

Assinaturas icnológicas da sucessão sedimentar Rio Bonito no bloco central da jazida carbonífera de Iruí, Cachoeira do Sul (RS)

Rosana Gandini, Renata G. Netto, Henrique P. Kern, Ernesto L.C. Lavina

Laboratório da História da Vida e da Terra, PPGeo UNISINOS, Av. Unisinos, 950, 93022-000 São Leopoldo RS, Brasil. gringasaxbio@gmail.com, nettorg@unisinos.br, kern.henrique@gmail.com, lavina@unisinos.br

RESUMO

Icnofábricas de *Chondrites*, *Chondrites-Helminthopsis-Planolites*, *Cylindrichnus-Thalassinoides*, *Helminthopsis*, *Macaronichnus*, *Ophiomorpha*, *Palaeophycus*, *Planolites*, *Thalassinoides*, *Thalassinoides-Palaeophycus* e *Thalassinoides-Palaeophycus-Helminthopsis* foram reconhecidas em depósitos costeiros e marinhos rasos da sucessão sedimentar Rio Bonito, no bloco central da jazida carbonífera de Iruí (Cachoeira do Sul, RS). As associações de fácies de depósitos costeiros caracterizam-se pelo índice de bioturbação baixo, pelo tamanho reduzido das escavações e pela icnodiversidade baixa, enquanto nos depósitos marinhos rasos apresentam índice de bioturbação moderado a alto e maior icnodiversidade. O padrão de cada icnofábrica, sua distribuição estratigráfica e seus vínculos faciológicos permitiram reconhecer quatro assinaturas icnológicas principais, três delas indicativas de estresse por salinidade e uma substrato-controlada. As icnofábricas de *Helminthopsis*, *Palaeophycus* e *Planolites* sugerem o domínio de águas oligoalinas a doces. As icnofábricas de *Thalassinoides-Palaeophycus* e *Cylindrichnus-Thalassinoides* refletem águas mesoalinas, e representam respectivamente, uma suíte de ambientes mais estáveis e com menor energia (suíte empobrecida de Icnofácies Cruziana) e uma suíte de ambiente com maior energia (suíte de icnofácies mista Skolithos-Cruziana). A icnofábrica *Thalassinoides-Palaeophycus-Helminthopsis* caracteriza uma suíte marinha rasa de Icnofácies Cruziana; o tamanho reduzido das escavações, contudo, sugere domínio de águas polialinas, e a ocorrência pontual das icnofábricas, a deposição em enseadas que mimetizariam as condições ambientais encontradas na zona de *shoreface* inferior/transição ao *offshore*. A icnofábrica de *Thalassinoides* é substrato-controlada e ocorre em contexto de Icnofácies Glossifungites, demarcando duas superfícies estratigráficas autogênicas e uma alogênica. A análise integrada e em alta resolução dos depósitos estudados, permitiu refinar as interpretações paleoambientais e estratigráficas para a sucessão sedimentar Rio Bonito na área de estudo. Figura Complementar 1. Figura Complementar 2.

Palavras-chave: icnologia, sedimentologia, icnofábricas, assinaturas icnológicas, depósitos costeiros.

ABSTRACT

ICHOLOGICAL SIGNATURES OF THE RIO BONITO SEDIMENTARY SUCCESSION IN THE CENTRAL BLOCK OF THE IRUÍ COAL MINE, RIO GRANDE DO SUL (BRAZIL). The subsurface deposits of the Rio Bonito sedimentary succession in the central block of the Iruí coal mine (Cachoeira do Sul, Rio Grande do Sul State, S Brazil) is composed of sedimentary facies associations that represent deposition in dominantly marginal-marine and shallow-marine settings, the later in minor scale. Ichnofabrics of *Chondrites*, *Chondrites-Helminthopsis-Planolites*, *Cylindrichnus-Thalassinoides*, *Helminthopsis*, *Macaronichnus*, *Ophiomorpha*, *Palaeophycus*, *Planolites*, *Thalassinoides*, and *Thalassinoides-Palaeophycus* occur in the marginal marine settings, whereas the *Thalassinoides-Palaeophycus-Helminthopsis* ichnofabric is present in the shallow marine deposits. The marginal-marine ichnofabrics are characterized by the low bioturbation index, the reduced size of burrows, and the low ichnodiversity, whereas the marine ones show a moderate to high degree of bioturbation and low ichnodiversity. The ichnofabric pattern, its stratigraphic distribution, and its sedimentological relationships allow recognizing four ichnological signatures, three suggesting stress caused by changes in the salinity gradient, and one substrate-controlled. Ichnofabrics of *Helminthopsis*, *Palaeophycus*, and *Planolites* in lithofacies SiltArg suggest the dominance of oligohaline to freshwater conditions. Ichnofabrics of *Thalassinoides-Palaeophycus* and *Cylindrichnus-Thalassinoides* reflect the dominance of mesohaline conditions, each one representing, respectively, more quiet and stable environments (impoverished Cruziana Ichnofacies suite), and moderate to high energy settings (mixed Skolithos-Cruziana Ichnofacies suite). The *Thalassinoides-Palaeophycus-Helminthopsis* ichnofabric represents an archetypical Cruziana Ichnofacies suite, indicating shallow marine settings. The reduced size of the burrows, however, suggests dominance of polyhaline rather than stenohaline conditions and its local distribution allow infer deposition in embayments, which mimic the environmental conditions found in the lower *shoreface/offshore* transition zones. The *Thalassinoides* ichnofabric is substrate-controlled, representing a Glossifungites Ichnofacies suite. It demarks two autogenic stratigraphic surfaces, and one allogenic stratigraphic surface interpreted as a sequence boundary. The integrated ichnological and sedimentological analysis in high resolution scale, allowed refining the existent paleoenvironmental and stratigraphic interpretations of the Rio Bonito sedimentary succession in the study area.

Key words: ichnology, sedimentology, ichnofabrics, ichnological signatures, coastal deposits.

INTRODUÇÃO

Ícnofósseis são registros autóctones que permitem análises paleossinecológicas mais precisas, já que refletem a forma como seus produtores respondem aos estímulos do meio, refinando as inferências paleoambientais (e.g., Seilacher, 1964, 1967; Frey, 1975; Ekdale *et al.*, 1984; Frey e Pemberton, 1984; Bromley e Ekdale, 1986; Bromley, 1996; Buatois *et al.*, 2002).

Os depósitos da sucessão sedimentar Rio Bonito/Palermo são ricos em estruturas sedimentares biogênicas e apresentam características de ambientes marginais-marinhos e marinhos rasos, incluindo zonas intermarés, lagunas, estuários, baías e possivelmente deltas, caracterizados pelas condições muito variáveis e de transição (Schneider *et al.*, 1974; Aboarrage e Lopes, 1986; Lavina e Lopes, 1987; Netto, 1994, 1998; Lopes, 1995; Buatois *et al.*, 2001, 2007; Lopes e Lavina, 2001; Tognoli, 2002; Holz, 2003). Estudos prévios sobre a icnologia desses depósitos revelam variações no padrão da bioturbação nestes depósitos, possivelmente relacionados ao domínio de condições ecológicas estressantes nos ambientes marginais-marinhos, e ótimas nos de gênese marinha (Netto *et al.*, 1991; Netto, 1994, 1998; Buatois *et al.*, 2001, 2007; Tognoli, 2002; Tognoli e Netto, 2003).

Concentrando predominantemente depósitos marginais-marinhos, a porção da sucessão correspondente à Formação Rio Bonito contém menor quantidade e diversidade de bioturbação, se comparada àquela que corresponde à Formação Palermo (Netto, 1994, 1998; Buatois *et al.*, 2001, 2007). Flutuações nas taxas de salinidade e oxigenação, combinadas aos fatores físicos, resultam em ambientes fisiologicamente estressantes para diversos grupos animais endobentônicos. A resposta da fauna endobentônica a essas condições é refletida nas estruturas sedimentares biogênicas por eles geradas. O conjunto da icnofauna, a forma como se organizam e seus vínculos faciológicos caracterizam as assinaturas icnológicas de uma sucessão e permitem avaliar, de forma subjetiva, o impacto dos fatores

que controlam a distribuição dos organismos bentônicos nos diferentes meios. O reconhecimento das assinaturas icnológicas presentes nos depósitos da Formação Rio Bonito permitiu avaliar a influência desses fatores no meio físico, contribuindo para o refinamento das interpretações paleoambientais e estratigráficas pré-existentes. Assim, esse trabalho objetiva (i) definir as assinaturas icnológicas da sucessão sedimentar equivalente à Formação Rio Bonito no bloco central da jazida carbonífera do Iruí (Cachoeira do Sul, RS); e (ii) refinar as interpretações estratigráficas e paleoambientais a partir da análise integrada da sedimentologia e da icnologia dos depósitos em questão.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para a descrição da icnofauna, foram utilizados testemunhos de 13 sondagens (IB-01-RS, IB-03-RS, IB-04-RS, IB-06-RS, IB-08-RS, IB-15-RS, IB-17-RS, IB-22-RS, IB-74-RS, IC-20-RS, IC-32-RS, IC-36-RS e IC-56-RS), amostrados no bloco central da jazida carbonífera do Iruí (Cachoeira do Sul, RS, coordenadas 6656000 a 6672000mN/334000 a 356000mE, faixa 22-Y), pertencentes ao Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 1982, 1987, 1988). Outros 18 conjuntos de testemunhos (IB-02-RS, IB-07-RS, IB-09-RS, IB-12-RS, IB-21-RS, IB-28-RS, IB-29-RS, IB-138-RS, IC-04-RS, IC-10-RS, IC-12-RS, IC-21-RS, IC-45-RS, IC-48-RS, CA-19-RS, CA-20-RS, CA-64-RS, CA-74-RS) foram utilizados apenas para a correlação dos depósitos (CPRM, 1980, 1981, 1987, 1988).

A caracterização sedimentológica foi feita a partir das litofácies e associações de fácies descritas por Kern (2008) e apresentadas na Tabela 1. A camada de carvão Iruí Superior, que ocorre em todos os testemunhos descritos e possui ampla lateralidade horizontal, serviu de marco estratigráfico para a correlação dos depósitos. A caracterização das icnofábricas levou em conta o tipo de estrutura biogênica (de bioturbação, bioerosão ou biodeposição), a icnodiversidade, o tamanho das escavações, os

padrões de agrupamentos e a intensidade de ocorrência. Tais aspectos foram comparados a uma amostra ideal marinha rasa (meio clímax) da Formação Palermo em testemunhos de sondagem da mesma área de estudo (Netto e Gonzaga, 1985; Netto, 1994).

O registro da ocorrência de cada icnofábrica nos testemunhos analisados encontra-se na Tabela 2 e foi feito a partir da descrição dos testemunhos de sondagem em alta resolução (escala centimétrica). As icnofábricas foram descritas, classificadas e quantificadas seguindo a metodologia proposta por Taylor e Goldring (1993). Perfis esquemáticos do empilhamento da sucessão em cada testemunho e das icnofábricas presentes foram confeccionados em Corel Draw 13, estando representados nas sessões estratigráficas 1 a 4 (Figuras Complementares 1 e 2). As fotografias das litofácies e icnofábricas foram feitas sob luz natural, com câmera digital Sony Cibershot 8.1, com utilização de macro com aproximação até 20 mm para fotos de detalhe.

GEOLOGIA REGIONAL E ÁREA DE ESTUDO

A bacia do Paraná é uma vasta região sedimentar da América do Sul que abrange porções territoriais do Brasil, Paraguai, Argentina e Uruguai, com aproximadamente 1,5.10⁶ km² (Figura 1). Dentre os episódios de evolução tectônica e paleogeográfica do supercontinente Gondwana, a bacia do Paraná se caracteriza como uma extensa depressão intracratônica, preenchida com sedimentos paleozóicos, mesozóicos, lavas basálticas e, localmente, rochas cenozóicas (Rocha-Campos, 1967; Schneider *et al.*, 1974; Milani, 1997; Milani *et al.*, 2007). A evolução de sua sedimentação também envolveu uma complexa interação de fatores tectônicos, paleogeográficos e paleoclimáticos (Santos *et al.*, 1996).

Os depósitos permianos da sucessão sedimentar Rio Bonito/Palermo registram o evento de transgressão marinha que sucede o final do episódio de “ice house” que afetou o supercontinente

Tabela 1. Litofácies, icnofábricas e associações de fácies da sucessão sedimentar Rio Bonito no bloco central da jazida carbonífera do Iruí (litofácies e associações de fácies a partir de Kern, 2008).**Table 1.** Lithofacies, ichnofabrics and fácies associations of the Rio Bonito sedimentary succession in the central block of the Iruí coal mine (lithofacies and fácies associations from Kern, 2008).

LITO-FÁCIES	DESCRIÇÃO	ICNOFÁBRICAS	ASSOCIAÇÃO DE FÁCIES
Pg	Paraconglomerado formado por grânulos e seixos angulares a arredondados, de composição polimítica* e intraclastos pelíticos dispersos de forma caótica em matriz arenosa e/ou argilosa, muitas vezes micáceo. Coloração cinza esverdeada a vermelha.	Não bioturbado	Canais fluviais (fácies de leques aluviais)
Ort	Ortoconglomerado formado por grânulos e seixos de composição polimítica*, arredondados a angulosos, e intraclastos pelíticos e fragmentos de carvão dispostos nos planos de estratificação. Matriz areno-siltosa, muitas vezes micácea. Estratificações cruzadas acanaladas de pequeno a médio porte e baixo a médio ângulo. Em alguns níveis ocorrem drapes de lama. Coloração esbranquiçada a cinza esverdeada.	Não bioturbado	Canais fluviais (fácies de canal e barras fluviais)
SiltArg	Siltito argiloso com restos vegetais. Localmente ocorrem grânulos e seixos caídos e laminações onduladas. Coloração variando de cinza claro a esverdeado. Em alguns níveis, o siltito apresenta aspecto brechado com colorações avermelhada, sugerindo paleossolos.	<i>Chondrites, Planolites, Chondrites-Helminthopsis-Palaeophycus, Thalassinoides</i>	Canais fluviais (fácies de planícies de inundação); baía estuarina; pântanos
SiltCarb	Siltito carbonoso de coloração cinza escura a preta, rico em restos vegetais (folhas e galhos). Em alguns níveis ocorrem nódulos de pirita e impressões fósseis de plantas (flora de <i>Glossopteris</i>).	<i>Chondrites, Thalassinoides</i>	Planícies de marés; pântanos
Cv	Carvão. Cor preta e brilho fosco, composto por lâminas de vitrênio e lentes de fusênio. Restos vegetais são abundantes e nódulos de pirita e fraturas preenchidas por carbonato são comuns.		Pântanos
Mrg	Argila calcária (marga) de coloração creme. Localmente mostra moldes de raízes, conchas de bivalves e feições de paleoalteração.	Rizobioturbação	Pântanos
Ht	Siltitos cinza escuro a cinza esverdeado intercalados com arenitos finos, quartzosos e esbranquiçados. Os siltitos apresentam laminação horizontal a ondulada. Os arenitos ocorrem como camadas finas e contínuas (<i>wavy</i>) e/ou descontínuas (<i>lenticulares = linsen</i>). Gretas de sinerese ocorrem localmente.	<i>Helminthopsis, Palaeophycus, Planolites, Thalassinoides, Thalassinoides-Palaeophycus, Thalassinoides-Palaeophycus-Helminthopsis</i>	Baía estuarina; shoreface inferior/transição offshore
Ac 1	Arenitos médios a grossos, arcoseanos, com intraclastos, micas, fragmentos de carvão e restos vegetais, estratificação cruzada acanalada de médio porte e baixo a médio ângulo e/ou maciços, e drapes de lama entre os planos de estratificação, em alguns níveis. Coloração acinzentada a amarelada. Porosidade alta.	Não bioturbado	Canais fluviais (fácies de canal e barras fluviais)
Ac 2	Arenitos muito finos a finos, micáceos, mal selecionados, intercalados com siltitos, com marcas de onda e estratificação cruzada cavalgante (<i>climbing ripple</i>) unidirecional e restos vegetais. Coloração acinzentada.	Não bioturbado	Canais fluviais (fácies de leque de <i>crevasse</i>); canais e barras de maré
SubAc	Arenitos médios a grossos, quartzosos com feldspatos caulinizados, com estratificação cruzada acanalada de médio a grande porte e baixo a alto ângulo e drapes de lama marcando os planos de estratificação, muitas vezes indicando sentido de fluxo reverso. Intraclastos, fragmentos de carvão e restos vegetais podem estar presentes, preferencialmente na base das camadas. Coloração acinzentada a amarelada. Porosidade relativamente alta.	<i>Ophiomorpha</i>	Canais e barras de maré
Aq1	Arenitos quartzosos finos a médios, eventualmente grossos, bem selecionados. Apresentam grãos subarredondados a arredondados, laminação plano-paralela e, secundariamente, estratificação cruzada de baixo ângulo. Coloração esbranquiçada a amarelada. Porosidade alta.	<i>Cylindrichnus-Thalassinoides, Helminthopsis, Macaronichnus</i>	Marinho raso (foreshore)
Aq2	Arenitos finos a médios, quartzosos e moderadamente selecionados com estratificação cruzada acanalada de pequeno a médio porte e de médio ângulo uni - e bidirecional intercalada com estratificação cruzada de baixo ângulo. Os grãos apresentam bom arredondamento e boa esfericidade. Ocorrem superfícies de reativação e <i>drapes</i> de lama marcando os <i>foresets</i> . Coloração acinzentada a acastanhada. Podem apresentar fragmentos de carvão e restos vegetais. Alguns níveis apresentam-se ferrificados.	Não bioturbado	Marinho raso (<i>shoreface superior</i>)
Aq3	Arenito muito fino intercalado com delgados níveis de siltito, com laminação <i>swalley</i> e estratificação com truncamento de baixo ângulo (<i>hummocky</i>). Internamente, as lâminas apresentam microgradação ascendente de arenito muito fino passando a siltito. Coloração esbranquiçada a acinzentada. Pode apresentar restos vegetais.	<i>Cylindrichnus-Thalassinoides, Palaeophycus</i>	Marinho raso (<i>shoreface inferior</i>)
Aq4	Arenito médio a muito grosso, quartzoso, maciço e/ou com cruzadas acanaladas de pequeno porte. Matriz siltico-arenosa. Grãos angulosos a arredondados com esfericidade baixa a moderada. Ocorrem intraclastos pelíticos e fragmentos de carvão. Coloração esbranquiçada a acinzentada.	Não bioturbado	Marinho raso (transição ao <i>offshore</i>)

* composição polimítica = quartzo, feldspato, fragmentos líticos de granitóides e rochas metamórficas.

Tabela 2. Registro de ocorrência das icnofábricas da sucessão sedimentar Rio Bonito nos depósitos de subsuperfície do bloco central da jazida carbonífera do Iruí (Cachoeira do Sul, RS). Abreviaturas: *Cho*, icnofábrica simples de *Chondrites*; *Cho-Hel-Pla*, icnofábrica composta, com domínio de *Chondrites*, *Helminthopsis* e *Planolites*; *Cyl-Tha*, icnofábrica composta, com domínio de *Cylindrichnus* e *Thalassinoides*; *Hel*, icnofábrica composta, com domínio de *Helminthopsis*; *Mac*, icnofábrica simples de *Macaronichnus*; *Oph*, icnofábrica simples de *Ophiomorpha*; *Pal*, icnofábrica composta, com domínio de *Palaeophycus*; *Pla*, icnofábrica composta, com domínio de *Planolites*; *Tha*, icnofábrica composta, com domínio de *Thalassinoides*; *Tha-Pal*, icnofábrica composta, com domínio de *Thalassinoides* e *Palaeophycus*; *Tha-Pal-Hel*, icnofábrica composta, com domínio de *Thalassinoides*, *Palaeophycus* e *Helminthopsis*. Para abreviaturas das litofácies, ver Tabela 1.

Table 2. Occurrence of the Rio Bonito sedimentary succession ichnofabrics in the subsurface deposits of the central block of Iruí coal mine (Cachoeira do Sul, RS, Brazil). Abbreviations: *Cho*, ichnofabric of *Chondrites*; *Cho-Hel-Pla*, composite ichnofabric with dominance of *Chondrites*, *Helminthopsis* and *Planolites*; *Cyl-Tha*, composite ichnofabric with dominance of *Cylindrichnus* and *Thalassinoides*; *Hel*, composite ichnofabric with dominance of *Helminthopsis*; *Mac*, ichnofabric of *Macaronichnus*; *Oph*, ichnofabric of *Ophiomorpha*; *Pal*, composite ichnofabric with dominance of *Palaeophycus*; *Pla*, composite ichnofabric with dominance of *Planolites*; *Tha*, composite ichnofabric with dominance of *Thalassinoides*; *Tha-Pal*, composite ichnofabric with dominance of *Thalassinoides* and *Palaeophycus*; *Tha-Pal-Hel*, composite ichnofabric with dominance of *Thalassinoides*, *Palaeophycus* and *Helminthopsis*. For lithofacies abbreviations, see Table 1.

TESTEMUNHO	PROFUNDIDADE (m)	LITOFÁCIES	ICNOFÁBRICA	TESTEMUNHO	PROFUNDIDADE (m)	LITOFÁCIES	ICNOFÁBRICA
	205,00-204,00	Ht	Tha-Pal	IB-15-RS	274,20-273,00	Aq2	Oph
	204,00-203,50	SiltArg	Cho-Hel-Pla		273,90-273,50	Aq1	Cyl-Tha
	202,00-200,00	Aq3	Pal		273,00-272,80		
IB-01-RS	200,00-199,00		Cyl-Tha	IB-17-RS	390,50-389,50	SiltArg	Cho
	160,00-159,00	Ht	Pla		387,00-386,50		
	158,90		Tha	IB-22-RS	263,00-262,70	Ht	Pla
	155,30		Pla		255,00-254,50		Tha-Pal
	148,70-147,00	SiltCarb	Tha		231,50		
	237,30	Aq1	Pla		228,50		
	213,30	SubAc	Oph		218,00-215,00		Pal
	209,00				212,00		Hel
IB-03-RS	204,60-200,20	SiltCarb	Tha		206,70-206,30	SiltCarb	Tha
	200,00-197,30	Ht	Tha-Pal-Hel		205,70-204,80	Ht	Tha-Pal-Hel
	198,20-197,80	SiltCarb	Tha		204,70-202,00		Tha-Pal
	278,3-277,50	SiltArg	Pla		200,40-200,15		Cyl-Tha
	240,00-239,50	Ht	Hel	IB-74-RS	139,50	SiltArg	Pla
	234,80	Aq3	Pal		127,00-126,50		
	221,50-220,70	Ht	Tha		126,00-125,30		
IB-04-RS	220,70-217,00		Tha-Pal		123,70-123,20	Ht	Pla
	216,00-215,00		Tha		87,00-86,80		Tha-Pal-Hel
	214,70-213,50		Cyl-Tha		86,80-86,60		Tha
	213,50-212,50		Tha		86,60-85,00		Tha-Pal-Hel
	212,50-208,00		Tha-Pal	IC-20-RS	227,20-227,00	SiltCarb	Cho
	234,00-232,30	Aq3	Pal		205,50-205,00	Ht	Tha-Pal
	230,50-230,10	SiltArg	Tha		201,00-198,30	SiltCarb	Tha
	230,10-229,50	Aq1	Mac		197,70-196,70	Ht	Tha-Pal-Hel
	211,00-210,60	SiltArg	Pla		196,70-196,60		Tha
	208,00-207,75	Aq1	Hel		196,60-191,00		Tha-Pal-Hel
IB-06-RS	207,75-207,20	SiltArg	Pla, Tha		191,00-187,00		Tha
	207,20-207,00	Ht	Tha-Pal-Hel		187,00-183,00		Tha-Pal
	207,00-203,70		Tha-Pal	IC-32-RS	160,80-160,15	SiltCarb	Tha
	205,85	SiltCarb	Tha		159,50-159,00	Aq2	Oph
	204,00-203,70	Ht			159,00-157,80	Ht	Tha
	203,67-201,00		Tha-Pal		159,00-156,35		Tha-Pal-Hel
	203,30-202,30		Tha		153,60-144,65		Tha-Pal
	256,00	SiltArg	Hel	IC-36-RS	280,50-280,30	Ht	Pal
	251,50				223,80		
	242,00		Pla		216,80-216,50	SiltCarb	Tha
IB-08-RS	236,70-235,00	Aq2	Oph		215,60-214,80	Ht	
	226,10-222,50				Tha-Pal		
	222,50-222,00	SiltCarb	Tha		214,50-208,80		Cyl-Tha
	222,00-218,30	Ht	Tha-Pal-Hel		214,00-212,00		Tha
	301,90-301,30	Ht	Tha-Pal-Hel		144,90-142,50		Pal
IB-15-RS	295,50-295-45	SiltCarb	Tha		129,30-128,80		Tha
	295,00-291,00	Aq1	Mac		128,20-127,60		
	287,00-285,00	Aq2	Oph		127,20-120,45		Tha-Pal-Hel

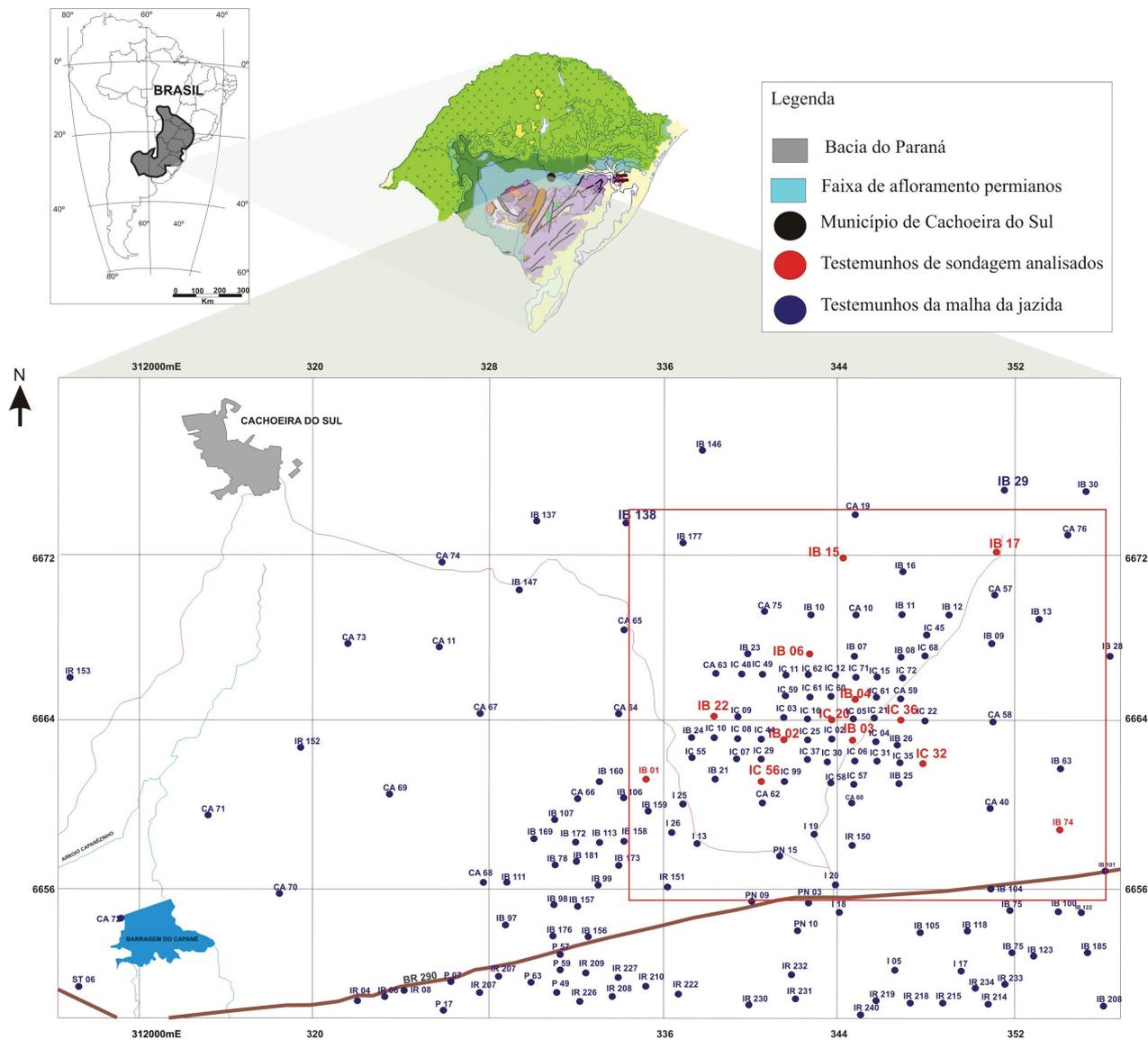


Figura 1. Localização da área de estudo na borda sudeste da bacia do Paraná no RS (modificado de Kern, 2008 e CPRM, 2001).
Figure 1. Location of the study area in the southeastern border of Paraná Basin at Rio Grande do Sul State, Brazil (modified from Kern, 2008 and CPRM, 2001).

Gondwana durante o Carbonífero (Habekost, 1978, 1983; Lavina *et al.*, 1985; Lavina e Lopes, 1987; Lopes, 1995; Milani, 1997; Milani *et al.*, 2007). Esses depósitos se estendem desde o NNE do Estado do Paraná até o SSE do Estado do Rio Grande do Sul (Aboarrage e Lopes, 1986; Milani, 1997; Milani *et al.*, 2007). No Rio Grande do Sul, assentam-se sobre rochas do embasamento pré-

cambriano ou sobre depósitos da Formação Rio do Sul (Figura 2) ao longo da maior parte da borda ESE da bacia, onde afloram, preferencialmente, nas minas de carvão a céu aberto existentes ao longo da rodovia BR-290 e zonas adjacentes.

A região da mina de carvão do Iruí (Cachoeira do Sul, RS, Figura 1) tem sido alvo de diversos estudos focados na análise sedimentológica, icnológica

e estratigráfica de seus depósitos, tanto em superfície quanto em subsuperfície. Os depósitos representam a deposição preferencial em ambientes marginais-marinhos, incluindo zonas intermarés, lagunas, vales incisos, estuários, baías e, possivelmente, deltas (Holz e Dias-Flor, 1984; Lavina *et al.*, 1985; Netto e Gonzaga, 1985; Lavina e Lopes, 1987; Netto, 1994; Lopes, 1995; Holz e Dias,

1998; Elias *et al.*, 2000; Lopes e Lavina, 2001; Buatois *et al.*, 2001, 2007). Conglomerados, arenitos muito finos a muito grossos, siltitos e carvões caracterizam os depósitos da Formação Rio Bonito no Rio Grande do Sul, sendo definidos como de caráter continental para os intervalos basais a médios e gradando para um sistema litorâneo e de transição no topo. Arenitos muito finos a finos e siltitos fazem parte dos depósitos superpostos da Formação Palermo, representando a sedimentação em condições marinhas (Schneider *et al.*, 1974; Lavina *et al.*, 1985; Lavina e Lopes, 1987; Holz, 1987; Lopes, 1990).

Kern (2008), analisando a mesma testemunhagem utilizada neste estudo, concluiu que a sedimentação eopermiana da bacia do Paraná no bloco central da jazida do Iruí corresponde a um grande evento transgressivo de segunda ordem, ao qual denominou Sequência Depositional Iruí Central, subdividida em duas seqüências deposicionais de 3ª ordem (Seqüências 1 e 2) e separadas por uma superfície de inconformidade subaérea. Em 4ª ordem, a Sequência 1 subdivide-se em três seqüências menores (A a C) e a 2 em duas (D e E, Figuras Complementares 1-2). Os depósitos caracterizariam a evolução de um sistema costeiro para marinho raso, onde se destaca o desenvolvimento de cordões litorâneos construídos pela deriva, que capturam as regiões de enseadas e baías, formando sistemas lagunares atrás da barreira. Na região da barreira propriamente dita, os sedimentos seriam retrabalhados pelas ondas e direcionados pela deriva litorânea, que deposita os materiais ao longo da costa. Corpos arenosos lenticulares gerados por correntes de maré intercalam-se com os cordões litorâneos, gerando feições que indicariam embaiamentos estuarinos. Os embaiamentos seriam de pequena extensão areal e distribuídos de modo paralelo às paleolinhas de praia. Icnofábricas representativas da Icnofácies *Skolithos* foram reconhecidas pelo autor nos depósitos de *foreshore* e *shoreface* e da Icnofácies *Cruziana* nos de transição ao *offshore*. Nos depósitos estuarinos, foram observadas icnofábricas representativas

tanto a icnofácies *Skolithos* quanto *Cruziana*, porém com icnogêneros empobrecidos e sugestivos de estresse ambiental.

ANÁLISE FACIOLÓGICA

Conglomerados, arenitos muito finos a muito grossos, siltitos e carvões são as rochas dominantes na sucessão sedimentar estudada. Com poucas exceções, as litofácies são recorrentes ao longo da sucessão. O empilhamento possui de modo geral uma tendência granodrecrescente e compõem diferentes associações de fácies que caracterizam, da base para o topo, depósitos costeiros e marinhos rasos.

Depósitos costeiros. Caracterizam-se pela associação de fácies de canais fluviais, de canais e barras de maré, de planície de marés, de pântano e de baía estuarina.

A associação de fácies de canais fluviais compreende as fácies de leques aluviais, de canal e barras fluviais, de leque de *crevasse* e de planície de inundação. A fácies de leques aluviais é composta pela litofácies Pg (Tabela 1), que ocorre

essencialmente na base dos perfis IB-01-RS, IB-04-RS, IB-06-RS, IC-32-RS, IC-20-RS, assentada sobre as rochas do embasamento e com espessuras de até 8 m. Localmente, podem ocorrer na porção média da sucessão, formando delgadas camadas que se interdigitam com depósitos de planície de inundação (Figura 3). As fácies de canal e barra fluvial são compostas pelas litofácies Ort e Ac1, a última com camadas de espessura variada, desde centimétricas até métricas. Lateralmente, ocorrem intercaladas a depósitos da fácies de planície de inundação e/ou da fácies de planície de marés. A fácies de leque de *crevasse* é caracterizada pela litofácies Ac2 (Tabela 1) e relaciona-se geneticamente às fácies de canal e barras fluviais (Figura 4), que ocorrem apenas nos depósitos do terço inferior da sucessão (seqüências A e B de Kern, 2008). A fácies de planície de inundação é caracterizada pela litofácies SiltArg, de caráter essencialmente maciço e ocorrendo em camadas centimétricas a métricas entre os depósitos da associação de fácies de depósitos fluviais.

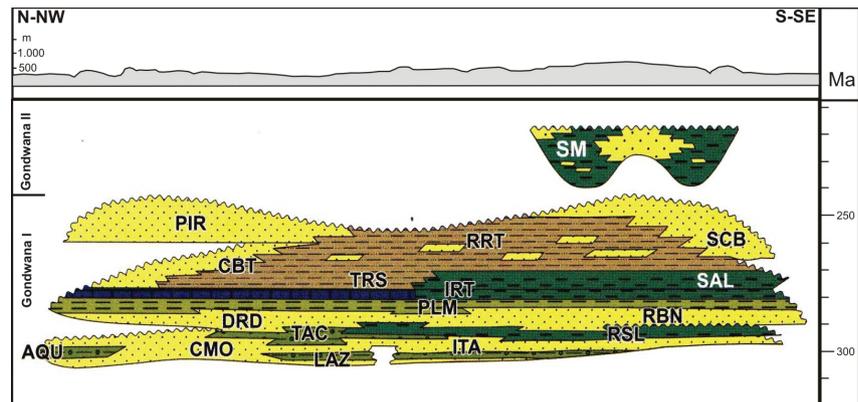


Figura 2. Estratigrafia da Superseqüência Gondwana I para a bacia do Paraná (modificado de Milani *et al.*, 2007), representativa da sedimentação ocorrida entre o final do Pensilvaniano e a base do Triássico. Abreviações: AQU, Formação Aquidauana; CBT, Formação Corumbataí; CMO, Formação Campo Mourão; IRT, Formação Irati; ITA, Formação Itararé; LAZ, Formação Lagoa Azul; PIR, Formação Pirambóia; PLM, Formação Palermo; RBN, Formação Rio Bonito; RRT, Formação Rio do Rastro; RSL, Membro Rio do Sul; SAL, Formação Serra Alta; SCB, Formação Sanga do Cabral; SM, Formação Santa Maria; TAC, Formação Taciba; TRS, Formação Teresina.

Figure 2. Stratigraphy of Gondwana I Supersequence in Paraná Basin (modified from Milani *et al.*, 2007), representing the deposition occurred between the end of Pennsylvanian and Lower Triassic. Abbreviations: AQU, Aquidauana Formation; CBT, Corumbataí Fm.; CMO, Campo Mourão Fm.; IRT, Irati Fm.; ITA, Itararé Fm.; LAZ, Lagoa Azul Fm.; PIR, Pirambóia Fm.; PLM, Palermo Fm.; RBN, Rio Bonito Fm.; RRT, Rio do Rastro Fm.; RSL, Rio do Sul Mb.; SAL, Serra Alta Fm.; SCB, Sanga do Cabral Fm.; SM, Santa Maria Fm.; TAC, Taciba Fm.; TRS, Teresina Fm.

A bioturbação é incipiente na associação de fácies de depósitos fluviais, ocorrendo apenas na litofácies SiltArg. É representada por icnofábrica simples de *Planolites* no furo IB-04-RS (Figura 3). O índice de bioturbação é baixo (BI 1-2) e as escavações mostram-se ligeiramente achatadas.

A associação de fácies de canais e barras de maré compreende as litofácies Aq2 e SubAc (Tabela 1), que ocorrem, preferencialmente, nas porções intermediária e superior dos poços descritos (Figura 4). Relaciona-se, geneticamente, às litofácies Aq1 e Ht. A associação de fácies de planície de marés compreende as litofácies SiltCarb, SubAc e Aq1 (Figura 5 e 6A), ocorrendo na porção mediana dos poços estudados (sequências C e D de Kern, 2008) intercaladas a depósitos da associação de fácies de pântano e marinho raso (fácies de *foreshore* e de *shoreface* superior).

A associação de fácies de baía estuarina é representada pelas litofácies Ht e SiltArg (Tabela 1, Figura 6B-6D), onde dominam as litologias lamosas sobre as arenosas. Gretas de sinerese podem ocorrer localmente na litofácies Ht. A associação de fácies de pântano compreende as litofácies SiltArg, SiltCarb, Cv e Mrg (Figura 4), caracterizada pela ampla ocorrência lateral e pelo expressivo empilhamento vertical nas sequências de base (sequências A-C de Kern, 2008), e por compor a maior parte da porção mediana da sequência sedimentar Rio Bonito na área de estudo (base da sequência D de Kern, 2008). A litofácies Cv é a mais representativa na associação de fácies de pântano, atingindo espessuras de até 5 m no centro da área de estudo. Fragmentos de carvão e de restos vegetais e bioturbação são comuns nas SubAc, SiltArg e SiltCarb, a última delas contendo compressões de folhas da flora de *Glossopteris* (Figura 6D).

As associações de fácies de canais e barras de marés, de planícies de marés, de baía estuarina e de pântano caracterizam, conjuntamente, depósitos estuarinos. Esses depósitos apresentam-se em geral bioturbados, mostrando icnodiversidade baixa a moderada e grau de bioturbação baixo a moderado. Icnofábricas simples

são comuns e as compostas são dominadas por *Thalassinoides* e *Palaeophycus*. Caracterizam estes depósitos as icnofábricas simples de *Chondrites* e *Ophiomorpha*, e as compostas dominadas por *Chondrites-Helminthopsis-Planolites*, *Helminthopsis*, *Palaeophycus*, *Planolites*, *Thalassinoides* e *Thalassinoides-Palaeophycus* (Figuras 6A-E).

A icnofábrica simples de *Chondrites* se caracteriza por apresentar trechos verticalizados a inclinados de escavações com ramificações dendríticas de diâmetros milimétricos. O índice de bioturbação é baixo (BI 1-2) e ocorre nas litofácies SiltCarb e SiltArg (IB-17-RS), nas associações de fácies de planície de maré e de pântano.

A icnofábrica simples de *Ophiomorpha* se caracteriza pela ocorrência de escavações predominantemente verticais, de tamanho reduzido, cujos bordos são revestidos por pequenos *pellets* dispostos em um arranjo muito simples, ora delgado, ora mais espesso. Localmente, possui *Skolithos* como elemento acessório (Figuras 5, 6A). O índice de bioturbação é baixo (BI 1-2) e ocorre nas litofácies SubAc (IB-03-RS) e Aq2 (IB-08-RS, IB-15-RS e IC-32-RS), compondo a associação de fácies de canais e barras de marés. Na litofácies Aq2, é comum a presença de rizobioturbação, preservada em palimpsesto sobre os depósitos contendo icnofábrica de *Ophiomorpha* (IB-15-RS).

A icnofábrica de *Chondrites-Helminthopsis-Planolites* é dominada por escavações representativas desses três icnogêneros (Figura 6C), contendo *Thalassinoides*, *Rhizocorallium* e *Arenicolites* como icnogêneros acessórios. Caracteriza-se principalmente pelo tamanho reduzido das escavações e pelo índice de bioturbação baixo a moderado (BI 2-3). Ocorre exclusivamente na litofácies SiltArg (IB-01-RS), nas associações de fácies de pântano e de baía estuarina.

A icnofábrica composta de *Helminthopsis* (Figura 6B) possui *Thalassinoides*, *Palaeophycus* e *Planolites* como icnogêneros acessórios. Apresenta índice de bioturbação baixo a moderado (BI 2-3) e, localmente, rizobioturbação. Nos depósitos estuarinos, ocorre exclusivamente na litofácies Ht (IB-04-RS e IB-22-RS), na associação de fácies de baía estuarina.

A icnofábrica composta de *Palaeophycus* contém *Planolites* como icnogênero acessório (Figura 6E). Possui índice de bioturbação baixo (BI 1-2) e ocorre na litofácies Ht (IB-01-RS, IB-22-RS, IC-36-RS e IC-56-RS) na associação de fácies de baía estuarina.

A icnofábrica composta de *Planolites* contém *Taenidium* e *Palaeophycus* como icnogêneros acessórios, podendo mostrar-se monoespecífica para *Planolites* em litofácies pelíticas, sugerindo redução de oxigênio (Tognoli e Netto, 2003). Possui índice de bioturbação baixo (BI 1-2) e escavações com tamanhos reduzidos. Rizobioturbação pode ocorrer associada. Ocorre nas litofácies Aq1 (IB-03-RS), Ht (IB-01-RS, IB-22-RS e IB-74-RS) e SiltArg (IB-04-RS, IB-06-RS, IB-08-RS e IB-74-RS), respectivamente nas associações de fácies de planícies de maré, de baía estuarina e de pântano.

A icnofábrica de *Thalassinoides* possui, localmente, *Conichnus*, *Gyrolithes* e *Rhizocorallium* como icnogêneros acessórios (Figuras 7A-E). Caracteriza-se por escavações com limites bem marcados e abruptos e preenchimento passivo por material mais grosso e diferente do que compõe a rocha matriz. Apresenta índice de bioturbação baixo (BI 1-2) e localmente moderado (BI 3-4) (IB-04-RS e IC-20-RS). Ocorre nas litofácies de SiltArg (IB-06-RS), SiltCarb (IB-01-RS, IB-03-RS, IB-06-RS, IB-08-RS, IB-15-RS, IB-22-RS, IC-20-RS, IC-32-RS e IC-36-RS) e Ht (IB-04-RS, IB-06-RS, IB-74-RS, IC-20-RS, IC-32-RS, IC-36-RS e IC-56-RS), respectivamente nas associações de fácies de planícies de marés, de pântano e de baía estuarina. Na litofácies SiltCarb, a icnofábrica de *Thalassinoides* se caracteriza pelo limite abrupto e pela ausência de revestimento nos bordos da escavação, sinalizando a presença de substratos pelíticos firmes (*firmgrounds*), além de baixo índice de bioturbação (BI 2) e tendência monoespecífica (Figuras 7A, 7E). Nas demais litofácies, mostra-se também representativa de substratos firmes, mas de granulometria ligeiramente mais grossa e com grau de saturação em água discretamente maior (*stiffgrounds*, Figuras 7B-D). No teste-



Figura 3. Depósitos de leques aluviais (litofácies Pg) intercalados a depósitos de planície de inundação (litofácies SiltArg) com discreta ocorrência da icnofábrica simples de Planolites (Pla), no testemunho de sondagem IB-04-RS. Escala: 10 cm.

Figure 3. Alluvial fan deposits (lithofacies Pg) intercalated with flooding plain deposits (lithofacies SiltArg) with a discrete occurrence of monospecific Planolites ichnofabric (Pla), preserved in IB-04-RS core. Scale bar: 10 cm.

munho IB-06-RS, apesar de ocorrer na litofácies SiltArg, a icnofábrica também se mostra monoespecífica (Figura 7D) e com índice de bioturbação baixo (BI 1-2), estando preservada em palimpsesto sobre a icnofábrica de *Planolites*. Preservação em palimpsesto também é observada na litofácies Ht, onde a icnofábrica composta de *Thalassinoides* retrabalha substratos contendo as icnofábricas compostas de *Thalassinoides-Palaeophycus* (Figura 7C) e de *Cylindrichnus-Thalassinoides*.

A icnofábrica composta de *Thalassinoides-Palaeophycus* é dominada por escavações relacionadas a esses icnogêneros, contendo *Planolites*, *Teichichnus*, *Helminthopsis* como icnogêneros acessórios e raros *Rhizocorallium* (testemunho IB-15-RS) e *Rosselia* (testemunho IC-20-RS). Possui índice de bioturbação em geral baixo (BI 1-2) a localmente moderado (BI 3-4), nos testemunhos IB-04-RS, IB-06-RS, IB-15-RS e IC-20-RS. As escavações se caracterizam por apresentar tamanhos reduzidos e por

spreite curtos e achatados em *Teichichnus* (testemunho IB-22-RS). Ocorre na litofácies Ht (IB-01-RS, IB-04-RS, IB-06-RS, IB-22-RS, IC-20-RS, IC-32-RS e IC-36-RS), correspondente a associação de fácies de baía estuarina. No testemunho IB-06-RS, a icnofábrica *Thalassinoides-Palaeophycus* ocorre ao longo de toda a litofácies Ht no topo da sucessão, mostrando índice de bioturbação moderado que se reduz em direção ao topo.

Depósitos marinhos. São caracterizados pela associação de fácies marinhas rasas, que compreendem as fácies de *foreshore*, *shoreface* superior e inferior, e de transição ao *offshore*, e ocorre preferencialmente no terço médio superior dos poços descritos (Figura 4).

A fácies de *foreshore* é composta pela litofácies Aq1 (Tabela 1; Figuras 5, 8A-C) e apresenta sua maior expressão nas sequências depositadas acima da camada de carvão Iruí Superior. Relaciona-se geneticamente à litofácies Aq2, que compõe a fácies de *shoreface* superior, e dispõe-se lateralmente às litofácies Ht, SiltArg e SiltCarb, que compõem as fácies costeiras de planícies e de barras de marés. Fragmentos de carvão e restos vegetais são comuns na litofácies Aq2. Os depósitos de *shoreface* inferior são compostos predominantemente pela litofácies Aq3, que se intercala com as litofácies Ht, presentes em menor escala. Lateralmente, os depósitos de *shoreface* inferior aparecem intercalados às litofácies SiltArg, SiltCarb, Cv e Ht, características dos depósitos de baía estuarina, planície de maré e pântano. Geneticamente, se relacionam aos depósitos de transição ao *offshore*, representados pelas litofácies Aq4 e Ht (Figura 9). Estas litofácies ocorrem de forma intercalada nas porções superiores dos poços descritos da maioria dos testemunhos da sucessão sedimentar, sobrepondo as litofácies Aq1, Aq2 e Aq3 (depósitos de *shoreface*).

Os depósitos marinhos apresentam-se em geral bioturbados, mostrando icnodiversidade moderada a alta. *Thalassinoides* e *Palaeophycus* são os icnogêneros dominantes nas icnofábricas, que podem ser simples, de *Macaronichnus*, ou compostas, de *Cylindrichnus-Thalassinoides*,

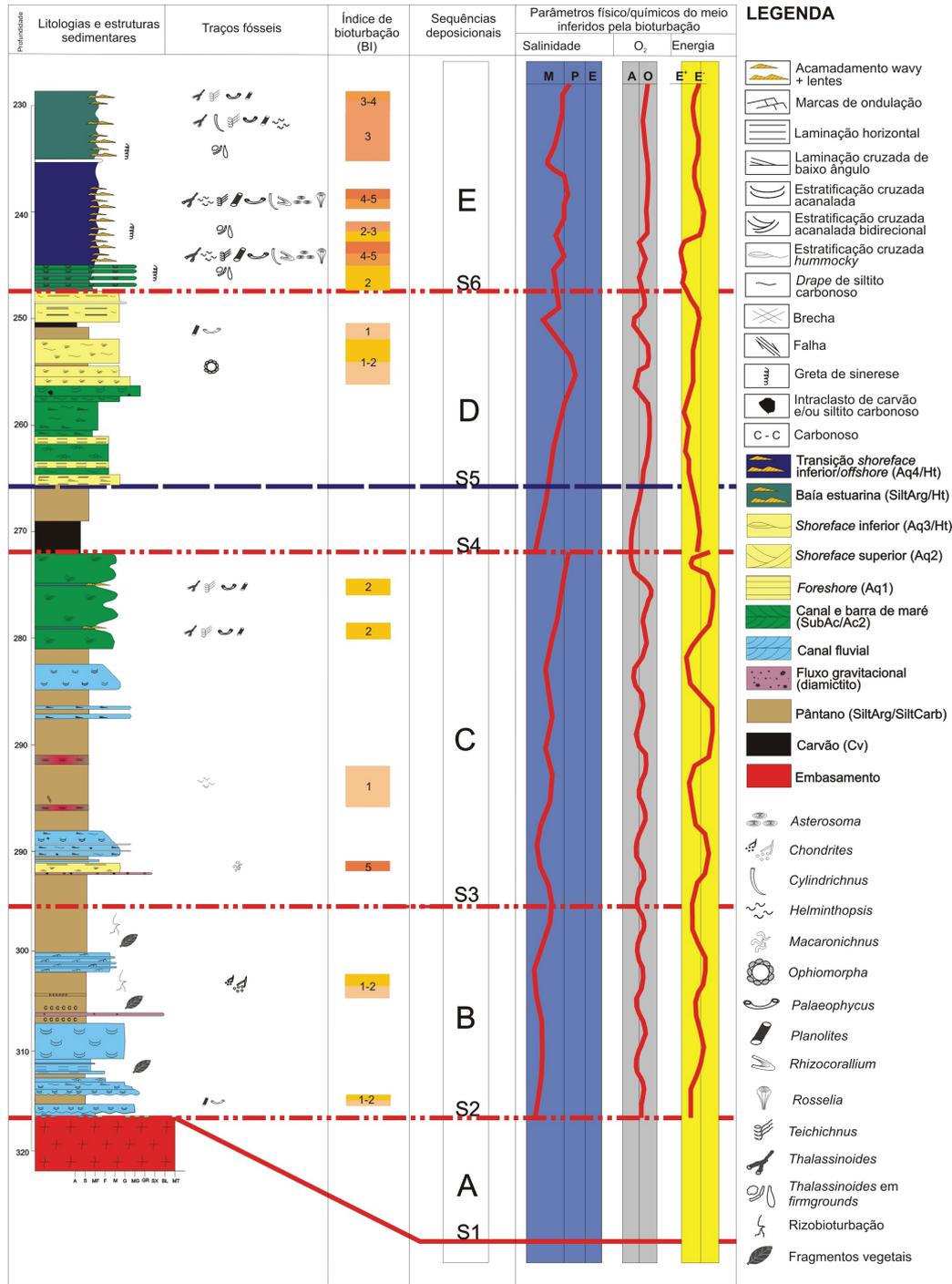


Figura 4. Perfil sedimentológico composto do topo da sucessão Rio Bonito, suas principais litofácies e a associação de fácies e icnofábricas presentes. Os índices de bioturbação e a diversidade e distribuição das populações nas fácies permitiram inferir as variações dos fatores ecológicos limitantes, propostos à direita do perfil. Abreviações: M, mesoalino; P, polialino; E, estenoalino; A, aeróbio; D, disaeróbio; E', moderada a alta energia; E'', moderada a baixa energia; S1-6, superfícies estratigráficas. Para melhor visualização das superfícies estratigráficas, ver Figuras Complementares 1-2.

Figure 4. Sedimentologic profile from the top of the Rio Bonito sedimentary succession showing the main lithofacies, the general facies and facies association stacking pattern and ichnofabrics. The bioturbation index and population diversity and distribution in sedimentary facies allowed inferring the variation of the limitant ecologic factors presented at right. Abbreviations: M, mesoalino; P, polialino; E, estenoalino; A, aeróbio; D, disaeróbio; E', moderada a alta energia; E'', moderada a baixa energia; S1-6, superfícies estratigráficas. For best visualization of the stratigraphic surfaces, see Supplementary Figures 1-2.



Figura 5. Depósitos de canais e barras de marés (litofácies Aq2), contendo a icnofábrica de *Ophiomorpha*, e de foreshore, contendo a icnofábrica de *Cylindrichnus-Thalassinoides* (Cyl-Tha) (IB-15-RS). Escala: 10 cm.

Figure 5. Tidal channel and tidal bar deposits (lithofacies Aq2) bearing *Ophiomorpha* ichnofabric, and foreshore deposits with *Cylindrichnus-Thalassinoides* composite ichnofabric (Cyl-Tha) (IB-15-RS). Scale bars: 10 cm.

Helminthopsis, *Palaeophycus* e *Thalassinoides-Palaeophycus-Helminthopsis* (Figura 4).

A icnofábrica simples de *Macaronichnus* se caracteriza pela densa ocorrência de escavações horizontais meandantes pouco espaçadas entre si, não ramificadas e sem apresentar entrecruzamentos, com paredes compactadas e preenchimento diferente da rocha matriz (Figuras 8B-C). O índice de bioturbação é alto (BI 5). Ocorre na litofácies Aq1 (testemunhos IB-15-RS e IB-06-RS), que compõe a fácies de *foreshore*. Pode ocorrer preservação em palimpsesto da icnofábrica de *Ophiomorpha* e de raízes fósseis e/ou rizobioturbação por sobre a icnofábrica de *Macaronichnus* (IB-15-RS).

As demais icnofábricas preservadas são todas compostas e representam uma

maior icnodiversidade, se comparadas às icnofábricas compostas presentes nos depósitos costeiros.

A icnofábrica de *Helminthopsis* é dominada pelo mesmo icnogênero e contém *Thalassinoides*, *Palaeophycus* e *Planolites* como icnogêneros acessórios. Possui índice de bioturbação baixo (BI 2-3). Ocorre na litofácies Aq1, na fácies de *foreshore* (IB-06-RS, Figura 6F). Rizobioturbação e fragmentos vegetais ocorrem associados localmente.

A icnofábrica de *Cylindrichnus-Thalassinoides* tem a participação acessória dos icnogêneros *Ophiomorpha*, *Palaeophycus*, *Planolites*, *Skolithos* e *Teichichnus* (Figuras 5, 8A). Possui índice de bioturbação moderado e é comum a presença de revestimento pelítico nos bordos das

escavações. Localmente, mostra-se empobrecida, com redução no tamanho das escavações, *Teichichnus* diminutos e com *spreite* curtos (testemunhos IB-04-RS, IB-15-RS, IB-22-RS e IC-36-RS) e, por vezes, com presença de rizobioturbação (IB-15-RS, IB-22-RS). Ocorre na litofácies Aq1 (IB-15-RS), compondo a fácies de *foreshore*, na litofácies Aq3 (IB-01-RS), compondo a fácies de *shoreface* inferior, e na litofácies Ht (IB-04-RS, IB-22-RS e IC-36-RS), compondo a associação de fácies de transição ao *offshore*.

A icnofábrica composta de *Palaeophycus* contém *Planolites* como icnogênero acessório. Possui índice de bioturbação baixo e ocorre na litofácies Aq3 (IB-04-RS e IB-06-RS), compondo a associação de fácies de transição ao *offshore*.

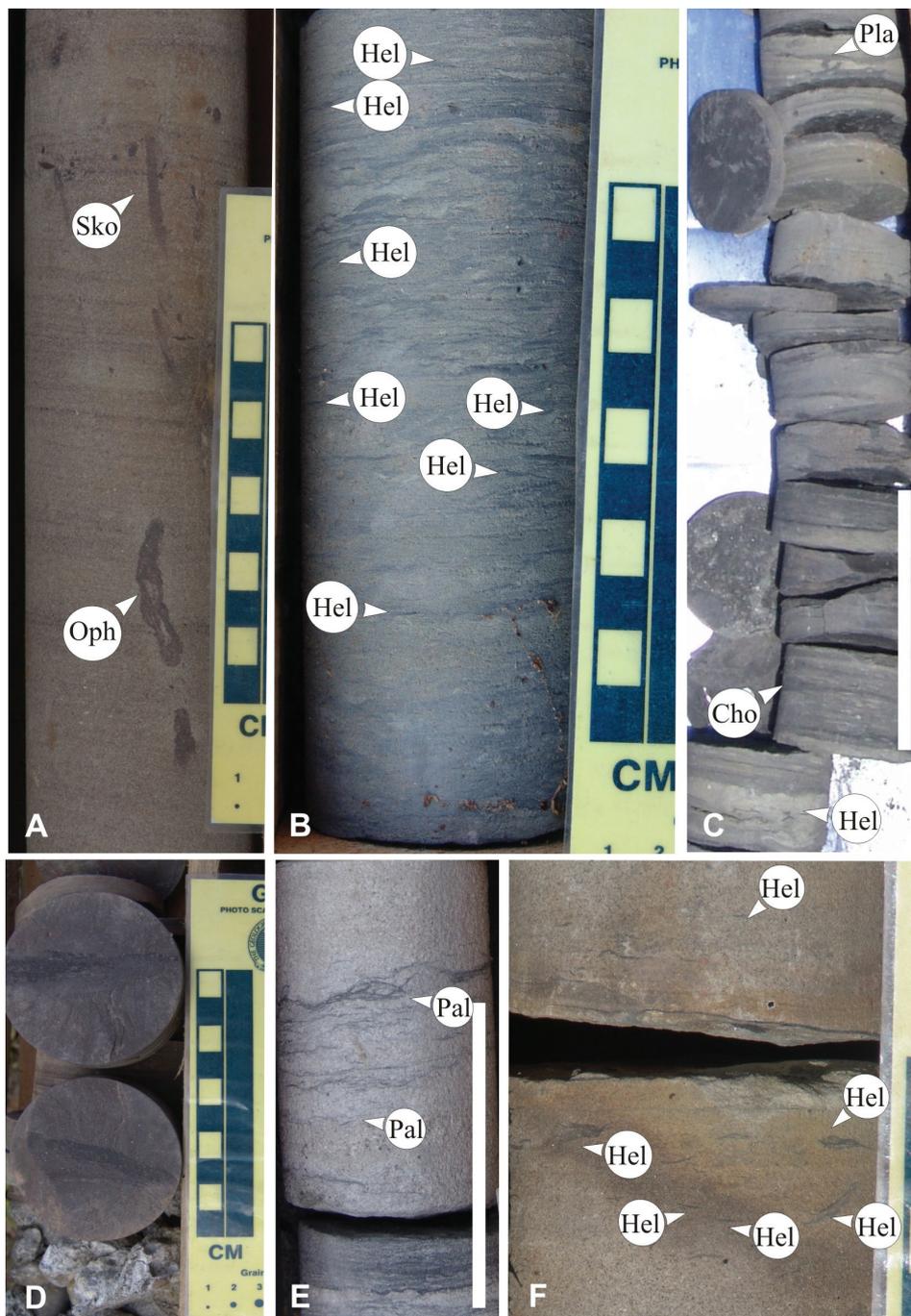


Figura 6. Icnofábricas dos depósitos costeiros. A. Depósitos de canais e barras de maré: arenitos com baixo grau de bioturbação (BI 1-2), com icnofábrica de *Ophiomorpha*, contendo também *Skolithos* (IB-15-RS). B. Depósitos heterolíticos de fácies de baía estuarina, com bioturbação moderada (BI 2-3) por *Helminthopsis* (IB-04-RS). C. Depósitos de pântano: siltitos argilosos com bioturbação moderada (BI 2-3) pela icnofábrica de *Chondrites-Helminthopsis-Planolites* (IB-01-RS). D. Compressão de folha da Flora de *Glossopteris* (IB-15-RS). E. Icnofábrica de *Palaeophycus* com baixo índice de bioturbação (BI 1) em litofácies heterolítica (IC-56-RS). F. Icnofábrica de *Helminthopsis* na litofácies de Aq1, em fácies de *foreshore* (IB-06-RS). Abreviações: Cho, *Chondrites*; Hel, *Helminthopsis*; Oph, *Ophiomorpha*; Pal, *Palaeophycus*; Pla, *Planolites*; Sko, *Skolithos*. Escalas: 10 cm.

Figure 6. Ichnofabrics from coastal deposits. A. Tidal channel and tidal bar deposits: poor bioturbated sandstones (BI 1-2) showing *Ophiomorpha* ichnofabric (Oph) with *Skolithos* (Sko) also (IB-15-RS). B. Heterolithic deposits from estuarine bay facies exhibiting moderate degree of bioturbation (BI 2-3) and *Helminthopsis* ichnofabric (Hel) (IB-04-RS). C. Swamp deposits: muddy siltstones with moderate degree of bioturbation (BI 2-3) and *Chondrites-Helminthopsis-Planolites* ichnofabric (IB-01-RS). D. Compressed leaf of *Glossopteris* sp. (IB-15-RS). E. *Palaeophycus* ichnofabric with low degree of bioturbation (BI 1) in heterolithic lithofacies (IC-56-RS). F. *Helminthopsis* ichnofabric in lithofacies Aq1 in *foreshore* deposits (IB-06-RS). Abbreviations: Cho, *Chondrites*; Hel, *Helminthopsis*; Oph, *Ophiomorpha*; Pal, *Palaeophycus*; Pla, *Planolites*; Sko, *Skolithos*. Scale bars: 10 cm.

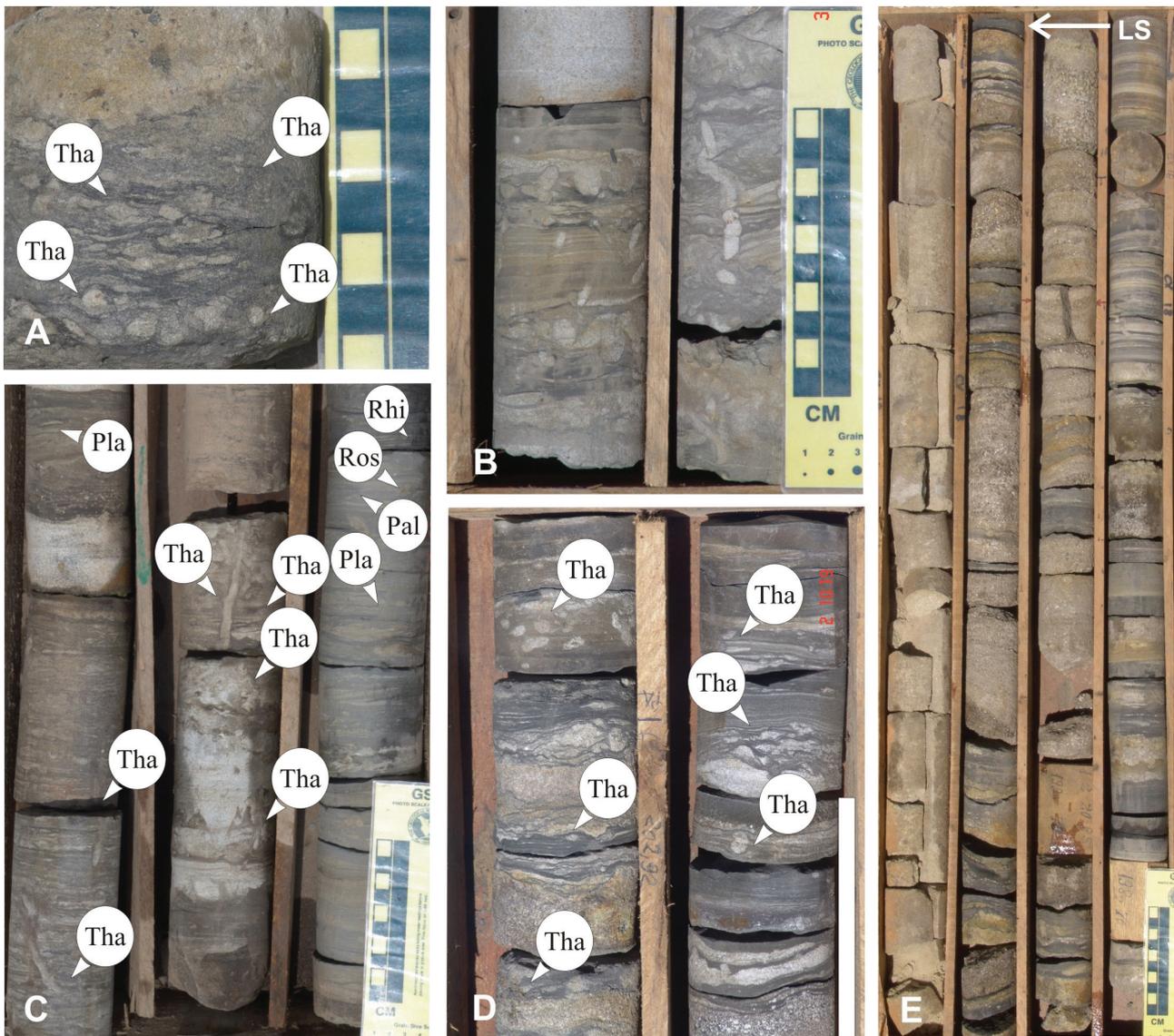


Figura 7. Icnofábrica composta de *Thalassinoides* em contexto de Icnofácies Glossifungites. A. Litofácies SiltCarb (IB-15-RS). B. Litofácies Ht (IC-20-RS). C. Preservação em palimpsesto, por sobre a icnofábrica de *Thalassinoides-Palaeophycus* (IB-06-RS). D. Litofácies SiltArg (IB-06-RS). E. Litofácies SiltCarb (IC-20-RS), correspondente ao limite de sequência demarcado pela S6 de Kern (2008) (Figuras Complementares 1-4). Abreviações: Pla, *Planolites*; Rhi, *Rhizocorallium*; Ros, *Rosselia*; Tha, *Thalassinoides*. Escalas: 10 cm. **Figure 7.** *Thalassinoides* composite ichnofabric in a Glossifungites Ichnofacies context. A. Lithofacies SiltCarb (IB-15-RS). B. Lithofacies Ht (IC-20-RS). C. Palimpsest preservation over the *Thalassinoides-Palaeophycus* ichnofabric (IB-06-RS). D. Lithofacies SiltArg (IB-06-RS). E. Lithofacies SiltCarb (IC-20-RS), corresponding to the sequence boundary marked by the S6 stratigraphic surface of Kern (2008) (Complimentary Figures 1-4). Abbreviations: Pla, *Planolites*; Rhi, *Rhizocorallium*; Ros, *Rosselia*; Tha, *Thalassinoides*. Scale bars: 10 cm.

A icnofábrica composta de *Thalassinoides-Palaeophycus-Helminthopsis* é dominada pelos dois primeiros icnogenêros, e *Helminthopsis* em menor proporção (Figura 9). *Asterosoma*, *Chondrites*, *Conichnus*, *Cylindrichnus*, *Gyrolithes*, *Ophiomorpha* *Planolites*, *Rhizocorallium*, *Rosselia*, *Skolithos* e *Teichichnus* ocorrem como icnogenêros acessórios. Possui índice

de bioturbação moderado a alto, localmente moderado a baixo. *Spreite*, quando presentes, são, em geral, reduzidos (IB-03-RS e IB-22-RS). Ocorre na litofácies de Ht (IB-03-RS, IB-06-RS, IB-08-RS, IB-15-RS, IB-22-RS, IB-74-RS, IC-20-RS, IC-32-RS e IC-56-RS), compondo a associação de fácies de transição ao *offshore*.

ANÁLISE DAS ICNOFÁBRICAS

Em geral, fatores como correntes de turbidez, salinidade, oxigenação, consistência do substrato e exposição subaérea são determinantes no controle da colonização de substratos inconsolidados por organismos bentônicos (Bromley e Ekdale, 1984; Ekdale *et al.*,



Figura 8. Icnofábricas da litofácies Aq1 na fácies de *foreshore*. **A.** Icnofábrica de *Cylindrichnus-Thalassinoides* em, contendo *Ophiomorpha* e *Teichichnus* associados (BI 2-3). **B-C.** Icnofábrica de *Macaronichnus* preservada em palimpsesto sobre icnofábrica de *Ophiomorpha* (B, IB-06-RS; C, IB-15-RS). Abreviações: Cyl, *Cylindrichnus*; Mac, *Macaronichnus*; Oph, *Ophiomorpha*; Tei, *Teichichnus*; Tha, *Thalassinoides*. Escalas: 10 cm. **Figure 8.** Ichnofabrics from lithofacies Aq1 in foreshore deposits. **A.** *Cylindrichnus-Thalassinoides* composite ichnofabric with associated *Ophiomorpha* and *Teichichnus* (BI 2-3). **B-C.** *Macaronichnus* ichnofabric preserved in palimpsest over *Ophiomorpha* ichnofabric (B, IB-06-RS; C, IB-15-RS). Abbreviations: Cyl, *Cylindrichnus*; Mac, *Macaronichnus*; Oph, *Ophiomorpha*; Tei, *Teichichnus*; Tha, *Thalassinoides*. Scale bars: 10 cm.

1984; Bromley, 1990, 1996; Beynon e Pemberton, 1992; Pemberton e Whightman, 1992; MacEachern *et al.*, 1992; Martin, 2004; Mángano e Buatois, 2004; McIlroy, 2004; MacEachern *et al.*, 2007a,

b). Assim, o padrão de bioturbação resultante costuma ser diagnóstico de tais condições quando analisado no contexto da fácies ou da associação de fácies. As onze icnofábricas reconhecidas nos

depósitos da sucessão sedimentar Rio Bonito fornecem importantes indícios para a análise da ação desses fatores numa escala de alta resolução.

Ambientes marginais-marinhos são ecologicamente estressantes para muitos organismos, devido às constantes variações nos fatores ecológicos que limitam sua distribuição. Aspectos químicos da água, como salinidade e oxigenação, e aspectos físicos, como turbidez e consistência do substrato, influenciam nas características fisiológicas e morfológicas de uma icnocenose, refletindo-se diretamente no tamanho das escavações, no índice de bioturbação e na icnodiversidade (Ekdale, 1988; Beynon e Pemberton, 1992; Gingras *et al.*, 1999, 2007; Mángano e Buatois, 2004; Savrda e Nanson 2003; MacEachern *et al.*, 2007c). As icnofábricas presentes nos depósitos estudados para as fácies marginais-marinhas irão refletir diretamente a influência desses fatores, durante ou imediatamente após ter cessado a deposição, ou mesmo durante períodos de não deposição.

As flutuações nas taxas de salinidade geralmente ocorrem em águas salobras (Perkins, 1974; Remane e Schlieper, 1971; Dalrymple *et al.*, 1992; Savrda e Nanson, 2003). O estresse causado por esse fenômeno afeta diretamente os organismos, reduzindo a biodiversidade e exigindo mudanças estratégicas nas populações (Pemberton e Whightman, 1992; Pemberton *et al.*, 2001; Netto e Rosseti, 2003; Buatois *et al.*, 2005). A adaptação fisiológica e etológica necessárias para responder a esse estresse faz com que organismos marinhos oportunistas, capazes de tolerar a flutuação de salinidade controlada pela osmo- e iônica-regulação, mostrem-se mais aptos na colonização desses ambientes de transição (Buatois *et al.*, 2005; MacEachern *et al.*, 2007c). Como consequência, suas escavações dominarão sobre as feitas pelos organismos eurialinos, transitórios ou *facies crossing* (Perkins, 1974). A alta taxa de mortalidade, a capacidade de rápida reprodução, o ciclo de vida curto e a maturidade sexual precoce indica que o recrutamento juvenil é um reflexo das

condições de sobrevivência impostas sobre a fauna e leva a uma redução do tamanho corporal dos organismos (Rees *et al.*, 1977; Pemberton e Whightman, 1992; MacEachern *et al.*, 2007c). O oxigênio dispendido para a manutenção do controle osmótico e iônico é minimizado também com a redução do tamanho corporal (Remane e Schlieper, 1971). Assim, as icnofábricas geradas em ambientes sujeitos a constantes flutuações de salinidade caracterizam-se pela baixa icnodiversidade, presença de assembleias marinhas empobrecidas (monoespecíficas), predomínio de formas simples e, especialmente, com escavações diminutas (Pemberton e Whightman, 1992; Bann e Fielding, 2004; Bann *et al.*, 2004; Buatois *et al.*, 2005, 2007; Gingras *et al.*, 2007; MacEachern *et al.*, 2007a, b). Nos depósitos estudados, as icnofábricas de *Chondrites*, *Chondrites-Helminthopsis-Palaeophycus*, *Cylindrichnus-Thalassinoides*, *Helminthopsis*, *Ophiomorpha*, *Palaeophycus*, *Planolites*, *Thalassinoides*, e *Thalassinoides-Palaeophycus* são, em maior ou menor escala, representativas dessas condições.

Em depósitos marinhos de transição ao *offshore*, icnofábricas com escavações bem desenvolvidas e ornamentadas, com maior incremento da icnodiversidade e no índice de bioturbação (BI 4-6), indicam a melhora da salinidade e sua condição mais estável (Beynon e Pemberton, 1992; Netto e Rossetti, 2003; Mángano e Buatois, 2004; Buatois *et al.*, 2005, 2007; Gingras *et al.*, 2007). A icnofábrica de *Thalassinoides-Palaeophycus-Helminthopsis* é a que melhor representa estas condições nos testemunhos estudados. Caracteriza-se por apresentar feições relacionadas a estruturas de habitação, alimentação e pastagem e pela combinação de habitação-alimentação, produzidas por organismos depositívoros e suspensívoros, a exemplo do que se observa nas icnofaunas de tempo bom (Beynon e Pemberton, 1992; Savrda e Nanson 2003; Buatois *et al.*, 2007). Além desta, as icnofábricas de *Cylindrichnus-Thalassinoides*, *Helminthopsis*, *Palaeophycus* e *Macaronichnus* também ocorrem associadas a depósitos marinhos na área de estudo.

A deficiência de oxigênio é uma característica de ambientes marinhos

profundos e/ou de ambientes protegidos da costa associados à deposição de sedimentos finos em condições de baixa energia (Gingras *et al.*, 2007), atingidos eventualmente por eventos de tempestades, descargas fluviais ou pelo alcance das marés (McIlroy, 2004). Esta condição também resulta na redução no tamanho das escavações e diminuição significativa da icnodiversidade (Rhoads e Morse, 1971; Savrda e Bottjer, 1989; Wignall, 1991). Suítes dominadas pelos icnogêneros *Chondrites*, *Phycosiphon* e/ou *Planolites* são indicativas de redução de oxigênio em ambientes salinos (Bromley e Ekdale, 1984; Martin, 2004). As baixas taxas de sedimentação propiciam a decantação da matéria orgânica em suspensão junto ao substrato e devido ao processo de decomposição, diminuem sua oxigenação, propiciando a colonização pelos produtores destas escavações (Gingras *et al.*, 2007). Nos níveis aqui abordados, depósitos pelíticos indicativos de anoxia são registrados naqueles representativos das zonas costeiras protegidas e de condições restritas, que levam a formação de turfeiras (litofácies Cv, Tabela 1), junto a áreas pantanosas ou planícies de maré (MacEachern *et al.*, 2007a, b, c). Em ambientes oligoalinos ou de água doce, entretanto, a avaliação de condições de baixa oxigenação a partir da icnofauna fica restrita à existência de uma icnodiversidade baixíssima e à presença de *Planolites* em suíte monoespecífica (Tognoli e Netto, 2003), único dos três icnogêneros previamente citados que ocorre em ambientes não-marinhos. A icnofábrica de *Planolites* presente na litofácies SiltArg basal da sucessão e vinculada a depósitos de planícies de inundação é um exemplo disso (Figura 3). Trata-se de uma icnofábrica discreta, simples e monoespecífica, sugerindo atividade de alimentação de organismos vermiformes generalistas tróficos não seletivos. O baixo índice de bioturbação e o tamanho reduzido das escavações parece ser a resposta às condições de salinidade reduzida e deficiência de oxigênio.

Altas taxas deposicionais são também condicionantes da fauna, sobretudo da fauna bentônica. A velocidade alta

das correntes, turbidez e sedimentação episódica limitam a colonização pela infauna, em especial dos organismos filtradores (Buatois e López-Angriman, 1992; Ranger e Pemberton, 1992; Gingras *et al.*, 2007). Escavações verticais de habitação (e.g., *Arenicolites*, *Ophiomorpha*, *Skolithos*, *Cylindrichnus*), estruturas de equilíbrio (e.g., *Diplocraterion*) e escavações intraestratais de alimentação (e.g., *Macaronichnus*) serão os elementos dominantes nas icnofábricas de depósitos de alta energia (MacEachern *et al.*, 2007a, b, c).

Nos depósitos estudados, a icnofábrica de *Ophiomorpha* mostra-se monoespecífica e é caracterizada por escavações verticais (Figura 6A), cujos bordos são revestidos por pequenos *pellets*, como proposto por Frey *et al.* (1978) e Pollard *et al.* (1993). Ocorre em arenitos com estratificação cruzada acanalada, compondo a associação de fácies de canais e barras de maré. O índice de bioturbação baixo e o caráter monoespecífico da icnofábrica apóiam a alta energia dos depósitos, ou mesmo uma alta frequência deposicional. Contudo, podem também refletir flutuações extremas de salinidade (Howard *et al.*, 1975). Em regime de macro marés, a variação da velocidade das correntes condiciona a migração das formas de leito e, como consequência, se suas cristas serão retas ou sinuosas (Dalrymple *et al.*, 1992). A alta energia do sistema, associada à migração de formas de leito, regula o estabelecimento e desenvolvimento da fauna bentônica, restringindo o registro das escavações verticais dos organismos suspensívoros, dominantes em ambientes de submarés de alta energia (Tognoli e Netto, 2003; Mángano e Buatois, 2004). Uma icnofábrica semelhante de *Ophiomorpha* foi descrita por Bromley (1990), que sugere colonização em ambientes de alta energia, como barras estuarinas e canais de maré. Aqui, esta icnofábrica ocorre associada a pequenas escavações verticais de *Skolithos* e rizobioturbação (Figura 6A). Momentos de baixa sedimentação favorecem a bioturbação por estes organismos, que escavam através do sedimento abaixo da superfície de reativação (Pollard *et al.*, 1993) e



Figura 9. Icnofábrica de *Thalassinoides-Palaeophycus-Helminthopsis* na litofácies Ht de depósitos de *shoreface* inferior e de transição ao *offshore*. A. O alto índice de bioturbação (BI 4-5) e maior icnodiversidade são característicos dessa icnofábrica, que está presente no topo da maioria dos testemunhos de sondagem analisados. B. Detalhe do intervalo 195,65 m no testemunho IC-20-RS, mostrando domínio de morfologias associadas a *Thalassinoides* e *Palaeophycus*. C-D. *Teichichnus* diminutos e com *spreite* curtos. Abreviações: Pal, *Palaeophycus*; Tei, *Teichichnus*; Tha, *Thalassinoides*. Escalas: A, 10 cm; B-D, 3 cm.

Figure 9. *Thalassinoides-Palaeophycus-Helminthopsis* ichnofabric from the lithofacies Ht in lower *shoreface* and *offshore* transition deposits. A. The high degree of bioturbation (BI 4-5) and higher ichnodiversity are characteristic of this ichnofabric, which occurs at the top of most of the studied cores. B. Detail of the 195,65 m interval from IC-20-RS core showing dominance of *Thalassinoides* and *Palaeophycus* burrows. C-D. Diminute *Teichichnus* with short *spreite*. Abbreviations: Pal, *Palaeophycus*; Tei, *Teichichnus*; Tha, *Thalassinoides*. Scales bars: A, 10 cm; B-D, 3 cm.

eventualmente favorecem o desenvolvimento de vegetação higrófila e deposição de sedimentos mais finos entre os planos de estratificação.

Os depósitos marinhos de alta energia de *foreshore* abrigam a icnofábrica simples de *Macaronichnus*, caracterizada pela ocorrência de escavações horizontais meandantes (Figuras 5, 8B-C). Ocorrem de forma intensa, paralelas à laminação e representam atividade de organismos do meiobento, que se alimentam de microdetritos e de bactérias. O alto índice de bioturbação (BI 5) contrasta com a baixa icnodiversidade, reflexo da alta energia do meio (Pemberton *et al.*, 2001). A constante agitação de ondas da zona de intermarés e da zona de quebra-mar favorece a circulação de água salina para níveis mais profundos dos depósitos de areias, renova o teor de oxigênio e traz microorganismos e partículas de matéria orgânica para a água intersticial. Em geral, *Macaronichnus* é registrado em depósitos de ambientes de alta energia, como *shoreface* superior e *foreshore* (Pemberton *et al.*, 2001; Bann *et al.*, 2004; Fielding *et al.*, 2007). No testemunho de sondagem IB-15-RS, a icnofábrica de *Macaronichnus* ocorre preservada em palimpsesto sobre a de *Ophiomorpha* e rizo-bioturbação (Figura 6A), sugerindo que os depósitos de *foreshore* migraram sobre barras em canais de maré (MacEachern e Pemberton, 1992; Pollard *et al.*, 1993).

Em ambientes de energia baixa a moderada, entretanto, a icnodiversidade e o índice de bioturbação variam, sendo maiores e mais estáveis nos ambientes polialinos e estenoalinos, menores e altamente variáveis nos mesoalinos e oligoalinos, e moderados e mais estáveis em ambientes de água doce (Pemberton e Wightman, 1992; Bromley, 1996; Buatois *et al.*, 2007). Nos depósitos estudados, as icnofábricas registradas na litofácies de heterolitos em depósitos costeiros de baía estuarina e em depósitos marinhos de transição *shoreface* inferior/*offshore* são um bom exemplo disso. A baixa icnodiversidade observada na icnofábrica de *Cylindrichnus-Thalassinoides*, a presença de *Teichichnus* com *spreite* curtos e de escavações verticais de habitação de

organismos suspensívoros (*Cylindrichnus*, *Ophiomorpha* e *Skolithos*) refletem a variabilidade do sistema, ora sujeito à ação de correntes mais intensas, ora experimentando momentos de calmaria, sob condições de águas mesoalinas sujeitas a flutuações de salinidade (Savrda e Nanson, 2003). Já a icnofábrica de *Thalassinoides-Palaeophycus* é dominada por escavações horizontais de organismos depositivos e pastadores, refletindo o retrabalhamento da infauna no substrato durante períodos de menor energia, e possivelmente maior restrição na circulação de fundo (Savrda e Nanson, 2003).

O tipo de substrato é um dos fatores de maior controle na distribuição da icnofauna. As características do substrato, como consistência ou grau de consolidação podem gerar variações preservacionais distintas de um mesmo comportamento (Bromley, 1996; Mángano *et al.*, 1998; Buatois *et al.*, 2002). A maioria das icnofábricas reconhecidas na sucessão sedimentar Rio Bonito na área de estudo possui escavações geradas em substratos classificados entre os tipos *softground* (macios) e *stifferond* (firmes, mas ainda plásticos). Somente a icnofábrica de *Thalassinoides* ocorre em substratos do tipo *firmground* (firme) e caracteriza os depósitos costeiros e as fácies de siltitos carbonosos (associação de fácies de planícies de marés e de pântano), siltitos argilosos (associação de fácies de pântano) e heterolitos (associação de fácies de baía estuarina). As escavações horizontais de habitação de *Thalassinoides*, vinculadas a ambientes de baixa energia serão dominantes e os índices de bioturbação baixos como proposto por MacEachern e Burton (2000) e Lettley *et al.* (2007). Caracteriza-se pelo limite abrupto e pela ausência de revestimento nos bordos da escavação, sinalizando a presença de substratos pelíticos firmes (*firmgrounds*), com preenchimento passivo por material mais grosso e distinto da rocha matriz. A presença dos *firmgrounds* implica na exposição subaérea do substrato pelítico, ou ainda, na prévia exumação de um substrato pelítico compactado, ainda em condições subaquáticas, por eventos erosivos significativos que levam à sua

exposição subaérea (Bromley, 1996; Lettley *et al.*, 2007). Estas características remetem a suítes típicas de Icnofácies Glossifungites, representativas da colonização desses substratos compactados por fauna marinha e posterior recobrimento do substrato por sedimentos trazidos por eventos episódicos significativos (Netto e Rossetti, 2003; Mángano e Buatois, 2004; Pemberton *et al.*, 2004; Gingras *et al.*, 2007). Nos depósitos estudados, é possível se observar preservação em palimpsesto da icnofábrica de *Thalassinoides* sobre as icnofábricas compostas de *Cylindrichnus-Thalassinoides* e *Thalassinoides-Palaeophycus* (Figura 7C). A preservação em palimpsesto sugere uma sucessão de eventos de colonização, que caracterizam superfícies *time-averaged* e representam o retrabalhamento por icnocenoses distintas, tolerantes às constantes variações ambientais (Pemberton e Wightman, 1992; Pemberton *et al.*, 2001; Mángano e Buatois, 2004).

ANÁLISE ESTRATIGRÁFICA E ASSINATURAS ICNOLÓGICAS

Fatores físico-químicos na análise de fácies, como tipo de suprimento alimentar, consistência do substrato, salinidade da água, oxigenação, temperatura e eventuais e rápidas exposições subaéreas do substrato, podem ser identificados pela bioturbação e por alguns tipos de estruturas sedimentares. A presença de bioturbação nos depósitos auxilia, portanto, o refinamento da sua interpretação, em especial nas análises em alta resolução (Frey, 1975; Bromley, 1996; Pemberton *et al.*, 2001; Buatois *et al.*, 2002; MacEachern *et al.*, 2007a, b). Dessa forma, o padrão de ocorrência das icnofábricas presentes na sucessão Rio Bonito na área de estudo permite refinar os processos atuantes na deposição das diferentes fácies, permitindo um maior detalhamento dos processos envolvidos nos ciclos transgressivos-regressivos de menor escala que compõem a história deposicional dessa sucessão.

O estudo paralelo de Kern (2008) reconheceu cinco sequências de 4ª ordem na sucessão estudada (sequências

A-E, Figuras Complementares 1-2). Os depósitos das litofácies Pg, Ort, Ac1, Ac2 e SiltArg são dominantes na base da sucessão aqui estudada e caracterizam, preferencialmente, depósitos relacionados a canais e planícies de inundação (sequências A-C). Apenas a litofácies SiltArg na sequência B se mostra bioturbada, e mesmo assim, de forma muito pontual (IB-04-RS, Figura 4; seções estratigráficas 3 e 4, Figura Complementar 2). O índice de bioturbação muito baixo, o tamanho reduzido das escavações e a presença exclusiva de icnofábrica de *Planolites* são características diagnósticas de estresse ambiental e de condições oligoalinas ou de água doce, associadas a um substrato pouco oxigenado.

Por sobre esses depósitos, assentam-se litofácies cujas associações caracterizam depósitos tipicamente costeiros, sujeitos a ingressões marinhas. Esses depósitos, situados no terço superior da sucessão, se estendem até o topo da Formação Rio Bonito na área de estudo. A associação de fácies de pântanos se assenta diretamente por sobre os depósitos fluviais. Dominam os depósitos das litofácies SiltArg e SiltCarb, coincidentes com as sequências A-C de Kern (2008) e são em geral ricos em fragmentos vegetais e rizobioturbação, com bioturbação de ocorrência pontual nas sequências B e C.

Os siltitos argilosos que compõem a sequência B contêm icnofábrica de *Palaephycus* (IC-36-RS, seção estratigráfica 3, Figura Complementar 2), na base, e de *Chondrites* (IB-17-RS, seção estratigráfica 4, Figura Complementar 2), na porção média. Ambas apresentam baixo índice de bioturbação e caráter monoespecífico, sugerindo alto estresse ambiental. A presença de *Palaephycus* aponta para águas de fundo bem oxigenadas, já que esta escavação caracteriza domicílio permanente ou semipermanente de organismo suspensívoro ou filtrador (Frey e Pemberton, 1984; Bromley, 1996; Buatois *et al.*, 2002). Embora sua presença não permita delimitar a salinidade das águas, a presença de *Chondrites*, sugere águas salinas, pelo menos mesoalinas, na região norte-nordeste da

área de estudo e condições de anoxia do substrato, já que seu produtor é considerado um organismo quimiossimbionte (Bromley e Ekdale, 1986; Savrda, 1992; Bromley, 1996; Gingras *et al.*, 2007). Tais características permitem interpretar os depósitos do testemunho IC-36-RS como representativos de zonas mais interiores dentro do sistema costeiro, possivelmente lagos ou lagunas rasas, enquanto que os do testemunho IB-17-RS como gerados em zonas mais marinhas, como um ecossistema de manguezal.

Na base das sequências B e C ocorrem depósitos da fácies de heterolitos contendo a icnofábrica de *Planolites* (IB-22-RS, seção estratigráfica 1, Figura Complementar 1). Como nas icnofábricas anteriores, o índice de bioturbação é baixo, as escavações mostram tamanhos reduzidos e sem os icnotáxons marinhos, como *Chondrites* e *Phycosiphon*. Esse padrão de icnofábrica sugere condições de forte estresse ambiental, causado possivelmente por redução extrema na salinidade e oxigenação do meio. Kern (2008) interpretou esses depósitos como representativos de baía estuarina. Contudo, o padrão extremamente pobre da icnofauna e a presença de depósitos de canais sotopostos na base da sequência B, e de paleossolos, na base da sequência C, sugerem corpos de água estagnados, possivelmente relacionados ao sistema fluvial ou fortemente influenciados pelo afluxo de água doce. Esta mesma icnofábrica e com características comparáveis, é observada também na litofácies SiltArg intercalada a depósitos interpretados por Kern (2008) como de canais e barra fluvial e de barras de marés, na porção sudeste da área de estudo (IB-74-RS, seção estratigráfica 3, Figura Complementar 2). Na porção norte, níveis delgados da litofácies SiltArg contendo a mesma icnofauna aparecem intercalados a depósitos mais expressivos de barras de maré (IB-15-RS, Figura 4; seção estratigráfica 1, Figura Complementar 1), revelando maior domínio dos processos marinhos, mas sugerindo a presença de condições dulcícolas durante determinados períodos.

Espessos pacotes da litofácies SiltArg ocorrem na porção média da sequência C, estando bem expressos no testemunho IB-08-RS (seções estratigráficas 2 e 4, Figuras Complementares 1-2). Estes pacotes contêm a icnofábrica de *Helminthopsis* com características similares às observadas na icnofábrica de *Planolites*. Uma vez que *Helminthopsis* é uma trilha fecal simples de organismos vermiformes detritívoros ou saprofágicos (Bromley, 1996; Buatois *et al.*, 2002), não permite avaliar a variação de salinidade. Mais uma vez a presença da icnofábrica de *Chondrites* no testemunho IC-20-RS, no centro da área de estudo, apóia no entanto, condições salinas e anoxia no substrato e um contato com o mar.

Na porção oeste da área de estudo a sequência C, contudo, apresenta uma maior icnodiversidade e intensidade de bioturbação (seção estratigráfica 1, Figura Complementar 1). Os depósitos mais basais da sequência contêm a icnofábrica de *Thalassinoides-Palaephycus*, que se caracteriza pela melhora do índice de bioturbação (BI 2), tamanho reduzido das escavações e presença de uma icnodiversidade baixa, com domínio de escavações feitas por organismos essencialmente marinhos (IB-01-RS, seções estratigráficas 1 e 4, Figuras Complementares 1-2). Mas as características da icnofauna ainda refletem estresse ambiental, caracterizando condições de águas salobras (mesoalinas), possivelmente associadas a um contexto lagunar/estuarino. Dá lugar à icnofábrica de *Chondrites-Helminthopsis-Planolites* nos depósitos siltico-argilosos sobrepostos (litofácies SiltArg, IB-01-RS, seções estratigráficas 1 e 4, Figuras Complementares 1-2) que, aparentemente, representa os depósitos mais profundos do corpo lagunar/estuarino, com registro da icnofábrica de *Thalassinoides-Palaephycus*. O índice de bioturbação melhora (BI 2-3) sugerindo uma maior estabilidade do meio, mas o tamanho das escavações se mantém reduzido, sugerindo a manutenção das condições mesoalinas. A ocorrência exclusiva de escavações de organismos detritívoros/saprofágicos e quimiossimbiontes sugere baixas taxas

de oxigenação do substrato e possíveis períodos de anoxia.

A presença de arenitos finos da litofácies Aq3 por sobre os depósitos anteriores marca um evento transgressivo, com o estabelecimento das fácies marinhas de *shoreface* inferior por sobre os depósitos costeiros. A icnofábrica de *Cylindrichnus-Thalassinoides* se faz presente na porção sudoeste da área de estudo (IB-01-RS, seções estratigráficas 1 e 4, Figuras Complementares 1-2) e mostra índice de bioturbação moderado (BI 3-4) e icnodiversidade baixa. Escavações de organismos de hábito suspensívoro são comuns, refletindo um ambiente de maior energia em relação aos anteriores, com predomínio de ação de correntes junto ao fundo. Contudo, as escavações ainda mostram tamanho reduzido e *spreite* curtos em *Teichichnus*, sugerindo a presença de águas no máximo polialinas. Lateralmente a estes depósitos, na porção norte da área, ocorre a icnofábrica de *Thalassinoides-Palaeophycus-Helminopsis* (IB-15-RS, seção estratigráfica 1, Figura Complementar 1), a mais diversificada e com maior índice de bioturbação (BI 4-5) entre as registradas. Caracteriza-se por uma icnofauna típica de *shoreface* inferior/transição a *offshore* e representa a colonização do substrato em períodos de tempo bom, entre eventos de tempestade. As condições de moderada a baixa energia reinantes durante esses períodos favorece a alta produtividade orgânica e abre oportunidade de colonização aos tipos tróficos, aumentando consideravelmente a diversidade da fauna endobêntica e intensificando o retrabalhamento do substrato. Esse padrão de colonização é próprio da Icnofácies Cruziana e é uma assinatura icnológica clássica de depósitos marinhos plataformais (Frey, 1975; Bromley, 1996; Pemberton *et al.*, 2001; Buatois *et al.*, 2002, 2005, 2007). Contudo, apesar do incremento na icnodiversidade e da ornamentação e tamanho da icnofábrica *Thalassinoides-Palaeophycus-Helminopsis* na porção basal da sequência C (testemunho IB-15-RS), o índice de bioturbação é moderado, sugerindo domínio de águas polialinas, a exemplo do que foi observado no testemunho IB-01-RS.

Uma mudança significativa de fácies marca o estabelecimento de espessos pacotes da litofácies SiltArg por sobre os arenitos finos da litofácies Aq3 e depósitos heterolíticos associados (litofácies Ht). Os depósitos siltico-argilosos ricos em fragmentos vegetais dominam no restante da sequência C na porção oeste da área de estudo e não possuem evidências de bioturbação, sugerindo uma queda do nível de base e uma maior influência de água doce, com a retomada dos pântanos relacionados a depósitos de canais e barra fluvial e/ou de marés e desenvolvimento local de paleossolos (seção estratigráfica 1, Figura Complementar 1; Kern, 2008). Na porção norte, contudo, os depósitos marinhos rasos se mantêm, com acúmulo de arenitos finos a médios da litofácies Aq2, representativos de depósitos de *shoreface* superior, intercalados por depósitos siltico-argilosos da litofácies SiltCarb contendo icnofábrica monoespecífica de *Thalassinoides* (IB-15-RS, seção estratigráfica 1, Figura Complementar 1). O limite abrupto das escavações, sua pouca compactação e o preenchimento passivo revela escavações feitas em substratos firmes (*firmgrounds*), num contexto de Icnofácies Glossifungites (Bromley, 1996; Pemberton *et al.*, 2001; Gingras *et al.*, 2007). A presença de siltitos argilosos contendo ocorrências de suíte de *Glossifungites* entre os depósitos arenosos da litofácies Aq2 sinaliza um período de rebaixamento do nível de base, onde as condições marginais marinhas são restabelecidas. O índice de bioturbação moderado (BI 4) indica um maior tempo para colonização e sugere o desenvolvimento de ambientes de supramaré, que são posteriormente recobertos por depósitos de *shoreface* superior, indicando o início de um novo ciclo transgressivo.

Por sobre os depósitos de *shoreface* superior assentam-se os arenitos finos a médios da litofácies Aq1, representativos de depósitos de *foreshore*. Esses depósitos contêm a icnofábrica de *Macaronichnus* (IB-15-RS, IB-06-RS; seção estratigráfica 1, Figura Complementar 1), caracterizada pelo índice de bioturbação alto (BI 5) e pela presença exclusiva de escavações

horizontais, resultante do retrabalhamento do substrato por organismos vermiformes detritívoros que se alimentam de restos orgânicos e bactérias em zonas profundas do substrato, em ambientes de maior energia (Pemberton *et al.*, 2001). A presença de icnofábrica de *Macaronichnus* é, pois, uma assinatura clássica de depósitos marinhos rasos de alta energia.

A porção superior da sequência C, na porção norte da área de estudo, é marcada pelo estabelecimento de depósitos de canais e barras de marés caracterizados pela intercalação das litofácies SubAc e SiltCarb. Os arenitos médios a grossos da litofácies SubAc contêm ocorrências pontuais da icnofábrica de *Ophiomorpha* (IB-15-RS; seção estratigráfica 1, Figura Complementar 1). *Ophiomorpha* representa a atividade de crustáceos endobentônicos que escavam um sistema de túneis complexos à medida que a escavação avança (Frey *et al.*, 1978). Apresenta os bordos revestidos por *pellets* produzidos a partir do material decantado e da adição de muco. Essa estratégia gera uma pré-cimentação dos bordos, auxiliando na manutenção da escavação, que deve permanecer aberta, para garantir o deslocamento do animal e a circulação de água no interior da galeria (Frey *et al.*, 1978; Bromley, 1996). Crustáceos decápodos talassinídeos e calianassídeos são os principais produtores de *Ophiomorpha* em depósitos mesocenozóicos. São organismos marinhos que suportam flutuações de salinidade e comumente invadem as zonas costeiras levados pelas correntes de marés. Aparentemente são os únicos organismos que suportam o somatório e predomínio das condições de moderada a alta energia e flutuação na salinidade (Howard *et al.*, 1975). Em depósitos paleozóicos, contudo, as ocorrências de *Ophiomorpha* são mais escassas, e as galerias, menores e mais simples. O caráter peletado das paredes, contudo, se mantêm, sugerindo a adoção das mesmas estratégias pelos produtores ancestrais. Assim, o índice de bioturbação baixo e a ocorrência exclusiva de *Ophiomorpha* nesta icnofábrica sugerem domínio de condições de moderada a alta energia

e de frequente flutuação na salinidade, situando os depósitos em zonas costeiras. Apesar de não detalhado neste estudo, observa-se também a ocorrência da icnofácies de *Ophiomorpha* na litofácies SubAc na porção oeste da área de estudo (IC-48-RS, seção estratigráfica 1, Figura Complementar 1).

À medida que se estabelecem depósitos de *foreshore* (litofácies Aq1) na porção norte da área de estudo, sistemas de canais e barras de maré passam a se desenvolver na porção oeste, onde antes se acumulavam os depósitos de pântanos. A icnofábrica de *Thalassinoides-Palaeophycus* aparece associada a depósitos heterolíticos intercalados (IB-22-RS; seção estratigráfica 1, Figura Complementar 1), apresentando as mesmas características previamente observadas nos depósitos heterolíticos presentes na base da sequência C. Estes depósitos heterolíticos parecem representar períodos de menor energia dentro do sistema de canais e barras de maré, favorecendo uma colonização mais estável. Em direção ao topo da sucessão observa-se a recorrência dos depósitos de supramaré (litofácies SiltArg) contendo icnofábrica de *Thalassinoides* em contexto de Icnofácies Glossifungites (IB-06-RS, seções estratigráficas 1 a 3, Figuras Complementares 1-2), e os depósitos de canais e barras de marés contendo a icnofábrica de *Ophiomorpha* (IB-15-RS, seção estratigráfica 1, Figura Complementar 1), ambas apresentando as mesmas características observadas previamente.

O topo da sequência C é caracterizado pela presença da icnofábrica de *Cylindrichnus-Thalassinoides* nos arenitos finos da litofácies Aq1 (depósitos de *foreshore*, Tabela 1), na porção norte da área de estudo (IB-15-RS, seção estratigráfica 1, Figura Complementar 1). A manutenção das características da icnofábrica observadas na litofácies Aq3 na base da sequência (IB-01-RS) e a alternância entre depósitos de *foreshore* e de canais e barras estuarinas no topo da sucessão nessa região reforçam o caráter marinho raso desses depósitos na porção norte da área de estudo, em relação à porção oeste, nesse tempo deposicional. A presença de depósitos de

foreshore contendo icnofábrica de *Macaronichnus* no testemunho IB-06-RS (seção estratigráfica 1, Figura Complementar 1) confirma esse caráter.

A camada de carvão Iruí Superior marca a base da sequência D. Sobre ela, na porção leste da área de estudo, assentam-se depósitos heterolíticos de pequena espessura (litofácies Ht) contendo icnofábrica de *Helminthopsis* (IB-04-RS, IB-22-RS, seções estratigráficas 1 e 3, Figuras Complementares 1-2) e depósitos síltico-argilosos (litofácies SiltArg) contendo icnofábrica de *Planolites* (IB-08-RS, seções estratigráficas 3 e 4, Figura Complementar 2). A presença exclusiva de trilhas fecais de organismos detritívoros/saprofágicos sugere ambientes com predomínio de baixa energia, ricos em matéria orgânica e de natureza disaeróbia a anaeróbia. O índice de bioturbação baixo a moderado (BI 1-3) e o caráter mono específico da icnofauna, contudo, remetem a situações estressantes, que podem ter sido causadas pela deficiência de oxigênio no substrato ou nas águas de fundo, por flutuações extremas de salinidade ou mesmo pelo estabelecimento de condições oligoalinas. É comum a presença de escavações feitas por organismos quimiossymbiontes (e.g., *Chondrites* e *Phycosiphon*) em ambientes marinhos redutores ricos em matéria orgânica, e sua ocorrência foi reportada em estudos anteriores na sucessão Rio Bonito/Palermo no Rio Grande do Sul, inclusive na área de estudo (Netto, 1994, 1998; Buatois *et al.*, 2001, 2007). A ausência de icnofábricas desses icnotaxons nas litofácies acima analisadas é, pois, incomum e pode ser um reflexo do domínio de águas oligoalinas a doces e sugere depósitos inundados mais continentalizados, possivelmente pântanos. Lateralmente, esses depósitos estão associados a depósitos pelíticos das litofácies SiltArg e SiltCarb, não bioturbados.

Na porção sudeste da área de estudo, contudo, a ocorrência das icnofábricas de *Ophiomorpha*, *Thalassinoides* e *Thalassinoides-Palaeophycus-Helminthopsis* marca a presença de condições salobras a polialinas em depósitos das litofácies

Aq2 e Ht compondo depósitos de canais e barras de marés e de baía estuarina. Os siltitos carbonosos que formam a base da sequência D nessa região (IC-32-RS, seção estratigráfica 3, Figura Complementar 2) contêm a icnofábrica de *Thalassinoides* em contexto de Icnofácies Glossifungites, sugerindo períodos de rebaixamento do nível de base e exposição do substrato pelítico da zona de supramaré, que é colonizado posteriormente por organismos marinhos, quando dos subseqüentes pulsos transgressivos. Os arenitos da litofácies Aq2 contendo a icnofábrica de *Ophiomorpha* aparecem sobrepostos ou intercalados aos siltitos carbonosos (IC-32-RS, seção estratigráfica 3, Figura Complementar 2) representam os períodos de maior influência marinha, onde há domínio dos processos de maré de maior energia e, possivelmente, flutuações significativas na salinidade, a julgar pela ocorrência exclusiva de *Ophiomorpha* nessa icnofábrica. A ocorrência da icnofábrica de *Thalassinoides-Palaeophycus-Helminthopsis* nos heterolitos que sucedem o pacote anterior marca o estabelecimento de condições marinhas. O índice de bioturbação moderado (BI 2-4), contudo, sugere condições ainda instáveis do meio, com domínio de águas polialinas. A presença da icnofábrica de *Thalassinoides* em contexto de Icnofácies Glossifungites nesses depósitos heterolíticos, preservada em palimpsesto sobre a icnofábrica de *Thalassinoides-Palaeophycus-Helminthopsis* (seção estratigráfica 3, Figura Complementar 2) sugere rebaixamento do nível de base e colonização em substratos do tipo *stiffground*, representando períodos de curta exposição e erosão do substrato (Lettley *et al.*, 2007). Reforça, ainda, as condições de instabilidade ecológica do meio refletida pela icnofábrica de *Thalassinoides-Palaeophycus-Helminthopsis*.

Uma superfície de ravinamento por ondas corta os depósitos carbonosos da base da sequência, marcando o estabelecimento de um sistema marinho raso na maior parte da área de estudo (SRS5 de Kern, 2008; seções estratigráficas 1 a 4, Figuras Complementares 1-2). As litofácies arenosas dominam a

seqüência na porção leste, intercalando-se a depósitos de marés na porção oeste. Esses depósitos mostram-se, em geral, pouco bioturbados, quando comparados com as mesmas litofácies presentes na seqüência C. A ocorrência de icnofábricas é pontual e marcada pelo índice de bioturbação muito baixo (BI 1, predominantemente). Os arenitos da associação fácies de canais e barras de maré contêm a icnofábrica de *Ophiomorpha* no testemunho IB-08-RS (seções estratigráficas 2 e 4, Figuras Complementares 1-2) e os depósitos das litofácies SiltArg e Ht associados contêm as icnofábricas de *Palaeophycus* (IB-04-RS, IB-22-RS, IC-36-RS), *Planolites* (IB-01-RS, IB-06-RS) e *Thalassinoides-Palaeophycus* (IB-15-RS, IC-20-RS, IC-32-RS). A maior energia dos depósitos parece ser o principal fator de controle na distribuição da icnofauna. Contudo, a escassez de traços fósseis nas litofácies representativas de menor energia sugere também a existência de estresse químico, possivelmente por flutuações extremas de salinidade, já que: (i) escavações de organismos oportunistas que suportam condições de forte disaerobia a anoxia não são observadas; (ii) depósitos costeiros de moderada a baixa energia dominados por marés e/ou ondas costumam ser meios relativamente mais estáveis e ocupados por fauna mesoalina endêmica, que possui hábito endobentônico em sua maioria, sendo comum a presença de bioturbação.

A presença da icnofábrica de *Helminthopsis* nos depósitos de marinhos de *foreshore* (litofácies Aq1), no topo da seqüência D (IB-06-RS, seções estratigráficas 1 a 3, Figuras Complementares 1-2) sugere períodos de redução da energia, permitindo a atividade de pastagem de detritos por organismos detritívoros/saprobíacos (e.g., Bromley, 1996; Buatois *et al.*, 2002), possivelmente durante períodos de maré baixa.

O topo da seqüência D é marcado pela ocorrência da icnofábrica de *Thalassinoides* em contexto de Icnofácies Glossifungites ao longo de praticamente toda a área de estudo (seção estratigráfica 4, Figura Complementar 2). Representativa de colonização em substratos do tipo *firmground*,

a icnofábrica ocorre na litofácies SiltCarb que se assenta, discordantemente, sobre os arenitos finos das associações de fácies de *shoreface*. Considerando que o desenvolvimento da icnofábrica de *Thalassinoides* em contexto de Icnofácies Glossifungites se dá em fácies costeiras e requer a ocorrência de eventos erosivos e subsequentes inundações marinhas (MacEachern *et al.*, 1992; Bromley, 1996; Pemberton *et al.*, 2001; Buatois *et al.*, 2002; MacEachern *et al.*, 2007a, b, c), pode se inferir a existência de uma superfície coplanar na base da seqüência E, reunindo pelo menos: (i) uma superfície de rebaixamento brusco de nível de base, que expõe até os depósitos de *shoreface* inferior e permite o estabelecimento dos depósitos de turfeiras; (ii) uma superfície transgressiva, que traz a fauna apta a escavar em substratos firmes, em contexto de supramaré; e (iii) uma superfície de ravinamento por ondas que erode os depósitos pelíticos e preenche as escavações. Essa ocorrência é um biomarcador de uma regressão forçada, estabelecendo um limite de seqüência de 3ª ordem entre as seqüências D e E (de 4ª ordem, segundo Kern, 2008), que já previamente sido detectada na área de estudo (Netto, 1994; Buatois *et al.*, 2001, 2007; Kern, 2008).

Depósitos das litofácies de heterolito contendo a icnofábrica de *Thalassinoides-Palaeophycus-Helminthopsis* com índice de bioturbação moderado a alto (BI 4-5) se assentam sobre os depósitos costeiros anteriores. Por ser representativa da Icnofácies Cruziana, essa icnofábrica marca o estabelecimento de condições ecológicas próprias de *shoreface* inferior/transição ao *offshore*. Sua presença, portanto, é um indicador de uma subida significativa do nível de base e do estabelecimento de condições marinhas francas. Contudo, o tamanho reduzido das escavações e o índice de bioturbação ligeiramente menor, se comparado com as icnofaunas marinhas rasas registradas previamente em sucessões da Formação Palermo, incluindo a área ora estudada, sugerem a presença de águas polialinas, e não estenoalinas (Netto e Gonzaga, 1985; Netto, 1994; Buatois *et al.*, 2001, 2007; Tognoli e Netto, 2003). A hipótese

da existência de águas menos salinas e de predomínio de corpos de águas costeiras (baías e lagunas) é reforçada pela presença das icnofábricas de *Thalassinoides-Palaeophycus* e de *Cylindrichnus-Thalassinoides*. Ambas icnofábricas apresentam índice de bioturbação moderado (BI 2-4) e são sugestivas de águas salobras nos mesmos depósitos heterolíticos que ocorrem lateralmente, e por sobre as ocorrências da icnofábrica de *Thalassinoides-Palaeophycus-Helminthopsis*. A frequente intercalação com níveis pelíticos contendo a icnofábrica de *Thalassinoides* em contexto de Icnofácies Glossifungites reforça ainda mais essa hipótese. Assim, acredita-se que os heterolitos contendo icnofábrica de *Thalassinoides-Palaeophycus-Helminthopsis* na seqüência E representem enseadas, onde as condições de moderada a baixa energia, a maior salinidade das águas e o predomínio da ação de ondas mimetizem as condições ecológicas esperadas na zona de *shoreface* inferior/transição ao *offshore*.

CONCLUSÕES

A análise icnológica realizada na sucessão sedimentar que engloba os depósitos da Formação Rio Bonito no bloco central da jazida carbonífera do Iruí permitiu:

(i) a identificação de quatro assinaturas icnológicas em trato de sistema transgressivo, representadas pelas icnofábricas de *Palaeophycus*, *Planolites* e *Helminthopsis* (domínio de águas oligoalinas a doces), de *Cylindrichnus-Thalassinoides* e *Thalassinoides-Palaeophycus* (domínio de águas mesoalinas), de *Thalassinoides* (domínio de eventos erosivos, com exumação e exposição temporária de pelitos compactados) e de *Thalassinoides-Palaeophycus-Helminthopsis* (domínio de águas polialinas a estenoalinas);

(ii) o reconhecimento de superfícies autogênicas nos depósitos costeiros, relacionadas ao avanço do trato transgressivo, e de uma superfície alogênicas, que separa o conjunto de seqüências A-D da seqüência E;

(iii) o reconhecimento de condições químicas da água (salinidade e oxigenação), que interferem na distribuição da

fauna bentônica e que se refletem no padrão das icnofábricas. Tais informações, acrescidas à análise dos parâmetros físicos, permitiram refinar a interpretação dos sistemas deposicionais;

(iii) confirmar a relevância da análise integrada da sedimentologia e da icnologia de sucessões sedimentares ricas em icnofósseis para o refinamento das interpretações estratigráficas e paleoambientais, em estudos estratigráficos de alta resolução.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho inclui-se no projeto “Assinaturas icnológicas em ambientes transicionais e marinhos rasos: caracterização e aplicação na análise de fácies deposicionais”, subsidiado pelo CNPq (processo 479457/2007-7). Os autores agradecem ao CNPq pelo auxílio e pela bolsa de produtividade em pesquisa de RGN (processo 303041/2007-2) e de ELCL (processo 305075/2007-1); à CPRM – Serviço Geológico do Brasil, pela cedência dos testemunhos de sondagem e dos dados das pastas de poços utilizados neste estudo; à CAPES, pelas bolsas de mestrado de RG e HPK e pela infra-estrutura de apoio (Pró-equipamentos 1675/2007); aos revisores, R. C. Lopes e F. Tognoli, e a G. Fauth, nosso agradecimento pela revisão crítica do manuscrito. Este trabalho é parte do estudo “Icnologia e Estratigrafia: subsídios para estudos de alta resolução. Fase II”.

REFERÊNCIAS

ABOARRAGE, A.M.; LOPES, R.C. 1986. *Projeto a borda leste da bacia do Paraná: integração geológica e avaliação econômica*. Porto Alegre, CPRM, 18 v.

BANN, K.L.; FIELDING, C.R. 2004. An integrated ichnological and sedimentological comparison of non-deltaic shoreface and subaqueous delta deposits in Permian reservoir units of Australia. In: D. McILROY (ed.), *The application of Ichnology to palaeoenvironmental and stratigraphic analysis*. Londres, Geological Society of London, Special Publication 228, p. 273-310.

BANN, K.L.; FIELDING, C.R.; MacEACHERN, J.A.; TYE, S.C. 2004. Differentiation of estuarine and offshore marine deposits using integrated ichnology and sedimentology:

Permian Pebbly Beach Formation, Sydney Basin, Australia. In: D. McILROY (ed.), *The application of Ichnology to palaeoenvironmental and stratigraphic analysis*. Londres, Geological Society of London, Special Publication 228, p. 179-211.

BEYNON, B.M.; PEMBERTON, S.G. 1992. Ichnological signature of a brackish water deposit: an example from the Lower Cretaceous Grand Rapids Formation, Cold Lake Oil Sands Area, Alberta. In: S.G. PEMBERTON (ed.), *Applications of Ichnology to petroleum exploration: a core workshop*. Tulsa, Society for Sedimentary Geology, SEPM Core Workshop 17, p.199-221.

BROMLEY, R.G. 1990. *Trace fossils. Biology and taphonomy*. Londres, Unwin Hyman, 280 p.

BROMLEY, R.G. 1996. *Trace fossils. Biology, taphonomy and applications*. Londres, 2ª ed., Chapman and Hall, 361 p.

BROMLEY, R.G.; EKDALE, A.A. 1984. *Chondrites: a trace fossil indicator of anoxia in sediments*. *Science*, **224**(4651):872-874. <http://dx.doi.org/10.1126/science.224.4651.872>

BROMLEY, R.G.; EKDALE, A.A. 1986. Composite ichnofacies and tiering of burrows. *Geological Magazine*, **123**:59-65. <http://dx.doi.org/10.1017/S0016756800026534>

BUATOIS, L.A.; LOPEZ-ANGRIMAN, O. 1992. The ichnology of a submarine braided channel complex: the Whisky Bay Formation of James Ross Island, Antarctica, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **94**(1-4):119-140. [http://dx.doi.org/10.1016/0031-0182\(92\)90116-M](http://dx.doi.org/10.1016/0031-0182(92)90116-M)

BUATOIS, L.A.; NETTO, R.G.; MÁNGANO, M.G. 2001. Paleoenvironmental and sequence-stratigraphic analyses of Lower Permian marginal to shallow-marine coal-bearing successions of the Paraná Basin in Rio Grande do Sul, Brazil, based on ichnological data. In: J.H.G. MELO; G.J.S. TERRA (eds.), *Correlação de seqüências paleozóicas sul-americanas*. Rio de Janeiro, *Ciência-Técnica-Petróleo*, **20**:s/p (CD-ROM).

BUATOIS, L.A.; MÁNGANO, G.; ACEÑO-LAZA, F. 2002. *Trazas fósiles. Señales de comportamiento en el registro estratigráfico*. Trelew, Museu Paleontológico Egidio Feruglio, Publicación Especial 2, 382 p.

BUATOIS, L.A.; GRINGAS, M.K.; MacEACHERN, J.; MÁNGANO, M.G.; ZONNEVELD, J.P.; PEMBERTON, S.G.; NETTO R.G.; MARTIN, A.J. 2005. Colonization of brackish-water systems through time: Evidence from the trace-fossil record. *Palaaios*, **20**(4):321-347. <http://dx.doi.org/10.2110/palo.2004.p04-32>

BUATOIS, L.A.; NETTO, R.G.; MÁNGANO, G. 2007. Ichnology of Permian marginal- to shallow-marine coal-bearing successions: Rio Bonito and Palermo Formations, Paraná Basin, Brazil. In: J.A. MacEACHERN; K.L. BANN; M.K. GINGRAS; S.G. PEMBERTON (eds.), *Applied Ichnology*. Tulsa, Society for Sedimentary Geology, SEPM Short Course Notes 52, p. 167-177.

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. 1980. *Projeto Iruí-Butiá Bloco Iruí Carvão*

Mineral: relatório final de pesquisa, áreas B-36, B-37, C-3, C-4, C-5, C-6, C-9, C-10, C-11. Porto Alegre, CPRM/SuReg POA, Relatório Interno, 2 v.

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. 1981. *Projeto Iruí-Butiá Bloco Bexiga: relatório final de pesquisa, áreas G-01 a G-03*. Porto Alegre, CPRM/SuReg POA, Relatório Interno, 1 v.

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. 1982. *Projeto Iruí-Butiá Bloco Capão da Várzea: relatório final de pesquisa, áreas B-01 a B-03, B-07 a B-09, B-13 a B-22 e B-35*. Porto Alegre, CPRM/SuReg POA, Relatório Interno, 4 v.

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. 1987. *Projeto Iruí-Butiá Bloco Iruí Área Capão das Pombas Sul: relatório final de pesquisa, áreas RS-33 a RS-37*. Porto Alegre, CPRM/SuReg POA, Relatório Interno, 1 v.

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. 1988. *Projeto Iruí-Butiá Bloco Iruí Área Capão das Pombas: relatório final de pesquisa, áreas RS-01, RS-45, RS-46 e RS-49*. Porto Alegre, CPRM/SuReg POA, Relatório Interno, 1 v.

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. 2001. *Mapa geológico do Brasil. Escala 1:5.000.000*. Brasília, Ministério de Minas e Energia, CD-ROM.

DALRYMPLE, R.W.; ZAITLIN, B.A.; BOYD, R. 1992. Estuarine facies models: conceptual, basis and stratigraphic implications. *Journal of Sedimentary Petrology*, **62**(6):1130-1146.

EKDALE, A.A. 1988. Pitfalls of paleobathymetric interpretations based on trace fossil assemblages. *Palaaios*, **3**(5):464-472. <http://dx.doi.org/10.2307/3514720>

EKDALE, A.A.; BROMLEY, R.G.; PEMBERTON, S.G. 1984. *Ichnology. The use of trace fossils in sedimentology and stratigraphy*. Tulsa, Society for Sedimentary Geology, 371 p.

ELIAS, A.D.D.; GARCIA, A.J.; LAVINA, E.L. 2000. Arcabouço cronoestratigráfico do Eopermiano da bacia do Paraná na região Centro-Oeste do Rio Grande do Sul. *Pesquisas em Geociências*, **27**(2):31-44.

FIELDING, C.R.; BANN, K.L.; TRUEMAN, J.D. 2007. Resolving the architecture of a complex, low-accommodation unit using high-resolution sequence stratigraphy and ichnology: the late Permian Freitag Formation in the Denison Trough, Queensland, Australia. In: J.A. MacEACHERN; K.L. BANN; M.K. GINGRAS; S.G. PEMBERTON (eds.), *Applied Ichnology*. Tulsa, Society for Sedimentary Geology, SEPM Short Course Notes 52, p. 179-208.

FREY, R.W. 1975. *The study of trace fossils*. New York, Springer, 562 p.

FREY, R.W.; PEMBERTON, S.G. 1984. Trace fossils facies models. In: R.G. WALKER (ed.), *Facies models*. Alberta, Geoscience Canada, Reprint Series 1-2, p.189-207.

FREY, R.W.; HOWARD, J.D.; PRYOR, W.A. 1978. *Ophiomorpha*: its morphologic, taxonomic and environmental significance. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **23**:199-229.

- [http://dx.doi.org/10.1016/0031-0182\(78\)90094-9](http://dx.doi.org/10.1016/0031-0182(78)90094-9)
 GINGRAS, M.K.; PEMBERTON, S.G.; SAUNDERS, T.; CLIFTON, H.E. 1999. The ichnology of modern and Pleistocene brackish-water deposits at Willapa Bay, Washington: variability in estuarine settings. *Palaios*, **14**(4):352-374.
<http://dx.doi.org/10.2307/3515462>
- GINGRAS, M.K.; BANN, K.L.; MacEACHERN, J.A.; PEMBERTON, S.G. 2007. A conceptual framework for the application of trace fossils. In: J.A. MACEACHERN; K.L. BANN; M.K. GINGRAS; S.G. PEMBERTON (eds.), *Applied Ichnology*. Tulsa, Society for Sedimentary Geology, SEPM Short Course Notes 52, p. 1-26.
- HABEKOST, N.T. 1978. Paleoambientes da Formação Palermo no Sudeste do Estado de Santa Catarina - Brasil. *Acta Geologica Leopoldensia*, **4**:4-177.
- HABEKOST, N.T. 1983. Paleoambientes da Formação Palermo na Região Central do Rio Grande do Sul, Brasil. *Acta Geologica Leopoldensia*, **7**:43-114.
- HOLZ, M. 1987. Leques aluviais – faciologia e ocorrência em sedimentitos do Supergrupo Tubarão (Eo-Permiano) da bacia do Paraná no Rio Grande do Sul. *Acta Geologica Leopoldensia*, **25**:65-104.
- HOLZ, M. 2003. Sequence stratigraphy of a lagoonal estuarine system – an example from the Lower Permian Rio Bonito Formation, Paraná Basin, Brazil. *Sedimentary Geology*, **162**(3-4):305-331.
[http://dx.doi.org/10.1016/S0037-0738\(03\)00156-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0037-0738(03)00156-8)
- HOLZ, M.; DIAS-FLORES, M.A. 1984. Análise estratigráfica da Formação Rio Bonito (Permiano Inferior) na área de Cachoeira do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 33, Rio de Janeiro. *Anais*, SBG, p. 993-1006.
- HOLZ, M.; DIAS, M.E. 1998. Taphonomy of palynological records in a sequence stratigraphy framework: an example of the Eo-Permian from the Paraná Basin of Southern Brazil. *Review of Palaeobotany and Palynology*, **99**(3-4):217-233.
[http://dx.doi.org/10.1016/S0034-6667\(97\)00029-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0034-6667(97)00029-8)
- HOWARD, J.D.; ELDERS, C.A.; HEINBOCKEL, J.F. 1975. Animal-sediment relationships in estuarine point bar deposits, Ogeechee River-Ossabaw Sound. *Senckenbergiana Maritima*, **7**:181-203.
- KERN, H.P. 2008. *Arquitetura estratigráfica de corpos arenosos gerados por ondas e marés no bloco central da mina de Iruí (Formação Rio Bonito, Eopermiano da bacia do Paraná, RS)*. São Leopoldo, UNISINOS, Dissertação de Mestrado, 145 p.
- LAVINA, E.L.C.; LOPES, R.C. 1987. A transgressão marinha do Permiano Inferior e a evolução paleogeográfica do Supergrupo Tubarão no Estado do Rio Grande do Sul. *Paula-Coutiana*, **1**:51-103.
- LAVINA, E.L.C.; NOWATZKI, C.H.; SANTOS, M.A.A. dos; LEÃO, H.Z. 1985. Ambientes de sedimentação do Super-Grupo Tubarão na região de Cachoeira do Sul, RS. *Acta Geologica Leopoldensia*, **9**(21):5-75.
- LETTLEY, C.D.; GINGRAS, M.K.; PEARSON, N.J.; PEMBERTON, G. 2007. Burrowed stiffground on estuarine point bars: modern and ancient examples, and criteria for their discrimination from firmgrounds developed along omission surfaces. In: J.A. MACEACHERN; K.L. BANN; M.K. GINGRAS; S.G. PEMBERTON (eds.), *Applied Ichnology*. Tulsa, Society for Sedimentary Geology, SEPM Short Course Notes 52, p. 325-333.
- LOPES, R.C. 1990. Estudo paleoambiental da Formação Rio Bonito na jazida do Leão – RS. Uma análise inicial. *Acta Geologica Leopoldensia*, **31**:91-112.
- LOPES, R.C. 1995. *Arcabouço aloestratigráfico para o intervalo Rio Bonito-Palermo (Eopermiano da bacia do Paraná), entre Butiá e São Sepé, Rio Grande do Sul*. São Leopoldo, UNISINOS, Dissertação de Mestrado, 254 p.
- LOPES, R.C.; LAVINA, E.L.C. 2001. Estratigrafia de seqüências nas formações Rio Bonito e Palermo (bacia do Paraná), na região carbonífera do Baixo Jacuí, Rio Grande do Sul. In: H.J.P.S. SEVERIANO RIBEIRO (ed.), *Estratigrafia de seqüências: fundamentos e aplicações*. São Leopoldo, Editora Unisinos, p. 391-419.
- MacEACHERN, J.A.; BURTON, J.A. 2000. Firmground *Zoophycos* in the Lower Cretaceous Viking Formation, Alberta: a distal expression of the *Glossifungites* ichnofacies. *Palaios*, **16**:387-398.
- MacEACHERN, J.A.; PEMBERTON, S.G. 1992. Ichnological aspects of Cretaceous shoreface successions and shoreface variability in the Western Interior Seaway of North America. In: S.G. PEMBERTON (ed.), *Applications of Ichnology to petroleum exploration: a core workshop*. Tulsa, Society for Sedimentary Geology, SEPM Core Workshop 17, p. 57-84.
- MacEACHERN, J.A.; BANN, K.L.; PEMBERTON, S.G.; GINGRAS, M.K. 2007a. The ichnofacies paradigm: high-resolution palaeoenvironmental interpretation of the rock record. In: J.A. MACEACHERN; K.L. BANN; M.K. GINGRAS; S.G. PEMBERTON (eds.), *Applied Ichnology*. Tulsa, Society for Sedimentary Geology, SEPM Short Course Notes 52, p. 27-64.
- MacEACHERN, J.A.; GINGRAS, M.K.; BANN, K.L.; PEMBERTON, S.G.; REICH, L.T. 2007b. Applications of ichnology to high-resolution genetic stratigraphic paradigms. In: J.A. MACEACHERN; K.L. BANN; M.K. GINGRAS; S.G. PEMBERTON (eds.), *Applied Ichnology*. Tulsa, Society for Sedimentary Geology, SEPM Short Course Notes 52, p. 95-129.
- MacEACHERN, J.A.; PEMBERTON, S.G.; BANN, K.L.; GINGRAS, M.K. 2007c. Departures from the archetypal ichnofacies: effective recognition of physicochemical stresses in the rock record. In: J.A. MACEACHERN; K.L. BANN; M.K. GINGRAS; S.G. PEMBERTON (eds.), *Applied Ichnology*. Tulsa, Society for Sedimentary Geology, SEPM Short Course Notes 52, p. 65-93.
- MÁNGANO, M.G.; BUATOIS, L.A. 2004. Ichnology of Carboniferous tide-influenced environments and tidal flat variability in the North American Midcontinent. In: D. McILROY (ed.), *The application of Ichnology to palaeoenvironmental and stratigraphic analysis*. Londres, Geological Society, Special Publication 228, p. 157-178.
- MÁNGANO, M.G.; BUATOIS, L.A.; WEST, R.R.; MAPLES, C.G. 1998. Contrasting behavioral and feeding strategies recorded by tidal-flat bivalve trace fossils from the Upper Carboniferous of eastern Kansas. *Palaios*, **13**(4):335-351.
<http://dx.doi.org/10.2307/3515322>
- MARTIN, K.D. 2004. A re-evaluation of the relationship between trace fossils and dysoxia. In: D. McILROY (ed.), *The application of Ichnology to palaeoenvironmental and stratigraphic analysis*. Londres, Geological Society, Special Publication 228, p. 141-156.
- McILROY, D. 2004. Ichnofabrics and sedimentary facies of a tide-dominated delta: Jurassic Ile Formation Field, Haltenbanken, Offshore Mid-Norway. In: D. McILROY (ed.), *The application of Ichnology to palaeoenvironmental and stratigraphic analysis*. Londres, Geological Society, Special Publication 228, p. 237-272.
- MILANI, E.J. 1997. *Evolução tectono-estratigráfica da bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozoica do Gondwana sul-ocidental*. Porto Alegre, UFRGS, Tese de Doutorado, 255 p.
- MILANI, E.J.; MELLO, J.H.G. de; SOUZA, P.A. de; FERNANDES, L.A.; FRANÇA, A.B. 2007. Bacia do Paraná. *Boletim de Geociências da Petrobras*, **15**(2):265-288.
- NETTO, R.G. 1994. *A paleoicnologia como ferramenta de trabalho na seqüência sedimentar Rio Bonito/Palermo*. Porto Alegre, UFRGS, Tese de Doutorado, 272 p.
- NETTO, R.G. 1998. Padrão de icnofábricas da seqüência sedimentar Rio Bonito/Palermo no RS e seu valor na diagnose paleoambiental. *Acta Geologica Leopoldensia*, **46/47**:209-226.
- NETTO, R.G.; GONZAGA, T.D. 1985. Paleoicnologia do Grupo Guatá (Supergrupo Tubarão) nos sedimentitos da mina do Iruí, Cachoeira do Sul, RS. *Acta Geologica Leopoldensia*, **21**:77-102.
- NETTO, R.G.; ROSSETTI, D.F. 2003. Ichnology and salinity fluctuations: A case study from the early Miocene (lower Barreiras Formation) of São Luís Basin, Maranhão, Brazil. *Revista Brasileira de Paleontologia*, **6**:5-18.
- NETTO, R.G.; SANTOS, M.A.A. dos; NOWATZKI, C.H. 1991. Permian trace fossils from estuarine sequences at Rio Grande do Sul State, Brazil. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON CARBONIFEROUS AND PERMIAN GEOLOGY AND STRATIGRAPHY, 13, Buenos Aires, *Abstracts*, 1:98v.
- PEMBERTON, S.G.; WHIGHTMAN, D.M. 1992. Ichnological characteristics of brackish water deposits. In: S.G. PEMBERTON (ed.), *Applications of Ichnology to petroleum exploration: a core workshop*. Tulsa, Society for Sedimentary Geology, SEPM Core Workshop 17, p. 141-167.

- PEMBERTON, S.G.; SPILA, M.; PULHAM, A.J.; SAUNDERS, T.; MacEACHERN, J.A.; ROBBINS, D.; SINCLAIR I.K. 2001. *Ichnology & sedimentology of shallow to marginal marine systems: Ben Nevis & Avalon reservoirs, Jeanne D'Arc Basin*. Calgary, Geological Association of Canada, Short Course 15, 343 p.
- PEMBERTON, S.G.; MacEACHERN, J.A.; SAUNDERS, T.D.A 2004. Stratigraphic applications of substrate-specific ichnofacies: delineating discontinuities in the rock record. In: D. McILROY (ed.), *The application of Ichnology to palaeoenvironmental and stratigraphic analysis*. Londres, Geological Society, Special Publication 228, p. 29-62.
- PERKINS, E.J. 1974. *The biology of estuaries and coastal waters*. Londres, Academic Press, 678 p.
- POLLARD, J.E.; GOLDRING R.; BUCK, S.G. 1993. Ichnofabrics containing *Ophiomorpha*: significance in shallow-water facies interpretation. *Journal of the Geological Society*, **150**(1):149-164. <http://dx.doi.org/10.1144/gsjgs.150.1.0149>
- RANGER, M.J.; PEMBERTON, S.G. 1992. The sedimentology and ichnology of estuarine point bars in the McMurray Formation of the Athabasca Oil Sands Deposit, northeastern Alberta, Canada. In: S.G. PEMBERTON (ed.), *Applications of Ichnology to petroleum exploration: a core workshop*. Tulsa, Society for Sedimentary Geology, SEPM Core Workshop 17, p. 401-421.
- REES, E.I.S.; NICHOLAIDOU, A.; LASKERIDOU, P. 1977. The effects of storms on the dynamics of shallow water benthic associations. In: B.F. KEEGAN; P.O. CEIDIGH; P.J. BOADEN (eds.), *Biology of benthic organisms*. Oxford, Pergamon Press, p. 465-474.
- REMANE, H.-E.; SCHLIEPER, C. 1971. *Biology of brackish water*. New York, Wiley, 372 p.
- RHOADS, D.C.; MORSE, J.W. 1971. Evolutionary and ecologic significance of oxygen-deficient marine basins. *Lethaia*, **4**(4):413-428. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1502-3931.1971.tb01864.x>
- ROCHA-CAMPOS, A.C. 1967. The Tubarão Group in the Brazilian portion of Paraná Basin. In: J.J. BIGARELLA; R.D. BECKER; I.D. PINTO (eds.), *Problems in Brazilian Gondwana geology*. INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON THE GONDWANA STRATIGRAPHY AND PALEONTOLOGY, Curitiba, **1**:27-95.
- SANTOS, P.R.; CAMPOS, A.C.; CANUTO, J.R. 1996. Patterns of late Paleozoic deglaciation in the Paraná Basin, Brazil. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **125**(1-4):165-184. [http://dx.doi.org/10.1016/S0031-0182\(96\)00029-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0031-0182(96)00029-6)
- SAVRDA, C.E. 1992. Trace fossils and benthic oxygenation. In: C.G. MAPLES; R.R. WEST (eds.), *Trace fossils*. Tulsa, The Paleontological Society, Short Course 5, p.172-196.
- SAVRDA, C.E.; BOTTJER, D.J. 1989. Trace fossil model for reconstructing oxygenation histories of ancient marine bottom waters: application to Upper Cretaceous Niobrara Formation, Colorado. *Palaeogeographic, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **74**(1-2):49-74. [http://dx.doi.org/10.1016/0031-0182\(89\)90019-9](http://dx.doi.org/10.1016/0031-0182(89)90019-9)
- SAVRDA, C.E.; NANSON, L.L. 2003. Ichnology of fair-weather and storm deposits in an Upper Cretaceous estuary (Eutaw Formation, western Georgia, USA). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **202**(1-2):67-83. [http://dx.doi.org/10.1016/S0031-0182\(03\)00628-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0031-0182(03)00628-X)
- SCHNEIDER, R.L.; MUHLMANN, H.; TOMMASI, E.; MEDEIROS, R.; DAEMON, R.F.; NOGUEIRA, A.A. 1974. Revisão estratigráfica da bacia do Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28, Porto Alegre, *Anais*, SBG, **1**:41-65.
- SEILACHER, A. 1964. Biogenic sedimentary structures. In: J. IMBRIE; N.D. NEWELL (eds.), *Approaches to Paleocology*, New York, John Wiley & Sons, p. 296-316.
- SEILACHER, A. 1967. Bathymetry of trace fossils. *Marine Geology*, **5**(5-6):413-428. [http://dx.doi.org/10.1016/0025-3227\(67\)90051-5](http://dx.doi.org/10.1016/0025-3227(67)90051-5)
- TAYLOR, A.M.; GOLDRING, R. 1993. Description and analysis of bioturbation and ichnofabric. *Journal of the Geological Society*, **150**(1):141-148. <http://dx.doi.org/10.1144/gsjgs.150.1.0141>
- TOGNOLI, F.M.W. 2002. *Análise estratigráfica e paleoicnológica do Grupo Guatá no leste paranaense*. Rio Claro, UNESP, Dissertação de Mestrado, 90 p.
- TOGNOLI, F.M.W.; NETTO, R.G. 2003. Ichnological signature of Paleozoic estuarine deposits from the Rio Bonito-Palermo succession, eastern Paraná Basin, Brazil. *Publicación Especial de la Asociación Paleontológica Argentina*, **9**:141-155.
- WIGNALL, P.B. 1991. Dysaerobic trace fossils and ichnofabrics in the Upper Jurassic Kimmeridge Clay of southern England. *Palaios*, **6**(3):264-270. <http://dx.doi.org/10.2307/3514906>

Submitted on: 10/05/2010

Accepted on: 05/07/2010