

# *Pesquisas em Geociências*

<http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias>

---

## **O Registro de Isótopos Estáveis de Hidrogênio em Testemunhos de Gelo da Ilha Rei George, Antártica**

*Francisco Adolfo Ferron, Jefferson Cardia Simões*  
*Pesquisas em Geociências, 27 (2): 87-96, jan./abr., 2001.*

Versão online disponível em:

<http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/article/view/20193>

---

Publicado por

## **Instituto de Geociências**

---



## **Portal de Periódicos**

# **UFRGS**

UNIVERSIDADE FEDERAL  
DO RIO GRANDE DO SUL

---

### **Informações Adicionais**

**Email:** [pesquisas@ufrgs.br](mailto:pesquisas@ufrgs.br)

**Políticas:** <http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/about/editorialPolicies#openAccessPolicy>

**Submissão:** <http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/about/submissions#onlineSubmissions>

**Diretrizes:** <http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/about/submissions#authorGuidelines>

---

Data de publicação - jan./abr., 2001.

Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil

## O Registro de Isótopos Estáveis de Hidrogênio em Testemunhos de Gelo da Ilha Rei George, Antártica

FRANCISCO ADOLFO FERRON<sup>1</sup> & JEFFERSON CARDIA SIMÕES<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE) UMR CEA/CNRS - CEA-Saclay, Orme des Merisiers, Bât 709, 91191 Gif-Sur-Yvette Cedex, France. e-mail: ferron@lsce.saclay.cea.fr

<sup>2</sup> Laboratório de Pesquisas Antárticas e Glaciológicas (LAPAG), Universidade Federal do Rio Grande do Sul Cx. Postal 15001, CEP 91570-970, Porto Alegre - RS, Brasil. e-mail: jcs5@if.ufrgs.br

(Recebido em 09/00. Aceito para publicação em 02/01)

**Abstract** - The hydrogen stable isotopic record in four ice cores drilled on King George Island ice field (to the west of the Antarctic Peninsula) are examined. Isotopic composition variations are strongly homogenised, exceptly in the few upper meters of cores drilled above 650-m of elevation. Intensive melting followed by water percolation throughout the snow and firn pack lead to isotopic exchange and consequently strong homogenisation. A stratigraphic profile showing several ice layers and a water table detected in the glacier strengthen this hypothesis. Isotopic ratios decrease with elevation, reflecting the strong melting and isotopic fractionation in lower areas.

**Keywords** - Glacioquímica, Testemunhos de Gelo, Antártica

### INTRODUÇÃO

As razões de isótopos estáveis, em especial hidrogênio e oxigênio, na neve e no gelo é uma ferramenta muito utilizada em paleoclimatologia para reconstruir variações de parâmetros ambientais de uma região, tais como temperatura, umidade relativa e padrões de circulação atmosférica, taxas de acumulação d'água e sequências de glaciações. Auxilia, também, na datação dos próprios testemunhos obtidos pela perfuração do gelo (Dansgaard *et al.*, 1973; Jouzel *et al.*, 1997).

Em regiões polares a sazonalidade observada devido às diferenças na composição isotópica da neve depositada no verão e no inverno, permite a contagem dos anos e a datação do testemunho de gelo. Essencialmente, a sazonalidade depende da diferença de temperatura entre a região fonte do vapor d'água e o local onde este vapor se deposita em forma de neve. Durante o percurso entre a fonte e o destino final, o vapor d'água sofre fracionamento isotópico, ou seja, a progressiva retirada na forma de precipitação dos isótopos pesados de hidrogênio e oxigênio. Quanto maior for a diferença de temperatura, maior será o fracionamento isotópico. Por outro lado, nas regiões subpolares, especialmente onde a influência do clima marítimo é muito marcante, a sazonalidade

não é claramente identificável, pois a pequena diferença da temperatura média entre o inverno e o verão e os processos pós-deposicionais como o derretimento superficial da neve nos períodos de verão, os quais causam homogeneização no conteúdo isotópico da cobertura glacial, levam a redução ou até a perda da assinatura isotópica de caráter sazonal, o que dificulta sobremaneira o estudo do registro ambiental nos testemunhos. Neste contexto, a Ilha Rei George (IRG) situa-se na região subpolar antártica, com clima classificado por Barsch *et al.* (1985) como Polar Oceânico do Hemisfério Sul, caracterizando-se por pequena variação na temperatura atmosférica durante o ano (se comparado com o interior do continente antártico) e temperaturas médias elevadas (acima de 0°C) durante os meses de verão (Rakusa-Suszczewski *et al.*, 1993; Ferron, 1999).

Neste trabalho são interpretados os perfis de razões de isótopos estáveis de hidrogênio em um testemunho de gelo (TG) com 49,9 metros de profundidade, obtido no topo da IRG a 700 metros de altitude no verão 1995/96 (TG Lange). Três testemunhos rasos, com aproximadamente 5 m de profundidade cada (TG Drake - 600 m de altitude; TG Ezcurra - 575 m; TG Domo 2 - 670 m) completam o estudo. A localização da Ilha Rei George e dos testemunhos é mostrada na figura 1.

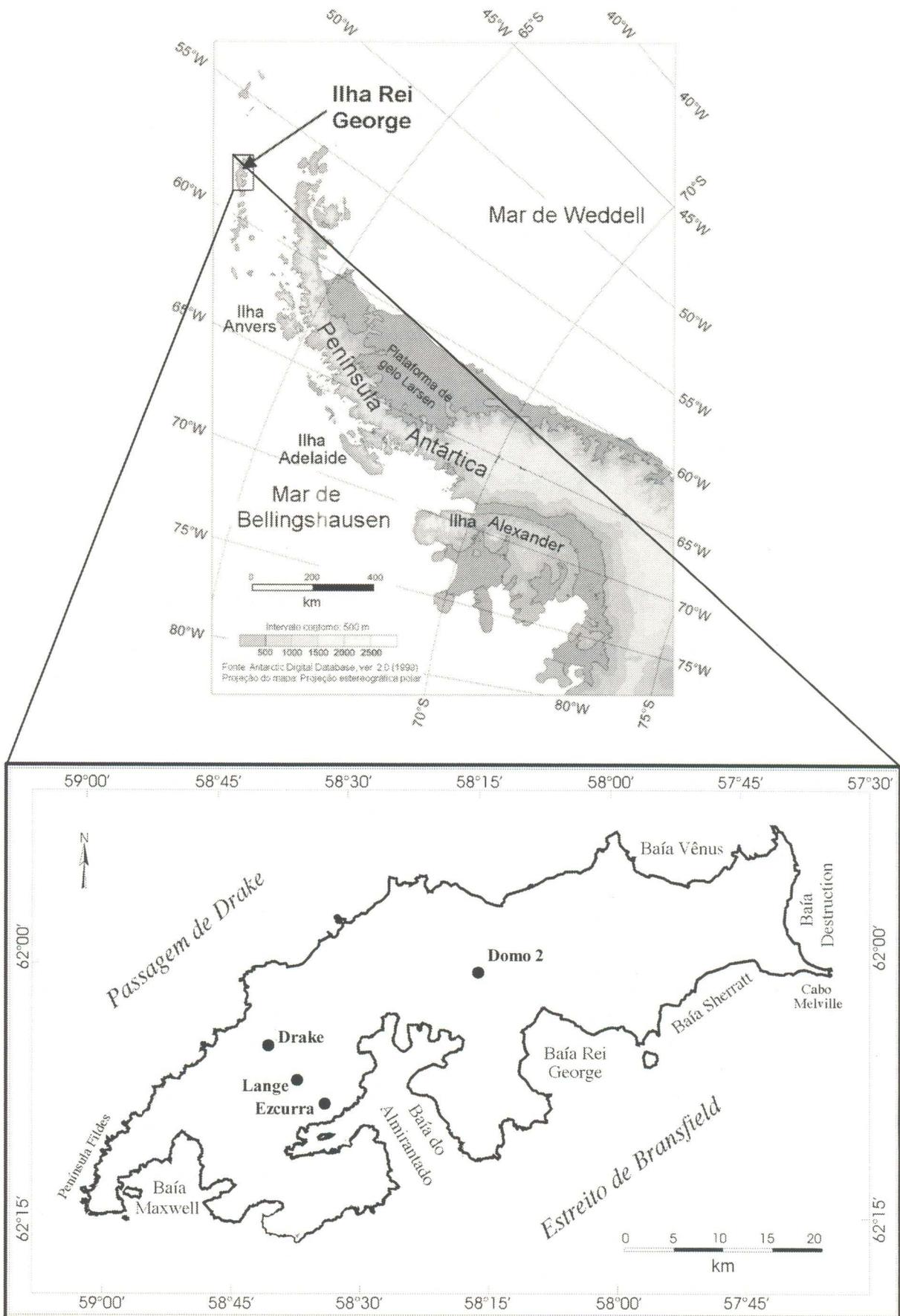


Figura 1 - Mapa de localização da Ilha Rei George mostrando os testemunhos de gelo utilizados neste trabalho.

Estudo preliminar da composição isotópica do gelo da IRG foi realizado por Yan (1997), que analisou a distribuição espacial na porção sudoeste do campo de gelo que cobre a ilha. Porém, é difícil a comparação dos dados, pois o trabalho citado acima não apresenta detalhes, como a profundidade em equivalente de água (*i.e.*, corrigida pela densidade) e a localização geográfica precisa dos testemunhos. Além disto, o valor isotópico médio (representativo da precipitação) é calculado para toda extensão do testemunho (onde se deveria utilizar somente a porção superficial, onde a homogeneização isotópica é menos intensa - *cf.* secção 3.1).

## METODOLOGIA

### Escolha dos locais de sondagem

Os fatores mais importantes para a determinação do local da sondagem do TG Lange foram: 1) área mais elevada da ilha, de forma a reduzir ao máximo os efeitos do derretimento, a percolação d'água e o recongelamento nas camadas de neve superficial (*i.e.*, local com menor temperatura atmosférica); 2) localização mais próxima possível do divisor da bacia de drenagem glacial, onde ocorre o menor deslocamento horizontal da coluna de gelo, para evitar correções na datação; 3) limitações logísticas: a perfuração do testemunho foi parte de um trabalho de campo integrando várias equipes na IRG, local de atuação do Programa Antártico Brasileiro (PROANTAR).

Os testemunhos rasos foram obtidos na mesma região do campo de gelo da IRG em diferentes elevações, a fim de comparar o comportamento da composição isotópica face às variações na intensidade dos processos de derretimento.

### Perfuração dos testemunhos

O TG Lange foi obtido com auxílio de uma perfuradora eletromecânica portátil (transportada em um trenó) com alcance de 100 metros, desenvolvida pelo *Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement* (LGGE - Saint-Martin-d'Hères, França). O equipamento foi instalado em uma trincheira de aproximadamente 1,2 metros de profundidade. Na perfuração dos testemunhos rasos foi utilizado um trado manual portátil SIPRE, fabricado pela CREEL (*Cold Regions Research Engineering Laboratory, U.S. Army Corps of Engineers*), com capacidade para atingir até 6 metros de profundidade.

O TG Lange foi recuperado em secções de aproximadamente um metro de comprimento. Uma vez retirada a secção do barrilete do testemunhador, este foi limpo (escovação) para remoção de qualquer material impregnado. Em seguida foi realizado o exame visual da estratigrafia em mesa de luz transmitida e a amostragem.

### Amostragem

Após a descrição estratigráfica, a secção foi cortada com auxílio de serrotes de aço cirúrgico em pedaços de 10 cm de comprimento. O peso e as dimensões de cada pedaço foram medidos para cálculo da densidade. Parte da área superficial foi removida para análise de isótopos estáveis, sendo guardadas em sacos de polipropileno e posteriormente transferidas para frascos. A parte restante foi descontaminada (remoção da porção externa) para análises de química iônica e acondicionada em frascos de polipropileno previamente lavados com água deionizada e bidestilada (Bernardo, 1999). Nesta etapa, utilizou-se roupas próprias para laboratório limpo (classe 100) e luvas plásticas, e as amostras foram processadas em uma mesa de fluxo laminar portátil. Estes procedimentos são necessários para garantir o grau de pureza devido às baixas concentrações iônicas no gelo polar (na ordem de ppb).

Os frascos e sacos plásticos contendo as amostras foram acondicionados em caixas especiais com isolante térmico, as quais foram armazenadas na trincheira de perfuração (temperatura média entre - 3 e - 4 °C), até o final da operação de campo. A seguir, foram transportadas sob refrigeração para os congeladores do Laboratório de Pesquisas Antárticas e Glaciológicas (LAPAG) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). No momento do envio das amostras para análise, os frascos foram retirados do congelador e mantidos fechados (para evitar evaporação e conseqüente fracionamento isotópico) à temperatura ambiente até o total descongelamento. A água foi então transferida para frascos de vidro de 50 ml, os quais foram enviados para o *Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement* (LSCE - Gif-Sur-Yvette, França), onde as análises isotópicas foram efetuadas.

### Análises isotópicas

As razões isotópicas de hidrogênio e oxigênio na água são medidas com relação ao padrão SMOW (*Standard Mean Ocean Water*), definido por Craig (1961) segundo a fórmula:

$$\delta x = \frac{R_{(amostra)} - R_{(SMOW)}}{R_{(SMOW)}} \times 1000$$

onde, X = D ou  $^{18}\text{O}$  ou; R = D/H ou  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ . Os valores de  $\delta\text{D}$  e  $\delta^{18}\text{O}$  são referidos em partes por mil (‰).

As medições de isótopos estáveis de hidrogênio foram realizadas no LSCE em um espectrômetro de massa construído pelos técnicos do CEA-Saclay especialmente para realizar análises destes isótopos. Para cada amostra, 0,7 ml são pipetados em pequenos frascos de vidro, os quais são colocados em um sistema automático de introdução, onde com auxílio de uma seringa em torno de 1 a 5  $\mu\text{l}$  da amostra é injetado no sistema de entrada do espectrômetro de massa. Neste último, mantido no vácuo por um conjunto de bombas e aquecido permanentemente a  $100^\circ\text{C}$ , a água é totalmente vaporizada em aproximadamente 30 segundos. O vapor antes de ser enviado ao espectrômetro de massa sofre redução ao passar por um forno constituído de um tubo de quartzo com 0,5 gramas de urânio, aquecido a  $600^\circ\text{C}$ . Um padrão é injetado a cada cinco amostras, permitindo controle de qualquer desvio ou instabilidade, frequentemente causadas pela injeção de pequenas quantidades de ar junto com a água. Para cada amostra são realizadas três análises isotópicas, utilizando-se o valor médio. O nível de precisão para estas análises é de 0,5 ‰ (Stievenard *et al.*, 1994).

## RESULTADOS

### Testemunho Lange

#### *Estratigrafia*

A análise estratigráfica do testemunho foi realizada logo após a retirada da secção do testemunhador, sendo esta encaminhada à uma mesa de luz transmitida especialmente construída para este fim.

Ao longo de todo o testemunho foram encontradas várias camadas de gelo milimétricas a centimétricas que indicam haver ocorrido recongelamento, sugerindo que no local da sondagem os processos de derretimento e percolação são intensos, causando homogeneização dos valores isotópicos. Foram identificados nove intervalos de profundidade onde as camadas de gelo ocorrem com maior frequência (Figs. 2 e 3). Em certas regiões subpolares, onde os processos de derretimento e

recongelamento não são tão intensos e restringem-se somente à um curto período durante o verão, este pode ser identificado pela presença de níveis contendo algumas camadas de gelo. O reconhecimento de sucessivos períodos de verão possibilita estimar a datação e a taxa de acumulação de neve. No caso da IRG, em virtude da grande quantidade de camadas e da sua distribuição totalmente irregular não foi possível realizar qualquer estimativa dos parâmetros citados acima. A falta de sazonalidade nas camadas de gelo observadas no TG Lange e a consequente dificuldade em identificar os períodos de verão indicam que estas são geradas não somente em épocas restritas no verão, mas na maior parte do ano, refletindo as elevadas temperaturas médias observadas na ilha. Também não foram observados níveis contendo micropartículas (*e.g.*, cinzas vulcânicas), as quais poderiam ser correlacionadas com explosões vulcânicas registradas neste século na região, servindo como horizontes de referência na datação.

#### *Variabilidade da composição isotópica*

O TG Lange pode ser dividido em três intervalos (Tab. 1 e Fig. 3), considerando-se a homogeneização isotópica: **(1) O intervalo superior** (0,5 a 2,7 metros em equivalente em água<sup>1</sup>) apresenta o maior desvio padrão (13,2‰) e a maior amplitude de  $\delta\text{D}$  (57,6‰). A sazonalidade pode ser claramente identificada e tem valor médio de  $\delta\text{D}$  igual a  $-72,2\text{‰}$ . Provavelmente, este intervalo ainda representa a composição média da precipitação na área. Dados de conteúdo iônico ( $\text{Cl}^-$  e  $\text{SO}_4^{2-}$ ) mostram que até 2,1 metros de profundidade há pouca lavagem e remoção de íons (Bernardo, 1999). **(2) No intervalo intermediário**, de 2,7 a 14,9 m, a sazonalidade ainda pode ser reconhecida, ou seja, as variações sazonais da razão isotópica são úteis para a datação do testemunho. Há, no entanto, diminuição na amplitude (43,1‰), apresentando uma homogeneização de 36,4% quando comparado ao intervalo superior. O valor médio de  $\delta\text{D}$  para este intervalo é  $-76,2\text{‰}$ . **(3) No intervalo inferior**, entre 14,9 e 34,9 m, a homogeneização é muito intensa (57,6%), o que também é verificado pela menor amplitude dos valores de  $\delta\text{D}$  (30,7‰). Apesar da intensa homogeneização, é ainda possível reconhecer a brusca queda

<sup>1</sup> A profundidade em metros em equivalente de água é obtida pelo somatório do produto da multiplicação do comprimento de cada pedaço das secções do testemunho pela sua respectiva densidade. Se não especificado, as profundidades citadas serão referidas sempre em metros em equivalente de água.

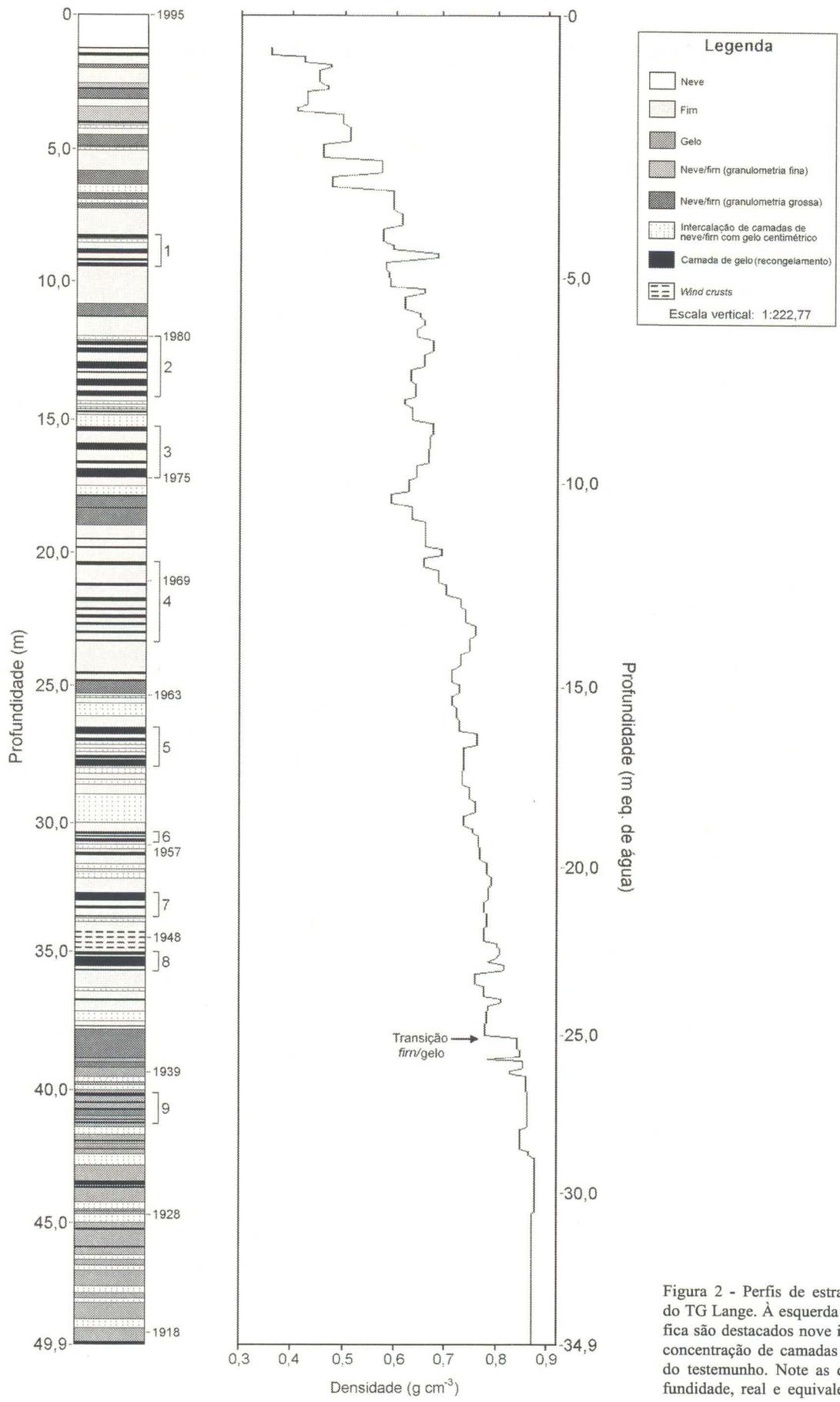


Figura 2 - Perfis de estratigrafia e densidade do TG Lange. À esquerda da coluna estratigráfica são destacados nove intervalos com maior concentração de camadas de gelo e a datação do testemunho. Note as duas escalas de profundidade, real e equivalente de água.

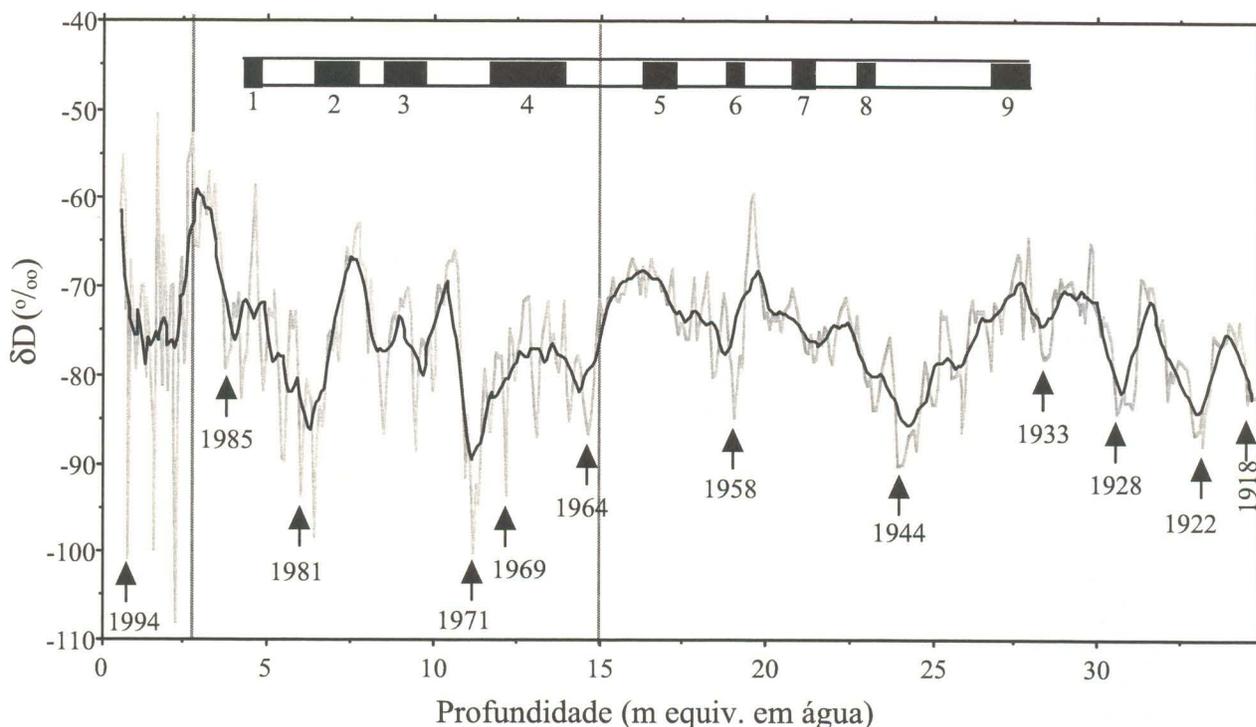


Figura 3 - Gráfico de  $\delta D$  ao longo do TG Lange. A linha preta foi obtida utilizando média móvel (coeficiente de suavização de 10 amostras). As linhas tracejadas verticais indicam a divisão do testemunho conforme o percentual de homogeneização (Tab. 1). As barras numeradas de 1 a 9 indicam os intervalos com maior concentração de camadas de gelo. A profundidade é em metros de equivalente água.

Tabela 1 - Dados estatísticos de  $\delta D$  para o TG Lange.

Profundidade (m. eq. H <sub>2</sub> O)	$\delta D$ médio (‰)	Desvio padrão (‰)	Homog (%)	Valor mín. (‰)	Valor máx. (‰)	Amplitude (‰)	Número amostras
0,5 - 34,9	- 75,4	7,6	*	- 108,0	- 50,4	57,6	427
0,5 - 2,7	- 72,2	13,2	0,0	- 108,0	- 50,4	57,6	37
2,7 - 14,9	- 76,2	8,4	36,4	- 99,0	- 56,7	43,1	155
14,9 - 34,9	- 75,2	5,6	57,6	- 90,1	- 59,4	30,7	235

no conteúdo de deutério (D) entre o verão de 1957 e o inverno de 1958. Esta parte do testemunho serve de referência para datação, pois é identificada em vários locais na Antártica [25,3‰ na IRG (Ferron, 1999); 54,7‰ na Ilha James Ross (Aristarain, 1980); 90,0‰ no interior do Continente Antártico (Jouzel *et al.*, 1979)].

A parte mais homogeneizada do testemunho está entre 14,9 e 23,0 m, onde a amplitude é de 25,3‰, com  $\delta D$  médio de - 72,8‰. A maior concentração de camadas de gelo de recongelamento (intervalos 5, 6, 7 e 8, *cf.* figura 3) é encontrada neste intervalo.

#### Homogeneização isotópica e aquífero

Dados estratigráficos mostram a 35 metros de profundidade (23 metros em equivalente de água) um conjunto de camadas de gelo que sustentam um aquífero intraglacial, detectado durante a perfuração

e confirmado recentemente por um perfil de radar GPR (*Ground Penetrating Radar*) [Travassos & Simões, 1999]. Este conjunto de camadas obstrui o fluxo vertical d'água, protegendo as camadas subjacentes da percolação, diminuindo assim a homogeneização isotópica (Moser & Stichler, 1980). Isto foi verificado na análise dos valores de  $\delta D$  abaixo de 23 metros. Conseqüentemente, a amplitude (26,1‰) da secção é maior do que no intervalo logo acima.

#### Datação do testemunho

O TG Lange foi datado pela comparação dos perfis isotópico ( $\delta D$ ) e do conteúdo iônico (Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) com registros da extensão de gelo marinho na longitude 60° W, da temperatura atmosférica média anual na região no período 1947-95, e com o perfil isotópico do testemunho perfurado na Ilha James Ross [Aristarain, 1980].

O modelo de fluxo proposto por Nye (1963) foi utilizado na datação do testemunho abaixo de 20 metros em equivalente de água (anterior ao ano de 1958). Devido à intensa homogeneização do testemunho abaixo desta profundidade, não foi possível determinar horizontes de referência confiáveis, além do reconhecimento da sazonalidade ser muito difícil ou impossível. Da superfície até 20 metros, este modelo foi aplicado somente para verificar a datação. A Tabela 2 compara a datação do TG Lange pelas duas diferentes metodologias. As diferenças encontradas são mais acentuadas abaixo de 20 metros de profundidade.

### Testemunhos Rasos

As razões isotópicas nos três testemunhos rasos (Domo 2, Drake e Ezcurra) mostram, no primeiro 0,5 m, valores médios elevados e com baixo desvio padrão, quando comparados ao resto do testemunho (Tab. 3). Ou seja, uma indicação de intenso derretimento da neve superficial, com a retirada de isótopos leves (*i.e.*, enriquecimento relativo de deutério) e homogeneização isotópica (baixo desvio padrão).

O TG Ezcurra, na menor altitude (575 m), apresenta o maior valor médio de  $\delta D$  no primeiro 0,5 m (-56,9‰) e a menor amplitude (11,4‰). A estratigrafia deste testemunho mostra várias camadas centimétricas de gelo neste intervalo. Abaixo de 2,7 m, associado com o aumento da densidade e da granulometria da neve, ocorre aumento e forte homogeneização no valor de  $\delta D$ . Isto reflete o derretimento e a recristalização, com a remoção de isótopos leves. Neste testemunho, portanto, o derretimento na parte superficial é mais intenso. Provavelmente os isótopos leves, retirados da parte superficial, concentraram-se entre 0,5 e 2,7 m, onde os valores isotópicos são mais baixos (-80,6‰).

O TG do Domo 2, maior altitude (670 m) dentre os testemunhos rasos, apresenta no primeiro 0,5 m o valor mais baixo de  $\delta D$  médio (-66,6‰) e maior amplitude (22,8‰), indicando derretimento menos intenso na superfície.

Não há correspondência satisfatória entre as variações nas razões isotópicas dos testemunhos rasos entre si e com aquelas do TG Lange (Fig. 4), indicação de que a acumulação líquida e as mudan-

Tabela 2 - Dados estatísticos de  $\delta D$  para os testemunhos rasos.

Testemunho	Média (‰)	Desvio padrão (‰)	Valor mínimo (‰)	Valor máximo (‰)	Amplitude (‰)	Número de amostras
Domo 2	- 66,6 <sup>(a)</sup>	8,6	- 78,7	- 56,0	22,8	5
	- 77,1 <sup>(b)</sup>	16,5	- 119,6	- 41,1	78,5	19
Drake	- 64,0 <sup>(a)</sup>	5,9	- 72,7	- 59,8	12,8	4
	- 64,0 <sup>(b)</sup>	5,2	- 71,0	- 52,3	18,7	22
Ezcurra	- 56,9 <sup>(a)</sup>	4,8	- 63,3	- 51,8	11,4	4
	- 80,6 <sup>(b)</sup>	17,4	- 137,1	- 57,4	79,7	21

Notas: <sup>(a)</sup> Profundidade de 0 a 0,5 metro. <sup>(b)</sup> Profundidade de 0,5 a 2,7 metros (em equivalente de água).

Tabela 3 - Comparação entre datação do TG Lange por variação sazonal e pelo fluxo de Nye.

Profundidade (m equiv. água)	Varição sazonal (Inverno)	Fluxo Nye
1,6	1991	1992
6,3	1980	1981
7,8	1978	1978
9,4	1975	1975
12,1	1969	1968
19,0	1958	1956
21,9	1953	1948
23,9	1950	1944
25,9	1946	1939
28,4	1940	1933
30,5	1936	1928
33,2	1929	1922
34,6	1926	1918

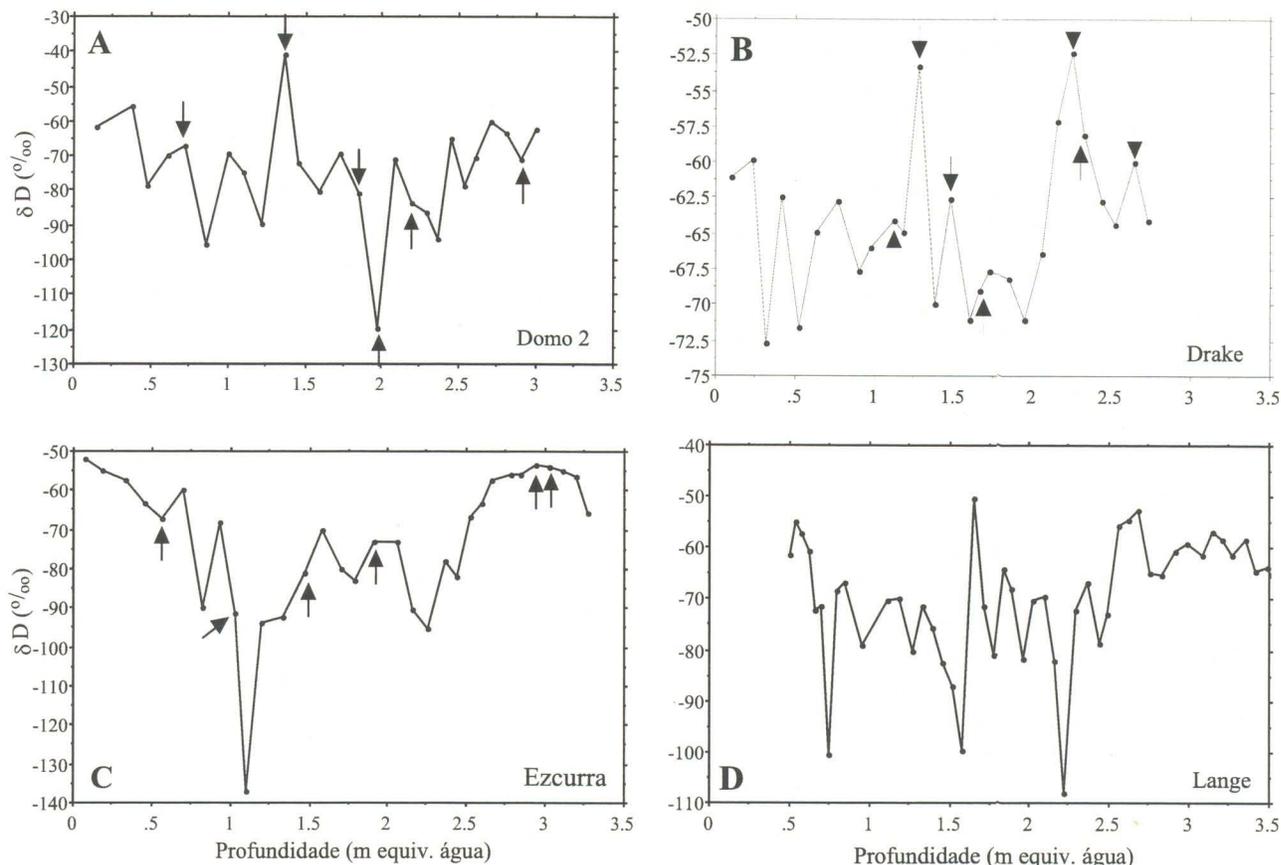


Figura 4 - Gráficos de  $\delta D$  para os 3,5 metros (em equivalente de água) dos testemunhos do Domo 2 (A), Drake (B), Ezcurrea (C) e Lange (D). As setas indicam presença de camadas de gelo.

ças na razão isotópica foram irregulares por toda superfície do campo de gelo.

## DISCUSSÃO

### Fatores que causam a homogeneização isotópica

O TG Lange mostra evidências de intenso derretimento, percolação e recongelamento, como evidenciado pela estratigrafia e pela análise do perfil isotópico. Estes processos, provavelmente, foram intensificados nos últimos 50 anos, acompanhando o progressivo aumento da temperatura atmosférica média na região (Ferron, 1999; Aquino, 1999).

As moléculas formadas por isótopos mais leves são removidas preferencialmente no derretimento, deixando a neve residual enriquecida em isótopos pesados. Porém, conforme avança o derretimento do pacote de neve, os isótopos pesados também são liberados. Desta forma, o conteúdo isotópico da água nos primeiros estágios de derretimento é mais negativo do que nos estágios finais [Árnason, 1969].

Nestas condições, Oerter *et al.* (1985) explicam a homogeneização isotópica basicamente por dois processos: 1) Troca isotópica entre a água que

está percolando (proveniente do derretimento) e o *firn*<sup>2</sup>, o qual encontra-se saturado d'água e em equilíbrio entre as fases líquidas e sólidas; 2) Recongelamento de água de derretimento nos poros do *firn* durante o inverno, a qual, devido à sua composição isotópica diferente, ocasionará homogeneização.

O enriquecimento em isótopos pesados ocorre quando há precipitação líquida ou derretimento de camadas superficiais que foram enriquecidas no conteúdo isotópico por evaporação ou outro efeito (Moser & Stichler, 1980), como por exemplo a sublimação ou a formação de *rime*<sup>3</sup>. Este parece ser também o caso na IRG, onde se observa que mesmo a 700 metros de altura a formação de *rime* contribui para a homogeneização isotópica, pois o mesmo é isotopicamente mais pesado do que a neve.

<sup>2</sup> *Firn* pode ser definido como o material transicional entre a neve e o gelo. O limite *firn/gelo* é bem demarcado na densidade 0,83 g cm<sup>-3</sup>, na qual as conexões entre os poros são totalmente fechadas. O limite *neve/firn* é mais difícil de ser definido (Paterson, 1994).

<sup>3</sup> Segundo definição de Armstrong *et al.* (1973), *rime* é um depósito de gelo composto de grãos irregularmente separados por ar aprisionado, às vezes adornados com cristais de gelo de forma ramificada, produzidos pelo rápido congelamento de gotas d'água superesfriadas de tamanho muito pequeno.

O enriquecimento isotópico na superfície também pode ser atribuído ao conteúdo de água livre misturada com a neve. Esta água é proveniente da precipitação líquida que ocorre nos meses de verão, enriquecida em isótopos pesados em comparação com a neve no inverno (Sharp *et al.*, 1960). Este efeito é mais importante nas baixas altitudes, e pode ser uma das causas do elevado valor isotópico observado na parte superficial do TG Ezcurra.

Finalmente, a homogeneização também ocorre por difusão molecular no gelo. Esta requer, no entanto, maior tempo se comparado aos processos no vapor e em líquidos (Moser & Stichler, 1980). No TG Lange este processo pode ser considerado, pois o gelo é pouco espesso e o seu tempo de permanência não é muito grande (*i.e.* cerca de 5000 anos) devido ao movimento vertical. A difusão de vapor d'água nos poros do *firn*, processo que homogeneiza as altas frequências do registro isotópico sazonal (Ciais *et al.*, 1995), é provavelmente restrita pela grande quantidade de camadas de gelo.

#### Papel da variação sazonal

A IRG, se comparada com locais no interior do Continente Antártico, possui pequena variação sazonal de temperatura e, associada, pequena variação no valor médio da composição isotópica da pre-

cipitação entre inverno e verão (Ferron, 1999). Desta forma, os efeitos do fracionamento isotópico causado pela percolação de água de derretimento serão proporcionalmente mais marcantes (Moser & Stichler, 1980).

#### Relação entre composição isotópica e altitude

Observa-se aumento no valor de  $\delta D$  com a diminuição da altitude (Fig. 5), que pode ser expresso segundo a relação abaixo, com coeficiente de correlação  $r = 0,94$  e nível de significância de 99% ( $\alpha = 0,01$ ):

$$\delta D = - 0,1 \text{ Altitude (metros)} - 0,15$$

Esta relação reflete, principalmente, o derretimento e a intensa retirada (*flush-out*) dos isótopos leves em altitudes menores.

#### CONCLUSÕES

Análises da composição isotópica e estratigrafia do TG Lange apontam para intenso derretimento superficial, percolação e recongelamento no campo de gelo da IRG, causando a retirada dos isótopos leves e homogeneização isotópica. Na parte superior da cobertura de neve (até 2,7 m), no topo do campo de gelo a 700 m de altitude, a homogeneização é reduzida. Provavelmente os valores isotópicos

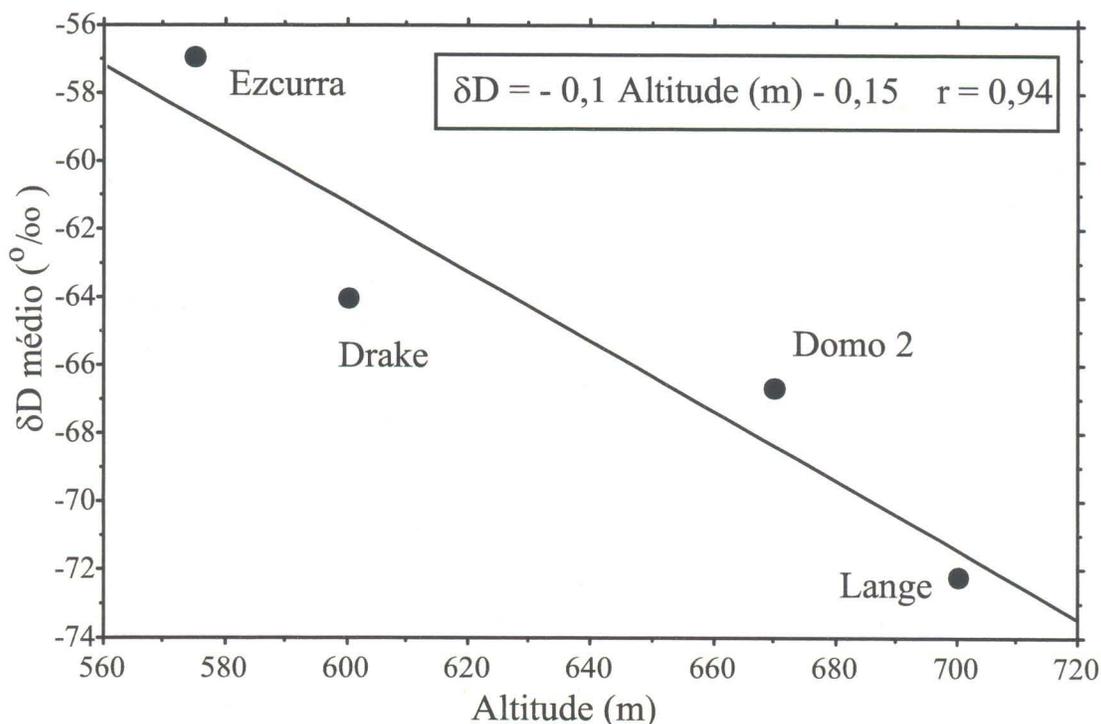


Figura 5 - Variação da composição isotópica ( $\delta D$ ) com relação à altitude do local das perfurações na IRG. Os valores de  $\delta D$  são referentes à parte superior dos testemunhos (0-2,7 metros para o TG Lange e 0-0,5 m para os testemunhos rasos).

originais da precipitação foram preservados. O TG Lange apresenta três níveis com homogeneização isotópica diferenciada: nos intervalos superior e intermediário ainda pode-se reconhecer a sazonalidade no registro; no intervalo inferior, que apresenta homogeneização de 57,7%, a sazonalidade é de difícil identificação. O principal mecanismo de homogeneização é a troca isotópica entre a água percolante (enriquecida em isótopos leves) e o *firn* permeável saturado d'água. O derretimento e a percolação d'água no interior da geleira, representados no registro estratigráfico pela grande quantidade de camadas de gelo intercaladas com neve e *firn*, reflete o ambiente subpolar da região, onde são registradas temperaturas elevadas no verão (acima de 0°C) em comparação com o interior do Continente Antártico.

**Agradecimentos** - Os autores agradecem às equipes do LGGE e do LSCE pelo empréstimo de uma perfuradora de gelo e a disponibilização do uso do espectrômetro de massa. Em especial a Michel Stievenard (LSCE) pela realização das análises isotópicas e a Alberto Aristarain (Laboratório de Estratigrafia Glaciar y Geoquímica de Agua y de la Nieve - LEGAN - Mendoza, Argentina) pela realização da descrição estratigráfica no campo. À Andreia R.D. Elias pela revisão do texto e sugestões. O apoio logístico na IRG por parte da Marinha do Brasil e da Secretaria Interministerial para os Recursos do Mar (SECIRM) foi essencial para a realização do trabalho. Este trabalho contou com o financiamento do Programa Antártico Brasileiro (PROANTAR) através do Conselho Nacional de Desenvolvimento e Pesquisa Científica (CNPq) [Projeto 49.0047/99-8].

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aquino, F. E. 1999. **Sedimentação moderna associada à geleira de maré Lange**. Porto Alegre, 106p. Dissertação de Mestrado em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Aristarain, A. J. 1980. **Etude glaciologique de la calotte polaire de l'île James Ross (Peninsule Antartique)**. Grenoble (França). 130p. Thèse de Troisième Cycle. Université Scientifique et Médicale de Grenoble.
- Armstrong, T.; Roberts, B. & Swithinbank, C. 1973. **Illustrated glossary of snow and ice**. Scott Polar Research Institute, 60 p. (Special Publication Number 4).
- Árnason, B. 1969. The exchange of hydrogen isotopes between ice and water in temperate glaciers. **Earth and Planetary Science Letters**, n. 6, p. 423-430.
- Barsch, D.; Blümel, W. D.; Flügel, W. A.; Mäusbacher, R.; Stäblein, G. & Zich, W. 1985. Untersuchungen zum periglacial auf der König-Georg Inset Südshetlandinseln, Antarktica. **Berichte Zur Polarforschung**, n. 24, p. 75.
- Bernardo, R. T. 1999. **Conteúdo aniônico da neve e do gelo da Ilha Rei George, Antártica**. Porto Alegre, 100p. Dissertação de Mestrado em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Ciais, P.; White, W. C.; Jouzel, J. & Petit, J. R. 1995. The origin of present-day Antarctic precipitation from surface snow deuterium excess data. **Journal of Geophysical Research**, 100 (D9): 18917-18927.
- Craig, H. 1961. Standard for reporting concentrations of deuterium and oxygen-18 in natural waters. **Science**, 133 (3467): 1833-1834.
- Dansgaard, W.; Johnsen, S. J.; Clausen, H. B. & Gundestrup, N. 1973. Stable isotopes in glaciology. **Kommissionen for Videnskabelige Undersogelser I Grønland**, 197 (2), 53p.
- Ferron, F. A. 1999. **Variações nas razões de isótopos estáveis na neve e no gelo da Ilha Rei George, Antártica**. Porto Alegre. 125p. Dissertação de Mestrado em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Jouzel, J.; Merlivat, L.; Pourchet, M. & Lorius, C. 1979. A continuous record of artificial tritium fallout at the South Pole (1954-1978). **Earth and Planetary Science Letters**, 45(1): 188-200.
- Jouzel, J.; Alley, R. B.; Cuffey, K. M.; Dansgaard, W.; Grootes, P.; Hoffmann, G.; Johnsen, S. J.; Koster, R. D.; Peel, D.; Shuman, C. A.; Stievenard, M.; Stuiver, M. & White, J. 1997. Validity of the temperature reconstruction from water isotopes in ice cores. **Journal of Geophysical Research**, 102 (C12): 26471-26487.
- Moser, H. & Stichler, W. 1980. Environmental isotopes in ice and snow. In: Fritz, P. & Fontes, J. Ch. (eds.). **Handbook of environmental isotope geochemistry**, Amsterdam, Elsevier, 1: 141-178.
- Nye, J.F. 1963. Correction factor for accumulation measured by the thickness of the annual layers in an ice sheet. **Journal of Glaciology**, 4 (36): 785-788.
- Oerter, H.; Baker, D.; Stichler, W. & Rauert, W. 1985. Isotope studies of ice cores from a temperate alpine glacier (Vernagtferner, Austria) with respect to the meltwater flow. **Annals of Glaciology**, 7, p.: 90-93.
- Rakusa-Suszczewski, S.; Mietus, M. & Piasecki, J. 1993. Weather and climate. In: Rakusa-Suszczewski, S. (ed.). **The maritime antarctic coastal ecosystem of Admiralty Bay**. Polish Academy of Sciences, p. 19-25.
- Sharp, R. P.; Epstein, S. & Vidziunas, I. 1960. Oxygen-isotope ratios in the Blue Glacier, Olympic Mountains, Washington. **Journal of Geophysical Research**, 65 (12): 4043-4059.
- Stievenard, M.; Delmotte, M.; Jouzel, J. & Fléhoc, C. 1994. Mass spectrometry analysis of water stable isotopes: reconstruction of past climates from polar ice cores. **Analisis Magazine**, 22 (7): 21-24.
- Travassos, J. & Simões, J. C. 1999. Stratigraphy and hydrology of a subpolar ice field, King George Island. In: SIXTH INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 1999. [em CD]
- Yan, M. 1997. A preliminary study on oxygen isotope of ice cores of Collins Ice Cap, King George Island, Antarctica. **Chinese Journal of Polar Science**, 8 (1): 65-71.