

ANÁLISE MULTITEMPORAL DE RETRAÇÃO DA GELEIRA UPSALA, PATAGÔNIA ENTRE 1984 E 2016

Laís Helena Mazzali^{1}; Chiara Landrò²; Anderson Ruhoff³*

Resumo – O presente estudo visa analisar imagens de satélite da Geleira Upsala, uma geleira de água doce localizada no *Hielo Patagônico Sur*, a fim de investigar as mudanças em sua frente e a retração de sua área entre 1984 e 2016. Os resultados foram obtidos com imagens sequenciais em diferentes composições espectrais dos dados dos satélites LANDSAT 5 TM, LANDSAT 7 ETM e LANDSAT 8 OLI ao longo dos 32 anos. Igualmente, a tendência das séries temporais de temperatura do ar, precipitação, neve e incidência de radiação de ondas curtas foi investigada na mesma escala de tempo, utilizando dados meteorológicos de reanálise MERRA 2 entre 1980 e 2016. As análises revelaram que a geleira recuou desde 1984, mesmo que não de forma constante ao longo dos anos, e que apresentou um retrocesso médio total da frente de 7730,42 m. Em relação à área de superfície, a redução média total da geleira e de seus terminais foi igual a 114,47 km², com consideráveis oscilações em 2006 e 2011. Este estudo avaliou o comportamento de uma geleira dentro do panorama geral das retrações das geleiras na América Latina e destacou a importância do uso de informações de satélites para estes tipos de pesquisas.

Palavras-Chave – Criosfera, Mudanças climáticas, LANDSAT.

UPSALA GLACIER, PATAGONIA RETREAT: A MULTITEMPORAL ASSESSMENT FROM 1984 TO 2016

Abstract – The following study aims to analyse satellite images of Glacier Upsala, a freshwater calving glacier in the Southern Patagonia Icefield to investigate the changes in its front position and the shrinking area from 1984 to 2016. The results were obtained with sequential images in different spectral compositions from LANDSAT 5 TM, LANDSAT 7 ETM and LANDSAT 8 OLI satellite data throughout the 32 years. Along with this survey the trend of temporal series of the air temperature, precipitation, snow and shortwave radiation incidence variables has been investigated at the same spatial scale by using meteorological data from MERRA 2 reanalysis between 1980 and 2016. The analyses revealed that the glacier has been retreating since 1984, even if not steadily along the years, and it exhibited a total average reduction of the front position of 7730,42 m. Concerning the surface area, a total average retreat of the glacier and its terminals equal to 114.47 km² has been derived, with substantial oscillations in 2006 and 2011. This study examined the behaviour of a glacier within a general and dramatic shrinking landscape of glacier in Latin America, and highlighted the importance of using satellite information for this type of surveys.

Keywords – Cryosphere, Climate Change, LANDSAT.

¹ Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil. Email: lais.gae@gmail.com.

² Instituto Politécnico de Milão, Milão, Itália. Email: chiara.landro@mail.polimi.it.

³ Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil. Email: anderson.ruhoff@ufrgs.br.

1. INTRODUÇÃO

A criosfera é a porção da superfície terrestre que está constantemente congelada e inclui todos os depósitos permanentes ou sazonais de neve e gelo na terra, nos mares, rios e lagos, e no solo (*permafrost*) (EEA, 2008), influenciando o sistema climático terrestre em várias dimensões. Além disso, desempenham um papel fundamental no ciclo da água e na troca de gases entre o solo e a atmosfera (McConnell, 2006). Por outro lado, a criosfera é um indicador sensível e informativo sistema climático terrestre (Goodison, 2006), apresentando rápido mecanismo de *feedback* positivo e particularmente sensível às mudanças climáticas (McConnell, 2006; EEA, 2008).

A maioria das geleiras tem experimentado uma contração linear e um adelgaçamento geral em resposta ao aumento da temperatura (Anderson *et al.*, 2010) e ao decréscimo na precipitação (Bertrand *et al.*, 2012). A continuação destas tendências de mudança climática possivelmente produzirá uma forte redução do volume de gelo, como na região sul da América do Sul, com o desaparecimento de pequenas geleiras e contribuição para a elevação média do nível do mar. Nesse contexto, é importante o entendimento dos processos e das variáveis responsáveis pelas alterações físicas das geleiras, para prever a resposta em diferentes cenários de mudanças climáticas.

O monitoramento e a análise da cobertura de gelo na superfície terrestre devem ocorrer em escalas espaciais e temporais apropriadas. Considerando as dificuldades operacionais de monitoramento e a disponibilidade limitada de dados meteorológicos observados em função de difícil acesso e condições térmicas, as tecnologias de sensoriamento remoto apresentam-se como fundamentais para a compreensão dos processos físicos e as interações do sistema climático terrestre que governam a evolução da criosfera (Lo Vecchio *et al.*, 2016).

No panorama sul-americano, diversos estudos, a partir da análise de imagens de satélite e fotografias aéreas, mostram que a maioria das geleiras tem recuado consideravelmente durante o último meio século. No campo de gelo *Hielo Patagónico Sur* (HPS) da América do Sul, 63 glaciares perderam gelo, cuja contribuição para o nível do mar por unidade de área é maior do que a dos glaciares do Alasca (Rignot *et al.*, 2003). Entre estes, é o caso do Glaciar Tyndall, localizado na extremidade sul do campo HPS, que apresenta significativa redução de área e retração da linha de frente. Entre 1945 e 1975, verificou-se uma retração de 3200 m (107 m por ano) e, entre 1975 e 1986, recuou 700 m (64 m por ano) (Aniya *et al.*, 1993). Outra geleira que apresenta considerável retração na Patagônia é o Glaciar Upsala, diagnosticado por Aniya *et al.* (1993).

Considerando a atual tendência de retração de geleiras em um contexto de mudanças climáticas, o objetivo principal deste artigo consiste em analisar o processo de retração do Glaciar Upsala a partir de imagens da série LANDSAT entre 1984 e 2016. Por meio da análise de diferentes composições espectrais para realçar neve e gelo, buscou-se realizar o mapeamento da retração da frente da geleira e a determinação das áreas de retração. Também foram analisadas as tendências de alteração de variáveis meteorológicas ao longo do tempo, como temperatura da atmosfera, precipitação (incluindo neve) e incidência de radiação.

2. CARACTERIZAÇÃO DA GELEIRA UPSALA

A Geleira Upsala localiza-se entre as latitudes 49,50°S e 50,00°S e as longitudes 73,15°W e 73,50°W no campo de gelo HPS, situado nos Andes da Patagônia Austral, considerada a terceira maior geleira em tamanho da América do Sul (**Figura 1a**). A geleira está localizada em uma altitude aproximada entre 470 m (na frente da Geleira) até 1700 m acima do nível do mar.

A Geleira Upsala flui para o sul, na parte oriental do HPS, e é alimentada pelo campo de gelo sul da divisão Upsala-Viedma e a partir da Geleira Bertacchi. O seu afinamento durante o século

XX tem causado a divisão do terminal em três áreas (**Figura 1b**): (i) o *Braço Upsala*, formando o braço maior Upsala Oeste (UWT) e fluindo para o Lago Argentino; (ii) o terminal Upsala leste (UET) e (iii) o terminal Upsala central (UCT), ambos fluindo para o Lago Guillermo, o qual é formado pelo derretimento recente da geleira (Warren, 1995). Todos estes terminais sofreram uma rápida retração da superfície (Sakakibara e Sugiyama, 2014; Sakakibara *et al.*, 2013; Skvarca *et al.*, 1995), com maior intensidade na linha de frente, como consequência atribuída possivelmente ao aquecimento atmosférico regional durante o século XX, com aumentos de temperatura entre 0,4 e 1,4 °C, mas não verificados em toda Patagônia (Rignot *et al.*, 2003; Rosenbluth *et al.*, 1997).

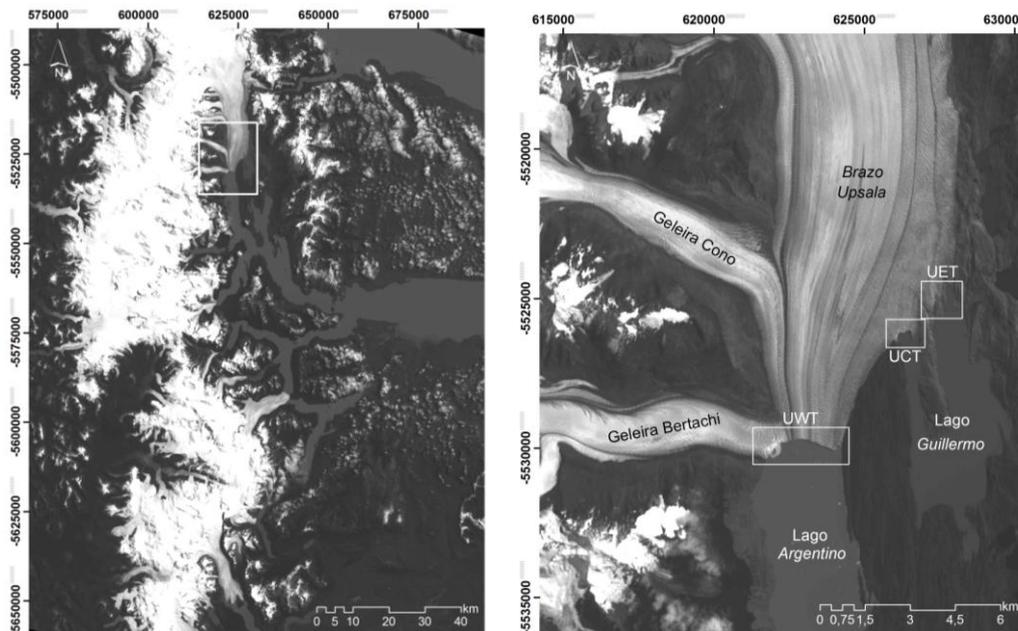


Figura 1 – Localização e caracterização da Geleira Upsala (no detalhe) em relação aos campos de gelo *Hielo Patagónico Sur* (HPS) na América do Sul (2017).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Dados meteorológicos e de sensoriamento remoto

Para análise de retração da linha de frente e da área da geleira entre 1984 e 2016, foram selecionadas imagens dos sistemas sensores *LANDSAT 5 Thematic Mapper* (TM), *LANDSAT 7 Enhanced Thematic Mapper* (ETM) e *LANDSAT 8 Operational Land Imager* (OLI). O critério de seleção baseou-se na ausência de nuvens sobre a frente e sobre a área da geleira. As composições para delimitação das feições da geleira utilizaram bandas espectrais do infravermelho médio (SWIR) e próximo (NIR), além das bandas visíveis vermelho (R), verde (G) e azul (B). A **Tabela 1** apresenta a identificação e detalhamento das imagens utilizadas no mapeamento da retração da geleira, obtidas a partir do site *United States Geological Survey* (USGS) *Earth Explorer*, disponíveis no endereço <https://earthexplorer.usgs.gov/>.

3.2. Mapeamento da retração da linha de frente e redução de área da geleira

A delimitação da linha de frente e da área de geleira foi realizada de forma manual a partir do processo de digitalização. A retração da linha frente da geleira entre duas datas consecutivas foi determinada a partir da conversão da linha mais antiga (1984) do formato polilinha para um conjunto de pontos. Posteriormente, determinou-se a menor distância entre cada um desses pontos até a outra linha (mais recente). A retração da geleira entre duas datas foi determinada a partir da média de todas as distâncias entre os pontos e a linha.

Tabela 1 – Identificação e detalhamento das imagens utilizadas para detecção da frente da geleira e análise da retração de área da Geleira Upsala, Patagônia, entre 1984 e 2016.

Identificador da imagem	Data	Satélite / Sensor	Finalidade de uso
LT52310951984169	17/06/1984	Landsat 5 TM	(1), (2)
LT523109519850127	27/01/1985	Landsat 5 TM	(1), (2)
LM52310951986014AAA03	14/01/1986	Landsat 5 TM	(1), (2)
LT52310951998159	08/06/1998	Landsat 5 TM	(1), (2)
LE72310952001287	14/10/2001	Landsat 7 ETM+	(1), (2)
LE723109520020408	08/04/2002	Landsat 7 ETM+	(1), (2)
LT52310952004057	07/05/2004	Landsat 5 TM	(1), (2)
LT52310952005114	24/04/2005	Landsat 5 TM	(1), (2)
LT52310952006081	01/08/2006	Landsat 5 TM	(1), (2)
LT52310952006092	13/09/2007	Landsat 7 ETM+	(1), (2)
LT523109520081212	12/12/2008	Landsat 5 TM	(1)
LT523109520091113	13/11/2009	Landsat 5 TM	(1), (2)
LT523109520100929	29/09/2010	Landsat 5 TM	(1), (2)
LT523109520110220	20/02/2011	Landsat 5 TM	(1), (2)
LE723109520120366	31/12/2012	Landsat 7 ETM+	(1), (2)
LE723109520130422	22/04/2013	Landsat 7 ETM+	(1), (2)
LC823109520142109	07/08/2014	Landsat 8 OLI	(1)
LE723109520150412	12/04/2015	Landsat 7 ETM+	(1)
LE72310952016121	30/04/2016	Landsat 7 ETM+	(1), (2)

Observação: Códigos referentes à utilização das imagens: (1) Delimitação da linha de frente da geleira; (2) Determinação da área da geleira.

3.3. Análise estatística dos dados meteorológicos

Para analisar a tendência de séries temporais de temperatura do ar, precipitação, neve e incidência de radiação de ondas curtas incidentes, utilizaram-se dados meteorológicos mensais de reanálise MERRA-2 (*Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications*) entre Janeiro/1980 a Dezembro/2016, produzido pelo *Global Modeling and Assimilation Office* (GMAO-NASA) e disponibilizados no endereço <https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA/>. Aplicou-se o teste não-paramétrico de Mann-Kendall para análise de tendência.

4. RESULTADOS

4.1. Retração da frente e redução de área da Geleira Upsala

A **Figura 2** apresenta os perfis das linhas de frente entre 1984 e 2016. É possível inferir que a retração ocorrida entre os 14 primeiros anos são semelhantes aos últimos 18 anos. Entretanto, a ausência de imagens da região entre 1986 e 1998 impossibilitou afirmar que a taxa de retração da frente é constante. A partir da **Figura 3a**, observam-se dois períodos de estabilidade, um entre 2004 e 2007 e outro entre 2013 e 2016. Entretanto, a partir da análise dos perfis de retração constata-se que somente o segundo período obteve linhas da frente aproximadamente paralelas, enquanto o primeiro apresenta oscilações assimétricas. Entre 1984 e 2016, estimou-se uma redução acumulada total de 7730,42 m da linha frente, oscilando entre 6925,31 e 8478,35 m e apresentando um desvio padrão de 434,00 m. Resultando em uma média anual de 241,58m. Todavia, 86,7% do total aferido

concentra-se nos períodos entre 1986 e 1998 e entre 2007 e 2012, sendo que o segundo possui uma diminuição média anual 2,7 vezes maior do que a encontrada para os 32 anos. Em dois, 1986 e 2006 verificaram-se os acréscimos da linha da frente de 3,64 e 107,11 m, nesta ordem.

A **Figura 3b** mostra a redução acumulada das áreas da geleira. Verificou-se uma perda total de 114,47 km² (26,25% da área analisada), obtendo uma taxa média de 3,8 km² por ano. Os anos de 1985, 2006 e 2011 apresentaram as maiores oscilações, de 12,33 (redução), 13,23 (acrécimo) e 13,25 (redução) km², respectivamente, representando mais de 10% da perda total da área cada um. É possível observar uma tendência de diminuição, especialmente nos terminais da geleira, situados no lagos Argentino e Guillermo. A variação espacial da redução da área é apresentada na **Figura 4**.

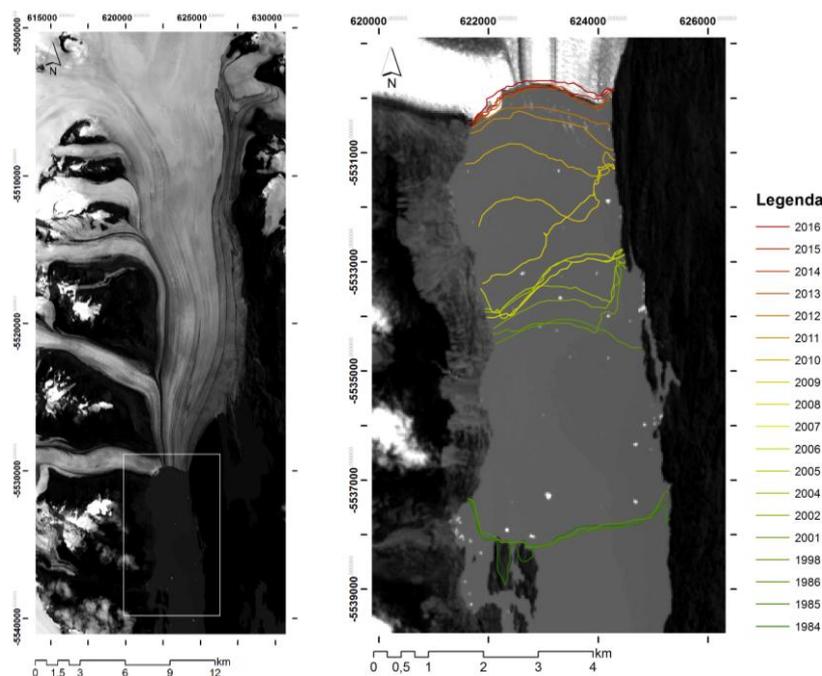


Figura 2 – A Geleira Upsala e a retração da linha de frente (no detalhe) entre 1984 e 2016 (2017).

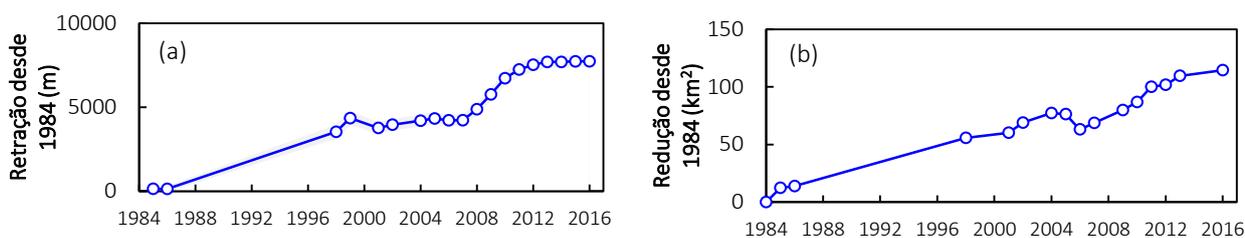


Figura 3 – Retração acumulada da linha de frente (a) e redução acumulada da área (b) da Geleira Upsala entre 1984 e 2016. A área cinza da figura (a) corresponde ao desvio-padrão da retração da linha de frente.

4.2. Análise de tendência de dados meteorológicos de reanálise

A **Figura 5** apresenta as séries temporais de dados meteorológicos de reanálise MERRA 2 entre 1980 e 2016. Em função da inexistência de dados observados próximos à área da geleira, utilizaram-se dados de reanálise para verificação de tendência estatisticamente significativa e de impactos das mudanças climáticas globais na retração da linha de frente e na redução da área superficial da geleira. A partir da análise estatística de Mann-Kendall ($N = 444$), verifica-se que no período não há tendência de aumento de temperatura (média, máxima e mínima, com *valor-p* de 0,54, 0,43 e 0,70, respectivamente) e de radiação incidente de ondas curtas em superfície (*valor-p* de 0,55) para um nível de significância de 0,05. Porém, observa-se uma tendência de aumento de

precipitação total (*valor-p* 3,47E-12) e por neve (*valor-p* 1,35E-8), principalmente entre 1995-2010. Sakakibara *et al.* (2013) e Sakakibara e Sugiyama (2014) analisaram a retração de diversos campos de gelo na Patagônia e verificaram que a retração de geleiras não está correlacionada a variações de temperatura do ar próximas região estudada. As principais hipóteses que explicariam a rápida retração da Geleira Upsala estão relacionadas à topografia local e aos processos dinâmicos das geleiras, além de prováveis mudanças climáticas de longo período (Sakakibara e Sugiyama, 2014).

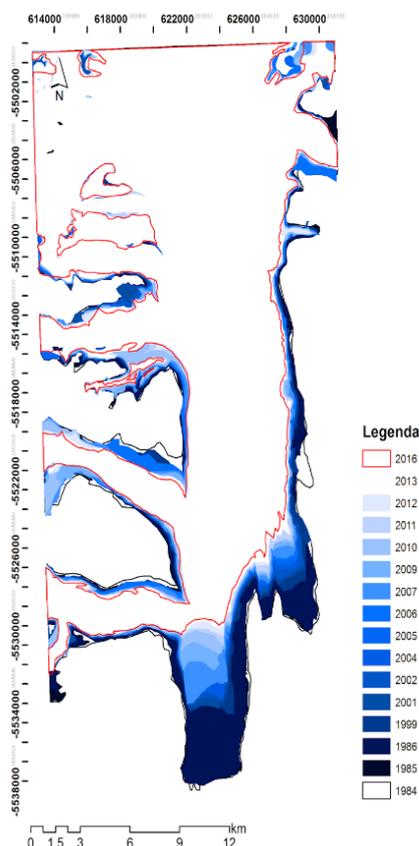


Figura 4 – Variação espacial e temporal de redução da área da Geleira Upsala entre 1984 e 2016.

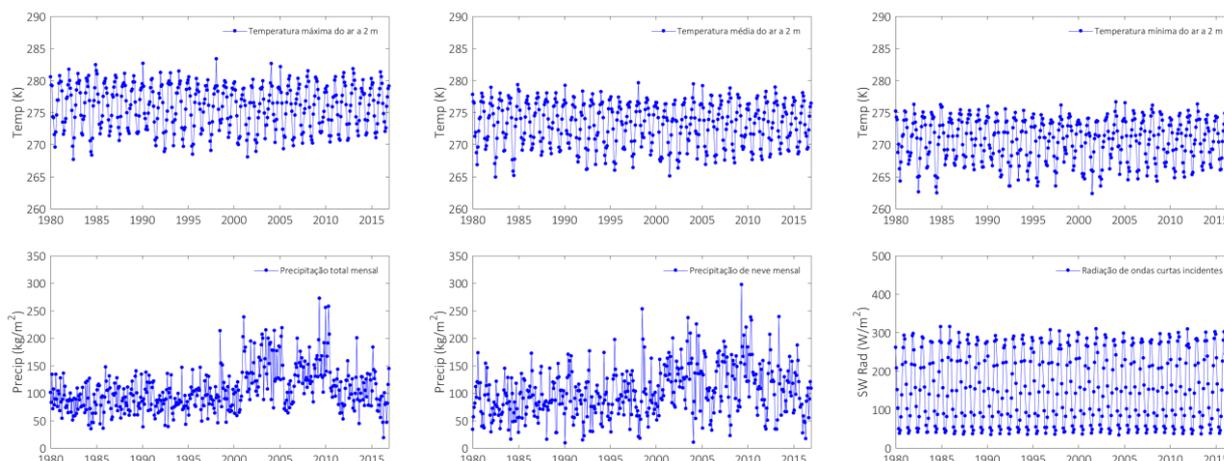


Figura 5 – Séries temporais de dados meteorológicos mensais de reanálise MERRA 2 entre janeiro/1980 e dezembro/2016: (a) temperatura máxima do ar a 2 m, (b) temperatura média do ar a 2 m, (c) temperatura mínima do ar a 2 m, (d) precipitação total mensal (com correção de viés), (e) precipitação de neve (com correção de viés) e (f) radiação solar de ondas curtas incidentes na superfície.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os procedimentos realizados sobre as imagens revelaram que tanto a frente quanto a área da Geleira Upsala exibiram retração, cujos valores foram de 7730,42 m e 114,47 km², respectivamente, para todo período analisado. Quase todo recuo da frente (87%) ocorreu em 17 anos (dividido em dois períodos), revelando que a sua diminuição não foi constante ao longo dos anos. A área da geleira apresentou a maior variação em relação à diminuição total nos anos de 1985, 2006 e 2011, especialmente nos terminais da geleira. Contudo, as análises dos dados meteorológicos para o mesmo período de estudo, revelaram que não existe uma tendência de aumento de temperatura do ar e radiação incidente de ondas curtas, apenas para as variáveis de precipitação – incluindo a de neve – principalmente entre 1995 e 2010. Não é possível, portanto, afirmar que as retrações da frente e da área se devam às variáveis climáticas no período analisado.

Todavia, segundo Francou *et al.* (2008), os tempos de resposta de uma geleira variam em função de vários fatores. Tamanho, topografia do leito rochoso, inclinação, quantidade de água em contato com o gelo-rocha, são alguns exemplos. Para as geleiras da Patagônia, a topografia é um fator relevante (Benn *et al.*, 2000). Naruse *et al.* (1997) afirma que a retração da Geleira Upsala foi devida à mudança no estresse longitudinal exercido pela base rochosa próxima à frente da geleira, cujas diminuições irregulares provavelmente foram devidas a um padrão espacial da elevação da base rochosa (Sakakibara *et al.*, 2013). Conforme Lo Vecchio *et al.* (2016), a rocha presente no vale da Geleira Upsala é ardósia, a qual possui como baixa dureza e facilidade de remoção.

Por fim, o balanço de massa é apontado por Francou *et al.* (2008) como o melhor indicador para efeitos de mudanças climáticas. Tal fator possibilita estimar o volume e a espessura de gelo, assim como conhecer os componentes dinâmicos, especialmente a velocidade do gelo. Igualmente, a evolução futura da geleira é interessante em ser analisada e prevista em estudos futuros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDERSON, B.; MACKINTOSH, A.; STUMM, D.; GEORGE, L.; KERR, T.; WINTER-BILLINGTON, A.; FITZSIMONS, S. (2010). Climate sensitivity of a high-precipitation glacier in New Zealand. *Journal of Glaciology*, 56, No. 195.
- ANIYA, M; NARUSE, R.; SHIZUKUISHI, M; SKVARCA, P; CASASSA, G. (1992). Monitoring recent glacier variations in the southern Patagonia icefield, utilizing remote sensing data. In *Isprs*.
- BENN, D.I.; LEHMKUHL, F. (2000). Mass balance and equilibrium-line altitudes of glaciers in high-mountain environments. In *Quaternary International*, 65/66, pp. 15-29.
- BERTRAND, S., HUGHEN, K. A., LAMY, F., STUUT, J.-B. W., TORREJÓN, F., AND LANGE, C. B. (2012). Precipitation as the main driver of Neoglacial fluctuations of Gualas glacier, Northern Patagonian Icefield. *Climate of the Past*, 8, pp.519-534.
- EUROPEAN ENVIRONMENTAL AGENCY. (2008). Impacts of Europe's changing climate – 2008 indicator-based assessment. EEA Report No 4/2008, Section 5.3 Cryosphere.
- FRANCOU, B. (2008). Glacier fluctuations during and after the little ice age. In *Ghiacciai montani e cambiamenti climatici nell'ultimo secolo*, Terra Glacialis, pp. 11-23.
- GOODISON, B. (2006). The Climate and Cryosphere, ECMWF Seminar on Polar Meteorology, 4-8 September 2006.
- KRAEMER, P.E.; RICCARDI, A.C. (1997). Estratigrafía de la región comprendida entre los lagos Argentino y Viedma (49° 40' -50° 10' lat. S). In *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, Provincia de Santa Cruz, 52(3), pp. 333-360.

LEIVA, J.C.; ESPIZUA, L.E.; MACKERN, M.V.; NORTE, F.A.; MASIOKAS, M.(2008). The response of the argentinian glaciers to the climate of the XX and XXI centuries. *Instituto argentino de nivología, glaciología y ciencias ambientales*.

LO VECCHIO, A; LENZANO, M.G; RICHIANO, S; LENZANO, L.E (2016). Identificación y caracterización litológica mediante el uso del sensor ETM+ (Landsat 7). Caso de estudio: entorno del glaciar Upsala, Argentina. *Revista de Teledetección*.

MCCONNELL, J. R. (2006). Role and Importance of Cryospheric Processes in Climate System. *Encyclopedia of Hydrological Sciences*, Part 17. Climate Change.

NARUSE, R.; SKVARCA, P.; TAKEUCHI, Y. (1997). Thinning and retreat of Glaciar Upsala, and an estimate of annual ablation changes in southern Patagonia. In *Annals of Glaciology*, International Glaciological Society.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA), Global Modelling and Assimilation Office. Disponível em <https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA/>. Acesso em 1 abr. 2017.

NATIONAL SNOW AND ICE DATA CENTER (NSIDC), The Life of a Glacier. Disponível em <https://nsidc.org/cryosphere/glaciers/life-glacier.html>. Acesso em 7 jun. 2017.

RIGNOT, E.; RIVERA, A.; CASASSA (2003). Contribution of the Patagonia icefields of South America to sea level rise. In *G.Science*, 302, pp. 434-437.

ROSEGRANT, M.W.; RINGLER, C.; MCKINNEY, D.C. ; CAI, X. ; KELLER, A.; DONOSO, G. (2000). Integrated economic-hydrologic water modeling at the basin scale: the Maipo river basin. In *Environment and Production Technology Division*, Discussion paper no. 63.

SAKAKIBARA, D.; SUGIYAMA, S.; SAWAGAKI, T.; MARINSEK, S.N.; SKVARCA, P. (2013). Rapid retreat, acceleration and thinning of Glaciar Upsala, Southern Patagonia Icefield, initiated in 2008. In *Annals of Glaciology*, 54(63).

SAKAKIBARA, D.; SUGIYAMA, S.; (2014). Ice-front variations and speed changes of calving glaciers in the Southern Patagonia Icefield from 1984 to 2011. *Journal of Geophysical*, 42 (1-4), pp. 1283-1618.

SKVARCA, P.; ROTT, H.; NAGLER, T; (1995) . Drastic retreat of Upsala Glaciar, southern Patagonia, revealed by ERS-I/SAR images and field survey. *SELPER*, 11(1-2), 51-55.

SKVARCA, P.; NARUSE, R. (1997). Dynamic Behavior Of Glaciar Perito Moreno, Southern Patagonia. In *Annals of Glaciology* International Glaciological Society.

SKVARCA, P.; RAUP, B.; DE ANGELIS, H. (2003). Recent behaviour of Glaciar Upsala, a fast-flowing calving glacier in Lago Argentino, southern Patagonia. In *Annals of Glaciology*, 36 International Glaciological Society.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS), Earth Explorer. Disponível em <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em 1 dez. 2016.

WARREN, C.R; GREENE, D.R.; GLASSER, N.F. (1995). Glaciar Upsala, Patagonia: rapid calving retreat fresh water. In *Annals of Glaciology* International Glaciological Society.