



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

ANA BEATRIZ FURTADO CARVALHO

GEOLOGIA E PALEONTOLOGIA DO ORDOVICIANO-SILURIANO DA BACIA DO
PARANÁ: UM ENFOQUE NO REGISTRO DE BRAQUIÓPODES

CAMPINAS

2024

ANA BEATRIZ FURTADO CARVALHO

GEOLOGIA E PALEONTOLOGIA DO ORDOVICIANO-SILURIANO DA BACIA DO
PARANÁ: UM ENFOQUE NO REGISTRO DE BRAQUIÓPODES

DISSERTAÇÃO APRESENTADA AO INSTITUTO DE
GEOCIÊNCIAS DA UNIVERSIDADE ESTADUAL DE
CAMPINAS PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRA
EM GEOCIÊNCIAS NA ÁREA DE GEOLOGIA E
RECURSOS NATURAIS

ORIENTADOR: PROFA. DRA. CAROLINA ZABINI

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO
FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELA
ALUNA ANA BEATRIZ FURTADO CARVALHO E
ORIENTADA PELA PROFA. DRA. CAROLINA
ZABINI

CAMPINAS

2024

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)
Biblioteca do Instituto de Geociências
Marta dos Santos - CRB 8/5892

C253g Carvalho, Ana Beatriz Furtado, 1997-
Geologia e paleontologia do Ordoviciano-Siluriano da Bacia do Paraná : um enfoque no registro de braquiópodes / Ana Beatriz Furtado Carvalho. –
Campinas, SP : [s.n.], 2024.

Orientador: Carolina Zabini.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP),
Instituto de Geociências.

1. Gondwana (Geologia). 2. Brachiopoda. 3. Invertebrados fósseis. 4.
Paleontologia - Paleozoico. I. Zabini, Carolina, 1983-. II. Universidade Estadual
de Campinas (UNICAMP). Instituto de Geociências. III. Título.

Informações Complementares

Título em outro idioma: Geology and paleontology of the Ordovician-Silurian interval in the Paraná Basin : a focus on the brachiopod record

Palavras-chave em inglês:

Gondwana (Geology)

Brachiopoda

Fossil invertebrates

Paleontology - Paleozoic

Área de concentração: Geologia e Recursos Naturais

Titulação: Mestra em Geociências

Banca examinadora:

Carolina Zabini [Orientador]

Matheus Denezine

Diego Fernando Muñoz

Data de defesa: 30-08-2024

Programa de Pós-Graduação: Geociências

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0001-9592-9573>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/4705804891998813>



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

AUTORA: Ana Beatriz Furtado Carvalho

**GEOLOGIA E PALEONTOLOGIA DO ORDOVICIANO-SILURIANO DA BACIA DO
PARANÁ: UM ENFOQUE NO REGISTRO DE BRAQUIÓPODES**

ORIENTADORA: Profa. Dra. Carolina Zabini

Aprovada em: 30 / 08 / 2024

EXAMINADORES:

Profa. Dra. Carolina Zabini - Presidente

Prof. Dr. Diego Fernando Muñoz

Prof. Dr. Matheus Denezine

A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria do Programa da Unidade..

Campinas, 30 de agosto de 2024.

SÚMULA/BIOGRAFIA

Ana Beatriz Furtado Carvalho cursou graduação em Ciências Biológicas na Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), obtendo título de bacharel e licenciada. Atuou principalmente na área do ensino, tendo experiência com a educação formal no Ensino Básico e no Ensino Superior. Também atuou com educação não-formal com práticas em museus, projetos de extensão universitária e divulgação científica. Sua pesquisa de mestrado foi conduzida no programa de pós-graduação em Geociências da UNICAMP, com enfoque em Paleontologia de Invertebrados.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todos aqueles que contribuíram para a realização da presente pesquisa. Obrigada à Dra. Carolina Zabini, orientadora deste trabalho, pelas contribuições constantes, por sua paciência, dedicação e pelo incentivo à melhoria contínua. Obrigada a todos os professores e servidores do Instituto de Geociências da Universidade Estadual de Campinas, que compartilharam o tempo, espaço e conhecimento que foram tão essenciais para este trabalho. Agradeço aos colegas do programa de pós-graduação, pelas xícaras de café divididas nas manhãs e madrugadas.

Obrigada aos colegas do Laboratório de Paleohidrogeologia — em especial, à Ana Laura Gomes, Francisco Arouca e Isabella Mattos por tantas horas trabalhando e aprendendo juntos em campo e em laboratório. Esta pesquisa não teria sido tão estimulante sem a ajuda e companhia de vocês! Obrigada aos colegas da Universidade de Brasília pela parceria em diversas etapas do projeto — ao Dr. Dermeval do Carmo, Dra. Livia Rodrigues e Dr. Matheus Denezine pelos ensinamentos, provocações científicas e sugestões valiosas.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), processo nº 2022/09053-9.

Obrigada àqueles que, mesmo não compartilhando do mesmo espaço acadêmico, contribuíram de forma imprescindível para a pesquisa. À minha família, Deborah, Pedro e Matheus, que me apoiam e guiam em meus caminhos. À minha família no Ceará, em especial à Luciane, Eliane e Melchisedec por me acolherem em suas casas durante tantos momentos da minha trajetória. Ao meu pai, Davi Carvalho, que esteve comigo no início desta pesquisa, mas não pôde ver sua conclusão — a ele, agradeço por me incentivar na busca pela verdade e pelo Verdadeiro. Ao meu noivo, Arthur Lago, por sua confiança, amizade e amor incomparável, que me manteve firme em meio ao caos.

Agradeço também aos meus amigos e companheiros do Instituto de Biologia da UNICAMP. Saber que compartilhamos tantas percepções e ideais me ajudou a manter os pés no chão diante dos desafios. Às minhas amigas e amigos de tantos tempos e lugares, que estiveram comigo para me ensinar, escutar e revigorar — agradeço por tanta paciência e encorajamento. Aos meus amigos da ABC² Campinas, que me ensinaram quase tudo que sei sobre trabalho em equipe e que me constroem com seu carinho e sua dedicação incessantes. Àquele que é a Esperança, eu agradeço.

EPÍGRAFE

Anybody who has been seriously engaged in scientific work of any kind realizes that over the entrance to the gates of the temple of science are written the words *Ye must have faith*. It is a quality which the scientists cannot dispense with.

— Max Planck (*Where is Science Going?* p. 214)

RESUMO

A unidade aloestratigráfica conhecida como Grupo Rio Ivaí da Bacia do Paraná é constituída pelas formações Alto Garças, Iapó e Vila Maria que, juntas, datam do Ordoviciano-Siluriano. O Grupo Rio Ivaí foi formalmente proposto nos anos 1990, mas o histórico de estudos de suas unidades data da década de 1940, compreendendo trabalhos com diferentes enfoques geológicos e paleontológicos. Nesta pesquisa, buscou-se resgatar as principais contribuições ao conhecimento das formações do Ordoviciano-Siluriano da Bacia do Paraná brasileira, com o intuito de detalhar as informações, saberes e paradigmas propostos ao longo das décadas, especialmente no que diz respeito aos conhecimentos paleontológicos. A partir de novas coletas conduzidas em afloramentos clássicos do Grupo Rio Ivaí, localizados na borda norte da Bacia do Paraná, este trabalho também revisita a paleobiodiversidade reportada para o Ordoviciano-Siluriano da bacia e reporta a ocorrência de novos grupos fósseis. O grupo de braquiópodes recebe especial atenção dado o seu potencial bioestratigráfico. Em escala global, os braquiópodes constituem um dos grupos fósseis de grande relevância bioestratigráfica para a determinação do Hirnantiano. Na Bacia do Paraná, entretanto, este intervalo não está bem estabelecido e requer estudos mais detalhados. A ocorrência de diferentes grupos de braquiópodes já foi reportada para as formações Iapó (Ordoviciano Superior) e Vila Maria (Siluriano Inferior). Este projeto também objetiva investigar a fauna de braquiópodes destas formações através de análises taxonômicas e tafonômicas. O estudo destes organismos, além de elucidar questões sobre a diversidade de paleoinvertebrados do Paleozoico Inferior da Bacia do Paraná, também pode fornecer evidências para o estabelecimento do Hirnantiano da Bacia, possibilitando a análise comparada destes estratos com aqueles de idade hirnantiana em outras regiões do globo. As etapas do projeto envolveram coleta tafonômica do material e análise direta de indivíduos. O estudo das amostras se deu por meio da observação com microscópio estereoscópico e de técnicas como a microscopia eletrônica de varredura. Com este trabalho, contribuiu-se para o resgate histórico do Grupo Rio Ivaí, a distribuição dos fósseis nesse intervalo e, em especial, para a caracterização da fauna de braquiópodes e sua comparação com o Hirnantiano global.

Palavras-Chave: Gondwana (Geologia); Brachiopoda; Invertebrados fósseis; Paleontologia - Paleozoico.

ABSTRACT

The allostratigraphic unit known as the Rio Ivaí Group of the Paraná Basin is made up of the Alto Garças, Iapó and Vila Maria formations which, together, date back to the Ordovician-Silurian. The Rio Ivaí Group was formally proposed in the 1990s, but the history of studies of its units dates back to the 1940s, comprising work with different geological and paleontological approaches. In this research, we sought to rescue the main contributions to the knowledge of the Ordovician-Silurian formations of the Brazilian Paraná Basin, with the aim of detailing the information, knowledge and paradigms proposed over the decades, especially regarding paleontological knowledge. Based on new studies conducted in classic outcrops of the Rio Ivaí Group, located on the northern edge of the Paraná Basin, this work also revisits the fossil biodiversity reported for the Ordovician-Silurian of the basin and reports the occurrence of new fossil groups. The group of brachiopods receives special attention due to their biostratigraphic potential. On a global scale, brachiopods constitute one of the fossil groups of great biostratigraphic relevance for determining the Hirnantian. In the Paraná Basin, however, this interval is not well established and requires more detailed studies. The occurrence of different groups of brachiopods has already been reported for the Iapó (Upper Ordovician) and Vila Maria (Lower Silurian) formations. This project also aims to investigate the brachiopod fauna of these formations through taxonomic and taphonomic analyses. The study of these organisms, in addition to elucidating questions about the diversity of fossil invertebrates from the Lower Paleozoic of the Paraná Basin, can also provide evidence for the establishment of the Hirnantian of the Basin, enabling the comparative analysis of these strata with those of Hirnantian age in other regions of the world. The project stages involved taphonomic collection of material and direct analysis of individuals. The samples were studied through observation with a stereoscopic microscope and techniques such as scanning electron microscopy. With this work, we hope to contribute to the characterization of the global Hirnantian brachiopod fauna, as well as to value and project efforts of Brazilian paleontology.

Keywords: Gondwana; Brachiopoda; Fossil invertebrates; Paleontology - Paleozoic.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Gondwana e outros paleocontinentes durante o Ordoviciano Superior, aprox. 445 Ma. Adaptado de Zabini <i>et al.</i> (2021).	18
Figura 2. Esquema simplificado das fases do projeto, iniciando a partir das campanhas de campo. A revisão bibliográfica será realizada ao longo de todas as etapas.	25
Figura 3. Mapa geológico da Bacia do Paraná, identificando as diferentes Supersequências ou Grupos. Em preto, o Grupo Rio Ivaí. Fonte: Carbonaro e Ghilardi (2016), modificado de Milani e Ramos (1998).	38
Figura 4. Carta estratigráfica do Ordoviciano-Siluriano da Bacia do Paraná, apresentando as unidades paraguaias e brasileiras. As formações do Grupo Rio Ivaí foram destacadas em vermelho. Adaptado de Gonçalves <i>et al.</i> (2022).	39
Figura 5. Mapa da distribuição do Grupo Rio Ivaí no flanco norte da Bacia do Paraná, Brasil. Afloramentos: (1) COHAB; (2) Córrego da Aldeia; (3) Fazenda Três Barras.	42
Figura 6. Seção COHAB, localizada em Barra do Garças (MT), Brasil. a. Visão geral do afloramento. b. Pesquisadores trabalhando no afloramento, em coleta para paleoinvertebrados. c. Quadrícula de 50 x 50 x 50 cm, na qual trabalha-se com esforço de coleta e tempo controlados, para a coleta tafonômica de paleoinvertebrados.	43
Figura 7. Seção Fazenda Três Barras, localizada em Bom Jardim de Goiás (GO), Brasil. a. Pesquisadoras trabalham em coleta para paleoinvertebrados às margens. b. Folhelhos da Formação Vila Maria constituem as margens do riacho que se forma após a queda da cachoeira Três Barras, que dá nome à seção.	45
Figura 8. Rochas das formações Iapó e Vila Maria aflorando na seção Córrego da Aldeia. a. Paredão rochoso onde se dá o contato entre as formações Iapó e Vila Maria. b. Pesquisadores fazendo coleta tafonômica de paleoinvertebrados nos folhelhos da Fm. Vila Maria.	46
Figura 9. Perfis estratigráficos das seções (A) COHAB, (B) Fazenda Três Barras <i>sensu</i> Rodrigues (2021) e (C) Córrego da Aldeia <i>sensu</i> Adorno (2014).	47
Figura 10. Ocorrência de grupos fósseis no afloramento COHAB. Os grupos destacados em rosa no perfil são aqueles de ocorrência inédita na seção.	61
Figura 11. Braquiópodes linguliformes recuperados na seção COHAB. a. Obolídeo indeterminado. b. Lingulídeo indeterminado, valva dorsal. c. <i>Kosoidea australis</i> , valvas ventrais. d. <i>Kosoidea australis</i> , valva dorsal. e. Fragmentos de <i>K. australis</i> ; escala em milímetros (mm).	62

Figura 12. Grupos de paleoinvertebrados recuperados no nível mais biodiverso da seção COHAB. a-b. Ostracode <i>Satiellina paranaensis</i> . c-d. Braquiópodes rhynconeliformes indeterminados. e. Arqueogastrópodes. f. Molde externo de bivalve, evidenciando a ornamentação de uma de suas valvas.	63
Figura 13. Molde do tórax e parte do pigídio de um espécime de trilobita dalmanitídeo, recuperado na seção COHAB.....	64
Figura 14. Escolecodontes recuperados em coletas para paleoinvertebrados em diferentes afloramentos. a. Escolecodonte indeterminado da seção COHAB. b-c. Escolecodontes indeterminados da seção Fazenda Três Barras.	64
Figura 15. Ocorrência de grupos fósseis no afloramento Fazenda Três Barras.	66
Figura 16. Fósseis recuperados no afloramento Fazenda Três Barras. a. Arqueogastrópodes em vista lateral. b. Arqueogastrópode em vista posteroventral. c. Valvas disarticuladas de molusco bivalve. d. Fragmento de braquiópode rhynconeliforme.	67
Figura 17. Ocorrência de grupos fósseis no afloramento Córrego da Aldeia.....	69
Figura 18. Composição da fauna de paleoinvertebrados da seção COHAB, com o número absoluto de espécimes (n) de <i>K. australis</i> . Total N=1571.....	72
Figura 19. Composição da fauna de paleoinvertebrados da seção COHAB, excluindo amostras de <i>K. australis</i> , com o número absoluto de espécimes (n) por grupo. Total N=81.	72
Figura 20. Composição da fauna de paleoinvertebrados da seção Fazenda Três Barras. No canto esquerdo, o número absoluto de espécimes (n) de cada grupo recuperado. Discinídeos e rhynconeliformes foram considerados no número total de espécimes de braquiópodes. Total N=239.	74
Figura 21. Distribuição de arqueogastrópodes por nível estratigráfico da seção Fazenda Três Barras. Cada barra do gráfico representa uma quadrícula de 50 cm no perfil. Os níveis representados são 6 metros a 12 metros.	75
Figura 22. Distribuição de bivalves por nível estratigráfico da seção Fazenda Três Barras. Cada barra do gráfico representa uma quadrícula de 50 cm no perfil. Os níveis representados são 6 metros a 12 metros.	76
Figura 23. Distribuição de ostracodes por nível estratigráfico da seção Fazenda Três Barras. Cada barra do gráfico representa uma quadrícula de 50 cm no perfil. Os níveis representados são 6 metros a 12 metros.	76
Figura 24. Composição da fauna de paleoinvertebrados da seção Córrego da Aldeia. No canto esquerdo, o número absoluto de espécimes (n) de cada grupo recuperado. Total N=267.	77

Figura 25. Distribuição de arqueogastropodes por nível estratigráfico da seção Córrego da Aldeia. Cada barra do gráfico representa uma quadrícula de 50 cm no perfil. Os níveis representados são 10 metros a 18 metros.	78
Figura 26. Distribuição de bivalves por nível estratigráfico da seção Córrego da Aldeia. Cada barra do gráfico representa uma quadrícula de 50 cm no perfil. Os níveis representados são 10 metros a 18 metros.....	78
Figura 27. Distribuição de ostracodes por nível estratigráfico da seção Córrego da Aldeia. Cada barra do gráfico representa uma quadrícula de 50 cm no perfil. Os níveis representados são 10 metros a 18 metros.	79
Figura 28. Distribuição agrupada de arqueogastropodes, bivalves e ostracodes nos afloramentos Córrego da Aldeia e Fazenda Três Barras. A densidade de amostras indica quanto da assembleia fossilífera foi recuperada em determinado nível estratigráfico.	81
Figura 29. Distribuição dos arqueogastropodes, bivalves e ostracodes recuperados nas seções Córrego da Aldeia e Fazenda Três Barras. Os picos das curvas indicam mais indivíduos recuperados em determinado nível estratigráfico.	82
Figura 30. Espécimes de <i>Dalmanella</i> cf. <i>testudinaria</i> (Dalman, 1828) articulados, recuperados na seção COHAB, Formação Iapó. Todas as escalas equivalem a 1 mm. a-d. CP3-1856a; a. Vista ventral; b. Vista dorsal; c. Vista anterior; d. Vista posterior. e-h. CP3-1859; e. Vista ventral; f. Vista dorsal; g. Vista anterior; h. Vista posterior. i-l. CP3-1861; i. Vista ventral; j. Vista dorsal; k. Vista anterior; l. Vista posterior.	87
Figura 31. Estruturas externas de <i>Dalmanella</i> cf. <i>testudinaria</i> ; todas as imagens foram obtidas do espécime CP3-1861. a. Costelas de ornamentação. b. Capilar (indicado pelas setas), estrutura perpendicular às costelas. c. Pontuações presentes em toda a superfície externa; as setas indicam pontuações de diferentes tamanhos. d. Margem anterior da concha, evidenciando as costelas na ausência de aditículas.	88
Figura 32. Estruturas externas de <i>Dalmanella</i> cf. <i>testudinaria</i> . a-b. CP3 1856a. a. Detalhe das costelas, evidenciando a ausência de aditículas. b. Pontuações presentes em toda a superfície externa; as setas indicam pontuações de diferentes tamanhos. c-d. CP3 1859. c. Detalhe das costelas, evidenciando a ausência de aditículas. d. Pontuações presentes em toda a superfície externa; as setas indicam pontuações de diferentes tamanhos.	90
Figura 33. Mióforo bilobado e crenulado, estrutura presente na valva dorsal, espécime CP3-1859. Esta estrutura não pôde ser aferida em microscópio estereoscópico, mas apenas por meio de microtomografia computadorizada.	91

Figura 34. Estrutura que se assemelha à cicatriz do músculo adutor, quadripartido, presente na valva dorsal de *Dalmanella* cf. *testudinaria*, CP3-1861. Esta estrutura não pôde ser aferida em microscópio estereoscópico, mas apenas por meio de microtomografia computadorizada. ... 91

Figura 35. Distribuição das faunas típica e atípica de *Hirnantia* na Gondwana durante o Ordoviciano Superior. Am, Bacia do Amazonas; B, Bacia de Bové; C, Bacia do Cabo; CA, Bacia Andina Central; Ea, Formação Eusebio Ayala, Bacia do Paraná; G, Bacia do Ghana; M, Bacia do Pará-Maranhão; P, Bacia de Puna; Pa, Grupo Rio Ivaí, Bacia do Paraná; Pe, Perunica; Pr, Bacia da Precordillera; SM, Bacia do Senegal-Mauritânia; T, Bacia de Tandil; Ti, Bacia de Tindouf; We, Plataforma do oeste europeu (Iberia, Armorica, Montaigne Noire, Sardenha, Alpes Cárnicos). Adaptado de Zabini *et al.*, 2021..... 98

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Principais referências adotadas em revisão da geologia e paleontologia do Grupo Rio Ivaí.	27
Tabela 2. Amostras rochosas das formações Iapó e Vila Maria obtidas durante as campanhas de campo realizadas no decorrer do projeto de pesquisa.....	29
Tabela 3. Amostras rochosas das formações Iapó e Vila Maria obtidas nos anos de 2016 e 2017, em campanhas de campo anteriores ao presente projeto.....	30
Tabela 4. Fauna de paleoinvertebrados reportada para a seção COHAB.....	59
Tabela 5. Fauna de paleoinvertebrados reportada para a seção Fazenda Três Barras.....	65
Tabela 6. Fauna de paleoinvertebrados reportada para a seção Córrego da Aldeia.	68
Tabela 7. Medidas (em mm) dos espécimes de rhyconeliformes, seção COHAB, Barra do Garças, Brasil.	88
Tabela 8. Braquiópodes reportados em camadas hirnantianas da Bacia do Paraná e bacias sedimentares coevas.	93

SUMÁRIO

Introdução.....	17
Objetivos.....	22
Estrutura da Dissertação	23
Material e Métodos.....	25
1. Revisão Bibliográfica e Listagem das Principais Publicações Consultadas.....	26
2. Material e Organização das Amostras.....	29
3. Campanhas de Campo.....	31
3.1. Coleta tafonômica	31
3.2. Coleta aleatória.....	31
4. Análise Taxonômica	33
5. Fotografia do Material.....	35
6. Análise da Distribuição dos Grupos Fósseis no Perfil Estratigráfico.....	36
Capítulo I. Contexto Geológico do Grupo Rio Ivaí.....	37
Geologia Regional.....	37
Geologia Local.....	41
COHAB.....	42
Fazenda Três Barras	44
Córrego da Aldeia	45
Capítulo II. Estado da Arte do Ordoviciano-Siluriano da Bacia do Paraná	48
Décadas de 1940-1970: As Primeiras Publicações de Unidades Pré-Devonianas.....	48
Década de 1980: O Mapeamento e a Paleontologia do Paleozoico Inferior da Bacia do Paraná.....	48
Década de 1990: A Proposição do Grupo Rio Ivaí	52
Década de 2000: O Refinamento da Idade da Formação Vila Maria.....	53
Décadas de 2010-2020: A Investigação do Registro Hirnantiano	54
Capítulo III. Ocorrências de Invertebrados Fósseis	58
Seção COHAB	58
Seção Fazenda Três Barras.....	65
Seção Córrego da Aldeia.....	68
Capítulo IV. Análise da Distribuição dos Grupos Fósseis no Perfil Estratigráfico.....	71
1. COHAB.....	71

2. <i>Fazenda Três Barras</i>	73
3. <i>Córrego da Aldeia</i>	77
4. <i>Avaliação da Semelhança entre as Distribuições Observadas</i>	80
Capítulo V. Taxonomia Paleontológica e a Fauna Hirnantiana	83
<i>Taxonomia Paleontológica</i>	83
<i>Fauna Hirnantiana na Bacia do Paraná e Bacias Adjacentes</i>	92
Considerações Finais	100
Referências Bibliográficas.....	102
Anexo I. Artigo de Revisão Histórica	114

Introdução

O intervalo Ordoviciano-Siluriano foi palco de importantes eventos geológicos e biológicos. O Hirnantiano (445,2 Ma - 443,8 Ma), último andar do sistema Ordoviciano, é particularmente interessante por registrar uma glaciação de grande magnitude, seguida do primeiro evento de extinção em massa do Fanerozoico. As geleiras existentes neste intervalo estavam localizadas no paleocontinente Gondwana (Fig. 1) e centradas no atual norte da África, estendendo-se também ao sul da África, Europa central e sul, oeste da Ásia e América do Sul (Mou *et al.*, 2023). O evento de extinção ligado à glaciação do Ordoviciano Superior, conhecido internacionalmente como *Late Ordovician Mass Extinction* (LOME, em português ‘Extinção em Massa do Ordoviciano Tardio’), levou à morte de cerca de 85% das espécies marinhas (Sepkoski, 1996; Sheeran, 2001; Stanley, 2016). Dada a singularidade de tais fenômenos, as camadas do Hirnantiano têm sido documentadas por muitos pesquisadores em diferentes formações geológicas ao redor do mundo (Chen *et al.*, 2006; Sá *et al.*, 2009; Suzuki *et al.*, 2009; Ghavidel-syooki *et al.*, 2011; Demski *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2018).

A identificação e correlação de estratos hirnântianos é possibilitada por uma característica assembleia fossilífera composta por organismos tais como graptólitos, conodontes, quitinozoários e braquiópodes (Delabroye e Vecoli, 2010). Em escala global, os braquiópodes do subfilo Rhynchonelliformea apresentam-se como um grupo de grande relevância bioestratigráfica para o reconhecimento do Hirnantiano. Hints *et al.* (2018) ressaltam a importância do grupo para a estratigrafia do paleocontinente Baltica (região de Lituânia, Letônia e Estônia), tendo em vista que o alcance estratigráfico das espécies é curto, o que auxilia na determinação de distintas unidades estratigráficas e possibilita a diferenciação de idades e épocas geológicas. Em paleolatitudes maiores, braquiópodes rhynchoneliiformes têm sido identificados juntamente com outros elementos da fauna, auxiliando na determinação de estratos hirnântianos no hemisfério Sul, como na África do Sul (Bassett *et al.*, 2009), Paraguai (Benedetto *et al.*, 2013) e Argentina (Benedetto *et al.*, 2015).

Braquiópodes são animais marinhos, lofoforados e bivalves, e sua concha pode apresentar composição carbonática (rhynchoneliiformes) ou organofosfática (linguliiformes). O registro mais antigo do filo data do Cambriano Inferior e um importante evento de diversificação é identificado durante o período Ordoviciano (Rudwick, 1970). Diferentemente do registro fóssil do Cambriano, período no qual surgiram muitos dos filos animais hoje conhecidos, o evento conhecido como *Great Ordovician Biodiversification Event* (GOBE, em português ‘Grande Evento de Biodiversificação do Ordoviciano’) aponta para uma

biodiversidade crescente nos níveis taxômicos mais inferiores, como famílias, gêneros e espécies (Servais e Harper, 2018).

No Brasil, o filo Brachiopoda foi reportado nos estratos das bacias sedimentares do Paraná (e.g. Carbonaro *et al.*, 2018), do Amazonas (e.g. Côrrea e Ramos, 2021), do Parnaíba (e.g. Zabini *et al.*, 2016) e dos Parecis (e.g. De Melo e Siqueira, 2001). Embora a ocorrência do grupo nas camadas paleozoicas brasileiras estenda-se do Ordoviciano (Zabini *et al.*, 2019) ao Permiano (Taboada *et al.*, 2016), muitos dos registros concentram-se no Devoniano.

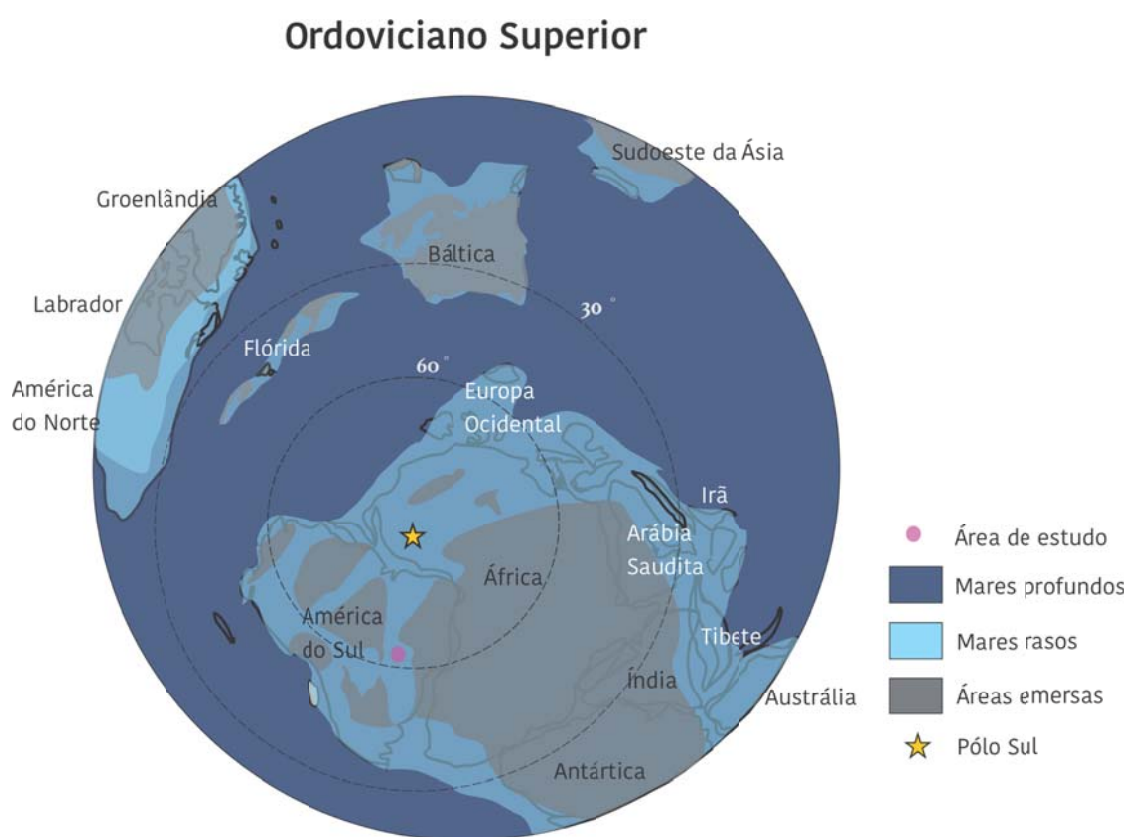


Figura 1. Gondwana e outros paleocontinentes durante o Ordoviciano Superior, aprox. 445 Ma. Adaptado de Zabini *et al.* (2021).

O estudo dos braquiópodes do Devoniano da Bacia do Paraná deu origem a trabalhos com enfoques taxonômicos (Bosetti *et al.*, 2010), sistemáticos (Comniskey e Bosetti, 2017), tafonômicos (Zabini *et al.*, 2010; Bosetti *et al.*, 2012; Comniskey *et al.*, 2016), paleoecológicos (Bosetti *et al.*, 2011) e de revisão (Zabini *et al.*, 2013; Videira-Santos e Scheffler, 2019). Apesar da literatura profícua, os braquiópodes de outros períodos desta Bacia não foram tão amplamente estudados, especialmente aqueles do Paleozoico Inferior.

Adicionalmente, tendo em vista a biodiversidade crescente durante o Ordoviciano, o intervalo Ordoviciano-Siluriano (O-S) apresenta-se como um foco interessante para o estudo da paleobiodiversidade.

O intervalo O-S da Bacia do Paraná é representado pelo Grupo Rio Ivaí (Assine *et al.*, 1994; Milani *et al.*, 2007), que compreende as formações Alto Garças (Ordoviciano), Iapó (Ordoviciano Superior) e Vila Maria (Siluriano Inferior). Dados paleontológicos que auxiliassem na datação das duas primeiras formações eram considerados escassos (Milani *et al.*, 2007). No entanto, trabalhos recentes têm sugerido idade hiranntiana para a Formação Iapó a partir do conteúdo fóssil (Zabini *et al.*, 2019, 2021; Gonçalves *et al.*, 2022). O estudo da assembleia de palinomorfos, bem como pesquisas incluindo datação radiométrica, indicam a idade eosiluriana da Formação Vila Maria (Gray *et al.*, 1985; Mizusaki *et al.*, 2002). Contudo, pesquisas com assembleias de ostracodes sugerem idade hiranntiana também para os pelitos basais desta formação (Adôrno *et al.*, 2016; Gonçalves *et al.*, 2022). Neste sentido, fica patente a valia das pesquisas paleontológicas para empreendimentos cronoestratigráficos.

Foi a partir desta perspectiva que Benedetto *et al.* (2013) contribuíram para a datação da Formação Eusebio Ayala (Grupo Itacurubí, Bacia do Paraná, Paraguai), valendo-se da identificação da fauna fóssil. O topo desta formação, até então de idade indeterminada, foi datado para o Hirnantiano, com base no registro de graptólitos e na assembleia de braquiópodes, que conta com gêneros e espécies reportados conjuntamente para camadas hiranntianas, a chamada “fauna de *Hirnantia*” (Rong e Harper, 1988).

A diversidade da fauna da *Hirnantia* varia de assembleias compostas por apenas três gêneros àquelas formadas por vinte, mas sua distribuição é global (Rong e Harper, 1988; Torsvik e Cocks, 2016). Seus integrantes mais característicos são os braquiópodes *Hirnantia*, *Eostropheodonta* e *Hindella*, que também podem ocorrer associados a trilobitas, como a assembleia *Hirnantia-Mucronaspis*, registrada em localidades como Letônia (Hints *et al.*, 2012) e Nova Zelândia (Cocks e Cooper, 2004). Na América do Sul, a fauna de *Hirnantia* foi descrita para a Argentina (Benedetto, 1986; Sánchez *et al.*, 1991) e Paraguai (Benedetto *et al.*, 2013).

No Brasil, Zabini *et al.* (2019) identificaram o braquiópode discinoide *Kosoidea* nos estratos das formações Iapó e Vila Maria (O-S da Bacia do Paraná), sendo este o mesmo gênero encontrado em camadas do Hirnantiano da Formação Cedarberg, Bacia do Cabo, África do Sul (Bassett *et al.*, 2009). No entanto, os braquiópodes de concha organofosfática como *Kosoidea* não são considerados bons marcadores estratigráficos devido à sua relativa

estase morfológica, sendo preteridos em relação àqueles de concha carbonática, do subfilo Rhynchonelliformea – estes, sim, característicos da fauna de *Hirnantia*.

Braquiópodes rhynchoneliformes foram recuperados nas camadas superiores da Formação Iapó (Zabini *et al.*, 2021); no entanto, os espécimes resgatados tratavam-se de pequenos e raros fragmentos, impossibilitando uma investigação profunda das características taxonômicas. A correta identificação da fauna fóssil dessas camadas é imprescindível para indicar o Hirnantiano na Bacia do Paraná brasileira. À luz destes fatos, o estudo de ostracodes das formações Iapó e Vila Maria trouxe também contribuições relevantes para a datação destas unidades.

Adôrno *et al.* (2016) reportaram as novas espécies de ostracodes *Satiellina paranaensis* Adôrno e Salas, 2016 e *Conchoprimitia brasilienses* Adôrno e Salas, 2016, nos folhelhos basais da Formação Vila Maria, camadas interpretadas por Assine *et al.* (1998) como um registro de plataforma continental marinha periglacial. Os gêneros reportados, embora não sejam diagnósticos do Hirnantiano, foram registrados apenas no Ordoviciano. O alcance estratigráfico de *Conchoprimitia* perfaz boa parte do Ordoviciano; sua ocorrência mais antiga é o Tremadociano (Ordoviciano Inferior) da Argentina (Salas e Vaccari, 2012), e persiste ao Ordoviciano Superior da Báltica (Landing *et al.*, 2013). Por sua vez, *Satiellina* é um *taxon* restrito ao Ordoviciano Médio e Superior. A idade siluriana proposta para toda a Formação Vila Maria foi contestada, e propôs-se uma idade hirnantiana para a base desta unidade, com o suporte da presença destes ostracodes (Adôrno *et al.*, 2016).

De forma complementar, Gonçalves *et al.* (2022) identificaram o ostracode *Harpabollia harparum* Troedsson, 1918 nos estratos superiores da Formação Iapó. A espécie é típica do Hirnantiano da Báltica, onde ocorre em associação a outras espécies, formando um conjunto que se distingue da fauna de ostracodes do Katiano (Ordoviciano Superior) e do Llandoveryano (Siluriano Inferior) (Meidla *et al.*, 2020; Truuver *et al.*, 2021). Os autores também reportam a presença de *S. paranaensis* nas camadas onde *H. harparum* ocorre, e endossam a hipótese proposta por Adôrno *et al.* (2016) a respeito da idade hirnantiana para o topo e a base das formações Iapó e Vila Maria, respectivamente (Gonçalves *et al.*, 2022). Não obstante, a valia destas pesquisas pode exceder as contribuições bioestratigráficas.

Anteriormente, a fauna de braquiópodes do Hirnantiano foi ponto de partida para estudos com enfoques diversos, tais como paleobiogeografia, paleobiodiversidade e paleoecologia (Rong e Harper, 1988; Harper e Hints, 2016; Rong *et al.*, 2020). Trabalhos que determinam a distribuição paleogeográfica do grupo no Ordoviciano Superior podem

contribuir para a resolução de questões de cunhos macroevolutivos e paleoclimáticos (Harper *et al.*, 2013). O potencial da pesquisa a partir do material fóssil é amplo, e a pesquisa com braquiópodes rhynconeliformes pode prover dados que lancem nova luz a questões maiores do Grupo Rio Ivaí.

Este trabalho propõe uma revisão histórica das formações do O-S no Brasil a partir da literatura, selecionando os trabalhos de cunho geológico e paleontológico que contribuíram para a construção do conhecimento a respeito destas unidades. Ademais, serão apresentadas novas considerações sobre afloramentos clássicos do Grupo Rio Ivaí, trazendo novas concepções dos perfis litoestratigráficos destas localidades e dados inéditos da paleofauna, incluindo novas ocorrências de rhynconeliformes.

Objetivos

I. Objetivo Geral

Este projeto tem como objetivo realizar o resgate histórico das formações Iapó e Vila Maria, e investigar a paleobiodiversidade de braquiópodes do intervalo O-S da Bacia do Paraná.

II. Objetivos Específicos

- Integrar e sintetizar dados clássicos e recentes acerca da geologia e paleontologia do Grupo Rio Ivaí, através de revisão bibliográfica e resgate histórico de afloramentos na borda norte/noroeste da Bacia do Paraná;
- Descrever o material de braquiópodes, seguindo as diretrizes taxonômicas mais modernas para cada grupo, publicando as diagnoses de eventuais *taxa* inéditos;
- Organizar um banco de dados fotográfico dos *taxa* de braquiópodes do O-S da Bacia do Paraná;
- Comparar e correlacionar a assembleia encontrada com aquelas reportadas em camadas hirnantianas de bacias coevas;
- Analisar e discutir a ocorrência mundial de braquiópodes deste intervalo comparando com os dados obtidos neste projeto, dando especial atenção à fauna de *Hirnantia*.

Estrutura da Dissertação

Esta dissertação propõe uma revisão histórica dos conhecimentos relativos à geologia e à paleontologia do Grupo Rio Ivaí e, conjuntamente, apresenta novos dados de ocorrências fósseis nas formações Iapó e Vila Maria. Dado o caráter duplo destes objetivos, optou-se por organizar o texto em diferentes capítulos.

O primeiro capítulo, *Contexto Geológico do Grupo Rio Ivaí*, tem como objetivo resgatar o conhecimento geológico e paleontológico sobre as unidades do Ordoviciano-Siluriano da Bacia do Paraná. Na seção *Geologia Regional*, detalha-se o entendimento geológico do Grupo, provendo uma descrição sucinta e atualmente válida de suas formações. Apresenta-se, então, as descrições dos três afloramentos visitados na seção *Geologia Local* e seus perfis estratigráficos atualizados. Neste capítulo, o conteúdo paleontológico reportado em trabalhos anteriores é mencionado brevemente.

O segundo capítulo, intitulado *Estado da Arte do Ordoviciano-Siluriano da Bacia do Paraná*, expõe todo o histórico de pesquisas realizadas no Grupo Rio Ivaí, evidenciando as interpretações paleoambientais, as determinações das idades de suas formações e todas as ocorrências fósseis relatadas, mesmo aquelas invalidadas em publicações posteriores. Adiciona-se, como anexo ao capítulo II, o artigo "*Geological Heritage of the Três Barras Farm section, Ordovician-Silurian Record in the Paraná Basin, Brazil*", submetido ao *Journal of the Geological Survey of Brazil*. O intuito deste manuscrito é evidenciar como a continuidade das pesquisas conduzidas por diferentes gerações de pesquisadores no afloramento Fazenda Três Barras possibilitou a evolução da compreensão geológica e paleontológica do Grupo Rio Ivaí ao longo dos anos.

No terceiro capítulo, *Material e Métodos*, apresenta-se as amostras estudadas, bem como a metodologia utilizada nas diferentes etapas deste trabalho. No quarto capítulo, *Ocorrências de Invertebrados Fósseis*, reporta-se uma listagem completa de todos os *taxa* recuperados nos afloramentos visitados, com suas respectivas referências bibliográficas, bem como novas ocorrências fósseis a partir de espécimes recuperados nos trabalhos de campo realizados no decorrer deste projeto.

Na quinto capítulo, *Análise da Distribuição dos Grupos Fósseis no Perfil Estratigráfico*, aborda-se a composição das assembleias fósseis dos diferentes afloramentos e a distribuição dos indivíduos no perfil vertical das seções. As assembleias de cada localidade

são comparadas em relação à sua composição e distribuição, avaliando-se possíveis interpretações paleoambientais e paleoecológicas a partir destes dados.

No sexto capítulo, *Taxonomia Paleontológica e Fauna Hirnantiana*, apresenta-se a taxonomia de braquiópodes rhynconeliformes recuperados nos níveis pelíticos da Formação Iapó identificados como *Dalmanella* cf. *testudinaria* (Dalman, 1828), um dos importantes elementos da fauna de *Hirnantia* documentada em várias localidades do mundo. Por fim, discute-se a composição da fauna fóssil reportada para o Grupo Rio Ivaí, comparando-a com as assembleias de bacias sedimentares coevas da Argentina, Paraguai, África do Sul e Norte da África.

Nas *Considerações Finais*, destacam-se as principais contribuições e considerações propostas neste trabalho, assim como questões pendentes que podem ser exploradas em estudos futuros.

Material e Métodos

Cada etapa da pesquisa conta com procedimentos próprios, alguns deles presentes da literatura específica. A seguir, as diferentes etapas e técnicas serão apresentadas e justificadas, e as fases do projeto serão apreciadas em maior detalhes. O esquema a seguir (Fig. 2) apresenta de forma resumida os métodos empregados para o desenvolvimento do presente trabalho.

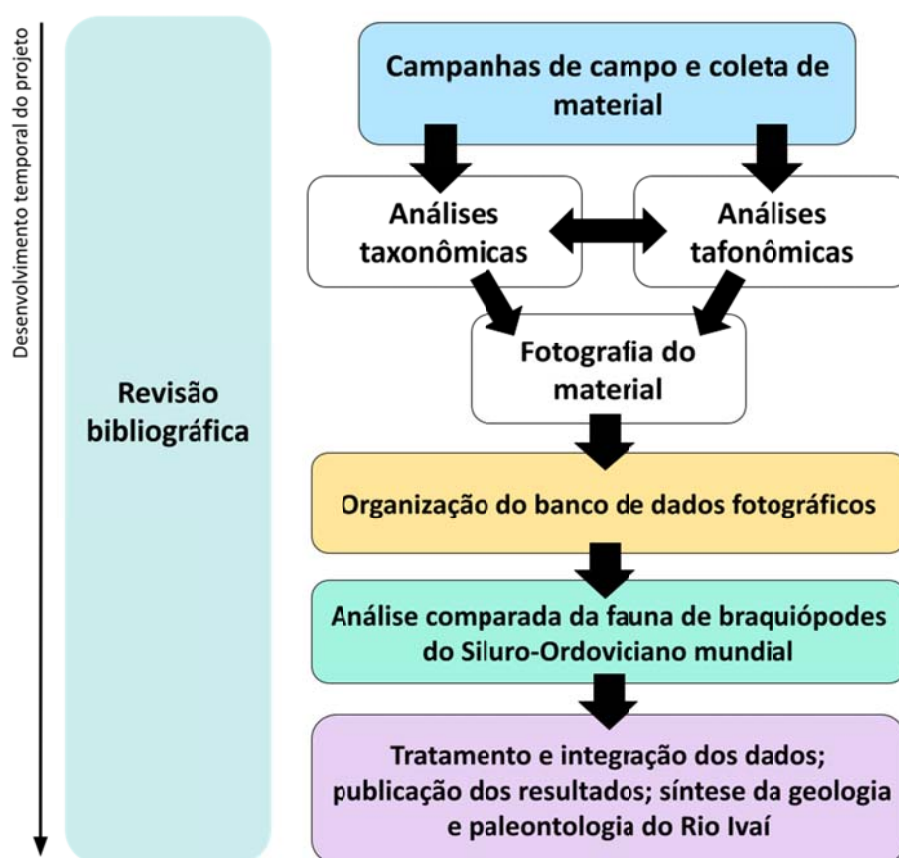


Figura 2. Esquema simplificado das fases do projeto, iniciando a partir das campanhas de campo. A revisão bibliográfica será realizada ao longo de todas as etapas.

1. Revisão Bibliográfica e Listagem das Principais Publicações Consultadas

A revisão da literatura apresenta-se como etapa inicial e fundamental para a compreensão do conhecimento produzido a respeito do Grupo Rio Ivaí ao longo de décadas de estudo, bem como para a identificação das principais lacunas e a proposição de caminhos futuros para a pesquisa.

Tendo em vista que o presente estudo tem como um de seus objetivos a síntese dos dados geológicos e paleontológicos do Rio Ivaí, trabalhos pioneiros e clássicos foram revisitados. Adôrno (2014), ao apresentar o histórico e a evolução do Grupo Rio Ivaí, menciona diversas destas publicações, o que torna sua contribuição basilar para o estudo aqui desenvolvido. Os trabalhos citados em sua dissertação foram acessados, e as referências presentes nestes também o foram.

Mais de vinte publicações em periódicos nacionais e internacionais, além de resumos de eventos científicos, dissertações e teses, foram acessadas em meio digital ou físico. Os materiais digitais foram majoritariamente buscados na base Google Scholar e todo o material físico foi acessado no acervo da Biblioteca Conrado Pasquale do Instituto de Geociências da Unicamp. A seguir, apresenta-se uma tabela com as principais referências bibliográficas adotadas para a revisão de caráter sintético do Grupo Rio Ivaí (Tab. 1).

Tabela 1. Principais referências adotadas em revisão da geologia e paleontologia do Grupo Rio Ivaí.

Ano	Autor	Título	Periódico
1947	Maack	Breves notícias sobre a geologia dos estados do Paraná e Santa Catarina	<i>Arquivos de Biologia e Tecnologia (IBPT)</i>
1978	Faria e Reis-Neto	Nova unidade litoestratigráfica pré-Furnas no sudoeste de Goiás	<i>XXX Congresso Brasileiro de Geologia. Recife, Brasil. Boletim de Resumos.</i>
1980	Andrade e Camarço	Estratigrafia dos Sedimentos Devonianos do Flanco Nordeste da Bacia do Paraná	<i>XXXI Congresso Brasileiro de Geologia. Balneário Camboriú, Brasil. Anais.</i>
1981	Burjack e Popp	A ocorrência do icnogênero <i>Arthropycus</i> no Paleozoico da Bacia do Paraná	<i>Pesquisas em Geociências</i>
1981	Popp <i>et al.</i>	Estudo preliminar sobre o conteúdo paleontológico da Formação Vila Maria (pré-Devoniano) da Bacia do Paraná	<i>Pesquisas em Geociências</i>
1982	Faria	Formação Vila Maria-nova unidade litoestratigráfica siluriana da Bacia do Paraná	<i>Ciências da Terra</i>
1985	Gray <i>et al.</i>	Silurian-age fossils from the Paleozoic Paraná Basin, southern Brazil	<i>Geology</i>
1987	Zalán <i>et al.</i>	A divisão tripartite do Siluriano da Bacia do Paraná	<i>Revista Brasileira de Geociências</i>
1989	Assine e Soares	Correlações nas sequências Mesopaleozoicas da Bacia do Paraná	<i>Acta Geologica Leopoldensia</i>
1994	Assine <i>et al.</i>	Sequências Tectono Sedimentares Mesopaleozóicas da Bacia do Paraná, Sul do Brasil	<i>Revista Brasileira de Geociências</i>
2000	Grahn <i>et al.</i>	Silurian and Lower Devonian Chitinozoan Biostratigraphy of the Paraná Basin in Brazil and Paraguay	<i>Palynology</i>
2002	Mizusaki <i>et al.</i>	Vila Maria Formation (Silurian, Paraná basin, Brazil): integrated radiometric and palynological age determinations	<i>Geological Magazine</i>
2014	Adôrno	Estudo cronobioestratigráfico da formação Vila Maria: litoestratigrafia e paleontologia do limite ordoviciano-siluriano da bacia do Paraná, estados de Goiás e de Mato Grosso, Brasil central	<i>Dissertação de mestrado. Universidade de Brasília</i>

Ano	Autor	Título	Periódico
2016	Adôrno <i>et al.</i>	The earliest ostracoda record from Brazil: Vila Maria Formation, Rio Ivaí group, Paraná basin, Central Brazil	<i>Revista Brasileira de Paleontologia</i>
2019	Zabini <i>et al.</i>	A new discinoid <i>Kosoidea australis</i> sp. nov. from the Iapó and Vila Maria Formations, NE Paraná Basin, Brazil	<i>Historical Biology</i>
2021	Zabini <i>et al.</i>	Fossil diversity and taphonomy of glacial and post-glacial lower paleozoic strata, NE Paraná Basin, Brazil	<i>Journal of South American Earth Sciences</i>
2021	Rodrigues	Taxonomia, análise da distribuição estratigráfica e do significado paleoambiental de palinórfos das formações Iapó e Vila Maria, Grupo Rio Ivaí: Ordoviciano–Siluriano da Bacia do Paraná, estado de Goiás, Brasil	<i>Tese de doutorado. Universidade de Brasília</i>
2022	Gonçalves <i>et al.</i>	The first record of Hirnantian Ostracoda in South America: Implications for the biostratigraphy and paleozoogeography of the Paraná basin	<i>Journal of Paleontology</i>
2022	Rodrigues <i>et al.</i>	Cryptospores of Iapó formation: The first evidence of early land plants from Late Ordovician in Paraná Basin, Brazil	<i>Review of Palaeobotany and Palynology</i>

2. Material e Organização das Amostras

No decorrer do projeto, foram realizadas três campanhas de campo, sendo elas nas datas de: julho-2022; janeiro-2023; e julho-2023. O material coletado em cada ocasião está discriminado na tabela abaixo (Tab. 2):

Tabela 2. Amostras rochosas das formações Iapó e Vila Maria obtidas durante as campanhas de campo realizadas no decorrer do projeto de pesquisa.

Campanha de Campo	Afloramento	Número de Amostras	Número de Tombo
julho-2022	COHAB	289	CP3 730 - CP3 1008
	Fazenda Três Barras	212	CP3 1045 - CP3 1253
janeiro-2023	COHAB	435	CP3 1358 - CP3 1792
	Córrego da Aldeia	63	CP3 1793 - CP3 1855
julho-2023	COHAB	456	CP3 1856 - CP3 2296; CP3 2451 - CP3 2456
	Córrego da Aldeia	126	CP3 2297 - CP3 2373; CP3 2383, 2384; CP3 2402 - CP3 2415; CP3 2425 - CP3 2430
Total		1581	

As amostras obtidas foram tombadas e registradas na **Coleção Paleontológica 3 (CP3)** do Instituto de Geociências da Universidade Estadual de Campinas. Cabe ressaltar que as amostras tombadas equivalem a uma rocha individualizada, de tamanho variável; em uma mesma amostra, um ou mais organismos fósseis podem estar presentes.

Também foram incluídas neste estudo amostras provenientes de coletas anteriores, realizadas nas seções COHAB e Fazenda Três Barras nos anos de 2016 e 2017, conforme identificadas na tabela a seguir (Tab. 3).

As amostras de coletas anteriores foram tombadas e registradas na **Coleção Paleontológica 3 (CP3)** do Instituto de Geociências da Universidade Estadual de Campinas, sob as siglas CP3 19 - CP3 585; CP3 600 - CP3 643; CP3 1254 - CP3 1307; CP3 1328 - CP3

1357. O total de amostras rochosas analisadas neste projeto totalizam **2.276**, considerando as coletadas entre os anos de 2016 e 2017, bem como as coletas de 2022 e 2023.

Tabela 3. Amostras rochosas das formações Iapó e Vila Maria obtidas nos anos de 2016 e 2017, em campanhas de campo anteriores ao presente projeto.

Campanha de Campo	Afloramento	Número de Amostras	Número de Tombo
2016 / 2017	Fazenda Três Barras	165	CP3 19 - CP3 152
	COHAB	530	CP3 153 - CP3 585; CP3 600 - 643; CP3 1254 - CP3 1307; CP3 1328 - CP3 1357
Total		695	

3. Campanhas de Campo

Nas campanhas de campo, visitaram-se os afloramentos **COHAB** (UTM 363910 mL 8245824 mN, Zona 22L, Datum SAD69), **Fazenda Três Barras** (UTM 382688 mL 8181674 mN, Zona 22K, Datum SAD69) e **Córrego da Aldeia** (UTM 377941 mL 8181403 mN, Zona 22K, Datum SAD69). A seção COHAB, mais produtiva para braquiópodes rhynconeliformes, foi a única visitada em todas as campanhas. Os objetivos desta etapa de trabalho foram a descrição dos perfis litoestratigráficos e a coleta de material fóssil. Ocasionalmente, coletou-se amostras para análise sedimentológica e palinológica. Diferentes estratégias de coleta foram adotadas, como será exposto a seguir.

3.1. Coleta tafonômica

As coletas tafonômicas foram realizadas em todas as seções. Nesta modalidade, a coleta é realizada de forma sistematizada, para a aquisição de dados tafonomicamente significativos. Para tal, quadrículas de 50 cm x 50 cm x 50 cm são demarcadas, e o mesmo número de coletores e de horas trabalhadas são mantidas para cada quadrícula, seguindo também o conjunto de práticas organizado por Holz e Simões (2002). Para cada amostra, registra-se o nível no perfil do qual ela é proveniente, sendo esta uma informação imprescindível para futuros estudos comparativos de tafonomia e bioestratigrafia.

Na seção COHAB, as coletas foram executadas a partir do nível superior do diamictito da Formação Iapó até os siltitos da Formação Vila Maria, totalizando um pacote de cerca de 5 metros de espessura (Fig. 3A). No afloramento Fazenda Três Barras, coletou-se a partir dos pelitos da Formação Iapó e em toda sequência de folhelhos da Formação Vila Maria, totalizando um pacote de cerca de 5,5 metros de espessura (Fig. 3B). Por fim, na seção Córrego da Aldeia, coletou-se em toda a extensão de folhelhos da Formação Vila Maria, totalizando uma sequência de cerca de 10 metros (Fig. 3C).

3.2. Coleta aleatória

Esta modalidade, realizada somente na seção COHAB, consiste em trabalhar em níveis conhecidos do perfil sem que haja limitação de número de coletores ou horas trabalhadas. Neste caso, também é imprescindível o registro do nível no perfil do qual as

amostras provêm, mas não há necessidade de trabalhar com quadrículas de tamanho previamente estabelecido. Esta técnica torna-se interessante para explorar níveis de maior biodiversidade, estabelecidos anteriormente com base na análise dos resultados de coletas tafonômicas. O potencial das coletas tafonômicas e aleatórias na seção COHAB foi discutido por Gomes *et al.* (2023).

4. Análise Taxonômica

Os espécimes coletados são investigados com o auxílio de microscópio estereoscópico modelo ZEISS Stemi 2000 para observação de características taxonomicamente relevantes, de acordo com o grupo ao qual pertencem. O trabalho clássico, constantemente revisado, *Treatise on Invertebrate Paleontology, Part H (Brachiopoda)* de Williams (1996), foi tomado como base para o reconhecimento inicial dos indivíduos e das estruturas, e literatura mais especializada é consultada de acordo com a identificação dos *taxa*.

Além da observação comparada com dados da literatura, outras técnicas são empregadas para a descrição dos espécimes. Devido ao desgaste e eventual destruição que estes procedimentos podem ocasionar nas amostras, serão empregados com parcimônia e em amostras pré-selecionadas, destinadas para estes estudos. Tais procedimentos são descritos a seguir:

- a. Cobertura com cloreto de amônio.** Esta técnica consiste no preparo de um pó fino e solúvel, não inflamável, a partir do aquecimento do cloreto de amônio em sua forma cristalina. O pó é aquecido e vaporiza-se. Após tornar-se vapor, é soprado sobre as amostras, onde sublima e se deposita sobre as rochas. Tal técnica permite a observação de caracteres taxonômicos relevantes no estudo de braquiópodes, ressaltando cicatrizes musculares e outras estruturas morfológicas e anatômicas de importância sistemática (cf. Mergl, 2020).
- b. Confeção de moldes e contramoldes.** O método consiste no uso de massa do tipo *polymer clay* para a moldagem das amostras. Permite o detalhamento da estrutura tridimensional do fóssil, que pode ser de difícil acesso especialmente em amostras com relevo negativo, facilitando a aferição de dados como a altura da concha, ornamentação e demais características macroscópicas. O potencial da técnica para a confecção de moldes e contramoldes de amostras fósseis foi explorado por Bramblett *et al.* (2019).
- c. Microscopia eletrônica de varredura (MEV).** Este método será utilizado para a visualização de microestruturas, como a microornamentação e microestruturas das conchas, que são caracteres taxonomicamente relevantes para a determinação de gêneros e espécies de braquiópodes. O protocolo adotado consiste na diminuição máxima possível

da amostra, sua cobertura (recobrimento ou metalização) com ouro ou carbono e colagem nos stubs.

d. Microtomografia computadorizada. A técnica consiste na emissão de raios-X sobre a amostra para a produção de imagens de alta resolução (até 6 μm) de sua estrutura interior. O método, que é considerado não-destrutivo, foi discutido por Seidel e Lüter (2014) e apontado como uma ferramenta excelente para o estudo de caracteres taxonômicos e filogenéticos de braquiópodes modernos. Pakhnevich (2010) aprecia o método no estudo de microestruturas e estruturas internas de braquiópodes fósseis, qualificando-o também para a análise de holótipos e espécimes frágeis.

Uma vez descritos, os espécimes das formações Iapó e Vila Maria são comparados com aqueles reportados em camadas do O-S mundial, a partir de revisões bibliográficas e pesquisa taxonômica comparada. Importa frisar que não se pretende analisar diretamente o material coletado por outros pesquisadores, mas sim partir das descrições taxonômicas publicadas em periódicos, resumos, resumos expandidos e outras fontes de interesse. Assim, espera-se determinar qualitativamente a similaridade entre a fauna de braquiópodes do O-S ao redor do mundo.

Embora a análise taxonômica não seja imprescindível para a pesquisa tafonômica, entender mais sobre o organismo auxilia na compreensão e interpretação das eventuais assinaturas tafonômicas observadas. Os estudos taxonômicos e tafonômicos poderão ocorrer, portanto, de forma sequencial ou paralela.

5. Fotografia do Material

Os espécimes são fotografados conforme as análises taxonômicas ocorrem. O intuito é elaborar um acervo virtual que conte com fotos de macro e microescala (*e.g.* imagens de MEV), possibilitando a visualização da estrutura geral dos organismos e o reconhecimento de caracteres taxonomicamente relevantes e de assinaturas tafonômicas recorrentes. Para capturar a estrutura geral dos fósseis e seus detalhes macroscópicos, utiliza-se uma câmera acoplada à lupa ZEISS Stemi 2000 e as fotos são tratadas no programa de computador ZEISS ZEN Blue Edition. Para a captura de estruturas microscópicas, as fotos serão salvas durante o procedimento de MEV, e tratadas com o mesmo programa.

O acervo de imagens será elaborado após a publicação das imagens dos espécimes em periódicos de circulação nacional e internacional. A descrição taxonômica detalhada e o acervo de fotografias, assim como eventuais ilustrações de estruturas e caracteres de importância taxonômica, possibilitará o desenvolvimento de um banco de dados completo, que possibilite a análise comparada dos organismos. O estudo comparado constitui a etapa seguinte do projeto, devendo ocorrer necessariamente após uma refinada pesquisa taxonômica, de modo a prover dados robustos.

6. Análise da Distribuição dos Grupos Fósseis no Perfil Estratigráfico

As coletas tafonômicas permitem a aquisição de dados referentes à paleobiodiversidade nas seções visitadas. Análises paleoecológicas preliminares foram conduzidas, visando descrever a riqueza, abundância e distribuição dos *taxa* ao longo dos perfis nos afloramentos estudados. Para tal, os dados coletados ao longo da pesquisa são armazenados em tabelas produzidas no Microsoft Excel (Office 360). O teste U de Mann-Whitney foi conduzido na linguagem Python (versão 3.10.12) e os gráficos de barra e de distribuição foram gerados em Python e R (versão 4.3.2).

Após a análise dos dados isolados, espera-se integrá-los a fim de uma melhor compreensão da distribuição dos *taxa* nas formações Iapó e Vila Maria e, assim, do seu paleoambiente e relações paleoecológicas. Estas informações são integradas aos dados de distribuição de outras unidades geológicas da Bacia do Paraná (formações Eusebio Ayala e Vargas Peña, no Paraguai), bem como de bacias coevas na Argentina (Bacia da Precordillera) e África do Sul (Bacia do Cabo), sempre que houver disponibilidade de informações. As análises estatísticas serão necessárias para analisar e interpretar dados de distribuição e biodiversidade da paleofauna reportada para os diferentes afloramentos do S-O global.

Capítulo I. Contexto Geológico do Grupo Rio Ivaí

As rochas sedimentares que constituem o Grupo Rio Ivaí podem ser encontradas aflorando nas margens norte, noroeste e sudeste da Bacia do Paraná (Assine *et al.*, 1994; Milani *et al.*, 2007). Nas seções a seguir, apresenta-se uma visão geral sobre as formações que compõem esta unidade. Então, explora-se em detalhes os afloramentos visitados, expondo como as formações apresentam-se nestas localidades.

Geologia Regional

A Bacia do Paraná ocupa uma área aproximada de 1.100.000 km² no território brasileiro e ocorre nos estados de Goiás, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Além do Brasil, esta bacia intracratônica também inclui porções dos territórios do leste do Paraguai, nordeste da Argentina e norte do Uruguai. A sinéclise abriga uma sucessão sedimentar que data do Neo-Ordoviciano ao Neocretáceo, marcada por eventos de discordância que permitem o reconhecimento de seis unidades aloestratigráficas de ampla escala ou supersequências (Milani *et al.*, 2007).

As supersequências podem ser categorizadas como grupos estratigráficos, que são entendidos como pacotes rochosos que materializam grandes intervalos temporais, na ordem de dezenas de milhões de anos. Milani (1997) reconheceu seis unidades destas na Bacia do Paraná, a saber: Rio Ivaí (Ordoviciano-Siluriano); Paraná (Devoniano); Gondwana I (Carbonífero-Eotriássico); Gondwana II (Meso a Neotriássico); Gondwana III (Neojurássico-Eocretáceo); e Bauru (Neocretáceo). As três primeiras representam ciclos transgressivo-regressivos do Paleozoico, enquanto as outras são pacotes de rochas sedimentares continentais mesozoicas com rochas ígneas associadas (Milani *et al.*, 2007).

O Grupo Rio Ivaí é a primeira unidade da bacia e seus estratos datam do Caradociano (i.e. Ordoviciano Superior; a terminologia inglesa equivale ao intervalo do Sandbiano ao Katiano inferior) ao Llandoveryano (Siluriano Inferior) (Milani e Ramos, 1998). A unidade está assentada sobre o embasamento cristalino da sinéclise e estende-se do estado de Santa Catarina até Mato Grosso e Goiás, aflorando principalmente no flanco norte da Bacia do Paraná (Fig. 3). O pacote, de forma geral, apresenta uma tendência de espessamento para oeste (Milani *et al.*, 2007). A unidade é constituída pelas formações Alto Garças, Iapó e Vila Maria (Assine *et al.*, 1994) (Fig. 4).

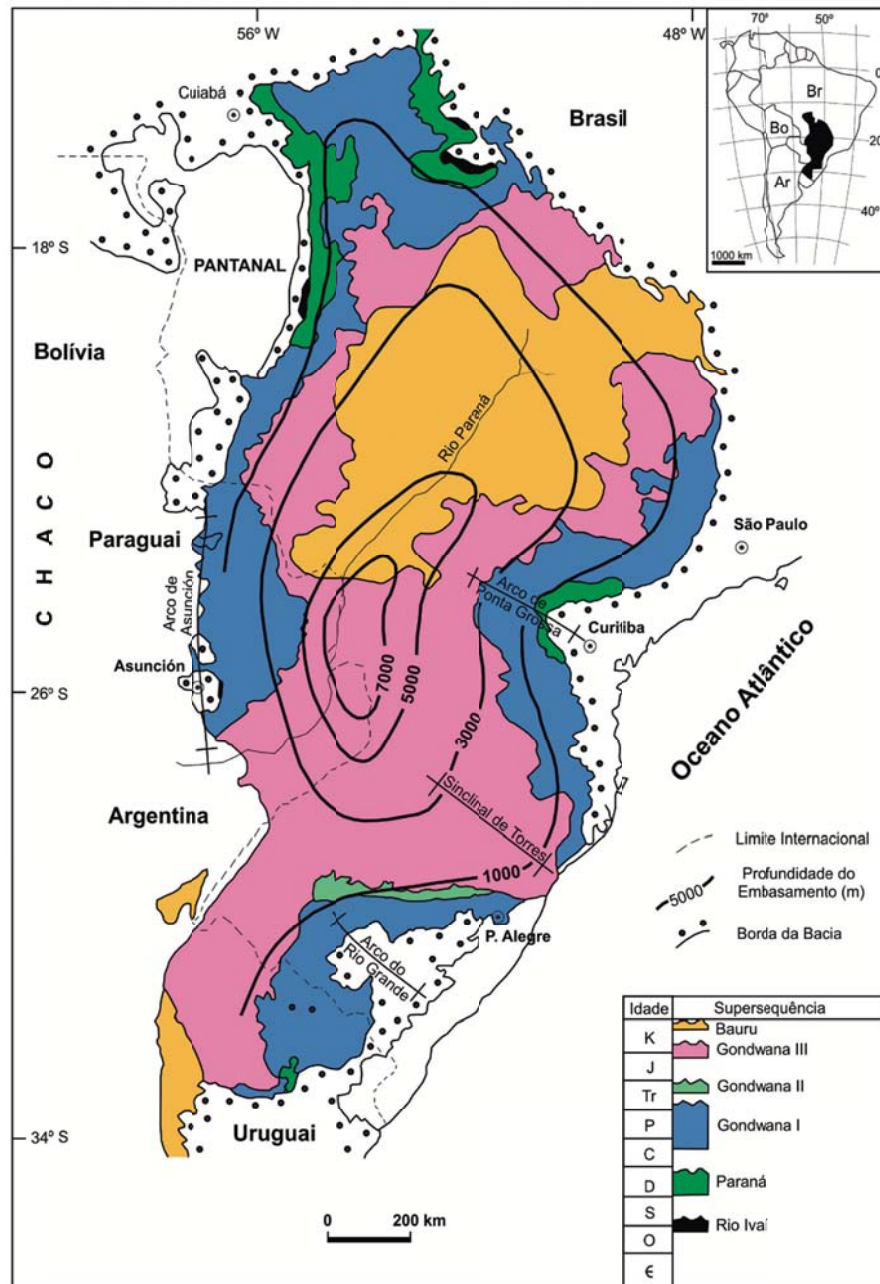


Figura 3. Mapa geológico da Bacia do Paraná, identificando as diferentes Supersequências ou Grupos. Em preto, o Grupo Rio Ivaí. Fonte: Carbonaro e Ghilardi (2016), modificado de Milani e Ramos (1998).

A Formação Alto Garças acomoda-se diretamente sobre o embasamento cristalino da bacia, que é constituído por rochas pré-cambrianas e eopaleozoicas. Trata-se de uma unidade arenosa com conglomerados basais, com seixos predominantemente de quartzo em uma matriz arenosa feldspática. Não está presente em todas as seções das formações do Rio Ivaí, mas aflora principalmente nas bordas norte e noroeste da bacia, em afloramentos dos estados de Goiás, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul. Na borda leste da bacia, esta unidade

pode ser observada especialmente em testemunhos de sondagem de poços nos estados do Paraná e Santa Catarina (Assine e Soares, 1989; Assine *et al.*, 1994, 1998).

Os arenitos conglomeráticos basais da Formação Alto Garças apresentam estruturas sedimentares, tais como estratificações cruzadas de médio porte, que indicam origem fluvial. Na parte superior desta unidade, constata-se a presença de estratificações com truncamento por ondas, sugerindo um ambiente marinho litorâneo (Assine *et al.*, 1994). Nesta porção, também foi identificado o icnofóssil *Skolithos*, que é tido como produzido por uma variedade de organismos em ambientes marinhos rasos. Nenhum fóssil corpóreo foi reportado para a unidade até o presente momento, e o conteúdo fossilífero conhecido não auxilia na determinação de sua idade (Milani *et al.*, 2007), visto que *Skolithos* ocorre do Cambriano ao Recente (Pemberton e Frey, 1985; Desjardins *et al.*, 2010). Esta unidade é sobreposta pela Formação Iapó.

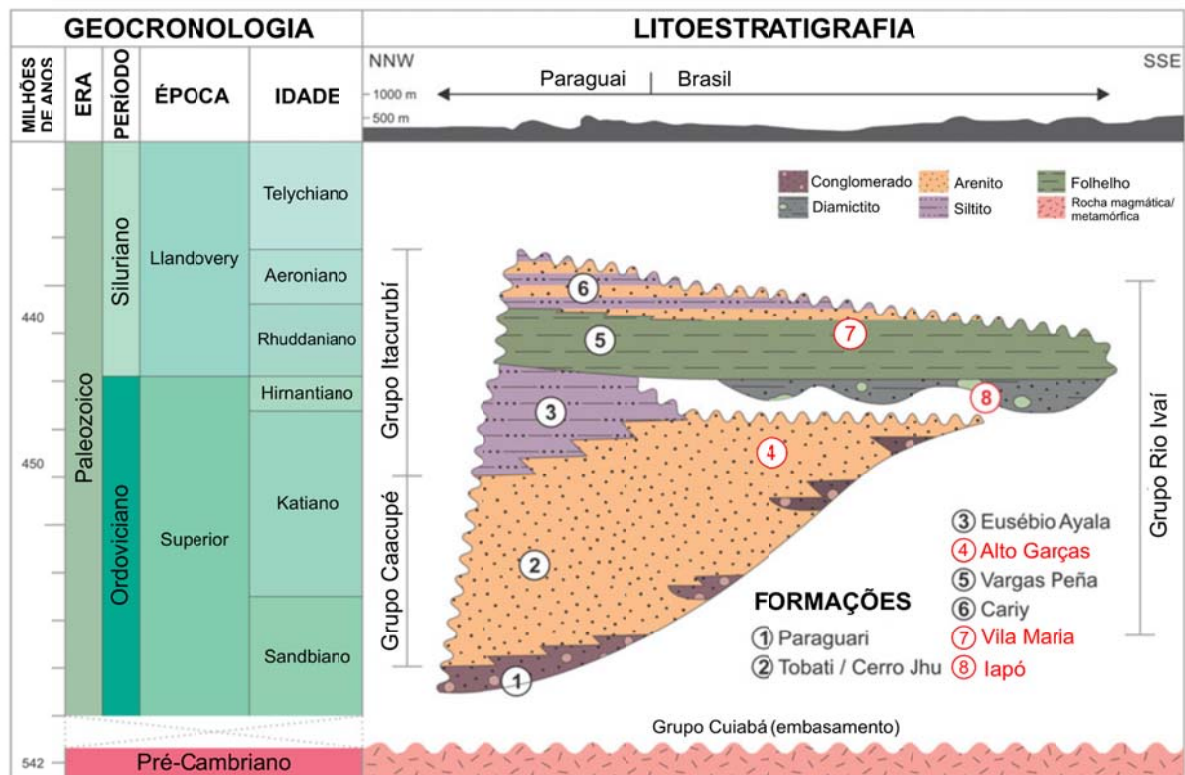


Figura 4. Carta estratigráfica do Ordoviciano-Siluriano da Bacia do Paraná, apresentando as unidades paraguaias e brasileiras. As formações do Grupo Rio Ivaí foram destacadas em vermelho. Adaptado de Gonçalves *et al.* (2022).

Em sua área de descrição, na Serra de São Joaquim (PR), a Formação Iapó é pouco espessa e descontínua, raramente ultrapassando duas dezenas de metros (Assine *et al.*, 1994). Zalán *et al.* (1987) estudaram os testemunhos de diferentes poços, abertos próximos à localidade-tipo, e a Formação Iapó comumente é a primeira a se depositar sobre o embasamento cristalino. Entretanto, afloramentos da unidade são pouco relatados na borda leste da bacia, e a unidade é mais comumente encontrada em superfície na borda norte (Assine *et al.* 1994, 1998). Assine e Soares (1989) descreveram testemunhos de poços na região da borda norte, em que a Formação Iapó é geralmente encontrada sobre a Formação Alto Garças.

As rochas basais da Iapó são representadas por diamictitos e conglomerados avermelhados com ocasionais lentes areníticas. Acima destes, encontra-se uma camada pelítica de espessura variável, contendo seixos que se tornam progressivamente mais escassos conforme sobe-se o perfil estratigráfico, tidos como indicativos de influência glacial. A origem da Formação Iapó foi interpretada como glacial, devido às camadas de deposição subaquática e abundante material glacial de *drift* que, “à primeira vista, lembram tilito” (Maack, 1947). Assine *et al.* (1994) concordaram com a interpretação glacial da unidade, associando sua gênese ao evento de glaciação ocorrido ao final do Ordoviciano. Mais recentemente, autores sugerem idade hiraniana para os estratos superiores da formação, devido ao seu conteúdo fossilífero (Zabini *et al.*, 2019, 2021; Gonçalves *et al.*, 2022; Rodrigues *et al.*, 2022). Sobreposta a esta unidade, encontra-se a Formação Vila Maria.

A Formação Vila Maria é constituída por folhelhos fossilíferos sem seixos, seguidos de arenitos intercalados a siltitos. A seção de arenitos superior apresenta estratificações cruzadas e laminações truncadas por ondas, que exibem também moldes de conchas, indicando um ambiente deposicional marinho raso; esta porção areno-siltosa representaria a parte regressiva do ciclo do Grupo Rio Ivaí (Assine *et al.*, 1994; Milani *et al.*, 2007). Esta unidade é sobreposta pela Formação Furnas (Siluro-Devoniano) em muitas localidades.

Na borda leste da Bacia do Paraná, a Formação Vila Maria foi registrada em subsuperfície, a partir de testemunhos obtidos de diferentes poços, conforme relatado nos trabalhos de Zalán *et al.* (1987) e Assine e Soares (1989). Na borda norte, diferentes afloramentos desta formação foram reportados por autores em trabalhos clássicos (e.g. Popp *et al.*, 1981; Gray *et al.*, 1985) e recentes (e.g. Adorno *et al.*, 2016), na região dos estados de Goiás e Mato Grosso. Faria (1982) atribuiu esta unidade ao Siluriano Inferior, hipótese que

foi explorada e corroborada posteriormente por outros autores, embora a partir de diferentes evidências (Zalán *et al.*, 1897; Gray *et al.*, 1985; Mizusaki *et al.*, 2002).

O conteúdo fossilífero desta formação é estudado desde sua proposição formal por Faria (1982), que descreveu diferentes grupos de paleoinvertebrados. Gray *et al.* (1985) descreveram, pela primeira vez, os palinomorfos da Formação Vila Maria. Embora muito do conteúdo paleontológico possa sugerir uma idade Llandoveryana para a Formação Vila Maria, Adorno *et al.* (2016) propõem a idade hiraniana para a base da unidade, a partir da ocorrência de ostracodes reportados exclusivamente para o Ordoviciano.

Geologia Local

A área de estudo do presente trabalho restringe-se à borda norte da Bacia do Paraná, local no qual as rochas do Grupo Rio Ivaí são reconhecidas em meio a camadas devonianas, permo-carboníferas e eventuais unidades cretáceas (Fig. 5). As campanhas de campo foram conduzidas nos afloramentos de Adorno (2014), também visitados por outros autores posteriormente (Adorno *et al.*, 2016; Zabini *et al.*, 2019, 2021; Gonçalves *et al.*, 2022; Rodrigues *et al.*, 2022). As seções estão localizadas nos municípios de Bom Jardim de Goiás (GO) e Barra do Garças (MT).

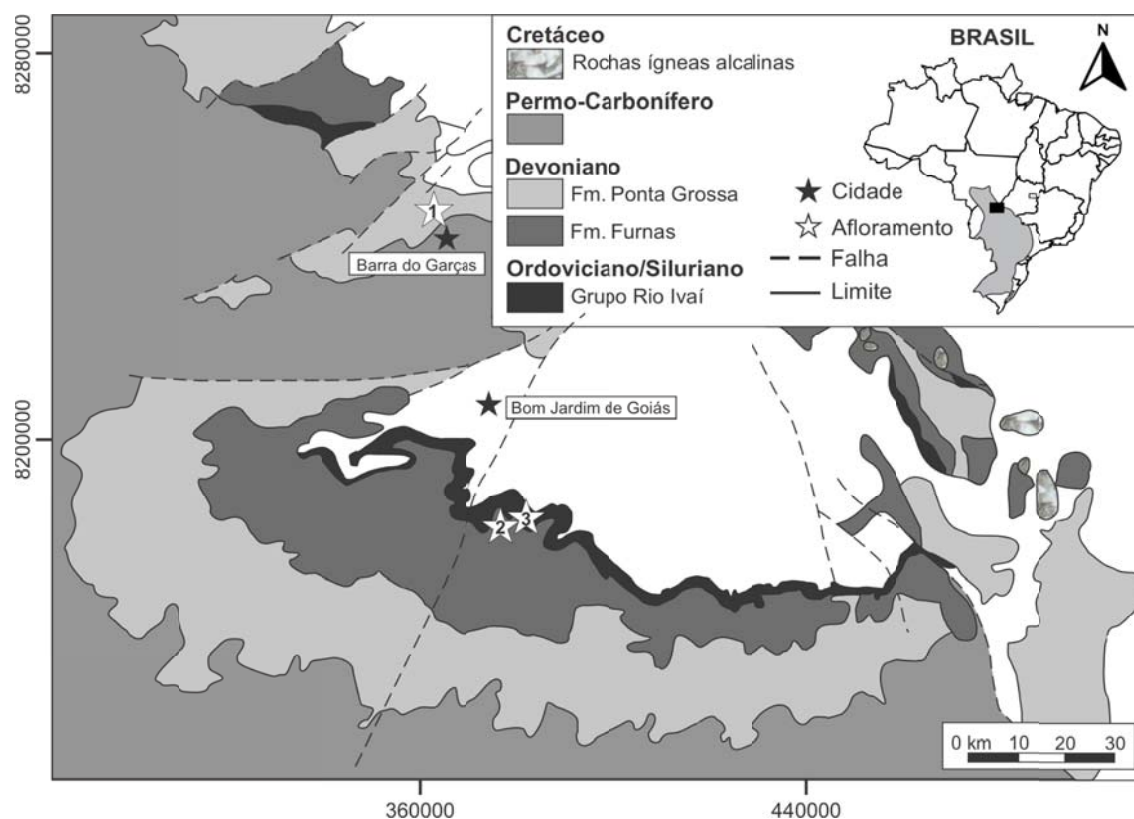


Figura 5. Mapa da distribuição do Grupo Rio Ivaí no flanco norte da Bacia do Paraná, Brasil. Afloramentos: (1) COHAB; (2) Córrego da Aldeia; (3) Fazenda Três Barras.

COHAB

A seção COHAB (UTM 363910 mL 8245824 mN, Zona 22L, Datum SAD69) foi originalmente descrita por Assine *et al.* (1998), e está localizada na área urbana do município de Barra do Garças, MT (Fig. 5 - Afloramento 1). Nesta localidade (Fig. 6), é possível encontrar o embasamento, representado pelos metapelitos e metaritmitos do Grupo Cuiabá. Sobre a rocha cristalina, encontram-se as três formações do Rio Ivaí: Alto Garças, Iapó e Vila Maria.



Figura 6. Seção COHAB, localizada em Barra do Garças (MT), Brasil. **a.** Visão geral do afloramento. **b.** Pesquisadores trabalhando no afloramento, em coleta para paleoinvertebrados. **c.** Quadrícula de 50 x 50 x 50 cm, na qual trabalha-se com esforço de coleta e tempo controlados, para a coleta tafonômica de paleoinvertebrados.

Os arenitos da Formação Alto Garças atingem 3 metros de espessura e apresentam marcas de ondulação (*ripple marks*). Estas rochas são sobrepostas pelos diamictitos basais com lentes arenosas da Formação Iapó. Acima do diamictito, argilitosossilíferos e com seixos pingados caracterizam o topo da unidade Iapó na seção COHAB, que atinge espessura total de cerca de 9 metros. Ocasionalmente lentes de areia são observadas nas camadas da Formação Iapó. Os argilitos são seguidos por uma superfície laterítica de cerca de um metro de espessura. Acima do laterito, encontram-se siltitos micáceos avermelhados, característicos da Formação Vila Maria.

A espessura total da unidade Vila Maria não pôde ser aferida nesta seção, localidade onde os arenitos da Formação Furnas também afloram (Fig. 9A). Zabini *et al.* (2021) publicaram a versão mais recente da distribuição dos grupos de paleoinvertebrados nos argilitos das formações Iapó e Vila Maria. Não há publicações que relatem a presença de palinomorfos nos estratos da seção.

Fazenda Três Barras

A seção Fazenda Três Barras (UTM 382688 mL 8181674 mN, Zona 22K, Datum SAD69) está localizada ao sul do município de Bom Jardim de Goiás (Fig. 5 - Afloramento 3), e o acesso se dá pela rota não pavimentada GO 188 e, depois, pela estrada que liga os municípios de Piranhas e Bom Jardim de Goiás. O embasamento nesta localidade é representado por riodacito, uma rocha ígnea extrusiva ácida, de coloração cinza escuro. A Formação Alto Garças não é encontrada nesta seção.

Neste local (Fig. 7), a Formação Iapó aflora discordantemente sobre a rocha cristalina, e é caracterizada por diamictitos maciços polimíticos, com seixos dispersos em matriz silto-arenosa, intercalados a camadas areníticas. O topo da unidade Iapó é representado por uma delgada camada de folhelhos com seixos pingados, e a espessura da Formação totaliza cerca de 7 metros (Adorno, 2014).

A base da Formação Vila Maria, que nesta seção apresenta contato gradativo com a Formação Iapó, é constituída por um pacote de folhelhos fossilíferos, de coloração cinza escuro, com aproximadamente 5 metros de espessura. Seguem-se, então, estratos de siltito micáceo roxo avermelhado, com espessura aproximada de 5 metros. A porção superior da unidade Vila Maria é caracterizada por arenitos indicativos de plataforma marinha rasa (Fig. 9B), ricos em icnofósseis. Diferentes autores reportaram paleoinvertebrados (Zabini *et al.*, 2021; Gonçalves *et al.*, 2022) e palinomorfos (Gray *et al.*, 1985; Mizusaki *et al.*, 2002; Rodrigues *et al.*, 2022) para esta seção.

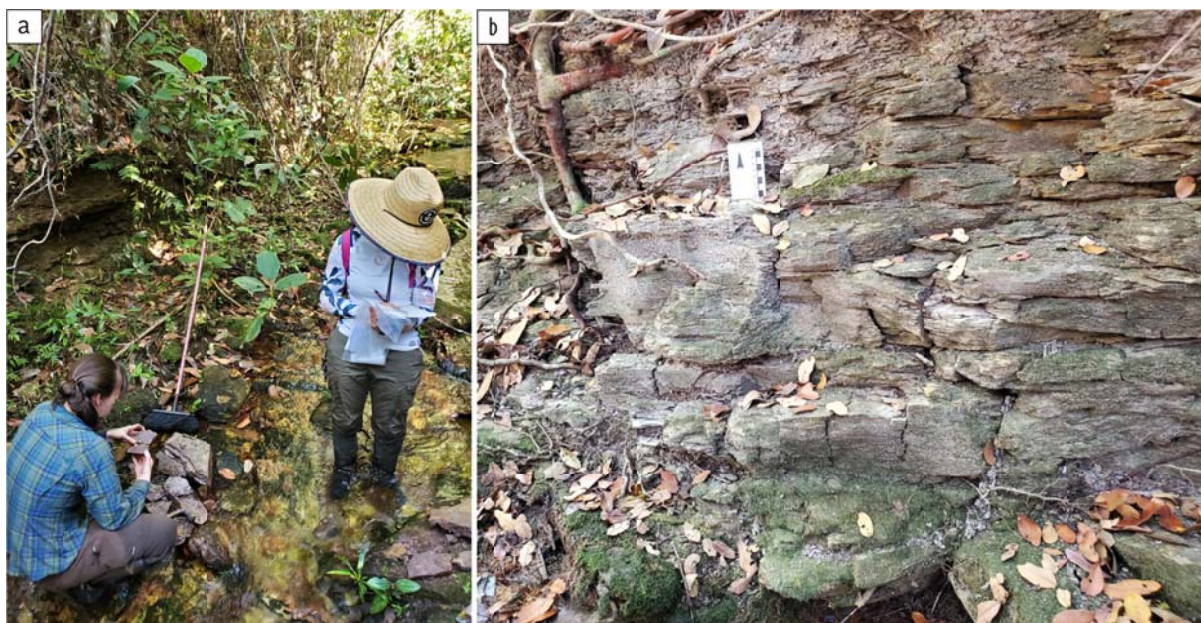


Figura 7. Seção Fazenda Três Barras, localizada em Bom Jardim de Goiás (GO), Brasil. **a.** Pesquisadoras trabalham em coleta para paleoinvertebrados às margens. **b.** Folhelhos da Formação Vila Maria constituem as margens do riacho que se forma após a queda da cachoeira Três Barras, que dá nome à seção.

Córrego da Aldeia

A seção Córrego da Aldeia (UTM 377941 mL 8181403 mN, Zona 22K, Datum SAD69) foi definida por Faria (1982) como a seção-tipo suplementar da Formação Vila Maria. Localiza-se ao sul do município de Bom Jardim de Goiás (Fig. 5 - Afloramento 2), e o acesso à seção se dá pela estrada que liga o município à Fazenda Boa Sorte.

Neste afloramento (Fig. 8), o embasamento é o mesmo encontrado na seção Fazenda Três Barras, e a Formação Alto Garças não aflora nesta localidade. Diretamente sobreposto à rocha cristalina, encontra-se a Formação Iapó, representada por um pacote de 1,5 metro de espessura de diamictitos com clastos angulosos, em matriz areno-siltosa. Acima destes, segue-se uma intercalação entre diamictitos estratificados e maciços da mesma unidade, que podem atingir até 7 metros de espessura (Adôrno, 2014). O topo da unidade Iapó é caracterizado por uma sequência de folhelhos escuros com seixos pingados, com cerca de meio metro de espessura. Na seção Córrego da Aldeia, a Formação Vila Maria faz contato gradacional com a Formação Iapó, como também observado na Fazenda Três Barras, e atinge 20 metros de espessura.

A porção basal da Formação Vila Maria é representada por estratos de folhelhos fossilíferos escuros, acinzentados a pretos, com espessura aproximada de 11 metros. A porção intermediária é caracterizada por siltitos roxo-avermelhados, micáceos, que são sucedidos pelos arenitos superiores da unidade (Fig. 9C). O contato entre as formações Vila Maria e Furnas é discordante.

Adôrno *et al.* (2016) descreveram ostracodes para o pacote basal da Formação Vila Maria nesta localidade, e Rodrigues *et al.* (2022) foram pioneiros em relatar a ocorrência de criptosporos na Formação Iapó, presentes nos afloramentos Córrego da Aldeia e Fazenda Três Barras. Em sua tese, Rodrigues (2021) relata diferentes grupos de palinomorfos recuperados nesta seção. Abaixo, encontram-se esquematizados os perfis estratigráficos das três seções estudadas, que foram construídos e adotados ao longo deste projeto (Fig. 9).



Figura 8. Rochas das formações Iapó e Vila Maria aflorando na seção Córrego da Aldeia. **a.** Paredão rochoso onde se dá o contato entre as formações Iapó e Vila Maria. **b.** Pesquisadores fazendo coleta tafonômica de paleoinvertebrados nos folhelhos da Fm. Vila Maria.

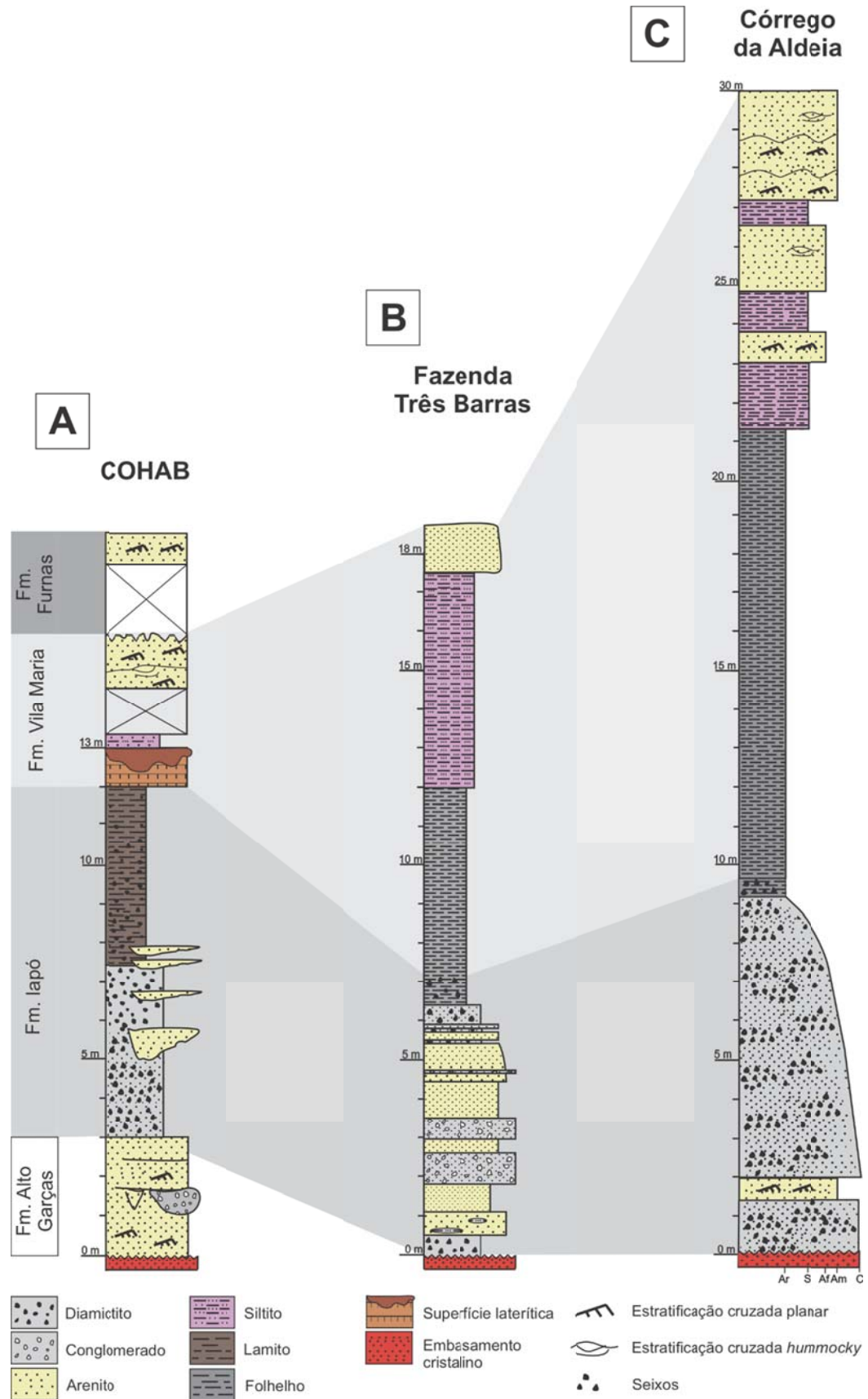


Figura 9. Perfis estratigráficos das seções (A) COHAB, (B) Fazenda Três Barras *sensu* Rodrigues (2021) e (C) Córrego da Aldeia *sensu* Adorno (2014).

Capítulo II. Estado da Arte do Ordoviciano-Siluriano da Bacia do Paraná

A pesquisa geológica das camadas de idade ordoviciano-siluriano na Bacia do Paraná começa na primeira metade do século XX, sendo a idade das formações do Grupo Rio Ivaí um dos tópicos centrais desde os primeiros estudos relacionados às unidades. Novos dados geológicos e paleontológicos somaram-se ao longo dos anos, acompanhados por subsequentes mudanças de paradigmas nas interpretações dos resultados.

Décadas de 1940-1970: As Primeiras Publicações de Unidades Pré-Devonianas

As formações constituintes do Grupo Rio Ivaí, foram estudadas e propostas em momentos diferentes ao longo do século XX, sendo a Formação Iapó a primeira unidade formal a ser descrita. Embora já houvesse conhecimento de unidades pré-devonianas na Bacia do Paraná, Maack (1947) sintetizou as discussões vigentes e propôs a Formação Iapó como unidade geológica formal, sotoposta à Formação Furnas, aflorante no estado do Paraná. Este autor interpretou a idade desta formação como siluriana, juntamente com a putativa Formação Blumenau (atualmente em desuso), que seria correspondente à Formação Iapó no estado de Santa Catarina.

Por sua vez, os estudos da unidade Vila Maria remetem ao chamado “Projeto Piranhas”, uma parceria entre a Universidade de Brasília e o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), hoje substituída pela Agência Nacional de Mineração (ANM). Deste empreendimento, resultou o relatório publicado por Faria *et al.* (1975), o primeiro trabalho que faz menção à Formação Vila Maria. Em termos oficiais, Faria e Reis-Neto (1978) apresentaram esta unidade à comunidade científica no XXX Congresso Brasileiro de Geologia em Recife, Pernambuco, comunicando que o contato desta com a Formação Furnas seria gradativo e concordante. Nesta breve comunicação, os autores também reportaram a ocorrência de braquiópodes do gênero *Orbiculoidea* nos folhelhos da Formação Vila Maria. Andrade e Camarço (1980) deram continuidade aos trabalhos referentes a esta unidade.

Década de 1980: O Mapeamento e a Paleontologia do Paleozoico Inferior da Bacia do Paraná

Andrade e Camarço (1980) trouxeram dados inéditos de testemunhos de poços perfurados no flanco norte/nordeste da Bacia do Paraná, discutindo a deposição da Vila Maria e sua espessura em diferentes localidades. Neste trabalho, os pesquisadores também

mencionam a presença de *Orbiculoidea* e de trilobitas do gêneros *Phacops*, levando-os à conclusão de que se tratava de de um ambiente marinho. Quanto à datação, propõem a idade devoniana inferior para toda a Formação Vila Maria, devido à sua concordância com a Formação Furnas. Trabalhos posteriores com icnofósseis, fósseis corpóreos e palinomorfos iriam questionar esta datação.

Burjack e Popp (1981) foram pioneiras no trabalho com os icnofósseis da Formação Vila Maria, unidade até então tida como restrita ao flanco nordeste da bacia. As autoras reportaram o icnogênero *Arthropycus*, descrito em um afloramento às margens do córrego Buriti Feio, em Caiapônia (GO), no topo da camada de siltitos. A presença de *Arthropycus alleghaniensis* (Harlan) Hall, 1852 deu suporte para a conclusão de que a Formação Vila Maria datava do Llandoveryano (Siluriano Inferior), e era correlata à Formação Trombetas, da Bacia do Amazonas.

Em um estudo publicado no mesmo volume, Popp *et al.* (1981) adotaram a datação proposta por Burjack e Popp (1981) e relataram novas ocorrências de paleoinvertebrados. Além do braquiópode *Orbiculoidea*, as pesquisadoras reportam três espécies distintas do bivalve *Paleoneilo*, bem como os gêneros *Nuculites* e *Pleurodaspis*, o arqueogastrópode *Bucanella* e ostracodes indeterminados. As autoras ressaltam que não constatarem a ocorrência de trilobitas como relatado por Andrade e Camarço (1980). Artigos subsequentes reportaram fauna de paleoinvertebrados semelhante a esta, que foi a primeira publicação a incluir fotos e dimensões dos espécimes.

Faria (1982) trabalhou com os estratos da Formação Vila Maria também na região de Goiás, reporando alguns dos mesmos grupos fósseis para os folhelhos basais da unidade - a saber, bivalves dos gêneros *Paleoneilo* e *Nuculites*, arqueogastrópodes, um possível graptólito do gênero *Climacograptus* e um braquiópode da superfamília Pentameracea. Neste trabalho, o autor também propõe as seções tipo e tipo suplementar da unidade Vila Maria, localizadas na borda norte da Bacia do Paraná, descrevendo formalmente a unidade para a comunidade científica.

A estratigrafia proposta constituía-se de três sequências litológicas: diamictitos basais, polimíticos e mal-selecionados, com ocasionais folhelhos e arenitos intercalados; folhelhos fossilíferos com lentes areníticas; por fim, arenitos rosas e avermelhados, feldspáticos, sotopostos por siltitos vermelhos com níveis arenosos (Faria, 1982). Quanto à idade da formação, o pesquisador considera o icnogênero relatado por Burjack e Popp (1981) como indicativo de idade llandoveryana para a porção superior da Formação Vila Maria e para

a base da Formação Furnas. O autor argumenta, também, que a ocorrência de *Climacograptus* poderia ser definitiva para a determinação da idade siluriana da unidade Vila Maria. No entanto, algumas das ocorrências fósseis relatadas viriam a ser revistas por Gray *et al.* (1985).

Em seu estudo, Gray *et al.* (1985) revisaram os *taxa* reportados por Faria (1982) e publicaram os primeiros dados de palinomorfos da Vila Maria. Os pesquisadores ressaltam que o suposto graptólito *Climacograptus* de Faria (1982) se tratava, na verdade, de uma estrutura de origem inorgânica; e o braquiópode *Pentamerus* era, em realidade, um espécime deformado do arqueogastrópode *Plectonotus*. A fauna de paleoinvertebrados, os autores concluem, não são indicativos de idade; além disto, argumentam que o icnogênero *Arthropycus* também não pode embasar as afirmações de uma idade llandoveryana para a formação. Em outras localidades, *Arthropycus* é registrado também no Ordoviciano, e seu limite estratigráfico superior é incerto (Gray *et al.*, 1985).

Em contrapartida, os autores propuseram uma datação baseada no conteúdo de palinomorfos. Nesta, que foi a primeira publicação referente aos microfósseis de parede orgânica da Formação Vila Maria, foram relatados criptosporos, acritarcas e algas prasinófitas. A partir da diversidade da assemblagem, bem como a variação de tamanho e tamanho médio dos espécimes, atribui-se a unidade Vila Maria ao Llandoveryano (Gray *et al.*, 1985), em consonância com o parecer de Burjack e Popp (1981). Pelos anos seguintes, a idade eosiluriana da Formação Vila Maria seria admitida como válida na comunidade de pesquisadores.

Em seu estudo dos pacotes rochosos da bacia no flanco norte/nordeste, Zalán *et al.* (1987) propõem que o Siluriano da porção brasileira da Bacia do Paraná seria representado não apenas pela Formação Vila Maria, mas por três unidades geológicas distintas: as formações Rio Ivaí, Vila Maria e Furnas. Os autores propõem a nomenclatura Formação Rio Ivaí, uma nova unidade formal, sotoposta à Formação Vila Maria; a nova unidade seria equivalente ao “Arenito” Eusebio Ayala da porção paraguaia da Bacia do Paraná. Sua seção-tipo seria um intervalo do poço 2-RI-1-PR, no município de Rio Ivaí, Paraná — de onde deriva seu nome —, sinalizando que estes autores reconheciam a presença desta unidade no flanco sudeste da Bacia do Paraná. Os pesquisadores argumentam, no entanto, que a Formação Rio Ivaí poderia ser detectada apenas em estudos de subsuperfície, não havendo afloramentos conhecidos no Brasil.

Para Zalán *et al.* (1987), o contato entre as formações Rio Ivaí e Vila Maria seria geralmente abrupto, indicativo de uma inconformidade de provável origem tectônica. A

unidade Vila Maria, representada por uma sequência basal de diamictitos polimíticos, foi apontada como uma possível correlata da Formação Iapó — que, para estes pesquisadores, tinha ocorrência restrita à borda sudeste da bacia, no Arco de Ponta Grossa. Porém, os dados dos poços sugeriam que a Formação Iapó seria mais velha que a Formação Rio Ivaí.

Desta forma, os autores argumentam que a unidade Iapó dataria do neo-ordoviciano, a unidade Rio Ivaí poderia ter idade neo-ordoviciano a eosiluriana, enquanto a Vila Maria era entendida como eosiluriana segundo dos dados de Gray *et al.* (1985). O contato entre esta última e a Formação Furnas foi interpretado como gradativo, enquanto o contato desta com a Formação Ponta Grossa foi tido como discordante. Assim, a idade da Formação Furnas foi entendida como abrangendo do neo-siluriano ao eodevoniano. A Sequência Siluriana, como tratada por Zalán *et al.* (1987) foi, então, interpretada como um ciclo transgressivo-regressivo completo, com forte influência glacial. Posteriormente, Assine e Soares (1989) propuseram mudanças significativas no entendimento do Ordoviciano-Siluriano da Bacia do Paraná.

Assine e Soares (1989) alegaram distinção clara entre as formações Iapó e Vila Maria; para os autores, a unidade Iapó designava os depósitos de diamictitos, enquanto Vila Maria se referia aos pelitos e arenitos finosossilíferos sobrepostos, diferindo do entendimento de Zalán *et al.* (1987). Em um caso similar, Andrade e Carmão (1980) haviam detectado arenitos basais, sotopostos aos diamictitos, no testemunho do poço 2-AG-1-MT e estenderam a designação da Formação Vila Maria até este pacote; Assine e Soares (1989), por sua vez, entendem que os arenitos pré-Iapó não constituem nenhuma das formações discutidas, chamando-os provisoriamente de “Arenito” Alto Garças.

Adicionalmente, os pesquisadores contestaram a designação “Rio Ivaí” de Zalán *et al.* (1987), considerando-a imprópria para a extensão a qual foi proposta. Para eles, a “Formação Rio Ivaí” designa todo o “Arenito” Alto Garças, os diamictitos e as camadas pelíticas da unidade Iapó. Por fim, o contato entre as formações Vila Maria e Furnas foi entendido como discordante; e aquele entre as formações Furnas e Ponta Grossa, como concordante e gradacional. Assim, propôs-se que a sequência Siluro-Ordoviciano da Bacia do Paraná seria representada pelo “Arenito” Alto Garças e pelas formações Iapó e Vila Maria (Assine e Soares, 1989).

Década de 1990: A Proposição do Grupo Rio Ivaí

Dando continuidade ao estudo de Assine e Soares (1989), Assine *et al.* (1994) apresentaram uma divisão do pré-carbonífero da Bacia do Paraná, propondo sua categorização em duas sequências tectono-sedimentares: o Grupo Rio Ivaí, representando a sequência do Ordoviciano-Siluriano; e o Grupo Paraná, representando o Devoniano. A sequência do O-S seria composta por três unidades geológicas, as formações Alto Garças, Iapó e Vila Maria. A sequência devoniana, por sua vez, seria constituída pelas formações Furnas e Ponta Grossa.

A caracterização proposta por Assine *et al.* (1994) para as unidades que compõem a sequência ordovício-siluriana da Bacia do Paraná foi adotada em trabalhos posteriores desde então. A Formação Alto Garças, então proposta como unidade geológica formal, foi descrita principalmente a partir de testemunhos de sondagem em poços nos flancos norte/nordeste (e.g. 2-AG-1-MT) e sudeste (e.g. 2-RI-1-PR) da bacia, uma vez que afloramentos são mais raros. Entretanto, a unidade pode ser observada em superfície nas regiões de Barra do Garças (MT) e Coxim (MS), no flanco norte da bacia. A Formação Alto Garças foi apontada como correlata ao Grupo Caacupé, na porção paraguaia da bacia.

A contribuição de Assine *et al.* (1994) para a compreensão da Formação Iapó se deve principalmente à extensão dessa unidade na Bacia do Paraná; até então, afloramentos descritos para o flanco norte/nordeste eram escassos, muitos deles sendo apresentados pela primeira vez neste trabalho. O contato desta unidade com a Formação Alto Garças é geralmente abrupto, o que foi interpretado como consequência da erosão dos sedimentos, expostos durante o abaixamento do nível do mar, evento decorrente da glaciação neo-ordoviciano. A Formação Iapó foi indicada como correlata à Formação Eusebio Ayala do Grupo Itacurubí, Paraguai. A origem glacial desta unidade foi explorada de forma abrangente por Assine *et al.* (1998).

O entendimento de Assine e Soares (1989) quanto à Formação Vila Maria foi reforçado por Assine *et al.* (1994), que esta unidade refere-se somente aos folhelhos e siltitos fossilíferos e aos arenitos finos rosáceos e micáceos superiores, conforme descritos na seção-tipo de Faria (1982). A seção pelítica da Formação Vila Maria é apontada como correlata à Formação Vargas Peña; a porção areno-siltosa superior seria correlata à Formação Cariy, ambas do Grupo Itacurubí. Os arenitos superiores da Vila Maria representariam a parte regressiva do ciclo O-S da bacia (Assine *et al.*, 1994).

Em sequência, Milani *et al.* (1995) incorporam o conceito de sequências tectono-sedimentares. A sequência ordovício-siluriana da Bacia do Paraná corresponderia

litoestratigraficamente ao Grupo Rio Ivaí de Assine *et al.* (1994), o pacote mais antigo da bacia. Milani *et al.* (1995) apresentam de forma sistematizada o histórico das pesquisas das camadas ordovício-silurianas da Bacia do Paraná e propõem um novo mapeamento da ocorrência do Grupo Rio Ivaí em escala de bacia. Para isto, os autores se valeram de diversos dados de subsuperfície, apresentando perfis inéditos de poços perfurados em quase todos os estados brasileiros nos quais a Bacia do Paraná ocorre e também na região de Assunção, Paraguai.

A partir dos testemunhos de sondagem, Milani *et al.* (1995) visualizaram significativo espessamento da sequência do O-S na direção da porção paraguaia da bacia. Os autores também relataram a ocorrência de quitinozoários, grupo de palinomorfos pouco recuperado nas seções do Grupo Rio Ivaí — o relatório interno da Petrobrás de autoria de Grahn (1989) foi o primeiro a contar com descrição de espécimes de quitinozoários do O-S da Bacia do Paraná, encontrados nos estratos pelíticos da Formação Vila Maria.

Posterior e paralelamente ao trabalho de Milani *et al.* (1995), que buscava descrever a sequência ordovício-siluriana em maior escala, seguiram-se diversos estudos que buscavam caracterizar de maneira minuciosa o Grupo Rio Ivaí nas bordas norte e noroeste da Bacia do Paraná. Alvarenga *et al.* (1998) foram responsáveis pela descrição de diversos afloramentos dos grupos Rio Ivaí (O-S) e Paraná (Devoniano) na região próxima à divisa entre os estados de Goiás e Mato Grosso, flanco norte da bacia. A região da Chapada dos Guimarães, no flanco noroeste, foi extensivamente estudada por Borghi e Moreira (1996a, 1996b, 1996c, 1997, 1998a, 1998b) e Moreira e Borghi (1997, 1998, 1999a, 1999b). O cenário paleontológico, por sua vez, viu crescer o conhecimento acerca dos quitinozoários silurianos da Formação Vila Maria.

Década de 2000: O Refinamento da Idade da Formação Vila Maria

Grahn *et al.* (2000) resumizam uma década de estudos palinológicos (Grahn, 1991, 1992a, 1992b; Grahn e Caputo, 1992; Gray *et al.*, 1992; Laranjeira *et al.*, 1997) na Bacia do Paraná, apresentando a ocorrência de múltiplas espécies de quitinozoários nas camadas silurianas e devonianas das porções brasileira e paraguaia da bacia. Em suas considerações finais, os pesquisadores propõem a divisão do Siluriano-Devoniano da Bacia do Paraná em setes biozonas de quitinozoários, variando do Rhuddaniano (Llandoveryano inferior) ao Emsiano superior. Neste trabalho, os autores endossam a idade llandoveryana da

Formação Vila Maria, apontando-a como correlata à Formação Vargas Peña, como afirmado por Assine *et al.* (1994).

O trabalho de Mizusaki *et al.* (2002) foi a primeira contribuição para a determinação da idade absoluta da Formação Vila Maria, utilizando a isócrona Rb/Sr para cristais de zircão detrítico. Os resultados foram apontados como significativos e confiáveis para a determinação da idade de deposição da unidade. O resultado da análise indicou que a idade das amostras, obtidas das porções inferior, intermediária e superior dos folhelhos acinzentados da Formação Vila Maria, seria de $435,9 \pm 7,8$ Ma. O intervalo obtido seria consistente com qualquer datação entre Ordoviciano Superior (Sandbiano) ao Siluriano Inferior (Llandoveryano).

Para lançar luz à questão, os pesquisadores optaram por associar os resultados radiométricos com os palinológicos. A presença do palinomorfo *Laevolancis divellomedia* (Chibrikova) Burgess e Richardson, 1991 e abundantes criptosporos envoltos por membrana (estrutura formada pela extensão da exina que os recobre externamente) levou os autores a concluir que a assemblagem possivelmente dataria do intervalo Rhuddaniano - Aeroniano Inferior. Desta forma, os folhelhos médios da Formação Vila Maria foram atribuídos ao Llandoveryano Inferior. Posteriormente, Adôrno *et al.* (2016) retomou a discussão referente à idade da Vila Maria a partir de dados de microinvertebrados.

Décadas de 2010-2020: A Investigação do Registro Hirnantiano

Adôrno *et al.* (2016) ressaltaram que poucas considerações taxonômicas a respeito dos ostracodes reportados para a unidade Vila Maria haviam sido levantadas em trabalhos anteriores. De fato, este foi o padrão observado para maioria dos paleoinvertebrados descritos até então para o Grupo Rio Ivaí (Popp *et al.*, 1981; Faria, 1982), com muitos indivíduos limitados à menções genéricas pouco embasadas. Assim, a descrição de *Conchoprimitia brasiliensis* Adôrno e Salas, 2016 e *Satiellina paranaensis* Adôrno e Salas, 2016 foi a primeira contribuição para o conhecimento da fauna de ostracodes mais antiga do registro fóssilífero brasileiro (Adôrno *et al.*, 2016).

Estes pesquisadores chamam atenção para o fato que as assemblagens descritas por Gray *et al.* (1985) e Mizusaki *et al.* (2002) não contavam com espécies diagnósticas de idade. Assim, os autores afirmam que os ostracodes são os elementos mais seguros para a datação, posicionando a porção basal dos folhelhos da Vila Maria no Ordoviciano Superior.

Isto pois os gêneros *Conchoprimitia* e *Satiellina*, apesar de não serem considerados diagnósticos, são registrados apenas no Ordoviciano. O ostracode *Satiellina* foi também reportado para as camadas da Formação Djeffara, Ordoviciano Superior da Bacia de Ghadamis, no noroeste da Líbia (Vannier *et al.*, 1989). Uma possível conexão entre bacias da América do Sul e do norte da África já havia sido sugerida por Benedetto *et al.* (2013), hipótese também discutida por Adôrno *et al.* (2016). No entanto, os ostracodes não foram os únicos invertebrados relatados em bacias brasileiras e africanas.

Zabini *et al.* (2019) descreveu o braquiópode discinoide (*i.e.* organofosfático) *Kosoidea australis* Zabini e Furtado-Carvalho, 2019 para as camadas pelíticas da Formação Iapó e os folhelhos basais da Formação Vila Maria, identificação que passou a ser adotada em trabalhos posteriores. Anteriormente, os indivíduos eram putativamente apontados como *Orbiculoidea* sp. (Andrade e Camarço, 1980; Popp *et al.*, 1981; Assine *et al.*, 1998). Em sua dissertação, Adôrno (2014) também havia adotado esta classificação, enfatizando a necessidade de trabalhos taxonômicos mais refinados para a identificação deste material. O gênero *Kosoidea* também é registrado nos estratos da Formação Cedarberg, Hirnantiano da Bacia do Cabo, África do Sul (Bassett *et al.*, 2009). Retomando a discussão de Benedetto *et al.* (2013), Zabini *et al.* (2019) propõem uma conexão entre as bacias sul-americanas e sul-africanas, uma hipótese não explorada anteriormente. No afloramento COHAB (Fig. 4-5) estudado por Zabini *et al.* (2019), *K. australis* era o elemento mais abundante do registro fóssilífero, mas a diversidade das seções do Grupo Rio Ivaí voltaria a ser explorada em trabalhos posteriores.

Zabini *et al.* (2021) descreveram uma fauna pouco diversa de paleoinvertebrados para o Grupo Rio Ivaí, composta por alguns grupos de braquiópodes, moluscos bivalves, ostracodes e um possível graptólito. Neste artigo, os autores apresentam considerações tafonômicas inéditas, descrevendo duas diferentes tafofácies para os afloramentos visitados. A primeira tafofácies refletiria um ambiente de *offshore* transicional, mais energético, fortemente influenciado por condições glaciais, e caracterizado por um alto grau de fragmentação, seleção de tamanho e de tipo de valvas. Os bioclastos, fragmentados, seriam alóctones, carregados por correntes formadas pelo derretimento das geleiras. A segunda tafofácies representa um ambiente de *offshore* menos energético, em um cenário transgressivo pós-glacial; de fato, os sedimentos não apresentam traços de influência de geleiras. Nesta tafofácies, os fósseis são encontrados articulados ou em posição de vida, com pouco ou nenhum transporte da sua área de vida/morte original.

As tafofácies descritas foram identificadas em afloramentos distintos. O primeiro refere-se à seção COHAB, que indica ambiente mais energético e glacial, são encontrados braquiópodes linguliformes e rhynconeliformes, totalizando quatro diferentes famílias. Um possível fragmento de graptólito também foi reportado. No segundo afloramento, a seção Fazenda Três Barras (Figs. 4 e 6), representativo de ambiente menos energético e periglacial, são encontrados principalmente moluscos bivalves e ostracodes. Ocorrências raras do discinídeo *K. australis* e um fragmento de braquiópode carbonático foram relatados nesta localidade (ver "Outcrop 1" e "Outcrop 2" de Zabini *et al.*, 2021, para mais detalhes). Neste segundo afloramento, Rodrigues *et al.* (2022) também relataram palinomorfos com grau de preservação moderado a bom, muitos deles até então desconhecidos para o Grupo Rio Ivaí.

Rodrigues *et al.* (2022) foram pioneiros em reportar palinomorfos para a Formação Iapó da Bacia do Paraná. Até então, estes organismos só eram conhecidos para a Formação Vila Maria, embora o afloramento do qual foram retiradas as amostras para preparação palinológica tenha sido o mesmo explorado anteriormente pelos primeiros autores a descrever dados palinológicos para o Grupo Rio Ivaí (Gray *et al.*, 1985; Mizusaki *et al.*, 2002). Ao todo, 31 espécies de palinomorfos, compreendendo criptosporos, acritarcas, prasinófitas e fungos, foram descritas para a Formação Iapó; destas, algumas são compartilhadas com a unidade sobreposta. A assemblagem também foi comparada com aquelas reportadas em bacias coevas.

As assemblagens de criptosporos da China e da Estônia apresentaram similaridade de 52% com aquela recuperada na Formação Iapó, seguidas pela assemblagem da Argentina, com 44% de similaridade. Tais resultados atestam o caráter cosmopolita da palinoflora do Ordoviciano Superior, dada a similaridade entre assemblagens de todo o mundo, independentemente de sua paleolatidade (Rodrigues *et al.*, 2022). Os autores frisam que esta uniformidade é encontrada em palinofloras do Darriwiliano (Ordoviciano Médio) ao Llandoveryano (Siluriano Inferior). Desta forma, a assemblagem reportada para a Formação Iapó não pode ser tomada como diagnóstica de idade.

Quanto a este aspecto, Gonçalves *et al.* (2022) argumentam a favor da idade Hirnantiana para as camadas superiores da Iapó. Em sua publicação, os autores relatam a ocorrência do ostracode hirnantiano *Harpabollia harparum* Troedsson, 1918 nos pelitos superiores da formação, uma espécie diagnóstica da idade em localidades como a Baltoscândia (Meidla, 2007; Truuvær e Meidla, 2015). No afloramento Fazenda Três Barras, estudado por Gonçalves *et al.* (2022), o ostracode *H. harparum* ocorre juntamente com as

espécies *S. paranensis* e *K. australis*, ambas tomadas anteriormente como possíveis indicativos de uma idade Neo-ordoviciana (hirsantiana) para a Formação Iapó.

Capítulo III. Ocorrências de Invertebrados Fósseis

Os perfis estratigráficos das seções visitadas, apresentados anteriormente (Fig. 8), são individualizados abaixo e as ocorrências dos grupos fósseis são apontadas ao longo dos perfis, discriminando aquelas já reportadas na literatura e as ocorrências inéditas, fruto deste projeto de pesquisa. Um breve relato do conteúdo fossilífero de cada seção acompanha as imagens. Parte destes resultados foram apresentados em eventos científicos por Zabini *et al.* (2023), que discorreram a respeito da recuperação de paleoinvertebrados inéditos no O-S brasileiro,

Seção COHAB

O conteúdo fossilífero de paleoinvertebrados conhecido para este afloramento foi reportado anteriormente por Assine *et al.* (1998), Adôrno (2014) e Zabini *et al.* (2019, 2021). Os grupos recuperados pelos diferentes pesquisadores são apresentados a seguir (Tab. 4):

Tabela 4. Fauna de paleoinvertebrados reportada para a seção COHAB.

Grupo Fóssil	Classe, Ordem ou Família	Espécie	Referência
Braquiópodes Linguliformes	Discinidae	<i>Kosoidea australis</i>	Zabini <i>et al.</i> , 2019, 2021 Adôrno, 2014 ("Orbiculoidea" sp.) Assine <i>et al.</i> , 1998 ("Orbiculoidea" sp.) <u>Este projeto</u>
	Lingulidae	? <i>Dignomia</i> sp.	Adôrno, 2014
		Gênero indeterminado	Zabini <i>et al.</i> , 2021 <u>Este projeto</u>
	Obolidae	? <i>Palaeoglossa</i> sp.	Zabini <i>et al.</i> , 2021
		Gênero indeterminado	<u>Este projeto</u>
Braquiópodes Rhynchonelliformes	Indeterminado	-	Zabini <i>et al.</i> , 2021
	Dalmanellidae	<i>Dalmanella</i> cf. <i>testudinaria</i>	<u>Este projeto</u>
Moluscos	Archeogastropoda	Gênero indeterminado	Assine <i>et al.</i> , 1998 <u>Este projeto</u>
	Bivalvia	Gênero indeterminado	<u>Este projeto</u>
Poliquetos	Elementos escolecodontes	-	<u>Este projeto</u>
Ostracodes	Conchoprimitiidae	<i>Conchoprimitia brasiliensis</i>	<u>Este projeto</u>
	Palaeocopida	<i>Satiellina paranaensis</i>	<u>Este projeto</u>
Trilobitas	Dalmanitidae	Gênero indeterminado	<u>Este projeto</u>

No perfil abaixo (Fig. 10), integramos as ocorrências reportadas na literatura e os novos dados gerados a partir das coletas recentes. Adicionamos a este perfil a superfície laterítica observada no afloramento, não descrita em trabalhos anteriores; da mesma forma, a

estimativa da espessura total dos diamictitos basais da Formação Iapó é maior do que a apresentada até então.

Esta é a seção que apresenta a maior diversidade de paleoinvertebrados (Figs. 11 - 14) A ocorrência de ostracodes, bivalves, trilobitas dalmanitídeos e escolecodontes constituem resultado inédito do presente trabalho; a ocorrência dos trilobitas no Grupo Rio Ivaí foi apresentada em simpósio científico por Zabini *et al.* (2023). A ocorrência de arqueogastrópodes, reportados unicamente por Assine *et al.* (1998), é registrada em imagens pela primeira vez.

COHAB

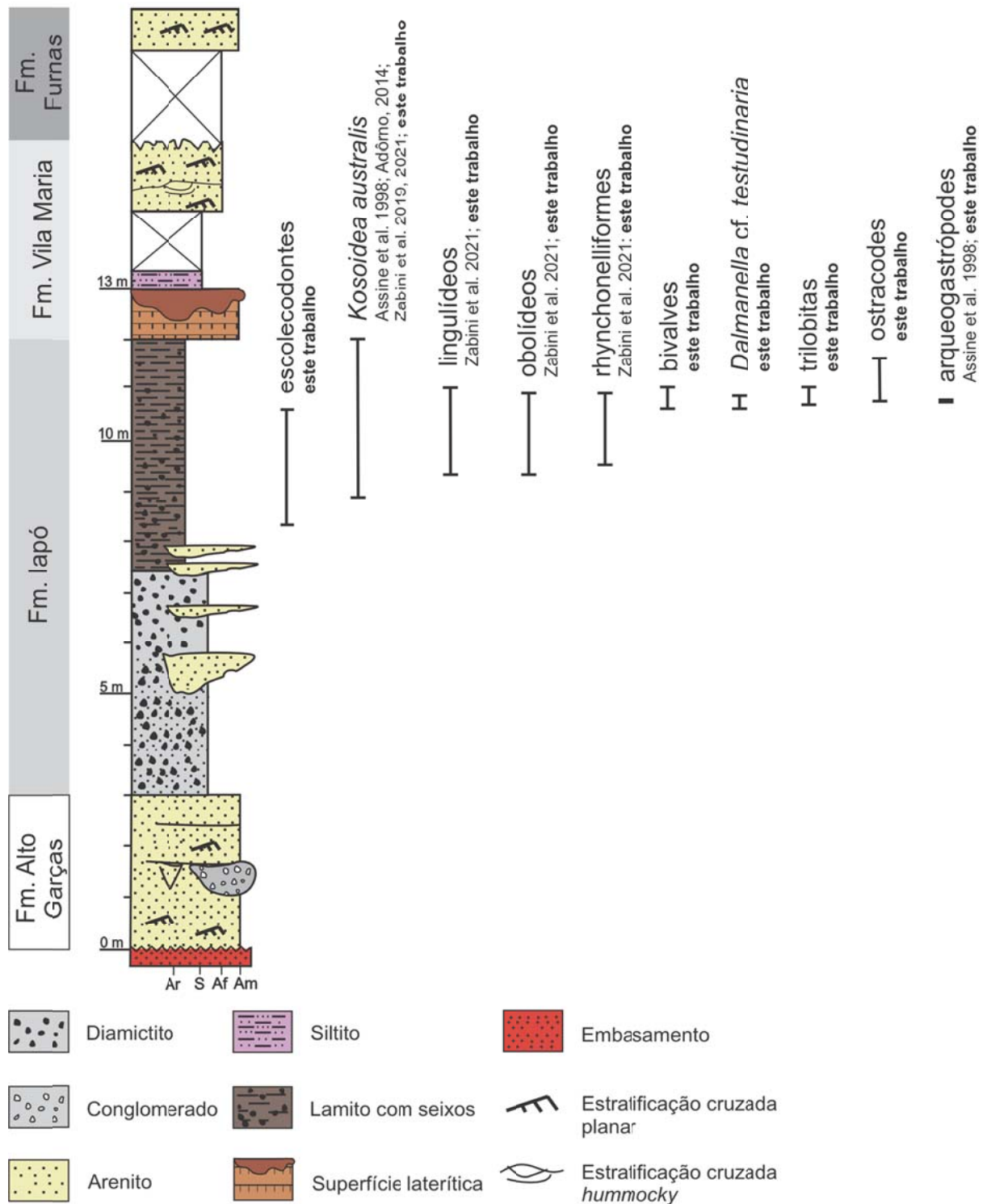


Figura 10. Ocorrência de grupos fósseis no afloramento COHAB. Os grupos destacados em rosa no perfil são aqueles de ocorrência inédita na seção.

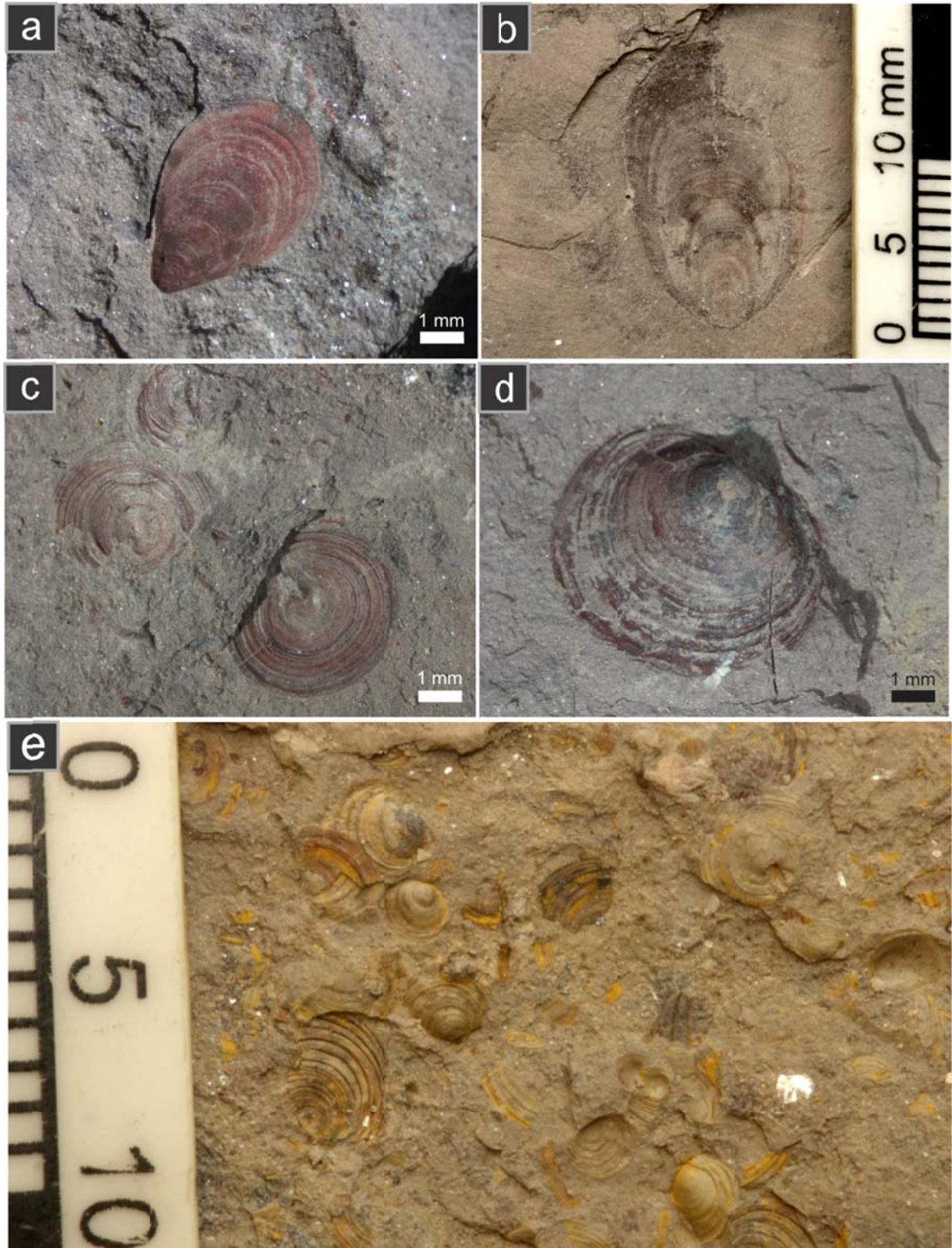


Figura 11. Braquiópodes linguliformes recuperados na seção COHAB. **a.** Obolídeo indeterminado. **b.** Lingulídeo indeterminado, valva dorsal. **c.** *Kosoidea australis*, valvas ventrais. **d.** *Kosoidea australis*, valva dorsal. **e.** Fragmentos de *K. australis*; escala em milímetros (mm).

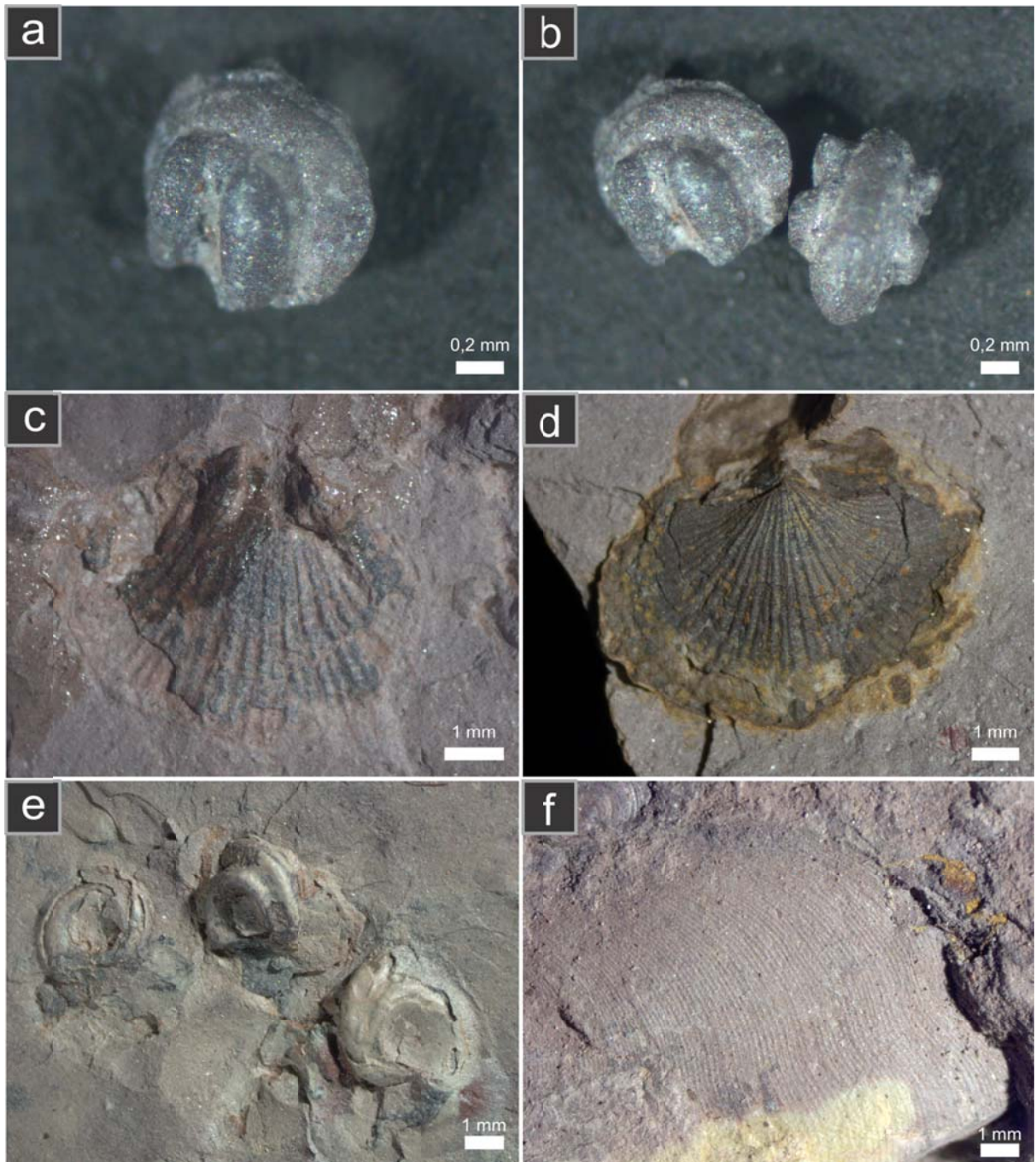


Figura 12. Grupos de paleoinvertebrados recuperados no nível mais biodiverso da seção COHAB. **a-b.** Ostracode *Satiellina paranaensis*. **c-d.** Braquiópodes rhynconeliformes indeterminados. **e.** Arqueogastrópodes. **f.** Molde externo de bivalve, evidenciando a ornamentação de uma de suas valvas.



Figura 13. Molde do tórax e parte do pigídio de um espécime de trilobita dalmanitídeo, recuperado na seção COHAB.

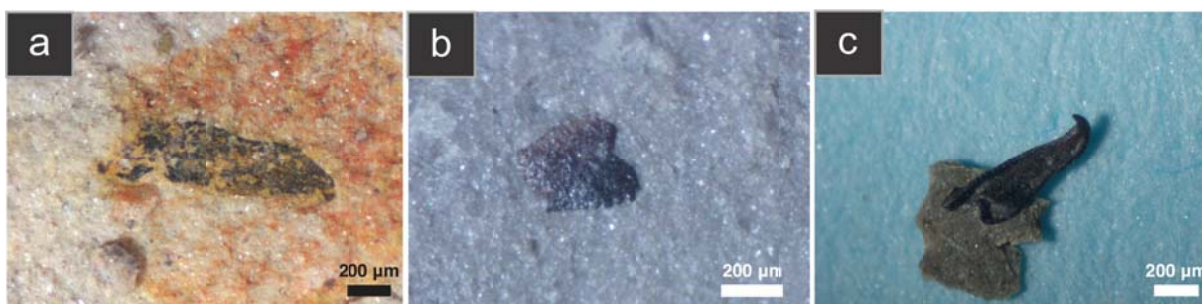


Figura 14. Escolocodontes recuperados em coletas para paleoinvertebrados em diferentes afloramentos. **a.** Escolocodonte indeterminado da seção COHAB. **b-c.** Escolocodontes indeterminados da seção Fazenda Três Barras.

Os fósseis ocorrem preservados como moldes; o nível de desarticulação e de fragmentação é alto, e nenhum dos indivíduos foi recuperado em posição de vida (e.g. valvas de braquiópodes linguliformes articuladas ou em borboleta). O discinídeo *K. australis* é o elemento mais abundante da fauna, recuperado em cerca de 3 metros da porção pelítica da Formação Iapó, que apresenta 4,5 metros de espessura total. Os demais grupos observados são comparativamente raros, caracterizando uma assembleia praticamente monoespecífica.

Seção Fazenda Três Barras

O conteúdo fossilífero de paleoinvertebrados conhecido para este afloramento foi reportado por Adôrno (2014), Zabini *et al.* (2019, 2021) e Gonçalves *et al.* (2022). Os grupos recuperados estão apresentados a seguir (Tab. 5):

Tabela 5. Fauna de paleoinvertebrados reportada para a seção Fazenda Três Barras.

Grupo Fóssil	Classe, Ordem ou Família	Espécie	Referência
Braquiópodes Linguliformes	Discinidae	<i>Kosoidea australis</i>	Zabini <i>et al.</i> , 2019, 2021 Adôrno, 2014 ("Orbiculoidea" sp.) <u>Este projeto</u>
		-	Zabini <i>et al.</i> , 2021
Moluscos	Archeogastropoda	? <i>Bucanella</i> sp.	Adôrno, 2014
		Gênero indeterminado	<u>Este projeto</u>
	Bivalvia	? <i>Nuculites</i> sp.	Adôrno, 2014
		? <i>Paleoneilo</i> sp.	Zabini <i>et al.</i> , 2021
		? <i>Cuneamya</i> sp.	Zabini <i>et al.</i> , 2021
		Gênero indeterminado	<u>Este projeto</u>
	Escolecodontes indeterminados	-	Rodrigues, 2021 <u>Este projeto</u>
Ostracodes	Bolliidae	<i>Harpabollia harparum</i>	Gonçalves <i>et al.</i> , 2022 Zabini <i>et al.</i> , 2021 ("Harpabollia" sp.)
	Palaeocopida	<i>Satiellina paranaensis</i>	Zabini <i>et al.</i> , 2021 <u>Este projeto</u>

No perfil abaixo (Fig. 15), integramos as ocorrências reportadas na literatura anteriormente e os novos dados gerados a partir das coletas recentes, que ampliam o limite

estratigráfico de ostracodes e do discinídeo *K. australis*. Este perfil segue a interpretação proposta por Rodrigues (2021) e Rodrigues *et al.* (2022).

Fazenda Três Barras

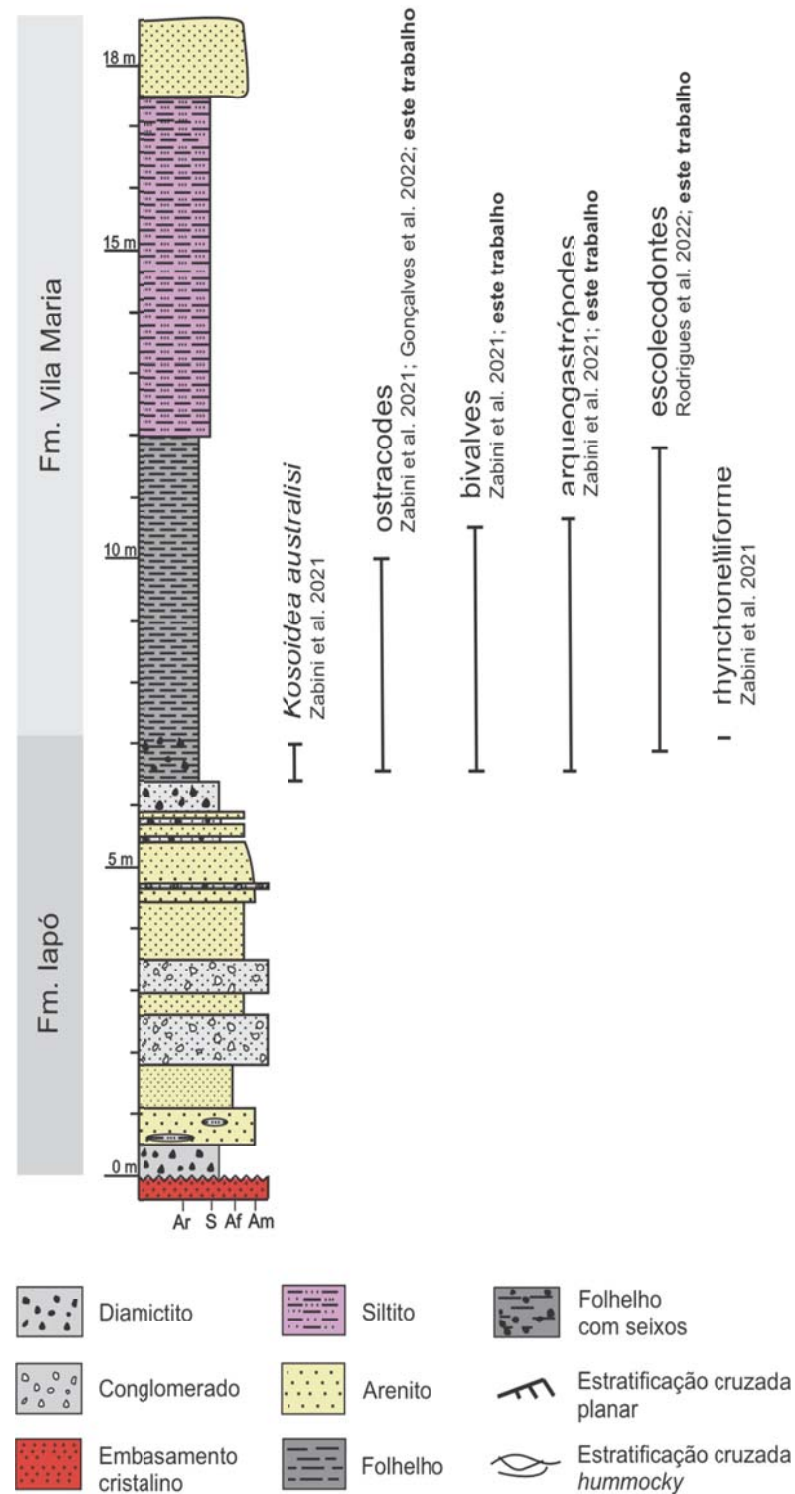


Figura 15. Ocorrência de grupos fósseis no afloramento Fazenda Três Barras.

Todos os fósseis recuperados foram preservados como moldes, e raros exemplares apresentam o perióstraco preservado (Fig. 16). O nível de desarticulação e de fragmentação é relativamente baixo, e alguns dos indivíduos foram preservados em posição de vida. Arqueogastrópodes e bivalves constituem os grupos mais observados, também presentes em quase todos os níveis dos folhelhos da Formação Vila Maria. Diferentemente do que foi observado na seção COHAB, os braquiópodes são raros no afloramento Fazenda Três Barras, e poucos espécimes de *K. australis* foram reportados.

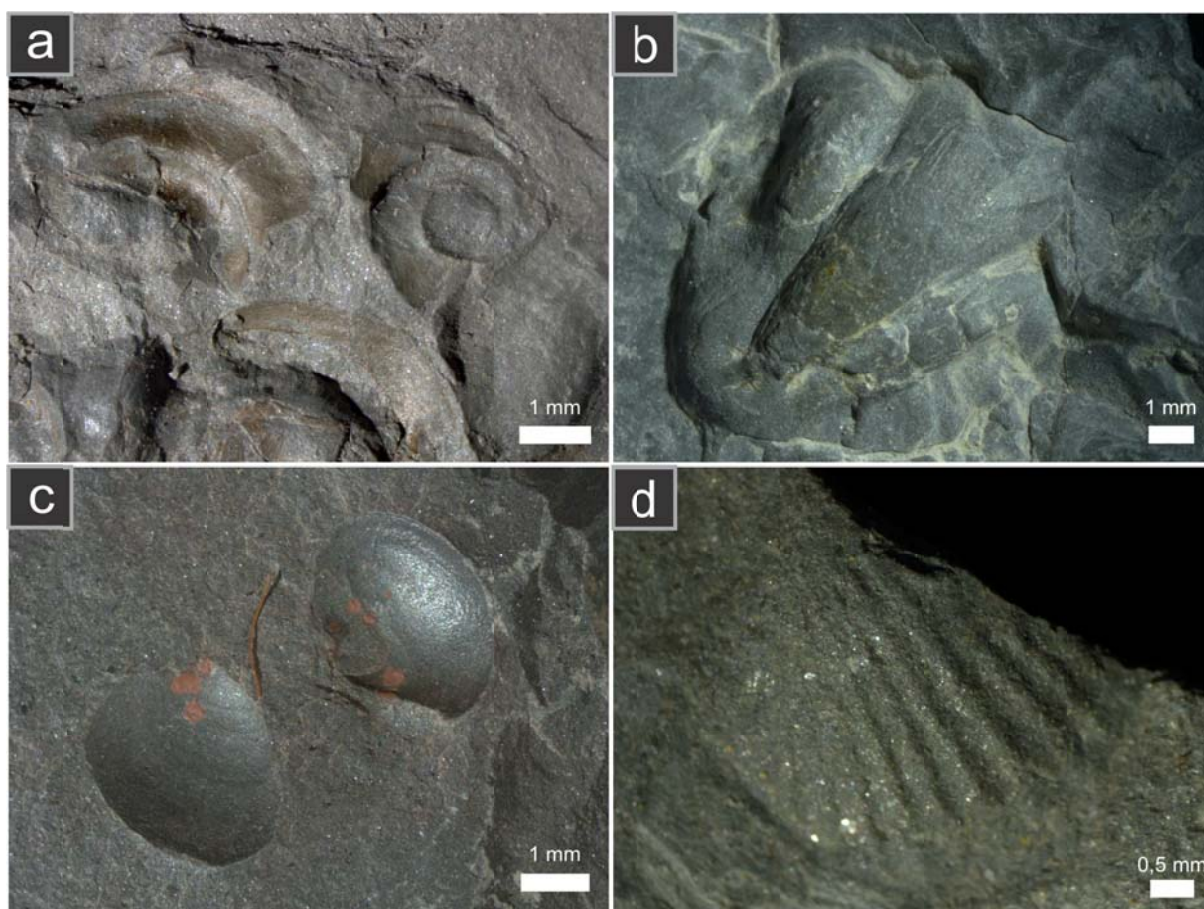


Figura 16. Fósseis recuperados no afloramento Fazenda Três Barras. **a.** Arqueogastrópodes em vista lateral. **b.** Arqueogastrópode em vista posteroventral. **c.** Valvas disarticuladas de molusco bivalve. **d.** Fragmento de braquiópode rhynchonelliforme.

Seção Córrego da Aldeia

O conteúdo fossilífero de paleoinvertebrados conhecido para este afloramento foi reportado anteriormente por Adôrno (2014), Adôrno *et al.* (2016) e Rodrigues (2021). Os grupos recuperados são apresentados a seguir (Tab. 6):

Tabela 6. Fauna de paleoinvertebrados reportada para a seção Córrego da Aldeia.

Grupo Fóssil	Classe, Ordem ou Família	Espécie	Referência
Braquiópodes Linguliformes	Discinidae	<i>Kosoidea australis</i>	Adôrno, 2014 (? " <i>Orbiculoidea</i> " sp.) Adôrno <i>et al.</i> , 2016 (? " <i>Orbiculoidea</i> " sp.) <u>Este projeto</u>
Moluscos	Archeogastropoda	? <i>Bucanella</i> sp.	Adôrno, 2014 Adôrno <i>et al.</i> , 2016
		Gênero indeterminado	<u>Este projeto</u>
	Bivalvia	? <i>Nuculites</i> sp.	Adôrno, 2014 Adôrno <i>et al.</i> , 2016
		Gênero indeterminado	<u>Este projeto</u>
Poliquetos	Escolecodontes indeterminados	-	Rodrigues, 2021 <u>Este projeto</u>
Ostracodes	Conchoprimitiidae	<i>Conchoprimitia brasiliensis</i>	Adôrno, 2014 ("C. <i>circularis</i> ") Adôrno <i>et al.</i> , 2016 <u>Este projeto</u>
	Palaeocopida	<i>Satiellina paranaensis</i>	Adôrno, 2014 ("S. <i>jamairiensis</i> ") Adôrno <i>et al.</i> , 2016 <u>Este projeto</u>

No perfil abaixo (Fig. 17), apresenta-se unicamente os dados referentes às coletas realizadas no decorrer deste projeto, entre os anos de 2022 e 2023. Adotou-se a coluna estratigráfica proposta por Adôrno (2014) e Adôrno *et al.* (2016); no entanto, os dados paleontológicos fornecidos por estes pesquisadores não foram incorporados devido à adoção

de uma metodologia de coleta diferente daquela empregada no presente projeto, o que refletiu em discrepâncias significativas nos limites estratigráficos das ocorrências dos grupos fósseis.

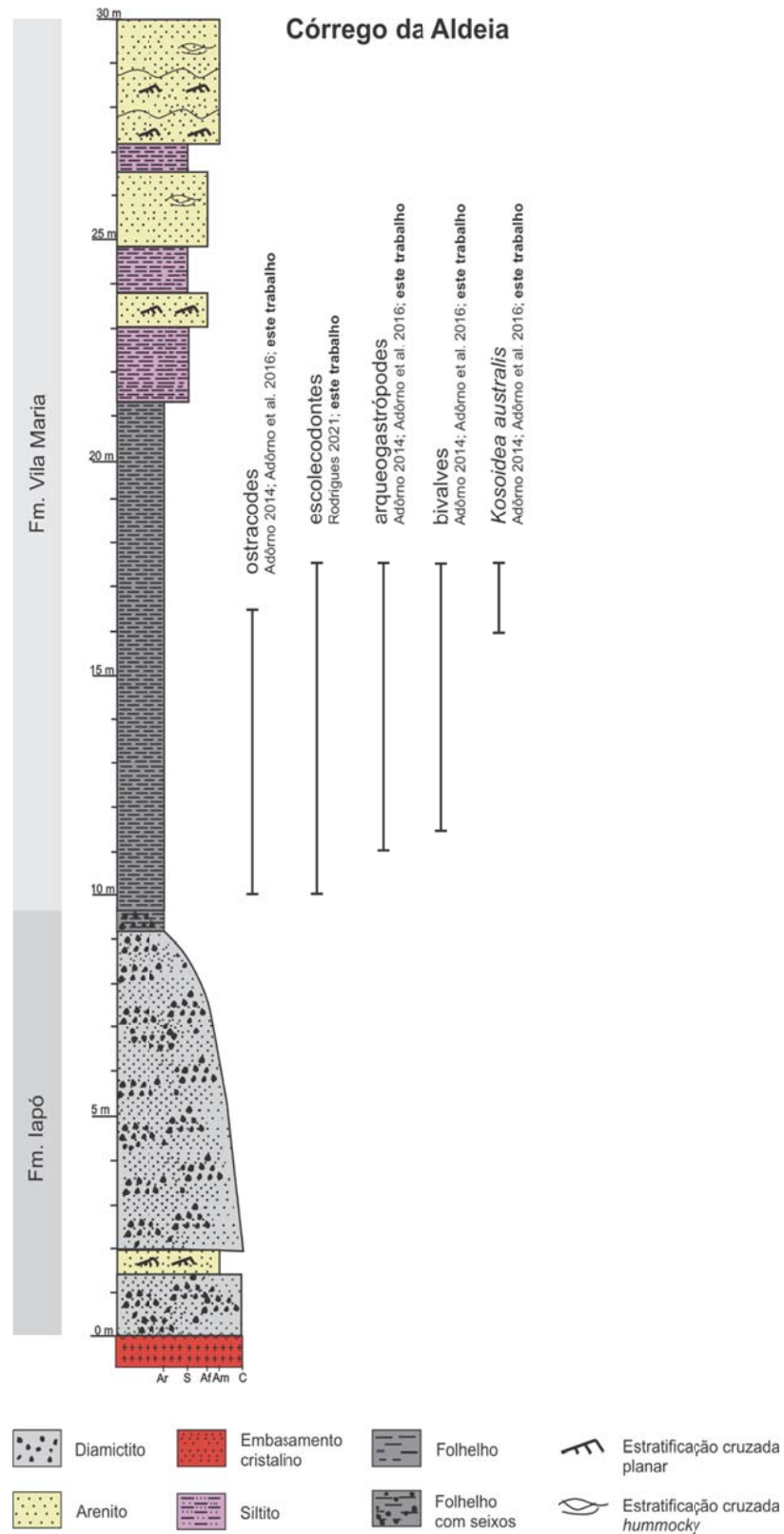


Figura 17. Ocorrência de grupos fósseis no afloramento Córrego da Aldeia.

Os organismos recuperados neste afloramento são taxo e tafonomicamente similares aos reportados para a seção Fazenda Três Barras (Fig. 16). Os fósseis ocorrem preservados como moldes, e o nível de desarticulação e de fragmentação é baixo, sendo alguns dos indivíduos encontrados em posição de vida. Assim como observado na seção Fazenda Três Barras, arqueogastropodes e bivalves constituem os grupos mais recuperados.. Os braquiópodes são raros na seção Córrego da Aldeia, e poucos espécimes de *K. australis* foram reportados; não foram recuperados braquiópodes rhynconeliformes.

Capítulo IV. Análise da Distribuição dos Grupos Fósseis no Perfil Estratigráfico

Os arqueogastropodes, bivalves, ostracodes, escolecodontes e discinídeos são grupos encontrados em todos os afloramentos visitados na borda norte da Bacia do Paraná. Entretanto, assim como as assinaturas tafonômicas observadas nos bioclastos são distintas entre as localidades, a composição da fauna fóssil em cada seção é diferente. A seguir, apresenta-se a contribuição absoluta e relativa de cada grupo fóssil para as tanatocenoses reportadas. Espera-se que os índices de diversidade analisados possam contribuir para a compreensão dos paleoambientes. Parte destes resultados foram apresentados em eventos científicos por Arouca *et al.* (2023), que discutiram a relação entre a distribuição de paleoinvertebrados e palinomorfos no afloramento Fazenda Três Barras.

1. COHAB

Neste afloramento, o braquiópodes linguliforme *K. australis* é o elemento mais abundante da fauna. Sua elevada abundância dificulta a apresentação dos dados referentes a esta seção, devendo ser desconsiderado para que a contribuição dos demais grupos para a assembleia fossilífera possa ser avaliada (Figs. 18 e 19). A ocorrência de outros grupos de paleoinvertebrados, bem como outros grupos de braquiópodes, embora rara, é mais observada entre 9 m - 11 m no perfil estratigráfico (Fig. 10), indicando um nível possivelmente mais biodiverso. Adicionalmente, observa-se maior diversidade de braquiópodes (linguliformes e rhynconeliformes) nesta localidade, em comparação com os demais afloramentos, tornando esta seção uma das mais interessantes considerando os objetivos deste projeto.

Na seção COHAB, a espessura da sequência pelítica com seixos pingados da Fm. Iapó é maior do que a observada nas outras seções (Fig. 8); isto pode indicar que um registro maior do ambiente com influência glacial, delimitado pelos níveis pelíticos com seixos caídos, seja mais proveitoso para a busca por braquiópodes do Hirnantiano na Bacia do Paraná do Brasil. As Figuras 18 e 19, abaixo, detalham o número de espécimes recuperados em coletas tafonômicas e identificados para este afloramento; vale ressaltar que o número de *K. australis* está **subestimado**, uma vez que estes indivíduos ocorrem muitas vezes como fragmentos, que não foram contabilizados para os fins deste capítulo.

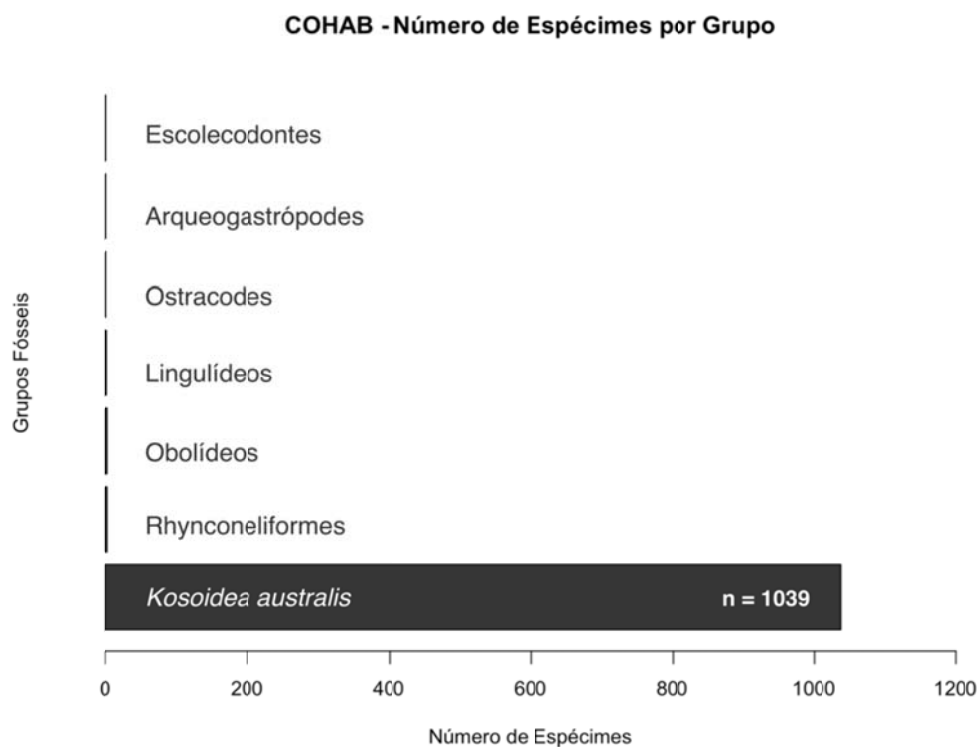


Figura 18. Composição da fauna de paleoinvertebrados da seção COHAB recuperados em coleta tafonômica, com o número absoluto de espécimes (n) de *K. australis*. Total N=1050.

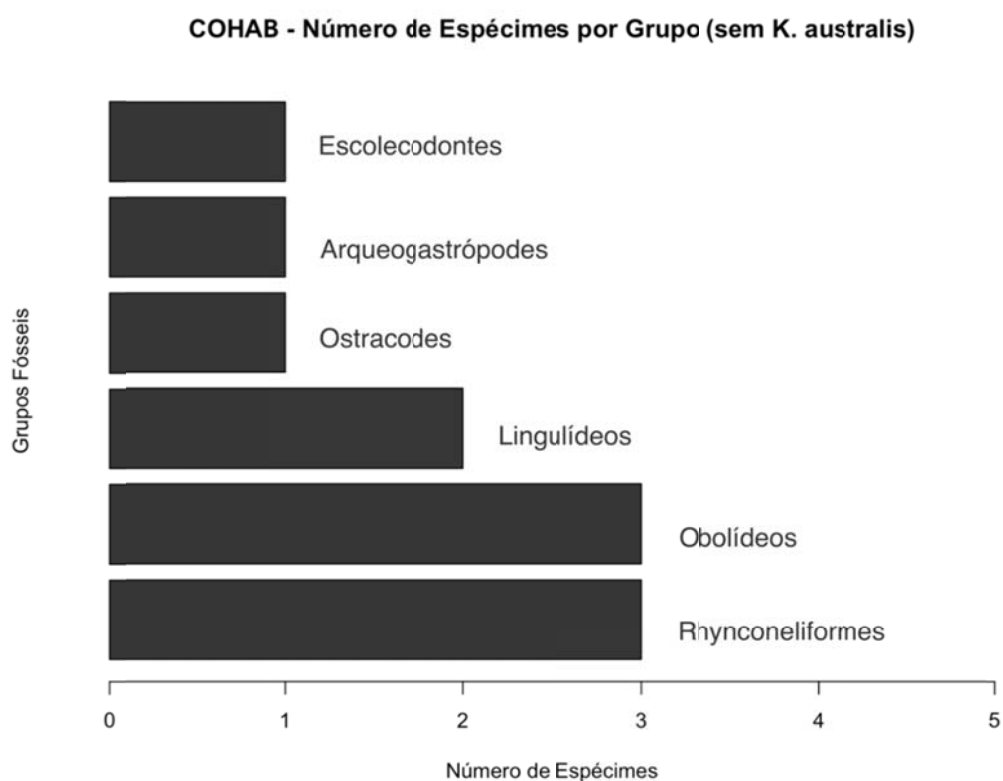


Figura 19. Composição da fauna de paleoinvertebrados da seção COHAB recuperados em coleta tafonômica, excluindo amostras de *K. australis*, com o número absoluto de espécimes (n) por grupo. Total N=11.

A distribuição dos espécimes no perfil já foi explorada por Zabini *et al.* (2021), que afirmaram que a proporção de valvas fragmentadas e inteiras de *K. australis* varia de acordo com o nível estratigráfico. Na seção, observa-se que a proporção entre valvas completas e fragmentadas está fortemente correlacionada. Ademais, assim como observado entre os discinídeos, nota-se uma forte seleção de tamanho atuando sobre os bioclastos; neste sentido, carapaças menores ou fragmentadas predominam sobre espécimes completos. Os ostracodes são exceção a esta tendência; devido ao seu diminuto tamanho, são encontrados frequentemente inteiros e com as valvas articuladas.

Zabini *et al.* (2021) inicialmente consideraram que esta seção preservaria um registro alóctone, sob a influência de correntes formadas a partir do derretimento das geleiras e com forte seleção de tamanho. O cenário seria de um ambiente com influência glacial, em altas latitudes e com baixa biodiversidade. Entretanto, as novas ocorrências de elementos fósseis aqui reportadas apontam para uma paleofauna mais diversificada do que a pressuposta por estes autores e para um registro paraúctone, como indicado pela tafocenose formada também por indivíduos pouco fragmentados ou inteiros (como os rhynconeliformes encontrados com valvas articuladas), sugerindo que os organismos não foram transportados por longas distâncias, mas permanecem no seu habitat original.

A continuidade dos estudos no afloramento COHAB tem revelado mais informações sobre a fauna fóssil do Grupo Rio Ivaí e, portanto, do extremo sul de Gondwana durante o Ordoviciano Superior. Neste sentido, tornam-se necessários mais estudos de cunho taxonômico para investigar quais gêneros e espécies compõem a assembleia fossilífera, bem como a real distribuição dos grupos no perfil estratigráfico, isto é, distinguir quais gêneros e espécies estão presentes e em quais níveis. Em posse de tais informações, é possível delinear um panorama mais completo e enriquecido da paleofauna e do paleoambiente.

2. Fazenda Três Barras

A fauna reportada para este afloramento, embora menos diversificada, não é dominada por uma única espécie; poucos indivíduos do discinídeo *K. australis* foram recuperados e, inversamente ao que se observou na seção COHAB, muitos ostracodes, arqueogastrópodes e bivalves são encontrados (Fig. 20). Os moluscos bivalves são o grupo mais abundante, correspondendo a cerca de 44% dos espécimes reconhecidos; são seguidos pelos arqueogastrópodes, que correspondem a 37% do total. Os ostracodes são representados

por ao menos três espécies diferentes, sendo elas *Conchoprimitia brasiliensis*, *Satiellina paranaensis* e *Harpabollia harparum* (Adôrno *et al.*, 2016; Gonçalves *et al.*, 2022), enquanto os braquiópodes são representados por poucos espécimes do discinídeo *K. australis* e um indivíduo rhynconeliforme (Fig. 16d).

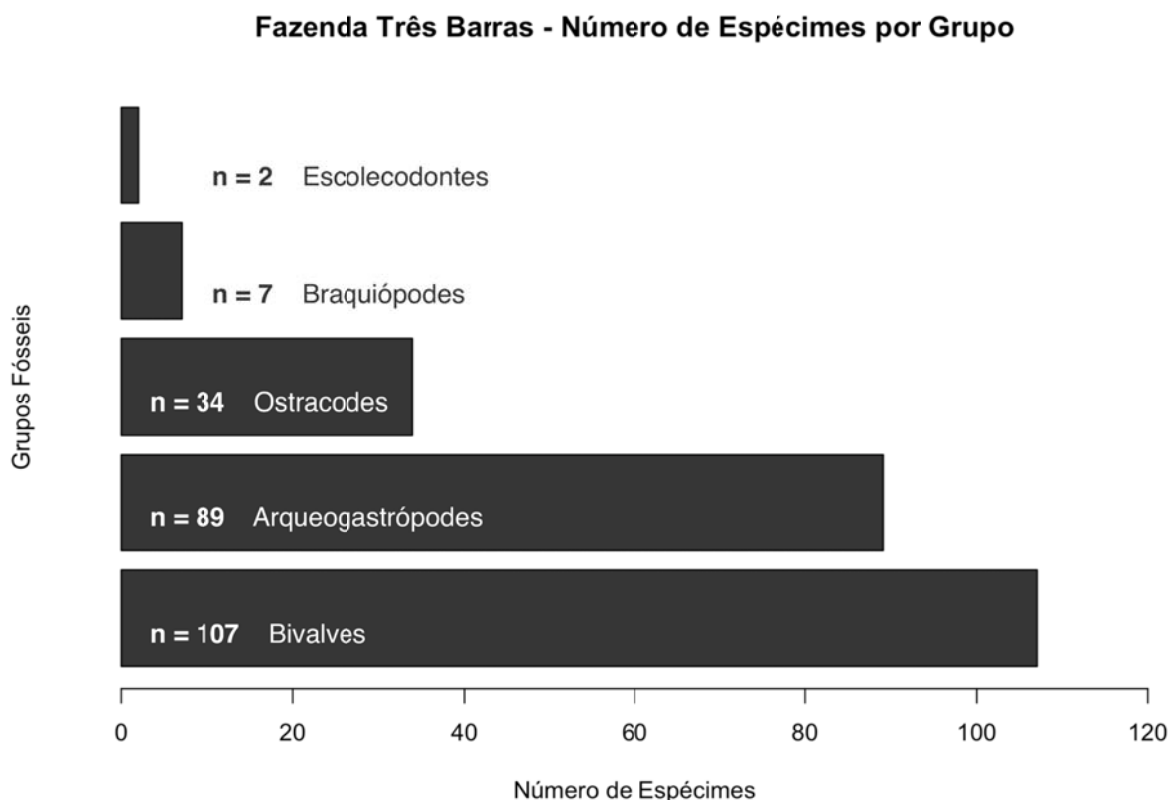


Figura 20. Composição da fauna de paleoinvertebrados da seção Fazenda Três Barras. No canto esquerdo, o número absoluto de espécimes (n) de cada grupo recuperado. Discinídeos e rhynconeliformes foram considerados no número total de espécimes de braquiópodes. Total N=239.

A distribuição dos organismos no perfil estratigráfico parece coincidir com a mudança de um paleoambiente marinho com progressivamente menor influência glacial, registrada pela transição de lamitos com seixos pingados, do topo da Formação Iapó, para os folhelhos marinhos acinzentados sem seixos da base da Formação Vila Maria. Os grupos mais abundantes (Bivalvia e Archeogastropoda) mostram o mesmo padrão de distribuição, com mais espécimes ocorrendo nos níveis dos intervalos 6,0 m - 7,5 m e, depois, entre 9,0 m - 10,0 m (Figs. 21-23). O intervalo entre 7,5 m - 9,0 m registra uma queda na ocorrência desses grupos de paleoinvertebrados, seguida por uma recuperação significativa da abundância.

Arouca *et al.* (2023) argumentam que estes resultados podem sugerir que os moluscos arqueogastrópodes e bivalves foram afetados pela mudança do ambiente; ao longo do tempo, entretanto, adaptaram-se e voltaram a prosperar nas novas condições. Desta forma, ficaria patente o caráter de sobrevivência de organismos generalistas durante a transição do glacial para o pós-glacial.

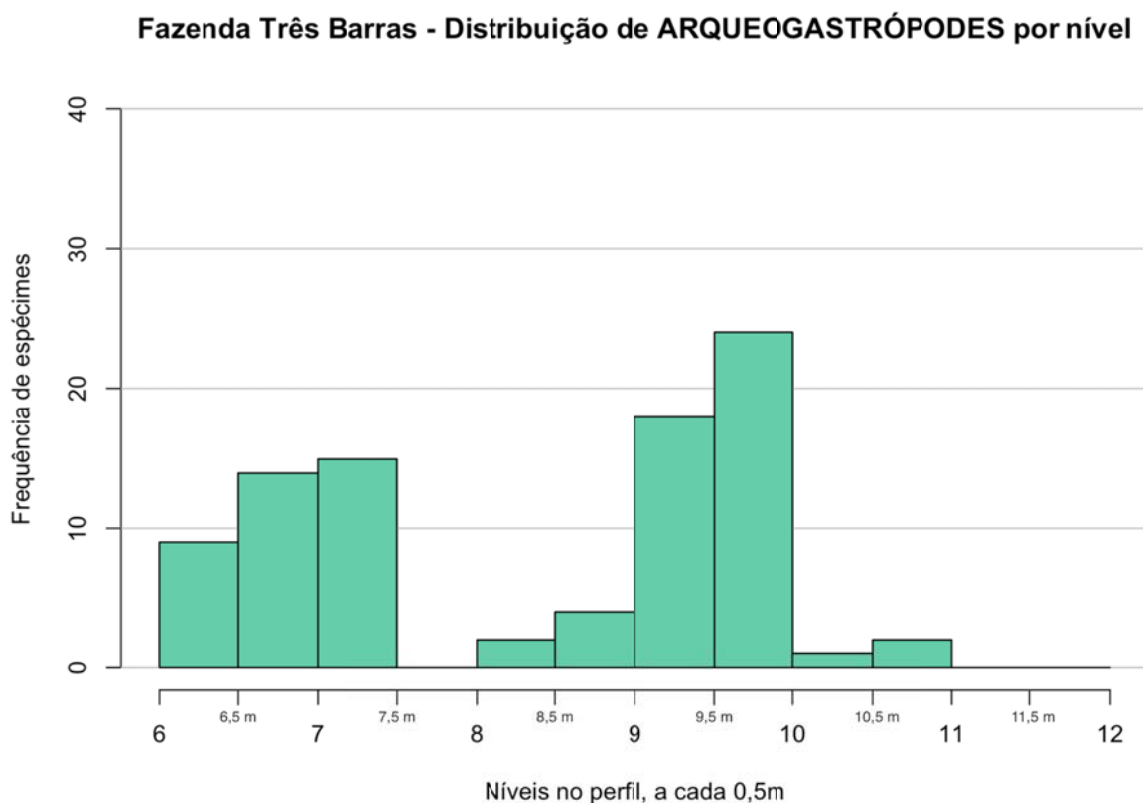


Figura 21. Distribuição de arqueogastrópodes por nível estratigráfico da seção Fazenda Três Barras. Cada barra do gráfico representa uma quadrícula de 50 cm no perfil. Os níveis representados são 6 metros a 12 metros.

Para Zabini *et al.* (2021), este afloramento apresenta um registro autóctone ou para-autóctone, com muitos dos exemplares fósseis recuperados articulados ou em posição de vida, sem evidência de influência glacial sobre os sedimentos dos folhelhos a partir de 7,0 m, da Formação Vila Maria. Assim como apontado para o material da seção COHAB, estes resultados seriam enriquecidos a partir da identificação dos exemplares de arqueogastrópodes e bivalves a nível genérico e/ou específico, associada à ocorrência estratigráfica individualizada das diferentes espécies de ostracodes. Neste cenário, seria possível compreender quais grupos, de fato, subsistiram e quais desapareceram do registro fóssil no cenário pós-glacial.

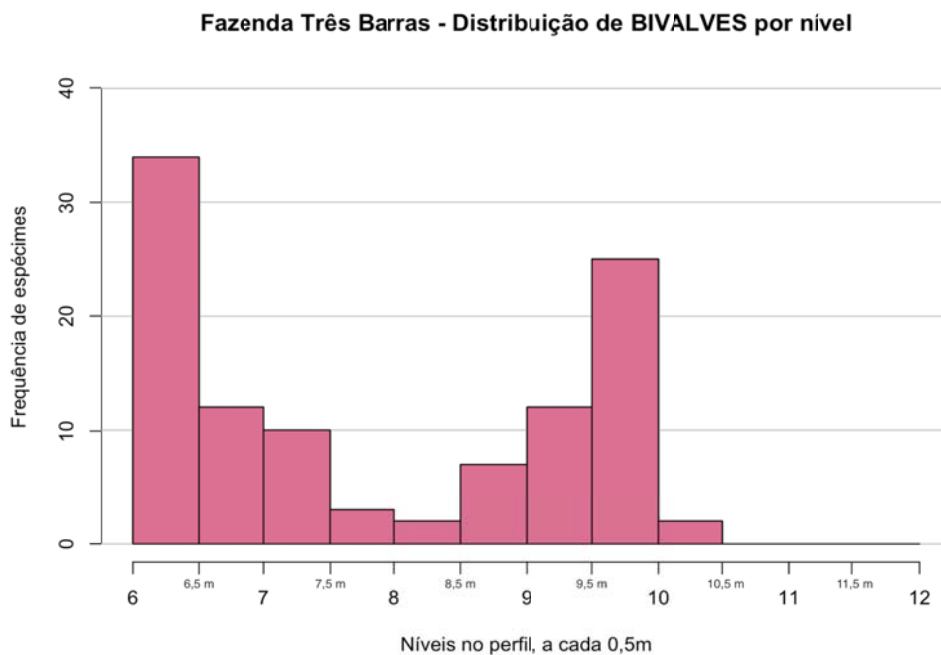


Figura 22. Distribuição de bivalves por nível estratigráfico da seção Fazenda Três Barras. Cada barra do gráfico representa uma quadrícula de 50 cm no perfil. Os níveis representados são 6 metros a 12 metros.

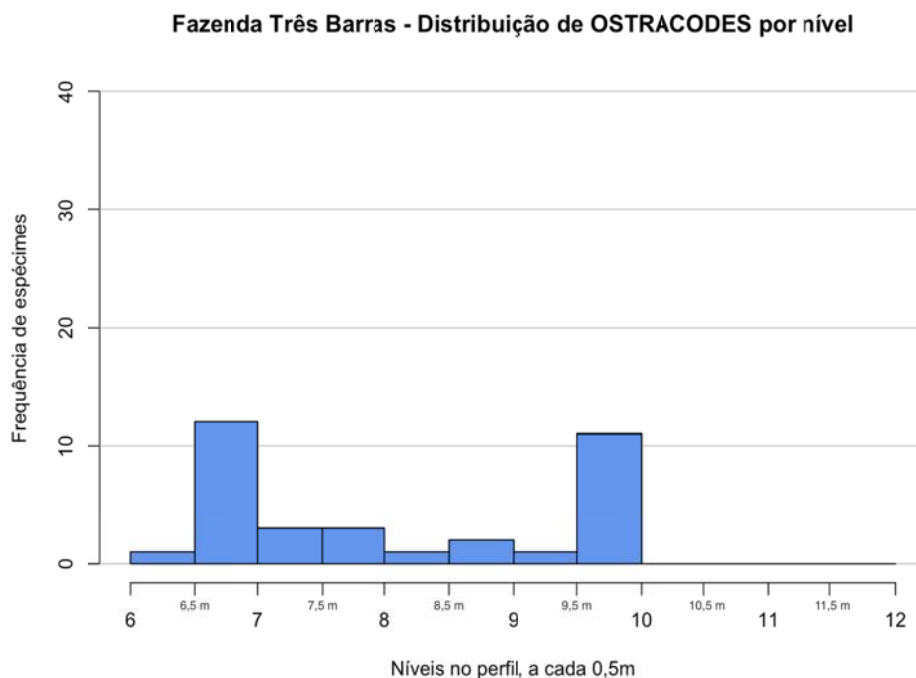


Figura 23. Distribuição de ostracodes por nível estratigráfico da seção Fazenda Três Barras. Cada barra do gráfico representa uma quadrícula de 50 cm no perfil. Os níveis representados são 6 metros a 12 metros.

3. Córrego da Aldeia

A fauna encontrada neste afloramento é bastante similar àquela reportada para a Fazenda Três Barras. Como observado na seção anterior, a abundância dos grupos que compõem a assembleia fossilífera é mais equilibrada em relação ao afloramento COHAB (Fig. 24), cuja assembleia tem caráter monoespecífico. Os moluscos bivalves são o grupo mais abundante, correspondendo a cerca de 38% dos espécimes reconhecidos; são seguidos pelos arqueogastrópodes, que correspondem a 36% do total. Os ostracodes são representados pelas espécies *Conchoprimitia brasiliensis* e *Satiellina paranaensis* (Adôrno *et al.*, 2016) e correspondem à 20% da assembleia.

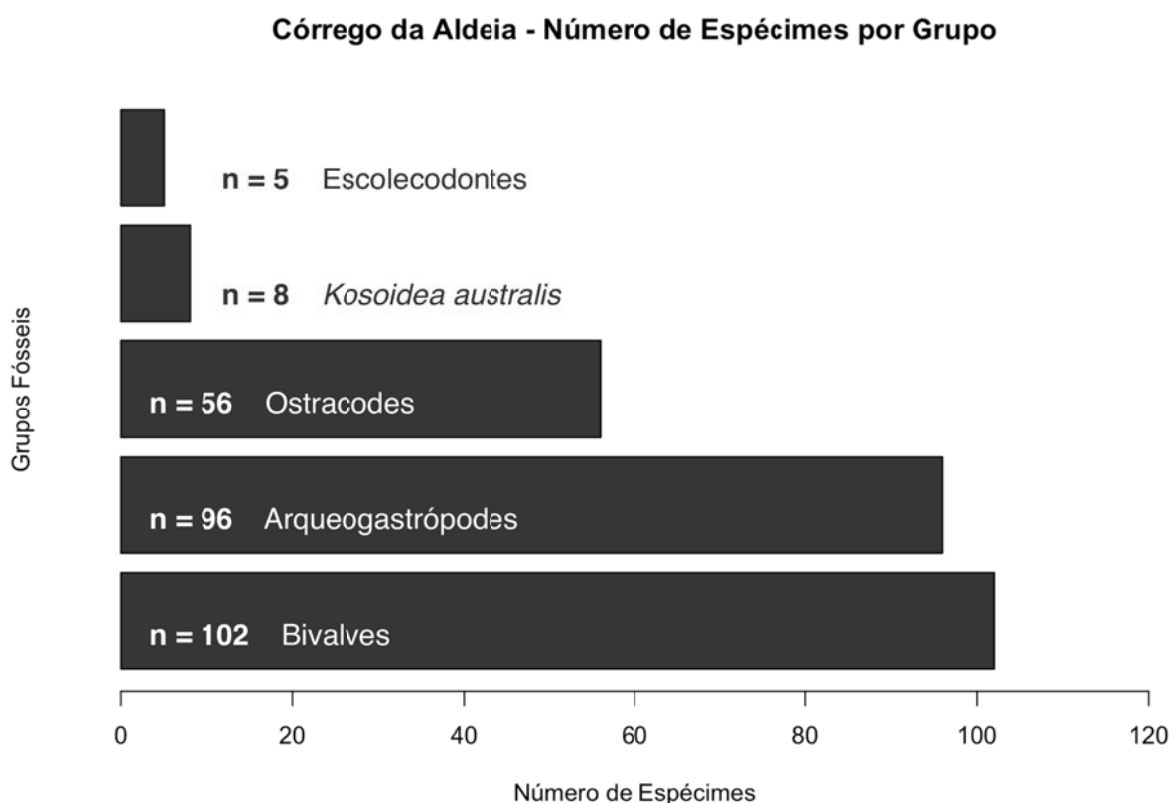


Figura 24. Composição da fauna de paleoinvertebrados da seção Córrego da Aldeia. No canto esquerdo, o número absoluto de espécimes (n) de cada grupo recuperado. Total N=267.

Ao invés da distribuição claramente bimodal atestada na ocorrência dos arqueogastrópodes e bivalves da Três Barras (Figs. 21 e 22), vê-se um padrão ligeiramente diferente no Córrego da Aldeia, com uma tendência de aumento do número de espécimes de arqueogastrópodes, bivalves e ostracodes em níveis estratigráficos mais superiores, atingindo seu ápice por volta de 16 metros no perfil vertical da seção (Figs. 25-27).

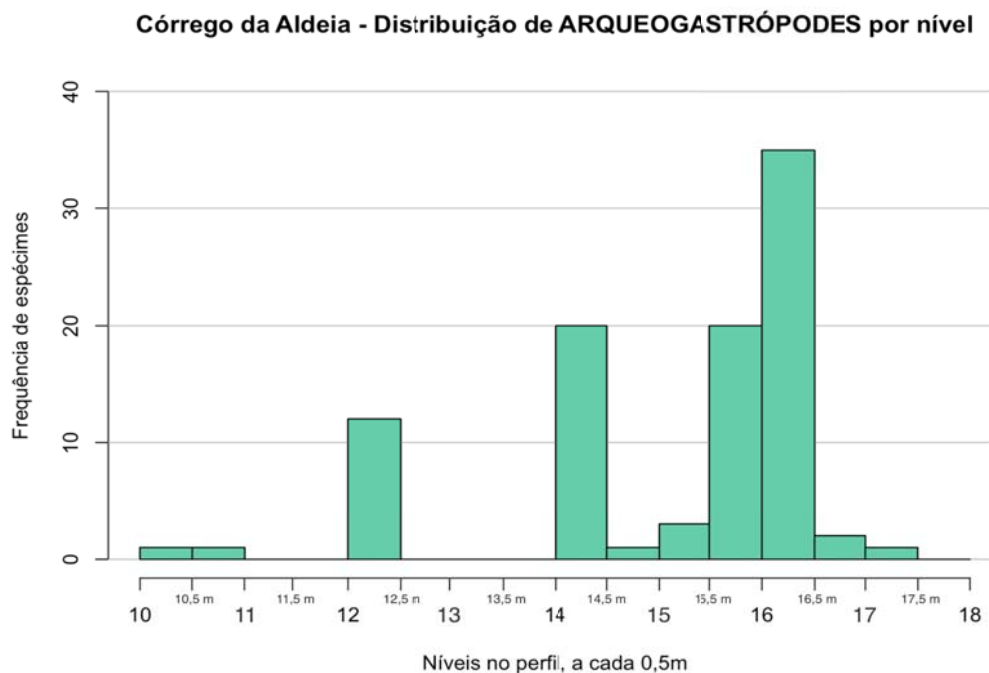


Figura 25. Distribuição de arqueogastropodes por nível estratigráfico da seção Córrego da Aldeia. Cada barra do gráfico representa uma quadrícula de 50 cm no perfil. Os níveis representados são 10 metros a 18 metros.

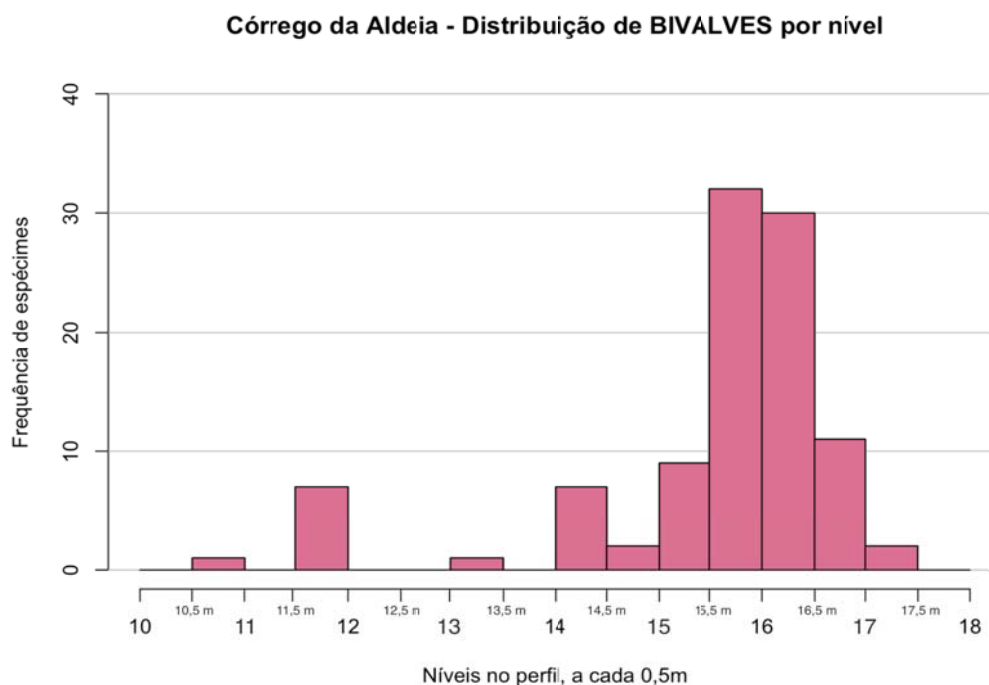


Figura 26. Distribuição de bivalves por nível estratigráfico da seção Córrego da Aldeia. Cada barra do gráfico representa uma quadrícula de 50 cm no perfil. Os níveis representados são 10 metros a 18 metros.

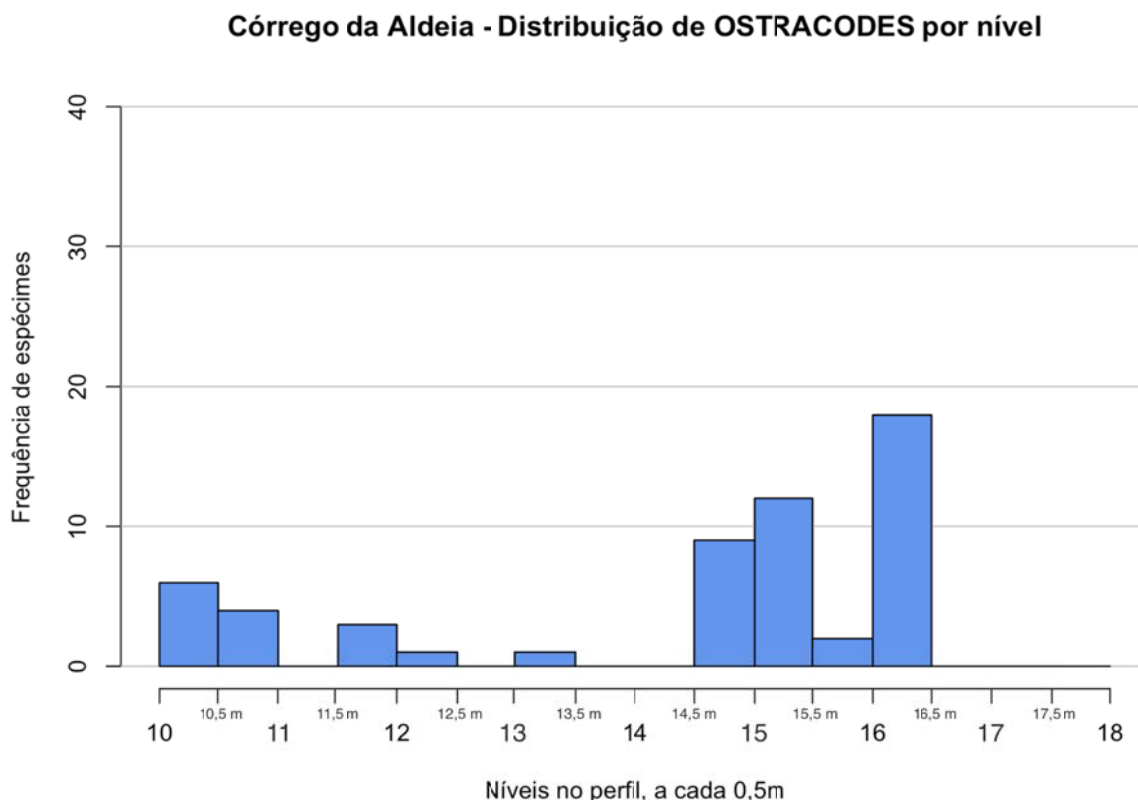


Figura 27. Distribuição de ostracodes por nível estratigráfico da seção Córrego da Aldeia. Cada barra do gráfico representa uma quadrícula de 50 cm no perfil. Os níveis representados são 10 metros a 18 metros.

Enquanto na Fazenda Três Barras a abundância dos indivíduos parecia coincidir com a mudança de um ambiente glacial para um cenário pós-glacial, indicado pela transição dos folhelhos com seixos pingados da Formação Iapó para os folhelhos sem seixos da Vila Maria, não se pode atribuir a mesma justificativa para a distribuição dos grupos fósseis no Córrego da Aldeia.

A partir da análise de carbono orgânico total (COT), Rodrigues (2021) estimou a superfície de inundação máxima (SIM) da seção Córrego da Aldeia na posição estratigráfica 18,3 m. A tendência transgressiva dos folhelhos pós-glaciais da Formação Vila Maria foi associada à diminuição da diversidade de palinomorfos, embora não de sua abundância, e à dominância de elementos marinhos em detrimento dos terrestres. O aumento no nível eustático pode ter outras implicações para invertebrados bentônicos, como moluscos bivalves e arqueogastrópodes. Assim, na seção Córrego da Aldeia, o padrão de distribuição dos paleoinvertebrados está mais provavelmente relacionado à variação do nível do mar do que o padrão observado na seção Três Barras.

4. Avaliação da Semelhança entre as Distribuições Observadas

Para verificar se os padrões da distribuição dos grupos fósseis mais abundantes (i.e. arqueogastrópodes, bivalves e ostracodes) entre as seções Fazenda Três Barras (Figs. 21-23) e Córrego da Aldeia (Figs. 25-27) são estatisticamente diferentes, realizou-se o teste U de Mann-Whitney. O teste U é indicado para comparar as tendências centrais de duas amostras independentes, avaliando a igualdade das medianas. A maior separação dos dados em conjunto indica que as amostras são distintas, rejeitando-se a hipótese de igualdade das medianas (hipótese nula) e assumindo-se que as distribuições observadas são diferentes (hipótese alternativa). Vale ressaltar que optou-se por considerar apenas os dados de ocorrência de arqueogastrópodes, bivalves e ostracodes devido ao maior número de indivíduos recuperados nos afloramentos; escolecodontes e braquiópodes (majoritariamente representados por *K. australis*) não apresentaram número amostral grande o suficiente para a realização de um teste estatisticamente relevante.

A distribuição dos grupos foi indicada como diferente entre os afloramentos Córrego da Aldeia e Fazenda Três Barras ($p < 0,05$). Mesmo com a padronização dos níveis estratigráficos, observou-se um padrão distinto entre as ocorrências nos dois afloramentos, com um deslocamento da curva de ocorrência e não-sobreposição dos picos de densidade observados em cada seção (Fig. 28). A comparação da distribuição de cada grupo fóssil nos dois afloramentos visitados também evidencia os padrões diferentes na ocorrência de cada grupo ao longo do perfil vertical das seções (Fig. 29).

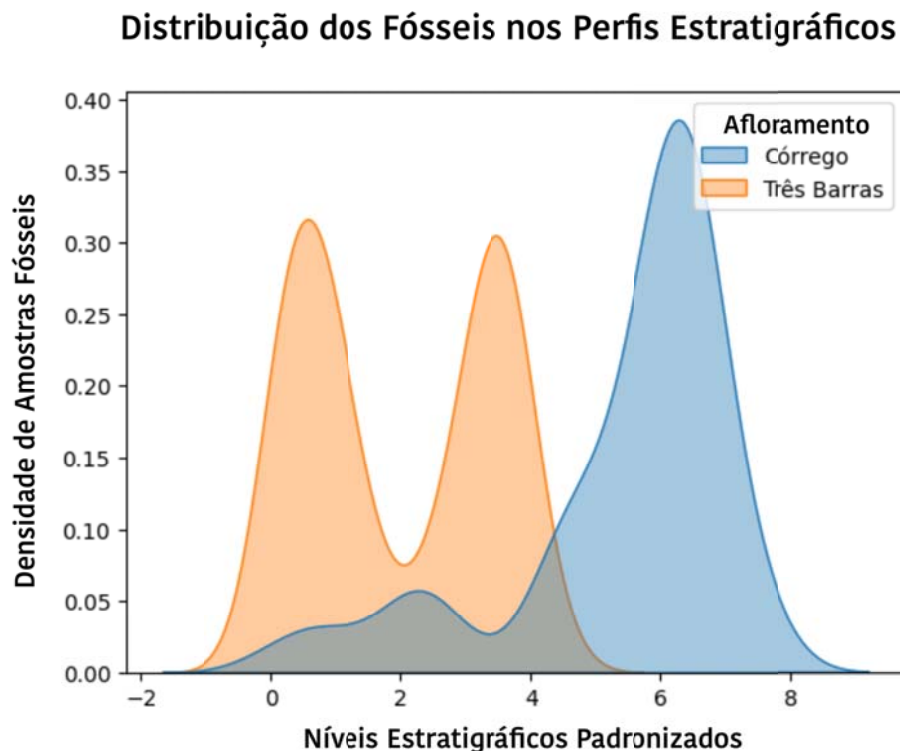


Figura 28. Distribuição agrupada de arqueogastropodes, bivalves e ostracodes nos afloramentos Córrego da Aldeia e Fazenda Três Barras. A densidade de amostras indica quanto da assembleia fossilífera foi recuperada em determinado nível estratigráfico.

Fica patente que a curva de abundância dos indivíduos nos dois afloramentos não seja semelhante. Na Fazenda Três Barras, observa-se dois picos de abundâncias, um deles mais próximo aos níveis mais inferiores, correspondentes à transição dos folhelhos com seixos da Formação Iapó para os folhelhos da Formação Vila Maria, que refletem uma mudança ambiental. O segundo pico ocorre em níveis mais superiores, o que foi interpretado como uma estabilização das populações no ambiente pós-glacial (Arouca *et al.*, 2023). Já na seção Córrego da Aldeia, observa-se que mais indivíduos são recuperados em níveis progressivamente superiores do perfil vertical (Fig. 29).

As assembleias fossilíferas nas seções Córrego da Aldeia e Fazenda Três Barras, embora semelhantes em diversidade taxonômica, apresentam padrões de distribuição diferentes. Poucos quilômetros separam as localidades (Fig. 4), cujo registro geológico reflete um mesmo paleoambiente e a transição do cenário glacial (mais frio) para o pós glacial (mais quente), com a retração da geleira. A distribuição dos espécimes, atestadamente distinta, lança dúvidas sobre a primeira interpretação paleoambiental levantada por Arouca *et al.* (2023), uma vez que ela não seria válida, *a priori*, para a seção Córrego da Aldeia.

Distribuição dos Grupos Fósseis nos Perfis Estratigráficos

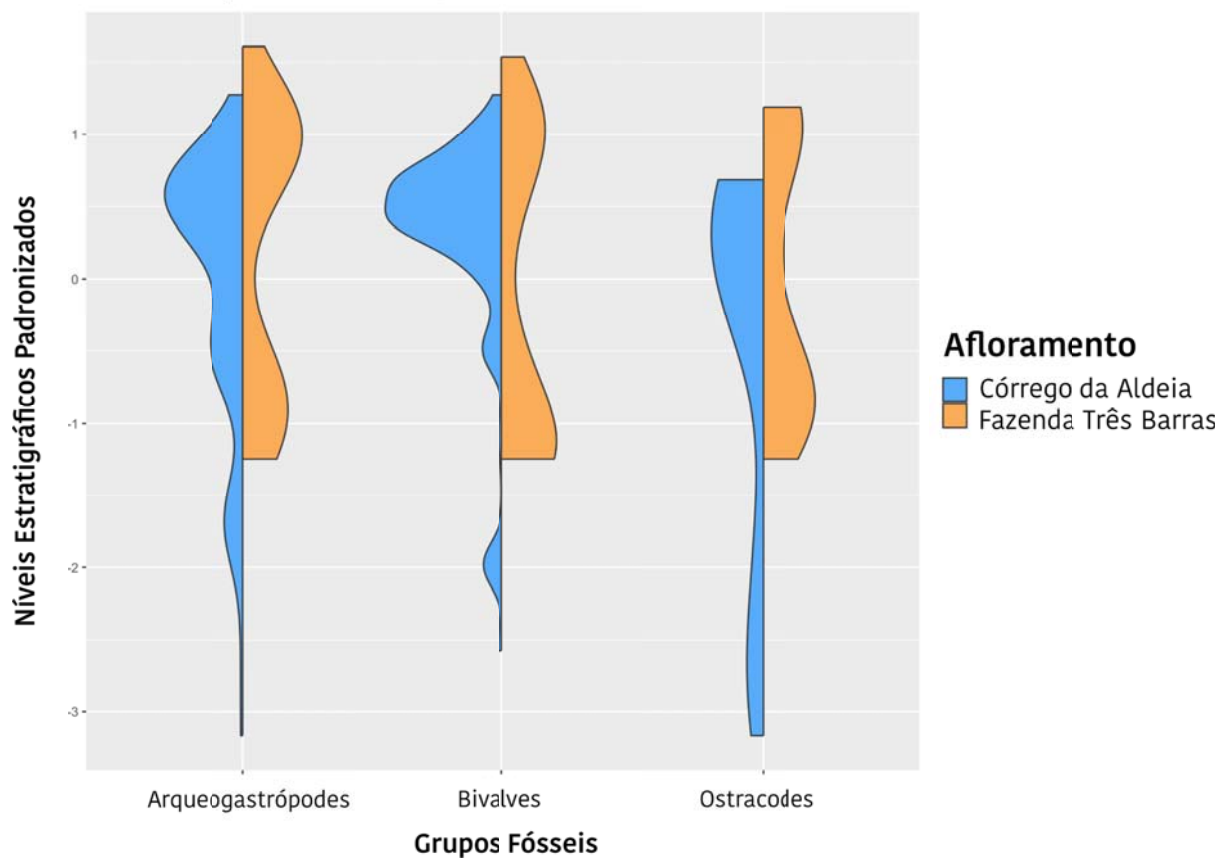


Figura 29. Distribuição dos arqueogastrópodes, bivalves e ostracodes recuperados nas seções Córrego da Aldeia e Fazenda Três Barras. Os picos das curvas indicam mais indivíduos recuperados em determinado nível estratigráfico.

Capítulo V. Taxonomia Paleontológica e a Fauna Hirnantiana

Neste capítulo, apresenta-se a taxonomia do braquiópode *Dalmanella* cf. *testudinaria* (Dalman, 1828), elemento importante da fauna de *Hirnantia* em diferentes localidades do mundo (Rong e Harper, 1988; Rong *et al.*, 2020). Discute-se também o significado da fauna encontrada nos níveis pelíticos das formações Iapó e Vila Maria, de idade hirnantiana, e sua relação com as faunas hirnantianas reportadas em bacias sedimentares coevas. Parte destes resultados foram apresentados em evento científico por Furtado-Carvalho *et al.* (2023), que reportaram a primeira ocorrência do gênero *Dalmanella* no Grupo Rio Ivaí da Bacia do Paraná.

Taxonomia Paleontológica

Uma vez que a identificação de braquiópodes rhynchoneliiformes faz parte dos objetivos desta pesquisa, esta seção pretende apresentar as informações sobre a taxonomia dos braquiópodes calcários recuperados e ilustrados.

Na seção COHAB (Fig. 10), recuperou-se três indivíduos rhynchoneliiformes cujas características morfológicas permitiram o estudo taxonômico. Assim como os demais elementos da fauna, a maior parte dos espécimes preservaram-se como pequenos fragmentos e, por isso, não puderam fazer parte das análises taxonômicas. Atribuímos estes indivíduos à espécie *Dalmanella testudinaria* (Dalman, 1828). A taxonomia supragenérica adotada segue a de Jin e Bergström (2010).

Filo BRACHIOPODA Duméril, 1805

Subfilo RHYNCHONELLIFORMEA Williams, 1996

Classe RHYNCHONELLATA Williams, 1996

Ordem ORTHIDA Schuchert e Cooper, 1932

Superfamília DALMANELLOIDEA Schuchert, 1913

Família DALMANELLIDAE Schuchert, 1913

Gênero *Dalmanella* Hall e Clarke, 1892

Espécie-tipo — *Orthis testudinaria* Dalman, 1828. Formação Loka, Hirnantiano, Borensult, Östergötland, sul da Suécia.

Diagnose (emendada) — "Concha subcircular, ventribiconvexa em adultos; multicostelada a fracamente fascicostelada, com linha medial da valva dorsal marcada por um interespaço. Pontuações diferenciadas em dois tamanhos; aditículas ausentes. Placas dentais divergentes posteriormente, tornando-se subparalelas anteriormente para servir como cristas delimitadoras laterais da pequena área muscular cordada. Processo cardinal delicado com mióforo bilobado; placas do braquióforo inclinadas dorso-medialmente; placas fulcrais normalmente presentes" (Jin e Bergström, 2010).

Diagnose emendada original (em inglês) — Shell subcircular, ventribiconvex in adults; multicostellate to weakly fascicostellate, with medial line of dorsal valve marked by interspace. Punctae differentiated into two sizes; aditicles absent. Dental plates divergent posteriorly, become subparallel anteriorly to serve as lateral bounding ridges of small, cordate muscle field. Cardinal process delicate, with bilobed myophore; brachiophore plates inclined dorso-medially; fulcral plates normally present (Jin e Bergström, 2010).

Discussão. — Os espécimes apresentam divergências individuais em sua morfologia externa, que são atribuídas a processos tafonômicos (e.g. compressão, rolamento, quebra etc.). Os espécimes não apresentam a região cardinal completamente preservada; desta forma, importantes estruturas aí localizadas (processo cardinal, placas dentais, placas fulcrais, braquióforos) não puderam ser observadas. Não obstante, as características morfológicas externas diagnósticas do gênero foram observadas nos três indivíduos. O gênero *Dalmanella* Hall e Clarke, 1892 apresenta ao menos quinze espécies descritas para o Ordoviciano Superior e sete para o Siluriano Inferior. No entanto, todas estas apresentam caráter endêmico, sendo reportadas para poucas localidades, geograficamente próximas, no hemisfério norte. A única exceção é a espécie *Dalmanella testudinaria*, amplamente reportada no Ordoviciano Superior em lugares tais como Irlanda, Inglaterra, República Tcheca, Noruega, Estônia, Letônia, Turquia, Rússia, China e Argentina. Esta também é a única reportada para o paleocontinente Gondwana.

Dalmanella cf. *testudinaria* (Dalman, 1828)

(Figs. 30-34)

Lista Sinonímica do Material-Tipo ou Topótipos:

- 1828** *Orthis testudinaria* — Dalman, p. 115, pl. 2, fig. 4.
1837 *Orthis testudinaria* — Dalman; Hisinger, p. 71, pl. 20, fig. 11.
1892 *Dalmanella testudinaria* (Dalman) — Hall & Clarke, p. 205, pl. 2, fig. 4 (pl. 5B, figs. 25-39; pl. 5C, figs. 1-47).
1921 *Dalmanella testudinaria* (Dalman) — Raymond, p. 14, pl. 5, figs. 3, 4.
1932 *Wattsella testudinaria* (Dalman) — Schuchert & Cooper, p. 125, pl. 22, figs. 14, 19, 21, 24.
1962 *Orthis testudinaria* Dalman — Hall, p. 140.
1963 *Dalmanella testudinaria* (Dalman) — Williams & Wright, p. 29, pl. 2, figs. 7, 8, 12-13, 16-19.
1965 *Dalmanella testudinaria* (Dalman) — Williams & Wright, p. H333, figs. 212, 3a-e.
1968 *Dalmanella testudinaria* (Dalman) — Bergström, p. 8, pl. 2, fig. 5.
2000 *Dalmanella testudinaria* (Dalman) — Harper, p. 783-784, fig. 566, 2a-f.

Material-tipo — Lectótipo NRM-PZ Br 12846. Valvas dorsal e ventral, articuladas. Paralectótipos, total de 83 espécimes: NRM-PZ Br 1927, 12797-12803, 12806, 12831-12842, 12844-12845, 12847-12849, 12850-12857, 12867-12882, 12896-12900, 12907, 12926 - 12927, 18858 - 18864, 102710 - 102711, 134837 - 134852.

Localidade-tipo — Camadas de *Dalmanitina*, Formação Loka, Hirnantiano, Borenshult, Östergötland, sul da Suécia.

Material ilustrado — Três conchas com valvas articuladas, em grau moderado de preservação. As amostras foram incorporadas à Coleção Paleontológica 3 (CP3) do Instituto de Geociências da Universidade Estadual de Campinas sob as numerações CP3-1856a, CP3-1859 e CP3-1861.

Ocorrência reportada — Porção superior dos lamitos com seixos pingados da Formação Iapó, seção COHAB, Município de Barra do Garças, Estado do Mato Grosso, Brasil.

Descrição — Conchas de tamanho pequeno, com contorno subcircular (Fig. 30), aproximadamente equidimensional (média da razão C/L próxima a 1); maior concha atingindo comprimento de 8,0 mm e largura de 8,7 mm (Tab. 7). Comissura anterior sulcada a rectimarginada; concha planoconvexa em espécimes menores e ventribiconvexa em indivíduos maiores. A linha da charneira tem aspecto reto, ocupando cerca de 70% da largura da concha. Umbo ventral moderadamente convexo; bico ventral moderadamente curvado, apontando dorsalmente. Interárea ventral do tipo apsáclina, predominantemente plana; condição do deltírio não pôde ser observada. Umbo dorsal aplanado, apresentando interespaço medial. Interárea dorsal do tipo anáclina, predominantemente plana, cerca de dois terços da altura da interárea ventral; condição do nototírio não pôde ser observada. Mióforo bilobado e crenulado (Fig. 33), ocupando um terço da cavidade do nototírio, bem preservado no espécime CP3-1859; não pôde ser observado nos demais. Costelas constituem a ornamentação radial (Fig. 31a), apresentando-se bem marcadas, padronizadas e uniformes, do tipo multicostelada. Costelas secundárias surgem por ramificação lateral no primeiro terço da concha. O número de costelas varia de 19 a 22. Linhas de crescimento concêntricas, mais visíveis em direção às margens da concha. Capilares casualmente presentes (Fig 31b). Pontuações observadas em dois tamanhos distintos (Figs. 31c; 32b, d), a mais grossa aparece mais comumente na crista das costelas, e a fina ocorre espalhada na superfície da concha. Aditículas ausentes (Figs. 31d; 32a, c). Cicatrizes musculares ocupando 60% da cavidade corporal (Fig. 34). Crista mediana entre as cicatrizes anteriores na valva dorsal. Uma crista transversal distinta separa o par anterior e posterior de impressões.

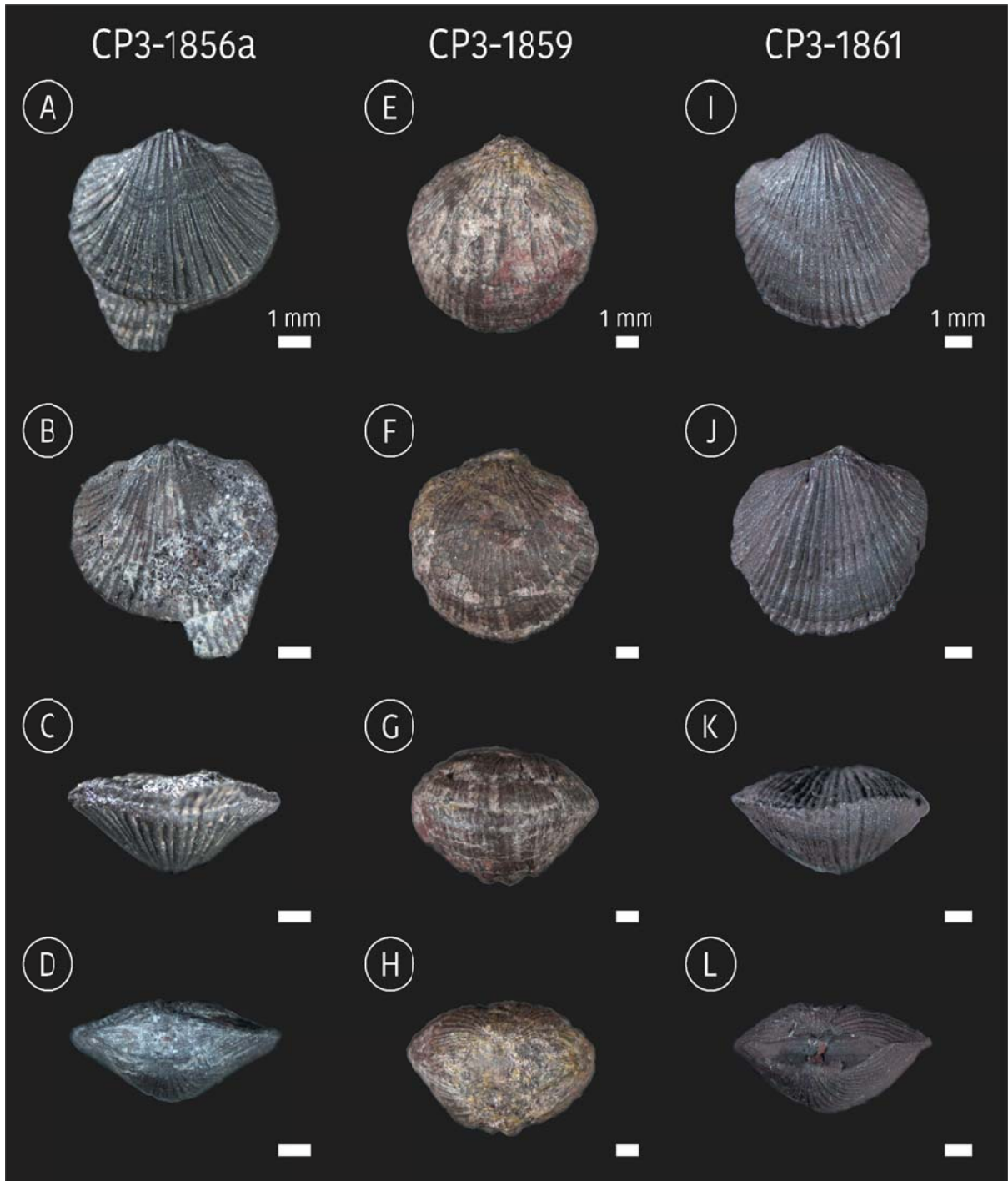


Figura 30. Espécimes de *Dalmanella* cf. *testudinaria* (Dalman, 1828) articulados, recuperados na seção COHAB, Formação Iapó. Todas as escalas equivalem a 1 mm. **a-d.** CP3-1856a; **a.** Vista ventral; **b.** Vista dorsal; **c.** Vista anterior; **d.** Vista posterior. **e-h.** CP3-1859; **e.** Vista ventral; **f.** Vista dorsal; **g.** Vista anterior; **h.** Vista posterior. **i-l.** CP3-1861; **i.** Vista ventral; **j.** Vista dorsal; **k.** Vista anterior; **l.** Vista posterior.

Tabela 7. Medidas (em mm) dos espécimes de rhyconeliformes, seção COHAB, Barra do Garças, Brasil.

Espécime	Comprimento (C)	Largura (L)	Altura (A)	C/L	A/L	Ilustração
CP3-1856a	5,8	5,9	2,7	0,98	0,45	Figs. 30a-d; 32a-b
CP3-1859	8,0	8,7	5,5	0,92	0,63	Figs. 30e-h; 32c-d; 33
CP3-1861	6,3	7,0	3,6	0,90	0,51	Figs. 30i-l; 32; 34

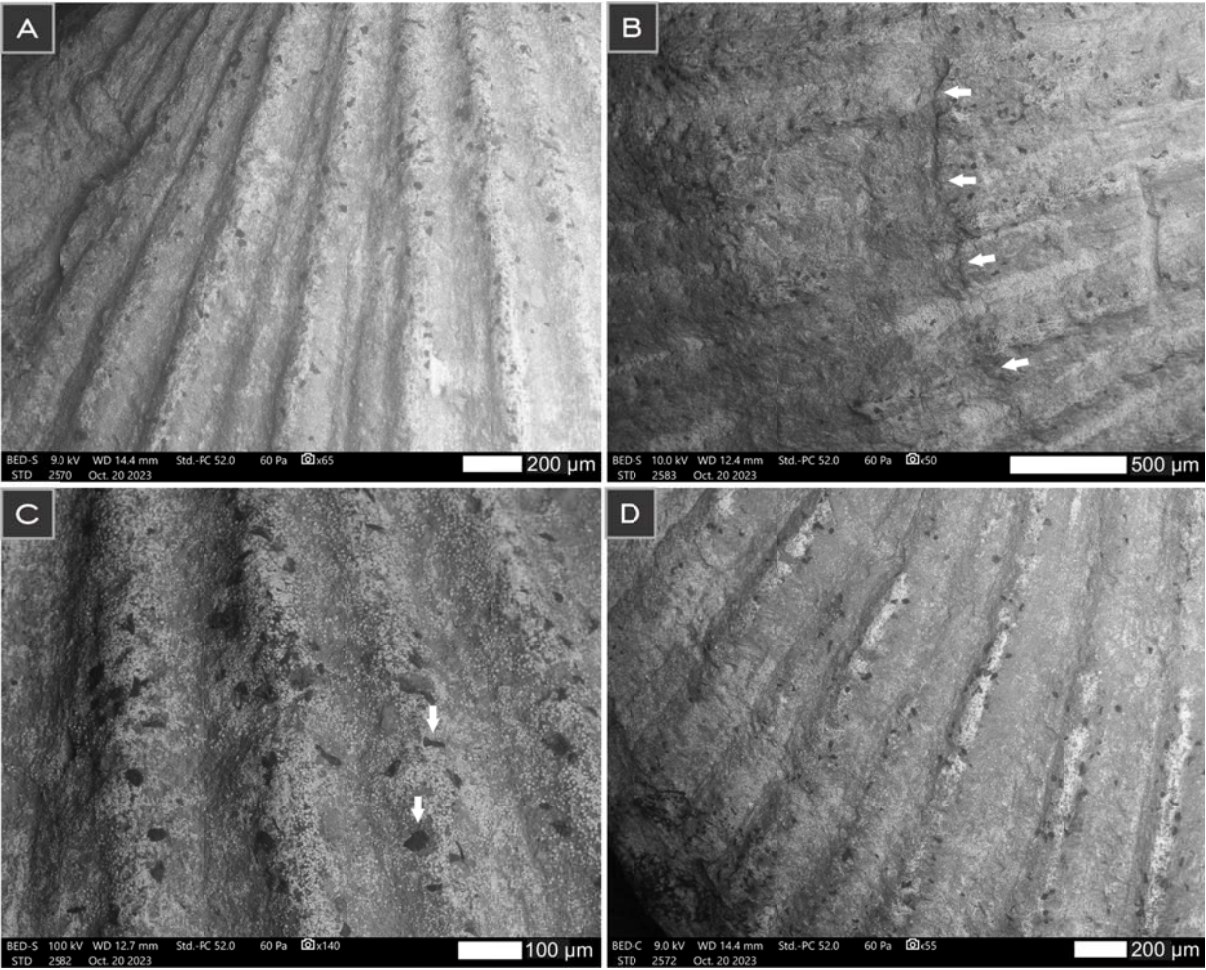


Figura 31. Estruturas externas de *Dalmanella* cf. *testudinaria*; todas as imagens foram obtidas do espécime CP3-1861. **a.** Costelas de ornamentação. **b.** Capilar (indicado pelas setas), estrutura perpendicular às costelas. **c.** Pontuações presentes em toda a superfície externa; as setas indicam pontuações de diferentes tamanhos. **d.** Margem anterior da concha, evidenciando as costelas na ausência de aditículas.

Discussão — Todos os espécimes recuperados assemelham-se a dalmanellídeos no que se refere ao aspecto geral da concha e das valvas, sua ornamentação e convexidade. Características morfológicas e microestruturas diagnósticas do gênero *Dalmanella* foram observadas nos espécimes, tais como as pontuações em dois tamanhos distintos e a ausência de aditículas. O mióforo bilobado, importante característica anatômica, foi observado em um dos indivíduos, CP3-1859, não sendo aferido nos demais dado o estado de preservação dos espécimes. De forma semelhante, uma estrutura que se assemelha às cicatrizes musculares da valva dorsal foi observada em um dos espécimes, CP3-1861. A ausência de estruturas nítidas na região cardinal impede uma atribuição taxonômica conclusiva e comparações mais significativas entre os espécimes.

Os diferentes níveis de convexidade entre as conchas dos indivíduos são evidentes, variando de conchas planoconvexas a ventribiconvexas; esta não é uma feição que, isoladamente, justifique a atribuição dos indivíduos a diferentes espécies ou gêneros, uma vez que é uma característica intimamente ligada ao tamanho geral dos espécimes (Jin & Bergström, 2010). A ventribiconvexidade das conchas é uma característica esperada em todos os espécimes de *D. testudinaria* (Jin, 2012), não obstante, diferentes pesquisadores enfatizam a ocorrência de variações morfológicas intraespecíficas (Benedetto, 1986; Leone e Benedetto, 2019).

Na Precordillera argentina, *D. testudinaria* é observada nas camadas hiranianas da Formação Don Braulio (Benedetto, 1986) e nas camadas rhudannianas da Formação La Chilca (Benedetto, 1995; Leone e Benedetto, 2019), que sucedem as primeiras. Na seção COHAB, espécimes de *Dalmanella* cf. *testudinaria* são encontrados nos mesmos estratos que organismos de provável idade hiraniana, como o ostracode *S. paranaensis* e o discinídeo *K. australis*; uma vez que o retrato geral da assembleia fossilífera aponta para o Hirantiano, argumenta-se que também estes dalmanellídeos são de idade hiraniana.

Os espécimes recuperados na seção COHAB são raros e apresentam preservação moderada. As técnicas de estudo taxonômico que foram empregadas auxiliaram na elucidação de importantes questões diagnósticas, embora não tenha sido possível acessar todas as características relevantes. As cicatrizes musculares não puderam ser examinadas diretamente em microscópio estereoscópio e deve-se levar em conta que o uso da técnica de microtomografia computadorizada para examiná-las produzirá imagens que não são idênticas, mas sim semelhantes ao contorno das cicatrizes. Considerando os caracteres observados e a discussão a respeito da ocorrência do gênero, reporta-se a ocorrência de *Dalmanella* cf.

testudinaria (Dalman, 1828) para o Hirnantiano do Grupo Rio Ivaí, Bacia do Paraná, representado pela seção pelítica da Formação Iapó.

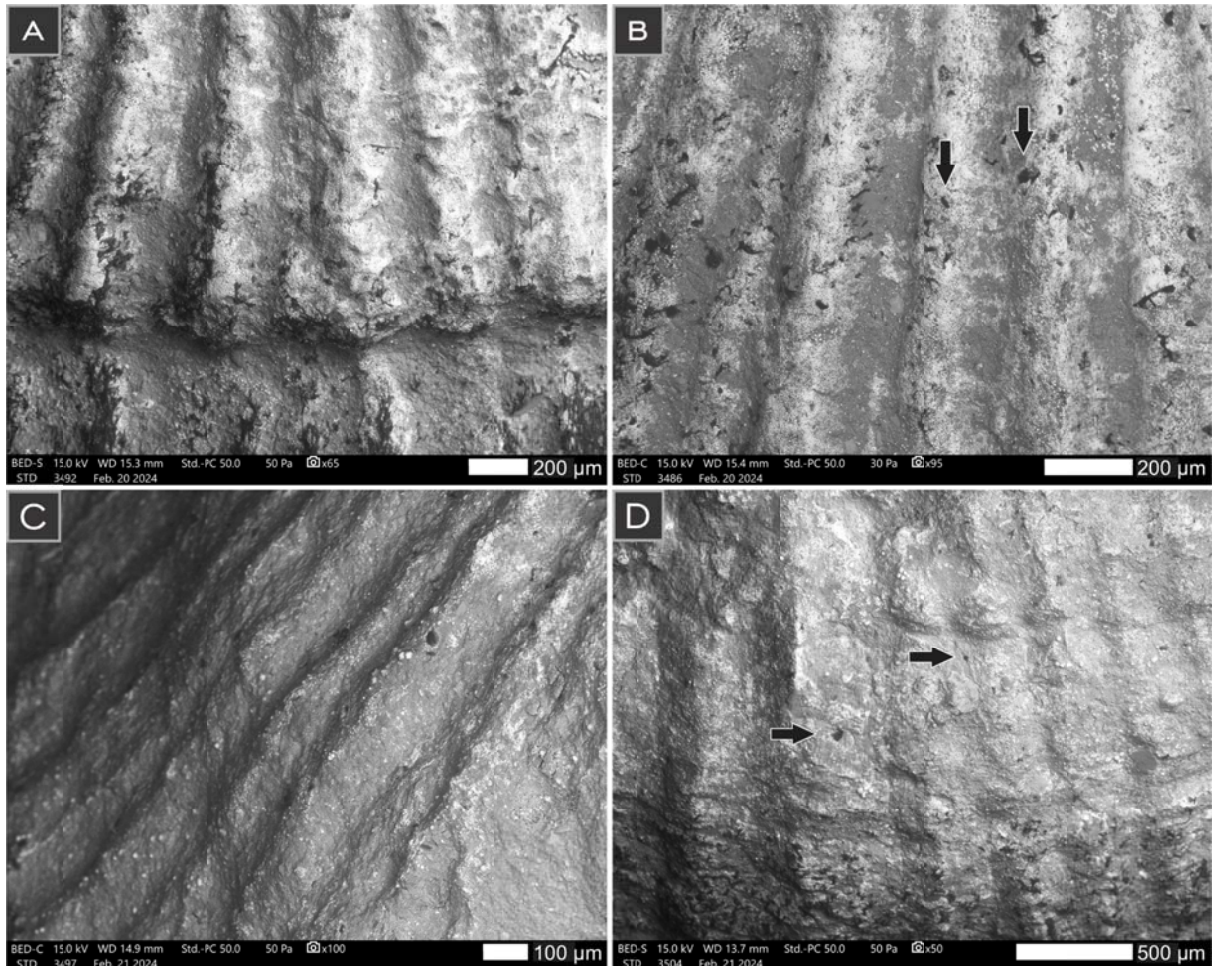


Figura 32. Estruturas externas de *Dalmanella* cf. *testudinaria*. **a-b.** CP3 1856a. **a.** Detalhe das costelas, evidenciando a ausência de aditriclas. **b.** Pontuações presentes em toda a superfície externa; as setas indicam pontuações de diferentes tamanhos. **c-d.** CP3 1859. **c.** Detalhe das costelas, evidenciando a ausência de aditriclas. **d.** Pontuações presentes em toda a superfície externa; as setas indicam pontuações de diferentes tamanhos.

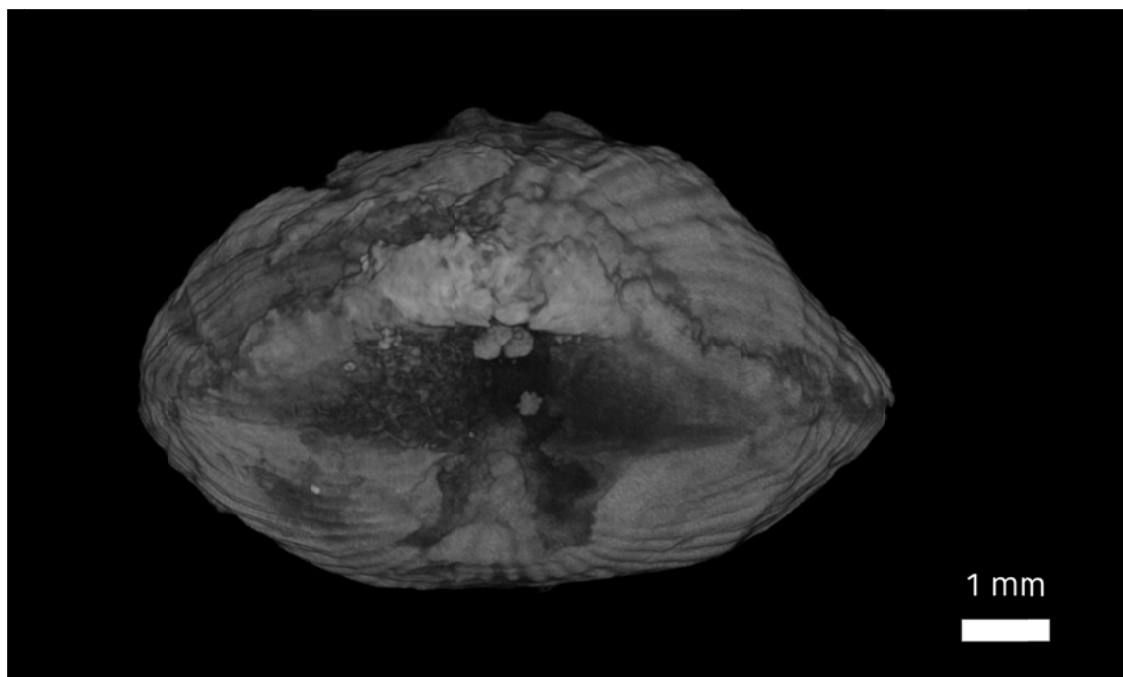


Figura 33. Mióforo bilobado e crenulado, estrutura presente na valva dorsal, espécime CP3-1859. Esta estrutura não pôde ser aferida em microscópio estereoscópico, mas apenas por meio de microtomografia computadorizada.

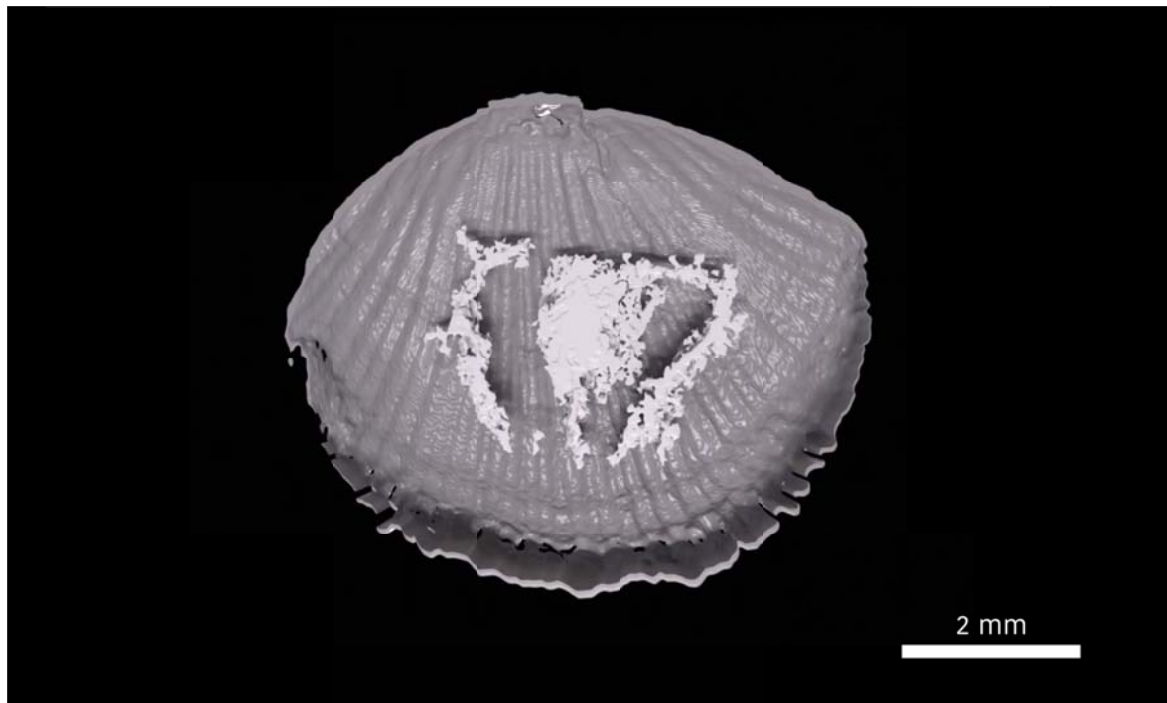


Figura 34. Estrutura que se assemelha à cicatriz do músculo adutor, quadripartido, presente na valva dorsal de *Dalmanella* cf. *testudinaria*, CP3-1861. Esta estrutura não pôde ser aferida em microscópio estereoscópico, mas apenas por meio de microtomografia computadorizada.

Fauna Hirnantiana na Bacia do Paraná e Bacias Adjacentes

Os recentes estudos conduzidos no Grupo Rio Ivaí têm proporcionado novos conhecimentos acerca da fauna de idade ordovício-siluriana da Bacia do Paraná. Os estudos taxonômicos, em particular, são valiosos para a compreensão da biodiversidade da assembleia fossilífera, aspecto imprescindível para estudos comparativos entre as faunas de bacias coevas. Dados de ocorrências fósseis de idade hirnantiana nas formações Iapó e Vila Maria são de especial interesse uma vez que há elementos em comum com as faunas de mesma idade na Argentina e Paraguai e nas regiões norte e sul da África.

O ostracode *H. harparum*, espécie índice do Hirnantiano da Báltica, e o gênero *Kosoidea*, reportado tanto para a Bacia do Paraná quanto para o Hirnantiano da Bacia do Cabo, foram apontados previamente como possíveis indicadores da idade hirnantiana dos pelitos superiores da Formação Iapó (Zabini *et al.*, 2019; Gonçalves *et al.*, 2022). A partir disto, vale ressaltar que uma fauna de idade hirnantiana distingue-se da chamada "fauna de *Hirnantia*".

A fauna de *Hirnantia* trata-se de uma assembleia composta por braquiópodes de diferentes espécies, sobretudo rhyconeliformes, adaptados a ambientes de águas rasas, que evoluíram e/ou prosperaram entre o primeiro e segundo "pulsos" da extinção em massa do final do Ordoviciano. Estes elementos estão frequentemente associados às trilobitas da fauna de *Dalmanitina/Mucronaspis*, e fornecem um meio confiável para correlacionar o Andar Hirnantiano em diferentes locais do mundo (Rong e Harper, 1988). Dada a distribuição global desta fauna — sendo alguns *taxa* considerados cosmopolitas —, sua composição pode variar de acordo com a localidade em que é reportada.

Reconhecem-se as faunas de *Hirnantia* "típica" e "atípica", que ocuparam latitudes temperadas e polares, respectivamente, e a última é apontada como menos rica em espécies do que a fauna típica (Sutcliffe *et al.*, 2001). Tanto a fauna de *Hirnantia* típica quanto a atípica foram reportadas para a Gondwana (Fig. 35), assim como assembleias de braquiópodes hirnantianos que não constituem a fauna de *Hirnantia*, como é o caso da assembleia da Bacia do Cabo, na África do Sul (Bassett *et al.*, 2009). As assembleias de braquiópodes descritas para o Hirnantiano da Bacia do Paraná e de bacia sedimentares coevas foi sumarizada na Tabela 8.

Tabela 8. Braquiópodes reportados em camadas hirnântianas da Bacia do Paraná e bacias sedimentares coevas.

Bacia Sedimentar	Tr Taxon	Grupo Biológico	Tr Fm. Geológica	Tr Autor, ano
Bacia do Paraná	<i>Dalmanella testudinaria</i>	Rhynchonelliforme	Fm. Iapó	Este trabalho
Bacia do Paraná	<i>Kosoidea australis</i>	Linguliforme	Fm. Iapó	Zabini et al., 2019
Bacia do Paraná	Lingulidae indeterminado	Linguliforme	Fm. Iapó	Zabini et al., 2021
Bacia do Paraná	? <i>Palaeoglossa</i> sp.	Linguliforme	Fm. Iapó	Zabini et al., 2021
Bacia do Paraná	<i>Arenorthis paranaensis</i>	Rhynchonelliforme	Fm. Eusebio Ayala	Benedetto et al., 2013
Bacia do Paraná	<i>Eostropheodonta conradii</i>	Rhynchonelliforme	Fm. Eusebio Ayala	Benedetto et al., 2013
Bacia do Paraná	<i>Hindella</i> cf. <i>H. crassa</i>	Rhynchonelliforme	Fm. Eusebio Ayala	Benedetto et al., 2013
Bacia do Paraná	? <i>Plectothyrella itacurubiensis</i>	Rhynchonelliforme	Fm. Eusebio Ayala	Benedetto et al., 2013
Precordillera	<i>Cliftonia oxoplecoides plicata</i>	Rhynchonelliforme	Fm. Don Braulio	Benedetto, 1990
Precordillera	<i>Dalmanella testudinaria</i>	Rhynchonelliforme	Fm. Don Braulio	Benedetto, 1986
Precordillera	<i>Drabovia undulata</i>	Rhynchonelliforme	Fm. Don Braulio	Astini & Benedetto, 1992
Precordillera	<i>Eostropheodonta</i> aff. <i>E. hirnantiensis</i>	Rhynchonelliforme	Fm. Don Braulio	Benedetto, 1986
Precordillera	<i>Hirnantia sagittifera</i>	Rhynchonelliforme	Fm. Don Braulio	Benedetto, 1986
Precordillera	Lingulidae indeterminado	Linguliforme	Fm. Don Braulio	Astini & Benedetto, 1992
Precordillera	<i>Paromalomena polonica</i>	Rhynchonelliforme	Fm. Don Braulio	Benedetto, 1990
Precordillera	<i>Plectatrype</i> sp.	Rhynchonelliforme	Fm. Don Braulio	Benedetto, 1990
Precordillera	<i>Plectothyrella</i> sp.	Rhynchonelliforme	Fm. Don Braulio	Benedetto, 1986
Precordillera	<i>Plectothyrella crassicauda</i>	Rhynchonelliforme	Fm. Don Braulio	Astini & Benedetto, 1992
Precordillera	<i>Orbiculoidea</i> sp.	Linguliforme	Fm. Don Braulio	Astini & Benedetto, 1992
Central Andean Basin	<i>Dalmanella</i> cf. <i>testudinaria</i>	Rhynchonelliforme	Fm. Zapla	Benedetto et al., 2015
Central Andean Basin	<i>Paromalomena</i> sp.	Rhynchonelliforme	Fm. Zapla	Benedetto et al., 2015
Central Andean Basin	<i>Orbiculoidea radiata</i>	Linguliforme	Fm. Zapla	Benedetto et al., 2015
Bacia do Cabo	<i>Kosoidea cedarbergensis</i>	Linguliforme	Fm. Cedarberg, Soom	Bassett et al., 2009
Bacia do Cabo	<i>Palaeoglossa</i> sp.	Linguliforme	Fm. Cedarberg, Soom	Bassett et al., 2009
Bacia do Cabo	<i>Plectothyrella</i> sp.	Rhynchonelliforme	Fm. Cedarberg, Soom	Bassett et al., 2009
Bacia do Cabo	<i>Trematis taljaardi</i>	Linguliforme	Fm. Cedarberg, Soom	Bassett et al., 2009
Bacia do Cabo	<i>Eostropheodonta discumbata</i>	Rhynchonelliforme	Fm. Cedarberg, Disa	Cocks et al., 1970
Bacia do Cabo	<i>Heterorthella africana</i>	Rhynchonelliforme	Fm. Cedarberg, Disa	Cocks & Fortey, 1986
Bacia do Cabo	? <i>Plectoglossa</i> sp.	Linguliforme	Fm. Cedarberg, Disa	Cocks et al., 1970
Bacia do Cabo	<i>Plectothyrella haughtoni</i>	Rhynchonelliforme	Fm. Cedarberg, Disa	Cocks et al., 1970
Bacia do Cabo	<i>Trematis taljaardi</i>	Linguliforme	Fm. Cedarberg, Disa	Cocks et al., 1970
Anti-Atlas	<i>Arenorthis arenaria</i>	Rhynchonelliforme	Fm. Lower Second Bani	Sutcliffe et al., 2001
Anti-Atlas	<i>Destombesium ellipsoides</i>	Rhynchonelliforme	Fm. Lower Second Bani	Sutcliffe et al., 2001
Anti-Atlas	<i>Destombesium zagoraensis</i>	Rhynchonelliforme	Fm. Lower Second Bani	Sutcliffe et al., 2001
Anti-Atlas	<i>Eostropheodonta jebiletensis</i>	Rhynchonelliforme	Fm. Lower Second Bani	Sutcliffe et al., 2001
Anti-Atlas	<i>Hirnantia sagittifera</i>	Rhynchonelliforme	Fm. Lower Second Bani	Sutcliffe et al., 2001
Anti-Atlas	<i>Eostropheodonta squamosa</i>	Rhynchonelliforme	Fm. Upper Second Bani	Sutcliffe et al., 2001
Anti-Atlas	<i>Hirnantia sagittifera</i>	Rhynchonelliforme	Fm. Upper Second Bani	Sutcliffe et al., 2001
Anti-Atlas	<i>Plectothyrella crassicauda chaveli</i>	Rhynchonelliforme	Fm. Upper Second Bani	Sutcliffe et al., 2001

A primeira ocorrência da fauna de *Hirnantia* típica na América do Sul foi descrita para a Formação Don Braulio, na Precordillera argentina (Benedetto, 1986); este autor descreveu uma assembleia dominada pelos braquiópodes *Hirnantia sagittifera* (McCoy, 1851) e *Dalmanella testudinaria* (Dalman, 1828) encontrada em uma lente calcária na porção intermediária da unidade, que apresenta 40 metros de espessura na localidade. Uma segunda assembleia também foi descrita, ocorrendo nas camadas de lamito e siltito imediatamente acima desta lente, e composta pelos braquiópodes *Eostropheodonta* aff. *E. hirnantensis* (McCoy, 1851) e *Plectothyrella* sp., associados à trilobita *Calymenella villicunensis* (Baldi e Blasco, 1975), ao bivalve *Paleoneilo* sp. e a conulárideos. Esta fauna ocorre imediatamente abaixo da biozona *Normalograptus persculptus* (Elles e Woods, 1907), indicativa do Andar Hirnantiano.

A fauna de *Hirnantia* atípica foi descrita para os siltitos e arenitos finos da Formação Eusebio Ayala, na porção paraguaia da Bacia do Paraná, Grupo Itacurubí (Benedetto *et al.*, 2013). Nesta assembleia, foram encontrados os braquiópodes *Arenorthis paranaensis* Benedetto e Halpern, 2013, *Plectothyrella? itacurubiensis* Benedetto e Halpern, 2013, *Hindella* cf. *H. crassa* (J. de C. Sowerby, 1839) e *Eostropheodonta conradii* (Harrington, 1950). A fauna atípica caracteriza-se pela presença de espécies endêmicas e/ou relativamente raras pertencentes a gêneros amplamente distribuídos e característicos da fauna de *Hirnantia*, tal como *Plectothyrella*, *Hindella* e *Eostropheodonta*. A assembleia está associada aos graptólitos da biozona *N. persculptus*, que indicam a idade hiranntiana destas camadas.

A fauna de idade hiranntiana descrita para os pelitos das formações Iapó e Vila Maria compartilha alguns *taxa* com as assembleias já reportadas para outras localidades na América do Sul. O rhyconeliforme *Dalmanella* cf. *testudinaria*, membro reconhecido da fauna de *Hirnantia*, é reportado no presente trabalho para os lamitos com seixos da Formação Iapó, juntamente com trilobitas da família Dalmanitidae. Esta é a família dos gêneros *Dalmanitina*/*Mucronaspis*, que compõem a fauna de trilobitas frequentemente reportada em associação com os braquiópodes da fauna de *Hirnantia*. O endemismo de algumas espécies que compõem a fauna descrita por Benedetto *et al.* (2013) também é observada na Bacia do Paraná brasileira, como braquiópodes linguliformes e ostracodes.

Este é o caso dos ostracodes *C. brasiliensis* e *S. paranaensis*, conhecidos apenas para o Grupo Rio Ivaí da Bacia do Paraná, embora os gêneros *Conchoprimitia* e *Satiellina* sejam amplamente distribuídos. Espécies de *Conchoprimitia* foram vastamente reportadas

para o Ordoviciano em localidades como Báltica (Tinn *et al.*, 2010), Portugal (Vannier *et al.*, 1989) e Argentina (Salas e Vaccari, 2012). Por sua vez, espécies de *Satiellina* foram reportadas para o Ordoviciano Médio e Superior das regiões de Ibero-Armorica, Norte da África e Báltica (Vannier, 1983, 1986). Da mesma forma, o linguliforme endêmico *Kosoidea australis* é o primeiro do gênero *Kosoidea* a ser reportado para a América do Sul (Zabini *et al.*, 2019), e apresenta diferenças morfológicas e anatômicas da espécie hirnantiana *K. cedarbergensis* Bassett e Popov, 2009, descrita para a Formação Cedarberg da Bacia do Cabo (Bassett *et al.*, 2009).

O Membro Soom constitui a porção mais basal da Formação Cedarberg, Bacia do Cabo, e é considerado um *fossilagerstätte*, apresentando um singular registro fóssil de idade Hirnantiana. A assembleia conhecida para os folhelhos do Membro Soom compreende grupos cuja preservação excepcional possibilitou o reconhecimento de estruturas pouco encontradas no registro fóssil — este é o caso de agnatos com musculatura e fígado preservados, bem como conodontes de grandes proporções; artrópodes euriptéridos com musculatura e apêndices articulados; e nautilóides ortocones com rádula (Gabbott *et al.*, 2017). No entanto, nestas camadas também é possível encontrar uma fauna característica de um ambiente marinho raso durante o Ordoviciano, composta por braquiópodes, moluscos bivalves e trilobitas.

Os braquiópodes do Membro Soom constituem uma fauna pouco diversa, composta pelos linguliformes *Trematis taljaardi* Rowell, 1970, *Kosoidea cedarbergensis* e *Palaeglossa* sp. e pelo rhyconeliforme *Plectothyrella* sp. (Bassett *et al.*, 2009). Dada a inquestionável idade hirnantiana do Membro Soom, os pesquisadores qualificaram esta assembleia como a fauna de *Hirnantia* atípica, a despeito da ausência de seus gêneros mais distintivos. Entretanto, vale ressaltar que na revisão ampla e emblemática de Rong *et al.* (2020), a assembleia da África do Sul não é considerada parte da fauna de *Hirnantia*, dada a idade hirnantiana terminal do Membro Soom da Formação Cedarberg. Ademais, os autores apontam que os gêneros *Palaeglossa* e *Kosoidea* não foram reportados em outras localidades para a assembleia de *Hirnantia*, e que a fauna do Membro Soom poderia representar uma unidade biogeográfica separada. Neste sentido, a fauna do Grupo Rio Ivaí da Bacia do Paraná pode representar uma importante conexão entre as unidades biogeográficas, lançando nova luz às interpretações de Rong *et al.* (2020).

A fauna de paleoinvertebrados da Formação Iapó apresenta algumas semelhanças com aquelas reportadas no continente africano. Além do gênero *Kosoidea*, Zabini *et al.*

(2021) também descreveram braquiópodes obolídeos *Palaeoglossa?* sp. para os lamitos com seixos pingados da Formação Iapó; ambos os gêneros são reportados para o Membro Soom da Formação Cedarberg (Bassett *et al.*, 2009). Cocks e Fortey (1986) relatam a ocorrência da trilobita dalmanitídea *Mucronaspis olini* (Temple, 1952) para as camadas do Membro Soom, uma espécie também descrita para as localidades de Gales e Suécia (Temple, 1952); trilobitas dalmanitídeas são reportadas para a Formação Iapó, seção COHAB, no presente trabalho. Para o afloramento Córrego da Aldeia, Adorno (2014) relatou a ocorrência do arqueogastrópode *Bucanella?* sp nas formações Iapó e Vila Maria. Em sua revisão da fauna dos folhelhos Soom, Gabbott *et al.* (2017) recupera a ocorrência de arqueogastrópodes putativamente atribuídos ao gênero *Bucanella* (Cocks e Fortey, 1986). É evidente o compartilhamento de *taxa* entre o registro fossilífero do Grupo Rio Ivaí e do Membro Soom; futuras pesquisas taxonômicas com os demais elementos da fauna do Grupo Rio Ivaí são imprescindíveis para esclarecer tais questões.

Conforme explorado por Zabini *et al.* (2019), a semelhança inicial observada entre a fauna da Bacia do Paraná e da Bacia do Cabo pode indicar uma conexão marítima entre essas bacias durante o Ordoviciano Superior e Siluriano Inferior, uma hipótese ainda pouco explorada. A ocorrência de *Dalmanella* cf. *testudinaria* na Formação Iapó, espécie presente na Precordillera argentina, vai ao encontro da hipótese da conexão entre bacias. Entretanto, é necessário observar que os invertebrados fósseis apresentam limitações relevantes para as pesquisas bioestratigráficas e biogeográficas, sendo o registro de palinomorfos mais confiável para esta finalidade.

O caráter da assembleia de braquiópodes do Membro Disa, porção superior da Formação Cedarberg, também foi discutido em revisões anteriores. Esta comunidade é constituída pelos linguliformes *Plectoglossa?* sp., *Orbiculoidea* sp. e *Tremadis taljaardi*, e pelos rhyconeliformes *Heterorthella africana* (Cocks e Brunton, 1970), *Eostropheodonta discumbata* Cocks e Brunton, 1970 e *Plectothyrella haughtoni* Cocks e Brunton, 1970 (Cocks *et al.*, 1970; Cocks e Fortey, 1986). Assim como avaliado para o Membro Soom, os revisores argumentam que a fauna do Membro Disa não apresenta os elementos mais distintivos da fauna de *Hirnantia* e, embora possa ser considerada uma assembleia aparentada de idade hirnantiana, não representa uma ocorrência da fauna de *Hirnantia* (Rong e Harper, 1988). Todavia, uma assembleia de braquiópodes pertencentes à "verdadeira" fauna de *Hirnantia* foi reconhecida na porção norte do continente africano.

Uma assembleia de *Hirnantia* atípica foi reportada para o Norte da África, em diferentes localidades. Nas montanhas Anti-Atlas do Marrocos, os *taxa* de braquiópodes reportados incluem os gêneros *Hirnantia*, *Eostropheodonta*, *Arenorthis*, *Kinella* e *Plectothyrella*, que compõem assembleias da fauna de *Hirnantia* em diferentes localidades (Havlíček, 1971; Mergl, 1983; Sutcliffe *et al.*, 2001; Villas *et al.*, 2016). Na Líbia, os braquiópodes *Plectothyrella*, *Hirnantia* e *Drabovinella* foram descritos juntamente com *Orbiculoidea* e outros gêneros de linguliformes (Havlíček e Massa, 1973). Na Argélia, a fauna pouco diversa inclui espécies emblemáticas da fauna de *Hirnantia* tais como *Hirnantia sagittifera* e *Plectothyrella crasscostis* (Dalman, 1828), bem como *Drabovinella maxima* Mergl, 1983, *Leptaena?* sp. e outros gêneros menos característicos (Mergl, 1983; Popov *et al.*, 2019).

Ordoviciano Superior

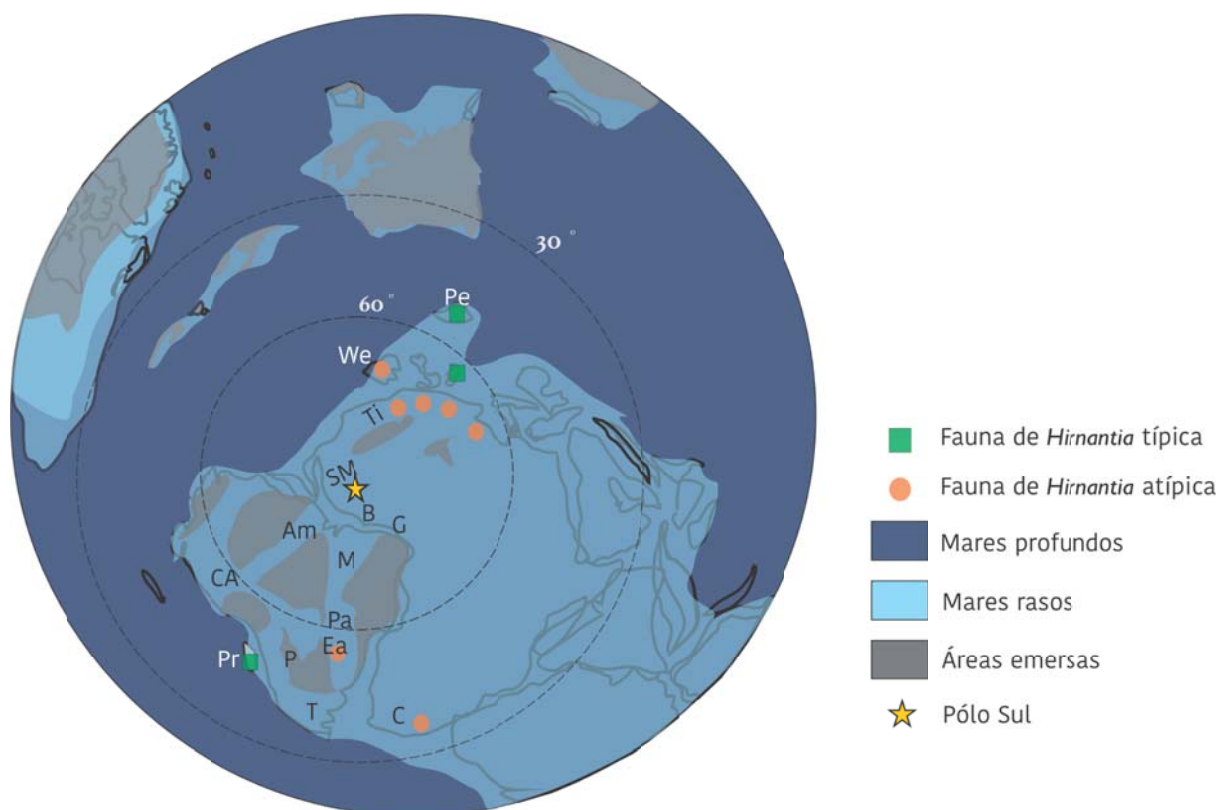


Figura 35. Distribuição das faunas típica e atípica de *Hirnantia* na Gondwana durante o Ordoviciano Superior. **Am**, Bacia do Amazonas; **B**, Bacia de Bové; **C**, Bacia do Cabo (*em discussão*); **CA**, Bacia Andina Central; **Ea**, Formação Eusebio Ayala, Bacia do Paraná; **G**, Bacia do Ghana; **M**, Bacia do Pará-Maranhão; **P**, Bacia de Puna; **Pa**, Grupo Rio Ivaí, Bacia do Paraná; **Pe**, Perunica; **Pr**, Bacia da Precordillera; **SM**, Bacia do Senegal-Mauritânia; **T**, Bacia de Tandil; **Ti**, Bacia de Tindouf; **We**, Plataforma do oeste europeu (Iberia, Armorica, Montaigne Noire, Sardenha, Alpes Cárnicos). Adaptado de Zabini *et al.*, 2021.

No que se refere à região norte do continente africano, sua fauna de braquiópodes não apresenta, em nenhuma das localidades discutidas, *taxa* em comum com o Grupo Rio Ivaí. Adôrno *et al.* (2016) reforça a hipótese de conexão entre as bacias sul-americanas e norte-africanas, conforme proposto por Benedetto *et al.* (2013), com base na ocorrência do gênero *Satiellina* na Formação Djeffara, Bacia de Ghadamis, Líbia (Vannier, 1986; Vannier *et al.*, 1989). Ademais, muitos *taxa* de palinórfos, como quitinozoários, acritarcas e prasinófitas, descritos para as formações Iapó e Vila Maria da Bacia do Paraná foram reportados também para formações do Ordoviciano Superior e Siluriano Inferior da Líbia

(Rodrigues, 2021). É possível que a continuidade do estudo da fauna de paleoinvertebrados da Bacia do Paraná revele maior afinidade com as assembleias do Norte da África.

A ocorrência de *Dalmanella* cf. *testudinaria* nos mesmos estratos em que são encontrados *S. paranaensis* e *K. australia* corroboram a hipótese da idade hirnantiana para os pelitos da Formação Iapó conforme defendido por diferentes autores em trabalhos recentes (Zabini *et al.*, 2019, 2021; Gonçalves *et al.*, 2022). Ainda, outros paleoinvertebrados aproximam a assembleia reportada na unidade Iapó com aquelas descritas no Hirnantiano de outras localidades.

Não se pode afirmar, com base nos grupos de braquiópodes encontrados na seção COHAB, que a fauna fóssil do Grupo Rio Ivaí trate-se de uma ocorrência da fauna de *Hirnantia*, uma vez que geralmente aceita-se outros gêneros e espécies de rhynconeliformes para caracterizar essa típica assembleia. De toda forma, o compartilhamento de *taxa* com bacias adjacentes, novamente atestado pela ocorrência de *Dalmanella* cf. *testudinaria*, pode lançar nova luz à interpretação dos domínios biogeográficos nos quais a fauna de *Hirnantia* poderia ter prosperado durante o Ordoviciano Superior. A ocorrência deste membro típico da fauna de *Hirnantia* soma-se às evidências fósseis reportadas anteriormente (Adôrno *et al.*, 2016; Zabini *et al.*, 2019, 2021; Gonçalves *et al.*, 2022), todas sugerindo a idade hirnantiana da fauna dos pelitos da Formação Iapó e dos folhelhos basais da Formação Vila Maria do Grupo Rio Ivaí.

Considerações Finais

Este estudo apresentou uma revisão histórica do Ordoviciano-Siluriano da Bacia do Paraná que se inicia com estudos do final da década de 1940 e culmina com a proposição do Grupo Rio Ivaí, evidenciando as importantes mudanças de paradigma que se seguiram ao longo de mais de cinco décadas de pesquisa. A idade das formações Alto Garças, Iapó e Vila Maria sempre foi um tema central das discussões científicas, conectando diferentes pesquisadores, que se dispuseram a responder esta questão por meio de diferentes abordagens. Vê-se, em especial, as contribuições feitas a partir do conteúdo fóssilífero das unidades Iapó e Vila Maria.

As pesquisas mais recentes e as contribuições feitas neste trabalho sugerem a idade hirnantiana (Ordoviciano Superior) para as camadas pelíticas da porção superior da Formação Iapó e da porção basal da Formação Vila Maria. Neste sentido, os ostracodes *Conchoprimitia brasiliensis* Adorno e Salas, 2016, *Satiellina paranaensis* Adorno e Salas, 2016 e *Harpabollia harparum* Troedsson, 1918, e os braquiópodes *Kosoidea australis* Zabini e Furtado-Carvalho, 2019 e *Dalmanella* cf. *testudinaria* (Dalman, 1828) constituem as principais ocorrências a favor da hipótese da idade hirnantiana destes estratos.

A primeira ocorrência do rhyconeliforme *Dalmanella* cf. *testudinaria* é reportada para o pacote pelítico da Formação Iapó na seção COHAB, localizada no município de Barra do Garças, MT, Brasil. Os três espécimes recuperados apresentam grau de preservação moderado e neles foram observadas diversas características diagnósticas do gênero *Dalmanella*, do qual a espécie *D. testudinaria* é a única reconhecida no Gondwana, sendo primeiramente documentada na Precordillera argentina (Benedetto, 1986). Os indivíduos descritos são semelhantes aos espécimes de *D. testudinaria* descritos por outros pesquisadores (ver Jin & Bergström, 2010). Embora esta espécie também ocorra no Rhudanniano do paleocontinente (Benedetto & Cocks, 2009; Leone & Benedetto, 2019), os demais elementos da assembleia fóssilífera recuperada na seção são indicativos da idade hirnantiana. Estede-se, portanto, a ocorrência de *Dalmanella* cf. *testudinaria* aos estratos hirnantianos da Bacia do Paraná, representados pelas camadas da Formação Iapó, do Grupo Rio Ivaí.

Neste trabalho também relata-se os grupos de paleoinvertebrados do Grupo Rio Ivaí, recuperados em três diferentes afloramentos na margem norte da Bacia do Paraná ao longo de campanhas de campo realizadas entre 2022 e 2023. Na seção Córrego da Aldeia, foram recuperados o discinídeo *Kosoidea australis*, os ostracodes *Conchoprimitia brasiliensis* e *Satiellina paranaensis* e arqueogastrópodes, bivalves e escolecodontes não identificados. Na

seção Fazenda Três Barras, foram recuperados discinídeos *Kosoidea australis* e um braquiópode rhyconeliforme não identificado, os ostracodes *Harpabollia harparum*, *Conchoprimitia brasiliensis* e *Satiellina paranaensis*, bem como arqueogastrópodes, bivalves e escolecodontes não identificados. Na seção COHAB, foram recuperados *Kosoidea australis*, lingulídeos não identificados, obolídeos não identificados, rhyconeliformes não identificados, o rhyconeliforme *Dalmanella* cf. *testudinaria*, o ostracode *Satiellina paranaensis*, trilobitas dalmanitídeas, bem como bivalves, arqueogastrópodes e escolecodontes não identificados.

A assembleia das camadas ordo-silurianas da Bacia do Paraná apresenta elementos em comum com aquelas reportadas em bacias sedimentares coevas. A assembleia de braquiópodes, conforme recuperada na seção COHAB, partilha elementos com a fauna reportada no Membro Soom, Hirnantiano da Formação Cedarberg, e com aquela reportada na Formação Don Braulio, na Precordillera argentina. O compartilhamento de *taxa* de braquiópodes e demais grupos fósseis (e.g. trilobitas dalmanitídeas) respalda a hipótese de conexão entre bacias sul-americanas e sul-africanas, conforme proposto por Zabini *et al.* (2019).

Por fim, enfatiza-se que a compreensão da fauna do Ordoviciano-Siluriano brasileiro será significativamente enriquecida a partir do estudo taxonômico a nível específico dos grupos de invertebrados fósseis relatados neste trabalho, como trilobitas, arqueogastrópodes e bivalves da seção COHAB. A contribuição fornecida por tais trabalhos possibilitaria a ampliação do conhecimento acerca dos contextos paleoecológico, paleoambiental e paleobiogeográfico de Gondwana.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADÔRNO, R.R. **Estudo cronobioestratigráfico da formação Vila Maria: litoestratigrafia e paleontologia do limite ordoviciano-siluriano da bacia do Paraná, estados de Goiás e de Mato Grosso, Brasil central**. 2014. Dissertação (Mestrado em Geologia) — Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

ADÔRNO, R. R.; DO CARMO, D. A.; SALAS, M. J.; ZABINI, C.; ASSINE, M. L. The earliest Ostracoda record from Brazil: Vila Maria Formation, Rio Ivaí Group, Paraná Basin, Central Brazil. **Revista Brasileira de Paleontologia**, v. 19, n. 3, p. 379–388, 19 jan. 2017.

ALVARENGA, C. S. J.; GUIMARÃES, E. M.; ASSINE, M. L.; PERINOTTO, J. A. J.; LARANJEIRA, N. P. F. Sequência Ordovício-Siluriana e Devoniana no Flanco Norte da Bacia do Paraná. **Anais da Academia Brasileira de Ciência**, [s. l.], v. 70, n. 3, p. 587-606, 23 mar. 1998.

ANDRADE, S. M.; CAMARÇO, P. E. N. Estratigrafia dos sedimentos devonianos do flanco nordeste da Bacia do Paraná. In: Congresso Brasileiro de Geologia 31, 1980, Camboriú, **Anais...** Camboriú, SBG, v.5, p. 2828-2836, 1980.

AROUCA, F. O.; FURTADO-CARVALHO, A. B.; GOMES, A. L. S.; RODRIGUES, L. C. S.; ZABINI, C. Distribuição Estratigráfica de Paleoinvertebrados e Palinomorfos das Formações Iapó e Vila Maria, Ordovício-Siluriano da Bacia do Paraná. In: V Simpósio Brasileiro de Paleoinvertebrados. Recife, Brasil. **Boletim de Resumos**, p. 16, 2023.

ASTINI, R. A.; BENEDETTO, J. L. El Ashgilliano tardío (Hirnantiano) del cerro La Chilca, Precordillera de San Juan, Argentina. **Ameghiniana**, v. 29, n. 3, p. 249-264, 1992.

ASSINE, M. L.; SOARES, P. C.; MILANI, E. J. Sequências Tectono-Sedimentares Mesopaleozóicas da Bacia do Paraná, Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, [s. l.], v. 24, ed. 2, p. 77-89, Junho 1994.

ASSINE, M. L.; ALVARENGA, C. J. S.; PERINOTTO, J. A. J. Formação Iapó: Glaciação Continental no Limite Ordoviciano/Siluriano da Bacia do Paraná. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 28, n. 1, p. 51–60, 1998.

ASSINE, M. L.; SOARES, P. C. Correlações nas Sequências Mesopaleozoicas da Bacia do Paraná. **Acta Geologica Leopoldensia**, v.12, p.39-48, 1989.

BASSETT, M. G.; POPOV, L. E.; ALDRIDGE, R. J.; GABBOTT, S. E.; THERON, J. N. Brachiopoda from the Soom Shale Lagerstätte (Upper Ordovician, South Africa). **Journal of paleontology**, v. 83, n. 4, p. 614–623, 2009.

BENEDETTO, J. L. The First Typical *Hirnantia* Fauna from South America (San Juan Province, Argentina Precordillera). In: RACHEBOEUF, P. R.; EMIG, C. C. (Ed.). **Biostratigraphie du Paléozoïque**, v. 4, p. 439-447, 1986.

BENEDETTO, J. L. Los géneros *Cliftonia* y *Paromalomena* (Brachiopoda) en el Ashgilliano tardío de la Sierra-de Villicúm, Precordillera de San Juan, Argentina. **Ameghiniana**, v. 27, n. 1-2, p. 141-150, 1990.

BENEDETTO, J. L.; HALPERN, K.; GALEANO INCHAUSTI, J. C. High-latitude Hirnantian (latest Ordovician) brachiopods from the Eusebio Ayala Formation of Paraguay, Paraná Basin: HIRNANTIAN BRACHIOPODS FROM PARAGUAY. **Palaeontology**, v. 56, n. 1, p. 61–78, 2013.

BENEDETTO, J. L.; HALPERN, K.; SUSANA DE LA PUENTE, G.; MONALDI, C. R. An in situ shelly fauna from the lower Paleozoic Zapla diamictite of northwestern Argentina: Implications for the age of glacial events across Gondwana. **Journal of South American earth sciences**, v. 64, p. 166–182, 2015.

BORGHI, L.; MOREIRA, M. I. C. Sucessões sedimentares pré-devonianas da bacia do Paraná na Chapada dos Guimarães, Estado de Mato Grosso. **Anais da Academia brasileira de Ciências**, v. 68, n. 276, 1996a.

BORGHI, L.; MOREIRA, M. I. C. A ocorrência inédita do Sistema Ordoviciano na Bacia do Paraná, em afloramentos de seu bordo noroeste. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 39, Salvador, 1996. **Anais...** Salvador, v.1, p.145-147, 1996b.

BORGHI, L.; MOREIRA, M. I. C. Aspectos petrológicos dos diamictitos das formações Iapó e Vila Maria (Bacia do Paraná). In: Congresso Brasileiro de Geologia, 39, Salvador, 1996. **Anais...** Salvador, v.1, p. 149-151, 1996c.

BORGHI, L.; MOREIRA, M. I. C. O limite das formações Alto Garças (Ordoviciano) e Vila Maria (Siluriano), na borda Noroeste da bacia do Paraná. In: Simpósio sobre Cronoestratigrafia da Bacia do Paraná, 3, Barra do Garças, MT. **Boletim de Resumos Expandidos...** Rio de Janeiro, Faculdade de Geologia da Uerj-Editora da Uerj, p. 4-5, 1997.

BORGHI, L.; MOREIRA, M. I. C. Contribuição ao conhecimento do Paleozoico Inferior da bacia do Paraná: mapeamento geológico da região Oriental de Chapada dos Guimarães, Estado de Mato Grosso. **A Terra em Revista**, vol. 4, p. 22-31, 1998a.

BORGHI, L.; MOREIRA, M. I. C. Um possível intervalo estratigráfico sob a Formação Alto Garças (bacia do Paraná), no Estado de Mato Grosso. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**. v. 70, n. 152, 1998b.

- BOSETTI, E. P.; HORODYSKI, R. S.; ZABINI, C.; MATSUMURA, W. M. K.; PENTEADO, A. C. Ocorrência de fenótipos subnormais no limite Neoeifeliano/Eogivetiano, Tibagi, estado do Paraná: implicações tafonômicas e paleossinecológicas. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi-Ciências Naturais**, v. 5, n. 2, p. 135-149, 2010.
- BOSETTI, E. P.; GRAHN, Y.; HORODYSKI, R. S.; MAULLER, P. M.; BREUER, P.; ZABINI, C. An earliest Givetian “Lilliput Effect” in the Paraná Basin, and the collapse of the Malvinokaffric shelly fauna. **Palaontologische Zeitschrift**, v. 85, n. 1, p. 49–65, 2011.
- BOSETTI, E. P.; GRAHN, Y.; HORODYSKI, R. S.; MAULLER, P. M. The first recorded decline of the Malvinokaffric Devonian fauna in the Paraná Basin (southern Brazil) and its cause; taphonomic and fossil evidences. **Journal of South American earth sciences**, v. 37, p. 228–241, 2012.
- BRAMBLETT, J. L.; GAUDIN, T. J.; HECKERT, A. B.; TORAN, M. L. Using polymer clays to make molds and casts of fossils for teaching and outreach. In: **80th Annual Meeting of ASB**, Memphis, Tennessee, 2019.
- BURJACK, M. I. D. A.; POPP, M. T. B. A ocorrência do icnogênero *Arthropycus* no Paleozoico da Bacia do Paraná. **Pesquisas em Geociências**, v. 14, n. 14, p. 163-168, 1981.
- CARBONARO, F. A.; GHILARDI, R. P. Fósseis do Devoniano de Goiás, Brasil (Sub-Bacia Alto Garças, Bacia do Paraná). **Papéis Avulsos de Zoologia**, v. 56, n. 11, p. 135–149, 2016. <https://doi.org/10.11606/0031-1049.2016.56.11>.
- CARBONARO, F. A.; COMNISKEY, J. C.; CORRAL, H. S.; GHILARDI, R. P. *Orbiculoidea baini* e *Orbiculoidea excentrica* (Brachiopoda, Discinidae) do Devoniano Médio (Sub-bacia Alto Garças, Bacia do Paraná) de Caiapônia, Goiás (Brasil). **Geologia USP. Série Científica**, v. 18, n. 4, p. 11–20, 2018 <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v18-137847>.
- CHEN, X.; RONG, J.; FAN, J.; ZHAN, R.; MITCHELL, C. E.; HARPER, D. A.; MELCHIN, M. J.; PENG, P.; FINNEY, S. C.; WANG, X. The Global Boundary Stratotype Section and Point (GSSP) for the base of the Hirnantian Stage (the uppermost of the Ordovician System). **Episodes Journal of International Geoscience**, v. 29, n. 3, p. 183–196, 2006. <https://doi.org/10.18814/epiugs/2006/v29i3/004>.
- COCKS, L. R. M.; BRUNTON, C. H. C.; ROWELL, A. J.; RUST, I. C. The first Lower Palaeozoic fauna proved from South Africa. **Q. Jl. Geol. Soc. Lond.**, v. 125, p. 583-603, 1970.

- COCKS, L. R. M.; COOPER, R. A. Late Ordovician (Hirnantian) shelly fossils from New Zealand and their significance. **New Zealand journal of geology and geophysics**, v. 47, n. 1, p. 71–80, 2004.
- COCKS, L. R. M.; FORTEY, R. A. New evidence on the South African Lower Palaeozoic: age and fossils reviewed. **Geological Magazine**, v. 123, n. 4, p. 437–444, 1986.
- COMNISKEY, J. C.; BOSETTI, E. P. Discinoids of the Malvinokaffric Realm: Stratigraphic, Paleogeographical Distribution and Systematic Review. **Terr@Plural**, v. 11, n. 2, p. 175–192, 2017.
- COMNISKEY, J. C.; BOSETTI, E. P. , HORODYSKI, R. S. Aspectos tafonômicos e o Efeito Lilliput em discinoideos do Devoniano da Bacia do Paraná, Sub-bacia Apucarana, Brasil. **Gaea - Journal of Geosciences**, v. 9, n. 1, p. 55–64, 2016. <https://doi.org/10.4013/gaea.2016.91.05>.
- CORRÊA, L. F. A.; RAMOS, M. I. F. Discinoids (Brachiopoda: Lingulata) from the upper Manacapuru Formation (Early Devonian), south border of Amazonas Basin, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 105, n. 102960, 2021 <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102960>.
- DALMAN, J. W. Upställning och Beskrifning af de i Sverige funne Terebratuliter. Kongliga Vewtenskasakademien Handlingar för År 1827, p.85–155, 1828.
- DELABROYE, A.; VECOLI, M. The end-Ordovician glaciation and the Hirnantian Stage: a global review and questions about Late Ordovician event stratigraphy. **Earth-Science Reviews**, v. 98, n. 3–4, p. 269–282, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2009.10.010>.
- DE MELO, G.; SIQUEIRA, D. Position of the Malvinokaffric Realm's northern boundary (Early Devonian) based on newly discovered brachiopods from the Parecis Basin (Brazil). **Journal of Geosciences**, v. 46, n. 3–4, p. 109–120, 2001.
- DEMSKI, M. W.; WHEADON, B. J.; STEWART, L. A.; ELIAS, R. J.; YOUNG, G. A.; NOWLAN, G. S.; DOBRZANSKI, E. P. Hirnantian strata identified in major intracratonic basins of central North America: implications for uppermost Ordovician stratigraphy. **Canadian journal of earth sciences**, v. 52, n. 1, p. 68–76, 2015.
- DESJARDINS, P. R.; MÁNGANO, M. G.; BUATOIS, L. A.; PRATT, B. R. *Skolithos* pipe rock and associated ichnofabrics from the southern Rocky Mountains, Canada: colonization trends and environmental controls in an early Cambrian sand-sheet complex: Early Cambrian *Skolithos* pipe rock. **Lethaia**, v. 43, n. 4, p. 507–528, 2010.

DUMÉRIL, A. M. **Zoologie analytique: ou méthode naturelle de classification des animaux, rendue plus facile à l'aide de tableaux synoptiques**. Allais, 1805.

FARIA, A. D. Formação Vila Maria-nova unidade litoestratigráfica siluriana da Bacia do Paraná. **Ciências da Terra**, v. 3, p. 12-15, 1982.

FARIA, A. D.; FUCK, R. A.; VELOSO, J. A. V.; HIRSON, J. R.; ANDRADE, G. F.; FONSECA, M. R. C. B. **Projeto Piranhas** - Convênio DNPM/FUB, 1975.

FARIA, A. D.; REIS-NETO, J. M. Nova unidade litoestratigráfica pré-Furnas no sudoeste de Goiás. In: XXX Congresso Brasileiro de Geologia. Recife, Brasil. **Boletim de Resumos**, p. 136–137, 1978.

FURTADO-CARVALHO, A. B.; AROUCA, F. O.; GOMES, A. L. S.; DENEZINE, M.; MUÑOZ, D. F.; ZABINI, C. Primeira Ocorrência de *Dalmanella* (Brachiopoda: Rhynchonelliformea) na Formação Iapó, Hirnantiano (Ordoviciano Superior) da Bacia do Paraná. In: V Simpósio Brasileiro de Paleoinvertebrados. Recife, Brasil. **Boletim de Resumos**, p. 24, 2023.

GABBOTT, S. E.; BROWNING, C.; THERON, J. N.; WHITTLE, R. J. The late Ordovician Soom Shale Lagerstätte: an extraordinary post-glacial fossil and sedimentary record. **Journal of the Geological Society**, v. 174, n. 1, p. 1–9, 2017.

GHAVIDEL-SYOOKI, M.; ÁLVARO, J. J.; POPOV, L.; POUR, M. G.; EHSANI, M. H.; SUYARKOVA, A. Stratigraphic evidence for the Hirnantian (latest Ordovician) glaciation in the Zagros Mountains, Iran. **Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology**, v. 307, n. 1-4, p. 1–16, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2011.04.011>.

GHILARDI, R. P. **Paleoautoecologia dos bivalves do Grupo Passa Dois (Neopermiano), no Estado de São Paulo: bivalves fósseis como indicadores da dinâmica sedimentar**. 1999. Dissertação (Mestrado em Geologia Sedimentar). Universidade de São Paulo, 1999.

GOMES, A. L. S.; FURTADO-CARVALHO, A. B.; AROUCA, F. O.; DENEZINE, M.; ZABINI, C. Tafonômica ou Aleatória: Técnicas de coleta e seus objetivos. In: II Simpósio Brasileiro de Tafonomia. Porto Alegre, Brasil. **Livro de Resumos**, p. 24, 2023.

GONÇALVES, L.; DO CARMO, D.; SALAS, M. J.; ADÔRNO, R. R.; MEIDLA, T.; DENEZINE, M.; RODRIGUES, L. C. S.; ASSINE, M. L.; ANTONIETTO, L. The first record of Hirnantian Ostracoda in South America: Implications for the biostratigraphy and paleozoogeography of the Paraná basin. **Journal of Paleontology**, v. 96, n. 2, p. 323–333, 2022. <https://doi.org/10.1017/jpa.2021.87>.

- GRAHN, Y. Chitinozoan biostratigraphy of the pre-Carboniferous sequences of the Parana Basin. Rio de Janeiro: **PETROBRAS. CENPES**. 1989. 23 p., il. (Relatorio interno).
- GRAHN, Y. The Ordovician-Devonian biostratigraphy of Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciência**. Resumo das Comunicações, p. 94, 1991.
- GRAHN, Y. Revision of Silurian and Devonian strata of Brazil. **Palynology**, v. 16, n. 1, p. 35–61, 1992a.
- GRAHN, Y. Ordovician Chitinozoa and Biostratigraphy of Brazil. **Geobios**, v. 25, n. 6, p. 703-723, 1992b.
- GRAHN, Y.; CAPUTO, M. V. Early Silurian glaciations in Brazil. **Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology**, v. 99, n. 1–2, p. 9–15, 1992.
- GRAHN, Y.; PEREIRA, E.; BERGAMASCHI, S. Silurian and lower devonian chitinozoan biostratigraphy of the paraná basin in brazil and Paraguay. American Association of Stratigraphic Palynologists. **Palynology**, v. 24, n. 1, p. 147–176, 2000.
- GRAY, J.; COLBATH, G. K.; FARIA, A.; BOUCOT, A. J.; ROHR, D. M. Silurian-age fossils from the Paleozoic Paraná Basin, southern Brazil. **Geology**, v. 13, n. 7, p. 521, 1985.
- GRAY, J.; BOUCOT, A. J.; GRAHN, Y.; HIMES, G. A new record of early Silurian land plant spores from the Paraná Basin, Paraguay (Malvinokaffric Realm). **Geological magazine**, v. 129, n. 6, p. 741–752, 1992.
- HALL, J.; CLARKE, J. M. **An introduction to the study of the genera of Palaeozoic Brachiopoda**. Natural History of New York, Palaeontology. Volume 8, Part 1. Albany: New York Geological Survey, C. van Benthuysen & Sons, 1892, pp. 394.
- HARPER, D. A. T.; RASMUSSEN, C. M. Ø.; LILJEROTH, M.; BLODGETT, R. B.; CANDELA, Y.; JIN, J.; PERCIVAL, I. G.; RONG, J.; VILLAS, E.; ZHAN, R. Biodiversity, biogeography and phylogeography of Ordovician rhynchonelliform brachiopods. In: HARPER, D. A. T.; SERVAIS, T. (eds) 2013. **Early Palaeozoic Biogeography and Palaeogeography**. Geological Society, London, Memoirs, v. 38, n. 1, p. 127-144, 2013.
- HARPER, D. A. T.; HINTS, L. Hirnantian (Late Ordovician) brachiopod faunas across Baltoscandia: A global and regional context. **Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology**, v. 444, p. 71–83, 2016.
- HAVLIČEK, V. Brachiopodes de l'Ordovicien du Maroc. **Notes et Mémoires du Service géologique du Maroc**, v. 230, p. 1-135, 1971.
- HAVLIČEK, V.; MASSA, D. Brachiopodes de l'Ordovicien supérieur de Libye occidentale implications stratigraphiques régionales. **Geobios**, v. 6, n. 4, p. 267-290, 1973.

- HINTS, L.; PÄRNASTE, H.; GAILITE, L. Hirnantia sagittifera (Brachiopoda) and Mucronaspis mucronata sl (Trilobita) in the Upper Ordovician of the East Baltic: taxonomy and distribution. **Estonian Journal of Earth Sciences**, v. 61, n. 2, p. 65, 2012.
- HINTS, L.; HARPER, D. A. T.; PAŠKEVIČIUS, J.. Diversity and biostratigraphic utility of Ordovician brachiopods in the East Baltic. **Estonian Journal of Earth Sciences**, v. 67, n. 3, p. 176-191, 2018.
- HOLZ, M; SIMÕES, M. G. **Elementos fundamentais de tafonomia**. Porto Alegre: Ed. Universidade, 2002 p. 231.
- JIN, J.; BERGSTRÖM, J. True *Dalmanella* and taxonomic implications for some Late Ordovician dalmanellid brachiopods from North America. **GFF**, v. 132, n. 1, p. 13–24, 2010.
- LANDING, E.; MOHIBULLAH, M.; WILLIAMS, M. First Middle Ordovician ostracods from western Avalonia: paleogeographical and paleoenvironmental significance. **Journal of paleontology**, v. 87, n. 2, p. 269–276, 2013.
- LARANJEIRA, N. P. F.; MELO, J. H. G.; PEREIRA, E. New palynological dating of the Vila Maria Formation (Silurian, Paraná Basin) in southwestern Goiás State, west-central Brazil. In: 3° Simpósio Sobre Cronoestratigrafia da Bacia do Paraná. **Abstract Volume**, p. 4–5, 1997.
- LEONE, M. F.; BENEDETTO, J. L. The Brachiopod *Dalmanella testudinaria* across the End Ordovician Extinction Event in the Cuyania Terrane of Western Argentina. **Ameghiniana**, v. 56, n. 3, p. 228-242, 2019.
- MAACK, R. 1947. Breves notícias sobre a geologia dos estados do Paraná e Santa Catarina. **Curitiba, Arquivos de Biologia e Tecnologia (IBPT)**, v. 11, p. 63–154.
- MEIDLA, T. Ostracods from the upper Ordovician borenschult fauna, Sweden. **GFF**, v. 129, n. 2, p. 123–132, 2007.
- MEIDLA, T.; TRUUVER, K.; TINN, O.; AINSAAR, L. 2020. Ostracods of the Ordovician-Silurian boundary beds: Jūrmala core (Latvia) and its implications for Baltic stratigraphy. **Estonian Journal of Earth Sciences**, v. 69, n. 4, 2020. <https://doi.org/10.3176/earth.2020.20>.
- MERGL, M. New brachiopods (Cambrian-Ordovician) from Algeria and Morocco (Mediterranean Province). **Časopis pro mineralogii a geologii**, v. 28, n. 4, p. 337-348, 1983.
- MERGL, M. Dendritic microborings in brachiopod shells from the Silurian of the Barrandian area, Czech Republic. **Bulletin of Geosciences**, v. 95, n. 3, p. 319–332, 2020. <https://doi.org/10.3140/bull.geosci.1793>.

- MILANI, E. J. **Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do Gondwana sul-ocidental**. 1997. Tese (Doutorado em Geologia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.
- MILANI, E. J.; DAEMON, R. F.; ASSINE, M. L.; SOARES, P. C. A sequência ordoviciano-siluriana da Bacia do Paraná. **Boletim de Geociências da Petrobras**, 9, 1995.
- MILANI, E. J.; MELO, J. H. G.; SOUZA, P. A.; FERNANDES, L. A.; FRANÇA, A. B. Bacia do Paraná. **Boletim de Geociências da PETROBRAS**, v. 15, 2007.
- MILANI, E. J.; RAMOS, V. A. Orogenias paleozóicas no domínio sul-ocidental do Gondwana e os ciclos de subsidência da Bacia do Paraná. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 28, n. 4, p. 473-484, 1998.
- MIZUSAKI, A. M.; MELO, J. H. G.; VIGNOL-LELARGE, M. L.; STEEMANS, P. Vila Maria Formation (Silurian, Paraná basin, Brazil): integrated radiometric and palynological age determinations. **Geological Magazine**, v. 139, n. 4, p. 453-463, 2002. <https://doi.org/10.1017/S0016756802006659>.
- MOREIRA, M. I. C.; BORGHI, L. Contribuição ao conhecimento geológico da Chapada dos Guimarães, Mato Grosso: o registro do Paleozoico Inferior. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 69, n. 1, p. 139-140, 1997.
- MOREIRA, M. I. C.; BORGHI, L. Deformações glaciogênicas na Formação Vila Maria (Siluriano, bacia do Paraná). In: Congresso Brasileiro de Geologia, 40., Belo Horizonte (MG), 1998. **Anais...** Belo Horizonte, SBG, p. 98, 1998.
- MOREIRA, M. I. C.; BORGHI, L. Revisão estratigráfica do intervalo Ordoviciano-Siluriano da bacia do Paraná. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 71, n. 4-I, p. 743-766, 1999a.
- MOREIRA, M. I. C.; BORGHI, L. Fácies sedimentares e sistemas deposicionais das Formações Alto Garças e Vila Maria na região de Chapada dos Guimarães (MT), borda noroeste da Bacia do Paraná. **Brazilian Journal of Geology**, v. 29, n. 3, p. 419-428, 1999b.
- PAKHNEVICH, A. V. Micro CT investigations of Recent and fossil brachiopods. In: 6th International Brachiopod Congress. Melbourne, Australia. **Abstracts**, p. 85, 2010.
- PEMBERTON, S. G.; FREY, R. W. The *Glossifungites* ichnofacies: modern examples from the Georgia coast, U.S.A. In: Curran, H.A. (ed.), **Biogenic structures: their use in interpreting depositional environments**. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Special Publication 35, p. 237-259, 1985.

- POPP, M.; BURJACK, M. I.; ESTEVES, I. Estudo preliminar sobre o conteúdo paleontológico da Formação Vila Maria (pré-Devoniano) da Bacia do Paraná. **Pesquisas em Geociências**, v. 14, n. 14, p. 169–180, 1981. <https://doi.org/10.22456/1807-9806.21739>.
- RODRIGUES, L. C. D. S. **Taxonomia, análise da distribuição estratigráfica e do significado paleoambiental de palinomorfos das formações Iapó e Vila Maria, Grupo Rio Ivaí: Ordoviciano–Siluriano da Bacia do Paraná, estado de Goiás, Brasil**. Tese (Doutorado em Geologia). Universidade de Brasília, 2021.
- RODRIGUES, L. C.; DO CARMO, D.; ASSINE, M.; STEEMAN, P. Cryptospores of Iapó formation: The first evidence of early land plants from Late Ordovician in Paraná Basin, Brazil. **Review of Palaeobotany and Palynology**, v. 305, n. 104742, 2022.
- RONG, J.; HARPER, D. A. T. A global synthesis of the latest Ordovician Hirnantian brachiopod faunas. **Earth and Environmental Science Transactions of The Royal Society of Edinburgh**, v. 79, n. 4, p. 383–402, 1988. <https://doi.org/10.1017/S026359330001436X>.
- RONG, J.; HARPER, D. A. T.; HUANG, B.; LI, Li R.; ZHANG, X.; CHEN, D. The latest Ordovician Hirnantian brachiopod faunas: new global insights. **Earth-Science Reviews**, v. 208, n. 103280, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103280>.
- RUDWICK, M. J. S. **Living and Fossil Brachiopods**. London: Hutchinson & Co., 1970, 199 pp.
- SÁ, A. A.; PINTO DE MEIRELES, C. A.; PIÇARRA, J. M.; VAZ, N.; GUTIÉRREZ-MARCO, J. C. The Hirnantian stratigraphy of Portugal, with notes on the Trás-os-Montes and Valongo-Arouca areas. In: **Absolutely final meeting of IGCP 503: Ordovician palaeogeography and palaeoclimate**, 2009, August 31–September 4.
- SALAS, M. J.; VACCARI, N. E. New insights into the early diversification of the Ostracoda: Tremadocian ostracods from the cordillera oriental, Argentina. **Acta palaeontologica Polonica**, v. 57, n. 1, p. 175–190, 2012.
- SCHUCHERT, C. Class 2. Brachiopoda. In: K.A. von Zittel, **Textbook of Palaeontology**, v.1, 2nd Edition (translated and edited by C.R. Eastman), Macmillan, London, 355–420, 1913.
- SCHUCHERT, C.; COOPER, G. A. Brachiopod genera of the Suborders Orthoidea and Pentameroidea. **Peabody Museum of Natural History Memoir**, v. 4, n. 1, 270 pp., 1932.
- SEIDEL, R.; LÜTER, C. Overcoming the fragility—X-ray computed micro-tomography elucidates brachiopod endoskeletons. **Frontiers in zoology**, v. 11, p. 1–15, 2014.

- SEPKOSKI, J. J. Patterns of Phanerozoic extinction: a perspective from global data bases. In: **Global Events and Event Stratigraphy in the Phanerozoic: Results of the International Interdisciplinary Cooperation in the IGCP-Project 216 “Global Biological Events in Earth History”**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1996. p. 35-51.
- SERVAIS, T.; HARPER, D. A. T. The great Ordovician biodiversification event (GOBE): definition, concept and duration. **Lethaia**, v. 51, n. 2, p. 151-164, 2018.
- SHEEHAN, P. M. The late Ordovician mass extinction. **Annual Review of Earth and Planetary Sciences**, v. 29, n. 1, p. 331-364, 2001.
- SUTCLIFFE, O. E.; HARPER, D. A. T.; SALEM, A. A.; WHITTINGTON, R. J.; CRAIG, J. The development of an atypical Hirnantia-brachiopod Fauna and the onset of glaciation in the late Ordovician of Gondwana. **Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh**, v. 92, n. 1, p. 1-14, 2001.
- SUZUKI, Y.; SHIINO, Y.; BERGSTRÖM, J. Stratigraphy, carbonate facies and trilobite associations in the Hirnantian part of the Boda Limestone, Sweden. **GFF**, v. 131, n. 4, p. 299–310, 2009. <https://doi.org/10.1080/11035890903452670>.
- TABOADA, A. C.; NEVES, J. P.; WEINSCHÜTZ, L. C.; PAGANI, M. A.; SIMÕES, M. G. Eurydesma–Lyonia fauna (Early Permian) from the Itararé group, Paraná Basin (Brazil): a paleobiogeographic W–E trans-Gondwanan marine connection. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 449, p. 431-454, 2016.
- TEMPLE, J. T. The ontogeny of the trilobite *Dalmanitina olini*. **Geological Magazine**, v. 89, n. 4, p. 251-262, 1952.
- TINN, O.; MEIDLA, T.; SOHAR, K. Intraspecific variation and polymorphism in the ostracode *Conchoprimitia socialis* (Brøgger, 1882) from the early Middle Ordovician Baltoscandian Palaeobasin. **Bulletin of geosciences**, p. 603–616, 2010.
- TORSVIK, Trond H.; COCKS, L. Robin M. **Earth history and palaeogeography**. Cambridge University Press, 2016.
- TROEDSSON, G. T. Om Skanes brachiopodskiffer. **Lunds Universitets Årsskrift**, v. 15, n. 3, 110 p., 1918.
- TRUUVER, K.; MEIDLA, T. A Hirnantian deep-water refuge for warm-water ostracods in Baltoscandia. **Geological Quarterly**, v. 59, n. 4, p. 738-749, doi: 10.7306/gq.1258, 2015.
- TRUUVER, K.; MEIDLA, T.; TINN, O. End-Ordovician ostracod faunal dynamics in the Baltic Palaeobasin. **Estonian Journal of Earth Sciences**, v. 70, n. 1, p. 51–69, 2021. <https://doi.org/10.3176/earth.2021.02>.

- VANDENBROUCKE, T. R. A.; GABBOTT, S. E.; PARIS, F.; ALDRIDGE, R. J.; THERON, J. N. Chitinozoans and the age of the Soom Shale, an Ordovician black shale Lagerstätte, South Africa. **Journal of Micropalaeontology**, v. 28, n. 1, p. 53-66, 2009.
- VANNIER, J. M. C. On *Bollia delgadoi* Vannier sp. nov. **Stereo Atlas Ostracod Shells**, v. 10, p. 95-98, 1983.
- VANNIER, J. M. C. Ostracodes Palaeocopa de l'Ordovicien (Arening-Caradoc) Ibero-Armoricain. **Paleontographica Abteilung**, v. 193, p. 145–218, 1986.
- VANNIER, J. M. C.; SIVETER, D. J.; SCHALLREUTER, R. E. L. The composition and palaeogeographical significance of the Ordovician ostracode faunas of southern Britain, Baltoscandia, and Ibero-Armorica. **Palaeontology**, v. 32, p. 163-222, 1989.
- VIDEIRA-SANTOS, R.; SCHEFFLER, S. M. O Estado da Arte das Pesquisas Sobre Chonetoidea (Brachiopoda) do Devoniano da Bacia do Paraná, Brasil. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 42, n. 1, p. 329–335, 2019. http://dx.doi.org/10.11137/2019_1_329_335.
- VILLAS, E.; COLMENAR, J.; GUTIÉRREZ-MARCO, J. C.; GARCÍA-BELLIDO, D. C.; LORENZO, S.; PEREIRA, S.; ÁLVARO, J. J. The Hirnantia fauna and the correlation of the uppermost Ordovician in the Central Anti-Atlas (Morocco). In: **Proceedings of the 35th International Geological Congress, Cape Town, South Africa**. 2016.
- WANG, G.; ZHAN, R.; RONG, J.; HUANG, B.; PERCIVAL, I. G.; LUAN, X.; WEI, X. Exploring the end-Ordovician extinctions in Hirnantian near-shore carbonate rocks of northern Guizhou, SW China: A refined stratigraphy and regional correlation. **Geological Journal**, v. 53, n. 6, p. 3019–3029, 2018. <https://doi.org/10.1002/gj.3140>.
- WILLIAMS, A.; ROWELL, A. J.; MOORE, R. C. (ed.). **Treatise on Invertebrate Paleontology, Part H, Brachiopoda** (Revised). Boulder (Co) –Lawrence (Ks): Geol. Soc. Am. – Univ. Kansas Press. p. 6–57, 1996.
- ZABINI, C.; ANELLI, L. E.; LEME, J. M. First occurrence of a lingulide (brachiopoda: lingulidae) at Piauí Formation (upper carboniferous), Parnaíba basin, Brazil. **Revista Brasileira de Paleontologia**, v. 19, n. 3, p. 527-530, 2016. <https://doi.org/10.4072/rbp.2016.3.15>.
- ZABINI, C.; BOSETTI, E. P.; HOLZ, M. Taphonomy and taphofacies analysis of lingulid brachiopods from Devonian sequences of the Paraná Basin, Brazil. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 292, n. 1-2, p. 44-56, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2010.03.025>.

ZABINI, C.; COMNISKEY, J. C.; BOSETTI, E. P. John Mason Clarke e os lingulídeos e discinídeos dos estratos devonianos da Bacia do Paraná, estado do Paraná, Brasil estado da arte. **Terr@ Plural**, v. 7, p. 43-58, 2013.

ZABINI, C.; DENEZINE, M.; RODRIGUES, L. C. S.; GONÇALVES, L. R. O.; ADÔRNO, R. R.; DO CARMO, D.; ASSINE, M. L. Fossil diversity and taphonomy of glacial and post-glacial lower paleozoic strata, NE Paraná Basin, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 111, p. 103470, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103470>.

ZABINI, C.; FURTADO-CARVALHO, A. B.; DO CARMO, D.; ASSINE, M. L. A new discinoid *Kosoidea australis* sp. nov. from the Iapó and Vila Maria Formations, NE Paraná Basin, Brazil. **Historical Biology**, v. 33, n. 4, p. 534-542, 2019. <https://doi.org/10.1080/08912963.2019.1648447>.

ZABINI, C.; GHILARDI, R. P.; AROUCA, F. O.; GOMES, A. L. S.; FURTADO-CARVALHO, A. B. Oldest Trilobite Record from the Paraná Basin, Brazil. In: V Simpósio Brasileiro de Paleoinvertebrados. Recife, Brasil. **Boletim de Resumos**, p. 12, 2023.

ZALÁN, P. V.; WOLFF, S.; CONCEIÇÃO, J. C. D. J.; VIEIRA, I. S.; ASTOLFI, M. A. M. (1987). A divisão tripartite do Siluriano da Bacia do Paraná. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 17, n. 3, p. 242–252, 1987.

ANEXO I. ARTIGO DE REVISÃO HISTÓRICA

Journal of the Geological Survey of Brazil vol 7, Special Issue 2 (Brazilian fossiliferous sites), 5-13, November 2024

Journal of the Geological Survey of Brazil



Geological heritage of the Três Barras Farm section, Ordovician-Silurian record in the Paraná Basin, Brazil

Ana Beatriz Furtado-Carvalho¹, Rodrigo Rodrigues Adorno², Lívia Cardoso da Silva Rodrigues¹, Carolina Zabini³¹UNICAMP, Institute of Geoscience, Geoscience Graduate Program, Campinas, SP, Brazil, CEP: 13083-855.²CGA - Center of Applied Geosciences, Geological Survey of Brazil, Brasília, DF, Brazil, CEP: 70.040-904.³UNICAMP, Institute of Geoscience, Department of Geology and Natural Resources, Campinas, State of São Paulo, Brazil, CEP: 13083-855.

Abstract

The Três Barras Farm section is an outcrop located at the northern edge of the Paraná Basin, in Midwest Brazil. Rocks from the Ordovician-Silurian period are found in this section, represented by the Iapó and Vila Maria formations of the Rio Ivaí Group, which lie directly on the crystalline basement. Devonian rocks of the Furnas Formation are also visible at the top of the section. Although the first fieldwork was conducted there in 1985, the site has been visited by multiple generations of researchers, often for paleontological studies. The fossil record in this section includes invertebrates such as mollusks and brachiopods, mineralized microfossils like ostracods, and palynomorphs such as acritarchs and cryptospores. Analyses conducted up until the 2000s suggested a Lower Silurian age for the complete strata of the Vila Maria Formation, with no invertebrate fossils reported. However since then, knowledge about the Rio Ivaí Group and the Três Barras Farm section has advanced. Recent studies have challenged the previously assigned Silurian age, with fossil ostracods and brachiopods indicating a Hirnantian age for the upper Iapó and lower Vila Maria formations. Recent palynological research has also reported the presence of palynomorphs in the Iapó Formation for the first time, supporting interpretations of a post-glacial paleoenvironment. Despite these advances, significant knowledge gaps remain regarding the palaeobiodiversity of the Iapó and Vila Maria formations, particularly considering recent discoveries at the Três Barras Farm. This site, located in a remote area, preserves the transition of Late Ordovician strata to Early Silurian ones, enabling studies on Lower Palaeozoic speciation and on the impact of a major glaciation on the biota. Preservation measures include sharing directions and mapping routes to the section, as well as raising awareness among the non-scientific community about its importance.

Article Information

Publication type: Research Papers
Received 15 May 2024
Accepted 29 August 2024
Online pub. 30 August 2024
Editor: R. S. Horodyski and H. Araújo Jr.

Keywords:

Rio Ivaí Group
Gondwana
Hirnantian
Llandovery
Vila Maria Formation
Iapó Formation

*Corresponding author
Ana Beatriz Furtado Carvalho
E-mail address:
abfurtadocarvalho@gmail.com

1. Introduction

The Ordovician (485.4 My - 443.8 My) is known for its rising palaeobiodiversity. Many fossil invertebrates such as graptolites, conodonts, and brachiopods are distinctive from this period. Palynomorphs like chitinozoans and acritarchs are as biostratigraphically useful as invertebrates (Delabroye and Vecoli 2010). While the Ordovician-Silurian (O-S) boundary is recognized by a mass extinction event related to a global glaciation, which led to the death of about 72% of

marine genera (Stanley 2016), the Early Silurian (443.8 My - 433.4 My) fossil record shows again an increase in diversity and the thriving of new biological species.

Many Ordovician-Silurian fossiliferous sites in Gondwana exhibit these diversity patterns and have been specially studied in the search for palynomorphs and fossil invertebrates. This is the case for Ordovician chitinozoans from the Central Andean Basin, northwest Argentina. In this area, researchers have found chitinozoans from Tremadocian (Early Ordovician) to Hirnantian (Late Ordovician) layers, which have helped the



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.

ISSN: 2595-1939

<https://doi.org/10.29396/jgsb.2024.v7.SI2.4>Open access at <https://jgsb.sgb.gov.br>

recognition of Time Slices and determination of the age of such assemblages (Puente and Rubinstein 2007). These studies also have palaeogeographic importance since chitinozoan zones are recognized worldwide.

Likewise, well-preserved brachiopods are found in the Hirnantian (Late Ordovician, 445.2 My - 443.8 My) and Rhuddanian (Early Silurian, 443.8 My - 440.8 My) strata in the Argentine Precordillera (Benedetto 1986; Benedetto and Cocks 2009). The fossil record showed similarity to the assemblages recovered in different paleocontinents, such as Laurentia and Baltica, supporting the widespread distribution of these organisms during the Late Ordovician and Early Silurian. More recently, Benedetto et al. (2013) proposed a sea connection between South America and North Africa based on the shared occurrence of brachiopod taxa of the Late Ordovician *Hirnantia* fauna.

Although there is extensive literature on the Ordovician-Silurian record from northern Argentina and surrounding areas in South America, more is needed about the assemblages in higher paleolatitudes, such as the one recovered from the O-S sedimentary layers in Brazil. The O-S rocks collectively known as the Rio Ivaí Group represent the oldest strata of the Paraná Basin, Brazil, and outcrop at its north, northwestern, and southeastern borders (Assine et al. 1994; Milani et al. 2007).

The study of the Rio Ivaí Group began in the late 1940s, with the first formal description of a Pre-Devonian geologic unit in the Paraná Basin (Maack 1947). Some of the O-S outcropping sites have a long research history, which dates

back to the work of Faria (1982) at the north margin of the basin. This paper aims to present the study history of the Três Barras Farm section, a significant site of the Ordovician-Silurian strata at the northern border of the Paraná Basin.

This work addresses the historic paleontological discoveries at the Três Barras Farm section and how they contributed to advancing the chronobiostratigraphic positioning of the Rio Ivaí Group. It introduces present-day location maps indicating the coordinates and an updated lithostratigraphic profile with the positioning of the fossiliferous occurrences identified to date. Ultimately, it considers the vulnerability aspects and suggests preservation measures for this important O-S paleontological section.

2. The Rio Ivaí Group

The Paraná Basin is the largest sedimentary basin of South America, comprising almost 1.4 million km². It occupies the territories of mid-southern Brazil, eastern Paraguay, northeastern Argentina, and northern Uruguay, with its axis oriented towards NNE-SSW. The volcano-sedimentary sequence ranges from the Ordovician to the Cretaceous and it is composed of six allostratigraphic units, the oldest one being with the Rio Ivaí Group of Ordovician-Silurian age (Milani et al. 2007) (Fig. 1).

Three units compose the Rio Ivaí Group: the Alto Garças Formation (Upper Ordovician), the Iapó Formation (Upper Ordovician), and the Vila Maria Formation (Upper Ordovician/

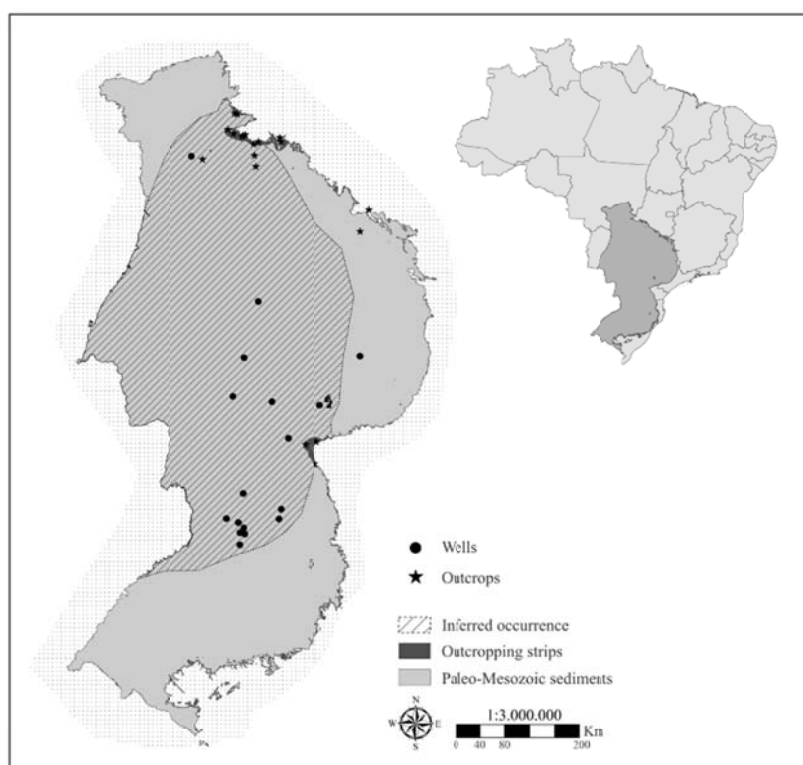


Figure 1. Simplified geologic map of the Paraná Basin in Brazil. The outcropping strips of the Rio Ivaí Group are represented in dark grey, at the northern and southeastern borders of the basin. The inferred occurrence is based on the isopach map (Milani et al. 1995).

Lower Silurian) (Assine et al. 1994; Adorno et al. 2016). The age of these units was obtained through the radiometric and palynological study of the Vila Maria Formation (Gray et al. 1985; Grahn et al. 2000; Mizusaki et al. 2002) and lithostratigraphic correlation of the O-S units with the Paraguayan portion of the Paraná Basin (Assine and Soares 1989; Assine et al. 1994).

The Rio Ivaí Group represents the first transgressive-regressive cycle of the Paraná Basin (Assine et al. 1994; Milani et al. 2007). The oldest unit, the Alto Garças Formation, comprises white to reddish conglomerates at its base, with quartz pebbles and feldspathic sandy matrix, and predominantly conglomeratic sandstones at its top. Its thickness is variable, although no values greater than thirty meters were found, and the vertical profile shows ascending fining-up. Medium to fine sandstones with hummocky cross-stratification can be found at the uppermost layers, suggesting coastal marine conditions (Assine et al. 1994). This unit does not occur at the Três Barras Farm section.

Despite its wide geographic distribution, the Iapó Formation rarely exceeds a twenty-meter thickness and has a discontinuous record. The unit comprises reddish diamictites and conglomerates at its base, often intercalated with sandstones. These beds occasionally exceed ten meters. In complete sections, the upper portion exhibits mudstones or shales with dropstones. The presence of dropstones suggests that these are glacial or glacially-influenced sediments (Assine et al. 1994, 1998).

The Iapó and Vila Maria formations are often observed in gradational contact, and the contact between them is generally characterized as transitional. The Vila Maria Formation shows fossiliferous grey shales at its base, which may be present as mudstones in some localities. These beds show no dropstones. The upper portion is defined by fine, well-sorted, muscovite-bearing sandstones and siltstones, which present cross-stratification and wave-generated truncated lamination, indicating a marine depositional environment (Assine et al. 1994).

These formations outcrop at different localities at the northern border of the Paraná Basin, in midwest Brazil. Various sections have been reported since the 1980s when Faria (1982) first described the Vila Maria Formation and studied what are now classical sites of the Ordovician-Silurian interval in the Paraná Basin. The Três Barras Farm section is one of these classical sites (Figs. 2-3) that has been revisited and analyzed by different generations of researchers over the decades. It is located on the private property called Três Barras Farm, south of Bom Jardim de Goiás town and west of Piranhas town by the unpaved road GO-188 and then by an unnamed road that connects Piranhas to Bom Jardim de Goiás.

The Três Barras Farm section (UTM coordinates: zone 22 K, 382877 E and 8181679 N, datum WGS84) is 26.5 meters thick, in which the Iapó Formation represents the first 6.95 meters, laying directly over the crystalline basement. The Alto Garças Formation cannot be found at this outcrop. The basal portion of the section is composed of conglomerates

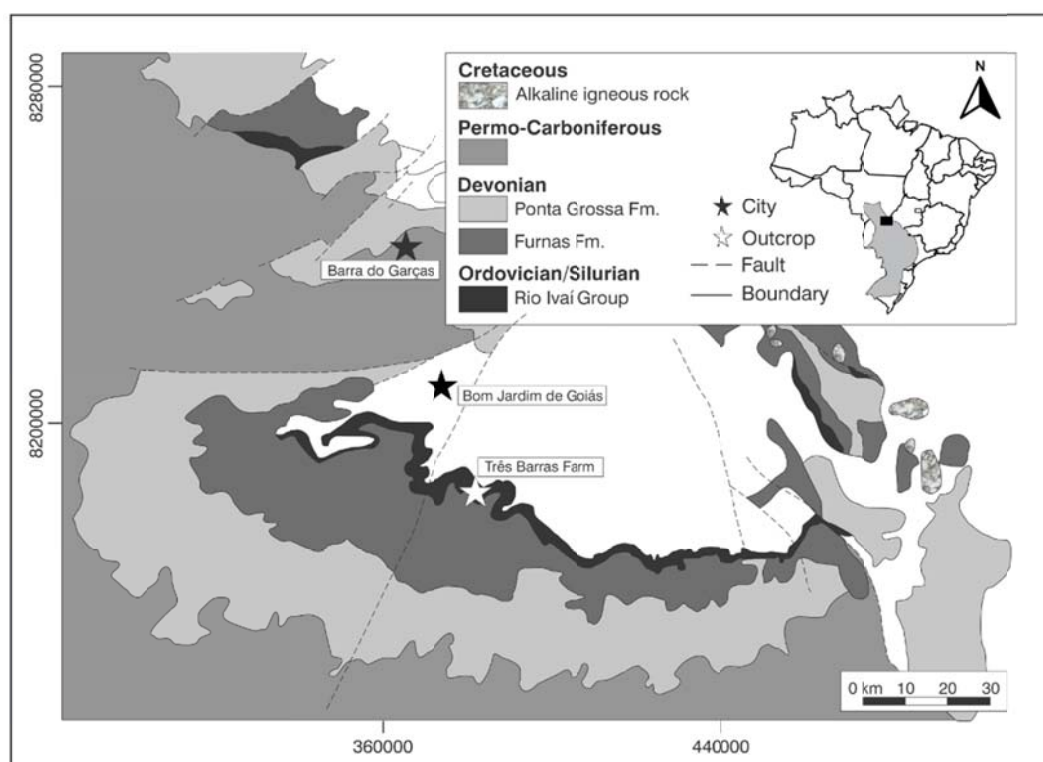


Figure 2. Geological map of the northern border of the Paraná Basin. The white star indicates the Três Barras Farm section (adapted from Adorno et al. 2016).

with siltstone lenses at 2.6 meters from the base, followed by a package of sandstones with conglomeratic levels between 2.6 and 6.4 meters and shales with dropstones up to 6.95 meters. The Vila Maria Formation overlays the lapó unit and comprises three primary lithologies. The first 4.5 meters are represented by fossiliferous dark shales, followed by a 6-meter-package of muscovite-bearing siltstone. The last 9 meters are represented by fine pinkish sandstones, where trace fossils can occasionally be found. The Furnas Formation is a Devonian unit that overlays the Vila Maria Formation in disconformity. The rocks from the lapó and Vila Maria formations at Três Barras Farm are found along the banks of a stream, from where they were collected (Fig. 3).

3. Três Barras Farm: The research history

The Três Barras Farm section is in Bom Jardim de Goiás, state of Goiás, midwest Brazil. It was first described by Gray et al. (1985), who reported the first palynomorphs (acritarchs, cryptospores, and prasinophytes) of the Rio Ivai Group, recovered from the Vila Maria Formation. The section was later visited by Mizusaki et al. (2002), Zabini et al. (2019, 2021), Rodrigues et al. (2022), and Gonçalves et al. (2022).

The original description of the Três Barras Farm portrayed the Vila Maria Formation as a fourteen-meter-thick unit that overlaid the crystalline basement. Its basal diamictites were superposed by fossiliferous dark shales, reddish siltstones, and pinkish sandstones (Gray et al. 1985). Whitish, coarser sandstones overlaid the upper layers, indicating the basal sequence of the much more studied Furnas Formation, of Devonian age and fluvial origin (Fig. 4a). Although researchers agree on the marine origin of the Vila Maria Formation, its age continues a question of debate.

Previous authors proposed a Silurian age to the complete Vila Maria sequence based on the trace fossil record. The ichnospecies *Arthropycus alleghaniensis* (Harlan 1831) was documented in the upper siltstones of the Vila Maria Formation and the lowermost Furnas Formation layers (Burjack and

Popp 1981). This trace fossil is often associated with the foraging of arthropods or worms. The contact between the Vila Maria and Furnas units was originally thought to be transitional, which led authors to assume a Llandovery (Lower Silurian) age to these strata (Burjack and Popp 1981; Faria 1982). Later authors questioned the validity of such a statement, arguing that in other localities *A. alleghaniensis* is also recorded in the Ordovician, and its upper stratigraphic limit is uncertain (Gray et al. 1985).

Gray et al. (1985) published the first palynological study of the Rio Ivai Group, with samples from the Três Barras Farm section. The microfossils were recovered from the grey fossiliferous shales, a low-diversity assemblage dominated by the acritarchs *Leiosphaeridia* spp. and *Dictyotidium* sp., which together represented 94% of the specimens. Cryptospores tetrad and dyads were also found – this plant spore assemblage corresponded to an assemblage zone also documented in different localities such as interior North America, Czech Republic, and North and South Africa, placing the Brazilian Paraná Basin in a relevant position in the paleogeographic debate of the Early Silurian. The palynological research suggested a Llandovery age based on the assemblage composition, the size range, and the mean size of the tetrads (Gray et al. 1985).

Decades later, Mizusaki et al. (2002) adopted the lithological column proposed by Gray et al. (1985) and conducted a new palynological study with dark shale samples from the Três Barras Farm outcrop. Their results presented a low-diversity acritarch-prasinophyte assemblage, yet a much-diversified cryptospore record, composed of ten genera and twenty species of tetrads and dyads. This work documents the first occurrence of *Laevolancis divellomedium* (Chibrikova) Burgess and Richardson, 1991, an important criterion to distinguish Early Silurian assemblages from Late Ordovician ones (Mizusaki et al. 2002).

The authors also performed a pioneer radiometric analysis from shale samples, presenting integrated radiometric and palynological dating that indicated a Lower Silurian age.



Figure 3. Rocks from the Rio Ivai Group outcrop along the banks of a stream at the Três Barras Farm section. a. The authors work in the section searching for fossil invertebrates. b. Dark shales from the base of the Vila Maria Formation compose the creek's banks that form after the Três Barras waterfall, which gives the section its name.

The Rb-Sr isochron result (435.9 ± 7.8 Ma) was considered the depositional age of the Vila Maria Formation, which was consistent with the cryptospore Sub-zone identification, dated Rhuddanian to Early Aeronian (Mizusaki et al. 2002). However rich these results proved, the knowledge of the Rio Ivaí Group and the Três Barras Farm would evolve substantially in the following years.

Adórno (2014) provided a new description of the section in their unpublished dissertation. Their main contribution was reporting that the lapó Formation also outcropped at Três

Barras Farm (Fig. 4b). Fossil invertebrate occurrences were then reported in this section by Zabini et al. (2021), who recorded five different taxa in both lapó and Vila Maria formations, including ostracods, mollusk bivalves, and brachiopods.

Juvenile specimens of the ostracod *Satiellina paranaensis* Adórno and Salas (2016) were found pyritized and articulated, all individuals of the ostracod *Harpabollia* sp. were replaced by pyrite, while specimens of the bivalve *?Paieoneilo* sp. were found in life position. Considering these taphonomic signatures, the Três Barras Farm section fossil assemblage

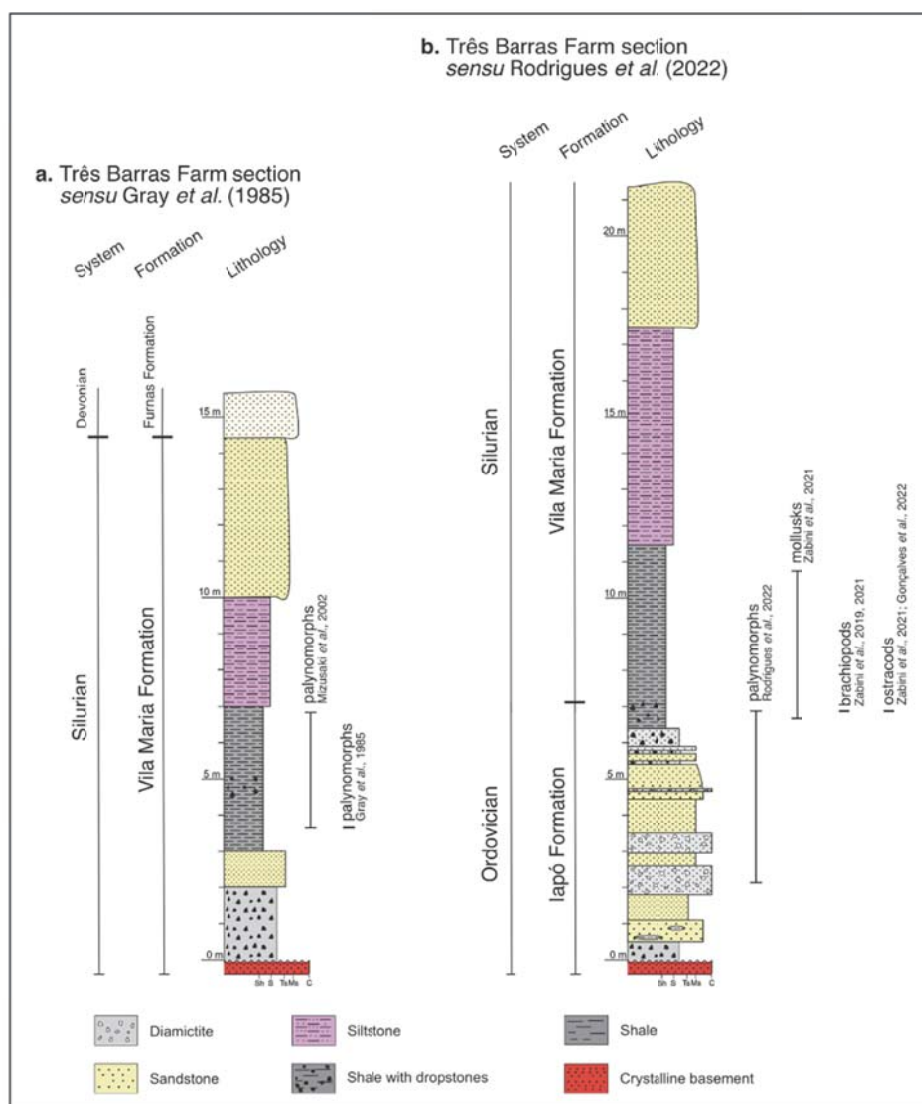


Figure 4. Stratigraphic profiles of the Três Barras Farm section proposed by different authors. a. Gray et al. (1985) described this outcrop for the first time and identified only the Vila Maria Formation of the Rio Ivaí Group. The Furnas Formation (Devonian) was not fully represented. Mizusaki et al. (2002) adopted their vertical profile. b. Rodrigues et al. (2022) developed a complete vertical profile in line with what had previously been produced by Zabini et al. (2019, 2021) and Gonçalves et al. (2022). The upper sandstones of the Vila Maria Formation were not represented. Once the transition from the lapó to the Vila Maria formations is gradual, no exact division between the Ordovician and Silurian strata is represented.

was considered autochthonous to parautochthonous. The environmental conditions could be anoxic, and individuals were probably not subjected to high-energy conditions post-mortem. The discinid brachiopod *Kosoidea australis* Zabini and Furtado-Carvalho (2019) and an unidentified rhynchonelliform (calcitic) brachiopod were also reported (Zabini et al. 2021).

In yet another argument on the age of the lapó and Vila Maria formations, the ostracod species was assigned as a strong indicator of the Hirnantian age since the genus *Satiellina* (Vannier 1986) was only recorded in Ordovician strata, and never in Silurian ones (Adorno et al. 2016). Researchers also affirmed that the palynomorph assemblages reported previously by Gray et al. (1985) and Mizusaki et al. (2002) (Table 1) did not record any age-diagnostic species (Adorno et al. 2016).

In addition to that, the discinid brachiopod *K. australis* found in the section was also referred to as an element that pointed to the Hirnantian age (Zabini et al. 2019, 2021), once the genus *Kosoidea* Havlíček and Mergl (1988) was recorded in the Hirnantian layers of the Soom Shale, Cedarberg Formation of Cape Basin in South Africa (Bassett et al. 2009). The discinid species was found at shales with dropstones, the uppermost layers of the lapó Formation at Três Barras Farm (Zabini et al. 2019, 2021).

The ostracod species *Harpabollia harparum* (Troedsson 1918), considered an indicator of the Hirnantian in Baltica (Truüver and Meidla 2015), was recovered from the shales with dropstones of the lapó Formation at the Três Barras Farm, strongly suggesting the Hirnantian age to the upper layers of the lapó unit (Gonçalves

et al. 2022). Its association with *K. australis* and *S. paranaensis* reinforces the hypothesis that these fossil invertebrates might indicate the Hirnantian in the Rio Ivaí Group strata.

Rodrigues et al. (2022), working at this same outcrop, recognized a palynomorph assemblage essentially composed of cryptospores and acritarchs that corroborated the paleoenvironmental interpretations previously proposed (Assine et al. 1998; Zabini et al. 2021). The researchers recorded an assemblage composed of 17 cryptospore species and 12 species of acritarchs and prasinophytes, the first record of palynomorphs from the lapó Formation. These taxa were also observed in localities such as China, Estonia, Canada, and Argentina, corroborating the cosmopolitan nature of the Late Ordovician palynoflora and the early radiation of land plants in Gondwana. The terrestrial input, seen by the increase in cryptospores, is recorded at the top of the lapó Formation, signaling the ice melting and proximity to the land (Rodrigues et al. 2022).

Since the first work in the Três Barras Farm section in the 1980s, much of the knowledge regarding its vertical profile (Fig. 4), the fossil record, and the units of the Rio Ivaí Group evolved. Table 1 presents all the fossil taxa recovered at the Três Barras Farm. New evidence indicates that some strata are Hirnantian, fossil invertebrates point to an offshore setting, and palynological data corroborates the post-glacial paleoenvironment. Although rich, these results do not answer all the questions regarding the topic. New studies could provide more information regarding the fossil record and the geological setting at the Três Barras Farm.

Table 1. Fossil taxa recorded in the Três Barras Farm section.

Biological Group	Taxon	Formation		Reference					
		lapó	Vila Maria	Gray et al., 1985	Mizusaki et al., 2002	Zabini et al., 2019	Zabini et al., 2021	Rodrigues et al., 2022	Gonçalves et al., 2022
Acritarch	?Dictyotidium sp.		x	x	x				
	Diexallophosis sp.		x	x	x				
	Dorsennidium sp.	x						x	
	Elektoriskos pogonius			x					
	Eupoikilofusa sp.		x		x				
	Eupoikilofusa striata	x						x	
	Evittia cf. E. dentifuculata	x						x	
	Helosphaeridium sp.	x						x	
	Leiosphaeridia sp.			x					
	Leiosphaeridia sp. A	x						x	
	Leiosphaeridia sp. B	x						x	
	Lophosphaeridium sp. A	x						x	
	Lophosphaeridium sp. B	x						x	
	?Multiplicisphaeridium sp.		x	x	x				
	Multiplicisphaeridium irregulare	x						x	
	?Pterospermella sp.		x	x	x				

continue

Table 1. Fossil taxa recorded in the Três Barras Farm section (continued)

Biological Group	Taxon	Formation		Reference					
		Iapó	Vila Maria	Gray et al., 1985	Mizusaki et al., 2002	Zabini et al., 2019	Zabini et al., 2021	Rodrigues et al., 2022	Gonçalves et al., 2022
	<i>Villosacapsula</i> cf. <i>setosapellicula</i>	x						x	
	<i>Veryhachium</i> sp.			x					
	<i>Veryhachium lairdii</i> group	x						x	
	<i>Veryhachium trispinosum</i> group	x						x	
	<i>Visbysphaera</i> n. sp.			x					
Brachiopoda	<i>Kosoidea australis</i>	x	x			x	x		
	Rhynchonelliformea	x	x				x		
Cryptospores	<i>Abditusdyadus laevigatus</i>		x		x				
	Dyads			x					
	<i>Dyadospera murusdensa</i>	x	x		x			x	
	<i>Dyadospera murusattenuata</i>	x	x		x			x	
	<i>Gneudaspora divellomedia</i>	x						x	
	<i>Imperfeciortiletes patinatus</i>		x		x				
	<i>Imperfeciortiletes vavrdovae</i>	x	x		x			x	
	<i>Laevolancis divellomedia</i>		x		x				
	<i>Laevolancis chibrikovae</i>	x						x	
	<i>Nodospora rugosa</i>		x		x				
	<i>Pseudodyadospora laevigata</i>	x	x		x			x	
	<i>Pseudodyadospora petasus</i>	x	x		x			x	
	<i>Rimosotetras problematica</i>	x	x		x			x	
	<i>Rugosphaera</i> sp. A	x						x	
	<i>Rugosphaera cerebra</i>	x						x	
	<i>Segestrespora laevigata</i>	x	x		x			x	
	<i>Segestrespora membranifera</i>		x		x				
	<i>Segestrespora rugosa</i>	x	x		x			x	
	<i>Sphaerasaccus glabellus</i>		x		x				
	Tetrahedral tetrad			x					
	<i>Tetrahedraletes</i>			x					
	<i>Tetrahedraletes grayae</i>	x						x	
	<i>Tetrahedraletes medinensis</i>	x	x		x			x	
	<i>Tetraplanarisporites laevigatus</i>	x						x	
	<i>Velatitetras anatoliensis</i>		x		x				
	<i>Velatitetras laevigata</i>	x	x		x			x	
	<i>Velatitetras retimembrana</i>		x		x				
	<i>Velatitetras rugosa</i>	x	x		x			x	
Fungi	<i>Tortotubus protuberans</i>	x						x	
Mollusca	? <i>Cuneomya</i> sp.		x				x		
	? <i>Paleoneilo</i> sp.		x				x		
Ostracoda	<i>Harpabollia harparum</i>	x					x		x
	<i>Satiellina paranaensis</i>	x					x		
Prasynophyte	<i>Tasmanites</i> sp. B	x						x	

4. Investigation potential

The age of the Iapó and Vila Maria formations has been debated since their proposition and the paleontological record plays a prominent role in this discussion, often yielding new insight. The recent findings of probable Hirnantian species raise questions about the alleged consensus that the Vila Maria Formation was entirely deposited during the Silurian (Burjack and Popp 1981; Faria 1982; Gray et al. 1985; Mizusaki et al. 2002) – rather, data point that the upper Iapó and lower Vila Maria strata are Ordovician.

In this sense, searching for other fossil organisms is paramount in determining the age of the formations. Several fossil groups are typical of the Hirnantian, such as conodonts, chitinozoans, graptolites, and brachiopods (Delabroye and Vecoli 2010). Rhynchonelliform brachiopods were reported at the Três Barras Farm section (Zabini et al. 2021), which creates an opportunity for future research on Hirnantian brachiopods. Similarly, Rodrigues et al. (2022) published the first palynomorph record from the Iapó Formation; studying these organisms in the Iapó and Vila Maria formations could provide valuable information regarding the paleoenvironment.

Furthermore, the Três Barras Farm section preserves a unique record of the Lower Paleozoic once the Late Ordovician strata transition to Early Silurian layers in this locality, documenting one of the most remarkable events in the history of the Earth. Existing research has not yet faced this topic in depth, and there is few literature comparing the fossil fauna and flora from the Hirnantian layers with the ones from Llandovery layers in Três Barras Farm. Such a study could shed light on the current understanding of speciation and the impacts of a major glaciation in a high-latitude community.

The fossil diversity at the Três Barras Farm section is also noteworthy; more than forty *taxa* have already been discovered (Table 1) and there are more to describe. Zabini et al. (2021) reported the occurrence of mollusk bivalves whose identification still needs improvement. In their unpublished work, Adorno (2014) mentions gastropod specimens in the Vila Maria strata at Três Barras Farm who lack proper taxonomical study.

New fossil *taxa* recovered were compared to those reported in different, coeval basins. Adorno et al. (2016) reported ostracods similar to the ones found in the north of Africa, while Zabini et al. (2019) described a new species whose genus also occurs in Hirnantian strata in South Africa. Likewise, Gonçalves et al. (2022) reported the Hirnantian *Harpabollia harparum*, which is also found in the Argentinean Precordillera and Baltica, and the cryptospore assemblage published by Rodrigues et al. (2022) is similar to the ones reported in China, Estonia, and Argentina. A comparative study between faunas could help elucidate the connection between ancient oceans and seas.

The fossil record at Três Barras Farm section has not yet been comprehensively researched. There are still some gaps concerning the age of the units, the fossil diversity, and the relationship between the record seen in Paraná Basin and coeval basins. Facing the amount of work that still needs to be done, this paper also aims to draw attention to the scientific questions that could be explored at the Três Barras Farm and, hopefully, call up researchers willing to explore them.

5. Recommended preservation and educational measures

The Três Barras Farm section is located in Bom Jardim County, within a private property named Três Barras Farm. The study site comprises the ravine of a small drainage, and access to the outcrop is difficult. The roads built within the property are seasonal and usually change annually. Valuable measures to keep this section available for future research are sharing directions to the site with the scientific community and mapping alternative routes coming from the different state and federal roads that cross the region.

The site is isolated and does not pose many risks or pressures related to human occupation or infrastructure projects. Preventive measures should be evaluated to avoid degradation of the area, or even banning access for researchers. In that regard, one recommended preservation measure would be to raise awareness among the owners of the Três Barras Farm, informing them about the scientific relevance that the site has and encouraging them to maintain access for researchers who wish to access the outcrop in search of developing new research projects. An effective approach to that is sharing results (e.g. images of fossil specimens, publications) with the local community and reporting on what was discovered and produced from the work on the site.

Once the site is located in a remote area, it may be subject to inaccessibility or degradation caused by natural hazard events (e.g. floods, landslides). Although protection measures for the outcrop would be unavailable in cases like this, alternative sites could be explored, such as the parastratotype section of the Vila Maria Formation, located a few kilometers away in a neighbor farm.

For these measures to be taken, there is a need for research that appraises the geological and paleontological heritage that the Três Barras Farm section represents. Much about the Gondwana and the Ordovician-Silurian interval can still be discovered from studies in this outcrop.

6. Final Remarks

The Três Barras Farm section is a geosite with high potential for the scientific community with a special interest in paleontological investigation. The presented information was defined based on field works and the current geological knowledge. This section needs to be known not only for the promotion of new paleontological discoveries but also for the preservation of the site. The Três Barras Farm outcrop revealed that the study area offers variability and diversity of interest, namely sedimentological, stratigraphic, paleontological, and geomorphological, so that combined with other important sites nearby such as the type-section and the parastratotype section of the Vila Maria Formation, has great interest. In terms of scientific evaluation and degree, this section is representative and has national and international relevance.

Acknowledgments

A.B.F.C. would like to thank FAPESP for grant #2022/09053-9. C.Z. would like to thank FAPESP for grant #2021/12304-0. All authors thank Dr. Dermeval do Carmo for his constant help and for encouraging this manuscript to be written. The authors also thank the two reviewers who contributed with essential insight and suggestions for the improvement of this work.

Authorship credits

Author	A	B	C	D	E	F
ABFC						
RRA						
LCSR						
CZ						

A - Study design/ Conceptualization B - Investigation/ Data acquisition
C - Data Interpretation/ Validation D - Writing
E - Review/Editing F - Supervision/Project administration

References

- Adôro R.R. 2014. Estudo cronobioestratigráfico da Formação Vila Maria: litoestratigrafia e paleontologia do limite Ordoviciano-Siluriano da Bacia do Paraná, estados de Goiás e de Mato Grosso, Brasil Central. MSc Dissertation, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 94 p. <http://dx.doi.org/10.26512/2014.11.D.18061>
- Adôro R.R., Carmo D.A., Salas M.J., Zabini C., Assine M.L. 2016. The earliest ostracoda record from Brazil: Vila Maria Formation, Rio Ivaí group, Paraná basin, Central Brazil. *Revista Brasileira de Paleontologia*, 19, 379-388. <https://doi.org/10.4072/rbp.2016.3.03>
- Assine M.L., Soares P.C. 1989. Correlações nas sequências mesozóicas da Bacia do Paraná. *Acta Geol. Leopoldensia*, 29, 39-48.
- Assine M.L., Soares P.C., Milani E.J. 1994. Sequências tectono sedimentares mesozóicas da Bacia do Paraná, sul do Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, 24, 77-89. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.19947789>
- Assine M.L., Alvarenga C.J.S.D., Perinotto J.A.J. 1998. Formação lapó: glaciação continental no limite Ordoviciano/Siluriano da Bacia do Paraná. *Revista Brasileira de Geociências*, 28, 51-60. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.19985160>
- Bassett M.G., Popov L.E., Aldridge R.J., Gabbott S.E., Theron J.N. 2009. Brachiopoda from the Soom shale lagerstätte (Upper Ordovician, South Africa). *Journal of Paleontology*, 83, 614-623. <https://doi.org/10.1666/08-136.1>
- Benedetto J.L. 1986. The first typical Hirnantia fauna from South America (San Juan Province, Argentina Precordillera). In: Racheboeuf P.R., Emig C.C. (ed.). *Les Brachiopodes Fossiles et Actuels, Biosratigraphie du Paléozoïque*, 4, 439-447.
- Benedetto J.L., Cocks L.R.M. 2009. Early Silurian (Rhuddanian) brachiopods from the Argentine Precordillera and their biogeographic affinities. *Ameghiniana*, 46(2), 241-253. Available online at: <http://hdl.handle.net/11336/55350> / (accessed on 3 September 2024).
- Benedetto J.L., Halpern K., Galeano Inchausti J.C. 2013. High-latitude Hirnantian (latest Ordovician) brachiopods from the Eusebio Ayala Formation of Paraguay, Paraná Basin. *Palaeontology*, 56(1), 61-78. <https://doi.org/10.1111/j.1475-4983.2012.01158.x>
- Burjack M.I.D.A., Popp M.T.B. 1981. A ocorrência do icnogênero *Arthropycus* no Paleozóico da Bacia do Paraná. *Pesquisas em Geociências*, 14, 163-168. Available online at: <https://seer.ufrgs.br/index.php/PesquisasemGeociencias/issue/view/1393> / (accessed on 5 September 2024).
- Delabroye A., Vecoli M. 2010. The end-Ordovician glaciation and the Hirnantian Stage: a global review and questions about Late Ordovician event stratigraphy. *Earth-Science Reviews*, 98(3-4), 269-282. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2009.10.010>
- Faria A.D. 1982. Formação Vila Maria - nova unidade litoestratigráfica siluriana da Bacia do Paraná. *Ciências da Terra*, 3, 12-15.
- Gonçalves L., Carmo D., Salas M.J., Adôro R.R., Meidla T., Denezine M., Rodrigues L.C.S., Assine M.L., Antonietto L. 2022. The first record of Hirnantian Ostracoda in South America: implications for the biostratigraphy and paleogeography of the Paraná basin. *Journal of Paleontology*, 96(2), 323-333. <https://doi.org/10.1017/jpa.2021.87>
- Grahn Y., Pereira E., Bergamaschi S. 2000. Silurian and lower Devonian chitinozoan biostratigraphy of the Paraná Basin in Brazil and Paraguay. *Palynology*, 24(1), 147-176. <https://doi.org/10.1080/01916122.2000.9989542>
- Gray J., Colbath G.K., Faria A., Boucot A.J., Rohr D.M. 1985. Silurian-age fossils from the Paleozoic Paraná Basin, southern Brazil. *Geology*, 13(7), 521-525. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1985\)13%3C521:SFFTPP%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1985)13%3C521:SFFTPP%3E2.0.CO;2)
- Harlan R. 1831. Description of an extinct species of fossil vegetable, of the family Fucoïdes. *Journal of the Academy of Natural Sciences of Philadelphia*, 6, 289-295.
- Havlíček V., Mergl N. 1988. Two new discinid genera (Brachiopoda) from the Silurian and Devonian of the Prague Basin, Czechoslovakia. *Journal of the Czech Geological Institute*, 63, 169-172.
- Maack R. 1947. Breves notícias sobre a geologia dos estados do Paraná e Santa Catarina. *Arquivos de Biologia e Tecnologia*, 2, 63-154. <http://dx.doi.org/10.1590/S1516-89132001000500010>
- Milani E.J., Melo J.H.S., Souza P.A., Fernandes L.A., França A.B. 2007. Bacia do Paraná. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 15(2), 265-287. Available online at: <https://btp.petrobras.com.br/btp/article/view/310> / (accessed on 5 September 2024).
- Milani E.J., Assine M.L., Soares P.C., Daemon R.F. 1995. A Sequência Ordovício-Siluriana da Bacia do Paraná. *Revista Brasileira de Geociências*, 24, 301-320.
- Mizusaki A.M., Melo J.H.G., Vignol-Lelarge M.L., Steemans P. 2002. Vila Maria Formation (Silurian, Paraná basin, Brazil): integrated radiometric and palynological age determinations. *Geological Magazine*, 139(4), 453-463. <https://doi.org/10.1017/S0016756802006659>
- Puente G.S., Rubinsztein C.V. 2007. The Ordovician chitinozoans from the western Gondwana margin, northwestern Argentina. In: *European Meeting on the Palaeontology and Stratigraphy of Latin America*, 4, Cuadernos del Museo Geominero, 8, 99-105.
- Rodrigues L.C., Carmo D., Assine M., Steeman P. 2022. Cryptospores of lapó formation: the first evidence of early land plants from Late Ordovician in Paraná Basin, Brazil. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 305, 104742. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2022.104742>
- Stanley S.M. 2016. Estimates of the magnitudes of major marine mass extinctions in Earth history. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(42), 6325-6334. <https://doi.org/10.1073/pnas.1613094113>
- Troedsson G.T. 1918. Om Skanes brachiopodskiffer. *Lunds Universitets Årsskrift*, Lund, N