Concepção de um Modelo Dinâmico para Análise da Evolução Glacial: Estudo de caso para a geleira Grey, Chile

Victor Huggo Lessa Rosolem[*1]; Dinalva A. Sales[2]; Jean M. A. Espinoza[3];
Bento Almeida Gonzaga[4]; Isadora Emmendorfer[5]

Resumo: A Geleira Grey, situada no Campo de Gelo Patagônico Sul, Chile, desempenha um papel fundamental no sistema hidrológico andino e constitui uma fonte de água doce para a região circundante. A dinâmica desta formação glacial representa um reflexo das alterações climáticas globais, atuando como um indicador sensível do aquecimento planetário e da variabilidade nos padrões de precipitação, além de contribuir para a elevação do nível do mar. O presente estudo tem como objetivo a elaboração de um modelo dinâmico para analisar os indicadores do balanço de massa da Geleira Grey. Para tal fim, realizou-se uma revisão bibliográfica, visando à análise das equações e variáveis relacionadas ao balanço de massa glacial. A metodologia adotada baseou-se na construção de um diagrama causal, incorporando as variáveis selecionadas. Com base nas relações causais estabelecidas entre estas variáveis, foi elaborado o modelo dinâmico com o *software* Vensim PLE®. Este modelo integra potenciais variáveis climáticas e geomorfológicas, com o propósito de elucidar as complexas interrelações entre os fatores que configuram este sistema glacial. O modelo revela que a precipitação na forma de neve é fundamental para o aumento da massa da geleira, enquanto processos como evaporação, ablação e derretimento resultam na remoção de massa. Pequenas alterações em qualquer desses componentes podem ter efeitos significativos no balanço geral da geleira.

Palavras-chave: Criosfera; Geleiras; Modelagem Computacional; Mudanças Climáticas; Vensim PLE®.

[*] vlessarosolem@gmail.com
[1] Universidade Federal do Rio Grande – FURG/Avenida Itália Carreiros – Km 8, Rio Grande – RS.
[2] Universidade Federal do Rio Grande – FURG/Avenida Itália Carreiros – Km 8, Rio Grande – RS.
[3] Instituto Federal de Santa Catarina – IFSC/Rua Maria Aparecida Barbosa, 153 - Campo Duna, Garopaba - SC.
[4] Universidade Federal do Rio Grande – FURG/Avenida Itália Carreiros – Km 8, Rio Grande – RS.
[5] Universidade Federal do Rio Grande – FURG/Avenida Itália Carreiros – Km 8, Rio Grande – RS.

1 INTRODUÇÃO

A criosfera engloba as partes do sistema terrestre compostas por água em estado sólido, como neve, gelo marinho, mantos de gelo, plataformas de gelo, geleiras, calotas polares e solo congelado (*permafrost*), encontradas tanto em terra quanto no mar (Meredith et al., 2019). Conforme destacado pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) em seu relatório de 2023, as geleiras estão se retraindo e perdendo massa globalmente, acompanhando o aumento das temperaturas atmosféricas (Calvin et al., 2023).

O monitoramento de geleiras apresenta desafios significativos devido à distância e à inacessibilidade das regiões, além das dificuldades operacionais associadas à realização de extensos trabalhos de campo (Scherler et al., 2008). O uso de sensoriamento remoto em geleiras teve início na década de 1970, marcando o início de uma nova era no monitoramento dessas formações, mitigando em parte as limitações e desafios anteriormente enfrentados (Veettil & Kamp, 2019). Dados obtidos por sensoriamento remoto oferecem informações valiosas, atualizadas regularmente e praticamente em tempo real, sobre geleiras e suas características associadas (Taloor et al., 2021).

As geleiras são divididas em duas partes principais: a região de acumulação, onde o ganho de massa supera as perdas devido ao acúmulo de neve ou gelo, e a região de ablação, onde as perdas de massa são maiores devido ao derretimento, evaporação, desprendimento, erosão e avalanches (Hagg, 2022). O balanço de massa das geleiras, que é a diferença entre ganho e perda de massa, indica seu estado de equilíbrio (Cuffey & Paterson, 2010).

Modelos físicos de balanço de massa são essenciais para entender melhor a relação entre parâmetros meteorológicos e o balanço de massa superficial das geleiras (Le Meur et al., 2007). Esses modelos permitem realizar testes de estabilidade, avaliando o impacto de mudanças em diversos parâmetros meteorológicos no balanço de massa, fornecendo embasamento sobre a dinâmica e estabilidade das geleiras (Gerbaux et al., 2005).

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é avaliar a aplicação da modelagem dinâmica visando entender o comportamento do balanço de massa para um estudo de caso na geleira Grey. Para isso, foram utilizadas informações obtidas através de estudo bibliográfico, aliado com o *software* Vensim PLE® para construir o modelo de balanço de massa da geleira.

1.1 Área de Estudo

A geleira Grey (coordenadas geográficas centrais: Lat. 50.9°S, Lon. 73.3°W, Datum WGS84) está localizada na região do Campo de Gelo Patagônico Sul (CGPS). Com uma área de 243 km², deságua no Lago Grey através de três terminais distintos, conforme ilustrado na figura 1.

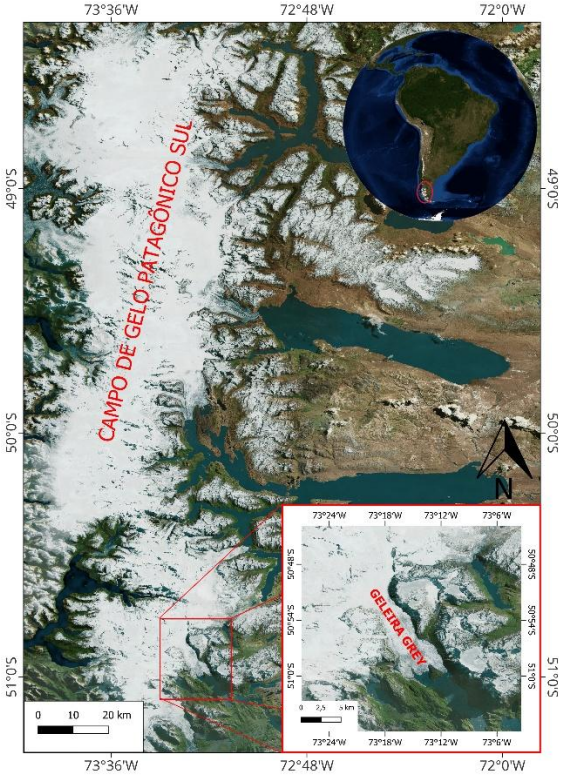

Figura 1: Localização da Área de Estudo Fonte: Bing Maps.

Em um estudo publicado por Rivera e Casassa (2004), foram feitas estimativas detalhadas sobre diversas características das geleiras no Parque Nacional Torres del Paine, no Chile. O estudo abrangeu aspectos como comprimento, área total, extensão de gelo, orientação, posição das frentes das geleiras, além das elevações máxima e mínima.

Os resultados revelaram uma tendência preocupante de diminuição da área coberta por gelo no parque, com uma redução de aproximadamente 62,2 km² desde 1945, o que equivale a uma perda de 8% da área total de gelo registrada nesse período. As estimativas das alterações também mostraram variações na frente da geleira Grey, conforme demonstrado na tabela 1.

Tabela 1: Variação (ma^{-1}) da frente da geleira Grey entre os anos de 1937 à 2003. Fonte: Rivera e Casassa (2004).

Período	Braço Ocidental	Braço Oriental
1937-1945	-14	-12
1945-1975	-31	-3
1975-1986	-23	-16
1986-1995	-50	-56
1995-1997	-768	-125
1997-2000	-60	-75
2000-2003	Estável	-67
Total	-946	-354

A tabela 1 revela que, entre 1937 e 1955, o recuo da geleira Grey ocorreu de forma moderada, mas com uma tendência negativa ao longo dos anos. Os autores Rivera e Casassa (2004) destacam que, entre 1975 e 1995, houve uma notável taxa de degelo nessa geleira, possivelmente associada a um aumento na velocidade do fluxo de gelo e a alterações positivas na temperatura das estações. Isso resultou na extensão longitudinal da porção inferior da geleira, um fenômeno que pode ter desencadeado o processo de *calving*, culminando em uma grande perda de gelo em 1997.

Segundo Davies e Glasser (2012), o intenso derretimento das geleiras da Patagônia é atribuído principalmente ao aumento das temperaturas atmosféricas, conforme confirmado por levantamentos climáticos locais subsequentes (Calvin et al., 2023). Essa tendência de aquecimento, observada ao longo do século XX e início do século XXI, resultou no afinamento e recuo generalizado das geleiras na região. Essas massas de gelo possuem significativa importância econômica, atuando como fontes de nascentes que formam rios utilizados para o abastecimento de água, geração de energia elétrica e irrigação.

As geleiras são grandes reservatórios naturais de água doce, correspondendo a 77% de toda a água doce do planeta (Rees, 2006). Em regiões como a Cordilheira dos Andes, que se estende por aproximadamente 7.000 km ao longo da costa oeste da América do Sul (Davies & Glasser, 2012).

Dada a relevância econômica dessas geleiras, os riscos de enchentes e deslizamentos decorrentes de seu derretimento acelerado, além de seu papel como indicadores de mudanças climáticas, o monitoramento de geleiras temperadas, como a geleira Grey, tornou-se uma necessidade premente. Esse acompanhamento é fundamental para subsidiar a compreensão e a formulação de estratégias de adaptação e mitigação diante das evidentes alterações climáticas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Dinâmica de Sistemas

A Dinâmica de Sistemas (DS) foi desenvolvida inicialmente por Jay W. Forrester no *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) em meados da década de 1950. Forrester (1961), em seu livro "*Industrial Dynamics*", introduziu a DS como uma metodologia para compreender e modelar sistemas complexos que evoluem ao longo do tempo.

A DS se distingue por sua ênfase em *loops* de *feedback*, atrasos, não-linearidades e estruturas de estoque e fluxo. Essas características permitem a modelagem de sistemas complexos e a identificação de pontos de alavancagem para intervenções eficazes (Sterman, 2000).

Na gestão de negócios, Morecroft (2015) aplicou a DS para analisar estratégias corporativas e processos de tomada de decisão. No campo das políticas públicas, Ghaffarzadegan et al. (2011) demonstraram como a DS pode ser utilizada para informar políticas em áreas como saúde pública e mudanças climáticas.

Um marco importante na aplicação da DS foi o relatório "Os Limites do Crescimento" (Meadows et al., 1972), que modelou as interações entre população, industrialização e recursos naturais, influenciando significativamente o debate sobre sustentabilidade global.

Essa abordagem pode ser aplicada a qualquer sistema físico, biológico econômico etc., desde que esses sejam dependentes do tempo e possuam unidades relacionais passiveis de uma descrição matemática. Nesse contexto, se pode aplicar a DS para modelar a dinâmica do balanço de massa de geleiras, por exemplo, como forma de melhor compreender os padrões desse fenômeno.

2.2 Modelagem da Dinâmica das Geleiras

A modelagem da evolução de geleiras em escala global progrediu significativamente nas últimas décadas, impulsionada pela disponibilidade crescente de dados e avanços computacionais. Inicialmente limitados pela escassez de informações sobre espessura e geometria do gelo, os modelos pré-2010 baseavam-se em abordagens simplificadas de balanço de massa e extrapolações (Zekollari et al., 2022).

O lançamento do *Randolph Glacier Inventory* em 2012 marcou uma virada, fornecendo um inventário global abrangente dos contornos das geleiras (Consortium, 2017). Isso permitiu a aplicação de modelos globais sem extrapolações extensivas, embora a falta de dados detalhados sobre a espessura do gelo ainda limitasse a representação precisa da evolução glacial (Marzeion et al., 2012).

Um avanço crucial veio com a estimativa global da distribuição da espessura do gelo (Huss & Hock, 2015), que abriu caminho para modelos mais sofisticados. O *Global Glacier Evolution Model* (GloGEM), desenvolvido por Huss e Hock (2015), foi pioneiro na consideração explícita da geometria e volume das geleiras, utilizando uma parametrização de conservação de massa.

Atualmente, modelos globais como *Open Global Glacial Model* (OGGM), *Python Glacier Evolution Model* (PyGEM) e o GloGEM, estão em constante desenvolvimento, integrando novos processos e melhorando a representação das geleiras. O *Glacier Model Intercomparison Project* (GlacierMIP) desempenha um papel crucial na coordenação da intercomparação desses modelos, promovendo seu aprimoramento e reduzindo incertezas nas projeções de mudanças glaciais (Hock et al., 2019).

2.3 Balanço de Massa de uma Geleira

De acordo com Cuffey e Paterson (2010), o balanço de massa de uma geleira pode ser estratificado conforme a localização vertical onde ocorre a troca de massa. Esta estratificação é expressa pela equação $\dot{b} = \dot{b}_s + \dot{b}_e + \dot{b}_b$, na qual $\dot{b}_s$ denota o balanço de massa superficial, $\dot{b}_b$ representa o balanço basal, e $\dot{b}_e$ indica o balanço *englacial*, que compreende as trocas internas da geleira. Esta decomposição é particularmente relevante devido à diversidade de fatores que influenciam cada componente.

Na maioria dos cenários, o balanço de massa superficial exerce uma influência preponderante sobre os demais termos, o que frequentemente leva à simplificação $\dot{b} \cong \dot{b}_s$. Contudo, é importante salientar que o balanço basal pode assumir um papel significativo em determinados contextos, como em geleiras de maré e geleiras localizadas em regiões montanhosas.

Considerando M como a massa total de gelo de uma geleira e A como sua área em projeção plana, a taxa de variação de M pode ser expressa pela equação (1).

$$\frac{dM}{dt} = \int_A [\dot{b}_s + \dot{b}_e + \dot{b}_b] dA - \dot{B}_c \tag{1}$$

Nesta equação, $\dot{B}_c$ representa a taxa de perda de massa por desprendimento (*calving*). A integração desta equação ao longo de um intervalo temporal fornece o balanço de massa da geleira, ΔM, frequentemente denotado por B na literatura.

O balanço de massa na superfície de uma geleira é determinado pelas taxas de diversos processos que adicionam ou removem massa. Esses processos incluem a acumulação de neve ($\dot{a}_s$), a deposição de avalanches ($\dot{a}_a$), derretimento ($\dot{m}_s$) recongelamento de água ($\dot{a}_r$), a sublimação ($\dot{s}$) e a deposição pelo vento ($\dot{a}_w$). A representação da taxa de balanço de massa na superfície é ilustrada pela equação (2).

$$\dot{b}_s = \dot{a}_s + \dot{a}_a - \dot{m}_s + \dot{a}_r + \dot{s} + \dot{a}_w \tag{2}$$

O balanço de massa *englacial* ($\dot{b}_e$) ocorre devido a processos de redistribuição de massa dentro da geleira, como o recongelamento de água derretida que se infiltra na neve ou firn, o recongelamento de água superficial que flui para fraturas, e o recongelamento de água injetada em fraturas na base da geleira. A fusão interna ocorre quando a temperatura do gelo está no ponto de fusão e há uma fonte de energia, como água fluindo ou deformação do gelo. A taxa de aquecimento por deformação ($\dot{S}_E$) é representada pela equação (3).

$$\dot{S}_E = \sigma \cdot \dot{\varepsilon} \tag{3}$$

Onde σ é a tensão no gelo e $\dot{\varepsilon}$ é a taxa de deformação. A perda de massa por fusão interna ao longo de uma camada de espessura Z_t é ilustrada pela equação (4).

$$-\dot{b}_e = \frac{\dot{S}_E Z_t}{L_f} \tag{4}$$

Onde L_f é o calor latente de fusão do gelo. O balanço de massa basal ($\dot{b_b}$) depende da temperatura, disponibilidade de água e da taxa líquida de fornecimento de energia. A representação da energia basal (E_b) é dada pela equação (5).

$$E_b = G + u_b \tau_b + k_T \frac{\partial T}{\partial z} \tag{5}$$

Onde G é o fluxo de calor do substrato, u_b é a taxa de deslizamento do gelo sobre o leito, τ_b é a tensão de cisalhamento no leito, k_T é a condutividade térmica do gelo e $\partial T/\partial z$ é o gradiente de temperatura vertical. Se $E_b < 0$, ocorre a acumulação basal (*freeze-on*), e a taxa de acumulação basal é dada pela equação (6).

$$\dot{b_b} = \frac{-E_b}{\rho_i L_f} \tag{6}$$

Onde ρ_i é a densidade do gelo. Se $E_b > 0$, ocorre a fusão basal, e a taxa de fusão basal é dada pela mesma equação, mas com E_b positivo.

A dinâmica do balanço de massa é crucial para compreender a relação entre as geleiras e o clima. Alterações no balanço de massa refletem mudanças climáticas e, por sua vez, afetam a área e o volume das geleiras, influenciando o clima local e, potencialmente, o clima global em regiões com grande cobertura de gelo.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo desenvolve um modelo conceitual para compreender os processos envolvidos no balanço de massa de uma geleira. Através do referencial teórico deste trabalho, as variáveis selecionadas para compor o nosso sistema foram: Albedo (Al), temperatura (T), vento (V), ablação (A), índice runoff (IR), material de fundo (MF), declividade (D) e espessura da massa de gelo (EMG).

Para fazer a conexão entre as variáveis construiu-se um diagrama causal, apresentado na figura 2, com a finalidade de mapear as relações de causa e efeito entre variáveis dentro de um sistema. Ele ajuda a visualizar como as diferentes componentes de um sistema interagem e se influenciam mutuamente, possibilitando a identificação de *loops* de *feedback* que podem ser positivos (amplificadores) ou negativos (estabilizadores).

O desenvolvimento do modelo dinâmico foi realizado utilizando o *software* Vensim PLE®. Este *software* proporciona uma interface visual intuitiva para a criação, simulação e análise de modelos complexos, constituindo uma ferramenta robusta para a compreensão de sistemas dinâmicos. A sua funcionalidade é baseada em programação em blocos e na representação de diagramas de fluxos.

Na representação dos modelos de DS, os estoques são simbolizados por retângulos. As taxas de entrada são ilustradas por setas com duas linhas sólidas que convergem para o

estoque, enquanto as taxas de saída são representadas por setas com duas linhas sólidas que divergem do estoque.

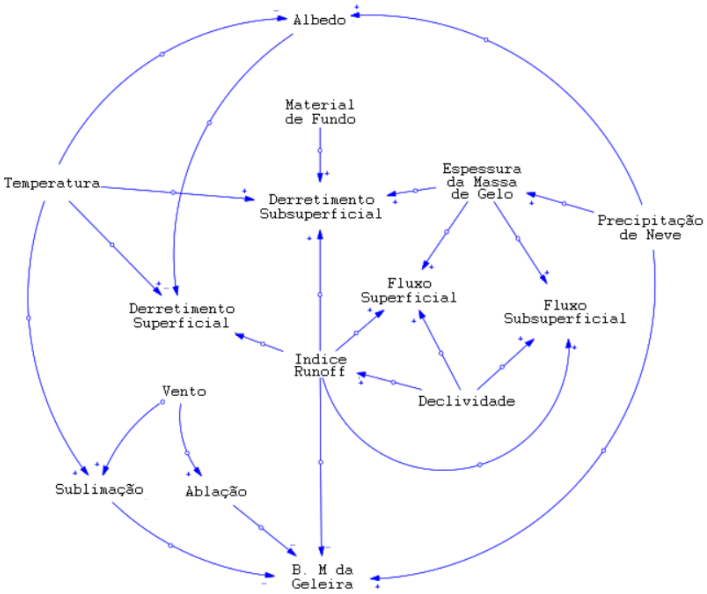

Figura 2: Relação entre as variáveis conectadas através de um diagrama causal.

As válvulas controlam as taxas de entrada e de saída. As nuvens simbolizam as disponibilidades externas que fornecem ou recebem as respectivas taxas. A figura 3 ilustra esse processo.

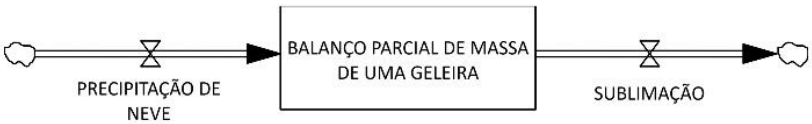

Figura 3: Exemplo simples de balanço parcial de uma geleira.

Uma vez estabelecidos os processos de entrada, análise e resultado, a resolução do sistema matemático é alcançada através de técnicas numéricas integrativas. A seleção do procedimento mais adequado leva em conta o equilíbrio entre eficiência computacional e fidelidade na representação das variáveis em estudo.

4 Resultados e Discussões

4.1 Resultados

O modelo desenvolvido no Vensim PLE®, ilustrado na figura 4, que demonstra detalhadamente os diversos processos que contribuem para o balanço de massa da geleira. A

precipitação na forma de neve desempenha um papel fundamental no aumento da massa da geleira, enquanto processos como evaporação, ablação e derretimento (tanto superficial quanto subsuperficial) resultam na remoção de massa. Adicionalmente, os fluxos superficiais e subsuperficial podem tanto adicionar quanto remover massa, dependendo da dinâmica de congelamento e derretimento da água no interior da geleira.

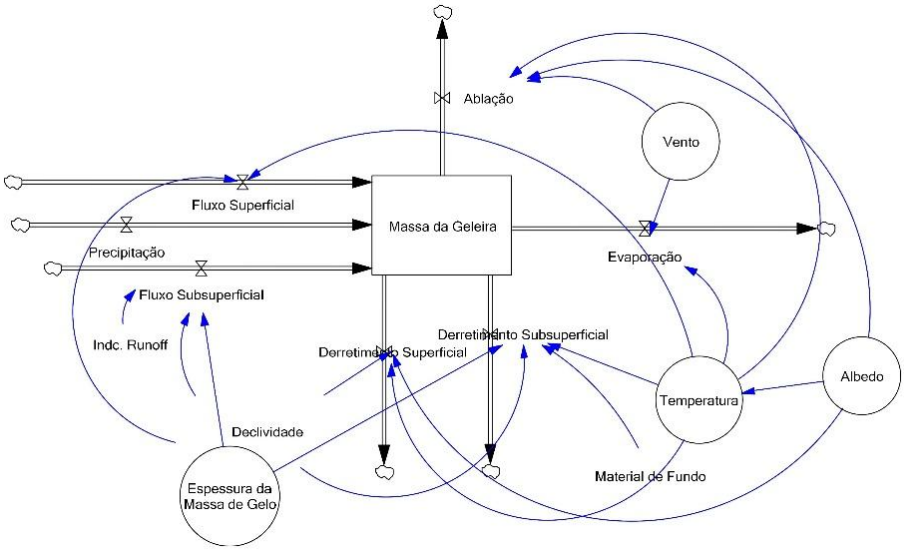

Figura 4: Modelo representativo para o balanço de massa da geleira Grey.

O modelo de balanço de massa de geleira revela uma complexa interação entre diversos fatores climáticos e glaciológicos. A análise integrada dessas variáveis fornece *insights* significativos sobre a dinâmica das geleiras e suas respostas às mudanças ambientais. O estoque do nosso modelo é representado pela equação fundamental que governa a mudança na massa da geleira ao longo do tempo, descrita pela taxa de deposição de massa, conforme ilustrado na equação (7).

$$\frac{dM}{dt} = P + FS + FSS - E - A - DS - DSS \tag{7}$$

Nesta equação, (M) representa a massa da geleira, (t) o tempo, (P) a precipitação, (FS) o fluxo superficial, (FSS) o fluxo subsuperficial, (E) a evaporação, (A) a ablação, (DS) o derretimento superficial e (DSS) o derretimento subsuperficial. A equação revela que o balanço de massa é um delicado equilíbrio entre processos de ganhos e perdas de massa. O modelo indica que pequenas alterações em qualquer desses componentes podem ter efeitos significativos no balanço geral, ressaltando a sensibilidade das geleiras às mudanças climáticas.

As equações utilizadas para modelar os processos de precipitação, ablação, evaporação, derretimento, e fluxo (Equações: (8)-(14)), são baseadas nas descrições dos autores Cuffey e Paterson (2010). As equações para a precipitação, ablação e evaporação são representadas pelas equações (8), (9) e (10).

$$P = f(P) \tag{8}$$

$$A = f(T, V, Al) \tag{9}$$

$$E = f(T, V) \tag{10}$$

O derretimento superficial e subsuperficial são modelados pelas equações (11) e (12).

$$DS = f(T, Al, D, EMG) \tag{11}$$

$$DSS = f(T, EMG, MF, D) \tag{12}$$

O fluxo superficial e subsuperficial são representados pelas equações (13) e (14).

$$FS = f(EMG, T) \tag{12}$$

$$FSS = f(D, EMG, IR) \tag{12}$$

4.2 Discussões

Segundo Pirazzini et al. (2018), o albedo da neve controla a quantidade de energia solar que é refletida de volta para a atmosfera e é absorvida pela camada de neve, sendo, portanto, um parâmetro-chave para o orçamento de energia e massa da neve e, em particular, para estimativas e previsões de escoamento de água derretida.

A diferença no albedo da superfície, ou seja, 0,7–0,8 para neve nova e 0,4–0,55 para gelo descoberto (0,1–0,2 para gelo coberto de detritos), resulta em diferentes taxas de derretimento (Naruse & Aniya, 1990). Portanto, uma ligeira mudança na temperatura do ar deve causar uma mudança maior nos processos de ablação e derretimento superficial por um mecanismo de *feedback* positivo, entre o albedo e a temperatura.

Os autores Rignot et al. (2003) observaram um aumento de 0,3°C na temperatura média anual (TMA) durante o último século nas estações meteorológicas no Chile central. Da mesma forma, a isoterma anual de 0°C subiu 150 m no inverno e 250 m no verão durante as últimas três décadas devido ao aquecimento regional (Rabassa, 2009).

As análises de dados climáticos fornecidos por estações meteorológicas localizadas ao redor do campo de gelo Patagônico revelaram um ligeiro aumento na temperatura do ar e uma diminuição na precipitação nos últimos 40 a 50 anos (Aniya, 1999). Essa mudança climática contribuiu significativamente para a recessão das geleiras na Patagônia e Tierra del Fuego. A diminuição da precipitação resulta em menor acumulação de neve, enquanto o aumento da temperatura acelera os processos nos quais uma geleira perde massa. Essa

combinação de fatores leva a um balanço de massa negativo, ou seja, a perda de gelo excede o ganho, resultando na retração das geleiras.

A neve à deriva e soprada é transportada horizontalmente pelo vento por meio de saltação (ou seja, em contato periódico com e diretamente acima da superfície da neve) (Pomeroy & Gray, 1990). Dessa forma, o vento é um componente essencial para o modelo, contribuindo para a evaporação e a ablação, ou seja, com um aumento significativo do vento, teremos mais ablação e evaporação, contribuindo negativamente para o balanço de massa.

A geometria das geleiras, incluindo sua espessura, declividade e o material de fundo, é crucial para modelar a evolução das grandes massas de gelo e esses fatores influenciam a dinâmica do fluxo de gelo, o acesso à água de degelo e a lubrificação basal, o equilíbrio de forças internas e a resposta a perturbações no terminal (Zheng, 2022). Durante o recuo, as tensões longitudinais, transversais e de cisalhamento no terminal são afetadas pela inclinação do leito glacial, a forma do terminal e as propriedades do gelo (Enderlin et al., 2018; Felikson et al., 2021; Yan et al., 2021).

As funções (f) que descrevem cada processo representam relações complexas que podem ser modeladas por equações empíricas ou físicas, incorporando os fatores relevantes. A compreensão desses processos e suas interações é fundamental para prever a resposta das geleiras às mudanças climáticas e suas consequências para o sistema terrestre.

De acordo com os cenários de mudanças climáticas e as informações apresentadas, espera-se que o modelo demonstre convergência com os dados relatados por Davies e Glasser (2012) e Rivera e Casassa (2004), prevendo, portanto, um cenário de declínio no balanço de massa.

Compreender a relação entre as variáveis e a construção do esboço do modelo para a geleira é essencial para permitir ajustes de curva e determinação dos coeficientes das equações, possibilitando, assim, a obtenção da taxa de balanço de massa. Para a validação do modelo, é necessário obter dados históricos de cada variável específica para a região da geleira Grey, fazendo parte da segunda etapa deste trabalho, onde será realizado o teste e a geração dos resultados.

5 CONCLUSÕES

A análise das variáveis e equações que dominam o balanço de massa da geleira Grey, revelou uma série de interações complexas entre fatores climáticos e glaciológicos. Utilizando o software Vensim PLE®, foi possível construir um modelo dinâmico conceitual que ilustra detalhadamente os processos que contribuem para o balanço de massa. A precipitação na forma de neve, fluxos (superficial e subsuperficial) mostraram-se fundamentais para o aumento da massa da geleira, enquanto a evaporação, a ablação e o derretimento (superficial e subsuperficial) foram identificados como processos chave na remoção de massa.

O balanço de massa da geleira Grey é significativamente afetado por variações sazonais e anuais nas condições meteorológicas. As mudanças influenciadas pelo aquecimento global, têm o potencial de alterar substancialmente a dinâmica da geleira. O esboço do modelo sugere que, em cenários de mudanças climáticas, espera-se uma convergência dos dados com as observações de declínio do balanço de massa.

A aplicação da modelagem dinâmica no estudo do balanço de massa de geleiras oferece uma melhor compreensão sobre a resposta das geleiras às mudanças climáticas. A capacidade de realizar ajustes de curva e determinar coeficientes das equações permite uma análise detalhada e precisa das variações na massa da geleira. Este estudo destaca a importância de obter dados históricos específicos para validar o modelo e garantir a precisão das previsões.

Além disso, o entendimento mais detalhado das interações entre variáveis climáticas e glaciológicas é crucial para prever a evolução futura das geleiras. O modelo conceitual desenvolvido neste estudo pode servir como uma ferramenta robusta para avaliar o impacto das mudanças climáticas na geleira Grey e em outras massas de gelo similares. A metodologia aplicada, combinada com a análise de dados históricos, proporciona uma base sólida para estudos futuros e para a formulação de estratégias de mitigação e adaptação às mudanças climáticas.

AGRADECIMENTOS

O trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES). DASales agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS).

REFERÊNCIAS

Aniya, M. (1999). Recent Glacier Variations of the Hielos Patagónicos, South America, and Their Contribution to Sea-level Change. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, *31*(2), 165–173. https://doi.org/10.1080/15230430.1999.12003293

Calvin, K., Dasgupta, D., Krinner, G., Mukherji, A., Thorne, P. W., Trisos, C., Romero, J., Aldunce, P., Barrett, K., Blanco, G., Cheung, W. W. L., Connors, S., Denton, F., Diongue-Niang, A., Dodman, D., Garschagen, M., Geden, O., Hayward, B., Jones, C., … Péan, C. (2023). *IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland.* Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).

Consortium, R. G. I. (2017). *Randolph Glacier Inventory 6.0*. NSIDC.

Cuffey, K. M., & Paterson, W. S. B. (2010). *The physics of glaciers* (4. ed). Butterworth-Heineman.

Davies, B. J., & Glasser, N. F. (2012). Accelerating shrinkage of Patagonian glaciers from the Little Ice Age (~AD 1870) to 2011. *Journal of Glaciology*, *58*(212), 1063–1084. https://doi.org/10.3189/2012JoG12J026

Enderlin, E. M., O'Neel, S., Bartholomaus, T. C., & Joughin, I. (2018). Evolving Environmental and Geometric Controls on Columbia Glacier's Continued Retreat. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, *123*(7), 1528–1545. https://doi.org/10.1029/2017JF004541

Felikson, D., A. Catania, G., Bartholomaus, T. C., Morlighem, M., & Noël, B. P. Y. (2021). Steep Glacier Bed Knickpoints Mitigate Inland Thinning in Greenland. *Geophysical Research Letters*, *48*(2), e2020GL090112. https://doi.org/10.1029/2020GL090112

Forrester, J. W. (1961). *Industrial Dynamics*. MIT Press.

Gerbaux, M., Genthon, C., Etchevers, P., Vincent, C., & Dedieu, J. P. (2005). Surface mass balance of glaciers in the French Alps: Distributed modeling and sensitivity to climate change. *Journal of Glaciology*, *51*(175), 561–572. https://doi.org/10.3189/172756505781829133

Ghaffarzadegan, N., Lyneis, J., & Richardson, G. P. (2011). How small system dynamics models can help the public policy process. *System Dynamics Review*, *27*(1), 22–44. https://doi.org/10.1002/sdr.442

Hagg, W. (2022). *Glaciology and Glacial Geomorphology*. Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-64714-1

Hock, R., Bliss, A., Marzeion, B., Giesen, R. H., Hirabayashi, Y., Huss, M., Radić, V., & Slangen, A. B. A. (2019). GlacierMIP – A model intercomparison of global-scale glacier mass-balance models and projections. *Journal of Glaciology*, *65*(251), 453–467. https://doi.org/10.1017/jog.2019.22

Huss, M., & Hock, R. (2015). A new model for global glacier change and sea-level rise. *Frontiers in Earth Science*, *3*. https://doi.org/10.3389/feart.2015.00054

Le Meur, E., Gerbaux, M., Schäfer, M., & Vincent, C. (2007). Disappearance of an Alpine glacier over the 21st Century simulated from modeling its future surface mass balance. *Earth and Planetary Science Letters*, *261*(3–4), 367–374. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.07.022

Marzeion, B., Jarosch, A. H., & Hofer, M. (2012). Past and future sea-level change from the surface mass balance of glaciers. *The Cryosphere*, *6*(6), 1295–1322. https://doi.org/10.5194/tc-6-1295-2012

Meadows, D. H., Meadows, D. L., Randers, J., & Behrens, W. W. (1972). *The Limits to Growth: A report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind*. Universe Books. https://doi.org/10.1349/ddlp.1

Meredith, M., Sommerkorn, M., Cassotta, S., Derksen, C., Ekaykin, A., Hollowed, A., & Schuur, E. A. G. (2019). *Polar Regions. Chapter 3, IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*.

Morecroft, J. D. W. (Org.). (2015). *Strategic Modelling and Business Dynamics: A Feedback Systems Approach* (1º ed). Wiley. https://doi.org/10.1002/9781119176831

Naruse, R., & Aniya, M. (1990). Some Possible Causes For Recent Variations Of Patagonian Glaciers. *Annals of Glaciology*, *14*, 351–351. https://doi.org/10.3189/S0260305500009228

Pirazzini, R., Leppänen, L., Picard, G., Lopez-Moreno, J. I., Marty, C., Macelloni, G., Kontu, A., Von Lerber, A., Tanis, C. M., Schneebeli, M., De Rosnay, P., & Arslan, A. N. (2018). European In-Situ Snow Measurements: Practices and Purposes. *Sensors*, *18*(7), 2016. https://doi.org/10.3390/s18072016

Pomeroy, J. W., & Gray, D. M. (1990). Saltation of snow. *Water Resources Research*, *26*(7), 1583–1594. https://doi.org/10.1029/WR026i007p01583

Rabassa, J. (2009). Impact of Global Climate Change on Glaciers and Permafrost of South America, with Emphasis on Patagonia, Tierra del Fuego, and the Antarctic Peninsula. Em *Developments in Earth Surface Processes* (Vol. 13, p. 415–438). Elsevier. https://doi.org/10.1016/S0928-2025(08)10019-0

Rees, W. G. (2006). *Remote sensing of snow and ice*. Taylor & Francis.

Rignot, E., Rivera, A., & Casassa, G. (2003). Contribution of the Patagonia Icefields of South America to Sea Level Rise. *Science*, *302*(5644), 434–437. https://doi.org/10.1126/science.1087393

Rivera, A., & Casassa, G. (2004). Ice Elevation, Areal, and Frontal Changes of Glaciers from National Park Torres del Paine, Southern Patagonia Icefield. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, *36*(4), 379–389.

Scherler, D., Leprince, S., & Strecker, M. (2008). Glacier-surface velocities in alpine terrain from optical satellite imagery—Accuracy improvement and quality assessment. *Remote Sensing of Environment*, *112*(10), 3806–3819. https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.05.018

Sterman, J. (2000). *Business dynamics: Systems thinking and modeling for a complex world*. Irwin/McGraw-Hill.

Taloor, A. K., Kothyari, G. C., Manhas, D. S., Bisht, H., Mehta, P., Sharma, M., Mahajan, S., Roy, S., Singh, A. K., & Ali, S. (2021). Spatio-temporal changes in the Machoi glacier Zanskar Himalaya India using geospatial technology. *Quaternary Science Advances*, *4*, 100031. https://doi.org/10.1016/j.qsa.2021.100031

Veettil, B. K., & Kamp, U. (2019). Global Disappearance of Tropical Mountain Glaciers: Observations, Causes, and Challenges. *Geosciences*, *9*(5), 196.

Yan, X., Ma, J., Ma, X., Chen, P., Wang, S., Wei, Y., Zhu, G., & Zhang, W. (2021). Hydrothermal combination and geometry control the spatial and temporal rhythm of glacier flow. *Science of The Total Environment*, *760*, 144315. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144315

Zekollari, H., Huss, M., Farinotti, D., & Lhermitte, S. (2022). Ice-Dynamical Glacier Evolution Modeling—A Review. *Reviews of Geophysics*, *60*(2), e2021RG000754. https://doi.org/10.1029/2021RG000754

Zheng, W. (2022). Glacier geometry and flow speed determine how Arctic marine-terminating glaciers respond to lubricated beds. *The Cryosphere*, *16*(4), 1431–1445. https://doi.org/10.5194/tc-16-1431-2022