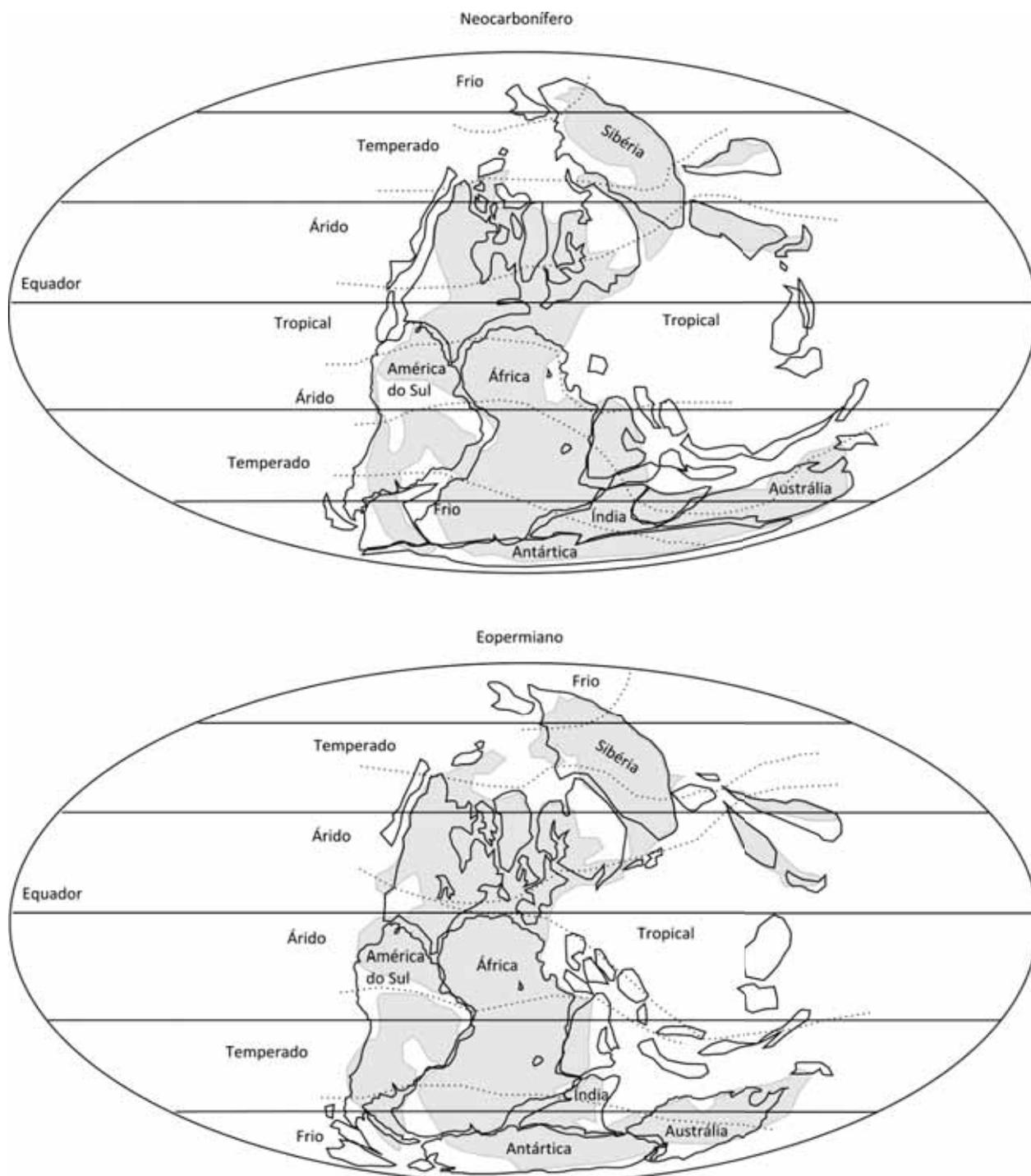


Figura 4.5.1. Distribuição dos continentes, principais características climáticas e terras emersas (em cinza) do Neocarbonífero ao Eopermiano (adaptado de Scotese 2001)

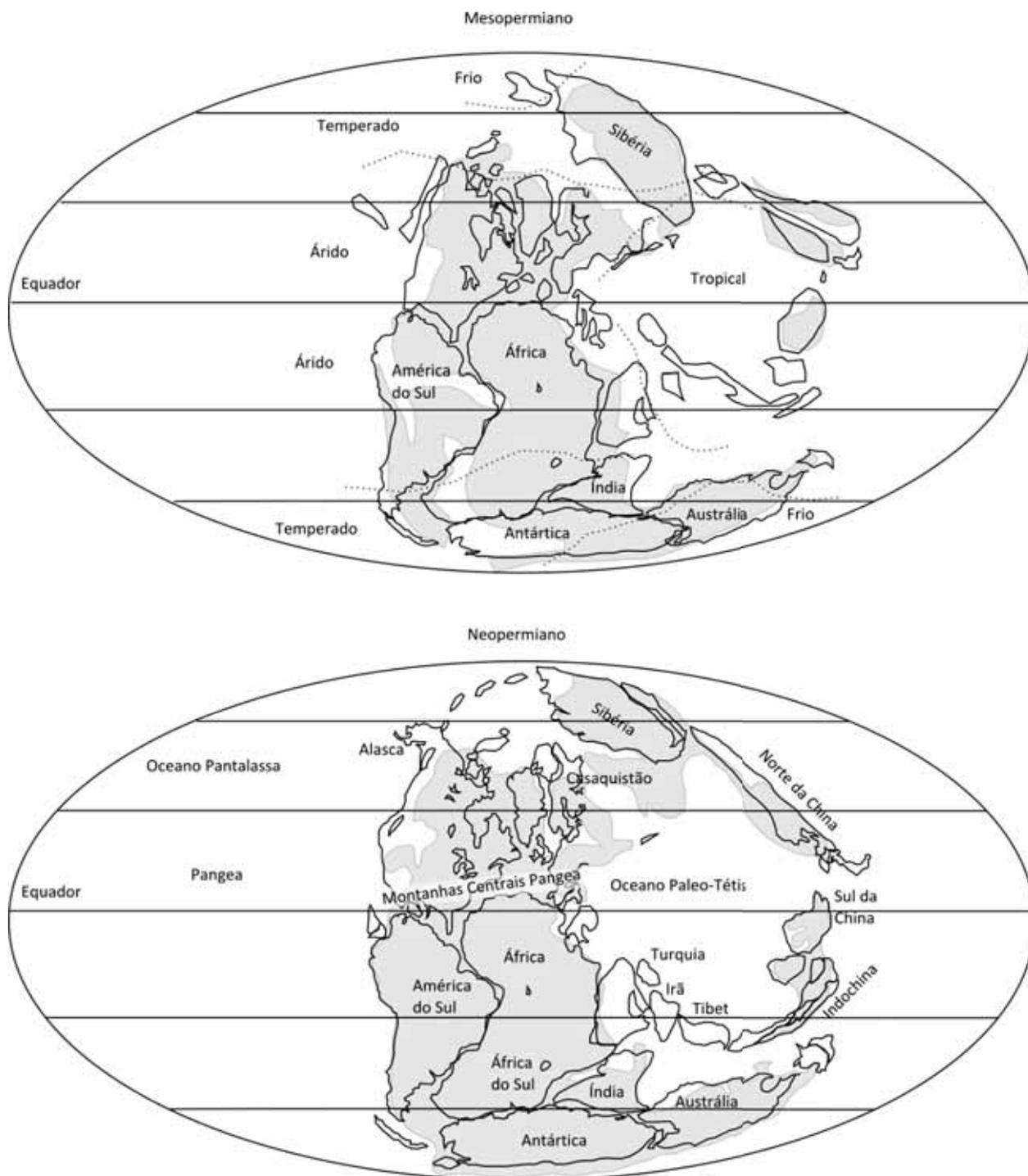


Figura 4.5.2. Distribuição dos continentes, principais características climáticas e terras emersas (em cinza) do Mesopermiano ao Neopermiano (adaptado de Scotese 2001)

Vários autores têm contestado a visão de apenas quatro províncias principais (Ricardi-Branco 2008, Ricardi 1994, Wnuk 1996, Chaloner & Lacey 1973), especialmente em relação às floras da América do Norte, Europa e Norte da América do Sul.

Durante o final do Paleozóico, as bacias do Paraná e do Parnaíba ocuparam posições paleogeográficas aproximadamente opostas (Mussa & Coimbra 1987): em altas latitudes a Bacia do Paraná, e no limite com a província Euroamericana, em baixas latitudes, a Bacia do Parnaíba. De fato, a posição paleogeográfica das duas bacias é “... *provocativa, no sentido de estimular e possibilitar comparações entre taofloras supostamente diversas, mas quase contemporâneas, dentro dos limites do próprio país*” (Mussa & Coimbra 1987, p.902, segundo parágrafo).

A Bacia do Paraná encontrava-se certamente nos domínios da Flora Gondvânica, enquanto a Bacia do Parnaíba merece discussão muito mais cautelosa a respeito de sua posição paleofitogeográfica. A figura 4.5.3 mostra a distribuição das províncias paleofitogeográficas no Neocarbonífero e Eopermiano, adaptado de Scotese (2001).

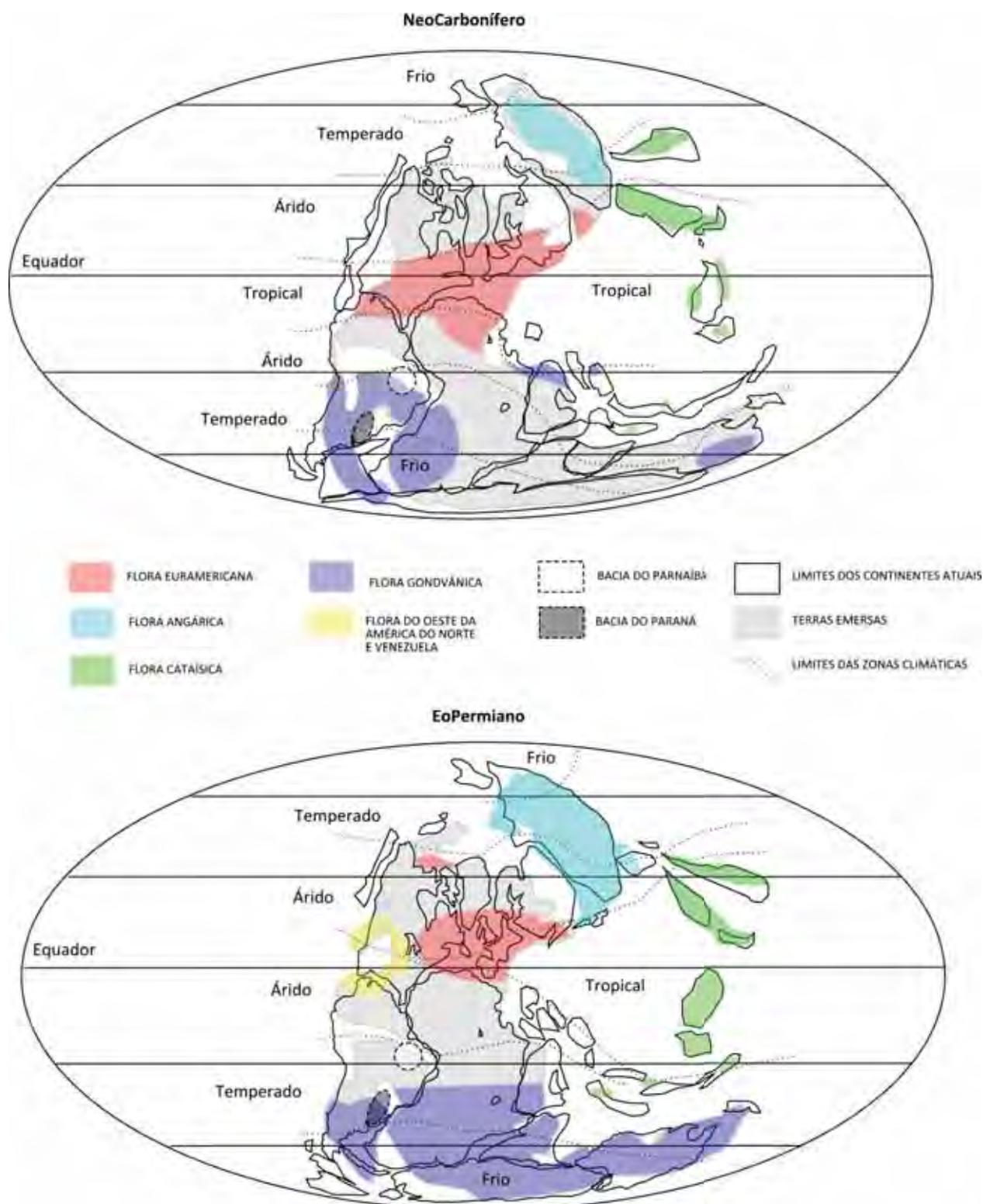


Figura 4.5.3. Províncias paleofitogeográficas do Neocarbonífero e Eopermiano, com destaque para terras emersas, características climáticas e a localização das Bacias do Paraná e Parnaíba (adaptado de Scotese 2001)

Na passagem do Carbonífero para o Permiano, praticamente ao final da glaciação, surgiram as primeiras gimnospermas denominadas glossopterídeas (dos gêneros *Gangamopteris*, predominante, e *Glossopteris*), ocupando enormes áreas do Gondwana meridional. Tendo em vista a importância adquirida pelas glossopterídeas logo após a glaciação até o final do Permiano, e seu caráter endêmico à Flora Gondvânica, esta é designada como “Flora *Glossopteris*” (Rösler 1975, Archangelski 1984, Cúneo 1996).

Chaloner & Lacey (1973), em trabalho antigo, mas com valor didático e correção apropriada, ilustram a área de abrangência da Flora *Glossopteris* e de outras floras no Permiano, em mapa reproduzido na figura 4.5.4. As floras mistas da Turquia e Arábia (Kerp *et al.* 2006) e a Flora Venezuelana (Ricardi-Branco 2008) foram incluídas na figura original.

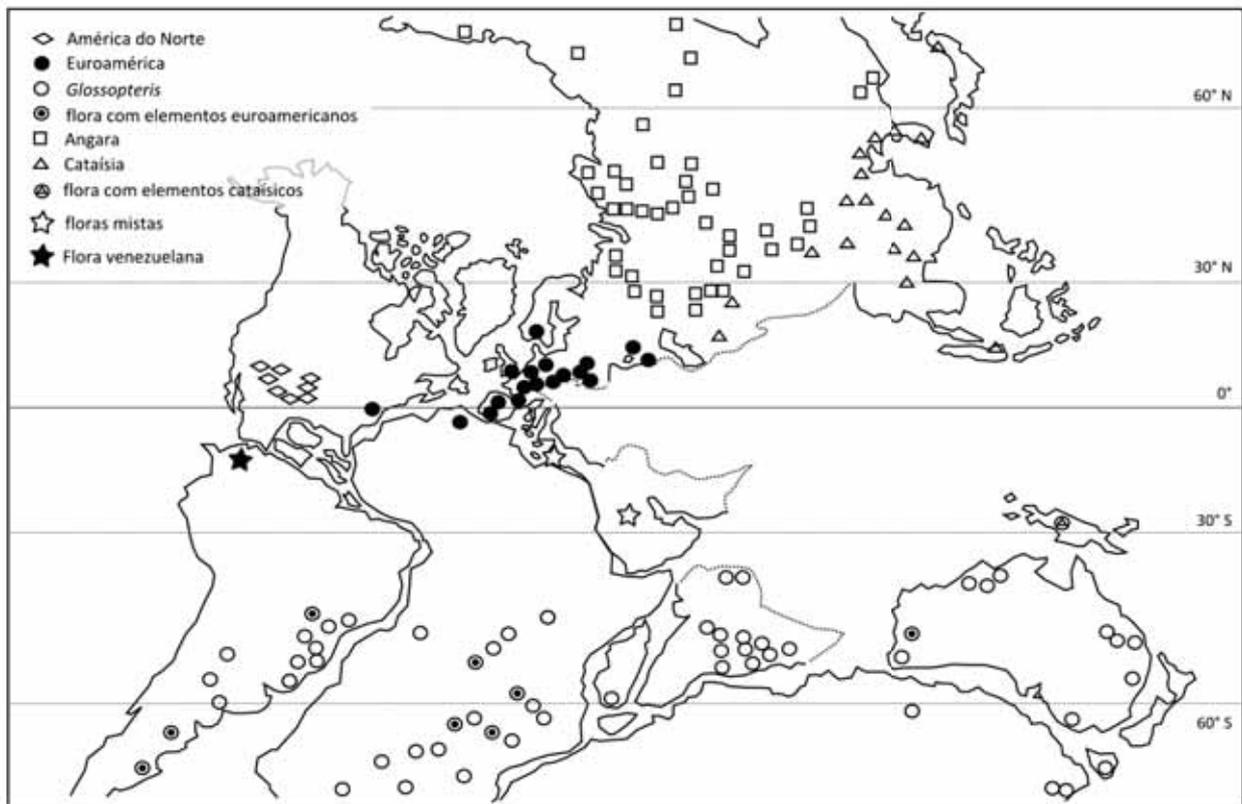


Figura 4.5.4. Províncias paleofitogeográficas e floras mistas do Eopermiano (adaptado de Chaloner & Lacey 1973)

O apogeu das glossopterídeas (predominantemente *Glossopteris*, em detrimento a *Gangamopteris*) ocorreu ainda no Eopermiano, quando se originaram diversas camadas de carvão em condições relativamente úmidas, temperadas frias a quentes. O carvão formou-se

pela acumulação principalmente de licófitas em áreas costeiras, em fase de discreta subida do nível relativo do mar. Estas eram menores do que os táxons pré-glaciais, mas adquiriram porte e abundância consideráveis (Ricardi-Branco 2003). Na Bacia do Paraná, o intervalo com carvões registra também Cordaitales, coníferas, esfenófitas e o aparecimento das Marattiales (através de frondes com sinângios). O ingresso de samambaias na região da Bacia do Paraná deve refletir o gradual aquecimento do clima e o deslocamento do Gondwana para o Norte (Rösler 1978). Estes vegetais, assim como algumas esfenófitas e gimnospermas, discutivelmente representariam elementos procedentes do Hemisfério Norte (Bohlin 1978, Rohn & Rösler 1987, Kerp *et al.* 2006).

Na Venezuela, em Marrocos e na Argélia há registro de floras, do Pensilvaniano ao Eopermiano (Ricardi-Branco 2008). As mais antigas floras se assemelham à Flora Euroamericana, e as mais novas mostram certo empobrecimento e notável grau de diferenciação, refletindo provavelmente as novas condições de aridez. Não há, nestas floras, a presença de glossopterídeas. Na Venezuela surgem gigantopterídeas, fato que sugere forte relação com a flora do Sudoeste e Centro dos Estados Unidos (Ricardi-Branco 2008).

A ocorrência de diversos exemplares de *Psaronius* (sobretudo *Psaronius brasiliensis*, *Psaronius arrojadoi* e *Tietea singularis*) em diversos locais das duas bacias abordadas permite tecer algumas hipóteses, segundo Mussa & Coimbra (1987): a primeira hipótese sustentaria que estes vegetais estariam presentes na Bacia do Paraná até o momento em que as temperaturas tornaram-se substancialmente mais frias, durante o Carbonífero; após este período de mudança climática, tais plantas ficaram restritas a regiões periféricas da Bacia do Paraná, ao mesmo tempo em que glossopterídeas alcançavam novas áreas e novos nichos vagos na parte mais central. A segunda hipótese, segundo os autores citados, seria de que a dispersão das psaroniáceas teria ocorrido do Norte em direção ao Sul, após o Carbonífero. Nas duas hipóteses sugeridas, tais vegetais apareceriam em zonas periféricas com menor influência do clima frio presente na Bacia do Paraná durante o Permiano.

Existem problemas implícitos na adoção de *taxa* de outras províncias paleoflorísticas na classificação de vegetais fósseis na Bacia do Paraná. Soma-se a isso a inerente dificuldade em reconhecer as verdadeiras relações filogenéticas entre as espécies descritas (Rohn & Rösler 1987).

Da mesma forma, merecem cautela os registros de vegetais permianos dos mesmos *taxa* feitos para as bacias do Parnaíba e do Paraná. Mussa & Coimbra (1987) pediam atenção à

identificação taxonômica de *Dadoxylon* e *Araucarioxylon* para gimnospermas encontradas nas duas bacias. Estes teriam sido criados para espécimes endêmicos de floras setentrionais, e após sua identificação, foram utilizados para identificar diversos outros vegetais em outras províncias paleofitogeográficas. Os autores sugerem que a evolução destes vegetais teria ocorrido independentemente das formas gondvânicas, pelo menos no nível de gênero.

Archangelski & Arondo (1975) já apontavam a influência de elementos setentrionais na flora do Permiano da Bacia do Parnaíba, com caráter cosmopolita, após as mudanças climáticas ocorridas após o Carbonífero. Estes elementos setentrionais seriam, portanto, da Flora Euramericana. Herbst (1999), por exemplo, descreveu diversos exemplares do gênero *Psaronius*, comum em floras setentrionais, encontrados dentro dos limites do MNAFTO, e que pertencem à coleção particular do Sr. Ulrich Dernbach.

Durante o Permiano, na província Euroamericana, destaca-se a floresta petrificada de Chemnitz (Bacia de Erzgebirge, Permiano), Leste da Alemanha (Röbber 2006). Entre os diversos vegetais que compõem a paleoflora ricamente preservada *in situ* por rápido sepultamento promovido por cinzas vulcânicas há 280 milhões de anos, estão diversos elementos comuns à assembléia fossilífera encontrada no MNAFTO (Röbber & Galtier 2002a, 2002b, 2003).

A floresta que havia em Chemnitz no Permiano era dominada por diversos exemplares dos gêneros *Psaronius* (22 espécies identificadas na coleção), *Scolecopteris* (3 espécies), *Pecopteris* e *Grammatopteris*, entre outras espécies de pteridófitas (Röbber 2006). No MNAFTO haveria provavelmente seis espécies de caules de pteridófitas arborescentes preliminarmente identificadas até o momento da elaboração do presente estudo: *Psaronius brasiliensis*, *Psaronius sinuosus*, *Tietea singularis*, *Tietea derbyi*, *Grammatopteris freitasii*, *Dernbachia brasiliensis*, *Botryopteris nollii* (Röbber 2006, Röbber & Galtier 2002a, 2002b, 2003). Também foram encontrados pecíolos e folhas que podem ter pertencido aos vegetais identificados através de caules, como *Stipitopteris*, *Scolecopteris*, *Pecopteris*, *Sphenopteris*, *Lobatopteris* e outras pinas e pínulas ainda não identificadas completamente (Mussa & Coimbra 1987, Röbber & Galtier 2002a, 2002b, 2003, Röbber 2006, Tavares *et al.* 2008, 2009).

Novos registros de pteridófitas ocupando os estratos inferiores da Floresta Petrificada do Tocantins Setentrional, tal como *Grammatopteris freitasii* (Röbber & Galtier 2002a), previamente conhecidos em apenas duas localidades da Europa (Autun, França, e Chemnitz, Alemanha), ressaltam o caráter de diversidade de espécies que havia no Permiano do Tocantins, bem como sua similaridade com floras setentrionais.

Em Chemnitz ocorrem muitas esfenófitas (sobretudo *Calamites*, *Arthropitys* e *Annularia*) (Rößler 2006). No MNAFTO há registros de *Arthropitys* sp. e *Sphenophyllum* sp. Além de pteridófitas e esfenófitas, compunham a floresta de Chemnitz licófitas, pteridospermas e gimnospermas *incertae sedis* (Rößler 2006). Três diferentes tipos de *Dadoxylon* sp. e diversas raízes de gimnospermas foram encontradas nos sítios fossilíferos do MNFATO. Mussa & Coimbra (1984) identificaram *Amyelon* na Bacia do Parnaíba, que é atribuído a uma raiz de Cordaitales conhecida em diversas bacias do hemisfério Norte. Mussa & Coimbra (1987) reconheceram *Cycadoxylon*, que seria um gênero de Cycadoxyleae cosmopolita.

A similaridade entre a Floresta Petrificada de Chemnitz com a Floresta Petrificada do Tocantins Setentrional fica evidente ao comparar seus gêneros comuns. As duas florestas parecem ter sido dominadas por samambaias arborescentes (Marattiales), com diversas pteridófitas menores (Filicales) compondo os estratos inferiores da floresta, incluindo samambaias epífitas. Enquanto os fósseis de Chemnitz foram preservados em conhecido evento vulcânico, os fósseis de Tocantins foram sepultados em uma seqüência de níveis aluviais. Estes diferentes processos foram responsáveis, por exemplo, pela excepcional preservação de uma infinidade de espécies em Chemnitz, em um registro fossilífero que traduz a rica diversidade de sua floresta, enquanto os processos sedimentares na Bacia do Parnaíba resultaram em certa seleção das espécies que viviam ali.

É importante ressaltar que as comparações entre os conteúdos paleobotânicos de cada bacia ainda não podem ser feitas de modo completo, pois muitos vegetais fósseis de Tocantins ainda se encontram em estudo e ainda não foram completamente identificados.

Apesar dos trabalhos mencionados, especialmente os dados sobre gimnospermas do Tocantins ainda são escassos. Outro fator que dificulta as comparações entre floras é o modo de preservação dos vegetais. Em Tocantins e em Chemnitz a maioria dos fósseis preservou-se por meio de permineralização por sílica, havendo registro predominantemente de caules. Na Bacia do Paraná há registro relativamente maior de folhas, sementes e frutificações, e caules permineralizados ocorrem apenas localmente. Por exemplo, um caule de esfenófito pode corresponder a *Arthropitys* quando está permineralizado, ou a *Calamites* ou *Paracalamites* quando está preservado como molde. Relação semelhante ocorre entre *Scolecopteris* e *Asterotheca*, para pinas de pteridófitas.

Até aqui foi possível mostrar as similaridades e as diferenças entre as florestas permianas que ocorriam na Bacia do Paraná, na porção Sul do Gondwana, a Floresta Petrificada

do Tocantins Setentrional, na Bacia do Parnaíba, e a Floresta Petrificada de Chemnitz, na Província Euroamericana. Neste momento faz-se necessário comentar sobre as razões que determinaram tais características.

Como foi explicitado por Mussa & Coimbra (1987), o clima parece ter sido o principal fator limitante à presença de pteridófitas arborescentes (como *Tietea* sp. e *Psaronius* sp.) na Bacia do Paraná durante e logo após a glaciação. As temperaturas mais baixas desta região teriam sido uma barreira climática entre a Flora *Glossopteris* e a floresta observada na assembléia do MNAFTO. De fato, Stephenson *et al.* (2008) ressaltam que a Bacia do Parnaíba, junto à Bacia do Solimões e do Amazonas, não experimentaram efeitos da glaciação do Carbonífero.

Rößler (2006) sugere que durante o Eopermiano houvesse uma conexão fitogeográfica entre a região de Tocantins e a província Euroamericana, possibilitando que as espécies pudessem dispersar-se sem grandes barreiras geográficas. O clima de ambas deveria ser muito semelhante: terras baixas com marcada sazonalidade. Esta semelhança poderia ser explicada pela distância relativa de ambas as regiões ao paleo-Ecuador. Interpreta-se que o clima da Bacia do Parnaíba durante o Permiano fosse semi-árido com regime de monções (Pinto & Sad 1986, Dias-Brito *et al.* 2007).

O clima de monções, tal qual conhecemos hoje, é definido por marcada sazonalidade, com chuvas fortes (por vezes torrenciais) em períodos definidos. Este caráter sazonal pode traduzir-se em sazonalidade anual ou plurianual, dependendo da região. Durante a estação ou período seco, pode apresentar características típicas de regiões semi-áridas (Borchert 1999), como observado, por exemplo, em diversas florestas na Índia hoje.

O clima da Bacia do Parnaíba durante o Permiano pode ser caracterizado por chuvas típicas de monções e períodos de estiagem bem definidos, com elementos semi-áridos. O clima de monções estabelecido no Permiano poderia ter contribuído inclusive para o clima de aridez observado em áreas com latitudes baixas (Stephenson *et al.* 2008). Os pequenos cursos d'água que permaneciam durante a estação seca, após as fortes tempestades, permitiam a sobrevivência de pteridófitas arborescentes e de toda a comunidade vegetal. Os estratos inferiores eram suportados provavelmente pelo micro-clima formado pelo dossel da floresta, dominado por Marattiales. Estudos atuais sobre a dinâmica florestal em áreas atingidas por monções reafirmam a importância das margens úmidas dos cursos d'água (Borchert 1999) e dos nutrientes carregados pelo fluxo e depositados nas grandes planícies de inundação durante

as tempestades (Lodge *et al.* 1994, Gibbs *et al.* 2002) para a manutenção da comunidade florestal nos períodos de estiagem.

Roscher & Schneider (2006) ressaltam o clima com forte caráter sazonal para intervalos do Eopermiano, com estações bem definidas e forte regime de monções nas áreas próximas ao Equador. Tabor & Montañez (2002) afirmam que as latitudes tropicais do sudoeste da província euroamericana teriam experimentado menores níveis de precipitação anual em função de barreiras orográficas a Leste. Os autores encontraram fortes evidências de que o clima de monções estabeleceu-se no hemisfério Norte no Eopermiano.

DiMichele *et al.* (2006) relatam, entretanto, a ocorrência de áreas de maior umidade dentro do cinturão de aridez no Neopermiano do Texas. Cenário equivalente na Bacia do Parnaíba, formando uma “mancha” de umidade (*wet spot*) nas terras baixas, poderia permitir a presença de uma flora empobrecida dominada por pteridófitas arbóreas. Nos registros feitos por DiMichele *et al.* (2006) em um *wet spot* no Texas, não há carvão e nem sedimentos que indicam áreas alagadas (como pântanos) com acumulação de matéria orgânica, fato condizente com um padrão mais árido em escala regional.

DiMichele *et al.* (2008) ressaltam ainda que as mudanças na vegetação no final do Paleozóico poderiam ser melhor compreendidas quando observadas à luz de mudanças temporais e espaciais na composição de espécies em cada bioma, como resposta à mudanças climáticas globais manifestadas local e regionalmente. Os autores dão especial ênfase na transição entre Permiano e Triássico, onde mudanças climáticas mais acentuadas teriam sido responsáveis por mudanças profundas na cobertura vegetal. DiMichele *et al.* (2008) apontam ainda que é comum que ocorrências em bacias de fósseis atípicos para aquele bioma esperado (presumidamente úmidos) sejam interpretadas como floras de áreas mais secas, raramente vistas em terras baixas do Neocarbonífero. Estas assembléias fossilíferas atípicas são usualmente interpretadas como de regiões equatoriais distantes de áreas mais prováveis de preservação, consistindo um viés no registro fossilífero e dando origem a mais problemas do que soluções no debate em estudos paleobiogeográficos.

Registros no Oriente Médio e Turquia mostram características típicas de floras mistas, com elementos comuns às floras Euroamericana, Cataísica e Gondvânica (Kerp *et al.* 2006). Tais regiões situavam-se na margem Sul do Mar de Tétis, em latitudes relativamente baixas. De acordo com a reconstrução paleogeográfica apresentada na figura 4.5.3, as latitudes poderiam ser similares àsquelas da Bacia do Parnaíba durante o Eopermiano. O clima da região, porém,

deveria ser mais úmido, em função da influência do mar. Em depósitos do Permiano Superior da região foram encontradas algumas pteridospermas típicas da flora triássica do Gondwana (*Dicroidium*). Isso sugere que as regiões de baixas altitudes do Norte do Gondwana constituíram o berço de tais vegetais. Após período de aquecimento climático durante o Triássico, elas teriam se dispersado ao Sul (Kerp *et al.* 2006).

Em comparação com as ocorrências do Oriente Médio, a Bacia do Parnaíba era menos favorável à dispersão de elementos de várias floras distintas, uma vez que se localizava na porção mais interior do continente e apresentava clima provavelmente mais seco.

Kerp *et al.* (2006) discutiram a existência de uma grande cadeia de montanhas que separaria a maior parte do Gondwana do Hemisfério Norte. Assim, não haveria elementos da flora do Sudoeste dos Estados Unidos no registro do Oriente Médio. Se realmente havia esta barreira, ela também poderia impedir trocas florísticas entre a Bacia do Parnaíba e o Sudoeste dos Estados Unidos. Por outro lado, outra consequência seria a interrupção no intercâmbio de espécies com a Flora Euroamericana. É necessário ter em mente, de acordo com registros de faunas de conchostráceos (Ferreira-Oliveira & Rohn 2010), que seria possível ter permanecido corredores de terras baixas entre os dois hemisférios.

Parece razoável considerar que em regiões equatoriais do final do Paleozóico haveria grande quantidade de biomas, compartilhando várias espécies em comum, dominadas em várias instâncias por linhas evolutivas e clados completamente distintos entre si (DiMichele *et al.* 2008). *Taxa* típicos de biomas úmidos do Carbonífero, por exemplo, poderiam aparecer em paisagens tipicamente permianas, especialmente biomas com estiagem sazonal. Estes *taxa* são comuns em floras ao longo de cursos d'água, dependentes da umidade de suas margens (*"stream-side elements"*). A diversidade desses grupos é muito menor do que em floras desenvolvidas por completo em áreas verdadeiramente úmidas, em razão da escassez de recursos naturais que suportassem uma alta biodiversidade.

DiMichele *et al.* (2008) ressaltam que a tendência de aridez em latitudes equatoriais no Permiano pode ter sido interrompida inúmeras vezes por pequenos "intervalos pluviais", com acentuado aumento de umidade. Durante estes pequenos intervalos os elementos de biomas mais úmidos conheceriam certa expansão a áreas mais secas, de forma análoga à conhecida "teoria dos refúgios" para florestas tropicais do recente.

A Floresta Petrificada do Tocantins Setentrional, desse modo, constituía provavelmente um ecótono entre a flora *Glossopteris*, localizada na porção Sul do Gondwana, e a província

Euroamericana, com elementos comuns a ambas. A constituição da flora do MNAFTO é, por este motivo, distinta de qualquer outra flora tropical do Eopermiano.

A similaridade do paleo-clima poderia facilitar com que vegetais relacionados com floras setentrionais do Eopermiano surgissem na Bacia do Parnaíba. Em contrapartida, a temperatura mais baixa da Bacia do Paraná no período poderia constituir uma barreira entre as duas floras, limitando a distribuição de espécies mais sensíveis (como as pteridófitas arborescentes).

#### 4.6 Considerações sobre a ecologia das pteridófitas permianas e atuais

O registro paleontológico mostra informações que, muitas vezes, têm origens em ambientes próximos, mas distintos. É comum verificar em depósitos sedimentares materiais vindos do leito de paleocanais, de suas margens, de sua planície de inundação, além de material carregado pelo fluxo, mesmo de terras mais altas, com climas diferentes. As reconstruções paleofitogeográficas freqüentemente abordam estes distintos ambientes, com múltiplas biocenoses (Wnuk 1996). Como nem todos os elementos de cada comunidade biológica ficaram preservados no registro fossilífero e sedimentar, a comparação com biomas atuais pode trazer luz a diversos aspectos.

Fitofósseis também podem ser úteis para a identificação do clima no local onde se estabeleceu a comunidade vegetal (Fittipaldi & Rösler 1987, Greenwood 2004). O clima é fator preponderante para o estabelecimento das plantas em um dado ambiente, pois a disponibilidade de água e nutrientes são requisitos fundamentais para a floresta. Adaptações das plantas a regimes sazonais, áridos ou úmidos, podem auxiliar na reconstituição do ambiente e da floresta do passado.

Ambientes com aridez pronunciada são encontrados atualmente no Brasil, inclusive na região do MNAFTO. A região Norte do Estado do Tocantins possui uma grande cobertura de Cerrado, em suas várias fisionomias, desde Campo Sujo até Cerradão (Savana Florestada na nomenclatura internacional). Mesmo em biomas com relativa aridez, há manchas de vegetação mais úmida somente ao longo de rios e córregos. Diversos estudos versam sobre Matas Ciliares no Cerrado (Rossatto *et al.* 2008, Battilani *et al.* 2005, Parron 2004, Durigan *et al.* 2002, Costa & Araújo 2001), e embora as pteridófitas tenham dominado este tipo de paisagem no Permiano, elas estão ausentes no presente. Estudos sobre pteridófitas em ambientes mais secos, como a Restinga, são raros e limitados à região Sul do país, de ambiente marcadamente subtropical (Athayde Filho & Windisch 2006). Atualmente, samambaias estão localizadas em matas mais úmidas, tipicamente em florestas pluviais tropicais.

Para comparar as pteridófitas arborescentes do MNAFTO com pteridófitas arborescentes atuais, foram utilizados dados coletados em remanescentes florestais onde há em abundância pteridófitas com hábito arbustivo ou arbóreo. No caso, na Mata Atlântica do litoral do Paraná.

## Pteridófitas do presente

Pteridófitas são plantas vasculares que se reproduzem por esporos, sem flores ou sementes, em ciclo de vida com visível alternância de gerações (Salino & Almeida 2008, Rolim 2007). Reunidas tradicionalmente em uma classe artificial (“Pteridophyta”), constituindo um táxon parafilético, as pteridófitas atuais são divididas em Licófitas (grupo mais basal, associado às pteridófitas que apareceram no Carbonífero, atualmente com apenas três famílias: Lycopodiaceae, Selaginellaceae e Isoetaceae) e Monilófitas (grupo com vascularização diferenciada, com 37 famílias) (Rolim 2007, Smith *et al.* 2006).

A distribuição atual de pteridófitas está concentrada nos trópicos, especialmente na Ásia Menor, Austrália e América. Em florestas tropicais, o número de espécies reconhecidas de pteridófitas pode chegar a 10% do total (Rolim 2007). Estima-se que existam hoje mais de doze mil espécies de pteridófitas (Salino & Almeida 2008, Athayde Filho & Windisch 2006).

Cerca de 30% das espécies neotropicais de pteridófitas podem ser encontradas no Brasil. Presentes desde a região Norte, na Amazônia, as pteridófitas constituem importante centro de endemismo do Neotrópico nas regiões Sul e Sudeste, pois 40% das espécies encontradas na região são endêmicas. São distribuídas em diversos tipos de ambientes (Salino & Almeida 2008, Rolim 2007, Athayde Filho & Windisch 2006, Dittrich *et al.* 2005, Souza *et al.* 2003): desde regiões com clima sazonal até florestas úmidas, paludosas (Restinga) e montanhosas, como a Serra do Mar (Floresta Ombrófila Densa Submontana e Montana), a Amazônia e planaltos e serras de Minas Gerais (Floresta Estacional Semidecidual). As causas do padrão de endemismo observado em florestas de altitude são pouco conhecidas, relacionadas provavelmente à diversidade de micro-ambientes resultantes de distintos tipos de solo, microclima e regimes de luz (Rolim 2007). As pteridófitas atuais apresentam-se em diversas formas de vida (epífitas, terrícolas e rupícolas) e hábitos de vida (herbáceas, arborescentes ou escandentes) (Fraga *et al.* 2008, Dittrich *et al.* 2005).

Pteridófitas epífitas estão presentes em ricas florestas tropicais, como a Mata Atlântica brasileira (Fraga *et al.* 2008). Estima-se que atualmente cerca de 2600 espécies de pteridófitas são epífitas. Entre as principais adaptações a esta forma de vida, Fraga *et al.* (2008) destacam o rizoma filiforme, longo e ramificado, com sistema radicular reduzido e fronte pequenas, ponto de saturação luminosa baixo, alta tolerância a escassez de nutrientes no substrato, dispersão de esporos pelo vento, e tricomas nas frondes. Os mesmos autores salientam que pteridófitas

arborescentes constituem importante micro-hábitat disponível para epífitas, incluindo outras pteridófitas, em razão de sua densa camada de raízes adventícias.

Entre as poucas samambaias arborescentes atuais, destaca-se *Dicksonia sellowiana* Hook. (Dicksonianaceae), típica do continente americano, com distribuição desde o México até o Uruguai. Em remanescentes de Floresta Ombrófila Mista ocupa posição de destaque no sub-bosque, atingindo em média 7 m de altura (Fraga *et al.* 2008).

As pteridófitas atuais ocupam um nicho ecológico distinto das samambaias permianas. Mesmo no sub-bosque de florestas atuais, as samambaias necessitam de condições de sombreamento e umidade. Em remanescentes de Floresta Ombrófila Densa Submontana e Montana, as pteridófitas geralmente são associadas ao fundo de vales, áreas de declive com densa cobertura vegetal e proximidade com rios ou córregos (figura 4.6.1 e 4.6.2).



Figura 4.6.1. Fotografia de pteridófitas arborescentes (Cyatheaceae) no estrato inferior em remanescentes atuais de Floresta Ombrófila Densa Submontana



Figura 4.6.2. Fotografia de pteridófitas arborescentes (Cyatheaceae) em relação ao estrato superior de um trecho de Floresta Ombrófila Densa Submontana

O potencial adaptativo das pteridófitas arborescentes atuais, ocupando o sub-bosque de florestas pluviais (Salino & Almeida 2008, Dittrich *et al.* 2005), parece ser semelhante ao das angiospermas presentes no mesmo estrato. Limitações evidentes em relação à disposição dos feixes vasculares, à complexidade das estruturas radiculares e a não-formação de lenho não permitem que as pteridófitas atuais alcancem estratos maiores. A maioria das samambaias encontradas na floresta atinge entre um e cinco metros de altura, geralmente em solos úmidos e em formação, especialmente cambissolos, argissolos e neossolos litólicos (Matos 2007).

Para traçar uma análise comparativa entre as pteridófitas permianas com pteridófitas arborescentes atuais, foi feito um inventário florístico em um remanescente de Floresta Ombrófila Densa Submontana, na Reserva Natural do Rio Cachoeira, no litoral do Paraná, região Sul do Brasil. Cinco espécies foram escolhidas para o estudo: *Alsophila setosa* Kaulf., *Alsophila sternbergii* (Sternb.) D.S. Conant, *Cyathea corcovadensis* (Raddi) Domin, *Cyathea leucofolis* Domin e *Cyathea phalerata* Mart., todas da família Cyatheaceae (Matos 2007, Dittrich *et al.* 2005).

Foram encontradas e medidas 218 pteridófitas arborescentes, identificadas entre as cinco espécies citadas acima. Estas espécies são comuns na Floresta Ombrófila Densa Submontana e Montana (Dittrich *et al.* 2005). O estudo envolveu um inventário em dez áreas remanescentes de Mata Atlântica, com área de amostragem de 1 ha em cada local. Os locais foram escolhidos de modo a contemplar diversos estágios sucessionais, desde florestas secundárias (com histórico de conhecidas interferências antrópicas nos últimos 80 anos) até florestas primárias (sem nenhum evento conhecido de ação antrópica, como corte raso ou seletivo). Este procedimento foi feito para certificar-se de que várias espécies de pteridófitas arborescentes típicas deste tipo de vegetação fossem encontradas, de modo a evitar vies (vícios de amostragem).

A espécie *Alsophila setosa* foi bastante rara na área de amostragem. Apenas dois indivíduos foram encontrados, ambas em um remanescente de floresta secundária. A altura dos dois indivíduos foi de 2 m e 6 m, com diâmetros de 6,68 cm e 11,78 cm.

Para *Cyathea corcovadensis* (figura 4.6.3) foram encontrados 76 indivíduos desta espécie, em seis áreas de estudo (de um total de dez), desde áreas altamente impactadas pela atividade humana (com corte raso há 25 anos) até floresta primária. Esta espécie esteve presente desde áreas mais baixas, com cerca de 50 m, até áreas mais altas, com 300 m de altitude. A área basal calculada para *C. corcovadensis* foi de 0,15585 m<sup>2</sup>/ha. Os histogramas

para classes de diâmetro e altura desta espécie são apresentados na figura. A maioria das samambaias desta espécie apresenta diâmetros em torno de 4 a 12 cm, e alturas de até 7 m. A maior samambaia desta espécie tinha 17 cm de diâmetro, com 10 m de altura.

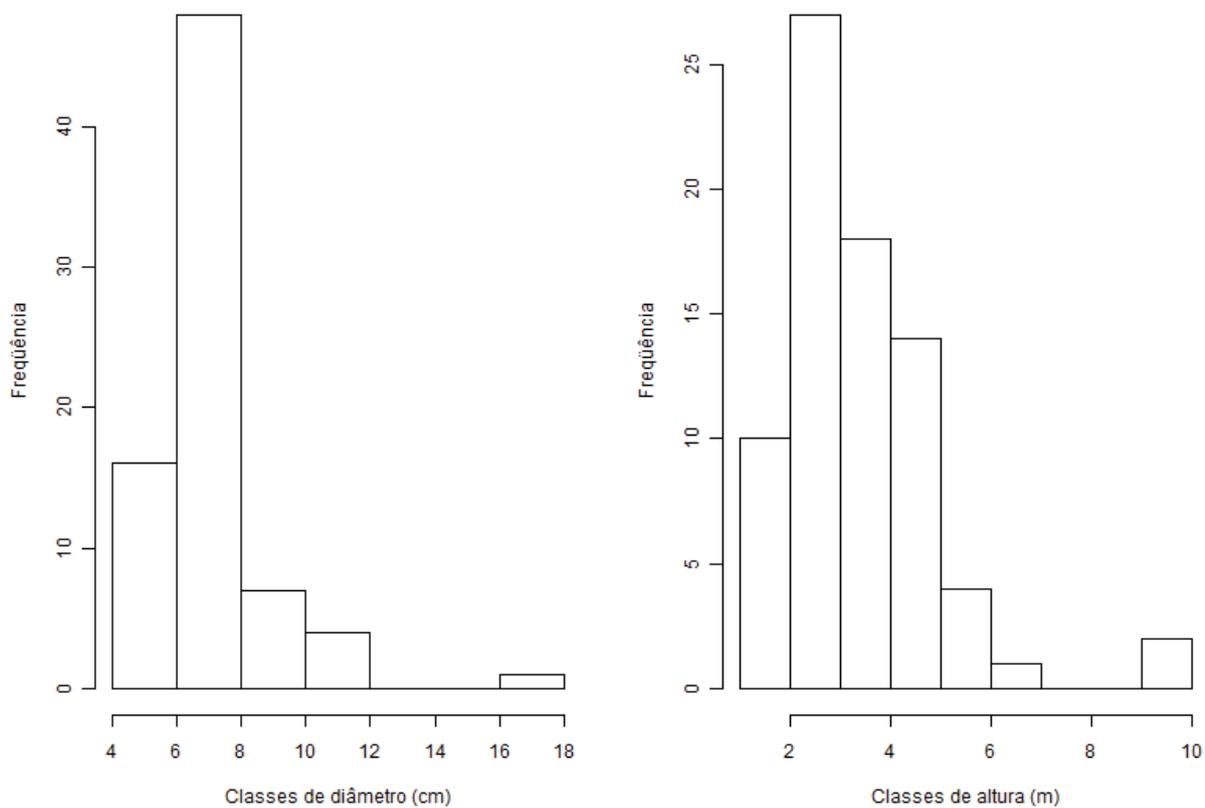


Figura 4.6.3. Histogramas para classes de diâmetro e altura para *Cyathea corcovadensis* em remanescente de Mata Atlântica

Vinte e três samambaias arborescentes da espécie *Cyathea leucofolis* foram encontradas. Estavam presentes em seis das dez áreas investigadas, em ambientes que variaram de estágios intermediários de sucessão (com mais de 40 anos após distúrbios antropogênicos) até estágios avançados, acompanhando o mesmo gradiente altitudinal observado para *C. corcovadensis*. A área basal de *C. leucofolis* foi pouco superior à de *C. corcovadensis*, com 0,21448 m<sup>2</sup>/ha. Os histogramas para classes de diâmetro e altura (figura 4.6.4) mostram que a maior parte de seus indivíduos apresenta diâmetros menores que 6 cm, e alturas entre 1 e 3 m. Poucas samambaias desta espécie conseguiam atingir alturas maiores, sendo que o maior indivíduo teve pouco mais de 9 m de altura, com 13,37 cm de diâmetro.

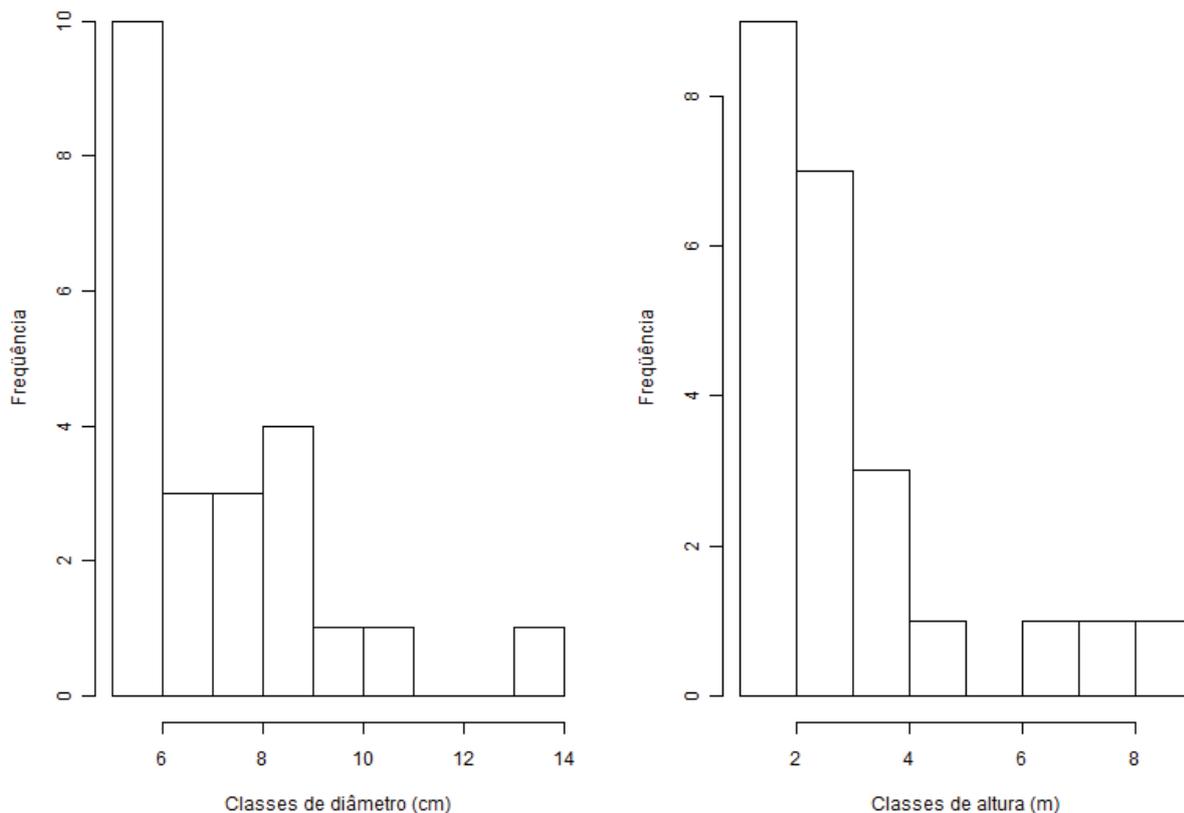


Figura 4.6.4. Histogramas para classes de diâmetro e altura para *Cyathea leucofolis* em remanescente de Mata Atlântica

A espécie *Cyathea phalerata* foi a que mostrou maior distribuição (ao lado de *Alsophila sternbergii*): foram encontrados 31 indivíduos, espalhados por oito das dez áreas de amostragem. A distribuição dos indivíduos desta espécie foi bastante regular nas classes de diâmetro e altura (figura 4.6.5). A maior samambaia de *C. phalerata* encontrada tinha 17,51 cm de diâmetro, e 9 m de altura. A área basal da espécie foi de 0,15736 m<sup>2</sup>/ha.

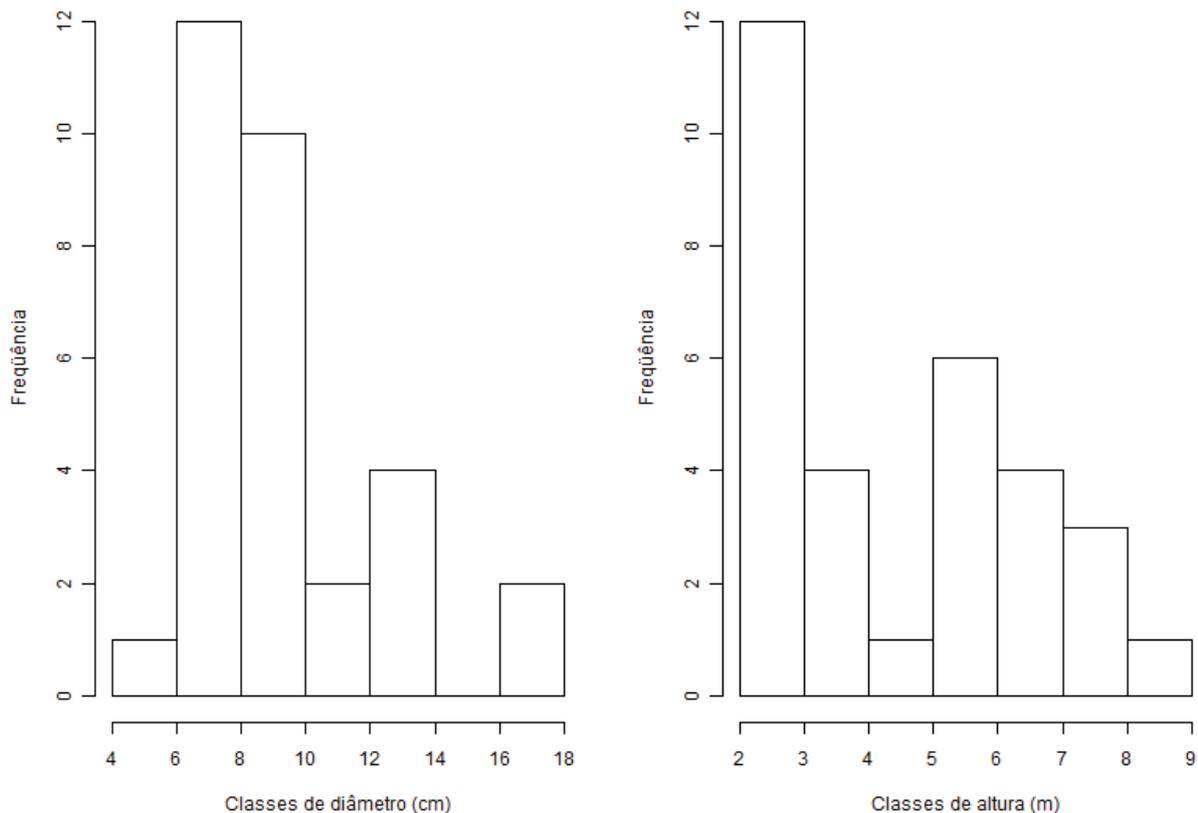


Figura 4.6.5. Histogramas para classes de diâmetro e altura para *Cyathea phalerata* em remanescente de Mata Atlântica

A espécie mais abundante no estudo das pteridófitas atuais foi *Alsophila sternbergii*, com 85 indivíduos encontrados em oito dos dez locais amostrados. Os histogramas para diâmetro e altura de *A. sternbergii* (figura 4.6.6) mostram que seus indivíduos se distribuem regularmente em todas as classes. As maiores samambaias arborescentes desta espécie podem atingir mais de 18 cm de diâmetro e até 15 m de altura. A área basal calculada para *A. sternbergii* foi de 0,16154 m<sup>2</sup>/ha, o que confere à espécie posição tímida nas tabelas fitossociológicas (apenas entre as 60 espécies de maior IVI – tabelas omitidas no presente estudo), mas com relativo destaque entre as espécies de sub-bosque.

Tabelas fitossociológicas (Mueller-Dunbois & Ellenberg 1974) são listas produzidas em inventários florestais, a fim de ordenar as espécies encontradas segundo sua presença, dominância (área basal) e densidade. Espécies com troncos maiores e com maior abundância na área amostrada ocupam o topo das tabelas. Espécies raras ocupam a parte inferior.

A área basal é a representação da área que cada árvore (ou o conjunto de árvores de uma dada espécie) ocupa no solo da floresta. Imaginando o tronco com a forma de um cilindro perfeito, a área basal corresponderia à área deste círculo. Portanto, o seu cálculo deriva diretamente da medição do diâmetro de cada indivíduo. Quanto maior a árvore, maior sua área basal. Ecólogos utilizam esta medida como inferência do grau de dominância de uma espécie na floresta. Engenheiros florestais utilizam esta medida para estimar o volume de madeira de cada árvore, utilizando também a altura medida.

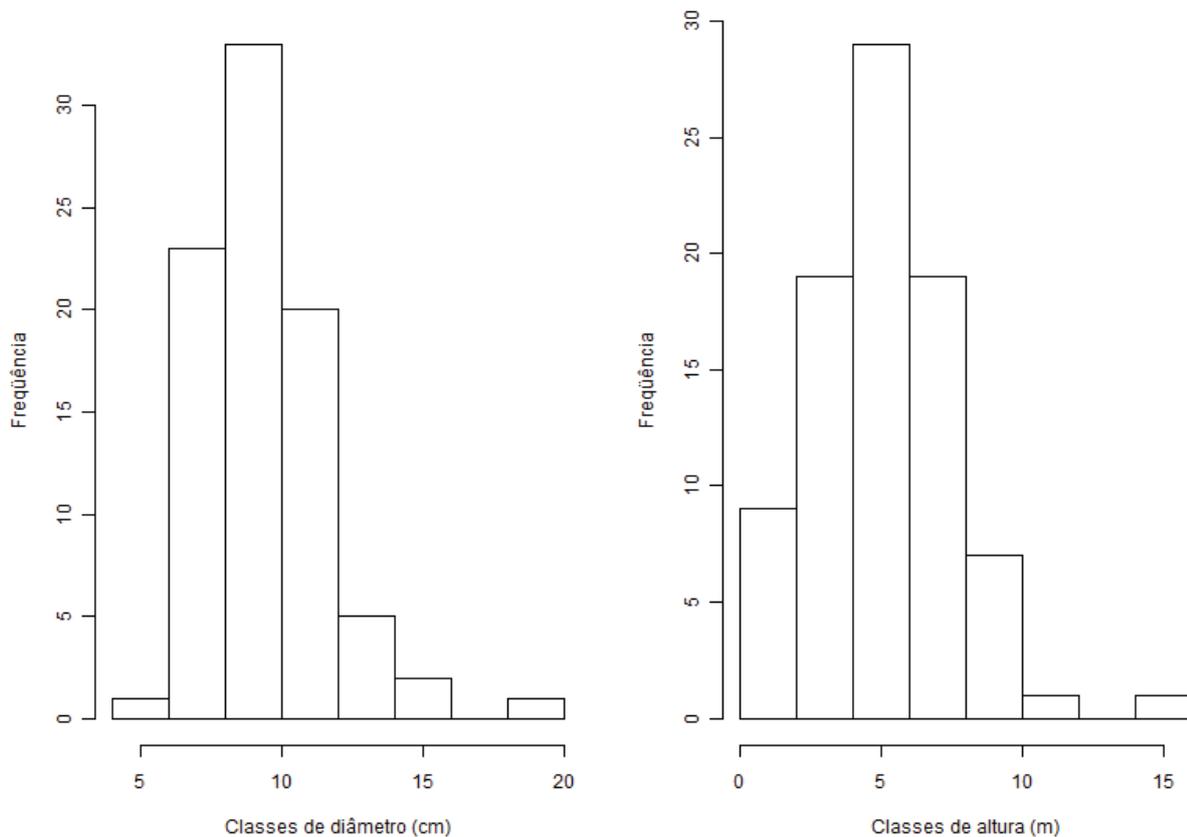


Figura 4.6.6. Histogramas para classes de diâmetro e altura para *Alsophila sternbergii* em remanescente de Mata Atlântica

Os histogramas das quatro espécies de maior abundância (não foram construídos histogramas para *Alsophila setosa*, por insuficiência amostral) apresentam padrão semelhante àqueles construídos para as pteridófitas fósseis do MNAFTO (figura 4.6.7). O padrão “J invertido” faz-se presente em todos os casos, como discutido na seção Resultados/Estrutura das assembléias fossilíferas (seção 4.1).

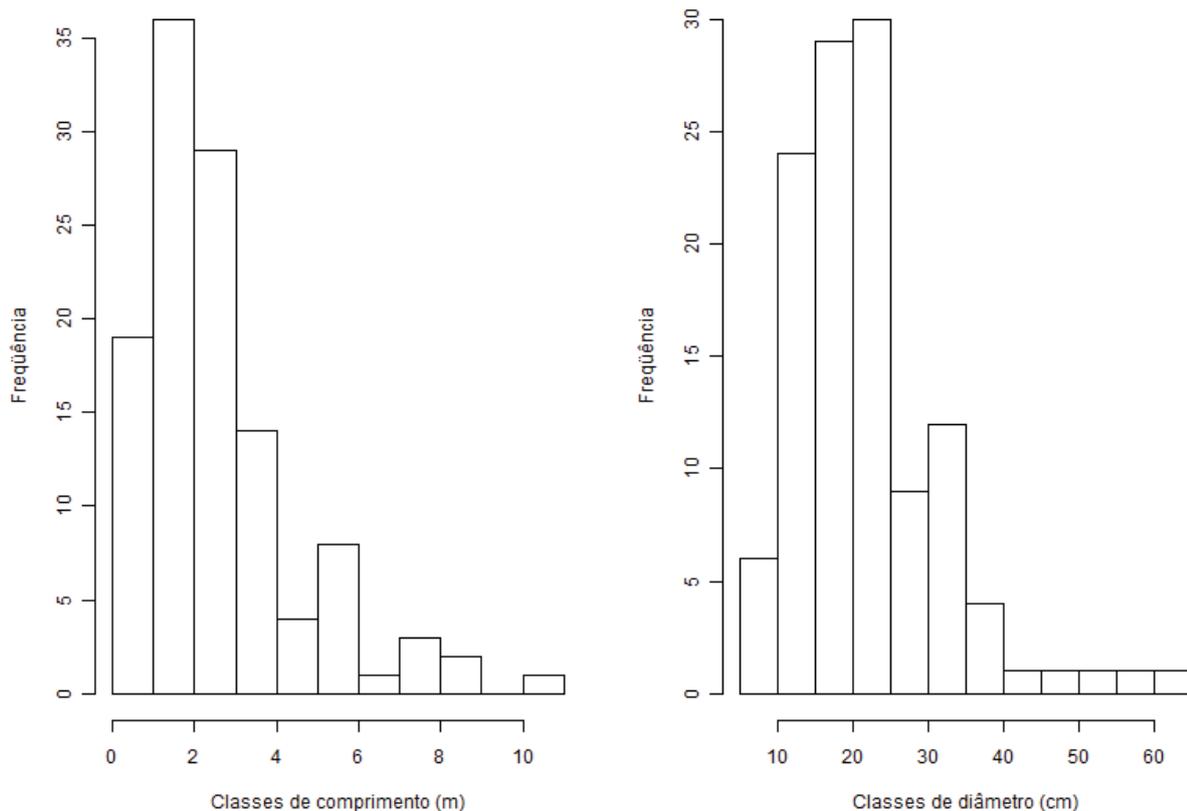


Figura 4.6.7. Histogramas para classes de diâmetro e comprimento para os fósseis de pteridófitas encontrados no MNAFTO

### Alometria

É evidente que os processos de morte, transporte e sepultamento a que foram expostas as pteridófitas permianas do MNAFTO interferem diretamente sobre várias medidas realizadas. Níveis de fragmentação e compactação dos fósseis foram observados em inúmeros casos. Há, dessa forma, uma interferência de processos tafonômicos e intempéricos sobre os histogramas das pteridófitas fósseis. Algumas classes de tamanho podem estar ausentes do registro fossilífero, especialmente as classes iniciais, que correspondem às plantas jovens.

Se as medidas de comprimento dos fitofósseis podem estar influenciadas pelos processos tafonômicos e intempéricos, as medidas do diâmetro proximal e distal podem oferecer informações mais fidedignas sobre a estrutura das samambaias do Permiano. Entre os fósseis encontrados na área de estudo, 18% apresentam sinais de compressão lateral. Para

corrigir isso foram tomadas as medidas do diâmetro maior e menor dos caules achatados, tanto para as medidas da porção proximal quanto da distal.

A partir dos dados biométricos coletados sobre as espécies de pteridófitas arborescentes do presente, foi possível investigar a relação entre diâmetros e alturas medidas. A análise destas duas variáveis, evidentemente correlacionadas, permite elaborar modelos lineares que permitam inferir qualquer uma das variáveis de interesse. Modelos alométricos são baseados na proporção entre as dimensões de uma planta ou animal: a relação entre altura e peso, entre o tamanho da cabeça e a altura, entre a altura de uma árvore e seu diâmetro.

Diante da influência dos processos tafonômicos (morte, transporte e sepultamento) e do intemperismo atual sobre o comprimento total dos fósseis encontrados, surgiu a idéia de buscar modelos alométricos para inferir sua real estrutura de tamanho. Em outras palavras, buscou-se utilizar um modelo estatístico para estimar a altura real das samambaias permianas com base em suas medidas de diâmetro.

Com base nos dados das quatro espécies de pteridófitas arborescentes mais abundantes em um remanescente de Mata Atlântica, utilizadas para as comparações feitas neste capítulo, foi elaborado um modelo alométrico, a partir de uma regressão linear.

A primeira etapa para a construção do modelo linear foi o estudo do comportamento dos dados de diâmetro e altura para cada espécie de pteridófito do presente. Análises de regressão linear foram feitas para cada uma das espécies. A relação entre duas variáveis pode ser investigada através de Regressão Linear (Chambers 1992). Quanto maior for o valor do coeficiente de regressão linear ( $R^2$ ), mais relacionadas estão as duas variáveis. Os resultados da análise por regressão linear para cada espécie de samambaia do presente são mostrados na tabela 4.6.1.

Tabela 4.6.1. Coeficientes de regressão linear para as quatro espécies de pteridófitas arborescentes do presente

Espécie	$R^2$	$p$	g.l.	$F$
<i>Cyathea corcovadensis</i>	0,141	0,00048	74	13,31
<i>Cyathea leucofolis</i>	0,184	0,02357	21	5,96
<i>Cyathea phalerata</i>	0,545	0,000001	29	36,91
<i>Alsophila sternbergii</i>	0,076	0,0059	83	7,971

$p$ : valor de probabilidade; g.l.: graus de liberdade;  $F$ : valor da estatística F

Os resultados mostrados na tabela apontam que a relação entre diâmetro e altura foi mais clara para os indivíduos de *Cyathea phalerata*. O coeficiente de regressão foi o mais alto entre as quatro espécies. Os valores da estatística  $F$  (incluindo o valor  $p$  e os graus de liberdade) são úteis para comparar os valores obtidos a partir dos dados com os valores estimados, ordenados em uma tabela estatística  $F$  (Chambers 1992). Eles apontam que para *C. phalerata* o comportamento da variável diâmetro influencia a variável altura na ordem superior a 50%. Não é, entretanto, uma relação extremamente forte: variáveis diretas de causa e efeito mostram coeficientes ( $R^2$ ) ao redor de 0,8 (80%) ou mais. Os dados mostram apenas, neste caso, que há uma relação visível que não pode ser desprezada.

A figura 4.6.8 mostra os gráficos de diâmetro *versus* altura para cada espécie estudada, com os respectivos coeficientes de regressão linear ( $R^2$ ). Fica evidente a correlação linear entre os dados coletados para *Cyathea phalerata* em relação às demais.

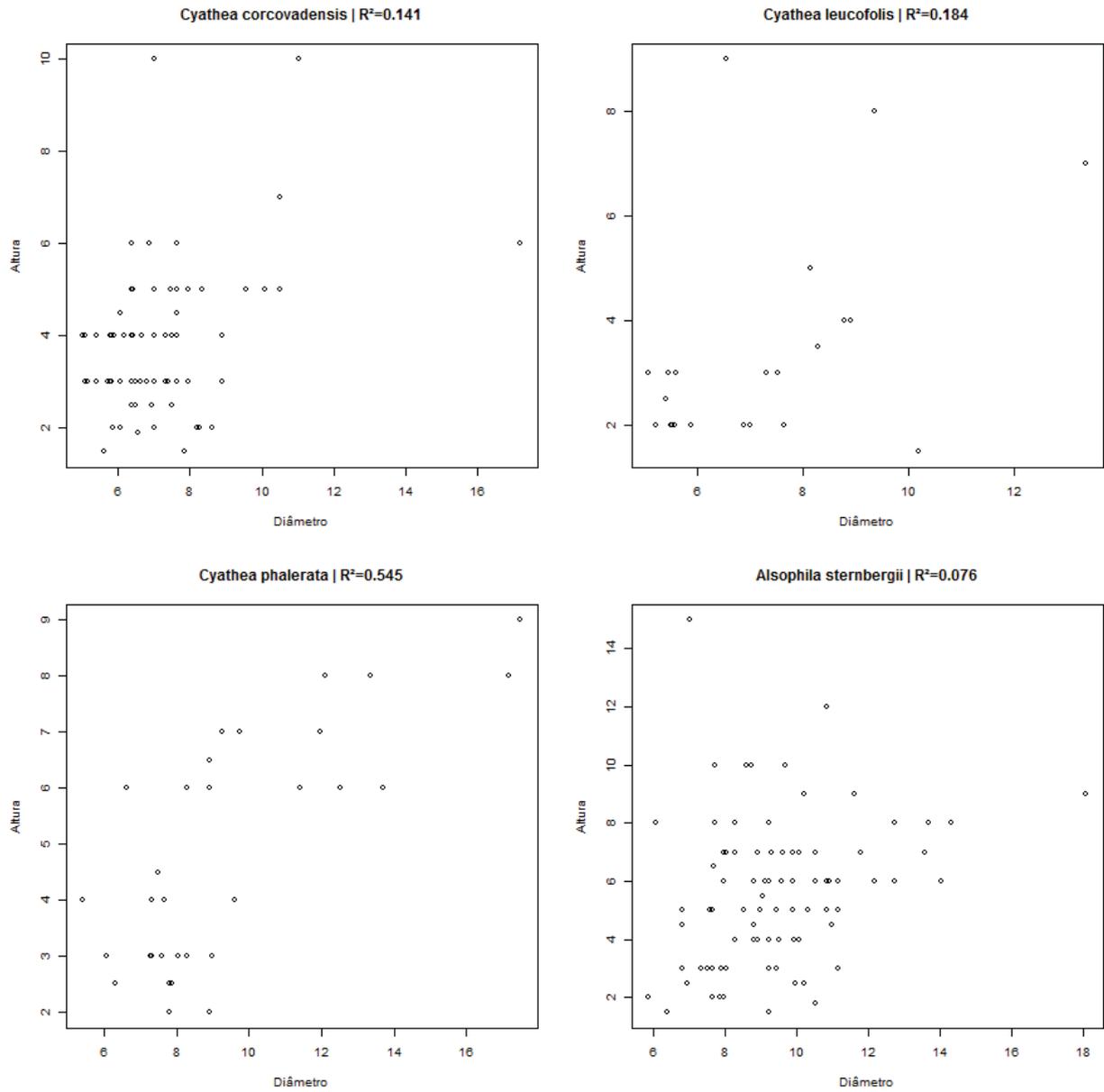


Figura 4.6.8. Gráficos de diâmetro *versus* altura para quatro espécies de pteridófitas atuais.

O modelo linear obtido com os indivíduos de *Cyathea phalerata* foi escolhido, com base na análise de cada regressão linear, para cada espécie. A fórmula do modelo linear gerado para esta espécie, e que serão aplicados para as pteridófitas fósseis do MNAFTO, é a seguinte:

$$h = 0,5229 \times d - 0,0874$$

Onde

$h$  = altura

$d$  = diâmetro

A figura 4.6.9 mostra a análise dos resíduos do modelo escolhido. Se o modelo for apropriado para a natureza dos dados, os resíduos devem seguir a distribuição aleatória ou a distribuição normal.

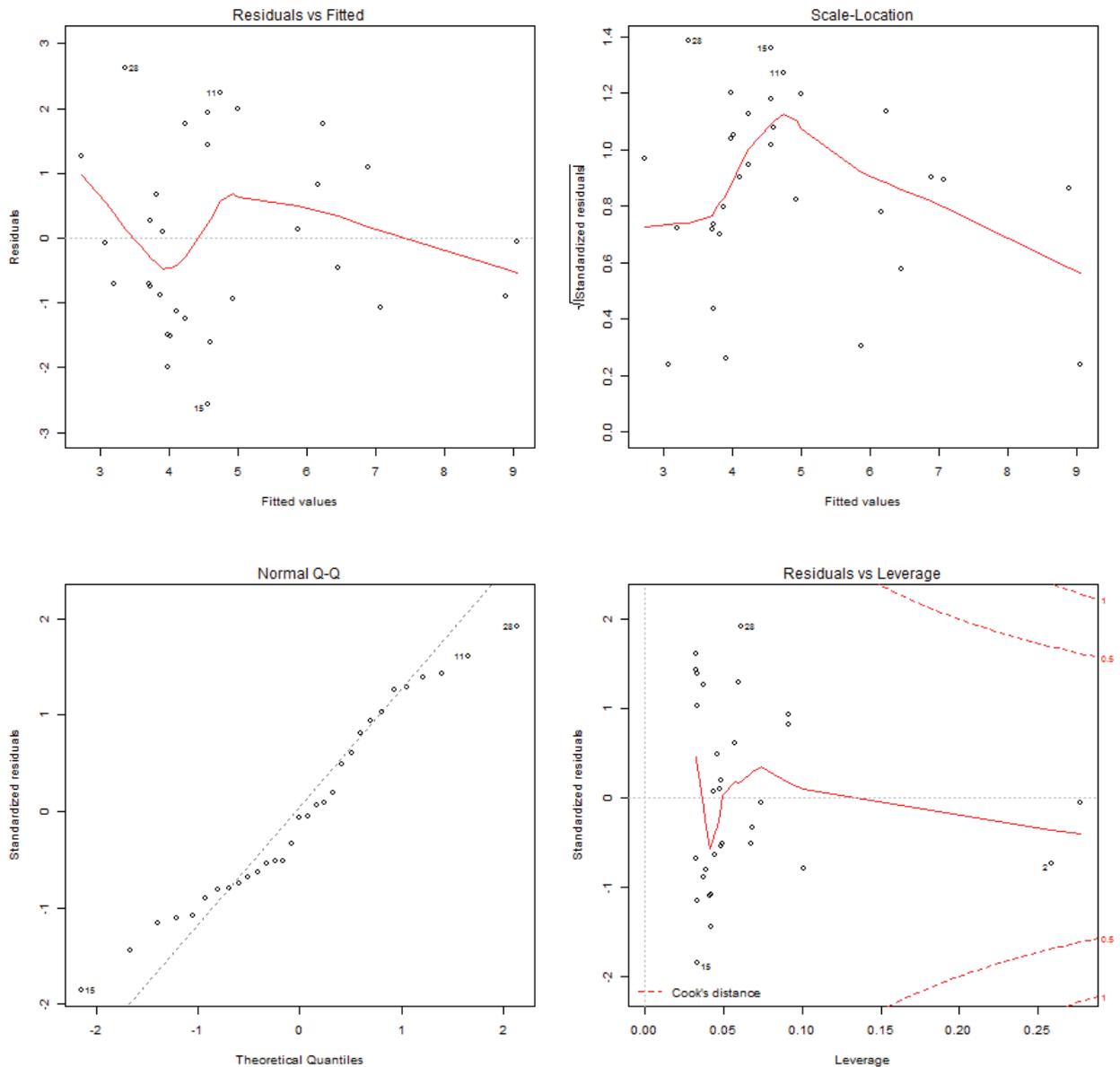


Figura 4.6.9. Análise dos resíduos do modelo alométrico de *Cyathea phalerata*. O gráfico no canto superior esquerdo mostra os erros residuais *versus* os valores ajustados. Os resíduos devem ser distribuídos aleatoriamente sobre a linha horizontal, que representa o erro zero. O gráfico no canto inferior esquerdo é o gráfico padrão quartil-quartil, que mostra se os erros estão normalmente distribuídos. O gráfico no canto superior direito mostra a raiz quadrada dos resíduos padronizados em função dos valores ajustados. O gráfico no canto inferior direito mostra a variação dos dados segundo o modelo encontrado. Valores da distância de Cook superiores a 1 indicariam pontos fora do modelo (*outliers*).

As figuras 4.6.10 a 4.6.13 mostram os histogramas do comprimento medido para as pteridófitas fósseis do MNAFTO ao lado dos histogramas com alturas estimadas a partir do diâmetro distal dos mesmos fósseis, para todas as pteridófitas fósseis (figura 4.6.10), e particularmente às pteridófitas de cada sítio fossilífero (figuras 4.6.11, 4.6.12 e 4.6.13). Mostra também mostra o comportamento do comprimento medido para as pteridófitas fósseis em cada um dos sítios fossilíferos estudados em relação às medidas de altura estimadas pelo modelo alométrico.

A análise dos resíduos do modelo escolhido mostra que os dados não estão completamente ajustados a uma regressão linear simples, sobretudo porque os erros residuais (plotados contra os valores ajustados) não seguem exatamente a distribuição aleatória. Tal observação era esperada em função da variabilidade das medidas de diâmetro e altura das pteridófitas. As duas variáveis são evidentemente relacionadas ( $R^2 = 0,545$ ), mas variações morfológicas de indivíduo para indivíduo, além de fatores ambientais (disponibilidade de água, declividade, sombreamento e solo), podem interferir no crescimento das samambaias.

O modelo obtido a partir de *Cyathea phalerata* foi utilizado para estimar a altura dos fósseis de pteridófitas do MNAFTO. Foi utilizado o diâmetro na porção distal, e não o diâmetro medido na porção proximal dos fitofósseis. Como as pteridófitas possuem um espessamento na base, ocasionado pelo manto de raízes adventícias, o diâmetro na base (ou na porção proximal) poderia gerar valores super-estimados de altura.

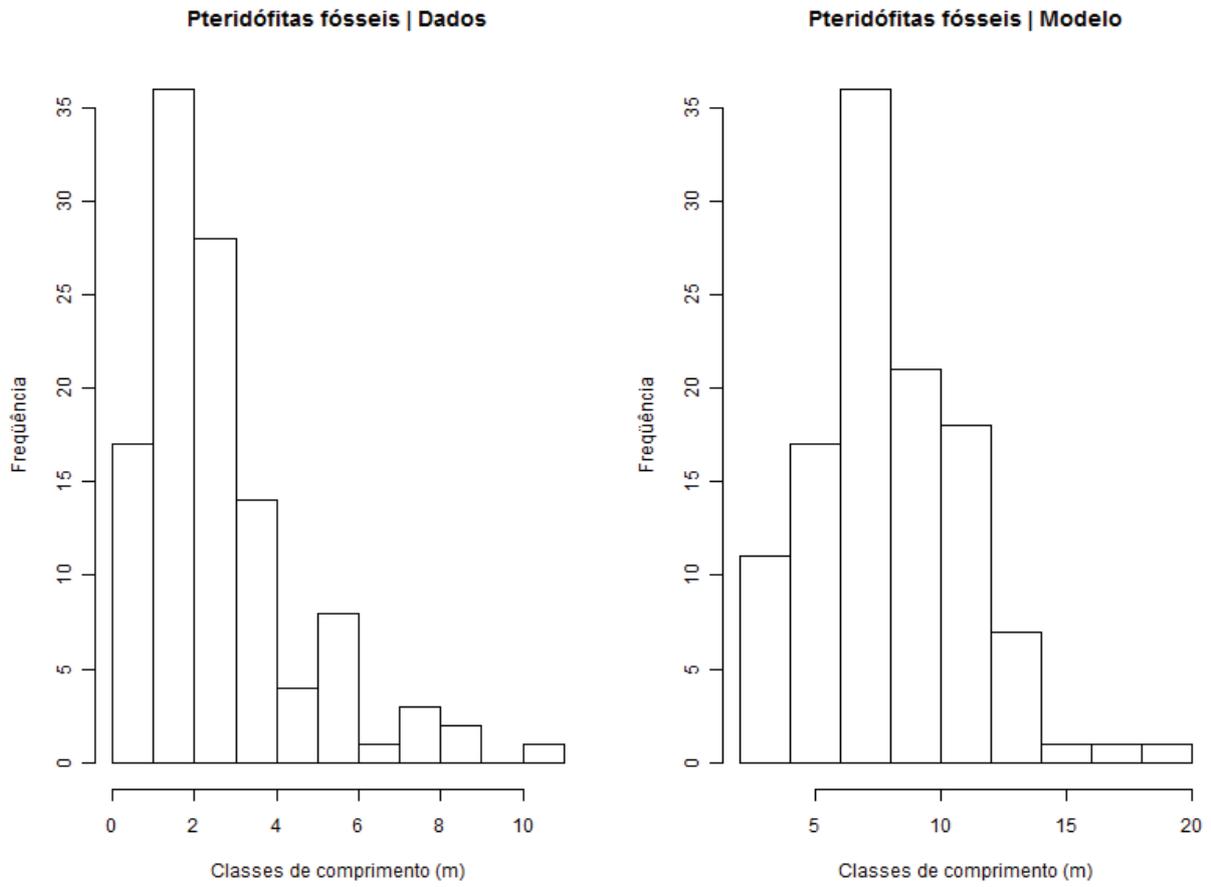


Figura 4.6.10. Histogramas para classes de comprimento e de altura estimada a partir do modelo linear para as pteridófitas fósseis no total

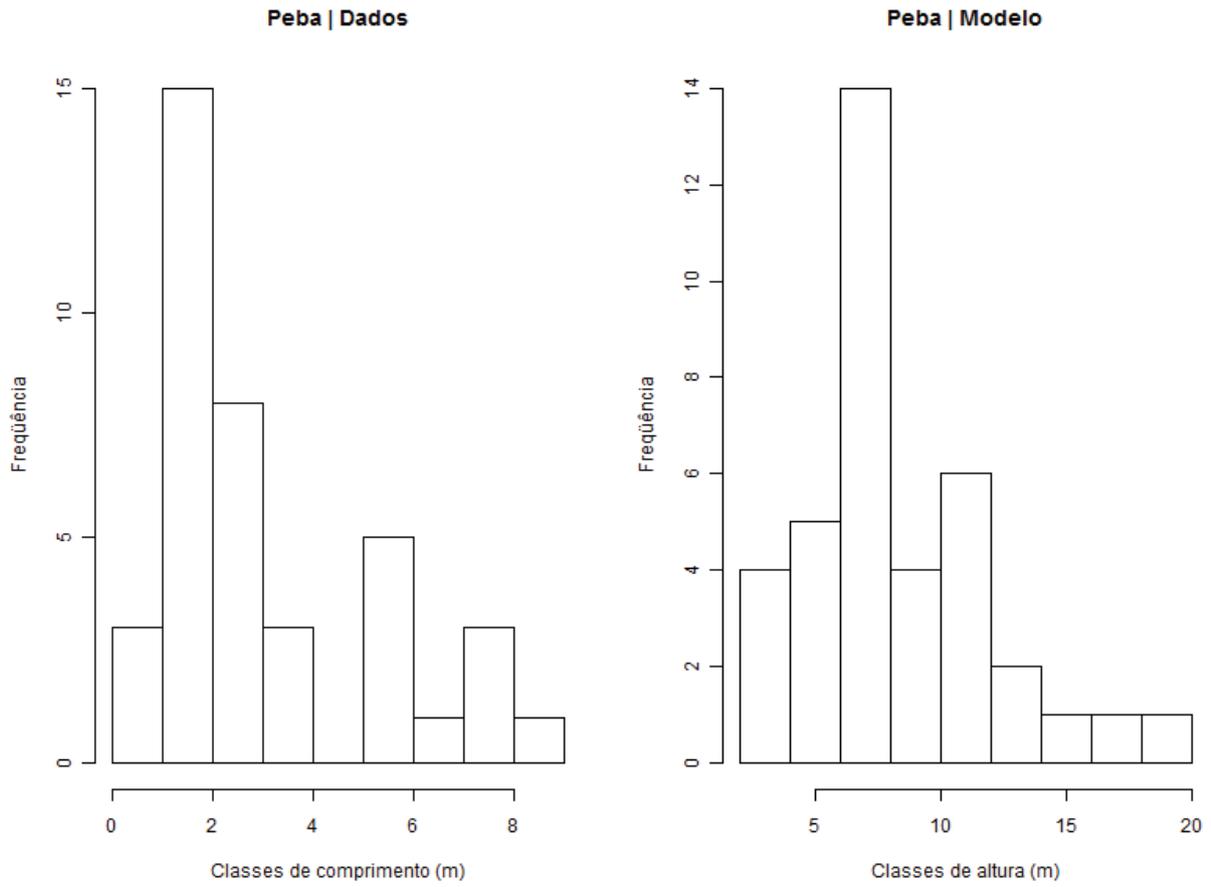


Figura 4.6.11. Histogramas para classes de comprimento e de altura estimada a partir do modelo linear para as pteridófitas fósseis da Fazenda Peba

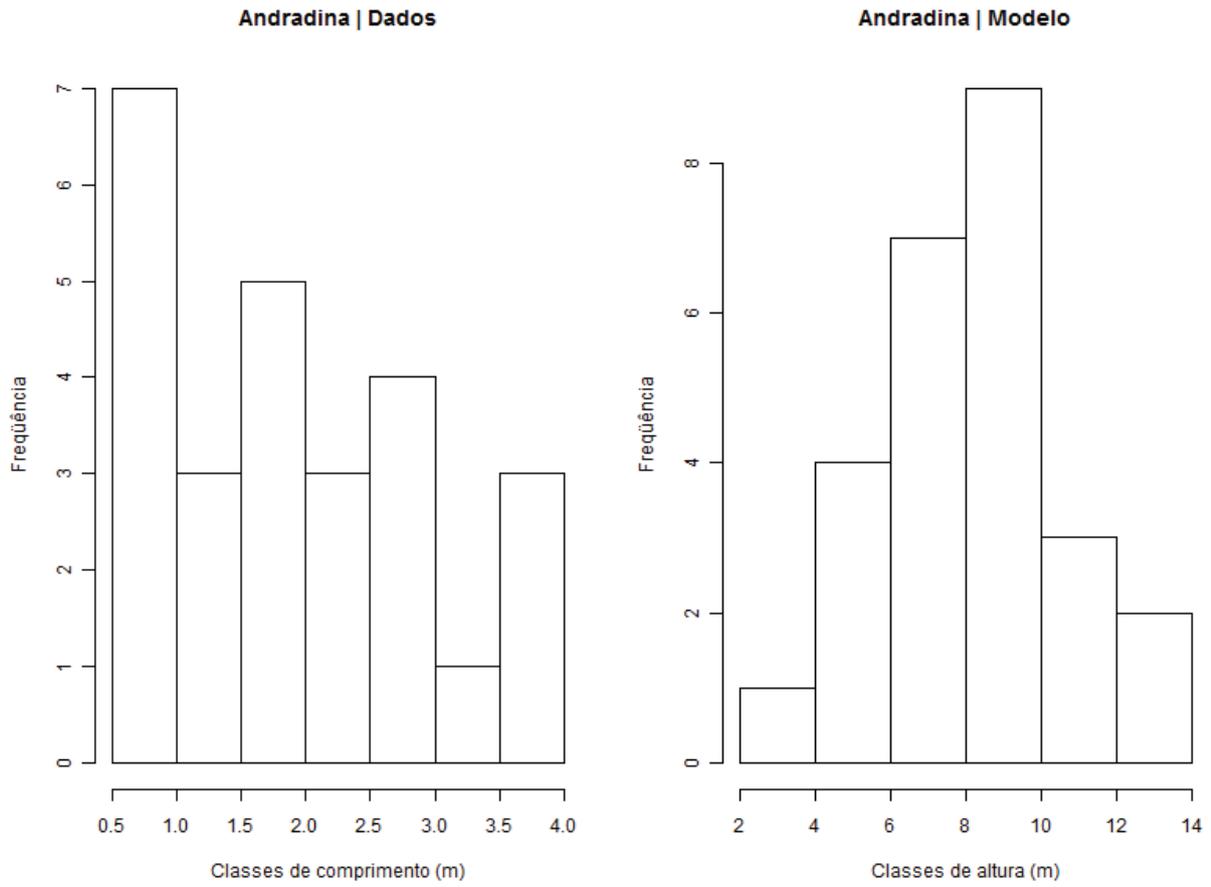


Figura 4.6.12. Histogramas para classes de comprimento e de altura estimada a partir do modelo linear para as pteridófitas fósseis da Fazenda Andradina

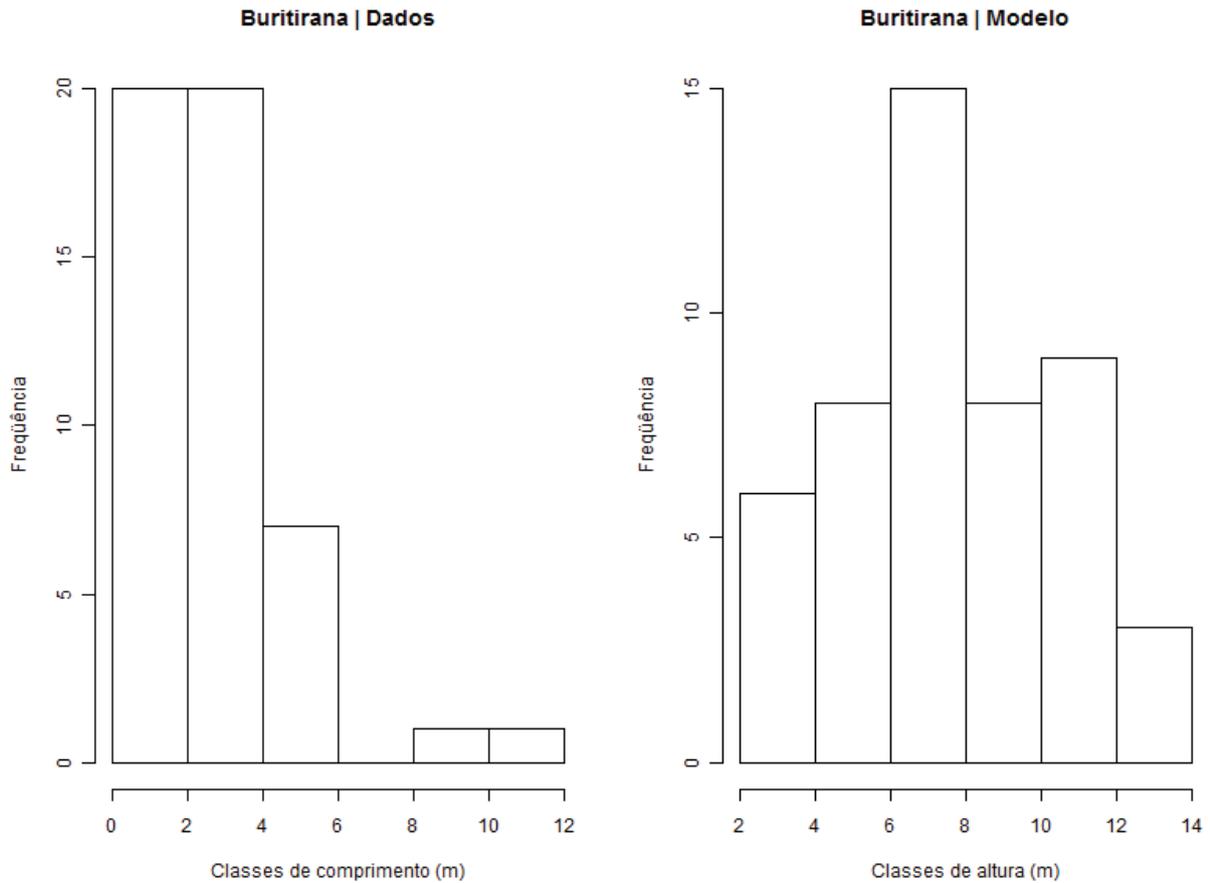


Figura 4.6.13. Histogramas para classes de comprimento e de altura estimada a partir do modelo linear para as pteridófitas fósseis da Fazenda Buritirana

A figura 4.6.14 ilustra o processo de estimativa da altura das pteridófitas com base nas medidas das pteridófitas arborescentes do presente. Além das medidas tomadas para os fitofósseis (A) e para as samambaias arborescentes atuais (B), a figura mostra o efeito da altura superestimada com o uso do diâmetro basal dos fósseis (C). Em linhas pontilhadas está a dimensão estimada das pteridófitas fósseis utilizando as medidas de diâmetro proximal (“base”) ou distal (“ápice”).

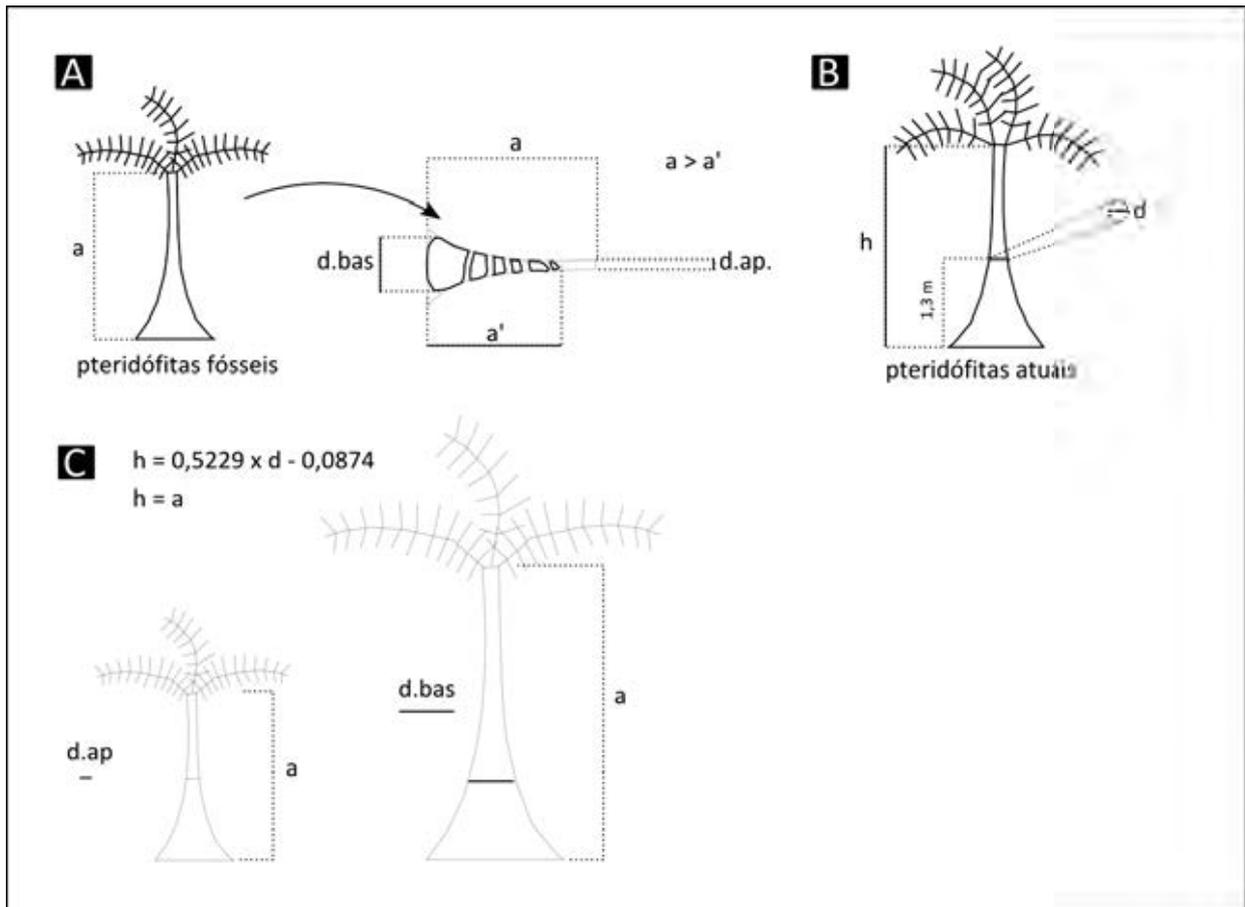


Figura 4.6.14. Processo de estimativa da altura das pteridófitas fósseis do MNAFTO com base nas pteridófitas do presente. A) Principais medidas tomadas das pteridófitas fósseis, com destaque para o comprimento ( $a'$ ), diâmetro na base ( $d.bas$ ) e na porção distal ( $d.ap$ ), e a altura verdadeira dos fósseis ( $a$ ); B) Principais medidas tomadas das pteridófitas atuais, com destaque para o diâmetro ( $d$ ) medido a 1,3 m, e altura ( $h$ ); C) Equação alométrica e o efeito do uso do diâmetro basal ( $d.bas$ ) e diâmetro na região distal ( $d.ap$ ) na estimativa da altura verdadeira das pteridófitas fósseis

As samambaias fósseis encontradas no MNAFTO mostraram, em alguns casos comentados em seções anteriores, elevado nível de fragmentação. É difícil dizer pontualmente se as fraturas, especialmente na porção distal, em direção ao ápice verdadeiro do vegetal, ocorreram no transporte até o sepultamento, ou devido a fatores intempéricos atuais, após a exposição do fóssil. Em vários casos, contudo, foi nítida a diferença entre os diâmetros medidos na porção proximal (a base verdadeira do vegetal, em muitos casos) e na distal (em nenhum caso condizente com o ápice verdadeiro). Um exemplo é mostrado na figura 4.6.15.



Figura 4.6.15. Fotografia de uma pteridófito fóssil (*Tietea*, código 26) encontrada na Fazenda Buritirana, com diâmetro basal bem maior do que o diâmetro na porção distal

O espessamento do diâmetro basal dos fósseis, por meio do manto de raízes adventícias, é a causa principal para as diferenças encontradas entre os diâmetros proximal e distal medidos no MNAFTO. A espessura média do manto de raízes foi de 5,4 cm (desvio padrão de 2,8 cm). A diferença média entre o diâmetro proximal e distal foi de 5,8 cm (com desvio padrão de 7,0 cm). Ou seja, não fosse o manto radicular, os caules das pteridófitas fósseis permianas seria aproximadamente cilíndrico. Por este motivo que os dados de diâmetro distal foram utilizados nas estimativas de alturas, por meio da equação alométrica.

Diante das informações recolhidas no presente estudo, é coerente afirmar que a vegetação formada pelos fósseis encontrados no MNAFTO constituía uma autêntica floresta, com elementos complexos presentes na ecologia de florestas do presente, embora com diferenças óbvias de composição de espécies e nível de atuação das interações ecológicas.

A observação do padrão típico da estrutura de populações de plantas atuais pode refletir em parte o comportamento das pteridófitas e gimnospermas do Permiano. Ao considerar que fitofósseis encontrados muito próximos poderiam de fato ter vivido juntos em

um mesmo local, e que os fatores intempéricos atuam de modo indistinto sobre todos os caules que afloram no presente, é razoável afirmar que os histogramas de classes de tamanho podem auxiliar na investigação sobre a estrutura destas populações.

O dossel de florestas atuais é dominado por dezenas de espécies de angiospermas. Em remanescentes de floresta primária, o dossel atinge entre 20 m e 30 m de altura. Em florestas secundárias o dossel pode ser menos denso e um pouco mais baixo, com alturas ao redor de 15 m e 20 m, no máximo. No Permiano, o dossel das florestas era substancialmente menor, em razão das limitações biomecânicas de seus principais constituintes, as pteridófitas arborescentes. Como não produzem lenho e são apoiadas apenas por feixes de raízes adventícias, há evidentes limitações de altura dos indivíduos. Os histogramas de tamanho dos fitofósseis assemelham-se aos das samambaias atuais, mas enquanto os vegetais do passado compunham o estrato superior de sua floresta, os vegetais atuais estão limitados ao estrato inferior (figura 4.6.16).

É importante ter em mente a exata dimensão dos vegetais, quando se busca estudar a forma de transporte por canais fluviais (Gurnell *et al.* 2002). No MNAFTO, a altura máxima das pteridófitas arborescentes chegaria a quase 15 m (os maiores fósseis estudados têm cerca de 10 m de comprimento medido). As samambaias permianas deveriam compor o estrato superior da floresta (o dossel), com licófitas, esfenófitas e outras samambaias menores em seu estrato intermediário (sub-bosque). Gimnospermas teoricamente poderiam ocupar áreas mais secas, um pouco mais distantes do canal principal. Eventualmente poderiam ajudar a compor o dossel e o sub-bosque da floresta.

Begon *et al.* (2006) ressaltam a importância de um conjunto de interações entre espécies constituintes de uma verdadeira comunidade. Entre as principais interações ecológicas relatadas estão a competição, parasitismo, dispersão, predação e herbivoria. Observar tais interações, mesmo em florestas atuais, não é tarefa fácil. Exceto por observações pontuais, como um pássaro alimentando-se de folhas verdes ou frutos, ou plantas epífitas crescendo sobre troncos na floresta, a maioria das observações são realizadas através das conseqüências destes processos ecológicos sobre as populações, ou seja, sobre os indivíduos de cada espécie.

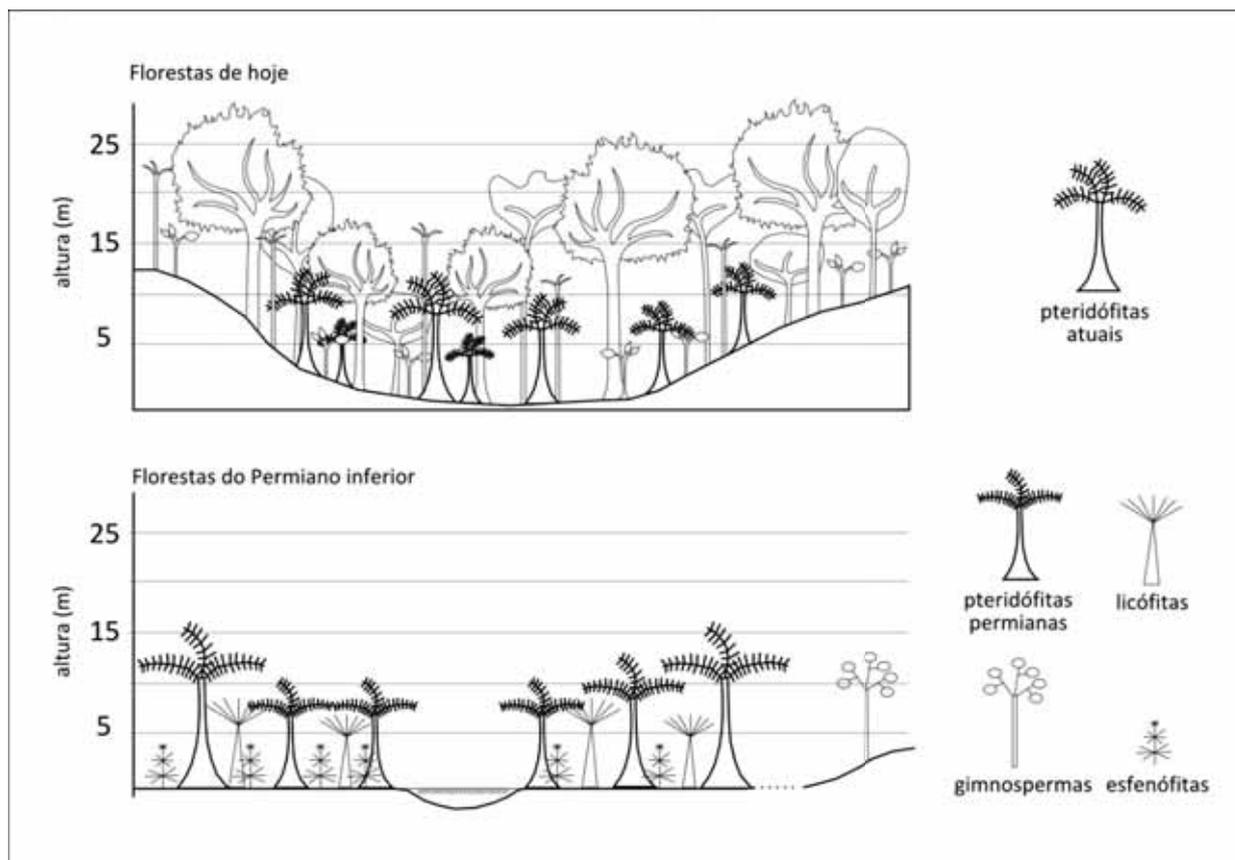


Figura 4.6.16. Desenho esquemático dos estratos verticais de florestas do presente e do Permiano

No registro fóssil, é possível observar interações ecológicas através das características morfológicas dos fósseis vegetais, da presença de várias espécies em uma mesma unidade sedimentar, e por meio da reconstituição dos ambientes em que estas espécies viveram.

Diversos autores (Röbner 2006, Röbner & Galtier 2003, DiMichelle & Phillips 2002) ressaltam que as pteridófitas do Permiano dispunham de diversas adaptações morfológicas, comparáveis com as adaptações vistas em pteridófitas atuais. Embora as samambaias permianas tenham colonizado essencialmente áreas úmidas em terras baixas, especialmente em grandes planícies de inundação, elas ocupavam grande variedade de nichos nos diversos estratos da floresta. Röbner (2006) reafirma que o manto de raízes adventícias de *Psaronius brasiliensis* e *Psaronius sinuosus*, no MNAFTO, propiciavam que diversos vegetais de hábito epifítico encontrassem ali condições ótimas para desenvolver-se.

A observação dos caules de pteridófitas arborescentes (especialmente dos gêneros *Tietea* e *Psaronius*, entre outros), e de pteridófitas epífitas (como *Botryopteris nollii*), além de licófitas, esfenófitas e até mesmo gimnospermas sugere um padrão definido de distribuição espacial e estratificação vertical para a floresta do período.

Florestas são definidas, entre diversas outras características, por quais espécies ocupam seus estratos principais: dossel e sub-bosque (Capretz 2004). Verificar padrões claros de estratificação vertical é indício evidente de uma complexa organização ecológica. Por isso torna-se importante identificar quais espécies dominavam o nível superior da floresta, e quais ocupavam os níveis inferiores.

No Carbonífero, Wnuk & Pfefferkorn (1987) já ressaltavam uma floresta com estratos definidos: pteridospermas com mais de 10 m de altura, formando o sub-bosque de uma floresta dominada por licófitas gigantes. Em tempestades as licófitas se quebrariam, tombando por cima das pteridospermas. A tempestade não teria efeitos diretos sobre as pteridospermas, pois estas ocupavam o sub-bosque, e a velocidade dos ventos sob o dossel da floresta era muito menor.

Samambaias arborescentes (Marattiales) certamente dominavam as florestas de terras baixas no Permiano Inferior (Pfefferkorn & Thomson 1982, DiMichelle & Phillips 2002, Rößler 2006), em várias províncias fitogeográficas distintas. No MNAFTO, pteridófitas arborescentes de até 15 m de altura dominavam o estrato superior da floresta. No sub-bosque, outras pteridófitas conviviam com licófitas, esfenófitas e gimnospermas epífitas, aproveitando-se das samambaias maiores para proteger-se de ventos e aproveitar alguma condição de luz e sombreamento oferecida pela copa dos constituintes do dossel.

Estas florestas ocupavam as margens de pequenos cursos d'água perenes, durante a estação seca. Após cada tempestade, durante a época chuvosa, as extensas planícies de inundação recebiam mais água, sendo possível expandir a ocupação destas áreas por elementos da floresta. Em áreas mais distantes e mais altas, gimnospermas dominavam o ambiente, em razão de sua relativa independência à água comparativamente às pteridófitas.

Como exemplificado por Wnuk & Pfefferkorn (1987), durante grandes tempestades de monções as pteridófitas do dossel protegiam as plantas do sub-bosque, oferecendo certa resistência aos ventos e à forte correnteza. Durante a estiagem, a paisagem experimentava condições semelhantes a ambientes áridos. A estrutura vertical e espacial da floresta permitiria

que aquela comunidade sobrevivesse, juntamente com pequenas adaptações das espécies para economizar água.

O sombreamento das plantas do sub-bosque e as adaptações de suas folhas permitiriam que tais espécies suportassem o período seco. Nos exemplares observados no MNAFTO é possível observar pinas e pínulas com margens complexas, dobradas de modo a proteger a face abaxial das folhas. Tais características sugerem adaptações a ambientes áridos (Tavares & Rohn 2009). Fittipaldi & Rösler (1987) já relacionavam a forma e a textura do limbo foliar com o clima, especialmente em relação a regimes de temperatura e precipitação. Os autores sugeriam ainda que análise de traqueídeos e anéis de crescimento (no caso de gimnospermas) poderiam complementar as informações sobre o paleoambiente. Greenwood (2004) reforçou a importância da análise do limbo e de suas margens para a análise de padrões climáticos e de transporte dos vegetais. Lodge *et al.* (1994) e Borchert (1999) argumentam que diversas adaptações das plantas atuais aos diferentes ciclos de inundação e estiagem de regimes de monções propiciam que elas ocupem as planícies de inundação e as margens dos rios.

Por fim, Wnuk (1996) aponta que a maioria dos estudos de reconstituição de florestas do passado abrange curtos intervalos de tempo, com pouquíssimos estudos que contemplam grandes períodos, em função da descontinuidade do registro fossilífero em escala local. De fato, a assembléia fossilífera do MNAFTO representa um pequeno intervalo de tempo e uma região geográfica muito restrita dentro do Permiano da Bacia do Parnaíba. Entretanto, as observações feitas a partir de seus fósseis e suas rochas sedimentares permitem reconstituir em parte o cenário local e regional durante o período, sobretudo em relação à estrutura da floresta que havia ali.

## 5. Conclusões

Após os resultados apresentados e discutidos nas seções anteriores desta tese, conclui-se que:

- Embora haja muitas ocorrências de “florestas petrificadas” pelo mundo, poucas de fato se referem a vegetais permineralizados por sílica. Muitos dos estudos científicos disponíveis na literatura discutem com poucos detalhes os processos de morte, transporte, sepultamento e preservação dos fósseis.
- Entre Araguaína e Filadélfia, dentro da região delimitada do Monumento Natural das Árvores Fossilizadas do Tocantins (MNAFTO), em área de aproximadamente 800 km<sup>2</sup>, três sítios fossilíferos principais expõem centenas de caules, algumas folhas e pecíolos permineralizados por sílica, em afloramentos atribuídos à Formação Motuca (Grupo Balsas) do Sul da Bacia do Parnaíba, de idade eopermiana e origem continental, predominantemente fluvial.
- Diversos caules dispostos sobre a superfície do terreno, e não apenas aqueles parcialmente mantidos na rocha sedimentar, estão preservados *in loco*.
- São reconhecidas orientações preferenciais relacionadas com paleocorrentes fluviais, responsáveis pela queda/morte e transporte dos vegetais. Os dados são consistentes em relação às paleocorrentes indicadas por estratificações cruzadas de arenitos em canais fluviais.
- Os dados tafonômicos e sedimentares sugerem paleoambientes em planícies com baixos desníveis topográficos, onde intensas tempestades de monções geravam fortes fluxos em canais rasos e largos, e conseqüente inundação de amplas planícies. As paleocorrentes para os três sítios são similares, em um padrão geral do fluxo de Oeste para Leste.
- Os estudos sobre o ambiente deposicional fornecem indícios de que poderia se tratar de um amplo sistema de leques aluviais distais, cuja área-fonte ficava a Oeste, provavelmente a dezenas ou centenas de quilômetros. Estudos em outras áreas da Bacia do Parnaíba são necessários para confirmar esta hipótese.
- Pteridófitas arborescentes e gimnospermas dominavam as florestas do Eopermiano da Bacia do Parnaíba. As pteridófitas ocupavam as margens dos corpos d’água e suas planícies de inundação, e as gimnospermas ocupavam áreas mais distantes. Os vegetais

conseguiram sobreviver durante as estações secas aproveitando-se da umidade nas margens dos canais fluviais e lençóis freáticos. Apesar do clima seco, indicado inclusive por evaporitos, a flora da Bacia do Parnaíba poderia se aproveitar do cinturão de umidade episódica observado também em outras ocorrências de floras tropicais na porção Norte do Gondwana.

- Diferenças climáticas entre a Bacia do Paraná e a Bacia do Parnaíba parecem responder em parte as questões sobre diferenças na composição das duas floras no Eopermiano.
- Latitudes equivalentes nos hemisférios Sul e Norte, com reflexos no clima, podem explicar parcialmente a similaridade entre as floras da Bacia do Parnaíba e da Província Euroamericana (especialmente representada pela flora de Chemnitz).
- Enquanto as pteridófitas arborescentes atuais ocupam parte dos estratos inferiores de florestas úmidas (como o sub-bosque da Floresta Ombrófila Densa Submontana), as pteridófitas arborescentes do Eopermiano compunham o estrato superior da floresta (dossel), com licófitas, esfenófitas e eventualmente gimnospermas epífitas nos estratos inferiores.
- Técnicas alométricas a partir da comparação com vegetais atuais podem ser ferramentas úteis para a estimativa do real tamanho dos fitofósseis. Se espécies similares, ou com nichos ecológicos análogos, são encontradas no presente, tais ferramentas podem prover informações e inferências de valor para a reconstituição dos vegetais.

## Referências Bibliográficas

- ABBE, T.B. & MONTGOMERY, D.R. Patterns and processes of wood debris accumulation in the Queets rivers basin, Washington. **Geomorphology**, v.51, p.81-107. 2003.
- ADENDORFF, R.; BAMFORD, M. & MCLOUGHLIN, S. *Liknopetalon*: a review of a rare Gondwanan, Permian pteridophyte. **Review of Palaeobotany and Palynology**, v. 126, p.83-101, 2003.
- ARCHANGELSKI, S. Nuevos elementos paleoflorísticos de la Formación Trampeadero (Carbónico), Sierra de Ambato, Provincia de La Rioja. **Ameguiniana**, v.15, n.3-4, p. 429-439. 1978.
- ARCHANGELSKI, S. Floras Neopaleozoicas Del Gondwana y su zonación estratigráfica: Aspectos paleogeográficos conexos. **Comunicações dos Serviços Geológicos de Portugal**, v.70, n.2, p. 135-150. 1984.
- ARCHANGELSKI, S. & ARONDO, O.G. Paleogeografía y plantas fosiles en el Permico Inferior austrosudamericano. **Actas I Congreso Argentino de Paleontologia y Bioestratigrafia**, p.479-496, 1975.
- ARNOLD, C.A. The proper designations of the foliage and stems of Cordaitales. **Phytomorphology** v.17, p.346-350. 1967.
- ARTABE, A.; ZAMUNER, A. & STEVENSON, D. Two New Petrified Cycad Stems, *Brunoa* gen. nov. and *Worsdellia* gen. nov., from the Cretaceous of Patagonia (Bajo de Santa Rosa, Río Negro Province), Argentina. **The Botanical Review**, New York, v. 70, n.2, p. 121-133, 2004.
- ASH, S. An Upper Triassic *Sphenopteris* showing evidence of insect predation from Petrified Forest National Park, Arizona. **International Journal of Plant Sciences**, v.160, n.1, p.208. 1999.
- ASH, S. The fossil tree ferns of Petrified Forest National Park, Arizona, and their paleoclimatological implications. *In*: SANTUCCI, S. & MCCLELLAND, L. (Ed.). **Proceedings of**

- the 6<sup>th</sup> Fossil Resource Conference: 2001 a fossil odyssey. 6<sup>th</sup> Fossil Resource Conference, Grand Junction, Colorado. 2001.
- ASSINE, M.L.; ZACHARIAS, A.A. & PERINOTTO, J.A. Paleocorrentes, paleogeografia e seqüências deposicionais da Formação Tatuí, Centro-Leste do Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Geociências**, v.33, n.1, p. 33-40. 2003.
- ATHAYDE FILHO, F.P. & WINDISCH, P.G. Florística e aspectos ecológicos das pteridófitas em uma floresta de Restinga no estado do Rio Grande do Sul, Brasil. **Iheringia**, Porto Alegre, v.61, n.1-2, p.63-71. 2006.
- AZCUY, C.; BERI, A.; BERNARDES-DE-OLIVEIRA, M.; CARRIZO, H.; DI PASQUO, M.; SARAVIA, P.; GONZÁLES, C.; IANUZZI, R.; LEMOS, V.; MELO, J.; PAGANI, A.; ROHN, R.; AMENÁBAR, C.; SABATTINI, N.; SOUZA, P.; TABOADA, A. & VERGEL, M. Bioestratigrafía Del Paleozoico Superior de América Del Sur: Primera Etapa de Trabajo hacia una nueva propuesta cronoestratigráfica. **Asociación Geológica Argentina (Publicación Especial)**, n.11, p.9-65. 2007.
- BAMFORD, M. Diversity of the Woody Vegetation of Gondwanan Southern Africa. **Gondwana Research**, Japan, v.7, n.1, p. 153-164, 2004.
- BANERJEE, M. Autochthonous deposition of Indian coal beds with palaeobotanical evidences of *in situ* plants from Saharjuri Basin, Jharkhand. **Current Science**, v. 88, n. 9, 2005.
- BATEMAN, E.M. Palaeoecology. *In*: CLEA, C.J. **Plant fossils in geological investigation; the Palaeozoic**. London, Ellis Horwood Limited, p.34-116. 1991.
- BATTILANI, J.; SCREMIN-DIAS, E. & SOUZA, A.L.T. Fitossociologia de um trecho de mata ciliar do rio da Prata, Jardim, MS, Brasil. **Acta Botanica Brasilica**, São Paulo, v.19, n.3, p.697-608. 2005.
- BATISTA, J.L.F. & MAGUIRE, D.A. Modelling the spatial structure of tropical forests. **Forest Ecology and Management**, v.110, p.293-314. 1998.
- BAUDRICK, C.A. & GRANT, G.E. Transport and deposition of large Woody debris in streams: a flume experiment. **Geomorphology**, v.41, p.263-283. 2001.

- BEGON, M.; TOWNSEND, C.R. & HARPER, J.L. **Ecology**. Blackwell Publishing Ltd., Oxford, 740p. 2006.
- BOHLIN, B. About the relation of the Gondwana floras to the Northern floras. **Cour.Forsch.Inst.Senckengerg**, Frankfurt am Main, v.34, p.97-100.
- BORCHERT, R. Climatic periodicity, phenology, and cambium activity in tropical dry forest trees. **IAWA JOURNAL**, v.20, n.3, p.239-247. 1999.
- BRACK, S.D. On a new structurally preserved arborescent Lycopsid fructification from the Lower Pennsylvanian of North America. **American Journal of Botany**, v.57, n.3, p.317-330. 1970.
- BRASIL. Sistema Nacional de Unidades de Conservação. Lei nº 9985, de 18 de Junho de 2000.
- BREA, N.; MATHEOS, S.; ZAMUNER, A. & GANUZA, D. Analisis de los anillos de crecimiento del bosque fosil de Victor Sziapelis, Terciario inferior Del Chubut, Argentina. **Ameghiniana**, v.42, n.2, p.407-418. 2005.
- BRONGNIART, A. Notice sur le *Psaronius brasiliensis*. **Bulletin de la Société Géologique de France**, v.19, p.1-7, 1872.
- BROOKS, A.P.; ABBE, T.B.; JANSEN, J.D.; TAYLOR, M. & GIPPEL, C.J. Putting the wood back into our rivers: an experiment in river rehabilitation. *In*: Rutherford, I.D.; Sheldon, F.; Brierkley, G.J. & Kenyon, C. (Edit.) **3<sup>rd</sup> Australian Stream Management Conference Proceedings – The Value of Healthy Streams**, v.1, p.73-80. 2001.
- BURNHAM, R.; ELLIS, B. & JOHNSON, K. Modern Tropical Forest Taphonomy: Does High Biodiversity Affect Paleoclimatic Interpretations? **Palaios**, v. 20, p. 439-451, 2005.
- BUURMAN, P. Mineralization of fossil wood. **Scripta Geologica**, v.12, p.1-43. 1972.
- CALDAS, E.; MUSSA, D.; LIMA FILHO, F. & RÖSLER, O. Nota sobre a ocorrência de uma floresta petrificada de idade permiana em Teresina, Piauí. **Boletim IG-USP**, publicação especial, v.7, p.69-87. 1989.
- CARSON, G. Silicification of fossils. *In*: ALLINSON, P. & BRIGGS, D. (Ed.). **Taphonomy: Releasing the data locked in fossil record**. Volume 9, Plenum Press, New York. 1991.

- CAPRETZ, R.L. Análise dos padrões espaciais de árvores em quatro formações florestais do Estado de São Paulo, através de análises de segunda ordem, como a Função K de Ripley. Dissertação de Mestrado, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba. 2004.
- CHALONER, W.B. & LACEY, W.S. The distribution of Late Palaeozoic floras. *In*: HUGHES, N.F. (ed.). Organisms and Continents through time. **Special Papers in Palaeontology**, v.12, p.241-269. 1973.
- CHAMBERS, J.M. Linear models. *In*: Chambers, J.M. & Hastie, T.J. **Statistical Models in S**. Wadsworth & Brooks, Cole. 1992.
- COIMBRA, A. & MUSSA, D. Associação lingnitaflorística na Formação Pedra de Fogo (Arenito Cacunda), Bacia do Maranhão-Piauí, Brasil. **Anais do XXXIII Congresso Brasileiro de Geologia**, Rio de Janeiro, p. 591-605. 1984.
- COLLINSON, J.D. Alluvial sediments. *In* READING, H.G (ed.). **Sedimentary Environments: Processes, Facies and Stratigraphy**. Blackwell Scientific Publishers, Oxford. 1986.
- COSTA, A.A. & ARAÚJO, G.M. Comparação da vegetação arbórea de Cerradão e de Cerrado na Reserva do Panga, Uberlândia, Minas Gerais. **Acta Botanica Brasilica**, São Paulo, v.15, n.1, p.63-72. 2001.
- COX, C.B. & HUTCHINSON, P. Fishes and amphibians from the Late Permian Pedra de Fogo Formation of northern Brazil. **Palaeontology**, v.34, p.561-573. 1991.
- CROSSMAN, G. Petrified forest. **Monthly American Journal of Geology and Natural Science**, v.1, n.5, p.233-234. 1831.
- CÚNEO, N.R. Permian phytogeography in Gondwana. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v.125, 75-104. 1996.
- DANIELS, M.D. & RHOADS, B.L. Influence of a large woody debris obstruction on three-dimensional flow structure in a meander bend. **Geomorphology**, v.51, p.159-173. 2003.
- DARWIN, C. **On the Origin of Species by Means of Natural Selection**. John Murray Publish, Londres, 381p. 1859.

- DERNBACH, U. & TIDWELL, W. **Secrets of Petrified Plants: Fascination from Millions of Years.** D'Oro Publishers, Schlehenweg. 2002.
- DERNBACH, U. **Petrified Forests.** D'oro Verlag, Heppenheim. 188 p. 1996.
- DIAS-BRITO, D. & CASTRO, J.C. 2005. **Caracterização Geológica e Paleontológica do Monumento Natural das Árvores Fossilizadas de Tocantins.** Relatório final. Instituto de Geociências e Ciências Exatas (IGCE), Unesp, Rio Claro.
- DIAS-BRITO, D.; ROHN, R., CASTRO, J.C.; DIAS, R.R. & RÖßLER, R. Floresta Petrificada do Tocantins Setentrional: O mais exuberante e importante registro florístico tropical-subtropical permiano no Hemisfério Sul. *In*: Winge, M.; Schobbenhaus, C.; Berbert-Born, M.; Queiroz, E.; Campos, D.A.; Souza, C.R.G.; Fernandes, A.C.S. (Edit.) **Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil.** Publicado na Internet em 23/01/2007 no endereço <http://www.unb.br/ig/sigep/sitio104/sitio104.pdf>. 2007.
- DIMICHELE, W.; KERP, H.; TABOR, N. & LOOY, C. The so-called "Paleophytic-Mesophytic" transition in equatorial Pangea – Multiple biomes and vegetational tracking of climate through geological time. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v.268, p.152-163. 2008.
- DIMICHELE, W.; MAMAY, S.; CHANEY, D.; WOOK, R. & NELSON, J. An Early Permian Flora with Late Permian and Mesozoic Affinities from North-Central Texas. **Journal of Paleontology**, v.75, n.2, p.449-460. 2001.
- DIMICHELE, W.; TABOR, N.; CHANEY, D. & NELSON, W. From wetlands to wet spots: environmental tracking and the fate of the Carboniferous elements in Early Permian tropical floras (in wetlands through time). **Special Paper – Geological Society of America**, v.399, p.233-248. 2006.
- DIMICHELE, W. & PHILLIPS, T. Paleoecology of the Middle Pennsylvanian-age Herrin Coal swamp (Illinois) near a contemporaneous river system, the Walshville paleochannel. **Review of Paleobotany and Palinology**, v.56, p.151-176. 1988.

- DIMICHELE, W.A. & PHILLIPS, T.L. Paleobotanical and paleoecological constraints on models of peat formation in the Late Carboniferous of Euramerica. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v.106, p.39-90. 1994.
- DIMICHELE, W.A. & PHILLIPS, T.L. The ecology of Paleozoic ferns. **Review of Palaeobotany and Palynology**, v.119, p.143-159. 2002
- DIMICHELE, W.; PFEFFERKORN, H. & GASTALDO, R. Response Of Late Carboniferous and Early Permian Plant Communities to Climate Change. **Annual Review of Earth and Planetary Science**, v. 29, p. 461-487, 2001.
- DINO, R., ANTONIOLI, L. & BRAZ, S. Palynological data from the Trisidela Member of upper Pedra de Fogo Formation ('Upper Permian') of the Parnaíba Basin, Northeastern Brazil. **Revista Brasileira de Paleontologia**, São Paulo, v.3, p.24-35. 2002.
- DITTRICH, V.A.O.; WAECHTER, J.L. & SALINO, A. Species richness of pteridophytes in a montane Atlantic rain forest plot of Southern Brazil. **Acta Botanica Brasilica**, São Paulo, v.19, n.3, p.519-525. 2005.
- DOLIANITI, E. Relações entre as Floras Paleozóicas do Brasil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v.44, p.113-117. 1972.
- DUBIEL, R.F.; PARRISH, J.T.; PARRISH, J.M. & GOOD, S.C. The Pangaen Megamonsoon – Evidence from the Upper Triassic Chinle Formation, Colorado Plateau. **Palaios**, v.6, p.347-360. 1991.
- DUBIEL, R.F.; HASIOTIS, S.T. & DEMKO, T.M. Incised valley fills in the lower part of the Chinle Formation, Petrified Forest National Park, Arizona: Complete measured sections and regional stratigraphic implications of Upper Triassic rocks. **National Service Paleontological Research Technical Report**, v.03, p.78-84. 1999.
- DURIGAN, G.; NISHIKAWA, D.; ROCHA, E.; SILVEIRA, E.R.; PULITANO, F.; REGALADO, L.; CARVALHAES, M.A.; PARANAGUÁ, P.A. & RANIERI, V.E.L. Caracterização de dois estrados da vegetação em uma área de Cerrado no Município de Brotas, SP, Brasil. **Acta Botanica Brasilica**, São Paulo, v.16, n.3, p.251-262. 2002.

- EFREMOV, J. Taphonomy: new branch of paleontology. **Pan American Geology**, v.74, p.81-93. 1940.
- FARIA, R.S. & RICARDI-BRANCO, F.S. *Lepidophylloides corumbataensis* sp. nov. from the Guadalupian in the Paraná Basin, Southern Brazil. **Review of Palaeobotany and Palynology**, no prelo.
- FARIA, R.S.; RICARDI-BRANCO, F.; GIANINI, P.C.F.; SAWAKUCHI, A.O.; DEL BEM, L.E.V. *Lycopodiopsis derbyi* Renault from the Corumbataí Formation in the State of São Paulo (Guadalupian of Paraná Basin, Southern Brazil): New data from compressed silicified stems. **Review of Palaeobotany and Palynology**, v.158, p.180-192. 2009
- FARIA JR., L.E.C. **Estudo sedimentológico da Formação Pedra de Fogo – Permiano – Bacia do Maranhão**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Pará, Belém, 57p.
- FARIA JR., L.E. O Permotriássico da Bacia do Maranhão: um modelo de paleodeserto. **Anais XXXIII Congresso Brasileiro de Geologia**, v.33, p.47. 1984.
- FARIA JR., L.E. & TRUCKENBRODT, W. Estratigrafia e Petrografia da Formação Pedra de Fogo. **Anais do XXXI Congresso Brasileiro de Geologia**, v.2, p. 740-754. 1980.
- FERNANDEZ-LOPEZ, S. Taphonomie et interprétation des paléoenvironnements. **Geobios**, v.18, p.137-154. 1995.
- FERREIRA-OLIVEIRA, L.G. & ROHN, R. Leaiid conchostracans from the uppermost Permian strata of the Paraná Basin, Brazil: Chronostratigraphic and paleobiogeographic implitations. **Journal of South American Earth Sciences**, v.29, n.2, p.371-380. 2010.
- FIELDING, C. & ALEXANDER, J. Fossil trees in ancient fluvial channel deposits: evidence of seasonal and longer-term climatic variability. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 170, p. 59-80, 2001.
- FITTIPALDI, F.C. & RÖSLER, O. As plantas fósseis como indicadores paleoclimáticos. **Anais do X Congresso Brasileiro de Paleontologia**, Rio de Janeiro, p. 925-936, 1987.

- FRAGA, L.L.; DA SILVA, L.B. & SCHMITT, J.L. Composition and vertical distribution of epiphytic pteridophytes on *Dicksonia sellowiana* Hook. (Dicksoniaceae), in mixed ombrophylous forest in Southern Brazil. **Biota Neotropica**, São Paulo, v.8, n.4, p.123-129. 2008.
- FROGGATT, P.C., WILSON, C.J.N. & WALKER, G.P.L. Orientation of logs in the Taupo Ignimbrite as an indicator of flow direction and vent position. **Geology**, v.9, p.109-111. 1981.
- GASTALDO, R.; ADENDORFF, R.; BAMFORD, M.; LABANDEIRA, C.; NEVELING, J. & SIMS, H. Taphonomic Trends of Macrofloral Assemblages Across the Permian–Triassic Boundary, Karoo Basin, South Africa. **PALAIOS**, v. 20, p. 479-497, 2005.
- GEBRIM, E. Geology and economic exploitation of gypsum deposits in Filadélfia, Goiás. **Anais XXVIII Congresso Brasileiro de Geologia**, v.28, p.185-196. 1974.
- GERRIENNE, P.; FAIRON-DEMARET, M. & GALTIER, J. A Namurian A (Silesian) permineralized flora from the Carrière du Lion at Engihoul (Belgium). **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 107, p. 1-15, 1999.
- GIBBS, M.; REES, P.; KUTZBACH, J.; ZIEGLER, A.; BEHLING, P. & ROWLEY, D. Simulations of Permian climate and comparisons with climate-sensitive sediments. **Journal of Geology**
- GLASSPOOL, I.J.; HILTON, J.; COLLINSON, M.E.; WANG, S.J. & LI, C.-S. Foliar physiognomy in Cathaysian gigantopterids and the potential to track Palaeozoic climates using an extinct plant group. **Paleogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v.205, p.69-110. 2004.
- GÓES, A.M. & FEIJÓ, F.J. Bacia do Parnaíba. **Boletim de Geociências Petrobras**, v.8, n.1, 57-67. 1994.
- GOULD, S. **Ontogeny and phylogeny**. Harvard University Press, Cambridge. 501p. 1977.
- GREENWOOD, D.R. Leaf Margin Analysis: Taphonomic Constraints. **Palaios**, v.20, p.498-505, 2004.
- GUERRA-SOMMER, M. & SCHERER, C. Middle-Late Triassic Petrified Forests from Mata Sandstone, at Rio Grande do Sul State, BR: Preliminary geological, taphonomic and biostratigraphic setting. **Geociências**, v.5, p. 117-120. 2000.

- GURNELL, A.M.; PIÉGAY, H.; SWANSON, F.J. & GREGORYS, S.V. Large wood and fluvial processes. **Freshwater Biology**, v.47, p.601-619. 2002.
- HAAS, J.N. First identification key for charophyte oospores from central Europe. **European Journal of Phycology**, v.229, p.227-235. 1994.
- HECKERT, A. & LUCAS, S. Stratigraphic distribution and age of Petrified Wood in Petrified National Park, Arizona. **National Park Service Paleontological Research**, technical report, v.98, n.1, p.129-134. 1998.
- HERBST, R. Nueva descripción de *Psaronous arrojadoi* (Pelourde) (Marattiales) del Pérmico de Brasil. **Ameghiniana**, v.21, n.2-4, p.243-258. 1985.
- HERBST, R. Studies on Psaroniaceae. I. The Family Psaroniaceae (Marattiales) and a redescription of *Tietea singularis* Solms-Laubach, from the Permian of Brazil. In: **Actas IV Congreso Argentino de Paleontología y Bioestratigrafía**, v.1, p.163-171. 1986.
- HERBST, R. Studies on Psaroniaceae. III. *Tietea derbyi* n. sp., from the Permiano f Brazil. In: SCHAARSCHMIDT, F. (Ed.). International Symposium on Palaeobotany: Anatomical investigation of plant fossils. **Courier Forschungsinstitut Senckenberg**, v.147, p.155-161. 1992.
- HERBST, R. Studies on Psaroniaceae. IV. Two Species of *Psaroinus* from Araguaína, State of Tocantins, Brazil. **Facena**, v.15, p.9-17. 1999
- HERNANDEZ-CASTILLHO, G. & STOCKEY, R. Palaeobotany of the Bunya Pine. 'On the Bunya Trail' **Queensland Review**, v.9, p. 2, 2002.
- HILL, C.; WAGNER, R. & EL-KHAYLAL, A. *Qasimia* gen. nov., an early *Marattia*-like fern from the Permian of Saudi Arabia. **Scripta Geologica**, v.79, p.1-50. 1985.
- HILTON, J.; WANG, S.; GALTIER, J. & LI, C. An Early Permian plant assemblage from the Taiyuan Formation of northern China with compression/impression and permineralized preservation. **Review of Palaeobotany and Palynology**, v. 114, p.175-189, 2001.
- IANUZZI, R. & RÖSLER, O. Floristic migration in South America during the Carboniferous: phytogeographic and biostratigraphic implications. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v.161, p.71-94. 2000.

- KELLER, A. & HENDRIZ, M. Palaeoclimatologic analysis of a Late Jurassic Petrified Forest, Southeastern Mongolia. **Palaios**, v.12, p.282-291. 1997.
- KERP, H.; HAMAD, A.A.; VÖRDING, B. & BANDEL, K. Typical Triassic Gondwanan floral elements in the Upper Permian of the paleotropics. **Geology**, v.34, n.4, p.265-268. 2006.
- KOUFOS, G.; ZOUROS, N. & MOUROUZIDOU, O. *Prodeinotherium bavaricum* (Proboscidea, Mammalia) from Lesvos island, Greece; the appearance of deinotheres in the Eastern Mediterranean. **Geobios**, v. 36, p. 305–315, 2003.
- KREBS, C. 1999. **Ecological Methodology**. Menlo Park, Addison-Wesley Educational Publishers. 620p.
- LEMOIGNE, Y. Flore Mixte au Permian Supérieur en Arabie Saoudite. **Géobios**, v.14, n.5, p.611-635. 1981.
- LI, X. The mixed Permian Cathaysia-Gondwana flora. **The Paleobotanist**, v.35, n.2, p.211-222. 1986.
- LI, H.; TIAN, B.; TAYLOR, E. & TAYLOR, T. Foliar anatomy of *Gigantonoclea guizhouensis* (Gigantopteridales) from the Upper Permian of Guizhou Province, China. **American Journal of Botany**, v.81, n.6, p.678-689. 1994.
- LIMA FILHO, M.F. **Análise estratigráfica e estrutural da Bacia Pernambuco**. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. 139p. 1998.
- LODGE, D.J.H.; MCDOWELL, W.H. & MCSWINEY, C.P. The importance of nutrient pulses in tropical forests. **Tree**, v.10, n.10, p.384-387. 1994.
- MATOS, F.B. **Pteridófitas da Reserva Natural Rio Cachoeira, Município de Antonina, Paraná, Brasil**. Monografia, Departamento de Botânica, Universidade Federal do Paraná (UFPR), 52p. 2007.
- MAHESHWARI, H. & BAJPAL, U. Northern Limits of the Eastern Gondwana: Paleobotanical evidence. **The Palaeobotanist**, v.36, p.354-368. 1987.

- MARTÍN-CLOSAS, C. & GALTIER, J. Plant taphonomy and paleoecology of Late Pennsylvanian Intramontane Wetlands in the Graissessac-Lodevè Basin (Languedoc, France). **Palaios**, v.20, p.249-265. 2005.
- MARTÍN-CLOSAS, C. & GOMEZ, B. Taphonomie des plantes et interprétations paléoécologiques; une syntèse. **Geobios**, v.37, p.65-88. 2004.
- MARTÍNEZ, J.; PÉREZ, L.; MARCUELLO, A.; CAZO, P.; CARPIO, M. & BELLMUNT, F. Exhumed channel sandstone networks within fluvial fan deposits from the Oligo-Miocene Caspe Formation, South-East Ebro Basin (North-East Spain). **Sedimentology**, v.57, p.162-189. 2010.
- MCKNIGHT, C.; GRAHAM, S.; CARROLL, A.; GAN, Q.; DILCHER, D.; ZHAO, M. & LIANG, Y. Fluvial sedimentology of an Upper Jurassic Petrified Forest assemblage, Shishu Formation, Jungarr Basin, Xinjiang, China. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v.79, p.1-9. 1990.
- MCMANUS, H.; TAYLOR, E.; TAYLOR, T. & COLLINSON, J. A petrified *Glossopteris* flora from Collinson Ridge, central Transantarctic Mountains: Late Permian or Early Triassic? **Review of Palaeobotany and Palynology**, v. 120, p.233-246, 2002.
- MERLOTTI, S. Os lenhos fósseis das Formações Irati e Serra Alta (Permiano Superior, Bacia do Paraná) do Rio Grande do Sul, Brasil – Registro de dois novos espécimes. **Geociências**, volume especial, p.37-39. 2000.
- MINELLO, L.F. As “Florestas Petrificadas” da região de São Pedro do Sul e Mata, RS. I – Preservação x Exploração. . **Acta Geologica Leopoldensia**, v.39, n.1, p.49-55. 1994a.
- MINELLO, L.F. “Florestas Petrificadas” da região de São Pedro do Sul e Mata, RS. II – Processo de fossilização e composição mineral. **Acta Geologica Leopoldensia**, v.39, n.1, p.57-73. 1994b.
- MINELLO, L.F. “Florestas Petrificadas” da região de São Pedro do Sul e Mata, RS. III – Análise morfológica megascópica, afinidades e considerações paleoambientais. **Acta Geologica Leopoldensia**, v.39, n.1, p.75-91. 1994c.
- MUELLER-DUNBOIS, D. & ELLENBERG, H. 1974. **Aims and Methods of Vegetation Ecology**. New York, J.Wiley & Sons. 547p.

- MUSSA, D. *Brasilestiloxyton* e *Solenobrasilioxyton*, dois novos gêneros gondwânicos na Formação Irati, Estado de São Paulo, Brasil. **Boletim IG-USP**, v.9, p.118-127. 1978.
- MUSSA, D. Ocorrência do gênero *Antarticoxyton* Seward, na Formação Irati (Permiano) do Estado de São Paulo, Brasil. **Anais I Congresso Latinoamericano de Paleontologia**, Buenos Aires, v.4, p.139-155. 1980.
- MUSSA, D. O gênero complexo *Dadoxyton* Endlicher 1847 e as questões sistemáticas a ele relacionadas. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v.60, n.4, p.487-488. 1988.
- MUSSA, D. Afinidades pteridospérmicas de alguns gêneros de caules gondwânicos. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v.61, n.4, p.482. 1989a.
- MUSSA, D. Estudo paleobotânico (paleoanatomia dos lenhos) na Formação Pirambóia, Bacia do Paraná, Brasil. **Anais do XI Congresso Brasileiro de Paleontologia**, v.1, p.66-67. 1989b.
- MUSSA, D. Paleobotânica: conceituação geral e grupos fósseis. *In*: CARVALHO, I. (Ed.). Paleontologia. Rio de Janeiro, Interciência, Volume 1, 861p. 2004.
- MUSSA, D. & COIMBRA, A.M. Método de estudo tafonômico aplicado a lignispécimes permianos da Bacia do Paraná. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v.56, n.1, p.85-101. 1984.
- MUSSA, D. & COIMBRA, A.M. Novas Perspectivas de Comparação entre as tafofloras permianas (de lenhos) das Bacias do Parnaíba e do Paraná. **Anais do X Congresso Brasileiro de Paleontologia**, Rio de Janeiro, p.901-923, 1987.
- MUSSA, D. & GARCIA, M. Planos estélicos pteridospérmicos do Gondwana do Brasil. **Geociências**, volume especial, p.53-56. 2000.
- O'CONNOR, J.; JONES, M. & HALUSKA, T. Flood plain and channel dynamics of the Quinault and Queets Rivers, Washington, USA. **Geomorphology**, v.51, p.31-59. 2003.
- ODUM, E. 1953. **Fundamentos de Ecologia**. Cengage Learning, São Paulo. 632p.
- ORSEN, M. & REIDEL, S. Biostratigraphy of Columbia River Basalt Group petrified forests. **Geological Society of America**, v.35, n.6, p.551. 2003.

- PARRON, L. **Aspectos da ciclagem de nutrientes em função do gradiente topográfico, em uma mata de galeria no Distrito Federal.** Tese de doutorado, Departamento de Ecologia, Universidade de Brasília, Brasília. 203p. 2004.
- PETRI, S. & FULFARO, V.J. **Geologia do Brasil.** USP, São Paulo. 631 p. 1983.
- PEYSER, C. & POULSEN, C. Controls on Permo-Carboniferous precipitation over tropical Pangaea: a CGM sensitivity study. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v.268, p.181-192. 2008.
- PELOURDE, F. Observations sur le *Psaronius brasiliensis*. **Annales des Sciences Naturelles (Botanique)**, v.9, n.16, p.337-352. 1912.
- PFEFFERKORN, H.W. & THOMSON, M. Changes in dominance patterns in Upper Carboniferous plant-fossil assemblages. **Geology**, v.10, p.641-644.
- PIGG, K. & MCLOUGHLIN, S. Anatomically preserved *Glossopteris* leaves from the Bowen and Sydney basins, Australia. **Review of Palaeobotany and Palynology**, v. 97, p.339-359, 1997.
- PIGG, K. & TAYLOR, T. Anatomically preserved *Glossopteris* stems with attached leaves from the Central Transantarctic Mountains, Antarctica. **American Journal of Botany**, v.80, n.5, p.500-516. 1993.
- PINTO, C.P. & SAD, J.H.G. Revisão da Estratigrafia da Formação Pedra de Fogo, borda sudoeste da Bacia do Parnaíba. **Anais do XXXIV Congresso Brasileiro de Geologia**, Goiânia, v.34, n.1, p.346-358. 1986.
- POTTER, P.E. & PETTJOHN, F.J. 1977. **Paleocurrents and Basin Analysis.** Berlin-Heidelberg-New York, Springer-Verlag, 425p.
- REES, P.M.C.A.; GIBBS-MARK, T.; ZIEGLER, A.M.; KUTZBACH, J.W. & BEHLING, P.J. Permian climates evaluating model predictions using global paleobotanical data. **Geology**, v.27, n.10, p.891-894. 1999.
- RICARDI, F. **Flora das Formações Carache e Palmarito (Neopaleozóico) na Região de Carache, Estado de Trujillo, Venezuela.** Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências. 1994.

- RICARDI-BRANCO, F.T. Licófitas da Formação Rio Bonito (Permiano Inferior, Bacia do Paraná), noroeste do Estado do Paraná, Brasil. **Revista Brasileira de Paleontologia**, Porto Alegre, v.5, p.21-30. 2003.
- RICARDI-BRANCO, F.T. Venezuelan paleoflora of the Pemsylvanian-Early Permian: paleobiogeographical relationships to central and western equatorial Pangea. **Gondwana Research**, v.14, p.297-305. 2008.
- ROBERTS, E.M. & HENDRIX, M.S. Taphonomy of a Petrified Forest in the Two Medicine Formation (Campanian), Northwest Montana: Implications for Palinspastic Restoration of the Boulder Batholith and Elkhorn Mountains Volcanics. **Palaios**, v.15, p. 476-482. 2000.
- RÖßLER, R. Two remarkable Permian petrified forests: correlation, comparison and significance. **Geological Society Special Publications**, v. 265, p. 39–63, 2006.
- RÖßLER, R. & GALTIER, J. First *Grammatopteris* tree ferns from the Southern Hemisphere - new insights in the evolution of the Osmundaceae from the Permian of Brazil. **Review of Palaeobotany and Palynology**, v. 121, p.205-230, 2002.
- RÖßLER, R. & GALTIER, J. *Dernbachia brasiliensis* gen. nov. et sp. nov. - a new small tree fern from the Permian of NE Brazil. **Review of Palaeobotany and Palynology**, v. 122, p.239-263, 2002.
- RÖßLER, R. & GALTIER, J. The first evidence of the fern *Botryopteris* from the Permian of the Southern Hemisphere reflecting growth form diversity. **Review of Palaeobotany and Palynology**, v. 127, p.99-124, 2003.
- RÖßLER, R. & NOLL, R. Der permische versteinerte Wald von Araguaina/Brasilien – Geologie, Taphonomie und Fossilführung. **Veröffentlichungendes Museum für Naturkunde Chemnitz**, v.25, p.5-44. 2002.
- ROHN, R. & RÖSLER, O. Pteridófilas pectopteróides da Formação Rio do Rasto no Estado do Paraná e da Formação Estrada Nova no Estado de São Paulo (Bacia do Paraná, Permiano Superior). **Boletim IG-USP**, São Paulo, v.17, p.57-76, 1986.
- ROHN, R. & RÖSLER, O. Relações entre a Flora Permiana do Gondwana e as floras das províncias setentrionais. **Anais X Congresso Brasileiro de Paleontologia**, Rio de Janeiro, v.2, p.885-899. 1987.

- ROHN, R. & RÖSLER, O. Middle to Upper Permian phyt stratigraphy of the Eastern Paraná Basin. **Geociências**, volume especial, p.69-73. 2000.
- ROLIM, L.B. **Pteridófitas do Parque Estadual do Itacolomi, Minas Gerais, Brasil**. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília. 2007.
- ROSA-ALVES, L. & GUERRA-SOMMER, M. Inferências tafonômicas para um fragmento de lenho da Formação Irati, Permiano Superior, da Bacia do Paraná, RS, Brasil. **Geociências**, volume especial, p.49-53. 2000.
- ROSCHER, M. & SCHNEIDER, J. Permo-Carboniferous climate: Early Pennsylvanian to Late Permian climate development of Central Europe in a regional and global context (in non-marine Permian biostratigraphy and biochronology). **Geological Society Special Publications**, v.265, p.95-136. 2006.
- RÖSLER, O. Confronto de aspectos entre as taofloras neopaleozóicas do Brasil e Argentina. **Actas I Congreso Argentino de Paleontología y Bioestratigrafía**, Tucumán, vol.1, p. 505-523. 1975.
- RÖSLER, O. The Brazilian Eogondwanic floral succession. **Boletim IG-USP**, v.9, p.85-91. 1978.
- ROSSATTO, D.R.; TONIATO, N.T.Z. & DURIGAN, G. Flora fanerogâmica não-arbórea do Cerrado na Estação Ecológica de Assis, Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Botânica**, v.31, n.3, p.409-424. 2008.
- SALINO, A. & ALMEIDA, T.E. Pteridófitas do Parque Estadual do Jacupiranga, SP, Brasil. **Acta Botanica Brasilica**, São Paulo, v.22, n.4, p.983-991. 2008.
- SALDI-CAROMILE, K.; BATES, K.; SKIDMORE, P.; BARENTI, J. & PINEO, D. **Stream Habitat Restoracion Guidelines: Final Draft**. Washington Department of Fish and Wildlife, Washington Department of Ecology & U.S. Fish and Wildlife Service, Olympia, Washington. 2004.
- SCOTESE, C.R. **Atlas of Earth History**. PALEOMAP Project, Arlington, Texas. 52p. 2001.
- SILVA, M.R.P. & ALMEIDA, M.G. O agronegócio e o Estado do Tocantins: o atual estágio de consolidação. **Caminhos de Geografia**, v.8, n.21, p.28-45. 2007.

- SIMÕES, M. & HOLZ, M. Tafonomia: processos e ambientes de fossilização. *In*: CARVALHO, I. (Ed.). Paleontologia. Rio de Janeiro, Interciência, 861p., 2004.
- SMITH, A.R.; PRYER, K.M.; SCHUETTPELZ, E.; KORALL, P., SCHNEIDER, H. & WOLF, P.G. A classification for extant ferns. **Taxon**, v.55, n.3, p.705-731. 2006.
- SOUZA, M.C.; GUILLAUMET, J. & AGUIAR, I.J.A. Ocorrência e distribuição de pteridófitas na Reserva Florestal Walter Egler, Amazônia Central, Brasil. **Acta Amazonica**, Manaus, v.33, n.4, p.555-562. 2003.
- STEPHENSON, M.; ANGIOLINI, L.; LENG, M.; BREWER, T.; BERRA, F.; JADOUL, F.; GAMBACORTA, G.; VERNA, V. & AL BELOUSHI, B. Abrupt environmental and climatic change during the deposition of the Early Permian Haushi limestone, Oman. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v.270, p.1-18. 2008.
- STOCKEY, R.A. Reproductive biology of the Cerro Cuadrado (Jurassic) Fossil Conifers: *Pararaucaria patagonia*. **American Journal of Botany**, v.64, n.6, p.733-744. 1977.
- SVETOSLAV, G. & MANCHEV, P. Oligocene pyroclastic rocks and a petrified forest in Nanovista Depression, Eastern Rhodopes. **Geokhimiya, Mineralogiya I Petrologiya**, v.42, p.47-65. 2005.
- TABOR, N. & MONTAÑEZ, I. Shifts in late Paleozoic atmospheric circulation over western equatorial Pangea: Insights from pedogenic mineral O compositions. **Geology**, v.30, n.12, p.1127-1130. 2002.
- TANNER, L.; CHAPMAN, M. & ZEIGLER, K. Facies analysis and sedimentologic model for deposition of bone-bearing strata in the Upper Triassic Petrified Forest Formation at the Snyder Quarry, north-central New Mexico. **Bulletin of New Mexico Museum of Natural History and Science**, v.24, p.41-48. 2003.
- TAYLOR, E.; TAYLOR, T. & CÚNEO, N. The Present is Not the Key to the Past: A Polar Forest from the Permian of Antarctica. **Science**, v. 257, p. 1675-1677, 1992.
- TAVARES, T.M.V. & ROHN, R. First record of petrified Permian pectopterids from the Paraná Basin, Brazil (Corumbataí Formation, Passa Dois Group, northeastern State of São Paulo): Morphology, anatomy and paleoecological implications. **Journal of South American Earth Sciences** v.27, p.60-73. 2009.

- TAVARES, T.M.V.; ROHN, R. & CAPRETZ, R.L. Evidências ecomorfológicas em pínulas de *Pecopteris* permineralizadas da Formação Corumbataí em Piracicaba, SP (Bacia do Paraná, Permiano). **Anais LVII Congresso Nacional de Botânica**, v.1. 2006.
- TAVARES, T.M.V.; ROHN, R.; RÖBLER, R.; NOLL, R. & CAPRETZ, R.L. Permian petrified fern leaves from the Central North Brazil (Parnaíba Basin, Araguaína region, Maranhão). **12<sup>th</sup> International Palynological Congress (IPC-XII) & 8<sup>th</sup> International Organisation of Palaeobotany Conference (IOPC-VIII)**, v.1, p.277-278. 2008.
- TAVARES, T.M.V.; ROHN, R.; CAPRETZ, R.L.; RÖBLER, R. & NOLL, R. Permian Marattiaean petioles from the western tropical Gondwana (Parnaíba Basin, Tocantins, Brazil). **Anais XIV Simposio Argentino de Paleobotánica y Palinología**, Mar del Plata, v.1, p.13. 2009.
- TERRIEN, F. & FASTVOSKY, D. Paleoenvironments of Early Theropods, Chinle Formation (Late Triassic), Petrified Forest National Park, Arizona. **PALAIOS**, V. 15, P.194-211, 2000.
- VELOSO, H.P.; RANGEL-FILHO, A.L.R.; LIMA, J.C.A. **Classificação da vegetação brasileira adaptada a um sistema universal**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Rio de Janeiro. 1991.
- WILSON, F.; DETTERMAN, R. & DUBOIS, G. **Digital data for Geologic Framework of the Alaska Peninsula, Southwest Alaska, and the Alaska Peninsula Terrane**. Open File Report, U.S. Geological Survey, p.99-317. 1999.
- WNUK, C. The development of floristic provinciality during the Middle and Late Paleozoic. **Review of Palaeobotany and Palynology**, v.90, p.5-40. 1996.
- WNUK, C. & PFEFFERKORN, H.W. A Pennsylvanian-age terrestrial storm deposit: using plant fossils to characterize the history and process of sediment accumulation. **Journal of Sedimentary Petrology**, v.57, p.212-221. 1987.
- WOODCOCK, D. & MEIER, H. Investigation and conservation of the Eocene Piedra Chamana Petrified Forest, Peru. **Geological Society of America**, v.35, n.6, p.59. 2003.