

A ORIGEM DA SALINIDADE NO CONTINENTE ANTÁRTICO

THE ORIGIN OF SALINITY IN THE ANTARCTIC CONTINENT

Arcângelo Loss^{1*}; Celeste Queiroz Rossi¹; Marcio Rocha Francelino²

RESUMO

A Antártica é o mais perfeito laboratório natural do planeta para estudos de mudanças ambientais. Partindo dessa premissa, este estudo teve como objetivo realizar uma revisão sobre a origem dos sais presentes no continente antártico, sendo pormenorizado as principais formas e fontes salinas que ocorrem. Na literatura, este tema é de grande discussão, sendo relatado que a origem dos sais pode ser devido à precipitação atmosférica, intemperismo de rochas, origem marinha (spray salino), sulfatos biologicamente produzidos ou atividade hidrotermal. De maneira geral, a presente revisão permitiu inferir diversas origens dos sais solúveis em água nos solos da Antártica. Perto da costa, influências marinhas são dominantes, encobrendo quaisquer contribuições do intemperismo das rochas. Mas para o interior, a influência do intemperismo é mais evidente, ao passo que a influência de circulação atmosférica superior torna-se importante também. Ressalta-se também, a importância da contribuição continental no aporte de sais nos períodos glaciais.

Palavras-chaves: Antártica, contribuição continental, emissões biológicas, precipitação química, spray marinho.

¹ Doutorando do Curso de Pós-Graduação em Agronomia - Ciência do Solo, Bolsista CNPq, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Br 465, km 7, Seropédica, RJ, CEP 23890-000. E-mail: arcangeloloss@yahoo.com.br; celesteq.rossi@yahoo.com.br.

*Autor para correspondência.

² Professor Adjunto, Departamento de Silvicultura, Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. BR 465, km 7, Seropédica, RJ, CEP 23890-000.

E-mail: marcio.francelino@gmail.com

ABSTRACT

The Antarctica is the most perfect natural laboratory to study the planet from environmental changes. From this premise, this study was to conduct a review on the origin of salts in the Antarctic, and detailed the main forms and sources occurring salt. In literature, this topic is of great discussion, and reported that the origin of salts may be due to precipitation, rock weathering, marine (salt spray), biologically produced sulfates or hydrothermal activity. Overall, this review allows us to infer various sources of water-soluble salts in soils of Antarctica. Near the coast, marine influences are dominant, covering up any contributions from weathering of rocks. But for the interior, the influence of weathering is more evident, while the influence of atmospheric circulation becomes more important as well. We also emphasize the importance of the contribution in the continental input of salts in glacial periods.

Keywords: Antarctica, continental contribution, chemical precipitation, emissions biological, sea spray.

INTRODUÇÃO

A história geológica da Antártica exhibe condições climáticas alternadas de aquecimento e resfriamento, documentadas, respectivamente, por rochas glaciais e florestas fósseis. O atual manto de gelo começou a se formar há apenas 30 milhões de anos (Ma) (Dutra, 2004; Campos, 2007).

A Antártica é o continente mais frio e seco da terra, sendo caracterizada por um clima frio e árido (Campbell & Claridge, 1987).

A precipitação média anual fica entre 30 e 70 mm, na região central e 400 a 600 mm, na região costeira (Izaguirre, 2000; Campbell & Claridge, 1987). Devido à influência das correntes marítimas, as zonas costeiras apresentam temperaturas mais amenas, com média anual de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (atingindo valores entre $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ no verão e $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ no inverno). Por outro lado, no interior do continente, a média anual é $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, com temperaturas variando entre $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ no verão até abaixo de $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ no inverno (Campbell & Claridge, 1987; <http://pt.wikipedia.org/wiki/Clima_da_Ant%C3%A1rtica> (Figura 1).

A Antártica pode ser dividida em duas regiões distintas, separadas por uma extensa cadeia de montanhas, que atravessa o continente, denominada Montanhas Transantárticas (Figura 2). A Antártica Oriental é maior, coberta por um manto de gelo mais extenso e espesso, cujo assoalho rochoso é constituído por rochas antigas, do Pré-Cambriano (mais de 540Ma) e das eras Paleozóica e Mesozóica (mais novas que 540Ma, até 65Ma). Trata-se de uma região mais estável, comparável à metade brasileira da América do Sul. A Antártica Ocidental, por sua vez, é formada

por terrenos mais jovens, que sofreram dobramentos e intenso vulcanismo, principalmente durante as eras Mesozóica e Cenozóica, analogamente à faixa andina do oeste da América do Sul, da qual pode ser considerada uma continuação. É formada pela junção de vários pedaços da crosta da Terra ou microcontinentes (Campbell & Claridge, 1987; Bose *et al.* 1990; Machado & Brito, 2006; Campos, 2007).

A Antártica Oriental é mais fria que a Ocidental por ser mais elevada (Figura 2). As massas de ar raramente penetram muito no continente, deixando seu interior frio e seco. O gelo no interior do continente dura muito tempo, apesar da falta de precipitação para renová-lo. A queda de neve não é rara no litoral, onde já se registrou a queda de 1,22 metro em 48 horas. Também é um continente com ventos fortes, registrando-se ventos com velocidades superiores a 200 km/h na região costeira, sendo a média nestes locais de 100 km/h <<http://www.aad.gov.au>>. No interior, entretanto, as velocidades são tipicamente moderadas (www.antarcticconnection.com).

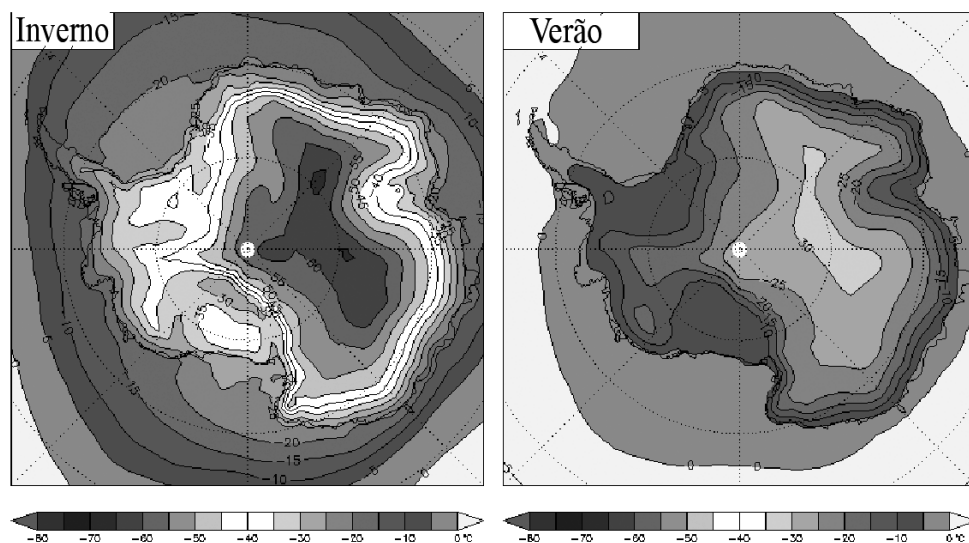


Figura 1 – Variação da temperatura na superfície da Antártica no inverno e no verão.

Fonte: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Clima_da_Ant%C3%A1rtica>.

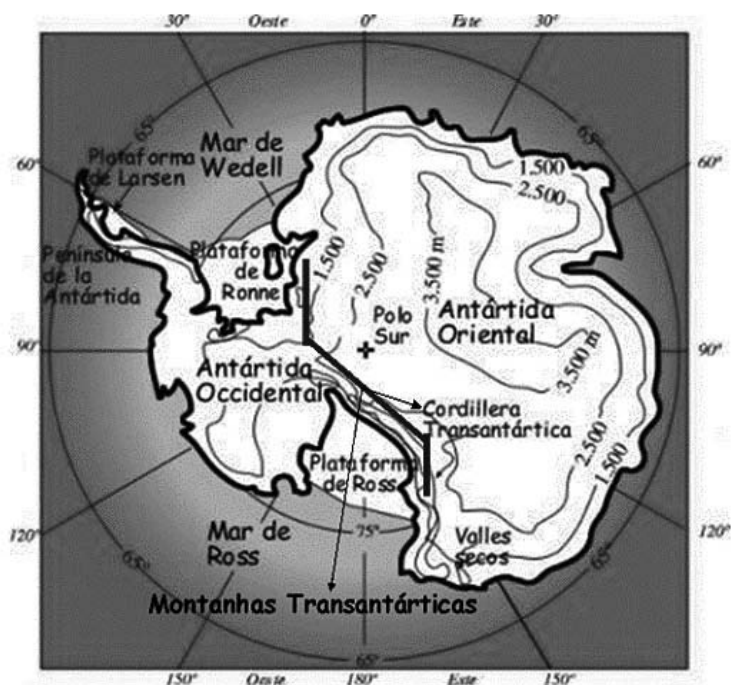


Figura 2 – Mapa do continente antártico na atualidade, com topografia aproximada em metros. Fonte: Uriarte (2010).

A maior parte da Antártica possui clima extremamente frio e árido, e, conseqüentemente, os solos possuem muitas semelhanças com solos de deserto de outras partes do mundo (Claridge & Campbell, 1968a,b, 1982; Ugolini & Bockheim, 2008). Em particular, ao longo do litoral e nas Montanhas Transantárticas (Figura 2), onde a evaporação excede a precipitação, acumulando sais solúveis ao longo do perfil do solo (Campbell & Claridge, 1987).

Particular atenção tem sido focada sobre a origem e distribuição destes sais, sendo desenvolvidos estudos por meio da pedologia, geologia e geoquímica (Ugolini & Bockheim, 2008). Esses estudos são importantes porque, em primeiro lugar, os sais são importantes indicadores das condições do intemperismo passado e presente na Antártica (Campbell & Claridge, 1987), contribuindo para a compreensão dos processos de intemperismo e formação dos solos, segundo porque estão relacionados intimamente com

a história glacial das áreas dos Vales Secos (Morikawa *et al.*, 1975).

Estudando a origem dos íons magnésio e potássio no Lago Vanda, Antártica, Morikawa *et al.* (1975) verificaram que a região do vale seco do Sul da Terra de Vitória é uma das maiores áreas livres de gelo, e contém lagos e solos que se destacam por seu caráter salino. Alguns estudos sobre a distribuição e química das eflorescências salinas na costa da Baía Prydz, leste da Antártica, tem sido feitos para tentar recompor o padrão aparente de distribuição do gelo usando a distribuição e o desenvolvimento dos elementos atmosféricos <<http://www.fms.its.utas.edu.au>>.

A Antártica é o mais perfeito laboratório natural do planeta para estudos de mudanças ambientais, entre outras peculiaridades, pelo fato de o gelo registrar, em sua composição, a composição atmosférica. A importância do gelo do mar na atmosfera, oceano e vida marinha é enorme. Sua presença e extensão alteram

a iluminação, temperatura, salinidade e densidade da água do mar (Nascimento, 2007).

Segundo Simões (2007) os chamados “testemunhos de gelo” conservam 800 mil anos de atividade, tornando a estratigrafia e a química do gelo polar os melhores arquivos sobre a evolução do clima e da atmosfera, ao longo de milhares de anos, provendo dados com resolução sazonal.

Este estudo teve como objetivo realizar uma revisão sobre a origem dos sais presentes no continente antártico, sendo pormenorizado as principais formas e fontes salinas que ocorrem.

Sais no antártico: ocorrência e origem

A acumulação de sais pode ocorrer de várias formas: eflorescências salinas sobre rochas, com acumulações sobre pedras e sobre a superfície do solo, dispersos ao longo do perfil do solo, ou como discretos horizontes constituído em grande parte de sal. Em muitos casos, lagos salinos pode ser o último sumidouro para a acumulação de sais (Campbell & Claridge, 1987).

Os sais no antártico são constituídos, em sua maioria, por cloretos, nitratos e sulfatos (de sódio, potássio, cálcio e magnésio), e sua composição e proporção variam consideravelmente de solo para solo. Entretanto, a maioria dos ânions e cátions mencionados podem ser encontrados em todos os solos e, quase todas as possíveis fases cristalinas, podem ser formadas pela combinação desses cátions e ânions, sendo identificadas em material extraído por processos físicos a partir do solo (Campbell & Claridge, 1987).

A origem dos sais é um tema de grande discussão, podendo ocorrer através da precipitação atmosférica, intemperismo de rochas e origem marinha (spray salino) (Campbell & Claridge, 1987). Durante décadas, diversas explicações para as altas concentrações de sal nos Vales Secos da Antártica foram apontadas: um antigo mar que um dia teria coberto a região; os fortes ventos antárticos que teriam carregado para o continente o sal

do mar; sulfatos biologicamente produzidos; erosão química e física de rochas ou atividade hidrotermal (Bao *et al.*, 2000).

Uma possível explicação para as concentrações de sal misteriosamente altas nos solos expostos nos Vales Secos da Antártica foi proposta por Bao *et al.* (2000). Segundo estes autores, o fenômeno se deve a emissões biológicas de enxofre nos oceanos que circundam o continente. O depósito atmosférico de sulfatos provenientes de algas marinhas emissoras de enxofre seria o principal responsável pela alta concentração de sal. A descoberta foi feita a partir da análise química de amostras de solo recolhidas na região.

A partir dessas análises, constatou-se uma anomalia em um isótopo de oxigênio nos sulfatos recolhidos dos solos da região localizada próxima à estação antártica norte-americana McMurdo. Por meio desse resultado, Bao *et al.* (2000) concluíram que esses sulfatos vieram de gases sulfúricos que haviam sofrido reações químicas na atmosfera e foram transportados para os Vales Secos. Como a Antártica fica a milhares de quilômetros das fontes de gases sulfúricos produzidos pelo homem devido à queima de combustíveis fósseis, os autores deduziram que esses sulfatos vieram majoritariamente das algas produtoras de enxofre abundantes no oceano em torno do continente.

Bao *et al.* (2000) constataram, também, que, nas áreas dos Vales Secos próximas à costa, os sulfatos biologicamente produzidos respondiam por uma menor fração da quantidade total de sal. No entanto, à medida que se avançava em direção ao continente, essa proporção aumentava substancialmente. Esses autores descobriram também que regiões mais profundas dos Vales Secos apresentavam maiores concentrações de sulfatos biologicamente produzidos quando comparado com a superfície.

Segundo Ugolini & Bockheim (2008), a composição dos sais segue uma tendência latitudinal, com a prevalência de cloreto ao longo da costa e uma tendência decrescente para sulfatos e bases solúveis em direção ao interior da costa (Quadro 1).

Quadro 1 – Média da concentração de alguns sais na neve e a relação entre cloreto e sulfato, interior da estação Mirny.

| Distância da costa (km) | Cl ⁻ | SO ₄ ⁻² | HCO ₃ ⁻ | Ca ⁺² | Mg ⁺² | Na ⁺ +K ⁺ | Cl ⁻ /SO ₄ ⁻² |
|-------------------------|--------------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------|------------------|---------------------------------|--|
| | mg L ⁻¹ | | | | | | |
| 0-10 | 4,9 | 1,0 | 1,9 | 0,9 | 0,4 | 2,9 | 4,9 |
| 10-60 | 1,6 | 0,4 | 2,1 | 0,5 | 0,3 | 1,0 | 4,0 |
| 60-400 | 0,8 | 0,4 | 1,8 | 0,5 | 0,3 | 0,4 | 2,0 |
| 40-900 | 0,7 | 0,3 | 1,9 | 0,4 | 0,2 | 0,4 | 2,3 |
| 900-1500 | 0,3 | 0,3 | 1,0 | 0,3 | 0,1 | 0,2 | 1,0 |

Fonte: Adaptado de Matveev (1970).

Quadro 2 – Concentração média (pg m⁻³) de alguns elementos de provável origem marinha, (sprays marinhos), no verão de 1974-75, Pólo Sul.

| | Elementos avaliados | | | | | | | | | |
|--------------|---------------------|------|------|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|
| | S | Cl | Br | I | Fe | Al | Na | Ca | Mg | K |
| Concentração | 49000 | 2600 | 2600 | 740 | 620 | 820 | 3300 | 490 | 720 | 680 |

Fonte: Adaptado de Macnhaut et al. (1979).

Estudos sobre a repartição pormenorizada das contribuições continental e marinha de depósitos de sal na Antártida Oriental durante o último ciclo glacial foram realizados por Bigler *et al.* (2006). Estes autores verificaram que os depósitos de sódio, cálcio e cloreto (conservados em núcleos de gelo) são de origem marinha e continental.

Estes sais fornecem importantes registros, ajudando a reconstruir o passado de processos climáticos. No entanto, é difícil separar claramente as contribuições individuais das duas origens, principalmente a continental durante os períodos glaciais. Nesta época, as fontes continentais representaram mais de 90% do total da entrada de Ca²⁺, sendo essa contribuição variável de acordo com os acontecimentos ocorridos durante os períodos glaciais. Durante o Holoceno, foi inferior a 50%, mas foi significativamente mais elevada durante o último período interglacial. A contribuição de sal marinho (aerossol) para a entrada de Na⁺ total, que era mais dominante e superior a 90%, foi reduzida para apenas dois terços dos valores máximos durante a última era glacial. Assim, a contribuição de entrada de Na⁺ por origem continental parece ser mais importante do que anteriormente se

pensava. Portanto, faz-se necessário a correção dos registros de entrada de Na⁺ continental (Bigler *et al.*, 2006).

Avaliando os atributos químicos de Criosolos Ornitogênicos da Baía do Almirantado, Simas *et al.* (2003) verificaram teores de Na variando de 1260 a 1440 mg dm⁻³. Os autores relataram que estes teores devem-se ao aporte de Na⁺ por sprays marítimos e à baixa lixiviação em função da extrema aridez deste local (partes mais elevadas da paisagem). No Quadro 2, verifica-se a concentração de alguns elementos derivados, provavelmente, de origem marinha.

A química da precipitação em diferentes partes da Antártica

Antártica Oriental

Um grande número de trabalhos tem avaliado a composição da precipitação na Antártica Oriental. Matveev *et al.* (1963, 1970) analisaram amostras coletadas da precipitação atmosférica, neve e gelo das zonas costeiras e interiores ao leste da Antártica. Nas amostras da precipitação, os sais de origem

marinha variaram em concentração, de 100 mg L⁻¹ durante a primeira manifestação de precipitação para um mínimo de cerca de 10 mg L⁻¹ ao final de uma tempestade ciclônica.

Na Molodezhnaya, no litoral leste da Antártida, Macnamara & Usselman (1972) avaliaram amostras de precipitação ao longo do ano e, encontraram quantidades consideráveis de sais com uma composição semelhante à da água do mar. Johnson & Chamberlain (1981) estudaram uma série de núcleos de gelo da Law Dome no litoral leste da Antártica. Eles descobriram que as concentrações de sódio, magnésio, potássio e cálcio nas camadas superficiais da neve diminuíram com o aumento da distância do mar (costa) (Quadro 3).

Nenhum desses autores relataram a presença de nitrato. Não se sabe se era inexistente nos depósitos estudados ou se a sua presença não foi verificada. No entanto, é possível, também, que, no ambiente relativamente quente e úmido do litoral Leste da Antártica, os nitratos são lixiviados para fora mais rapidamente do que outros sais (Campbell & Claridge, 1987). Wilson & House (1965) constataram que a neve acumulada no Pólo Sul continha pequenas quantidades de nitrogênio sob a forma de nitrato.

Pólo Sul

Estudos medindo as concentrações de nitrato nos núcleos do Pólo Sul e de Vostok foram realizados por Parker *et al.* (1981). Os autores encontraram concentrações entre 1,0 e 2,5 µg L⁻¹. A variação da concentração com

o tempo (estimado por contagem anual de camadas) foi a mesma em ambas as localidades e parecia corresponder com manchas solares. Uma vez que as concentrações de sódio não variaram na mesma forma, Parker *et al.* (1981) concluíram que os nitratos não foram provenientes de uma fonte marinha, e sim de algum processo induzido pela radiação solar.

Península Antártica

A Antártica Marítima, onde a precipitação é muito mais elevada, por estar circundada por oceano, possui maior influência da precipitação química em relação ao restante do continente. No entanto, a maior contribuição está sendo por aerossóis “spray marinho” (Campbell & Claridge, 1987).

Estudando a química da porção final de uma elevação de 1660 m sobre o gelo da Ilha James Ross, na ponta Norte da Península Antártica, Aristarain *et al.* (1982) descobriram que a neve derretida possuía teores de potássio, cálcio e sódio maiores do que a água do mar. Esses autores avaliaram as variações na composição da precipitação durante um período de 15 anos e verificaram que a concentração de sulfatos e cloretos estava presente em maiores quantidades quando comparados com as concentrações desses sais na água do mar. A quantidade de sulfatos que atingem a ilha James Ross no verão é superior à quantidade do inverno (Aristarain *et al.*, 1982). Estes autores acreditam que os sulfatos chegam como ácido sulfúrico, originários a partir da oxidação de compostos de enxofre produzido pelos organismos marinhos.

Quadro 3 – Variação nas concentrações de Na⁺, K⁺, Mg⁺² e Ca⁺² em camadas superficiais de neve de acordo com a distância da costa, Law Dome, Antártida Oriental.

| Distância da costa (km) | Elevação (m) | Concentração (µg L ⁻¹) | | | |
|-------------------------|--------------|------------------------------------|----------------|------------------|------------------|
| | | Na ⁺ | K ⁺ | Mg ⁺² | Ca ⁺² |
| 5 | 380 | 560 | 27 | 66 | 22 |
| 50 | 920 | 200 | 14 | 24 | 10 |
| 110 | 1400 | 50 | 6 | 5 | 4 |

Fonte: Adaptado de Johnson & Chamberlain (1981).

Lagos salinos

Nas regiões livres de gelo da Antártica, lagos salinos são encontrados com frequência, em delimitadas bacias de drenagem, atuando como sumidouros, acumulando sais lixiviados a partir de áreas adjacentes, derivados do mar ou que chegam por precipitação (Campbell & Claridge, 1987).

No Vestfold Hills (costa leste Antártica.), por exemplo, muitos dos lagos ocupando as pequenas bacias, são salgados (McLeod, 1964). Estes lagos salgados ocorrem em um vale interior alinhado a partir da costa, e todos se encontram totalmente abaixo do nível do mar. O lago Deep Lake, por exemplo, reside em uma elevação de 50 m abaixo do nível do mar, e contém mais de 200 g L⁻¹ de sólidos totais dissolvidos com uma composição semelhante à da água do mar.

Esses sais não poderiam ter sido obtidos a partir das rochas adjacentes, que são rochas metamórficas de alto grau de intemperismo, nem de “sprays marinhos”, uma vez que existem lagos doces mais pertos do mar. A explicação mais óbvia para a presença desses sais é que o vale onde se localizam esses lagos era um fiorde, sendo isolados por uma queda no nível do mar ou pela elevação da região. Como a água do mar ficou concentrada devido à evaporação, ocorreram grandes alterações, e sais, em grande parte de sulfato de sódio (mirabilite), foram depositados, principalmente em torno dos lagos. Outros lagos com composições semelhantes também são encontrados em Bunger Hills, no leste da Antártica (Campbell & Claridge, 1987).

Alguns trabalhos tem sido realizados em lagos de água doce, como o Enderby, perto Molodezhnaya Station (Macnamara, 1968), e o Schirmacher Oasis (Bardin & Leflat, 1965; Simonov & Bonch-Osmolovskaya, 1968). Embora não salino, esses lagos contêm baixas concentrações de sais, sendo suas águas, provavelmente, água do mar fortemente diluída pelo derretimento de gelo. Outro lagos, mais para o interior, contêm pequenas quantidades de sais derivados do intemperismo das rochas, grande parte dos

bicarbonatos alcalinos (Campbell & Claridge, 1987). Simonov & Bonch-Osmolovskaya (1968), acreditam que o bicarbonato de sódio contido nas águas que drenam para as lagoas, reagem com o magnésio precipitado de carbonato de magnésio, o que conduz a uma maior proporção de cloreto de sódio e sulfato nas águas da lagoa do que o encontrado em água do mar sozinho. A água do mar pode chegar a estes lagos sob a forma de um aerossol a partir do mar, 80 km para o norte em uma pequena prateleira de gelo.

Depósitos de sais nas regiões costeiras

Muitas zonas costeiras da ilha Victoria, bem como as regiões costeiras, contêm depósitos de sais de sulfato (mirabilite - Na₂SO₄·10H₂O e gesso - CaSO₄). Depósitos de mirabilite também podem ocorrer até 1500 km mais a oeste, e ocorrem também em outras zonas livres de gelo perto da costa. Nestas duas áreas, os depósitos são encontrados em lagos que anteriormente foram ocupados por água do mar, e que foram isolados pela elevação costeira (Dort & Dort, 1970, 1972). Embora o sulfato de sódio não seja comumente precipitado pela evaporação de água do mar em temperatura normal, a deca mirabilite é o primeiro mineral formado a partir da cristalização de gelo na água do mar. Nelson & Thompson (1954) mostraram que, a uma temperatura de -8,2 °C, 88% do volume de água do mar deve cristalizar ao gelo antes que a mirabilite comece a ser formada.

Depósitos de sais no solo

Depósitos de sal em solos foram estudados em dois tipos de terreno, em primeiro lugar, os pequenos, isolados, áreas livres de gelo da Antártica Oriental que ocorrem ao longo da costa ou em nunataks (parte rochosa de uma montanha ou pico que não está coberta por gelo, embora esteja em uma geleira ou campo de gelo) até 150 km; em segundo lugar, as maiores áreas livres de gelo das

Montanhas Transantártidas, que vão desde ambientes costeiros do Norte até muitas centenas de quilômetros da costa (Campbell & Claridge, 1987). Segundo Voronov & Spiro (1965), o mecanismo básico que provoca a diferenciação desses sais é a migração. A maioria dos sais são inicialmente derivados sob a forma de aerossol e, nas regiões costeiras, sais podem estar presentes em solução em concentrações suficientemente altas para a precipitação de mirabilite, dependendo da temperatura. A importância crescente de sulfato de magnésio em relação a outros sais não foi claramente explicado por Voronov & Spiro (1965), embora possa estar relacionado com a relativa facilidade com que os outros íons migram para fora do sistema.

A distribuição do sal cristalino na região McMurdo Sound ocorre principalmente como eflorescências salinas e incrustações na superfície do solo ou como acumulações sob superfície de pedras. Mais de 30 diferentes fases de sal foram notificados a partir dessa região, mas apenas 10 delas são generalizados. Estas são: thenardite (Na_2SO_4), gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), halite (NaCl), calcite (CaCO_3), darapskite ($\text{NaNO}_3 \cdot \text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), nitrato de sódio (NaNO_3), mirabilite ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), bloedite ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), epsomite ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) e hexahydrate ($\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) (Keys e Williams, 1981).

O Vale Victoria contém considerável acumulação de gesso, particularmente como depósitos ou horizontes em volta do lago Vashka (Gibson, 1962). Estes depósitos podem marcar o nível anterior de um lago altamente salino semelhante. No entanto, o sal cristalino representa apenas a fase mais estável, compreendendo os hidratos e sais duplos que são capazes de formar a partir de íons presentes na solução fases nas temperaturas e umidades prevalentes em cada site. Montanhas podem ocorrer em até 3.000 m acima do nível do mar. Grandes quantidades de sal podem estar contidas em alguns desses perfis. Por exemplo, um solo no topo da geleira Shackleton, em uma elevação de 2700 m, continha cerca de 40

kg de sais por metro quadrado (Campbell & Claridge, 1987).

Evidências de precipitação de sais

Wilson (1959) mostrou que a camada superior do oceano é enriquecida com nitrato e materiais biológicos, que são transferidos para a atmosfera por fortes ventos. Ele sugeriu que esta é a fonte de compostos nitrogenados encontrados nas neves de regiões temperadas. Perto dos oceanos, a maior parte do nitrogênio ocorre na forma de amônia ou de compostos proteicos, mas estes são oxidados lentamente, provavelmente pelo ozônio produzido pela ação da luz ultravioleta na atmosfera superior. Do mesmo modo, sulfetos são oxidados a sulfatos e compostos de iodo a iodatos.

Lodge & Pate (1966) mostraram que a atmosfera sobre oceanos tropicais contém amônia, mas que a proporção de óxidos de nitrogênio aumenta mais nas massas terrestres. A proporção de cloreto de precipitação atmosférica decresce com o aumento da distância do mar, através da remoção de cristais de cloreto de sódio que atuam como condensação dos núcleos e são precipitados da atmosfera. Fischer *et al.* (1969) revelaram que mais da metade das partículas do ar de origem sobre a região compreendida McMurdo Sound possui material variando de ácido sulfúrico e sulfato de amônio, enquanto menos de 10% de cloreto de sódio.

Aristarain *et al.* (1982) consideraram que a origem do nitrogênio, enxofre e sais de iodo na Antártida, em última instância, é biológico. Eles são obtidos a partir da superfície do oceano, como descrito por Wilson (1959), e transportados para as regiões polares pela atmosfera que circula para manter o anticiclone permanentemente centrado sobre o continente antártico. Durante o transporte, esses compostos são oxidados a nitratos, sulfatos e iodatos. A maior parte desses compostos são eliminados por precipitação atmosférica, mas, como já explicado, cloretos são removidos preferencialmente. O nitrogênio é trans-

portado como nitrato e parece ser derivado, em grande parte por oceanos tropicais, mas pode muito bem ser sulfato de uma fonte adicional nos mares Surrounding da Antártica, conforme descrito por Aristarain *et al.* (1982).

Os sais são precipitados com a neve sobre o planalto central, em quantidades e proporções encontradas por Wilson & House (1965) ou por Maenhaut *et al.* (1979), e são transportados com a neve para áreas de terra nua na borda do planalto, onde se acumulam quando a neve derrete e evapora. Um outro mecanismo que deve ser postulado é a ausência de cloreto de sódio nos solos do Maciço Roberts e para a sua presença na neve no Pólo Sul. Uma vez que o cloreto de sódio é mais higroscópico do que os outros sais, pode dissolver, infiltrar e aprofundar-se na massa de gelo. Neste contexto, Wilson & House (1965) relataram a presença de cloreto de sódio na neve em uma profundidade de 13 m,

mas não foi observado cloreto de sódio na neve superficial, no Pólo Sul.

Compostos tais como NH_4^+ e SO_4^{2-} , HNO_3 e NaCl podem atingir o solo do oceano tropical através da circulação superior atmosférica de neve polar, enquanto que o cloreto de sódio pode ser derivado também de oceanos locais. Cálcio e magnésio são provenientes em grande parte por intemperismo de minerais ferromagnesianos (augite, hornblenda), dolorites, e a partir de biotites. O potássio é derivado em grande parte por meteorização da muscovite e, em uma pequena escala, a partir de feldspato potássico. Pequenas quantidades de cálcio, magnésio e potássio podem ser derivadas de sais de origem marinha. O sódio pode ser obtido por intemperismo de feldspatos de sódio, mas é em grande parte de origem marinha. Carbonatos derivam em grande parte da dissolução de mármore e outras rochas calcárias (Figura 3).

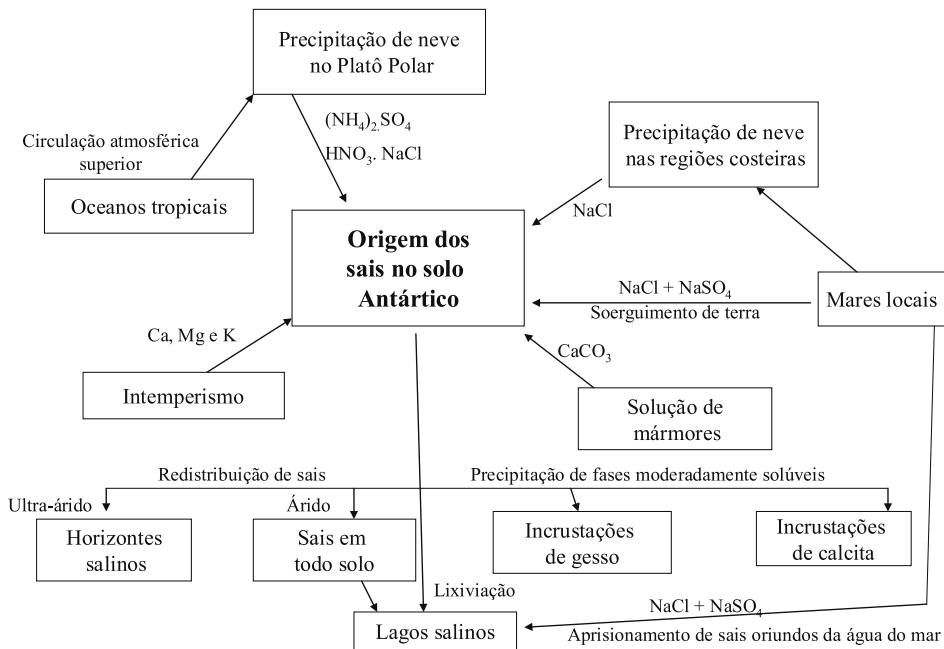


Figura 3 – Fluxograma mostrando os caminhos prováveis para a derivação dos sais nos solos da Antártica. Fonte: Adaptado de Campbell & Claridge (1987).

Os sais são adicionados ao solo pela precipitação atmosférica, por liberação através de rocha ou por depósitos de uma antiga salina (Figura 3). Ugolini & Anderson (1973) mostraram que sais migram em soluções saturadas de sal que pode existir em baixas temperaturas sobre os solos da Antártica.

Sais são dissolvidos na umidade do solo. A maioria dos sais solúveis, ou aqueles capazes de formar soluções com a menor pressão de vapor, dissolvem-se em primeiro lugar, e são movidos ao longo dos filmes de umidade intragregados até que as temperaturas se tornem altas o suficiente para os filmes se evaporarem. Quando as condições permanecem constantes, sais estão concentrados em horizontes; quando estas são variáveis, sais podem ser distribuídos em todo o perfil. Nos regimes de umidade ultra-áridos, onde a temperatura do solo nunca sobe acima do ponto de congelamento, os mecanismos de transporte de sal são limitados, pois a umidade não pode ocorrer ao longo dos intragregados. Estes sais tendem a concentrar em um determinado horizonte, onde as condições higroscópicas está estabelecida pelo acúmulo de sais. Nos regimes de umidade árido, onde as temperaturas são quentes, e ocasionalmente existe a presença de água líquida, sais podem ser redistribuídos e são geralmente dispersos ao longo do perfil. Nestas situações também, a umidade na forma de neve se acumula na superfície (Figura 3).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diferentes composições de sais solúveis em água nos solos da Antártica revelam que eles têm diversas origens. Perto da costa, influências marinhas são dominantes, encobrendo quaisquer contribuições do intemperismo das rochas. Mas para o interior, a influência do intemperismo é mais evidente, ao passo que a influência de circulação atmosférica superior torna-se importante também. Ressalta-se também, a importância da contribuição continental no aporte de sais nos períodos glaciais.

Nos Vales Secos da Antártica, uma possível explicação para as concentrações de sal misteriosamente altas nos solos expostos pode ser devida a emissões biológicas de enxofre nos oceanos que circundam o continente. Nestes vales, a influência de sais derivados de corpos de água do mar predomina, sendo a composição dos sais consideravelmente modificada pela história geológica da região.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Antarctic Connection - *Antarctic winds & the wind chill factor (on line)*. Disponível em <<http://www.antarcticconnection.com/antarctic/weather/wind.shtml>> (acesso em: 01 Setembro 2009).
- Aristarain, A.J.; Delmas, R.J. & Briat, M. (1982) - Snow chemistry on James Ross Island (Antarctic Peninsula). *J. Geophys. Res.* 87:11004 - 1012.
- Australian Antarctic Division - *Weather (on line)* Disponível em: <<http://www.aad.gov.au/default.asp?casid=1548>> (acesso em: 17 Agosto 2009).
- Bao, H.; Campbell, D.A.; Bockheim, J.B. & Thiemens, M.H. (2000) - Origins of sulphate in Antarctic dry-valley soils as deduced from anomalous 170 compositions. *Nature* 407: 499-502.
- Bardin, V.I. & Leflat, O.M. (1965) - Chemistry of waters in the Schirmacher ponds. *Inf. Bull. Soviet Antarct. Exped.* 52: 361-363.
- Bigler, M.; Röthlisberger, R.; Lambert, F.; Stocker, T. F. & Wagenbach, D. (2006) - Aerosol deposited in East Antarctica over the last glacial cycle: Detailed apportionment of continental and sea-salt contributions. *Journal of Geophysical Research* 111: 1-14.
- Bockheim, J.G. (1979) - Relative age and origin of soils in eastern Wright Valley, Antarctica. *Soil Sci.* 128: 142-152.
- 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, E. L. (Eds.) *Antarctic Pa-*

- leobiology. Springer Verlag, New York, pp. 118- 148.
- Campbell, I.B. & Claridge, G.G.C. (1982) - The influence of moisture on the development of soils of the cold deserts of Antarctica. *Geoderma* 28: 221-238.
- Campbell, I.B. & Claridge, G.G.C. (1987) - *Antarctica: soils, weathering processes and environment*. Elsevier, Amsterdam, 368 pp.
- Campos, A.C.R. (2007) - *Antártica: Uma breve introdução*. Centro de Pesquisas Antárticas. Universidade de São Paulo, 50 pp.
- Claridge, G.G.C. & Campbell, I.B. (1968a) - Some features of Antarctic soils and their relation to other desert soils. Trans. 9th Int. Congr. *Soil Sci.* 4, 541-549.
- Claridge, G.G.C. & Campbell, I.B. (1968b) - Origin of nitrate deposits. *Nature* 217: 428-430.
- Claridge, G.G.C. & Campbell, I.B. (1982) - The influence of moisture on the development of soils of the cold deserts of Antarctica. *Geoderma* 28: 221-238.
- Dort, W. & Dort D.S. (1970) - Sodium sulphate deposits in Antarctica. *Mod. Geol.* 1: 97-117.
- Dort, W. & Dort, D.S. (1972) - Marine origin of sodium sulphate deposits in Antarctica. In: Adie, R.J. (Ed.) *Antarctic geology and geophysics*. Universitetsforlaget, Oslo, pp. 639-671.
- 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: 401-410.
- Fischer, W.H.; Lodge, J.P.; Pate, J.B. & Caddle, R.D. (1969) - Antarctic atmospheric chemistry: preliminary exploration. *Science* 164: 66-67.
- Gibson, G.W. (1962) - Geological investigations in southern Victoria Land. Antarctica. Evaporite salts in the Victoria Valley region. *Geol. Geophys* 5: 361-374.
- Izaguirre, I. (2000) - *Antártida: descubriendo el continente blanco*. Ediciones Caleuche, 192p.
- Johnson, B.B. & Chamberlain, J.M. (1981) - Sodium, magnesium, potassium and calcium concentrations in ice cores from the Law Dome, Antarctica. *Geochim. Cosmochim. Acta* 45: 771-786.
- Kiernan, K.; Fink, D.; Yore, D.; White, D.; McConnell, A. & Sigurdsson, I. (2009) - *Bedrock erosion in the Larsemann Hills, Antarctica (Staff) (on line)*. Disponível em <<http://fcms.its.utas.edu.au/scieng/geog/project.asp?lProjectId=2172>> (acesso em: 25 agosto 2009).
- Lodge, J.P. & Pate, J.B. (1966) - Atmospheric gases and particulate matter over Panama. *Science* 153: 408-410.
- Machado, M. C. S. & Brito, T. (2006) - *Antártica: ensino fundamental e ensino médio*. Coleção explorando o ensino. 167 pp.
- Macnamara, E.E. (1968) - Some limnological observations from Enderby Land, Antarctica. *Inf. Bull. Soviet Antarct. Exped.* 7: 246-254.
- Macnamara, E.E. & Usselman, I. (1972) - Salt minerals in soil profiles and as surficial crusts, coastal Enderby Land, Antarctica. *Geological Society of America Bulletin* 83: 145-150.
- Maenhaut, W.; Zoller, W.H.; Duce, R.A. & Hoffman, G.L. (1979) - Concentration and size distribution of particulate trace elements in the south polar atmosphere. *Journal of Geophysical Research* 84: 2421-2431.
- Matveev, A.A. (1963) - The chemical composition of atmospheric precipitations on the basis of observations at Mirny. *Meteorologheskie Issledovania* 5: 100 - 107.
- Matveev, A.A. (1970) - Chemical hydrology of regions of East Antarctica. *Journal of Geophysical Research* 75: 3686-3690.
- McLeod, I.R. (1964) - The saline lakes of the Vestfold hills, Princess Elizabeth Land. In: R.J. Adie (Ed.) *Antarctic geology north Holland*. Amsterdam, pp. 65-72.
- Morikawa, H.; Minoto, I. & Ossaka, J. (1975) - Origin of magnesium and potassium ions in Lake Vanda, Antarctica. *Nature* 254: 583-584.
- Nascimento, C. D. (2007) - *O Programa Antártico Brasileiro – PROANTAR: questões de gestão e representação da informação no contexto da produção*

- científica*. Mestrado em Ciência da Informação. Universidade Federal Fluminense. 219 pp.
- Nelson, K.H. & Thomson, T.G., (1954) - Crystallisation of salts from sea water by frigid concentration. *J. Mar. Res.* 13: 166-182.
- Parker, B.C.; Zeller, E.J. & Gow, A.J. (1981) - Nitrogenous chemical composition of Antarctic ice and snow. *Antarct. J. U.S.* 16:79-81.
- Simas, F.N.B.; Schaefer, C.E.G.R; Albuquerque Filho, M.R.; Michel, R.F.M; Dias, L.E.; Borges Jr., M.; Prates, L. (2004) - Atributos químicos de criossolos ornitogênicos da Bahia do Almirantado, Antártica. In: Schaefer, C.E; Francelino, M.R; Simas, F.N.B; Albuquerque Filho, M.R. *Ecossistemas costeiros e monitoramento ambiental da Antártica Marítima: Bahia do Almirantado, Ilha Rei George*. Viçosa: NEPUT/DPS, 192 pp.
- Simões, J. C. (2007) - *O papel ambiental do gelo: por que pesquisar geleiras (on line)*. Disponível em: <<http://www.ufrgs.br/antartica/nov-pesq-br.html#relevancia>>. (acesso em: 20 janeiro 2007).
- Simonov, T.M. & Bonch-Osmolovskaya, K. S. (1968) - Chemistry of water, ice and snow in the Schirmacher Ponds. *Inf. Bull. Soviet Antarct. Exped.* 7: 260-264.
- Ugolini, F.C. & Anderson, D.M. (1973) - Ionic migration and weathering in frozen Antarctic soils. *Soil Science* 115: 461-470.
- Ugolini, F.C.A. & Bockheim, J.G. (2008) - Antarctic soils and soil formation in a changing environment: A review. *Geoderma* 144: 1-8.
- Uriarte, A. (2010) - *El hielo de la Antártida (on line)*. Disponível em <<http://images.google.com.br/imgres?imgurl=http://www.mitosyfraudes.org/images15/ant.jpg&imgrefurl>>. (acesso em: 26 Fevereiro 2010).
- Voronov, P.S. & Spiro, N.S. (1965) - Composition of soluble salts in unconsolidated quaternary deposits of the central and western sectors of East Antarctica. *Problemi Antarkitiki* 19:10-14.
- Wikipédia - *Clima da Antártica (on line)*. Disponível em <http://pt.wikipedia.org/wiki/Clima_da_Ant%C3%A1rtica>. (acesso em: 26 Fevereiro 2010).
- Wilson, A.T. (1959) - Surface of the ocean as a source of airborne nitrogenous material and other plant materials. *Nature* 184: 99- 101.
- Wilson, A.T. & House, D.A. (1965) - Chemical composition of South Polar snows. *Journal Geophysical Research* 70: 5515-5518.