

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS – UNISINOS  
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA – PPGeo  
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

JOSELINE MANFROI

**REGISTRO DE *CHARCOAL* EM DEPÓSITOS DO FINAL DO  
CRETÁCIO DA PENÍNSULA ANTÁRTICA:  
*Proxy* na Avaliação do Contexto Depositional e Paleoambiental**

SÃO LEOPOLDO

2014

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS – UNISINOS  
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA – PPGeo  
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

JOSELINE MANFROI

**REGISTRO DE *CHARCOAL* EM DEPÓSITOS DO FINAL DO  
CRETÁCIO DA PENÍNSULA ANTÁRTICA:  
*Proxy* na Avaliação do Contexto Depositional e Paleoambiental**

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre, pelo programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Tânia Lindner Dutra

Coorientador: Prof. Dr. André Jasper

SÃO LEOPOLDO

2014

M276r Manfroi, Joseline  
Registro de charcoal em depósitos do final do cretáceo da Península Antártica: proxy na avaliação do contexto deposicional e paleoambiental / por Joseline Manfroi. -- São Leopoldo, 2014.

[8], 61 f. : il. color. ; 30 cm.

Com: artigo “Macroscopic charcoal remains from the Antarctic Peninsula at in the Upper Cretaceous”.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Geologia, São Leopoldo, RS, 2014.  
Orientação: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Tânia Lindner Dutra, Escola Politécnica; Coorientação: Prof. Dr. André Jasper, Centro Universitário Univates.

1.Geologia – Antártica, Península. 2.Carvão vegetal – Antártica, Península. 3.Paleontologia – Cretáceo. 4.Paleoincêndios. 5.Vulcanismo – Antártica, Península. I.Dutra, Tânia Lindner. II.Jasper, André. III.Título.

CDU 55(99)  
662.711(99)  
56“615.3”

Catálogo na publicação:  
Bibliotecária Carla Maria Goulart de Moraes – CRB 10/1252

“A tarefa não é tanto ver aquilo que  
ninguém viu, mas pensar o que  
ninguém ainda pensou sobre aquilo  
que todo mundo vê.” (Arthur  
Schopenhauer)

## AGRADECIMENTOS

Á minha prezada orientadora, Professora Dr<sup>a</sup>. Tânia Lindner Dutra, pelo apoio, carinho, dedicação e grande troca de conhecimento, o qual me proporcionou crescimento profissional e pessoal. Além de me apresentar o maravilhoso universo antártico e suas peculiaridades.

Ao meu prezado coorientador, Professor Dr. André Jasper, pela dedicação e amizade. E por estar sempre presente, apostando em mim ao longo desta caminhada.

Á minha amada família, que esteve comigo em todos os momentos, acreditando em mim e me apoiando. Aos meus pais, Valdir Manfroi e Mara Regina Manfroi, dos quais tenho muito orgulho. E as minhas irmãs, Marina Manfroi e Gabriela Manfroi pela compreensão de tantas ausências em prol da conquista deste objetivo.

Ao meu querido noivo, Guilherme Marobin, pela sua paciência, espera, carinho e grande companheirismo. E principalmente por tornar os meus sonhos os seus sonhos e me compreender tão bem.

Aos professores do PPGeo - UNISINOS, pela acolhida, cordialidade e conhecimento. Em especial meu agradecimento à Dr<sup>a</sup>. Renata Guimarães Netto, Dr. Ernesto Luiz Correa Lavina, Dr. Francisco Manoel Wohnrath Tognoli, Dr. Paulo Sergio Gomes Paim e Dr. Ubiratan Ferrucio Faccini que me incentivaram e colaboraram com a construção do conhecimento para elaboração deste trabalho.

Aos queridos colegas que conheci ao longo destes dois anos de convivência, que se tornaram grandes amigos e companheiros, e que levarei comigo para sempre.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de mestrado, ao PROANTAR pelo apoio nas expedições de coleta do material de estudo e ao Instituto Antártico Chileno (INACH), na pessoa de seu Coordenador Científico, Dr. Marcelo Leppe, pela cessão das amostras do material de estudo.

## RESUMO

A presença de carvão vegetal macroscópico (*charcoal*) no registro fóssil oferece a perspectiva de uma gama variada de avaliações sobre o contexto paleoambiental que originou este tipo de depósito. Entre suas aplicações estão aspectos que têm envolvido a pesquisa geológica e paleontológica nos últimos anos, tais como as variações do teor de oxigênio na atmosfera e a associação da vegetação a contextos pirogênicos. No presente trabalho foi realizada a avaliação da presença de carvão vegetal macroscópico (*charcoal*) em depósitos do final do Cretáceo na Península Antártica cuja gênese, em um contexto tectônico de ante-arco, resultou em uma deposição eminentemente vulcânica. Parte do material aqui estudado provém das coletas realizadas pelo Programa Antártico Brasileiro nas ilhas King George e Nelson, estando armazenado no Laboratório de História da Vida e da Terra (LaViGea), da Universidade do Vale do Rio do Sinos – UNISINOS, parte foi cedida pelo Instituto Antártico Chileno (INACH), e provém da ilha Livingston. As amostras foram analisadas sob estereomicroscópio, buscando a presença de fragmentos que denunciassem a ocorrência de elementos carbonizados. Estes foram retirados mecanicamente do sedimento e analisados sob Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). As análises permitiram a definição das características morfoanatômicas preservadas nos fragmentos vegetais e a avaliação da dinâmica dos paleoincêndios. Duas localidades mostraram a presença de restos carbonizados, uma delas no sudoeste da ilha King George (Pontal Price) e a outra na área norte da ilha Nelson (Pontal Rip). A análise demonstrou que os fragmentos vegetais carbonizados apresentam estruturas celulares preservadas, a presença de raios transversais simples e pontoações uniseriadas permitem relacionar o material à Gimnospermas. A fusão das paredes celulares dos traqueídeos, com claras marcas de ruptura das estruturas permitem inferir temperaturas entre 340°C e 600 °C. Tendo em conta o contexto proximal do edifício vulcânico, inferido a partir das litologias associadas, uma vinculação tafonômica à queda de cinzas ainda aquecidas é aqui proposta para a queima e preservação dos restos.

**Palavras-chave:** Península Antártica, Cretáceo Superior, paleoincêndios, carvão vegetal macroscópico.

## ABSTRACT

The presence of macroscopic charcoal in the fossil record offers the opportunity to a range of assessments on the paleoenvironmental context that gave rise to this type of record. Among their applications are aspects involving in the geological and paleontological studies of recent years, such as changes in oxygen content in the atmosphere and the association of vegetation to pyrogenic contexts. The present study assessed the presence of macroscopic charcoal in deposits of the Late Cretaceous of Antarctic Peninsula, whose genesis in a fore arc tectonic context, resulted in a highly influenced volcanic deposition. Some of the material here studied comes from the collection undertaken in the Antarctic expeditions made in PROANTAR-Brazil, on King George Island and Nelson Island, being stored at the Laboratory of Life and Earth History (LaViGea), at the Vale do Rio dos Sinos University (UNISINOS), and part was courtesy from the Chilean Antarctic Institute (INACH). The samples were analyzed under a stereomicroscope (increases between 10 and 40 times) seeking by the presence of charred wood plant fragments, after mechanically removed from the sediment and analyzed under a Scanning Electron Microscope (SEM). The analysis allowed the definition of morphoanatomical structures that allows determinate the dynamics of paleofires and its effect over the original vegetation. Two sites showed charred remains proper to this analysis, one in southern King George Island (Price Point), the other at the northern sector of the Nelson Island (Rip Point). The analysis shows wood fragments preserving part of its cellular structure and simple transverse, with uniseriate piths, which allow relating the material forms to the gymnosperms cellular structures. The fusion of the cell walls, with clear marks of rupture, indicate high firing temperatures (340°C to 600°C), which associated to the proximal volcanic context informed by the associated lithologies, allows to suggest a heated fallout tephra like the source of ignition and preservation of wood materials.

**Keywords:** Antarctic Peninsula, Late Cretaceous, paleofires, charcoal.

## SUMÁRIO

1.	DADOS DE IDENTIFICAÇÃO.....	01
2.	INTRODUÇÃO.....	01
3.	OBJETIVOS.....	04
3.1.	Objetivo Geral.....	04
3.2.	Objetivos Específicos.....	04
4.	CARVÃO MINERAL X CARVÃO VEGETAL.....	05
5.	REGISTRO E RELEVÂNCIA PRETÉRITA DO CARVÃO VEGETAL...09	
6.	PENÍNSULA ANTÁRTICA: GEOLOGIA E PALEOAMBIENTE.....	11
7.	ÁREA DE ESTUDO.....	19
7.1.	Pontal Rip, Ilha Nelson.....	20
7.2.	Pontal Price, Ilha King George.....	23
8.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	25
8.1.	Material de estudo.....	26
8.2.	Preparação e análise das amostras.....	27
9.	RESULTADOS E CONCLUSÃO.....	27
10.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	28
11.	ANEXO I: ARTIGO CIENTÍFICO.....	40



## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Mapa geral da Antártica, salientando suas duas grandes subdivisões, o setor oriental ou Continente e o ocidental, a Península Antártica, cuja história geológica é distinta.....02
- Figura 2.** Ilustração das diferenças entre os processos de carbonificação (*coal*) e carbonização (*charcoal*) e seus efeitos tafonômicos sobre restos de lenho.....06
- Figura 3.** Diagrama ilustrativo dos diferentes processos envolvidos na formação e aplicação de carvão vegetal.....09
- Figura 4.** Paleogeografia da Antártica entre o Cambriano e o final do Carbonífero (*Orogenia Terra Australis*, resultado dos processos de subducção) e no final do Paleozóico e Mesozóico basal (*Orogenia Gondwanides* que afetou preferencialmente as áreas orientais da atual Península Antártica).....13
- Figura 5.** Arcabouço geológico da Antártica e os principais blocos crustais entre o Jurássico e o Cretáceo.....14
- Figura 6.** Contexto geotectônico da Península Antártica e sua correspondência em áreas do sul da América do Sul.....15
- Figura 7.** Província Weddelliana.....16
- Figura 8.** História climática da Península Antártica no Cenozóico e os principais eventos de queda na temperatura atestados na sucessão da ilha King George. Curva global de isótopos de oxigênio em águas marinhas profundas e suas tendências.....17
- Figura 9.** As duas grandes áreas da Antártica (Península e Continente) e sul da América do Sul, após a formação dos mares de Scotia e Weddell entre o Eoceno médio e superior.....18
- Figura 10.1.** Ilhas do arquipélago das Shetland do Sul, noroeste da Península Antártica, e a localização das ilhas King George e Nelson; **10.2.** Mapa de detalhe da ilha Nelson e

do sul da ilha King George (Península Fildes), e os locais estudados.....	20
<b>Figura 11.</b> Perfil estratigráfico e registro paleontológico do afloramento do Pontal Rip, ilha Nelson, ilhas Shetland do Sul.....	22
<b>Figura 12.</b> Fragmentos de lenho e ramos carbonizados dos níveis basais do perfil Pontal Rip.....	23
<b>Figura 13.</b> Perfil estratigráfico e registro paleontológico do afloramento Pontal Price e os níveis contendo carvão vegetal macroscópico.....	25
<b>Figura 14.</b> Aspecto geral da sucessão do Pontal Price. Níveis restritos de carvão mineral e vegetal intervalam-se nos dois níveis de tufos mais basais.....	26

## 1. DADOS DE IDENTIFICAÇÃO

### 1.1 Área de concentração:

- Geologia Sedimentar

### 1.2 Linha de Pesquisa:

- Paleontologia Aplicada

### 1.3 Tema de interesse:

- Paleobotânica e Paleoecologia

## 2. INTRODUÇÃO

A porção continental da Antártica corresponde a cerca de 10% da área de todos os continentes da Terra, o que a torna o quinto maior dos continentes. Sua maior parte está localizada ao sul do Círculo Polar Antártico e está circundada por águas oceânicas que lhe conferem mais de 17.000 km de costa (Henriques 1984). O Continente Antártico formou-se a partir da fragmentação do Gondwana e conservou uma posição polar desde o final do Mesozóico, enquanto as outras massas de terra austrais dele divergiram e conformaram as massas de terra que hoje compõem o Hemisfério Sul (Tarling 1988, Lawver *et al.* 1991).

Graças aos processos geológicos pretéritos, sob sua imensa cobertura de gelo estão duas massas continentais geradas de modo distinto e, conseqüentemente, com uma história geológica particular. No Continente Antártico (ou Antártica Oriental, Figura 1) o registro geológico e paleontológico reflete as antigas ligações gondwânicas, com idades entre o Devoniano e o limite Juro-Cretáceo (Bose *et al.* 1990, Taylor & Taylor 1990, McLoughlin *et al.* 1997, Jokat *et al.* 2003, Ashworth & Cantrill 2004, Hervé *et al.*

2006, Dutra & Jasper 2010). Já a Península Antártica (Antártica Ocidental), de conformação geológica bem mais complexa, resulta da interação de um conjunto de pequenas placas formadas pelos processos de subducção ocorridos desde o final do Paleozóico e, do final do Cretáceo em diante, e a partir da abertura do Mar de Weddell, pela superposição de ambientes de arco tectônico ativo (Weissel 1977, Smellie *et al.* 1984, Elliot 1988, Del Valle & Rinaldi 1993, Birkenmajer 2001, Dutra 2004, Willan & Hunter 2005, Brown *et al.* 2006, Reguero *et al.* 2013).



**Figura 1.** Mapa geral da Antártica, salientando suas duas grandes subdivisões, o setor oriental ou Continente e o ocidental, a Península. O círculo vermelho marca a área foco deste estudo (Dutra & Jasper 2010).

Deste modo, diferentes processos geológicos discutidos com maior detalhe a seguir, estão envolvidos na gênese do conjunto de ilhas que caracterizam o oeste da Península (ambientes de ante-arco), onde se destacam as ilhas Shetland do Sul. Neste arquipélago localizam-se as ilhas Nelson e King George, objeto da análise da ocorrência de *charcoal* aqui empreendida e cujos processos geológicos predominantemente vulcânicos, foram abordados por distintos autores (Adie 1964, Barton 1965, Smellie *et al.* 1984, Soliani Jr. *et al.* 1988, Birkenmajer 1982, Shen Yanbin 1994, Birkenmajer 2001).

O registro paleontológico conhecido para as áreas da Península Antártica atesta a influência dos processos vulcânicos igualmente na preservação da vegetação, e mostra uma maior diversidade de vida entre o final do Mesozóico e a parte média do Eoceno, graças à presença de climas mais favoráveis (Ótimo Climático do Paleoceno-Eoceno ou *Paleocene–Eocene Thermal Maximum –PETM* e *early Eocene warm events –ETM*, de McInherney & Wing 2011, Westerhold *et al.* 2008, Zachos *et al.* 2008). E a atividade vulcânica tem sido um dos fatores apontados para este intervalo de calor, permitindo supor a presença de condições extremamente propícias à ocorrência de incêndios (Svensen *et al.* 2004, Storey *et al.* 2007, Moore & Kurtz 2008).

Para o desenvolvimento do presente trabalho levou-se em conta a possibilidade de testar a presença e a magnitude dos incêndios e a resposta da vegetação, num contexto menos abordado na literatura que trata da preservação de incêndios vegetacionais, que normalmente os atribuí as alteração atmosféricas e suas consequentes modificações do clima, ou a partir da presença do homem, à atividade antrópica (Jones & Chaloner 1991, Scott 2000, 2010, Gavin *et al.* 2007, Scott & Damblon 2010, Glasspool & Scott, 2010).

Diante disto, busca-se aqui avaliar o registro de carvão vegetal macroscópico em dois depósitos da Península Antártica, o Pontal Rip, na ilha Nelson (Bastos 2012,

Bastos *et al.* no prelo), e o Pontal Price, na ilha King George (Barton 1965, Smellie *et al.* 1984, Dutra 2004), cujo registro tem sido datado como correspondendo ao final do Campaniano. O final do Cretáceo é conhecido pela reativação pronunciada da atividade vulcânica em áreas da Península, um dos três momentos de vulcanismo ativo no setor das Shetland do Sul (Smellie *et al.* 1984, Shen 1994, Birkenmajer 2001). Assim, os depósitos daí decorrentes e seu conteúdo paleontológico constituem um bom laboratório para a avaliação dos efeitos tafonômicos e paleoambientais destes processos sobre a vegetação e para as inferências geológicas.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1. OBJETIVO GERAL**

Avaliar a ocorrência de paleoincêndios, utilizando a análise de carvão vegetal macroscópico de depósitos do Pontal Rip e Pontal Price (Cretáceo Superior), visando contribuir para a avaliação do contexto paleoambiental e geológico das áreas setentrionais da Península Antártica durante este intervalo.

#### **3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Avaliar a presença de carvão vegetal macroscópico (*charcoal*) em níveis do final do Cretáceo, onde a presença de material carbonoso é mais frequente nas sucessões das ilhas Shetland do Sul.
- Buscar afinidades taxonômicas do carvão vegetal resgatado.
- Correlacionar os eventos de paleoincêndios com as condições paleo-

ambientais quando de sua deposição.

- Contribuir para a construção de modelos paleoambientais para as altas latitudes do sul no final do Mesozóico e em ambientes submetidos a um vulcanismo ativo.

#### **4. CARVÃO MINERAL (*COAL*) x CARVÃO VEGETAL (*CHARCOAL*)**

Antes de abordar os aspectos que são objeto de estudo da presente pesquisa é importante apontar as principais diferenças entre o que tem sido chamado de carvão mineral (*coal*), fruto dos processos de carbonificação, e aquele proveniente da queima da matéria vegetal ou seja, carbonização, chamado de carvão vegetal ou *charcoal* (Schopf 1956, 1974).

O carvão mineral é uma rocha combustível que contém mais de 50% de seu peso e acima de 70% de seu volume formado por material carbonoso proveniente da compactação de restos de plantas, como ocorre, por exemplo, nos depósitos de turfeira (Schopf 1956). Em português, o termo “carbonificação” foi atribuído a este processo e consiste na transformação do material vegetal em carvão mineral (*coal*). Duas importantes etapas estão envolvidas neste processo. Na primeira delas, denominada carbonificação química, a matéria orgânica vegetal depositada em meio subaquoso é degradada por bactérias aeróbicas e oxigênio que eliminam, primeiro as substâncias vegetais mais facilmente degradáveis e, posteriormente, as mais resistentes como cutículas e resinas (Gammidge 2001).

Após o soterramento inicial passam a atuar as bactérias anaeróbicas e, com a incorporação dos restos na crosta, iniciam-se processos físico-químicos (aumento da temperatura e pressão) que levarão à perda dos voláteis (hidrogênio e oxigênio,





Em estudos de *charcoal* o caráter inerte do material queimado é importante já que colabora com a preservação de elementos anatômicos capazes de dar suporte à sua identificação taxonômica (Scott 2000, 2003, 2010).

Três tipologias foram definidas para o estudo de carvão vegetal, com respeito ao tamanho dos fragmentos preservados no registro geológico: a) macroscópico, para fragmentos maiores que do que 1 mm; b) mesoscópico, quando os fragmentos variam entre 1 mm e 125  $\mu\text{m}$  e; c) microscópico, quando os fragmentos são menores do que 125  $\mu\text{m}$  (Scott & Damblon 2010).

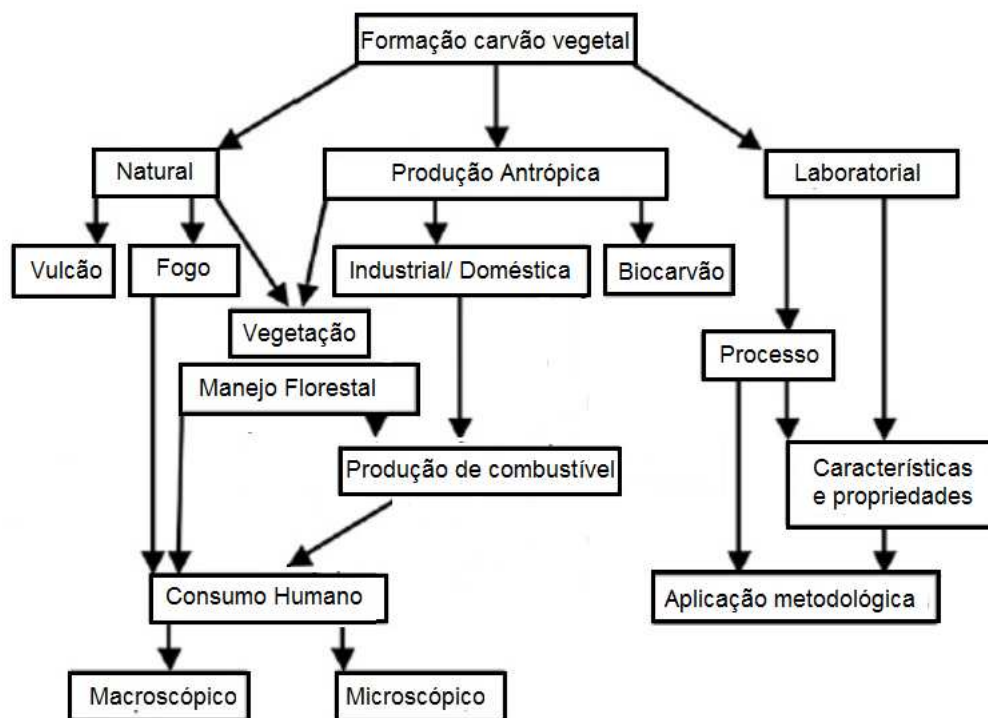
A tafonomia e a preservação do carvão vegetal podem ser avaliadas de diferentes formas, sendo importante levar em consideração que os fragmentos podem ser transportados por distâncias consideráveis por meio de correntes de ar ou água e para fora das áreas dos incêndios que lhe deram origem (Herring 1985, Patterson *et al.* 1987, Clark 1988, Bradbury 1996, Clark & Patterson 1997, Scott 2000, Ali *et al.* 2009). Assim, este tipo de registro pode ocorrer nos mais diferentes tipos de ambiente. Uma vez depositado, o carvão vegetal pode ser exposto à ação física, química e biológica e, portanto, pode auxiliar na avaliação da variada gama de processos tafonômicos ocorridos em associações fossilíferas caracterizadas por sua presença (Bird *et al.* 1999, Nichols *et al.* 2000, Wengel *et al.* 2006, Braadbaart & Poole 2009, Ascough *et al.* 2010, Zimmerman 2010, Hamad *et al.* 2011).

De forma mais específica, o carvão vegetal macroscópico fornece informações adicionais, tendo em vista que seus fragmentos são preservados geralmente no próprio ambiente de sua formação, sendo que podem ser ainda utilizados na reconstituição da dinâmica do fogo, de sua frequência e, da vegetação por ele atingida (Scott 2010). Mais recentemente, a ocorrência de incêndios tem sido frequentemente associada às alterações no clima global (Wardle *et al.* 1998, 2008, Wildman *et al.* 2004, Marlon *et al.*

2008, Belcher & McElwain 2008, Dutoit & Thinon 2009, Ohlson & Dahllerg 2009, Favilli & Cherubini 2010, Jasper *et al.* 2011).

Segundo Scott (2000) a gênese e a dinâmica dos incêndios dependem da ação conjunta de três elementos básicos que garantem a sua ocorrência: a) níveis mínimos de oxigênio (12 a 15%); b) fonte de ignição (energia); e c) combustível (vegetação). A tipologia do combustível e a disponibilidade de água no ambiente (o teor de umidade auxilia a reduzir a temperatura do incêndio) exercem também grande influência, tendo em vista que a propagação do fogo dependerá de condições específicas vinculadas a estas variáveis (Silva 1998, 2002, Gutsell & Johnson 2007). Além disso, o poder de combustão e o potencial calorífico de um incêndio estão em geral relacionados aos materiais que se encontram disponíveis no ambiente, ou seja, o tipo de resto vegetal ~~ne~~ ~~sele~~ ou de vegetação que se desenvolve no local (Trabaud 1992, Silva 2002).

Estudos de Scott (2010) e Scott & Damblon (2010) demonstram as diferentes origens e aplicações atribuídas ao carvão vegetal, que ultrapassam inclusive os limites do registro geológico (Figura 3).



**Figura 3.** Diagrama ilustrativo dos diferentes processos envolvidos na formação e utilização de carvão vegetal. Modificada de Scott & Damblon (2010).

## 5. REGISTRO E RELEVÂNCIA PRETÉRITA DO CARVÃO VEGETAL

As mudanças ambientais globais estão entre os maiores desafios da humanidade para o século XXI. A construção de cenários futuros que demonstrem quais as tendências globais para a evolução ambiental são de suma importância (Belcher & McElwain 2008). Todavia, a atenção para estes estudos não pode estar voltada somente para os “sinais atuais”, uma escala temporal restrita para a compreensão de eventos de amplo alcance. Sendo assim, caracterizar e entender ambientes do passado da Terra são ferramentas eficientes na construção de cenários futuros.

Até o momento, a discussão que tenta definir se a natureza dessas mudanças está vinculada a oscilações climáticas de curta duração ou a um ciclo do tipo *icehouse/greenhouse* de maior duração (milhões de anos) não está esclarecida e as

análises atuais não são as mais adequadas para compreender estes eventos globais de grande amplitude temporal (Gastaldo *et al.* 1996, Sorokhtin *et al.* 2007).

A caracterização dos processos associados às mudanças ambientais ocorridas durante o tempo profundo são fundamentais para a compreensão da evolução do planeta e os dados para isto provêm diferentes áreas do conhecimento, compondo um mosaico paleoambiental confiável para as reconstruções e sua utilização como ferramenta preditiva. (Royer *et al.* 2001). Um desses processos é a avaliação da dinâmica dos paleoincêndios que refletem condições ambientais restritivas e diretamente conectadas com as condições vigentes no meio (Jasper *et al.* 2007, 2011, 2013).

O fogo é um elemento modelador muito comum em ecossistemas atuais e pretéritos (Scott & Stea 2002, Preston & Schmidt 2006, Scott 2010, Scott & Damblon 2010), podendo ser comparado à herbivoria como fator de modificação dos diferentes biomas durante o tempo (Bond & Keeley 2005).

Evidências de incêndios vegetacionais são encontradas no registro desde o Siluriano (Rowe & Jones 2000, Cressler 2001, Edwards & Axe, 2004, Glasspool *et al.* 2004) e se mantém até o Quaternário, com uma intensificação notável no Paleozóico Superior, quando aparecem as florestas e vegetações pantanosas (Scott, 1989; MacDonald *et al.*, 1991; Scott, 2000; Scott & Glasspool, 2006; Scott, 2010). Contudo, não há consenso quanto as suas causas indiretas (Brow, 2000; Schmidt, 2000; Preston, 2006).

A análise de carvão vegetal macroscópico permite diversas inferências paleoambientais, que vão desde a caracterização da vegetação que foi queimada (Glasspool *et al.* 2004, Uhl *et al.* 2004, Jasper *et al.* 2011, Manfroi *et al.* 2011, 2012), passando pelos elementos envolvidos na ignição da vegetação, sua temperatura aproximada, seu impacto sobre o ambiente local, e culminando com a análise da

composição atmosférica durante o evento (Jones & Chaloner 1991, Glasspool & Scott 2010, Scott & Damblon, 2010). Embora maior parte dos estudiosos proponha sua vinculação a eventos de aquecimento global (Pyne 1982, Scott 1989, Jones & Chaloner 1991), atividades vulcânicas, comprovadas pela associação de depósitos de carvão vegetal com fluxos de lava ou sedimentos piroclásticos, têm sido relatadas também como importantes elementos condicionadores da queima da vegetação e para a sua preservação nas taofitocenoses (Kemp 1981, Rössler & Barthel 1998, Scott, 2000).

Especificamente para o Continente Antártico, embora ainda pouco estudadas, evidências de queda de meteoros, vulcanismo e mudanças na concentração de carbono atmosférico, estão entre as causas para a ocorrência de incêndios antes de sua cobertura pelo gelo (Wardle *et al.* 1986, Tschudy & Tschudy 1986).

Estudos de carvão vegetal permitem uma definição mais clara das condições vigentes em um determinado paleoambiente e dos processos ocorridos durante a queima e parecem ter estado presentes nos ambientes do planeta desde que se instalaram os primeiros biomas vegetais (Pyne 1982, Uhl & Kerp 2003).

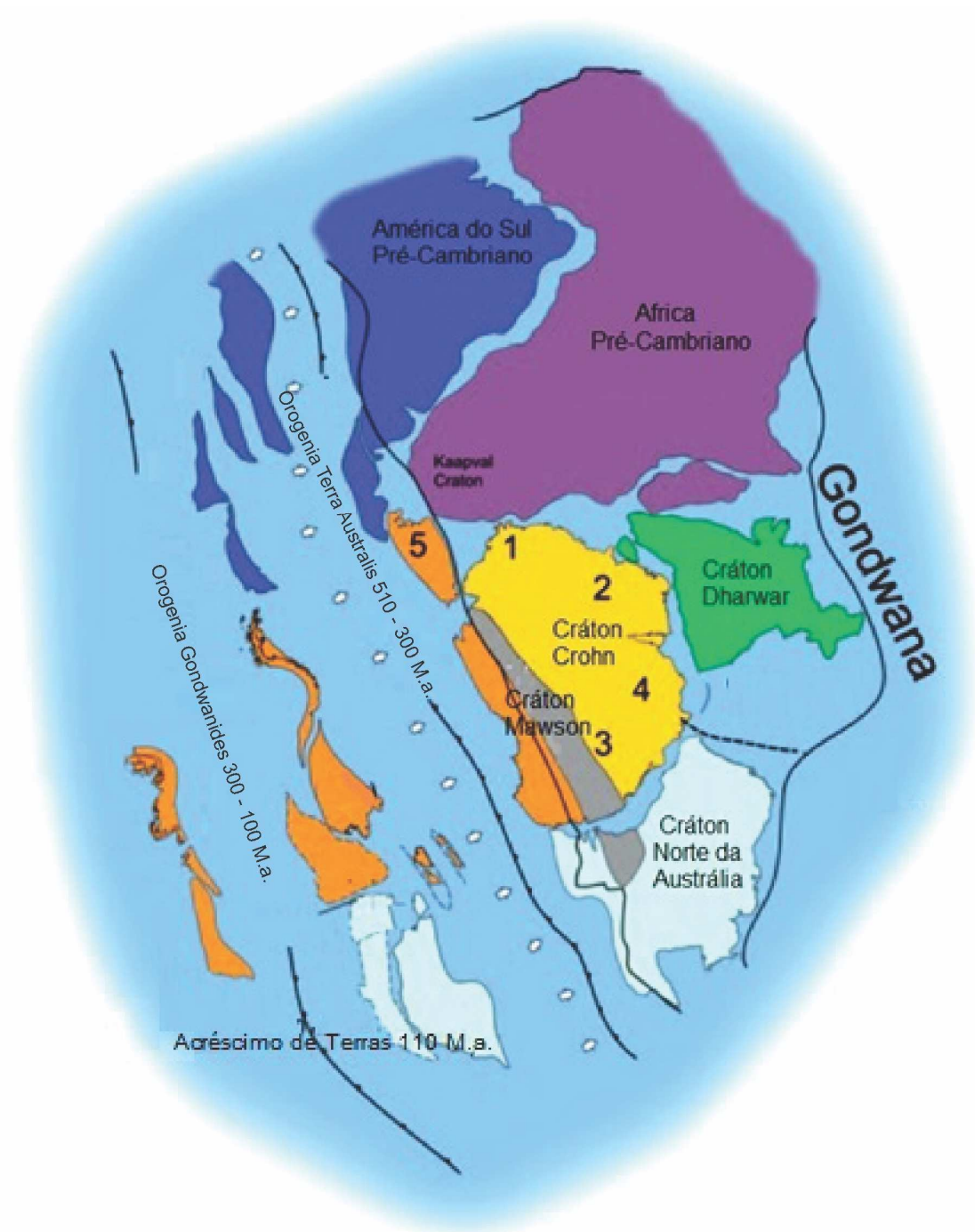
## **6. PENÍNSULA ANTÁRTICA: GEOLOGIA E PALEOAMBIENTE**

A Antártica hoje reúne características superlativas, sendo o mais frio, seco, ventoso, remoto e o melhor preservado entre os continentes. Quanto em extensão geográfica, sua área totaliza cerca de 14 milhões km<sup>2</sup>, o que representa 10% da superfície da Terra (King & Turner 1993, Cooper *et al.* 2007). Isolada no sul do globo, sua aparente continuidade areal moderna resulta da cobertura de cerca de 98% de seu território pelo gelo, iniciada no final do Eoceno e que chegou ao nível do mar há cerca de 4 milhões de anos (Cantrill & Poole 2013).

No passado, no entanto, sua geografia e contexto geológico foram muito distintos, especialmente nas áreas da Península Antártica (Figuras 4 e 5). No Continente Antártico a presença de litologias do final do Paleozóico e Mesozóico atesta uma história comum as demais terras do Gondwana (Bose *et al.* 1990, Taylor & Taylor 1990, Playford 1990, McLoughlin *et al.* 1997, Jokat *et al.* 2003, Ashworth & Cantrill 2004, Boger 2011) e mostra que, até o Jurássico, processos de acreção e deslocamento de blocos conformavam sua margem paleo-pacífica (Doubleday & Tranter 1994, Riley & Leat 1999).

A partir do rompimento do Gondwana iniciaram-se os processos que conduziram o continente à sua moderna geografia. Durante a fragmentação, as outras massas de terra gondwânicas, gradativamente se afastaram do continente, a partir da América do Sul (movimento logo após abortado), seguida da África, Índia-Madagascar e Austrália (Weissel *et al.* 1977, Lawver *et al.* 1991).

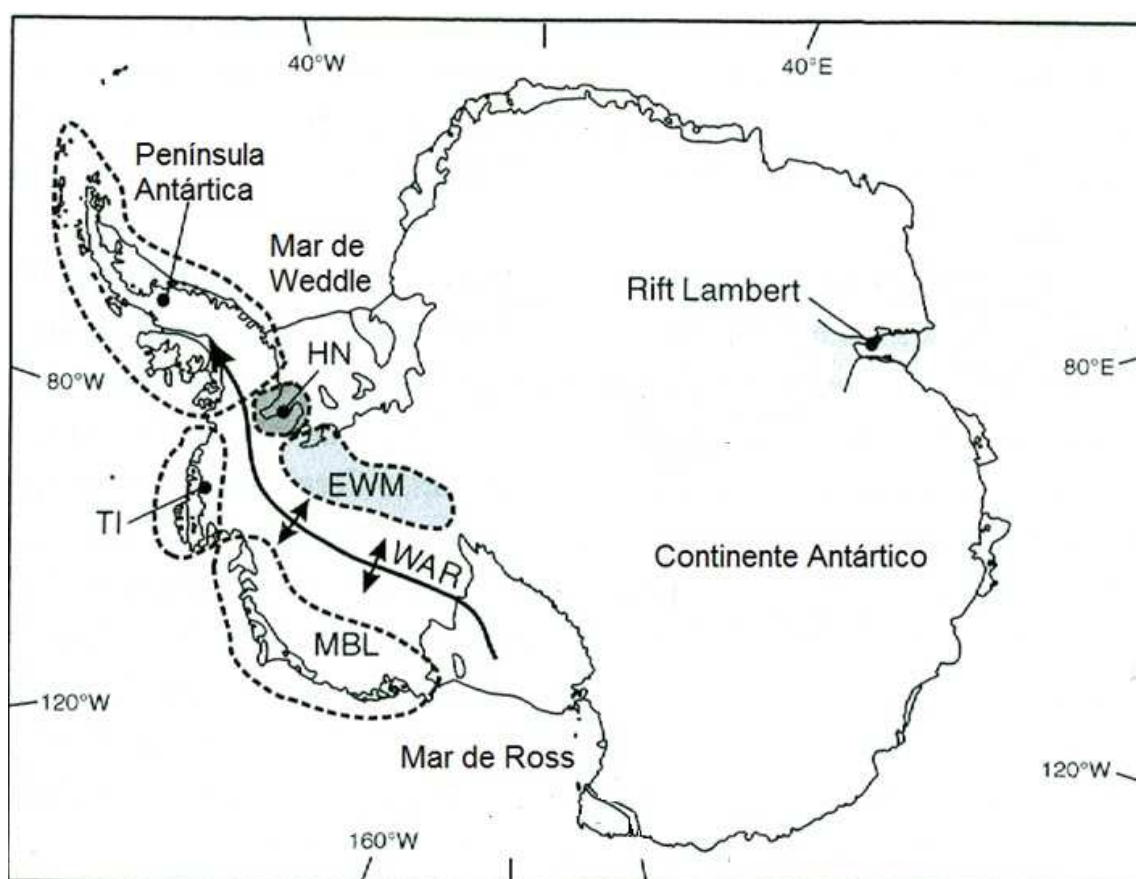
Entre o final do Jurássico e o Cretáceo as áreas ocidentais, que hoje correspondem a Península Antártica, guardavam o registro de sua gênese mesozoica geologicamente complexa, com movimentos de convergência e divergência, e microplacas que se moviam de modo independente entre si (Dalziel & Lawver 2001).



**Figura 4.** Paleogeografia da Antártica entre o Cambriano e o final do Carbonífero (*Orogenia Terra Australis*, resultado dos processos de subducção) e no final do Paleozóico e Mesozóico basal (*Orogenia Gondwanides* que afetou preferencialmente as áreas orientais da atual Península Antártica), segundo Boger (2011). Números de 1-5 representam os domínios tectônicos da placa oriental (Continente). Modificada de Reguero *et al.* (2013)

Para este intervalo, cinco diferentes blocos crustais compunham as áreas da Península Antártica (Figura 5), dois deles ligados ao continente (HN e EWM), e dois

outros no flanco ocidental (TI e MBL), ambos limitados por um sistema *rift* (WAR *rift system*) e cobertos pelo mar (Storey 1995, Dutra & Jasper 2010, Cantrill & Poole 2013, Reguero *et al.* 2013). O quinto e por mais tempo mantido íntegro, ao norte, corresponde à Península Antártica.

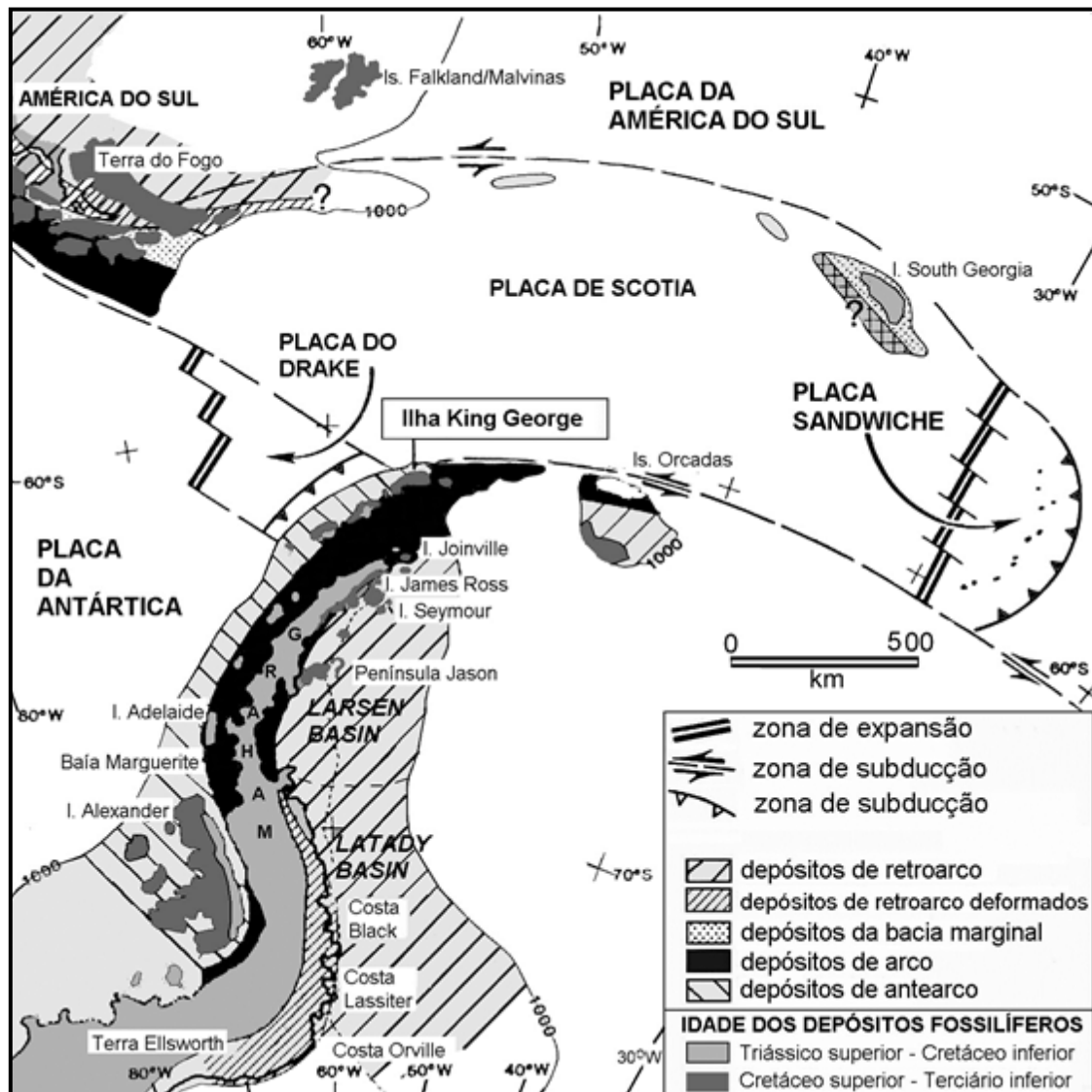


**Figura 5.** Arcabouço geológico da Antártica e seus cinco principais blocos crustais para o final do Jurássico e Cretáceo. WAR= Sistema *rift* da Antártica Oriental; TI= Thurston Island; MBL= Terra de Mary Bird; HN= Haag Nunatak; EWM= Mts. Elsworth-Whitemore (Reguero *et al.* 2013)

É neste último bloco (o mais acessível aos estudos geológicos) que os efeitos dos processos de subducção são mais visíveis, com a formação de áreas do arco magmático (a Península continental ou Terra de Graham), de retro-arco a leste (correspondendo às bacias de Latady e Larsen) e, de ante-arco, a oeste, englobando as ilhas Shetland do Sul e Alexander (Figura 6). A grande diversidade de ambientes favoreceu o crescimento das



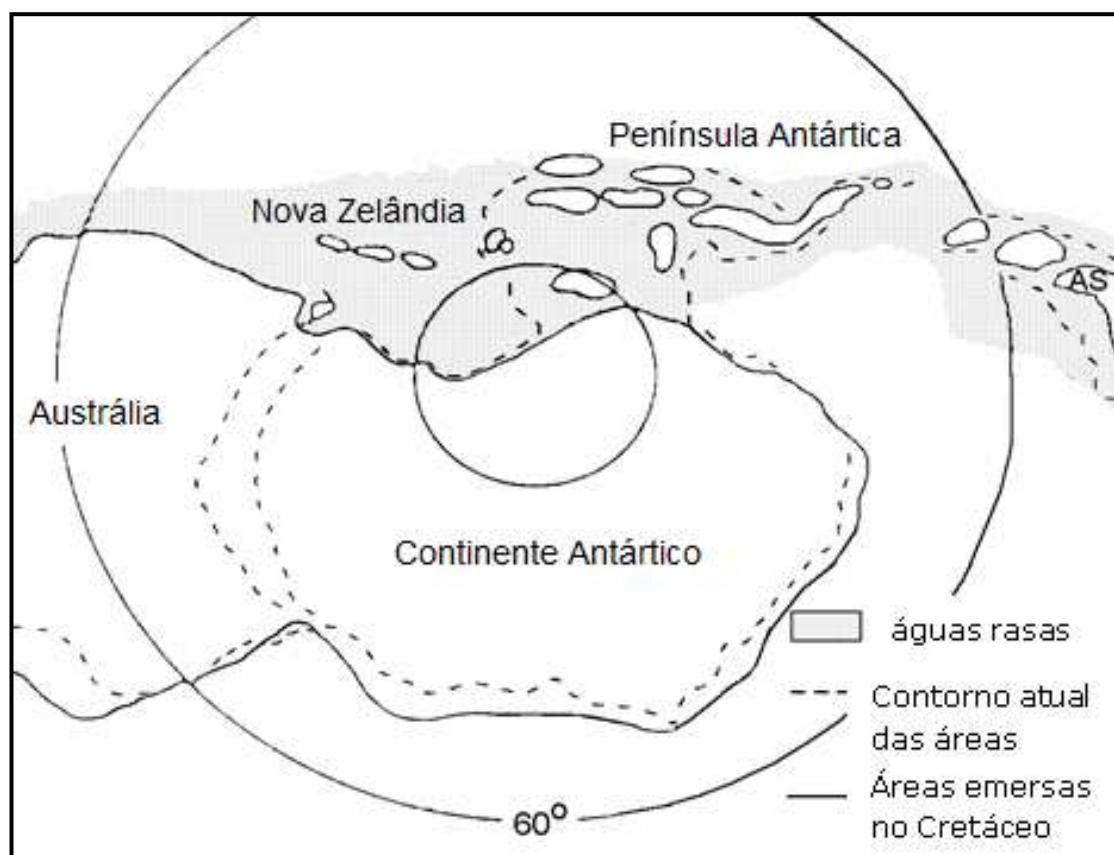
florestas, cujos análogos modernos crescem hoje em áreas da Cordilheira dos Andes e Nova Zelândia (Dutra & Batten 2000) e, ao mesmo tempo, graças ao intenso vulcanismo das áreas ocidentais, podem ter sido os responsáveis pela queima e preservação da matéria vegetal.



**Figura 6.** Contexto geotectônico da Península Antártica e sua correspondência em áreas do sul da América do Sul (Dutra 2001, modificado de Ellio 1988).

Para Lawver *et al.* (1992) neste momento, terras contínuas uniam a Península à Patagônia. Contudo, novos dados baseados em cistos de dinoflagelados têm sugerido a presença de águas marinhas neste setor no Cretáceo Superior (Província Sul Polar de

Bowman *et al.* 2012). Este aspecto mantém-se, contudo, controverso, já que as faunas de tetrápodes e as floras têm atestado um livre trânsito entre a América do Sul e a Austrália até o Eoceno (Case 1988, Olivero *et al.* 1991, Marensi *et al.* 1994, Dutra & Batten 2000, Specht *et al.* 2007, Reguero & Marensi 2010), a partir do sistema de ilhas e mares de águas rasas da Província Weddelliana, Figura 7 (Zinsmeister 1979, Case 1988).

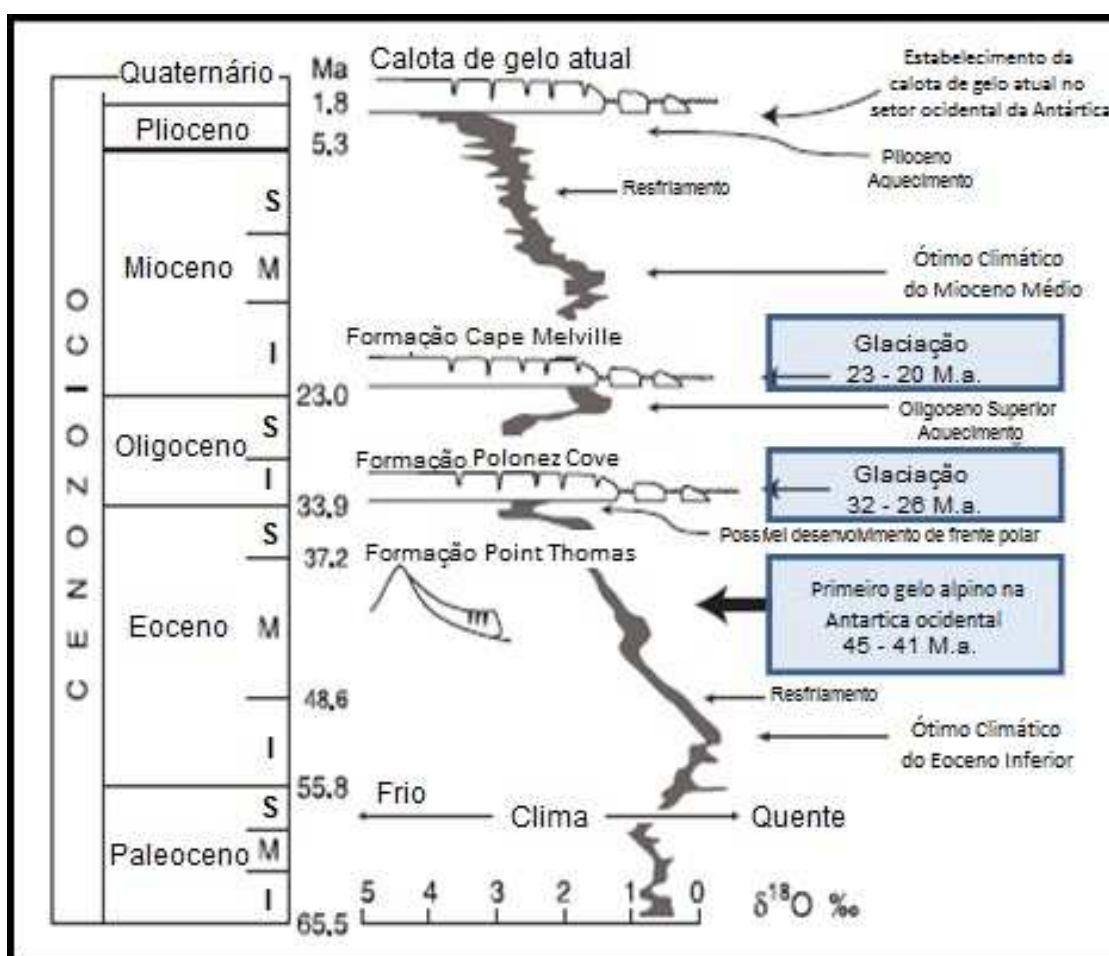


**Figura 7.** Província Weddelliana (Hill 1989)

No final do Cretáceo, com a definitiva entrada do Mar de Weddel nas áreas orientais do *backarc* (sub-bacia de James Ross), originou-se a mais espessa e melhor conhecida sucessão de plataforma em altas latitudes e representativa de uma mega sequência regressiva (Macellari 1988, Hathway 2000, Willan & Hunter 2005). O caráter costeiro e marinho raso dos depósitos é atestado pela presença de abundantes fósseis de

mamíferos e restos de plantas vindas do continente.

Em termos paleoclimáticos, a conformação das placas e a presença/ausência do mar em diferentes momentos exerceram seus efeitos. O final do Cretáceo será marcado por um intervalo de clima mais frio em relação àquele que havia caracterizado o período nas altas latitudes do sul, mas sem evidências de gelo (Barrera *et al.* 1987). Irá preceder um tempo de calor e umidade que irá atingir seu máximo no início do Eoceno (Figura 8).



**Figura 8.** História climática da Península Antártica no Cenozóico e os principais eventos de queda na temperatura atestados na sucessão da ilha King George. Curva global de isótopos de oxigênio em águas marinhas profundas e suas tendências, a partir de Zachos *et al.* (2001). Escala de tempo de Gradstein & Ogg (2004). Figura modificada de Birkenmajer *et al.* (2005)

A definitiva separação entre o extremo sul da América do Sul e o norte da Península Antártica, resultado dos movimentos transcorrentes que originaram o Estreito

de Drake ocorridos entre 50 e 41 Ma (Barker 2001, Bohoyo *et al.* 2007), dá lugar ao definitivo isolamento do continente nas altas latitudes e a formação da Corrente Circum-Antártica (Figura 9). A gradativa deterioração do clima é atestada inicialmente pela deposição de tilitos de origem glacial (Eoceno médio a superior), e pelas evidências posteriores (Oligoceno e Mioceno) da chegada do gelo ao nível do mar (Kennett & Barker 1990, Birkenmajer *et al.* 2005).

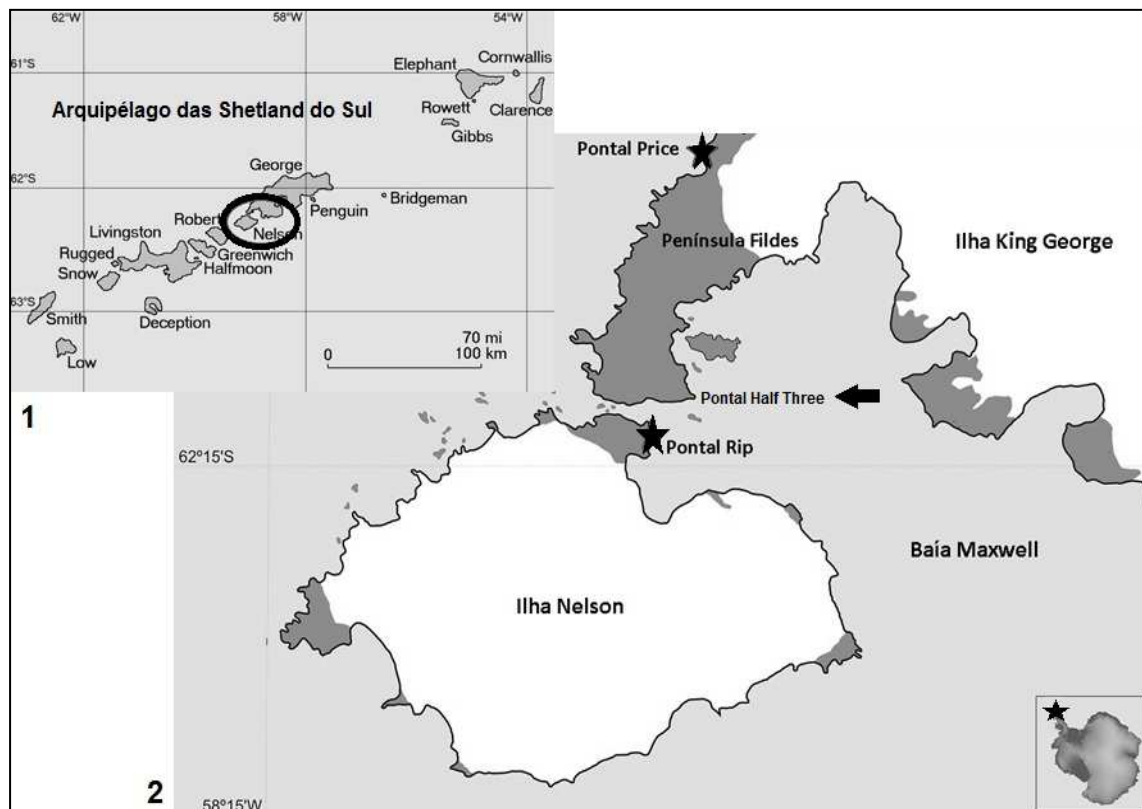


**Figura 9.** As duas grandes áreas da Antártica (Península e Continente) e sul da América do Sul, após a formação dos mares de Scotia e Weddell entre o Eoceno médio e superior (Smith & Sandwell, 1997). Modificado de Reguero *et al.* (2013).

## 7. ÁREAS DE ESTUDO

Com aproximadamente 500 km de comprimento e uma área total de 3.687 km<sup>2</sup>, o arquipélago das Shetland do Sul situa-se na porção nor-ocidental da Península Antártica. É composto por cerca de 11 ilhas maiores e onde as ilhas King George e Nelson, foco deste trabalho, ocupam uma posição intermediária (Figura 10.1). Parte delas era originalmente ligada à porção continental da Península ou Terra de Graham, até que movimentos extensionais ocorridos há 4 Ma romperam estas ligações e originaram o Estreito de Bransfield, hoje com largura aproximada de 100 km (Tokarski 1991, Yi *et al.* 2005). O material aqui estudado provém dos pontais Rip e Price (Figura 10.2), áreas escolhidas por serem exclusivas em expor níveis carbonosos de idade Campaniano superior (Dutra 1997, Dutra *et al.* 1998, Trevisan 2011, Bastos 2012, Bastos *et al.* no prelo).

O único outro local com características similares na sucessão das Shetland do Sul, pela presença de níveis de carvão, é o Pontal Half Three (Formação Half Three Point, Grupo Peninsula Fildes de Shen, 1994), a sul da ilha King George. Idades Rb-Sr entre 71-77 Ma foram aí obtidas nos basaltos cálcico-alcálicos sobrepostos aos níveis de tufos com palinomorfos e restos vegetais carbonizadas (Wang & Shen 1994, Cao 1994). No conjunto, estas três ocorrências mostram floras mais empobrecidas que aquelas do Paleógeno, e caracterizadas pelo domínio de formas primitivas de *Nothofagus*, pteridófitas e raras coníferas (Dutra & Batten 2000, Dutra 2001, 2004, Bastos 2012, Bastos *et al.* no prelo).



**Figura 10. 1.** Ilhas do arquipélago das Shetland do Sul, noroeste da Península Antártica, e a localização das ilhas King George e Nelson; **2.** Mapa de detalhe da ilha Nelson e do sul da ilha King George (Península Fildes), e os locais estudados (estrelas). Modificado de Dutra (1997). A seta aponta o Pontal Half Three, onde níveis do final do Cretáceo (idades Rb-Sr) foram igualmente identificados e que exibe fácies e conteúdo paleontológico comparável (Cao, 1994).

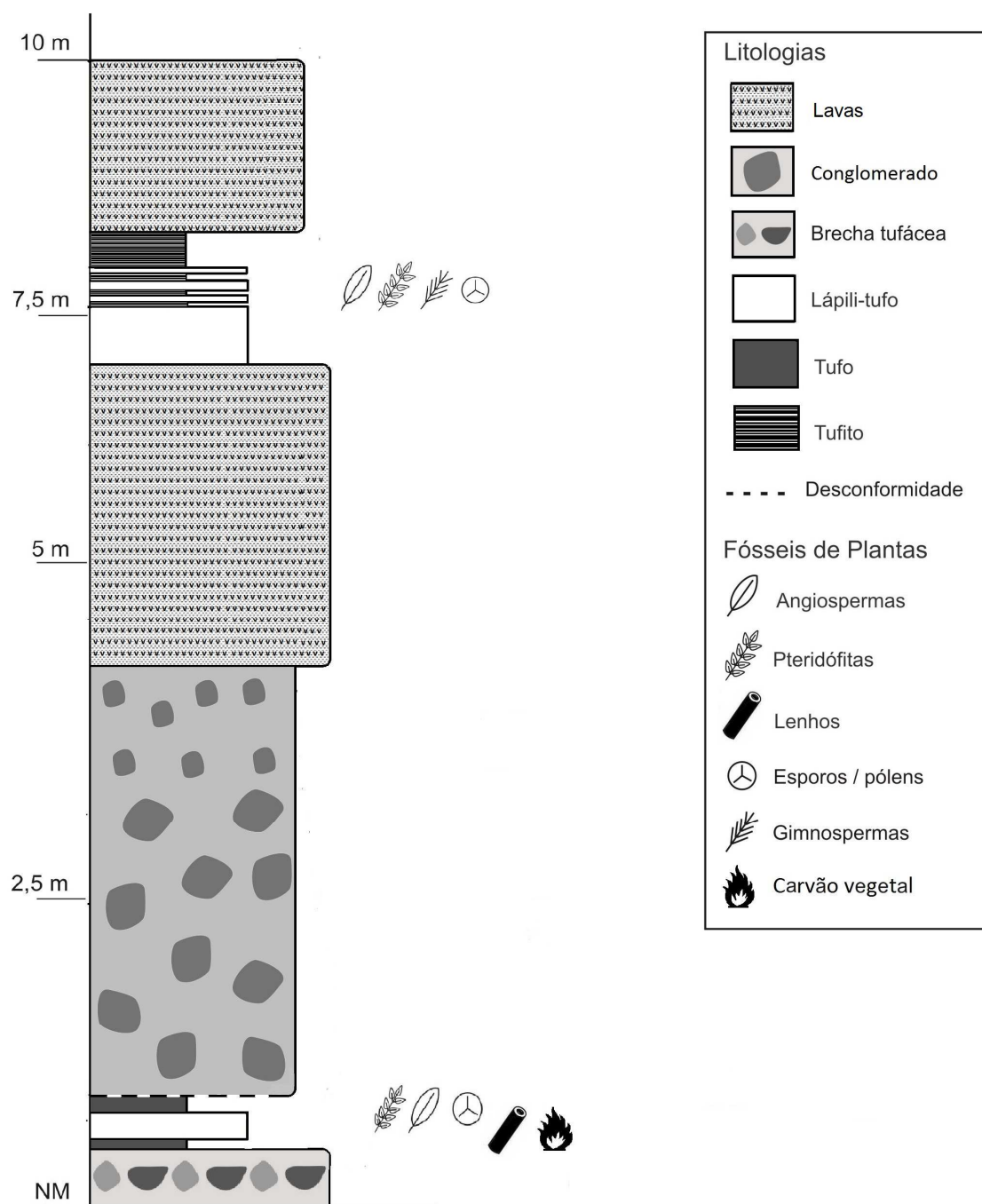
### 7.1 Pontal Rip, Ilha Nelson

A ilha Nelson é constituída por cerca de 99% de rochas vulcânicas (lavas andesíticas e intrusivas), dados que se limitam, contudo, as poucas áreas expostas junto ao mar durante os meses de verão (Fontoura *et al.* 1988). Os estudos realizados mostram que até o momento, o único setor a expor níveis tufáceos e de tufos com fósseis está restrito ao norte da ilha (o próprio Pontal Rip), localizado às margens do Estreito Fildes e voltado para o sul da ilha King George (Fontoura *et al.* 1988, Dutra *et al.* 1998). O Estreito Fildes (com entre 1 km a 400 m de largura) separa as ilhas King George e Nelson e foi formado graças à falhamentos transversais que, segundo Birkenmajer

(2001), estabeleceram-se ortogonalmente ao sistema principal de falhas que afetou o arquipélago das Shetland do Sul.

O Pontal Rip (coordenadas geográficas 62° 24' 73"S- -59° 61' 35" W) é composto por uma sucessão de 10 m de rochas vulcânicas e vulcanoclásticas (*sensu* Smith 1991) onde dominam as brechas e conglomerados. Níveis finos de piroclásticas (tufos e lúpili) e tufos retrabalhados intercalados, de cores cinza escuro, concentram a macro e microflora em dois níveis do afloramento (Figura 11). A camada contendo carvão vegetal macroscópico foi identificada no nível mais basal de tufos finos que assenta sobre depósitos de brecha (Figura 12), próximo ao nível do mar. Superiormente, e após um setor encoberto que lateralmente, permite ver sua correspondência a depósitos de *debris flow*, seguem-se duas camadas de lavas contendo entre elas uma intercalação granodecrescente de tufos e lapilli, igualmente contendo restos vegetais (Bastos *et al.* no prelo).

Em termos paleoflorísticos, os níveis basais contendo carvão vegetal expõem uma macroflora muito mais escassa, praticamente restrita a frondes de *Coniopteris*, grupo de pteridófitas restrito ao Mesozóico e comum em outras áreas da Península Antártica (Trevisan 2011). Na microflora, contudo, estão presentes esporos de fungos, algas e pteridófitas, associados a uma ocorrência rara, mas importante de testas de foraminíferos, que atestam a proximidade do mar. Entre os grãos de pólen dominam formas ancestrais relacionadas à *Nothofagus* (*Nothofagidites senectus* e *N. kaitangataensis*) e coníferas Araucariaceae e Podocarpaceae (Trevisan, 2011).



**Figura 11.** Perfil estratigráfico e registro paleontológico do afloramento do Pontal Rip, ilha Nelson, ilhas Shetland do Sul (modificado de Trevisan 2011).





**Figura 12.** Aspecto geral dos fragmentos de lenhos e ramos carbonizados dos níveis basais do perfil do Pontal Rip.

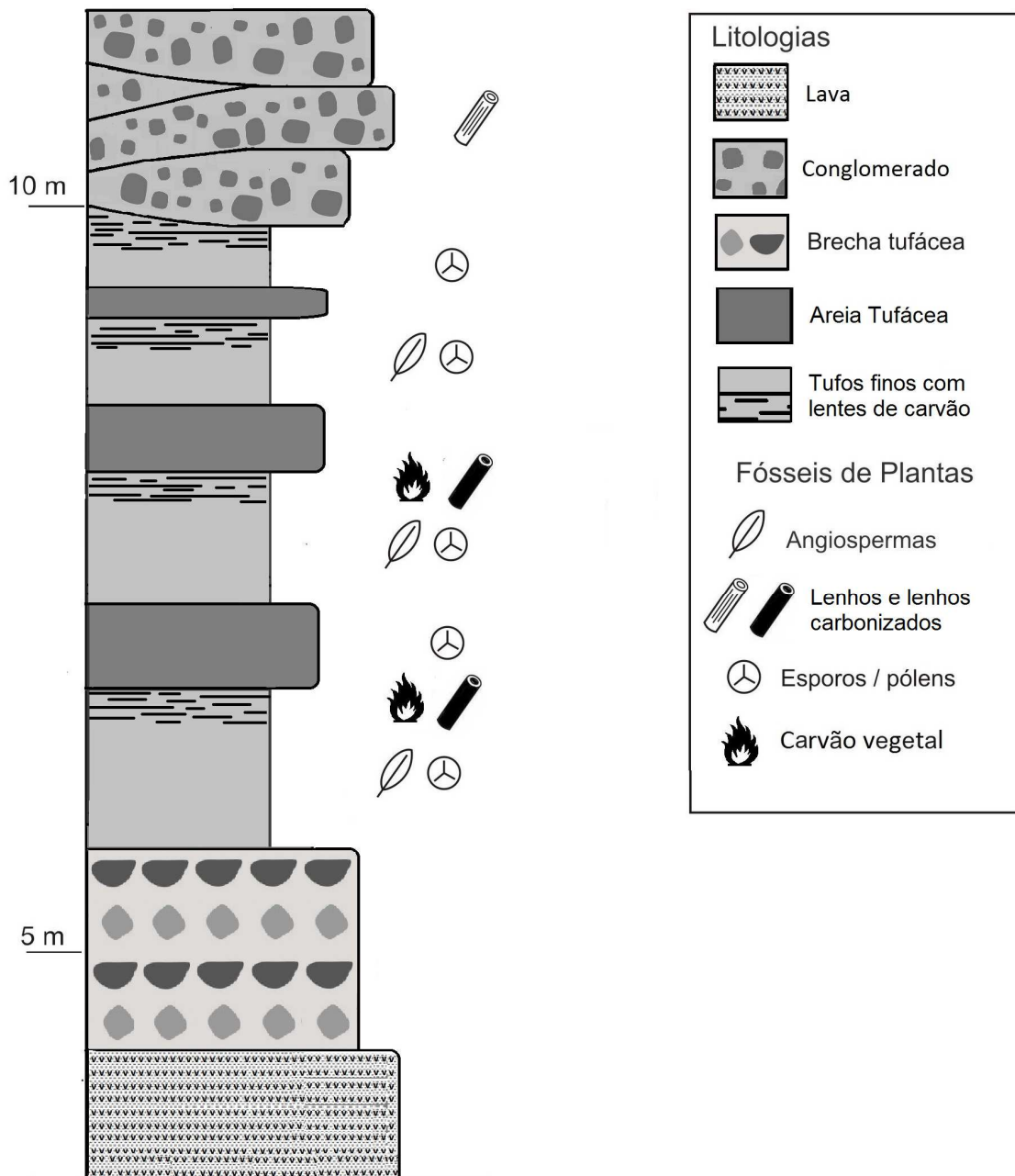
## 7.2. Pontal Price, Ilha King George

O afloramento do Pontal Price ( $62^{\circ} 15' 41''\text{S}$ -  $59^{\circ} 49' 59''\text{W}$ ), localiza-se a leste da Península Fildes (Figura 10.2), e mais uma vez aflora em uma área próxima ao nível do mar, na costa do Estreito de Drake. O conjunto de litologias e o conteúdoossilífero é próximo àquele de outras localidades a que foram atribuídas idades no final do Cretáceo na própria Península Fildes, tais como, a Baía Skua e a Península Potter. (Smellie *et al.* 1984, Shen 1994, Dutra & Batten 2000).

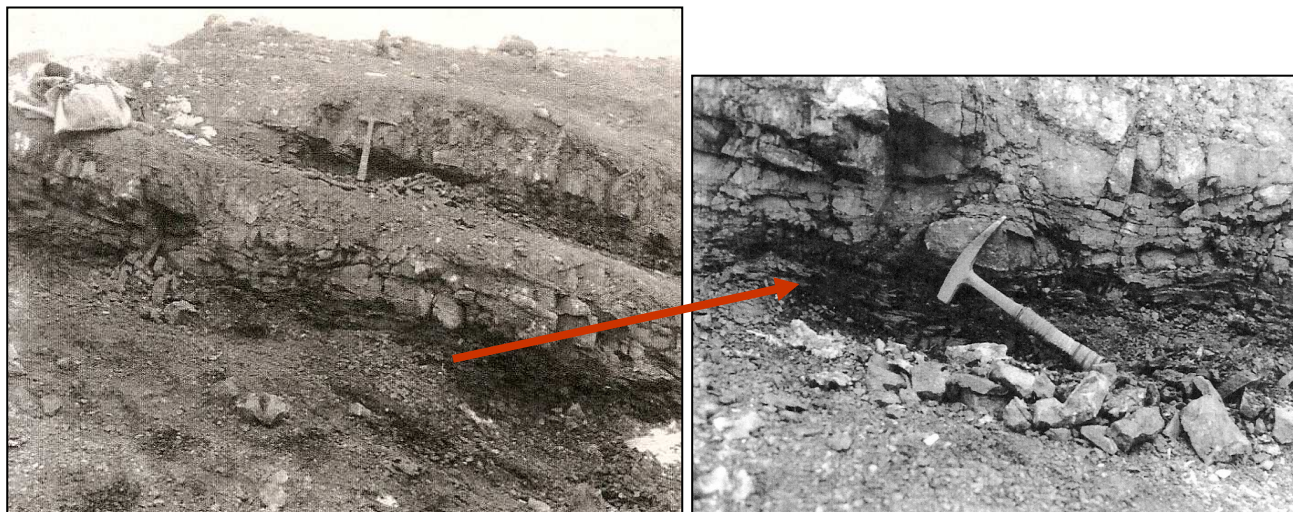
A deposição no Pontal Price foi incluída na Formação Fildes que, para Smellie *et al.* (1984), reuniria litologias vulcânicas (dominantemente andesíticas), com tufos e folhelhos intercalados, aflorantes próximo ao mar e representativas dos níveis mais antigos na sucessão das Shetland do Sul. A deposição consiste de 4 sucessivos ciclos granocrescentes, de geometria tabular, compostos por tufitos, lapilitos e carvão

(estes em camadas centimétricas ou lentes), sobrepostos a fluxos de detritos (brechas) com clastos de tufos e basalto. Superiormente dão lugar a conglomerados de clastos grandes (50 cm), que incluem fragmentos de lenho, e de contato basal erosivo (Figuras 13 e 14). As fácies epiclásticas a vulcanoclásticas intermediárias podem corresponder a planícies de inundação e pântanos associados, semelhantes ao que Smith (1991) chamou de *low-relief aluvial plain ring*, e correspondente a uma fase de *highstand* entre erupções (Dutra *et al.* 1996). A presença de camadas de material tamanho areia, internamente maciças, de grande amplitude lateral, e exibindo feições de carga, assentadas sobre pelitos apoia esta última proposta.

A ação hidrotermal posterior é atestada pela expressiva presença de calcita em microfalamentos e fraturas, frequentes ao longo do perfil, e movimentações tectônicas pós-deposicionais estão refletidas na inclinação de 15° dos estratos. Os restos de folhas são igualmente raros nesta seção, mas as associações polínicas caracterizam-se mais uma vez pelo domínio de grãos de pólen de *Nothofagus* de tipos primitivos e de Podocarpaceae, acompanhados de esporos de pteridófitas. No conjunto, e pela similaridade com a vegetação moderna que hoje cresce nas latitudes temperadas da América do Sul e Nova Zelândia, sugerem climas frios e úmidos (Dutra *et al.* 1996, Dutra & Batten 2000).



**Figura 13.** Perfil estratigráfico e registro paleontológico do afloramento do Pontal Price e os níveis contendo carvão vegetal macroscópico (modificado de Dutra & Batten 2000).



**Figura 14.** Aspecto geral da sucessão do Pontal Price. Níveis restritos de carvão mineral e vegetal (*coal* e *charcoal*) intercalam-se nos dois níveis de tufos mais basais.

## 8. MATERIAIS E MÉTODOS

### 8.1. Material de estudo

O presente trabalho foi desenvolvido com a utilização de amostras coletadas durante as expedições brasileiras a Península Antártica, com o apoio do Programa Antártico Brasileiro (PROANTAR), especialmente na de número XXV (verão 2006-2007). As amostras estão depositadas no Laboratório de História da Vida e da Terra (LaViGea), na seção Antártica, da Universidade do Vale do Rio do Sinos – UNISINOS. Além disso, foram avaliadas amostras provenientes da ilha Livingston e cedidas pelo Instituto Antártico Chileno (INACH), mas estas se mostraram estéreis para a presença de carvão vegetal, não tendo sido consideradas nas análises.

O material aqui estudado é proveniente de duas localidades (Pontal Rip e Pontal Price), cujos níveis foram datados por seu conteúdo paleobotânico e por correlações com a área próxima do Pontal Half Three, na ilha King George, onde idades absolutas forneceram valores correspondentes ao Campaniano superior (Wang & Shen 1994).

## 8.2. Preparação e análise das amostras

As amostras coletadas foram tratadas mecanicamente e analisadas em laboratório, a olho nu e sob estereomicroscópio (aumentos entre 10 e 40 vezes). Foram analisadas um total de 56 amostras. Destas, apenas 15 (12 do afloramento Pontal Rip – Ilha Nelson e três do afloramento Pontal Price – ilha King George), foram avaliadas em detalhe no presente trabalho. Após o resgate dos fragmentos de carvão vegetal, os mesmos foram preparados para avaliação sob Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).

As amostras foram montadas sobre *stubs* providos de fita adesiva dupla-face, metalizadas com ouro e analisadas sob MEV marca Zeiss, modelo EVO LS15, do Instituto Tecnológico em Ensaios e Segurança (ITTFuse), da Universidade do Vale do Rio dos Sinos, para a definição de suas características morfoanatômicas. Com base nas estruturas anatômicas observadas, afinidades taxonômicas foram estabelecidas e inferências vinculadas às características dos eventos de paleoincêndios foram realizadas.

A partir da integração dos dados obtidos das amostras provenientes das áreas de estudo, com aqueles já disponíveis em trabalhos prévios, foram construídas hipóteses vinculadas às condições paleoambientais predominantes no momento da formação e deposição do material.

## 9. RESULTADOS E CONCLUSÕES

Os resultados e conclusões são tratados no artigo em anexo, submetido á Revista *GEAE – Journal of Geoscience*.

## 10. REFERÊNCIAS

- Adie R.J. 1964. Stratigraphic correlation in West Antarctica. *In*: Adie R.J. (ed.) Antarctic Geology, Symposium on Antarctic Geology, 307-313.
- Ali A.A., Higuera P.E., Bereron, Y., Carcaillet, C. 2009. Comparing fire-history interpretations based on area, number and estimated volume of macroscopic charcoal in lake sediments. *Quaternary Research*, **72**:462-468.
- Ascough P.L., Bird M.I., Scott A.C., Collinson M.E., Weiner S., Cohen-Ofri, I., Snape C.E., Le Manquais K. 2010. Charcoal reflectance: implications for structural characterization. *Journal of Archaeological Science*, **36**: 1672-1679.
- Ashworth A.C. & Cantrill D.J. 2004. Neogene vegetation of the Meyer Desert Formation (Sirius Group) Transantarctic Mountains, Antarctica. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **213**: 65-82.
- Barker P.F. 2001. Scotia Sea regional tectonic evolution: implications for mantle flow and palaeocirculation. *Earth Science Reviews*, **55**:1-39.
- Barrera E., Huber B. T., Savin S. M. & Webb P. N. 1987. Antarctic marine temperatures: late Campanian through early Palaeocene. *Paleoceanography*, **2**:21-47.
- Barton C.M. 1965. The Geology of South Shetland Islands. III. The stratigraphy of King George Island. *Scientific Reports of the British Antarctic Survey*, **44**: 1-33.
- Bastos B.L. 2012. *Flora fóssil do Pontal Rip, Ilha Nelson, Península Antártica: Taxonomia e contexto geológico*. Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Dissertação de Mestrado, 44p.
- Bastos B.L., Dutra T.L., Wilberger T., Trevisan C. (no prelo). Uma flora do final do Cretáceo na Ilha Nelson, Ilhas Shetland do Sul, Península Antártica. *Revista Brasileira de Paleontologia*, 16 (3).
- Belcher C.M., McElwain J.C. 2008. Limits for combustion in low O<sub>2</sub> redefine paleoatmospheric predictions for the Mesozoic. *Science*, **321**: 1197-1200.
- Bird M.I., Moyo C., Veenendaal E.M., Lloyd, J., Frost P. 1999. Stability of elemental carbon in a savanna soil. *Global Geochemical Cycles*, **13**:923-932.
- Birkenmajer K. 1982. Report on geological investigations of King George Island and

Nelson Island (South Shetland Islands, West Antarctica) in 1980-81. *Studia Geologica Polonica*, **74**:175-197.

Birkenmajer K. 2001. Mesozoic and Cenozoic stratigraphic units in parts of the South Shetland Islands and northern Antarctic Peninsula (as used by the Polish Antarctic Programmes). *Studia Geologica Polonica*, **118**:5-188.

Birkenmajer K., Gazdzicki A., Krajewski K.P., Przybycin A., Solecki A., Tatur A. & Yoon, H.I. 2005. First Cenozoic glaciers in West Antarctica. *Polish Polar Research*, **26**:3-12.

Boger S.D. 2011. Antarctica – before and after Gondwana. *Gondwana Research*, **19**:335-371.

Bohoyo F., Galindo-Zaldívar J., Jabaloy A., Arodriguez-Fernández J.M. Schreider. A.A. & Surināch, E. 2007. Development of deep extensional basins associates with the sinistral transcurrent fault zone of the Scotia-Antarctic plate boundary, In: A.K. Cooper & C.R. Raymond *et al.* (eds.) Antarctic: A keystone in a changing world, Online Proceedings Of The 10th Isaes X ,USGS Open-File Report 2007-1047. Extended Abstract, 042,4p.

Bond W.J., Keeley J.E. 2005. Fire as a global “herbivore”: the ecology and evolution of flammable ecosystems. *Trends in Ecology and Evolution*, **20(7)**:387-394.

Bose M.N., Taylor E.L. & Taylor T.N. 1990. Gondwana Floras of India and Antarctica. A survey and appraisal, *In*: Taylor, T.N & Taylor (eds.) Antarctic Paleobiology. New York, Springer Verlag, p.118-148.

Bowman V.C., Francis J.E., Riding J.B., Hunter S.J. & Haywood, A.M. 2012. A latest Cretaceous to earliest Paleogene dinoflagellate cyst zonation from Antarctica, and implications for phytoprovincialism in the high southern latitudes. *Review of Palaeobotany and Palynology*, **171**:40–56.

Braadbaart F., Poole I. 2009. Preservation potential of charcoal in alkaline environments: an experimental approach and implications for the archaeological record. *Journal of Archaeological Science*, **36**: 1672-1679.

Bradbury J.P. 1996. Charcoal deposition and redeposition in Elk Lake, Minnesota, USA. *The Holocene*, **6**:339-344.

Brown J.K. 2000. Introduction and Fire regimes. In: Wildland Fire in Ecosystems: Effects of Fire on Flora. USDA Forest Service General Tech. Rep. RMRS –GTR, **422**: 01-08.



Brown B., Gaina C. & Dietmar R.M. 2006. Circum-Antarctic paleobathymetry: Illustrated examples from Cenozoic to recent times. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **231**: 158-168.

Cantrill D.J & Poole I. 2012. The vegetation of Antarctica through Geological Time. Cambridge University Press, Cambridge, 490p.

Cao Liu. 1994. Late Cretaceous palynoflora in King George Island of Antarctica, with references to its paleoclimatic significance. In: Shen Yanbin (ed.) *Stratigraphy and Palaeontology of Fildes Peninsula, King George Island, Antarctic*. Beijing, Monograph Science Press, p.51-83.

Case J.A. 1988. Paleogene floras from Seymour Island, Antarctic Peninsula. In: Feldmann RM, Woodburne MO (eds.) *Geology and Paleontology of Seymour Island, Antarctic Peninsula*, vol. 169. Memoir of the Geological Society of America, Boulder, p.523–530.

Clark J.S. 1988. Particle motion and the theory of charcoal analysis: source area, transport, deposition and sampling. *Quaternary Research*, **30**: 67-80.

Clark J.S., Patterson III W.A., 1997. Background and local charcoal in sediments: scales of fire evidence in the palaeo record. In: Clark, J.S., *et al.* (ed.), *Sediment Records of Biomass Burning and Global Change*. Springer Verlag, p.23-48.

Cooper A.K., Barrett P., Stagg H., Storey B., Stump E., Wise W. and the 10th ISAES editorial team. 2007. *Antarctica: a keystone in a changing world*. Proceedings of the 10th International Symposium on Antarctic Earth Sciences, Santa Barbara, California, August 26 to September 1, 2007, Polar Research Board, National Research Council, U.S. Geological Survey. U.S. Geological Survey Open-File Report 2007-1047, version 2.0.

Cressler III W.L. 2001. Evidence of earliest known wildfires. *Palaios*, **16**:171-174.

Dalziel I.W.D. & Lawver,L.A. 2001. The lithospheric setting of the West Antarctic ice sheet. *American Geophysical Union Antarctic Research Serie*, **77**:29-44.

Del Valle, R.A & Rinaldi, C.A. 1993. Structural features of the northeastern sector of the Antarctic Peninsula. In: Anais Jornadas de comunicaciones sobre investigaciones Antárticas, Instituto Antártico Argentino, p.261-267.

Dutra T.L. 2001. Paleoflora da ilha 25 de Mayo, Península Antártica: contribuição à paleogeografia, paleoclima e para a evolução de Nothofagus. *Asociación Paleontology Argentina, Publicación Especial*, **8**:29-37.



- Dutra T.L. 2004. Paleofloras da Antártica e sua Relação com os Eventos Tectônicos e Paleoclimáticos nas Altas Latitudes do Sul. *Revista Brasileira de Geociências*, **34(3)**: 401-410.
- Dutra T.L. & Batten D.J. 2000. Upper Cretaceous floras of King George Island, West Antarctica, and their palaeoenvironmental and phytogeographic implications, *Cretaceous Research*, **21**:181-209.
- Dutra T.L. & Jasper A. 2010. Paleontologia da Antártica. In: Carvalho, I. (org.). Paleontologia. 3ed. Interciência, Rio de Janeiro, **1**:537-572.
- Dutra T.L., Leipnitz, B., Faccini U.F. & Lindenmayer, Z. 1996. A non marine Upper Cretaceous interval in West Antarctica (King George Island, Northern Antarctic Peninsula). *SAMC (South Atlantic Mesozoic Correlations) News, IGCP Project 381*, **5**: 21-22.
- Dutra T.L., Hansen M.A.F. & Fleck, A. 1998. New evidences of wet and mild climates in Northern Antarctic Peninsula at the end of Cretaceous. In: 3rd Annual Conference of IGCP Project, **381**:10-13.
- Doubleday P.A., Tranter T.H. 1994. Deformation mechanism paths oceanic rocks during subduction and accretion: the Mesozoic forearc of Alexander Island, Antarctica. *Journal Geological Society of London*, **151**:543-554.
- Edwards D., Axe L. 2004. Anatomical evidence in the detection of the earliest wildfire. *Palaios*, **19**:113-128.
- Elliot D. 1988. The James Ross Basin, northern Antarctic Peninsula. In: Anais V Congresso Geológico Chileno, **39**:225-226.
- Favilli F., Cherubini P. 2010. Charcoal fragments of Alpine soils as an indicator of landscape evolution during the Holocene in Val di Sole (Trentino, Italy). *The Holocene*, **20**:67-79.
- Fontoura M.A., Fensterseifer H.C. & Troian F.L. 1988. Geology and Petrology of intrusive bodies of Stansbury Peninsula, Nelson Island, South Shetland Islands, Antarctica. *Serie Científica INACH*, **38**:45-58.
- Galloway W.E. & Hobday D.K. 1983. Terrigenous Clastic depositional system. *Spronger-Verlag*, p.423.
- Gammidge, L. 2001. Coal: an introduction. *Palaios*, **16**:160-168.
- Gastaldo R.A., DiMichele W.A., Pfefferkorn H.W. 1996. Out of the Icehouse into the

Greenhouse: a Late Paleozoic analog for modern global vegetation change. *GSA Today*, **6(10)**: 1-7.

Gavin D.G., Hallett D., Hu F.S., Lertzman K.P., Prichard S.J., Brown K.J., Lych, J.A., Bartlein P., Peterson D.J. 2007. Forest fire and climate change in western North America: insights from sediment charcoal records. *Front Ecological Environmental*, **5(9)**: 499-506.

Glasspool I.J., Edwards D., Axe L. 2004. Charcoal in the Silurian as evidence for the earliest wildfire. *Geology*, **32**:381-383.

Glasspool I.J., Scott A.C. 2010. Phanerozoic concentrations of atmospheric oxygen reconstructed from sedimentary charcoal. *Nature Geoscience*, **3**:627-630.

Gradstein F.M. & Ogg, J.G. 2004. Geologic Time Scale 2004 – why, how, and where next! *Lethaia*, **37**:175–181.

Gutsell J., Jonhson M. 2007. Wildfire are tree population processes. *In*: Jonhson, M. (ed.) Plant Disturbance Ecology Amsterdam: *Elsevier*, p.698.

Hathway B. 2000. Continental rift to back-arc basin: Jurassic-Cretaceous stratigraphical and structural evolution of the Larsen basin, Antarctic Peninsula. *Journal of the Geological Society London*, **157**: 417-432.

Henriques E. 1984. Uma visão da Antártica. *In*: Biblioteca do Exército, Coleção General Benício, 198 p.

Herring J.R. 1985. Charcoal fluxes into sediments of the North Pacific Ocean: the Cenozoic record of burning. The Carbon Cycle and Atmospheric CO<sub>2</sub>: Natural Variations Archean to Present. *Geophysical Monographs*, **32**:419-442.

Hervé F., Faúndez V., Brix M., Fanning M. 2006. Jurassic sedimentation of the Miers Bluff Formation, Livingston Island, Antarctica: evidence from SHRIMP U-Pb ages of detrital and plutonic zircons. *Antarctic Science*, **18(2)**: 229-238.

Hill R.S. 1989. New species of *Phyllocladus* (Podocarpaceae) macrofossils from Southeastern Australia. *Alcheringa*, **13**:193-208

Jasper A., Guerra-Sommer M., Uhl D., Salvi J., Kauffmann M., Osterkamp I.C., Gonçalves C.V. 2007. A ocorrência de incêndios vegetacionais durante o Paleozóico Superior da Bacia do Paraná. *In*: Carvalho I. S. *et al.* (eds.), Paleontologia: Cenários da Vida, vol.1. Rio de Janeiro, Ed. Interciência, p.15-23.

Jasper A., Uhl D., Guerra-Sommer M., Bernardes-de-Oliveira, M.E.C. & Machado,

N.T.G. 2011. Upper Paleozoic charcoal remains from South America: multiple evidences of fire events in the coal bearing strata of the Paraná Basin, Brazil. *Palaeo*, **306**:205-218.

Jasper A., Guerra-Sommer M., tHamad A., Abdalla M.B., Bamford M , Bernardes-de-Oliveira M., Tewari R., Uhl D. 2013. The burning of Gondwana: Permian fires on the southern continent-A palaeobotanical approach. *Gondwana Research*, **24**:148-160.

Jokat W., Boebel T., König M. & Meyer U. 2003. Timing and geometry of early Gondwana breakup. *Journal of Geophysical Research*, **108(B9)**: 24-28.

Jones T.P & Chaloner, W.G. 1991. Fossil charcoal, its recognition and palaeoatmospheric significance. *Paleogeography. Paleoclimatology. Paleoecology*, **97**: 39-50.

Kennett J.P. & Barker P.F. 1990. Latest Cretaceous to Cenozoic climate and oceanographic developments in the Weddell Sea, Antarctica: an ocean-drilling perspective. *In: Barker, PF, Kennett, JP (eds.) Proceedings of ODP Science Results*, vol. 113, p.937-960.

Lawver L.A., Royer J.Y., Sandwell D.T., Scotese C.R. 1991. Evolution of the Antarctic continental margins. *In: Thomson, M.R.A.; Crame, J.A.; Thomson, J.W. (eds.) Geological Evolution of Antarctic*. Cambridge University Press, p.533-540.

Lawver L.A., Gahagan L.M. & Coffin F.M. 1992. The development of palaeoseaway around Antarctica. *In: Kennett, J.P., Warnke, D.A. (eds.), The Antarctic Paleoenvironment: A Perspective on Global Change. Antarctic Research*, **65**:7-30.

Kemp E.M. 1981. Pre-Quaternary fire in Australia. *In: Gill, A.M.; Groves R.A.; Noble, I.R (eds.), Fire and the Australian Biota*. Australian Academy of Science, Canberra p.03-21.

King J.C., Turner J. 1993 *Antarctic Meteorology and Climatology*. Cambridge University Press, p.409.

Kuhlbusch T.A.J., Crutzen, P.J. 1996. Black carbon, the global carbon cycle, and atmospheric carbon dioxide. *In: Levine, J.S. (ed.), Biomass burning and Global Change. Remote Sensing, Modelling and Inventory Development and Biomass Burning in Africa*, vol. 1. MIT Press, Cambridge Massachusetts, p.160-169.

MacDonald G.M., Larsen C.P.S., Szeics J.M., Moser K.A. 1991. The reconstruction of boreal forest fire history from lake sediments-a comparison of coal. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **291**:11-39.

Macellari C.E. 1988. Stratigraphy, sedimentology and paleoecology of Upper Cretaceous-Paleocene shelf-deltaic sediments of Seymour Island (Antarctic Peninsula). In: Feldmann, R.M., Woodburne, M.O. (Eds.), *Geology and Paleontology of Seymour Island, Antarctic Peninsula. Geological Society of America, Memoir* **169**:25-53.

Manfroi J., Jasper A., Secchi M, I., Uhl D., Hamad A.M.B. 2011. Registro de paleoincêndios vegetacionais no afloramento Morro do Papaléo, Rio Grande do Sul, Brasil. In: Atas do XXII Congresso Brasileiro de Paleontologia, Paleontologia: Caminhando pelo tempo, p.359-362.

Manfroi J., Jasper A., Guerra-Sommer M. & Uhl D. 2012. Subarborescent lycophytes in coal-bearing strata from the Artinskian (Early Permian/Cisuralian) of the Santa Catarina coalfield (Paraná Basin, SC,Brazil). *Revista Brasileira de Paleontologia*, **15**:135-140.

Marensi S.A., Reguero M.A., Santillana S.N. & Vizcaíno S.F. 1994. Eocene land mammals from Seymour Island, Antarctica: palaeobiogeographical implications. *Antarctic Science*, **6**:3–15

Marlon J.R., Bartlein P.J., Carcaillet C., Gavin D.G., Harrison S.P., Higuera P.E., Joos F., Power M.J. & Prentice I.C. 2008. Climate and human influences on global biomass burning over the past two millennia. *Nature Geoscience*, **1**:607-702.

McInherney F.A., Wing S. 2011. A perturbation of carbon cycle, climate, and biosphere with implications for the future. *Annual Reviews of Earth Science*, **39**:489–516.

McLoughlin S., Lindström S., Drinnan A.M. 1997. Gondwana floristic and sedimentological trends during the Permian-Triassic transition: new evidence from the Amery Group, northern Prince Charles Mountains, East Antarctica. *Antarctic Science*, **9**:281-298.

Moore E., Kurtz A. C. 2008. Black carbon in Paleocene-Eocene boundary sediments: A test of biomass combustion as the PETM trigger. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **267(1-2)**:147.

Nichols G.J., Cripps J., Collinson M.E., Scott A.C. 2000. Experiments in waterlogging and sedimentology of charcoal: results and implications. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **164**:43-56.

Ohlson, M., Dahlberg B.2009. The charcoal carbon pool in boreal forest soils. *Nature Geoscience*, **2**:692–695.

O'Keefe J.M.K., Bechtel A., Christanis K., Dai S., DiMichele W.A., Eble C.F., Esterle J.S., Mastalerz M., Raymond A.L., Valentim B.V., Wagner N.J., Ward C.R., Hower

J.C. 2013. On the fundamental difference between coal rank and coal type. *International Journal of Coal Geology*, **118**:5-188.

Olivero E., Gasparini Z., Rinaldi C. & Scasso, R. 1991. First record of dinosaurs in Antarctica (Upper Cretaceous, James Ross Island): paleogeographical implications. In: Thomson MRA, Crame JA, Thomson JW (eds), *Geological Evolution of Antarctica*. Cambridge University Press, Cambridge, p. 617–622

Patterson III W.A., Edwards K.J, Maguire D.J. 1987. Microscopic charcoal as an indicator of fire. *Quaternary Science Reviews*, **6**:3-23.

Playford G. 1990. Proterozoic and Paleozoic palynology of Antarctica: a review. In: Taylor T.N & Taylor E.L. (eds.) *Antarctic paleobiology, its role in the reconstruction of Gondwana*. Springer-Varlag, p.51-70.

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

Pyne S.J. 1982. *Fire in America: a cultural history of wildland and rural fire*. Princeton University Press, p.257

Reguero M.A. & Marensi S.A. 2010. Paleogene climatic and biotic events in the terrestrial record of the Antarctic Peninsula: an overview. In: Madden, R., Carlini, A.A., Vucetich, M.G. & Kay, R. (eds.) *The paleontology of Gran Barranca: evolution and environmental change through the middle Cenozoic of Patagonia*, Cambridge University Press, p. 383–397

Reguero M.A., Goin, F., Hospitaleche C.A., Dutra T.L., Marensi S. 2013. Late Cretaceous/Paleogene West Antarctica Terrestrial Biota and its Intercontinental Affinities. *Springer Briefs in Earth System Sciences South America and the Southern Hemisphere*, p. 120.

Riley T.R. & Leat P.T. 1999. Large volume silicic volcanism along the proto-Pacific margin of Gondwana: Lithological and stratigraphical investigations from the Antarctic Peninsula. *Geological Magazine*, **36**:1-16.

Rössler R. & Barthel M. 1998. Rotliegend taphocoenoses preservation favoured by rhyolitic explosive volcanism. *Freiberg Forschung Hefte*, **474**:59-101.

Royer D.L., Berner R.A. & Beerling D.J. 2001. Phanerozoic atmospheric CO<sub>2</sub> change: evaluating geochemical and paleobiological approaches. *Earth Science Review*, **54**:349-392.

- Rowe N.P. & Jones T.P. 2000. Devonian charcoal. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **164**: 347-354.
- Saito T., Yamanoi T., Kaihom K. 1986. End-Cretaceous devastation of terrestrial flora in the boreal Far East. *Nature*, **323**:253-255.
- Schmidt M.W.I., Noack, A.G. 2000. Black carbon in soils and sediments: analysis, distribution, implications, and current challenges. *Global Biogeochemical Cycles*, **14**:777-793.
- Schopf J.M. 1956, A definition of coal. *Economic Geology*, 51(6):521-527
- Schopf J. M. 1974. Coal, climate and global tectonics. In: D. H. Tarling and S. K. Runcorn (eds.), *Implications of Continental Drift to the Earth Sciences*, 1, Academic Press, London, p.609-22.
- Scott A.C. 1989. Observations on the nature and origin of fusain. *International Journal of Coal Geology*, **12**:443-475.
- Scott A.C. 2000. The pre-Quaternary history of fire. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **164**:281-329.
- Scott A.C. 2003. Charcoal in sediments. In: Middleton, G.V. (ed.), *Encyclopaedia of Sediments and Sedimentary Rocks*. Kluwer Academic Publishers, p.121-123.
- Scott A.C. 2009. Forest fire in the fossil record. In: Cerdà, A.; Robichaud, P.(eds.), *Fire Effects on Soils and Restoration Strategies*. Science Publishers Inc., New Hampshire, p.1-37.
- Scott A.C. 2010. Charcoal recognition, taphonomy and uses in palaeoenvironmental analysis. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **291**:11-39.
- Scott A.C. & Damblon F. 2010. Charcoal: Taphonomy and significance in geology, botany and archaeology. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **291**:1-10.
- Scott A.C. & Glasspool, I. 2006. The Diversification of Paleozoic fire systems and fluctuation in atmospheric oxygen concentration. *International Journal of Coal Geology*, **70**:53-66.
- Scott A.C. & Glasspool I. 2007. Observations and experiments on the origin and formation of inertinite group macerals. *International Journal of Coal Geology*, **70**:53-66.

Scott A.C. & Stea R. 2002. Fire sweep across the Mid-Cretaceous landscape of Nova Scotia. *The Geoscientist*, **12**:3-6.

Shen Yanbin 1994. Subdivision and correlation of Cretaceous to Paleogene volcano sedimentary sequence from Fildes Peninsula, King George Island, Antarctic. Beijing, Monograph Science Press, **3**:1-36.

Smellie J.L., Pankhurst R.J., Thomson M.R.A., Davies R.E.S. 1984. The geology of the South Shetland Islands: VI. Stratigraphy, geochemistry and evolution. *British Antarctic Survey, Scientific Reports*, **87**:1-85.

Smith, G.A. 1991. Facies sequences and geometries in continental volcanoclastic sequences. In: R.V. Fisher & G.A. Smith (eds.), *Sedimentation in volcanic settings*. SEPM (Society for Sedimentary Geology) Special Publication **45**:109-122.

Smith, R.C. 1991. Landscape response to a major ignimbrite eruption, Taupo volcanic center, New Zealand. *Sedimentation in Volcanic Setting*, SEPM Special Publication, **45**: 123-137.

Smith W.H.F. & Sandwell D.T. 1997. Global seafloor topography from satellite altimetry and ship depth soundings. *Science*, **277**:1956-1962.

Soliani Jr. E., Kawashita K.H.C., Hansen M.A.F. & Troian F.L. 1988. K-Ar Ages of the Winkel Point Formation (Fildes Peninsula Group) and associated intrusions, King George Island, South Shetland Islands, Antarctica. *Serie Científica Instituto Antártico Chileno*, **38**:133-139.

Sorokhtin O.G., Chilingar G.V., Khilyur L.F. 2007. Global warming and global cooling: evolution of climate on Earth. In: *Developments in Earth & Environmental Sciences 5*. Elsevier. p.313.

Specht R.L., Dettmann, M.E. & Jarzen D.M. 1992. Community associations and structure in the Late Cretaceous vegetation of southeast Australasia and Antarctica. *Paleogeography, Palaeoclimatology, Paleoecology*, **94**:283-309.

Stach E.M.T., Mackowsky M., Teichmüller G. H., Taylor D., Teichmüller R. 1975. *Stach's Textbook of coal Petrology*. (2nd ed.). Gebrüder Borntraeger, Berlin, Stuttgart, pp. 1-28.

Storey B.C. 1995. Crustal growth of the Antarctic Peninsula by accretion, magmatism and extension. *Geological Magazine*, **122**:5-14

Storey M., Duncan, R.A.; Swisher III, C.C. 2007. Paleocene-Eocene Thermal Maximum and the Opening of the Northeast Atlantic. *Science*, **316(5824)**: 587–589.

Svensen H., Planke S., Malthes-Sørensen A., Jamtveit B., Myklebust R., Eidem T., Rey S. S. 2004. Release of methane from a volcanic basin as a mechanism for initial Eocene global warming. *Nature*, **429(6991)**: 542–545.

Tarling D.H. 1988. Gondwanaland and the evolution of the Indian Ocean. In: M.G. Audrey – Charles and A. Hallam (eds.), Gondwana and Tethys, *GSA Special Publication*, **37**:61-77.

Taylor E.L. & Taylor T.N. 1990. Structurally preserved Permian and Triassic floras from Antarctica. In: Taylor, T.N. & Taylor, E.L. (eds.), Antarctic paleobiology: Its role in the reconstruction of Gondwana, New York, *Springer-Verlag*, p.149-163.

Trabaud L. 1992. Influence du régime des feux sur les modifications a court terme et la stabilité a long terme de la flore d'une garrigue de *Quercus coccifera*. *Revue D' Ecologie-la Terre Et La Vie*, **47**:229-251.

Trevisan C. 2011. *Fósseis de pteridófitas das ilhas King George e Nelson: afinidade taxonômica e importância no contexto deposicional e do clima nas áreas setentrionais da Península Antártica*. Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade do Vale do Rio do Sinos, Dissertação de Mestrado, p.44.

Tschudy R.H & Tschudy B.D. 1986. Extinction and survival of plant life following the Cretaceous/Tertiary boundary event, Western Interior, North America. *Geology*, **14**:667-670.

Uhl D. & Kerp H. 2003. Wildfires in the Late Palaeozoic of Central Europe – The Zechstein (Upper Permian) of NW – Hesse (Germany). *Palaeo*, **199**: 1-15.

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

Wang Y. & Shen Y. 1994. Rb-Sr isotopic dating and trace element, REE geochemistry of Late Cretaceous volcanic rocks from King George Island, Antarctica. In: Shen Yanbin (ed.) *Stratigraphy and palaeontology of Fildes Peninsula, King George Island, Antarctica*. Monograph, Beijing Science Press, China, vol. 3:109-131.

Wardle D.A., Zackrisson O., Nilsson M.C. 1998. The charcoal effect in boreal forests: mechanisms and ecological consequences. *Oecologia*, **115**:419-426.

Wardle D.A., Nilsson M.C., Zackrisson, O. 2008. Fire-derived charcoal causes loss of forest humus. *Science*, **320**:629.



Weissel J.K., Hayes D.E & Herron E.M. 1977. Plate tectonics synthesis: The developments between Australia, New Zealand and Antarctica since the Late Cretaceous. *Marine Geology*, **25**:231-277

Wengel M., Kothe E. 2006. Degradation of organic matter from black shales and charcoal by the wood rotting fungus *Schizophyllum commune* and release of DOC and heavy metals in the aqueous phase. *Science of the Total Environment*, **367**:383-393.

Westerhold T., Röhl U., Raffi I., Fornaciari E., Monechi S., Reale V., Bowles J., Evans H. F. 2008. New chronology for the late Paleocene thermal maximum and its environmental implications. *Palaeogeography, Paleoclimatology, Palaeoecology*, **257**: 377-403.

Wildman R.A., Hickey L.J., Dickinson M.B., Berner R.A., Robinson J.M., Dietrich M., Essenhigh R.H., Wildman C.B. 2004. Burning of forest materials under late Paleozoic high atmospheric oxygen levels. *Geology*, **32**:457-460.

Willan R.C.R & Hunter M.A. 2005. Basin evolution during the transition from continental rifting to subduction: Evidence from the lithofacies and modal petrology of the Jurassic Latady Group, Antarctic Peninsula. Elsevier. *Journal of South American Earth Sciences*, **20**:171-191.

Yi, S., Batten, D.J. & Lee, S.J. 2005. Provenance of recycled palynomorph assemblages recovered from surficial glaciomarine sediments in Bransfield Strait, offshore Antarctic Peninsula. *Cretaceous Research*, **26**:906-919

Zachos J., Pagani M., Sloan L., Thomas E. & Billups K. 2001. Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to Present. *Science*, **292**:686-693.

Zachos J.C., Dickens G.R., Zeebe R.E. 2008. An early Cenozoic perspective on greenhouse warming and carbon-cycle dynamics. *Nature*, **451(7176)**: 279-83.

Zimmerman A.R. 2010. Abiotic and microbial oxidation of laboratory-produced black carbon (biochar). *Environmental Science and Technology*, **44**:1295-1301.

Zinsmeister W.J. 1979. Biogeographic significance of the Late Mesozoic and Early Tertiary molluscan faunas of Seymour Island (Antarctic Peninsula) to the final breakup of Gondwanaland. In: J. Gray & A.J. Boucot (eds.) *Historical Biogeography, Plate Tectonics, and the Changing Environment*. Oregon State University, p.349-355.

**ANEXO I**

**MACROSCOPIC CHARCOAL REMAINS FROM THE ANTARCTIC  
PENINSULA AT IN THE UPPER CRETACEOUS**

Joseline Manfroi

Tânia Lindner Dutra

Dieter Uhl

André Jasper

(Submetido à *GEAE – Journal of Geoscience*)

## MACROSCOPIC CHARCOAL REMAINS FROM THE ANTARCTIC PENINSULA UPPER CRETACEOUS

JOSELINE MANFROI<sup>1,3</sup>, TÂNIA LINDNER DUTRA<sup>1</sup>, DIETER UHL<sup>2</sup> &  
ANDRÉ JASPER<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Programa de Pós-Graduação em Geologia, PPGE. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Unisinos.  
Avenida Unisinos, 950, Bairro Cristo Rei, CEP 93022-000, São Leopoldo, RS, Brasil.*

<sup>2</sup>*Institut für Geowissenschaften, Universität Tübingen, Sigwartstraße 10, 72076 Tübingen, Germany.*

<sup>3</sup>*Programa de Pós-Graduação em Ambiente e Desenvolvimento, PPGAD. Centro Universitário Univates.  
Avenida Avelino Tallini, nº 171, Bairro Universitário. CEP 95900-000 Lajeado, Rio Grande do Sul,  
Brasil.*

*joselinemanfroi@universo.univates.br, tdutra@unisinos.br, ajasper@univates.br &  
dieter.uhl@senckenberg.de*

**ABSTRACT** - The analysis of past floristic data is of great importance for the understanding of environmental and geological events that occurred in Antarctica when more favorable climates allows the growing of vegetation and consequently the occurrence of natural events such as wildfires. In the present study, we evaluated the presence of wildfire in two Upper Cretaceous expositions of the King George and Nelson islands, South Shetland Islands, Antarctic Peninsula. The analysis of samples, collected during the Brazilian expeditions under Scanning Electron Microscope (SEM), confirmed the presence of macroscopic charcoal in those areas and mainly to this time interval. The charcoal materials showed preserved and simple transverse ray, with uniseriate piths, which allow relating the material forms to the gymnosperms cellular structures. The fusion of the cell walls of tracheids, with clear marks of subsequent rupture, allows to infer paleotemperatures between 340°C to 600°C. The temperature of burning, expected when take in account the proximal volcanic activity informed by the associated lithologies, and prevents in these case the analysis about other causes to wildfire events. There are no signals yet to the end of Cretaceous in the northern areas of Antarctic Peninsula of a greenhouse interval or dry climates that could explain those natural fires.

**Keywords:** macroscopic charcoal, Antarctic Peninsula, Late Cretaceous, volcanism.

**RESUMO** - A análise dos dados florísticos pretéritos é de grande importância para a compreensão de eventos ambientais que ocorreram no Continente Antártico enquanto ele estava ocupado por florestas que foram associadas a climas mais agradáveis e submetido a eventos naturais, como incêndios vegetacionais. No presente estudo, foi avaliada a ocorrência de paleoincêndios vegetacionais em duas localidades nas ilhas King George e Nelson, Shetland do Sul, Península Antártica. Assim, as amostras contendo carvão vegetal macroscópico coletados durante as expedições brasileiras à Antártica foram analisados sob Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) confirmando a presença de carvão vegetal macroscópico nas áreas de estudo. A análise demonstrou que os fragmentos vegetais carbonizados apresentam estruturas celulares preservadas, a presença de raios transversais simples e pontuações uniseriadas permitem relacionar o material à Gimnospermas. A fusão das paredes celulares dos traqueídeos, com claras marcas de ruptura das estruturas permitem inferir temperaturas entre 340°C e 600 °C. A temperatura de queima e as litologias associadas remetem como fonte de ignição para estes incêndios a atividade vulcânica próxima, e inibe neste caso, a análise de outros fatores que possam ter provocado a queima. Não há sinais para o final do Cretáceo nas áreas do norte da Península Antártica que houve um intervalo de climas secos que poderiam colaborar com a cocorrência de incêndios na vegetação.

**Palavras-chave:** carvão vegetal macroscópico, Península Antártica, Cretáceo Superior, vulcanismo.

## INTRODUCTION

The continental portion of Antarctica, today covered by ice, corresponds to above 10% of the total area of the Earth, being the fifth largest continent in World. Its major part is located under the 60° S latitude, and is surround by 17 000 km of coastal areas. The modern geography of Antarctica is mainly a consequence of the Gondwana fragmentation and to the fact that since the Cretaceous, while had maintained a almost stationary and near pole position, the other austral land masses gradatively pull apart and forms the modern Southern Hemisphere continents (Tarling, 1988; Lawver *et al.*, 1991; 2004; Dalziel, 2013).

The geological record from the East Antarctica (EANT), or Antarctic Continent,

reflects those primitive connections, with deposits from the Devonian until Jurassic that are common with other parts of Gondwanaland (Bose *et al.*, 1990; Taylor and Taylor, 1990a; McLoughlin *et al.*, 1997; Dutra, 2004; Dutra and Jasper 2010). For otherwise, West Antarctic (WANT) or Antarctic Peninsula, have a distinct and more complex geological history that results mainly from tectonic plates interactions and post-Paleozoic subduction and rifting processes. Its Pacific margin first has undergone convergence and divergence and after their microcontinental blocks moved independently of each other and in relation to the cratonic East Antarctica, by the West Antarctic Rift System (Elliot, 1988; Del Valle and Rinaldi, 1993; Dalziel and Lawver, 2001; Hervé *et al.*, 2006; Smellie *et al.*, 2006; Reguero *et al.*, 2013). However, the ice cover today disguises the distinct genesis and geographies of both sectors.

The Antarctic Peninsula paleobotanical record shows that during near all the Mesozoic (Triassic fossils are still dubious), warmer and relatively wet climates dominated the Pacific coast and induced the growing of a diversified and abundant flora, composed mainly by ferns and distinct groups of gymnosperms (Bennettitales, conifers and Cycadales). And, since the end of Albian testimony the arriving of the first angiosperms (Taylor and Taylor, 1990b; Cantrill and Nichols, 1996; Cantrill and Poole, 2013; Reguero *et al.*, 2013).

With the reactivation of subduction efforts in the end of Cretaceous, and the consequent volcanism produced in the tectonic arc, the two conditions (fuel and source of fire) to wildfires and charcoal deposits were established (Jones and Chaloner, 1991; Scott, 2000; Gavin *et al.*, 2007; Scott and Damblon, 2010).

The present study aimed to evaluate the charcoal record (fossil charcoal, *sensu* Scott, 2000, 2010) identified in two localities of the South Shetland Islands archipelago (Rip Point, at Nelson Island, and Price Point, in King George Island). The near volcano-generated deposits at this expositions is attested by the presence of dominant pyroclastic rocks and a Late Cretaceous age was inferred to those localities by its micro and macroflora (Dutra *et al.*, 1996; Dutra, 2004; Trevisan, 2011; Bastos *et al.*, *in press*).

Charcoalified plant fossils often shows excellent preservation of its anatomical and morphological details. Charcoal is almost pure carbon, chemically inactive and so, preserves the three-dimensional character of the anatomical structures, unless subjected to physical compression (Scott and Jones, 1991). To Eklund *et al.* (2004) at least great part of charred plants refers to secondary wood materials, a variety of other organs and types of plants was preserved at this manner, since mosses to angiosperms.

To date, some and important charcoal occurrences is informed to Antarctic areas, mainly to Antarctic Peninsula region. Two of them referring to Early Cretaceous levels and to places linked with volcanic settings (Brown *et al.*, 2012). The first refers to findings made in Lower Cretaceous tuffs of Alexander Island (Triton Point Formation), Antarctic Peninsula that shows charred woods of distinct groups of austral conifers and seed coats (Falcon Lang and Cantrill, 2000). The other, at Kerguelen Plateau, Ragat Basin, allows identified Podocarpaceae woods (Francis and Coffins, 1992).

Other evidences of past fire-prone ecosystems comes from charcoalfied mesofossils linked to sedimentary facies and coal, in the Eastern flank of the Antarctic Peninsula (James Ross Basin). The first (Table Nunatak Formation) is noteworthy by the diversity of plants represented, including angiosperm flowers, fruits, seeds and leaves, that supports an Upper Cretaceous age (Santonian). They are associated to ferns and conifer shoots, leaves, cones and seeds (Eklund *et al.*, 2004). To the same basin, Kvaček and Sakala (2011) also notice the presence of rich charcoal beds with mesofossils in levels of Coniacian-Campanian age from the Hidden Lake Formation and Santa Marta Formation.

To Bond and Scott (2010), the presence of fire was one of the reasons to the spread of angiosperms in the Late Cretaceous. At the same time, the great capacity of this group of plants to produces great amounts of biomass, supports since then, fire events in Earth landscapes.

### **Geological and paleontological context**

Since at least the Upper Cretaceous, the Antarctic Peninsula has been in its present position relative to South America, and at almost the same paleolatitude (Lawver *et al.*, 1992). During the complex tectonism that affect the WANT areas between the Jurassic and Cretaceous, and originated five distinct blocks, the Antarctic Peninsula block distinguishes also by the maintaining of its integrity, paleogeographic location and the intimate link with EANT (Cantrill and Poole, 2013), a relation only broken in the middle of Paleogene.

The today South Shetland Islands terrains (approximately 500 km in length and 3,687 km<sup>2</sup>), at this time was also part of this block and due to its position at Pacific margin represents a outer-arc (Birkenmajer, 1995) or fore-arc (Elliot, 1988) context which produces its mainly terrestrial and volcanic (99%) deposits (Reguero *et al.*,

2013). The relations with the Graham Land (the arc environment) was only interrupted at 4 Ma ago, with the overture of the Bransfield Strait (Tokarski, 1991).

The King George (KGI) and Nelson (NI) islands (Figure 1) were part of the South Shetland archipelago where occupies an intermediary position, been KGI the great one (80 km of length, 20 km wide) and, together with Livingston Island, the well-studied in its stratigraphic, paleobotanical and geological aspects (Adie, 1964; Barton, 1965; Birkenmajer, 1981; 1982; Shen, 1994; Birkenmajer, 2001). The studied material comes from the Rip Point, at northern part of NI, and from the Price Point, located at the Drake margin of Fildes Peninsula, KGI (Figure 2).

In the Rip Point exposition (62°24'73"S – 59°61'35"W) the charcoal material comes from dispersed shoots in a fine tuff layers (ash and lapilli) recovering basal breccias and exposed at sea level (Figure 3). Andesitic lavas occurs intercalated and covering the 10 m section of the Rip Point (Fontoura *et al.*, 1988; Dutra *et al.*, 1998).

At Price four levels of tuff, lapilli and tuffites contains plant fossils (mainly microflora and rare leaf remains), the basal ones with coal and charcoal lenses or thin beds. To both localities was suggested a Campanian age (Dutra *et al.*, 1998; Trevisan, 2011; Bastos *et al.*, *in press*), by the correlation between its floral content, presence of coal levels, and depositional features, with the succession exposed at the Half Three Point [Half Three Point Formation, Fildes Peninsula Group of Shen (1994)], in the same Fildes Peninsula. At Half Three Point, an absolute age of 71 Ma Rb-Sr was obtained in the calcic-alkaline basalts that overlies the fossiliferous tuff levels (Wang and Shen, 1994; Cao, 1994).

Both Rip and Price Point presents a scarce flora, instead represented by macro and microassemblages. *Nothofagus* is dominant in the leaf remains but represented by fragmentary materials that difficult a more precise affinity. In the pollen assemblages are represented by primitive types of pollen grains (the “ancestral” types *N. asperus* Romero, *N. senectus* Dettmann & Playford, and *N. kaitangataensis* Romero), that supports the Late Cretaceous age. Ferns dominate the microflora, represented by spores of Dicksoniaceae, *Rugulatisporites mallatus* Stover (Thyrsopteridaceae or Osmundaceae) and *Cyathidites minor* Couper, and occurs also by fronds of *Coniopteris* (Trevisan, 2011; Bastos *et al.*, *in press*).

The gymnosperms, only registered by fragments of shoots and wood logs in the

macroflora, are represented in the palinological assemblage by pollen grains of Araucariaceae, that compound 50% of the assemblage and are dominated by *Araucariacites australis* Cookson (Dutra and Batten 2000; Bastos *et al.*, *in press*). The occurrence of *Classopollis simplex* (Danze-Corsin & Laveine) Reiser & Williams and *Cycadopites* sp., also support the Cretaceous age (Raine *et al.*, 2011).

## MATERIAL AND METHODS

This study is carried out with samples collected during the Brazilian Expeditions to the Antarctic Peninsula, supported by the Brazilian Antarctic Program (PROANTAR). The detached charcoal fragments are stored at the Antarctic collection of the Laboratório de História da Vida e da Terra (LaViGea), at Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), São Leopoldo, Rio Grande do Sul, Brazil, and under the acronym **Pbac**.

Fragments that presents potential characteristics to represents charcoal remains (*sensu* Scott, 2000; 2010), were mechanically extracted from the sediment and analyzed under stereo microscope (Zeiss Stemi 2000-C) with 10X and 40X magnification. From the 56 samples analyzed, 15 were positive in presents charcoal features (*sensu* Jones and Chaloner, 1991; Scott, 2000; 2010), containing fragments between 1-3 mm in width, and 1-5 mm in length (macroscopic charcoal). After first evaluation, the of charcoal pieces were mounted on standard stubs with LeitC (Plano GmbH, [www.plano-em.de](http://www.plano-em.de)) to the analysis of its morpho-anatomical details under Scan Electronic Microscope (SEM – Zeiss EVO LS15) from the Instituto Tecnológico de Ensaios de Segurança (ITTFuse) at UNISINOS.

Based on the anatomical structures, general taxonomic affiliations were established. Some proposals about the taphonomic and paleoenvironmental constrains are presented and modeled, using the obtained data and those published so far about the area.

## RESULTS

In the 15 samples characterized as presenting macroscopic charcoal, three fragments came from the Price Point succession, where occurs in lenses or in more continuous and thin beds that marks the top of the two basal tuffaceous (reworked



volcanic grains) intervals (Figure 2). On the otherwise, more abundant and well preserved samples (12 fragments), was detected at Rip Point in the surface of a fine tuff layer over breccias at the lower part of the outcrop (Figure 3).

In the analyzed material was possible to observe tracheid's with 10-26  $\mu\text{m}$  in width and 50-250  $\mu\text{m}$  in length, whose cell walls are highly shattered (Figure 4A-B). Uniseriate and aligned pitting are distributed along the tracheids and view showing preserved crossing fields (Figure 4C). Although the high tracheid degradation, some parts suggest an abietoid pattern (Figure 4D). The parenchymatous rays are uniseriate, composed by seven to nine cells, with 8-10  $\mu\text{m}$  in width, and 8-16  $\mu\text{m}$  in length (Figure 5A-B). The cell walls are homogenized (Figure 5C) and presents thermal cracking (Figure 5D). Cross-field pits, leaf traces or growth rings are not visible.

## DISCUSSION

The scarcity of macro-charcoal in the studied samples could be the result of the high temperatures inferred by the preserved structures in charcoal samples and normally reflects the action of crown fires (Scott, 2000; Brown *et al.*, 2012), expected in volcanic regimes. But, at least rare, the here preserved material maintains the good tridimensional preservation expected in charcoaled remains (Scott and Jones, 1991).

When we compared the anatomical features of the charcoal material from Rip and Price points many similar anatomical features could be observed, and together with the other paleofloristic data, allows proposed common taphonomic and of vegetational answers to both areas. The rarer occurrence of charcoal remains at Price could be due to the post-depositional reworking of the charcoaled fragments informed by the tuffaceous nature of the lithologies at this area. Based on the Lüttge *et al.* (2005) wood scheme, the uniseriate rays, associated to the abietoid pitting, support a Podocarpaceae affinity. Those data match with the mega and microfloristic composition described for the area, in which, besides *Nothofagus*, pteridophytes and gymnosperms (conifers – Araucariaceae and Podocarpaceae) were the predominant woody components (Dutra *et al.*, 1996; Dutra and Batten, 2000).

The charcoal macroscopic remains here studied, associated to the megafloristic and microfloristic record made by Dutra (2001), Cantrill (1996), Dutra and Batten (2000), Trevisan (2011) and Bastos *et al.* (*in press*), confirm the presence of woody gymnosperms and other groups of gymnosperms in the association. Although, if

compared with the Early Cretaceous, the Late Cretaceous had colder temperatures at the high southern latitudes (Barrera *et al.*, 1987), the climate at the deposition area was mild enough to support forests and its burning time by time. That reinforces previous studies (Dutra *et al.*, 1996; Dutra and Batten, 2000) which defined that, at least, a cold-humid climate, similar to those nowadays observed at temperate zones from South America and New Zealand, was dominating the area during the Campanian.

The presence of tracheids with homogenized cell walls and presenting thermal cracking support a relatively high (340°C – 600°C) burning temperature (Jones and Chaloner, 1991). That could indicate that the contemporaneous volcanic activities, confirmed for the same levels by lithological studies (Birkenmajer, 1981; Smellie *et al.*, 1984; Dutra and Batten, 2000), constitute a potential ignition source for the palaeo-wildfires. However, just the material providing from the Rip Point was effectively found in volcanic sediments, while the Price Point material was preserved in coal lenses, suggesting a swampy deposition.

Considering those elements, it can be inferred that exists a relation between the volcanic activity and the palaeo-wildfires, which are registered by the macroscopic charcoal. Is important to consider that mega and microfloral remains are preserved in the under and overlying levels (Dutra and Batten, 2000; Trevisan, 2011; Bastos *et al.*, *in press*), which confirms that adequate conditions to the vegetation recovery were present between the eruption events. In that scenario, a tafonomic linking with the incandescent ash fall, produced by the nearby volcanic activity, can be accepted for the macroscopic charcoal here studied (Figure 6).

In the Price Point, the exclusive presence of macroscopic charcoal in coal lenses and beds is probably associated to a “non-fire interval” in which the vegetation, including the charcoal, was reworked and accumulated in little swampy areas. That process are commonly observed in Permian coals around the world (Scott, 2010; Jasper *et al.*, 2011; 2013; Manfroi *et al.*, 2012) and occurs due macroscopic charcoal bioclastic nature, which allows reworking and inclusion in different sediments.

## CONCLUSIONS

Based on the data here presented and on the discussed points, the following aspects is proposed to the charcoal occurrence in the two studied areas from South Shetland Islands levels:

- 1) Both localities (Rip Point and Price Point) had their vegetation subjected to palaeo-wildfire events during the Upper Cretaceous (Campanian).
- 2) The anatomical characteristics preserved in the macroscopic charcoal produced by the fire events suggests a Podocarpaceae taxonomic affinity.
- 3) The palaeo-wildfires temperatures reached temperatures between 340°C and 600°C.
- 4) The volcanic activities occurred at the surrounding areas can be considered an ignition source for the paleowildfires;

## ACKNOWLEDGMENTS

The authors acknowledge the financial support of CNPq for collecting the samples and also scholarship master for Manfroi, J.

## REFERENCES

- ADIE R.J. 1964. Stratigraphic correlation in West Antarctica. *In: Adie R.J. (ed.) Antarctic Geology, Symposium on Antarctic Geology*, 307-313.
- BARRERA E., Huber B. T., Savin S. M. & Webb P. N. 1987. Antarctic marine temperatures: late Campanian through early Palaeocene. *Paleoceanography*, **2**:21-47.
- BARTON C.M. 1965. The Geology of South Shetland Islands. III. The stratigraphy of King George Island. *Scientific Reports of the British Antarctic Survey*, **44**: 1-33.
- BROWN S.A.E., SCOTT A.C., Glasspool, I.J. & Collinson, M.E. 2012. Cretaceous wildfires and their impact on the Earth system. *Cretaceous Research*, **36**:162-190.
- CANTRILL D.J. & NICHOLS G.J. 1996. Taxonomy and paleoecology of Early Cretaceous (late Albian) angiosperm leaves from Alexander Island, Antarctica. *Review Palaeobotany and Palynology*, **92**:1-28.
- CANTRILL, D.J & POOLE, I. 2012. *The vegetation of Antarctica through Geological Time*. Cambridge University Press, Cambridge, 490 p.
- CAO LIU. 1994. Late Cretaceous palynoflora in King George Island of Antarctica, with references to its paleoclimatic significance. *In: Shen Yanbin (ed.) Stratigraphy and Palaeontology of Fildes Peninsula, King George Island, Antarctica*. Beijing, Monograph Science Press, p.51-83.
- DALE, V.H., SWANSON F.J. & CROSAFULLI C.M. 2005. *Ecological Responses to 1980 Eruption Mount St. Helens*. Springer-Verlag New York Inc. 364 pp.

DALZIEL I.W.D. 2013. Antarctica and supercontinental evolution: Clues and puzzles. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, pp. 3-16.

DALZIEL I.W.D. & LAWVER L.A. 2001. The lithospheric setting of the West Antarctic ice sheet. *American Geophysical Union, Antarctic Research Series*, **77**:29-44.

DEL VALLE R.A & RINALDI C.A. 1993. Structural features of the northeastern sector of the Antarctic Peninsula. *In: Jornadas de Comunicaciones sobre Investigaciones Antárticas*, Instituto Antártico Argentino, *Anais*, pp. 261-267.

DUTRA T.L. 2001. Paleoflora da ilha 25 de Mayo, Península Antártica: contribuição à paleogeografia, paleoclima e para a evolução de Nothofagus. *Asociación Paleontology Argentina, Publicación Especial*, **8**:29-37.

DUTRA T.L. 2004. Paleofloras da Antártica e sua Relação com os Eventos Tectônicos e Paleoclimáticos nas Altas Latitudes do Sul. *Revista Brasileira de Geociências*, **34 (3)**: 401-410.

DUTRAT.L. & BATTEN D.J. 2000. Upper Cretaceous floras of King George Island, West Antarctica, and their palaeoenvironmental and phytogeographic implications. *Cretaceous Research*, **21**:181-209.

DUTRA T.L. & JASPER A. 2010. Paleontologia da Antártica. *In: Carvalho, I. (org.). Paleontologia*. 3ed. Interciência, Rio de Janeiro, **1**:537-572.

DUTRA T.L., LEIPNITZ, B., FACCINI U.F. & LINDENMAYER, Z. 1996. A non marine Upper Cretaceous interval in West Antarctica (King George Island, Northern Antarctic Peninsula). *SAMC (South Atlantic Mesozoic Correlations) News, IGCP Project 381*, **5**: 21-22.

DUTRA T.L.; HANSEN M.A.F. & FLECK A. 1998. New evidences of wet and mild climates in Northern Antarctic Peninsula at the end of Cretaceous. *In: 3rd Annual Conference of IGCP Project*, **381**:10-13.

EKLUND H., CANTRILL D.J. & FRANCIS, J.E. 2004. Late Cretaceous plant mesofossils from Table Nunatak, Antarctica. *Cretaceous Research*, **25**:211-228.

ELLIOT D. 1988. The James Ross Basin, northern Antarctic Peninsula. *In: Anais V Congresso Geológico Chileno*, **39**:226.

FALCON-LANG H.J. & CANTRILL D.J. 2000. Cretaceous (late Albian) Coniferales of Alexander Island, Antarctica. 1: Wood taxonomy, a quantitative approach. *Review of Palaeobotany and Palynology*, **111**:1-17.

FONTOURA M.A.; FENSTENSEIFER H.C. & TROIAN, F.L. 1988. Geology and Petrology of intrusive bodies of Stansbury Peninsula, Nelson Island, South Shetland Islands, Antarctica. *Serie Científica INACH*, **38**:45-58.

FRANCIS J.E. & COFFIN M.F. 1992. Cretaceous fossil wood from the Raggan Basin,

southern Kerguelen Plateau (site 750). *Proceedings of the ODP Scientific Results*, **120**:273-280.

GAVIN D.G.; HALLETT D.; HU F.S., LERTZMAN K.P.; PRICHARD S.J.; BROWN K.J.; LYCH, J.A. BARTLEIN P.; PETERSON D.J. 2007. Forest fire an climate change in western North America: insights from sediment charcoal records. *Front Ecological Environmental* **5(9)**:499-506.

HERVÉ F.; FAÚNDEZ, V.; BRIX M.; FANNING M. 2006. Jurassic sedimentation of the Miers Bluff Formation, Livingston Island, Antarctica: evidence from SHRIMP U-Pb ages of detrital and plutonic zircons. *Antarctic Science*, **18(2)**: 229-238.

JASPER A.; UHL D.; GUERRA-SOMMER,M.; BERNARDES-DE-OLIVEIR ,M.E.C. & MACHADO N.T.G. 2011. Upper Paleozoic charcoal remains from South America: multiple evidences off ire eventes in the coal bearing strata of the Paraná Basin, Brazil. *Palaeo*, **306**:205-218.

JASPER A.; GUERRA-SOMMER M.; THAMAD A.; ABDALLA M.B.; BAMFORD M; BERNARDES-DE-OLIVEIR ,M.E.C.; TEWARI R.; UHL. D. 2013. The burning of Gondwana: Permian fires on the southern continent-A palaeobotanical approach. *Gondwana Research*, **24**:148-160.

JONES T.P & Chaloner W.G. 1991. Fossil charcoal, its recognition and palaeoatmospheric significance. *Paleogeography. Paleoclimatology. Paleoecology*, **97**: 39-50.

KVACEK J. & SAKALA J. 2011. Late Cretaceous flora of James Ross Island (Antarctica) –preliminary report. *Czech Polar Reports*, **1(2)**:96-103.

LAWVER L.A.; ROYER J.Y.; SANDWELL D.T.; SCOTESE C.R. 1991. Evolution of the Antarctic continental margins. *In*: Thomson, M.R.A.; Crame, J.A.; Thomson, J.W.(eds.) *Geological Evolution of Antarctic*. Cambridge University Press, pp. 533-540.

LAWVER L.A., GAHAGAN L.M., Coffin F.M. 1992. The development of palaeoseaway around Antarctica. *In*: J.P. Kennett & D.A. Warnke (eds). *The Antarctic paleoenvironment: a perspective on global change*, vol 65. *Antarctic Research Series, Antarctic Sea Ice*, pp. 7–30.

LAWVER L.A., DALZIEL I.W.D., GAHAGAN L.M., KYGA, R.M. & HERBER B.D. 2004. *PLATES 2004. Atlas of Plate Reconstructions (750 Ma to Present Day)*. University of Texas, Institute for Geophysics.

LÜTTGE, U.; KLUGE, M.; BAUER, G.; 2012. **Botanik**. Ed. WILEY – VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 651 p.

MANFROI J.; JASPER A.; GUERRA-SOMMER M. & UHL D. 2012. Subarborescent lycophytes in coal-bearings strata from the Artinskian (Early Permian/Cisuralian) of the Santa Catarina coalfield (Paraná Basin, SC,Brazil). *Revista Brasileira de Paleontologia*. **15**:135-140.

MCLOUGHLIN S.; LINDSTRÖM S.; DRINNAN A.M. 1997. Gondwana floristic and sedimentological trends during the Permian-Triassic transition: new evidence from the Amery Group, northern Prince Charles Mountains, East Antarctica. *Antarctic Science*, **9**:281-298.

RAINE, J.I., MILDENHALL, D.C. & KENNEDY, E.M. 2011. *New Zealand fossil spores and pollen: an illustrated catalogue*. 4th edition, GNS Science miscellaneous series, 4. [on line edition <http://data.gns.cri.nz/sporepollen/index.htm>"], accessed in 10/01/2014.

REGUERRO M.A., GOIN F., HOSPITALECHE C.A., DUTRA T.L. MARENSSI S. 2013. Late Cretaceous/Paleogene West Antarctica Terrestrial Biota and its Intercontinental Affinities. Springer Briefs in Earth System Sciences South America and the Southern Hemisphere, p.120.

SCOTT A.C. 2000. The pre-Quaternary history of fire. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **164**:281-329.

SCOTT A.C. 2010. Charcoal recognition, taphonomy and uses in palaeoenvironmental analysis. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **291**:11-39.

SCOTT A.C.; DAMBLON F. 2010. Charcoal: Taphonomy and significance in geology, botany and archaeology. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. **291**:1-10.

SCOTT A.C. & GLASSPOOL I.J. 2007. Observations and experiments on the origin and formation of inertinite group macerals. *International Journal of Coal Geology*, **70**:53-66.

SCOTT A.C. & JONES T.P. 1991. Microscopical observations of Recent and fossil charcoal. *Microscopy and Analysis*, **24**:13-15.

SCOTT, A.C.; MOORE, J.; BRAYSHAY, B. 2000. Fire and the palaeoenvironment. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **164**:1-412.

SHEN YANBIN 1994. Subdivision and correlation of Cretaceous to Paleogene volcano sedimentary sequence from Fildes Peninsula, King George Island, Antarctic. Beijing, Monograph Science Press, **3**:1-36.

SMELLIE J.L.; PANKHURST R.J.; THOMSON M.R.A., DAVIES R.E.S. 1984. The geology of the South Shetland Islands: VI. Stratigraphy, geochemistry and evolution. *British Antarctic Survey, Scientific Reports*, **87**:1-85.

SMELLIE J.L.; MCINTOSH W.C.; ESSER R.; FRETWELL P. 2006. The Cape Purvis volcano, Dundee Island (northern Antarctic Peninsula): Late Pleistocene age, eruptive processes and implications for a glacial paleoenvironment. *Antarctic Science* **18**(3): 399-408.

SMITH R.C. 1991. Landscape response to a major ignimbrite eruption, Taupo volcanic center, New Zealand. *Sedimentation in Volcanic Setting, SEPM Special Publication*, **45**:

123-137.

TARLING D.H. 1988. Gondwanaland and the evolution of the Indian Ocean. *In*: M.G. Audrey – Charles and A. Hallam (eds.), *Gondwana and Tethys, GSA Special Publication*, **37**:61-77.

TAYLOR E.L. & TAYLOR T.N. 1990a. Structurally preserved Permian and Triassic floras from Antarctica. *In*: Taylor T.N. & Taylor E.L. (eds.), *Antarctic paleobiology: Its role in the reconstruction of Gondwana*, New York, *Springer-Verlag*, p.149-163.

TAYLOR, T.N & TAYLOR E.L. (eds.) 1990b. *Antarctic paleobiology, its role in the reconstruction of Gondwana*. Springer-Verlag, New York, 350p.

TREVISAN C. 2011. *Fósseis de pteridófitas das ilhas King George e Nelson: afinidade taxonômica e importância no contexto deposicional e do clima nas áreas setentrionais da Península Antártica*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade do Vale do Rio do Sinos, São Leopoldo, Brasil, 44p.

TOKARKI A .K. 1991. The Late Cretaceous-Cenozoic structural history of King George Island, South Shetland Islands, and its plate-tectonic setting. — *In*: Thomson M.R.A., Crame J.A. and Thomson J.W. (eds), *Geological Evolution of Antarctica*. Fifth International Symposium on Antarctic Earth Sciences, Cambridge, 1987, Cambridge University Press: 493-497.

WANG Y. & SHEN Y. 1994. Rb-Sr isotopic dating and trace element, REE geochemistry of Late Cretaceous volcanic rocks from King George Island, Antarctica. *In*: Shen Yanbin (ed.) *Stratigraphy and palaeontology of Fildes Peninsula, King George Island, Antarctica*. Monograph, Beijing Science Press, China, vol. 3:109-131.

## FIGURE CAPTIONS

**Figure 1.** King George and Nelson Islands location in relation to the Antarctic Peninsula.

**Figure 2. A.** Graphic log from the Rip Point outcrop (Nelson Island), showing the two tuffitic levels with plant fossils. Charred shoots and pieces of wood are exclusive from the lower level and occurs dispersed over a tuff bed (modified from Bastos *et al.*, *in press*); **B.** geological section at Price Point (King George Island) with the four volcanoclastic intervals with plant remains, covered by a conglomerate (a debris flow or lahar deposit). The thin beds or lenses of coal and charcoal are restricted to the more basal levels (modified from Dutra, 1997).

**Figure 3.** Charred wood fragments and shoots in a very thin layer of tuff over breccias that represents the basal portion of Rip Point outcrop (Nelson Island).

**Figure 4.** Price Point (Nelson Island) macroscopic charcoal SEM images: A) tracheids general view showing preserved crossing fields affinity Podocarpaceae; B) wood detail showing the tracheids shattering; C) wood detail with tracheids uniseriate pitting with Abietoid pattern ; D) wood detail with tracheids uniseriate pitting.

**Figure 5.** Rip Point (King George Island) macroscopic charcoal SEM images: A) wood detail showing the presence of uniseriate rays in tangential view ; B) wood detail showing the presence of uniseriate rays in radial view; C) tracheids detail showing the cell wall homogenization; D) tracheids detail showing uniseriate pitting.

**Figure 6.** Proposed environmental conditions and reconstruction of the events involved in the genesis of the charred woods in studied areas during the Late Cretaceous (Campanian): **A.** pre-eruption (*sensu* Smith, 1991) landscape, and altitudinal distribution of the vegetation on the volcano slopes. Its low diversity indicates a pioneer vegetation where ferns occupying the low areas, and distinct conifers and *Nothofagus* the uplands. The silica-rich soils promote the absorption of mineralized waters by the stand vegetation (Biondi *et al.*



2003); **B.** main effusive events from the sineruption phase originate heat ash clouds (surge) that precedes the lava flows and burn the vegetation (mainly external expansions, like leaves, shoots and the less mineralized parts of the trunk surfaces); **C.** ceasing of the volcanic and wildfire events (post-eruption phase) allows rapid vegetation recovery, stimulated by fertile soils (Dale *et al.* 2005).

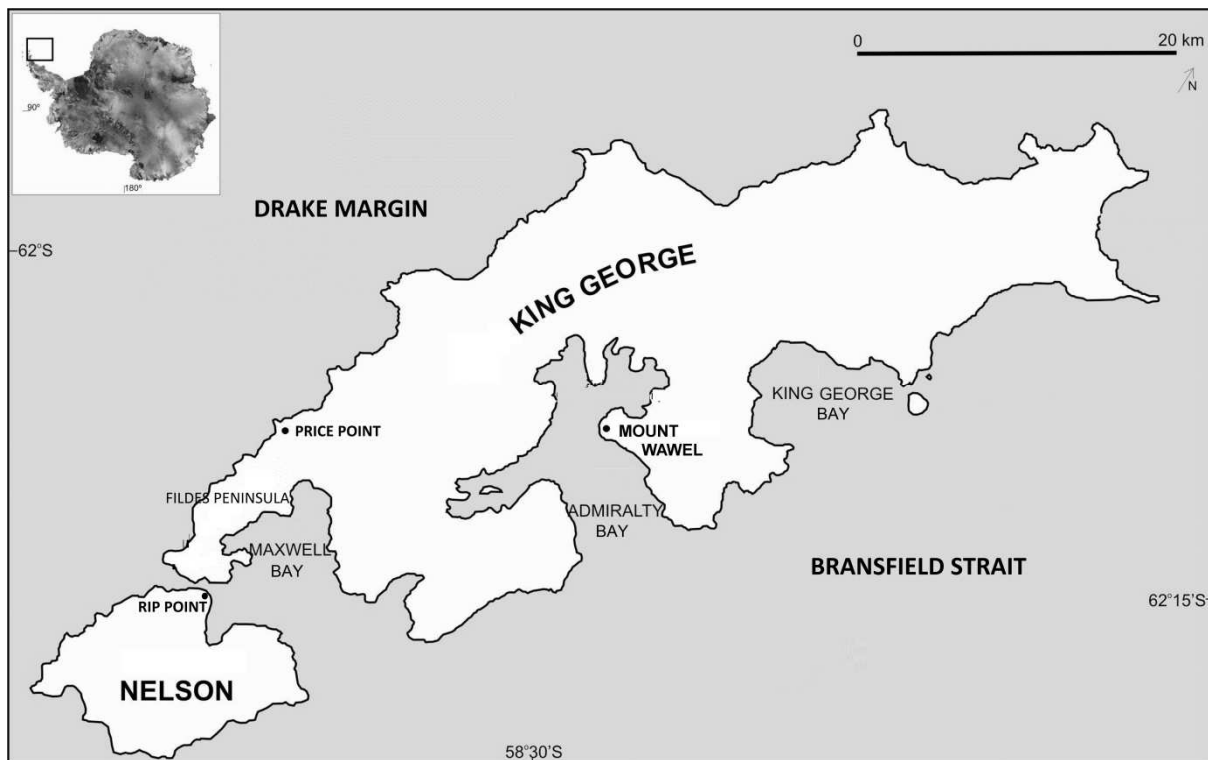
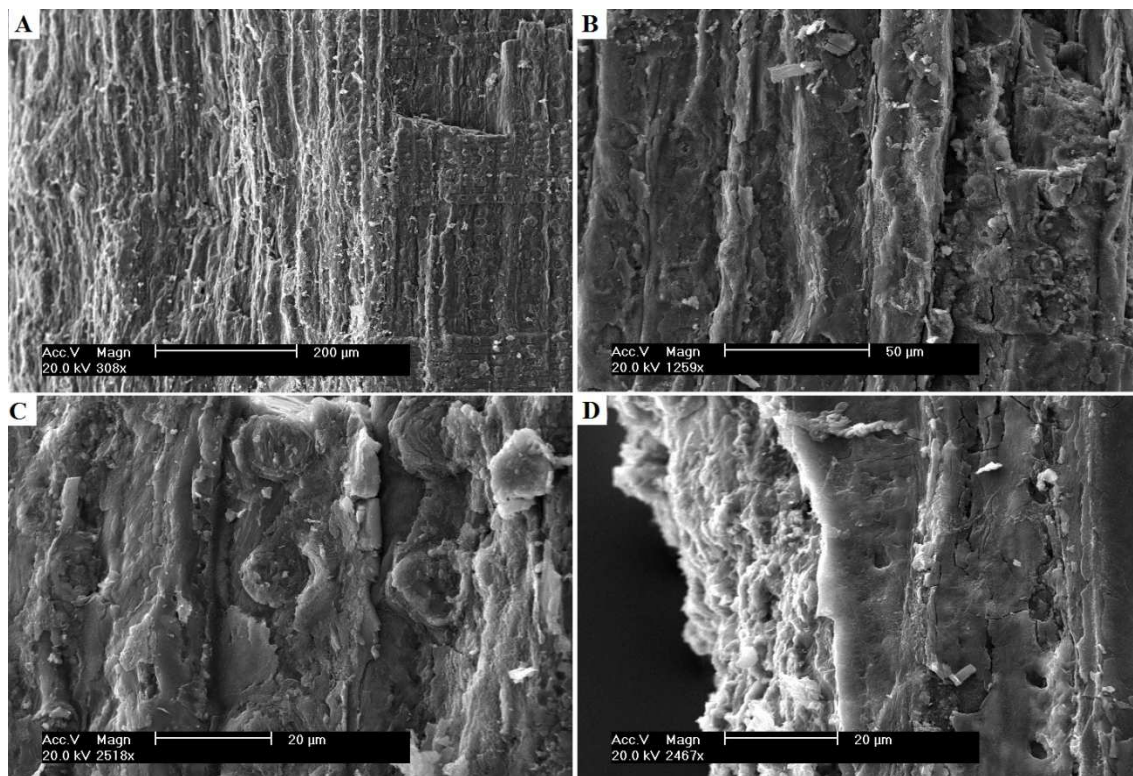


Figure 1.

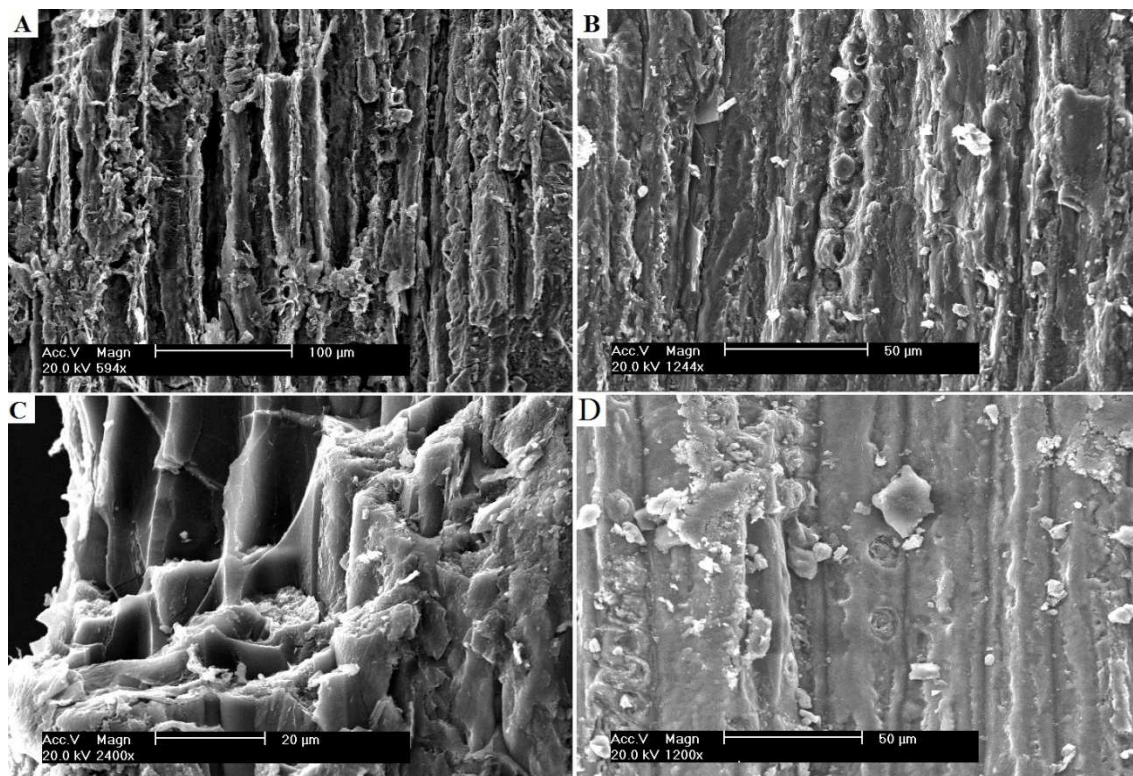




**Figure 3.**

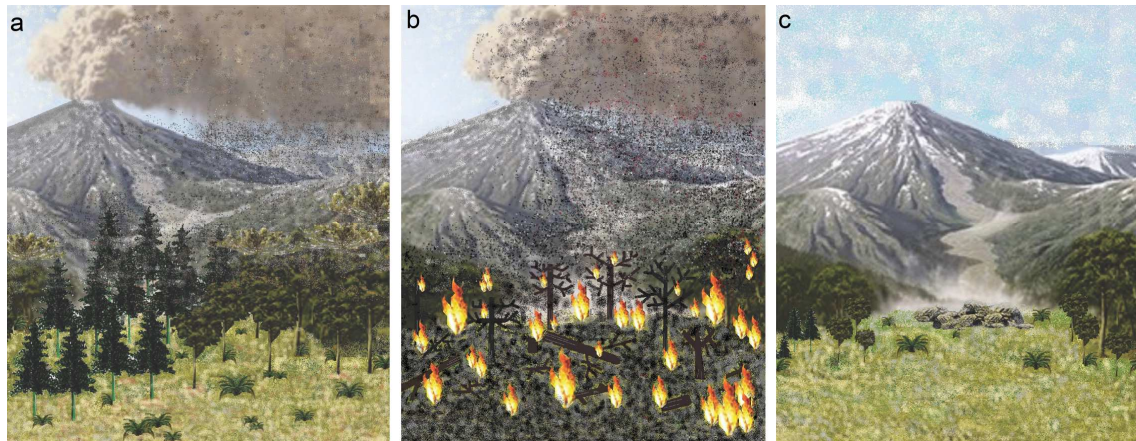


**Figure 4.**



**Figure 5.**





**Figure 6.**