

VARIAÇÕES DE ÁREA DAS GELEIRAS DA COLÔMBIA E DA VENEZUELA ENTRE 1985 E 2015, COM DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO

VARIATIONS IN GLACIER AREA IN COLOMBIA AND VENEZUELA BETWEEN 1985 AND 2015, USING REMOTE SENSING DATA

Isabel Cristiane REKOWSKY¹, Ulisses Franz BREMER², Bijeesh Kozhikkodan VEETIL¹

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto.

Email: isabel.rek@gmail.com; bijeesh.veetil@ufrgs.br

²Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências. Email: bremer@ufrgs.br

Introdução
Área de Estudo
Caracterização Climática
Variação da Cobertura de Gelo na Área
Materiais e Métodos
Resultados e Discussão
Sierra Nevada de Santa Marta
Sierra Nevada Del Cocuy
Nevado Del Ruiz
Nevado Santa Isabel
Nevado Del Tolima
Nevado Del Huila
Sierra Nevada De Mérida
Conclusão
Referências

RESUMO - As geleiras tropicais do norte andino têm apresentado retração desde o fim da Pequena Idade do Gelo (séc. XVI-XIX), retração esta que se acentuou a partir da segunda metade do século XX. Neste estudo, a variação de área das geleiras na Colômbia e Venezuela foi mapeada a partir de imagens Landsat adquiridas entre 1985 e 2015. Atualmente, na Colômbia, há geleiras na *Sierra Nevada de Santa Marta*, na *Sierra Nevada del Cocuy* e nos vulcões do *Nevado del Ruiz*, *Santa Isabel*, *del Tolima* e *del Huila*, enquanto na Venezuela, resta apenas uma massa de gelo na *Sierra Nevada de Mérida*. A extensão de cada geleira foi mapeada através do método *Normalized Difference Snow Index* (NDSI). Após a aplicação de um limiar, foram obtidos os polígonos com as áreas de gelo de cada geleira. Em 1985/1986, a soma das áreas das sete geleiras estudadas correspondia a 92,84 km², enquanto no último ano estudado (2015/2016) esse valor passou para 36,97 km². A redução de área ocorreu em todas as geleiras analisadas, com taxas de retração anual variando entre 2,49% a.a. e 8,46% a.a.

Palavras-chave: Geleiras tropicais. Norte andino. *Normalized Difference Snow Index* – NDSI.

ABSTRACT - Tropical glaciers in the northern Andes have retreated since the Little Ice Age (XVI-XIX), and this retreat has been accelerated since the second half of the twentieth century. In this study, variations in the area of glaciers in Colombia and Venezuela have been mapped using Landsat images, acquired between 1985 and 2015. Currently, in Colombia, there are glaciers in Sierra Nevada de Santa Marta, Sierra Nevada del Cocuy and volcanoes of Nevado del Ruiz, Santa Isabel, del Tolima and del Huila, while in Venezuela, it remains only a mass of ice in the Sierra Nevada Merida. The extent of each glacier was calculated by the Normalized Difference Snow Index (NDSI) method. After the application of a suitable threshold, the polygons with the area of each ice glacier were obtained. In 1985/1986, the sum of the areas of the seven studied glaciers corresponded to 92.84 km², while in the final year analyzed (2015/2016), this value shrank to 36.97 km². The area shrinkage occurred in all the glaciers that were mapped, with annual decline rates ranging from 2.49%/year to 8.46%/year.

Keywords: Tropical glaciers. Northern Andes. Normalized Difference Snow Index – NDSI.

INTRODUÇÃO

Desde o fim do século XIX as geleiras alpinas têm apresentado retração e afinamento em resposta direta ao aquecimento atmosférico, contudo, a magnitude dessa resposta não tem sido a mesma em todos os lugares (Sagredo et al., 2014). Na Colômbia e na Venezuela, especificamente, as geleiras estão se reduzindo de forma acentuada (Ceballos et al., 2010; Braun & Bezada, 2013).

Na Colômbia, durante o último século, desapareceram oito pequenas geleiras, tanto por efeitos atmosféricos quanto por reativação vulcânica e, embora em épocas de chuva esses

picos sejam cobertos temporariamente de neve, a formação de gelo não ocorre. Em 2006/2007 restavam seis geleiras na Colômbia, totalizando uma área de 47,2 km², com uma taxa de redução de área entre 2% e 5% ao ano (Ceballos et al., 2010). Segundo Carrillo & Yopez (2010), as geleiras na Venezuela estão restritas às encostas dos picos Humboldt-Bonpland e Bolívar, na Sierra Nevada de Mérida.

Este trabalho tem como objetivo quantificar as variações de área nas geleiras da Colômbia e Venezuela, entre os anos 1985 e 2015, mediante o uso de uma série de imagens de satélite.

ÁREA DE ESTUDO

O extremo norte da cordilheira dos Andes é dividido em três ramos montanhosos no sul da Colômbia: Cordilheira Ocidental, Cordilheira Central e Cordilheira Oriental, a qual segue no território venezuelano. De acordo com Leppäranta & Granberg, (2010), as altas latitudes e altas altitudes favorecem a glaciação, principalmente devido às baixas taxas de ablação.

Em áreas montanhosas as geleiras são, com frequência, resultado da alta acumulação, frequentemente induzida pela orografia, e da baixa taxa de ablação, a qual diminui com a altitude. Assim, observa-se que no norte andino

os picos mais altos da Cordilheira Central, Cordilheira Oriental e Sierra Nevada de Santa Marta possuem condição favorável à formação de campos de gelo e geleiras (Hoyos-Patiño, 1998).

A área de estudo compreende essas geleiras que se dividem em seis áreas na Colômbia (*Sierra Nevada de Santa Marta*, *Sierra Nevada del Cocuy*, vulcão *Nevado del Ruiz*, vulcão *Nevado Santa Isabel*, vulcão *Nevado del Tolima*, vulcão *Nevado del Huila*) e uma na Venezuela (*Sierra Nevada de Mérida*) (Figura 1). Todos os vulcões nevados da área de estudo são estruturas vulcânicas classificadas como ativas (IDEAM, 2000).

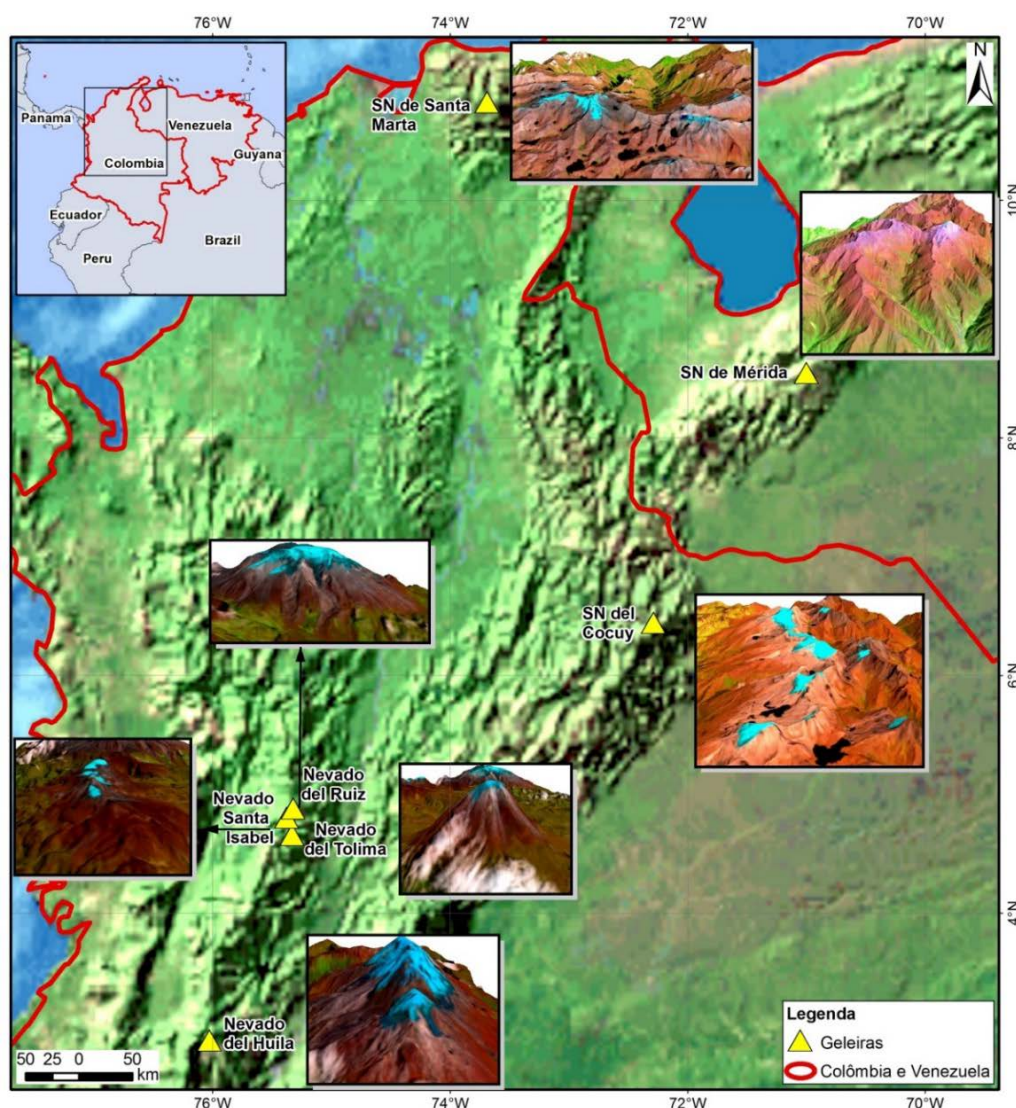


Figura 1 - Localização da área de estudo.

Caracterização Climática

No norte dos Andes o ciclo anual hidroclimático é dominado pela migração meridional da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) a qual, por sua vez, controla as várias dinâmicas dos ventos alísios sobre oceanos e

massas de terra. Diversos padrões de circulação local e regional interagem com a ZCIT e sua migração para modificar o ciclo anual de precipitação (Poveda et al., 2006).

Schubert (1975) analisou o clima da Venezuela e, segundo esse autor, durante os

meses de inverno (hemisfério norte: novembro a abril) a maior parte do país está sob a influência dos ventos alísios de nordeste os quais, sobre a terra, mudam para um sentido mais leste sobre os *Llanos* (leste dos Andes) e uma direção mais norte na bacia do Maracaibo (noroeste dos Andes). Ao atingir os Andes estes ventos ascendem e a escassa umidade que se manteve após a passagem pelo mar do Caribe é precipitada nos montes e flancos da cadeia montanhosa e pouca umidade alcança os vales internos dos Andes.

Durante os meses de verão (maio a outubro) a maior parte da Venezuela fica sob a influência da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e recebe chuva abundante. Assim como a Venezuela, o norte da Colômbia também é caracterizado por um ciclo anual bimodal de precipitação, com duas estações chuvosas distintas (abril-maio e outubro-novembro) e duas estações menos chuvosas (dezembro-fevereiro e junho-agosto), as quais são resultantes da dupla passagem da ZCIT sobre a região (Poveda et al, 2005).

Nas geleiras *Sierra Nevada de Santa Marta*, *Sierra Nevada del Cocuy* e *Sierra Nevada de Mérida* o período menos chuvoso ocorre nos meses de dezembro a março; na cordilheira central, onde está localizado o *Parque Natural de los Nevados* (Vulcões *Nevado del Ruiz*, *Santa Isabel*, *del Tolima*) e o *Nevado del Huila*, há uma sazonalidade menor da precipitação, sendo que os períodos menos chuvosos ocorrem entre julho e agosto e entre dezembro e fevereiro.

As altas montanhas do norte andino são caracterizadas por clima frio, com pequenas flutuações interanuais de temperatura (IDEAM, 2012; León, 2010).

Os processos de fusão glacial estão diretamente relacionados com as mudanças climáticas e a variabilidade climática em diferentes escalas temporais.

Atualmente, as geleiras do norte andino são relativamente pequenas em área, espessura e volume e, por sua localização latitudinal e altitudinal, têm sido muito vulneráveis às mudanças na precipitação e na temperatura, respondendo tanto à dinâmica climática mundial, como às variações induzidas pela ZCIT e os fenômenos *El Niño* Oscilação Sul (IDEAM, 2012).

A variação nas condições climáticas andinas

foi registrada por Vuille & Bradley (2000), cujo estudo indicou uma tendência de aquecimento geral de 0,10-0,11 °C/década entre 1939 e 1998. Ao analisar as mudanças recentes na atmosfera da alta montanha colombiana, estudo do IDEAM (2012) evidenciou que, embora em grande parte do país a precipitação apresentou tendência de aumento, em estações meteorológicas localizadas em altitudes superiores a 3.000 m há tendência de diminuição das precipitações, destacando-se as localizadas próximas das geleiras *El Cocuy*, *Ruiz*, *Santa Isabel* e *Tolima*. Por outro lado, as temperaturas médias e médias máximas apresentaram tendência de aumento nos últimos 30 anos nas estações meteorológicas de altas montanhas. Ainda de acordo com IDEAM (2012), há uma evidência clara de que as tendências de aumento na temperatura são mais intensas na alta montanha do que em pisos térmicos inferiores, demonstrando a sensibilidade de ambientes como as geleiras, às variações climáticas.

Variação da Cobertura de Gelo na Área

Durante a Pequena Idade do Gelo - PIG (séc. XVI-XIX) a área da *Sierra Nevada de Santa Marta* chegou a 82,6 km², sendo que essa geleira estava distribuída em três massas de gelo, alongadas no sentido Leste-Oeste, respondendo principalmente às condições topográficas. Entre o fim da PIG e 1954 (período de um século), essa geleira perdeu 76% da área e as três massas glaciais localizadas na Sierra de Santa Marta em 1850 se dividiram em 50 geleiras de diferentes tamanhos. Destaca-se que essa divisão em massas menores é um dos fatores que acelerou o degelo pela exposição de uma área maior aos agentes atmosféricos. Em 1995, a área total da geleira estava reduzida a apenas 11,1 km² (IDEAM, 2000).

A *Sierra Nevada del Cocuy* é a geleira mais extensa da Colômbia. Através de registros de morainas, estima-se que a área dessa geleira em 1850 era de 148,7 km², sendo que 80% da área coberta com gelo estava localizada na vertente oeste, devido às condições topográficas (IDEAM, 2000).

Segundo Ceballos et al. (2006) em 1955 a área de gelo em Cocuy era de 38,9 km², chegando a 31,4 km² em 1986.

O *Nevado del Ruiz* possuía área de 47,5 km²

em 1850, passando para 21 km² em 1959. Além da retração que já vinha sofrendo, esse vulcão foi adicionalmente afetado pela erupção de 1985, durante a qual, perdeu aproximadamente 10% da sua massa (CEBALLOS et al., 2006).

Durante a PIG o *Nevado Santa Isabel* chegou a ocupar 27,8 km² (IDEAM, 2000), passando para apenas 9,4 km² em 1959 (CEBALLOS et al., 2006).

Segundo Ceballos et al. (2006), a área com gelo no *Nevado del Tolima* chegava a 8,6 km² em 1850 e passou para apenas 2,7 km² em 1958.

De acordo com IDEAM (2000), apesar da taxa de retração do *Nevado del Huila* ser menor que nas outras geleiras da Colômbia, é possível observar que há retrocesso do gelo no cume,

fazendo com que a rocha aflore em partes do topo, ou seja, há perda de volume de massa.

O último avanço do gelo na *Sierra Nevada de Mérida* teve um máximo em torno de 20.000 anos antes do presente e terminou por volta de 13.000 anos antes do presente, sendo chamado de Glaciação de Mérida. Nesse período a área coberta por gelo na Venezuela era de aproximadamente 600 km², sendo que aproximadamente 200 km² estavam localizados na *Sierra Nevada de Mérida*. Após essa glaciação, o degelo na região tem sido elevado (SCHUBERT, 1998).

De acordo com Braun & Bezada (2013), em 1952 a área de geleira remanescente na *Sierra Nevada de Mérida* correspondia a pouco mais de 3 km², chegando a apenas 0,1 km² em 2011.

Tabela 1 - Imagens utilizadas no estudo.

Geleira	Data	Missão	Sensor	Órbita/ Ponto	Azimute solar	Elevação Solar	Processa- mento
Sierra Nevada de Santa Marta	03/06/1985	Landsat 5	TM	008/53	112,21	51,19	L1T
	23/03/1991	Landsat 5	TM	008/53	101,7	52,32	L1T
	20/12/1997	Landsat 5	TM	008/53	138,15	44,7	L1T
	28/02/2003	Landsat 7	ETM+	008/53	118,85	53,19	L1T
	22/01/2010	Landsat 5	TM	008/53	134,53	47,63	L1T
	22/12/2015	Landsat 8	OLI	008/53	144,17	48,46	L1T
Sierra Nevada del Cocuy	26/01/1985	Landsat 5	TM	007/56	124,88	46,41	L1T
		Landsat 5	TM	007/55	126,25	45,74	L1T
	16/03/1991	Landsat 5	TM	007/56	100,19	51,34	L1T
	13/12/1997	Landsat 5	TM	007/56	134,89	48,14	L1T
	04/01/2003	Landsat 7	ETM+	007/56	134,99	48,91	L1T
	14/12/2009	Landsat 5	TM	007/56	138,57	50,69	L1T
	16/01/2016	Landsat 8	OLI	007/56	134,59	51,33	L1T
Parque Natural de los Nevados (Ruiz, Sta Isabel, Tolima)	13/03/1985	Landsat 5	TM	009/57	100,54	53,27	L1T
	14/01/1987	Landsat 5	TM	009/57	125,69	44,28	L1T
	24/10/1997	Landsat 5	TM	009/57	119,72	56,96	L1G
	14/10/2002	Landsat 7	ETM+	009/57	115,9	61,23	L1T
	30/01/2016	Landsat 8	OLI	009/57	127,88	53,44	L1T
Nevado del Huila	08/09/1986	Landsat 5	TM	009/58	74,96	52,51	L1T
	24/10/1997	Landsat 5	TM	009/58	117,59	57,47	L1G
	14/10/2002	Landsat 7	ETM+	009/58	113,3	61,64	L1T
	30/01/2016	Landsat 8	OLI	009/58	126,12	54,14	L1T
Sierra Nevada de Mérida	06/01/1986	Landsat 5	TM	006/54	132,69	43,48	L1T
	20/01/1988	Landsat 4	TM	006/54	128,5	43,2	L1T
	28/12/1999	Landsat 5	TM	006/54	135,98	43,04	L1T
	31/01/2001	Landsat 5	TM	006/54	127,61	47,46	L1T
	06/01/2015	Landsat 8	OLI	006/54	140,01	49,13	L1T

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho foram usadas imagens dos seguintes satélites e respectivos sensores: Landsat 4 – TM (*Thematic Mapper*), Landsat 5 – TM, Landsat 7 – ETM+ (*Enhanced Thematic*

Mapper Plus) e Landsat 8 – OLI (*Operational Land Imager*). As imagens utilizadas nesse trabalho são disponibilizadas gratuitamente pelo USGS (2016a), mediante cadastro na

página. Inicialmente foram definidos três requisitos para o *download* da imagem: ter sido obtida durante o período com as menores médias mensais de precipitação, não apresentar cobertura de nuvens na área da geleira e ter sido obtida entre os anos de 1985 e 2016.

Nas geleiras do norte (Sierra Nevada de Santa Marta, Sierra Nevada del Cocuy e Sierra Nevada de Mérida) foi possível obter uma boa série de dados que atendiam os requisitos listados. Contudo, nas geleiras da Cordilheira Central (Ruiz, Santa Isabel, Tolima e Huila) o número de imagens com boa qualidade que está disponível é bastante reduzido.

Assim, foram ampliados os meses de busca e considerada a possibilidade de utilizar cenas em que havia alguma cobertura de nuvem, desde que essa não inviabilizasse a delimitação da geleira. Apesar disso, o número de imagens obtidas para as geleiras da Cordilheira Central foi inferior ao que se obteve para as demais geleiras, tornando inviável manter intervalos padronizados.

Na tabela 1 estão listadas as imagens utilizadas para a delimitação da área de cada

uma das geleiras consideradas neste estudo.

Dentre as imagens selecionadas foram observados dois níveis de correção: L1T e L1G (Tabela 1). De acordo com USGS (2016b), a Correção Padrão de Terreno (Standard Terrain Correction) aplicada no nível 1T (L1T) oferece precisão radiométrica e geométrica através da incorporação de pontos de controle no terreno, enquanto emprega um Modelo Digital de Elevação (MDE) para a correção topográfica. Nas cenas onde não há pontos de controle no terreno ou MDE necessário para a correção L1T é aplicada uma correção sistemática (L1G) que proporciona precisão radiométrica e geométrica, a qual é derivada de dados coletados pelo sensor. Destaca-se que as cenas com esse nível de correção (L1G) não passaram por correção topográfica.

Na tabela 2 são apresentados o número de pontos de controle utilizados na correção e o erro quadrático médio em X e em Y de cada cena utilizada, dados esses que são disponibilizados nos metadados das imagens.

Tabela 2 - Resíduo médio resultante da ortoretificação das imagens Landsat informado nos metadados das imagens.

Geleira	Data	Número de Pontos de Controle no solo (GCPs)	Erro Quadrático Médio em Y (m)	Erro Quadrático Médio em X (m)
Sierra Nevada de Santa Marta	06/03/1985	79	3,6	2,64
	23/03/1991	122	3,82	2,96
	20/12/1997	159	3,22	3,68
	28/02/2003	121	3,2	3,14
	22/01/2010	157	3,46	3,33
	22/12/2015	215	5,89	6,4
Sierra Nevada del Cocuy	26/01/1985	37	3,98	3,9
	16/03/1991	108	3,62	3,32
	13/12/1997	88	4,18	3,82
	04/01/2003	189	4,25	2,27
	14/12/2009	141	3,16	2,75
	16/01/2016	316	4,37	6,42
Parque Natural de los Nevados (Ruiz, Santa Isabel, Tolima)	08/09/1986	95	3,74	3,79
	24/10/1997	-	-	-
	14/10/2002	80	3,79	3,23
	30/01/2016	75	6,98	5,54
Nevado del Huila	08/09/1986	67	4,03	3,07
	24/10/1997	-	-	-
	14/10/2002	142	5,84	3,2
	30/01/2016	95	6,62	6,55
Sierra Nevada de Mérida	06/01/1986	47	3,47	6,96
	20/01/1988	111	3,56	4,61
	28/12/1999	57	3,65	5,31
	31/01/2001	93	3,2	3,3
	06/01/2015	165	6,33	6,8

Após uma inspeção visual das cenas selecionadas, concluiu-se que era necessário registrar três imagens, todas do ano de 1997, que abrangiam as geleiras Sierra Nevada del Cocuy, Parque Natural de los Nevados e Nevado del Huila.

O co-registro das cenas deslocadas foi

Tabela 3 - Erro quadrático médio (RMS) resultante do corregristo das cenas TM/Landsat-5, tendo por imagem de referência a cena OLI/Landsat da respectiva geleira.

Geleira	Data	Erro Quadrático Médio (pixel)
Sierra Nevada del Cocuy	13/12/1997	0,44
Parque Natural de los Nevados (Ruiz, Santa Isabel, Tolima)	24/10/1997	0,71
Nevado del Huila	24/10/1997	0,45

Visando diminuir o tempo de processamento, as imagens selecionadas foram recortadas, de forma que recobrissem a geleira e uma faixa de aproximadamente 10 km de margem.

Para delimitar a área das geleiras foi aplicado o *Normalized Difference Snow Index* (NDSI) diretamente aos contadores digitais. Nesse índice são utilizadas duas bandas nas quais o alvo apresenta comportamento espectral oposto ou com características bem distintas: bandas 2 e 5 dos sensores TM e ETM+ e bandas 3 e 6 do sensor OLI, conforme as equações a seguir.

$$\text{NDSI} = [\text{TM2} - \text{TM5}] / [\text{TM2} + \text{TM5}]$$

$$\text{NDSI} = [\text{OLI3} - \text{OLI6}] / [\text{OLI3} + \text{OLI6}]$$

A aplicação desse índice gerou um arquivo em formato raster, com valores entre -1 e 1. Cada imagem resultante da aplicação do Índice foi comparada com uma composição colorida em que a cobertura de gelo se destacava (TM e ETM+: RGB542 e OLI: RGB653).

Após essa análise, foram definidos os limiares de cada imagem, os quais variaram entre 0,4 e 0,7 nas imagens TM e ETM+ e, entre 0,25 e 0,35 nas imagens do sensor OLI.

As áreas classificadas como geleiras foram então convertidas para vetor e os polígonos com área menor que 4.500 m² (5 pixels) foram removidos por serem insignificantes no contexto considerado.

Em seguida, os polígonos restantes passaram por uma nova análise visando identificar se apenas áreas de geleiras

efetuado no *software* Envi, com geração automática de pontos de controle, tendo como referência a imagem mais recente da respectiva geleira. Na tabela 3 são apresentados os erros resultantes do co-registro realizado nas imagens com deslocamento, sendo que todos elas ficaram com um erro inferior a 1 pixel.

estavam demarcadas, sendo que em algumas imagens, restaram alguns polígonos em áreas cobertas por água, os quais foram selecionados e excluídos manualmente.

Em algumas imagens da Cordilheira Central observou-se nuvens finas sobre as geleiras. Essas imagens não puderam ser descartadas devido ao pequeno número de cenas multitemporais em que não há cobertura total de nuvens. As áreas de nuvens apresentaram valores baixos na imagem resultante da aplicação do NDSI, ou seja, para abranger as áreas de gelo com nuvens finas sobrepostas, seria necessário usar um valor de limiar muito baixo, o que levaria a uma sobre estimativa da área total.

Então, optou-se por aplicar a razão de bandas TM5/TM3, pois, como a cobertura de nuvens nessas imagens não era espessa, parte da radiação é transmitida, possibilitando diferenciar as áreas de gelo e de solo.

O raster resultante da aplicação da razão de bandas apresentou valores entre 0 e 5, sendo que os menores valores correspondiam a áreas somente cobertas por gelo, valores pouco superiores em áreas de geleira e nuvens finas e, valores bem mais elevados em áreas de nuvens e solo ou apenas nuvens.

Assim, após inspeção visual, foi determinado um limiar que variou entre 0,55 e 0,9 nas imagens utilizadas para delimitar as áreas de gelo que estavam cobertas por nuvens finas.

Esse dado foi convertido para vetor e mesclado ao vetor resultante da aplicação do *Normalized Difference Snow Index*-NDSI, chegando-se assim ao limite da geleira.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Sierra Nevada de Santa Marta

Para o ano de 1985, foi estimado que a área da geleira era de 17,39 km², enquanto em 2015 a extensão da geleira correspondia a 7,79 km², o que representa uma retração de 55% no período analisado (Figura 2).

Como pode ser observado na figura 2D, o período de maior retração foi entre 1985 e 1991; por outro lado, entre 2010 e 2015, a área dessa geleira permaneceu estável.

Quanto à distribuição espacial das massas de gelo, observa-se que houve desaparecimento de pequenas massas de gelo existentes nos primeiros anos de estudo, o que pode estar relacionado a efeitos de borda, uma vez que pequenas geleiras são mais suscetíveis a variações climáticas.

Além disso, houve fragmentação de blocos maiores durante o período analisado (Figura 2C).

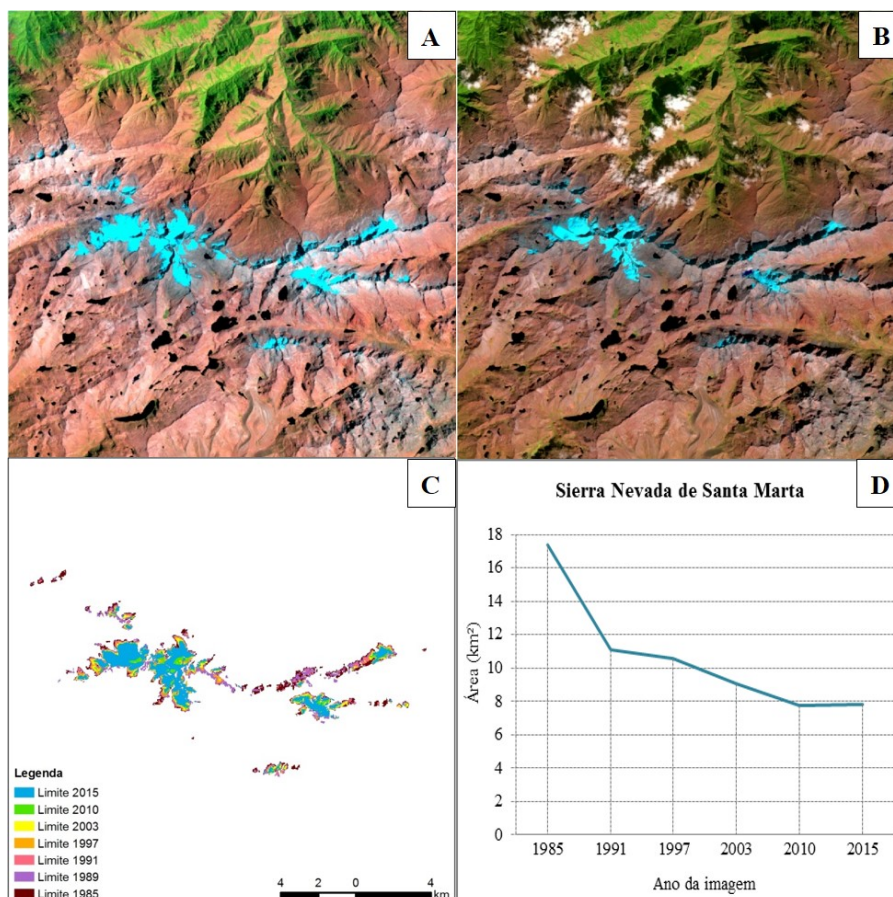


Figura 2 - Imagens Landsat da Sierra Nevada de Santa Marta em (A) Março de 1985 (RGB543), e (B) Dezembro de 2015 (RGB654). (C) Evolução temporal do contorno da geleira. (D) Variação de área da geleira.

Sierra Nevada Del Cocuy

A área estimada dessa geleira, em 1985, foi de 31,93 km², passando para 14,63 em 2016, o que representa uma redução de 54%. A retração mais acentuada ocorreu entre 1985 e 1997, sendo que durante esse período houve uma redução de 32% na área da geleira (Figura 3D).

Como são mais suscetíveis a impactos relacionados à variação de parâmetros meteorológicos devido a efeitos de bordas, pequenas massas de gelo existentes no início do estudo acabaram desaparecendo. A maior mudança observada nos maiores blocos de

gelo se refere à fragmentação em unidades menores.

Nevado Del Ruiz

A área coberta com gelo no vulcão *Nevado del Ruiz* passou de 17,15 km² em 1985 para 6,47 km² em 2016, o que corresponde a uma redução de 62 % da área. Como pode ser observado na Figura 4D, houve redução acentuada entre 1985 e 1987 e novamente entre 2002 e 2016.

Além dos fatores externos que têm influenciado na retração do *Nevado del Ruiz*, a atividade vulcânica também tem acelerado a fusão dessa geleira.

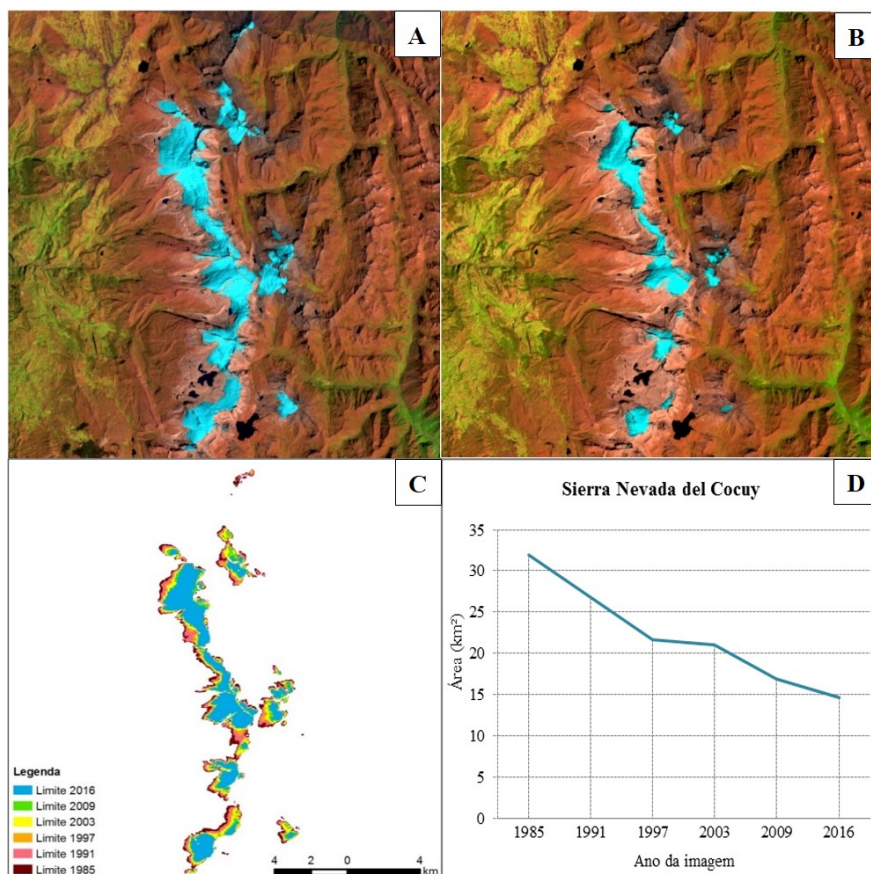


Figura 3 - Imagens Landsat da Sierra Nevada del Cocuy em **A**) Janeiro de 1985 (RGB542), e **B**) Janeiro de 2016 (RGB654). **C**) Evolução temporal do contorno da geleira. **D**) Variação de área da geleira.

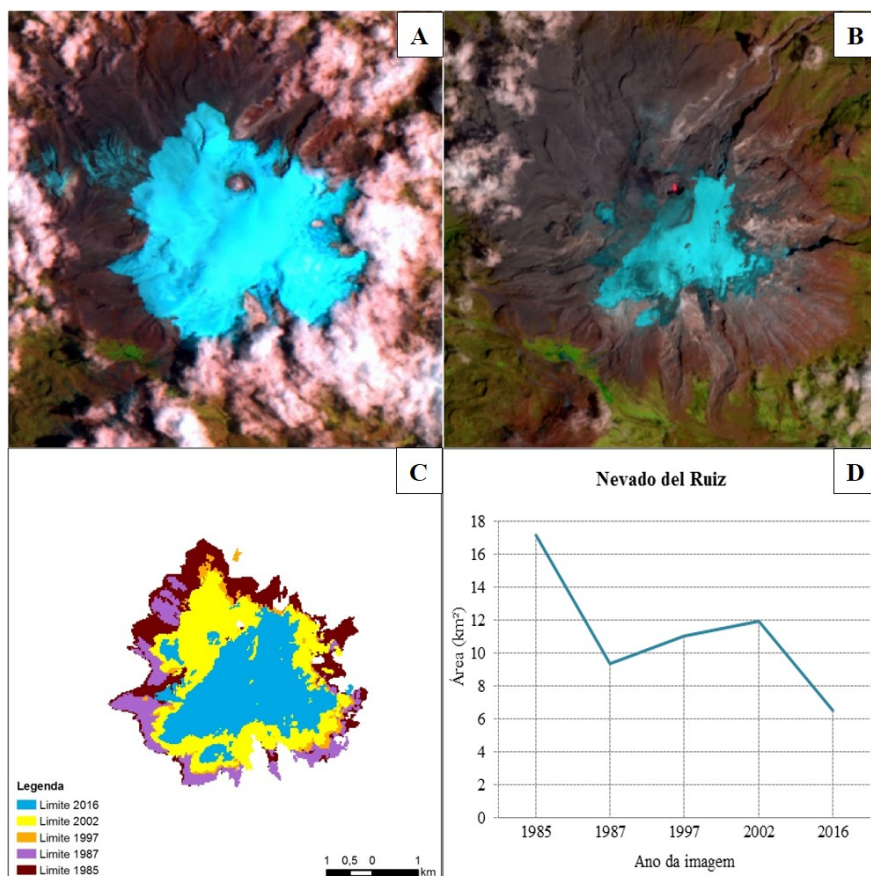


Figura 4 - Imagens Landsat do Nevado del Ruiz em **A**) Março de 1985 (RGB542), e **B**) Janeiro de 2016 (RGB654). **C**) Evolução temporal do contorno da geleira. **D**) Variação de área da geleira.

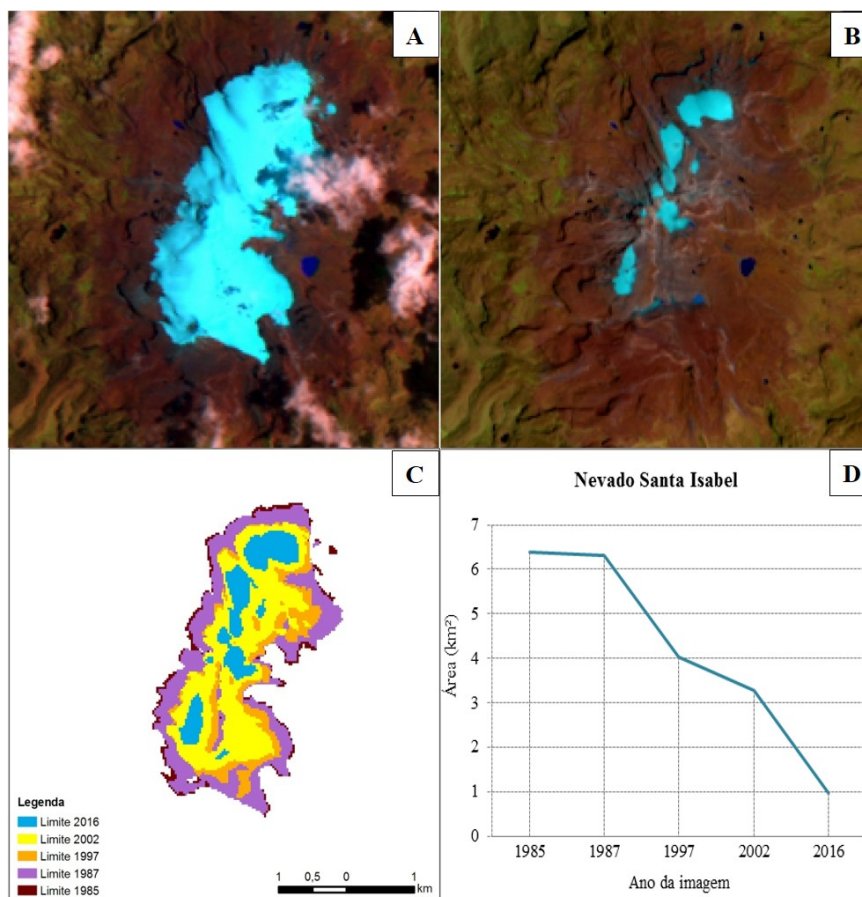


Figura 5 - Imagens Landsat do Nevado Santa Isabel em **A**) Março de 1985 (RGB542), e **B**) Janeiro de 2016 (RGB654). **C**) Evolução temporal do contorno da geleira. **D**) Variação de área da geleira.

Durante o período analisado ocorreu uma erupção em novembro de 1985, a qual causou perda acentuada de área (IDEAM, 2000). Conforme gráfico da figura 4D verifica-se que nos anos seguintes à erupção, a geleira recuperou parte da área perdida em 1985, contudo, entre os anos de 2002 e 2016 o *Nevado del Ruiz* voltou a apresentar retração.

Nevado Santa Isabel

O *Nevado Santa Isabel* apresentou perda acentuada de área no período analisado (Figuras 5A, B). Essa geleira passou de 6,40 km² em 1985 para 0,96 km² em 2016, o que representa um encolhimento de 85% (Figura 5D).

Segundo Ceballos et al. (2006), efeitos de borda e escala se tornam efetivos quando a geleira atinge um tamanho crítico e, de acordo com esses autores, o *Nevado Santa Isabel* atingiu a dimensão crítica para esses efeitos na década de 1990.

Além disso, com a perda de gelo em partes do topo, o aquecimento das rochas do entorno pela radiação solar, pode implicar em advecção local do ar quente e isso pode aumentar o fluxo de calor sensível.

Nevado Del Tolima

O vulcão *Nevado del Tolima* possui a menor geleira da Colômbia devido à condição estrutural (tamanho) do cone vulcânico onde se encontra localizado (IDEAM, 2000). A geleira possuía área de 1,89 km² em 1985 e passou para 0,58 km² em 2016, o que corresponde a uma redução de 69% do total (Figura 6B).

Nevado Del Huila

O *Nevado del Huila* possuía área de 16,25 km² em 1986, sendo que esse valor caiu para 6,41 km² em 2016 (Figura 7D), o que corresponde a uma redução de 61% da área ocupada pela geleira.

Destaca-se que a retração identificada não ocorreu apenas nas partes mais baixas da geleira, mas partes do topo também perderam massa de gelo, marcado pelo fraturamento de uma massa única de gelo existente em 1986 em fragmentos menores (Figuras 7A, B). Em junho de 1994, um terremoto de magnitude 6.2 na escala Richter, desencadeou uma avalanche a partir da geleira do *Nevado del Huila*. De acordo com IDEAM (2000), é provável que esse terremoto tenha aumentado o fraturamento da geleira, o que

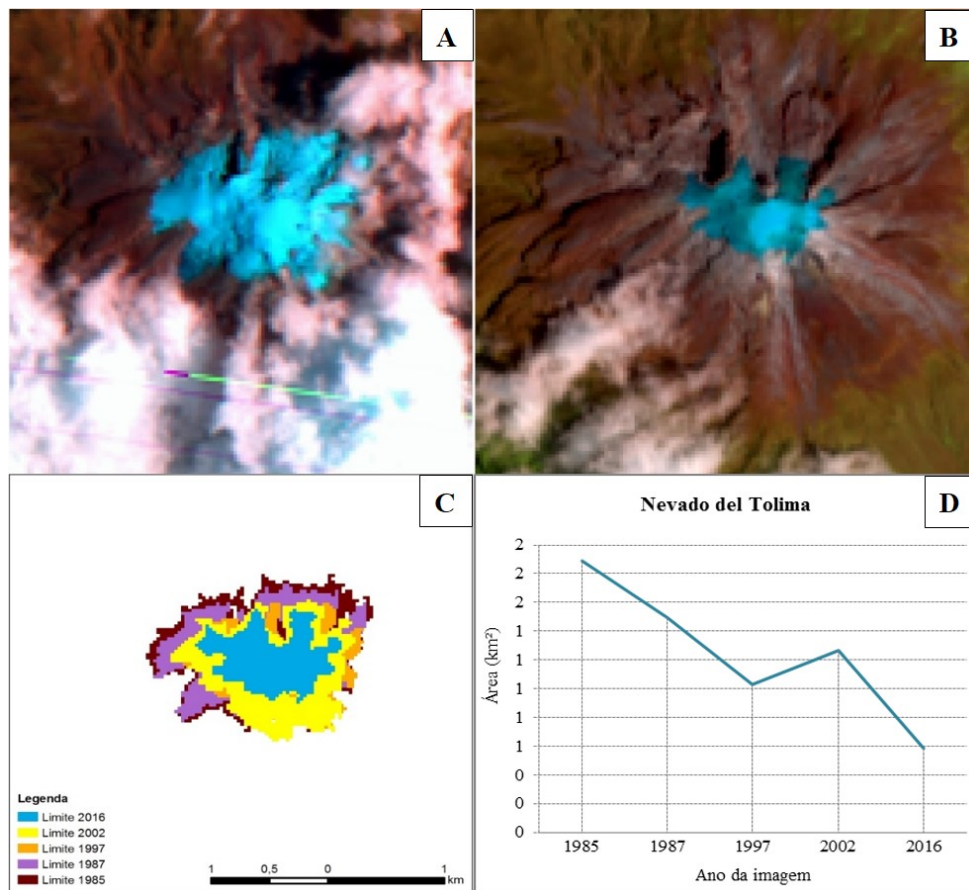


Figura 6 - Imagens Landsat do Nevado del Tolima em **A**) Março de 1985 (RGB542), e **B**) Janeiro de 2016 (RGB654). **C**) Evolução temporal do contorno da geleira. **D**) Variação de área da geleira.

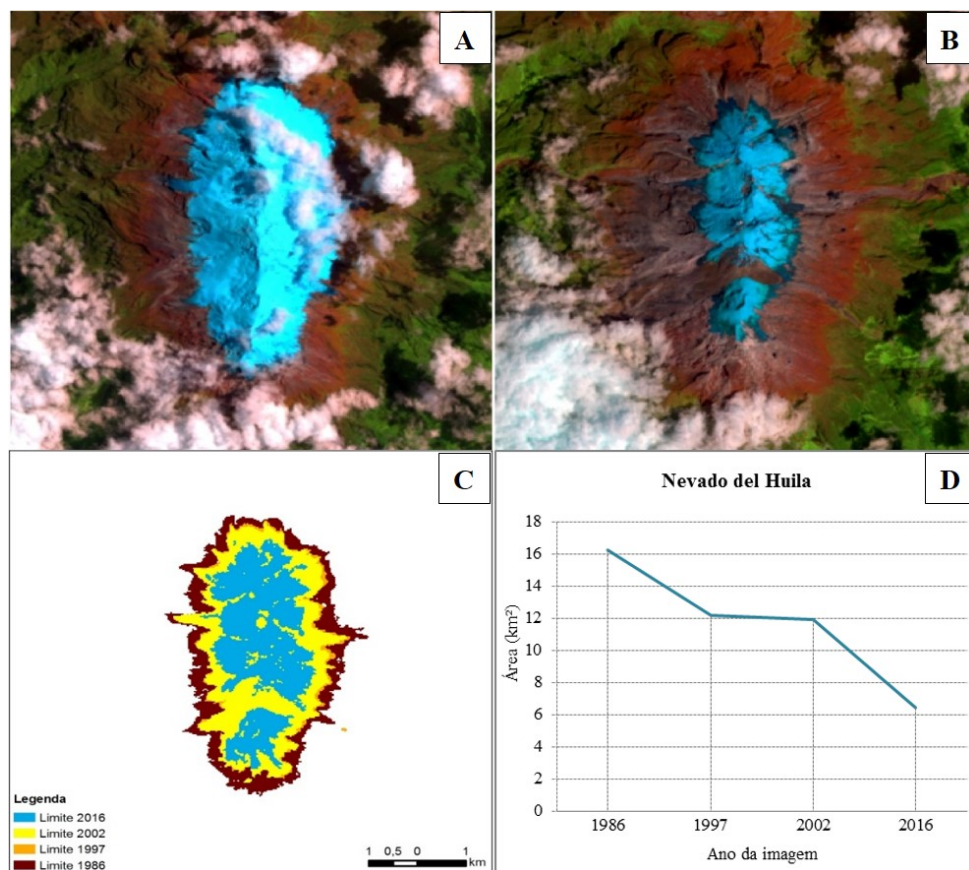


Figura 7 - Imagens Landsat do Nevado del Huila em **A**) Agosto de 1986 (RGB542), e **B**) Janeiro de 2016 (RGB654). **C**) Evolução temporal do contorno da geleira. **D**) Variação de área da geleira.

poderia levar a um aumento da perda de massa.

Infelizmente não há imagens do ano subsequente a esse evento disponíveis, assim, não foi possível analisar nesse estudo se houve alguma mudança aparente na área da geleira nos meses seguintes ao terremoto citado.

Sierra Nevada De Mérida

A *Sierra Nevada de Mérida* é a última área coberta com gelo permanente na Venezuela. Em 1986 havia cobertura de gelo em quatro picos na *Sierra Nevada de Mérida*: Bolívar, la Concha, Bonpland e Humboldt, sendo que os dois últimos estavam conectados.

Já no mapeamento realizado com imagens de 2015, foram identificadas áreas com geleira apenas nos picos Humboldt/Bonpland (Figuras 8A, B).

Entre as geleiras estudadas, a *Sierra Nevada*

de Mérida foi a que apresentou a maior retração no período, 92%, passando de 1,84 km² em 1986 para apenas 0,14 km² em 2015 (Figura 8D).

Na tabela 4 é apresentada uma síntese dos resultados obtidos nesse estudo. Observa-se que todas as geleiras mencionadas nesse trabalho apresentaram redução da área no período analisado. As taxas de retração anual variaram entre 2,49% a.a., na *Sierra Nevada del Cocuy*, e 8,43% a.a. na *Sierra Nevada de Mérida*.

Nos anos iniciais do estudo (1985/1986), a área total coberta com gelo na Colômbia e na Venezuela chegava a 92,84 km², mas com a retração ocorrida no período, a área total das geleiras passou para 36,97 km² nos anos 2015/2016, o que corresponde a uma retração de 60% no total das áreas analisadas das cenas multitemporais.

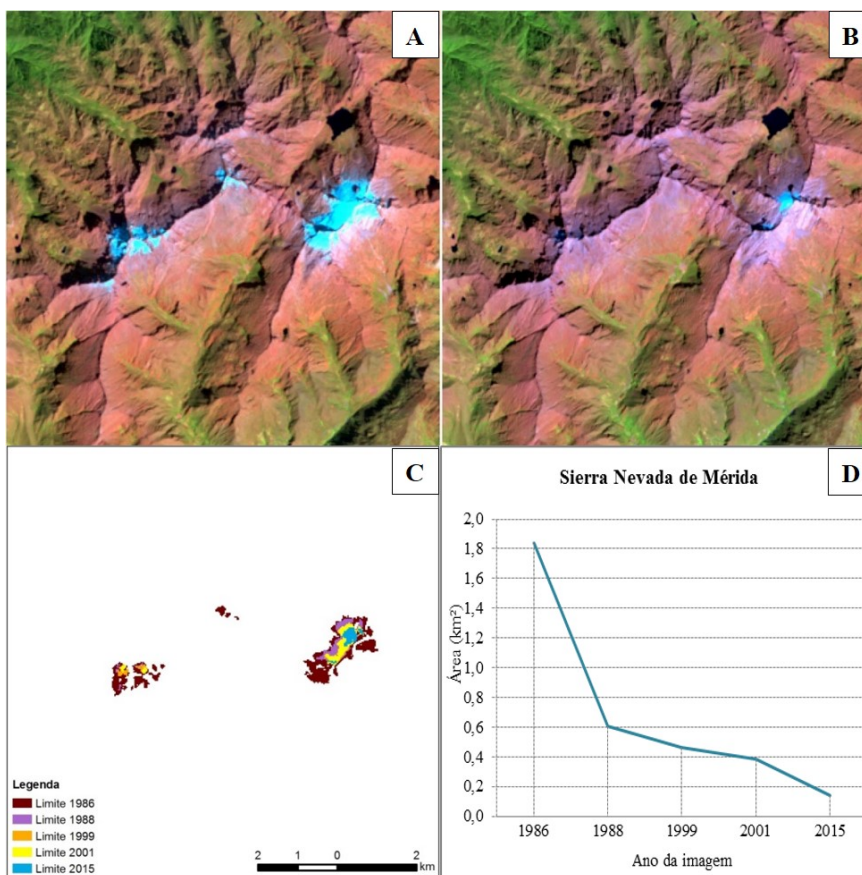


Figura 8 - Imagens Landsat da Sierra Nevada de Mérida em **A**) Janeiro de 1986 (RGB542), e **B**) Janeiro de 2015 (RGB654). **C**) Evolução temporal do contorno da geleira. **D**) Variação de área da geleira.

CONCLUSÃO

A delimitação das áreas de geleira feita a partir da aplicação do NDSI diretamente aos contadores digitais se mostrou adequada para o mapeamento de geleiras, reduzindo as correções manuais.

Destaca-se que a definição do limiar baseado no comportamento de cada imagem é um passo

chave do processo, pois o uso de valores muito altos ou muito baixos pode levar a uma subestimativa ou sobre estimativa da área coberta por gelo e, conseqüentemente, a obtenção de resultados que não correspondem à realidade.

Tabela 4 - Síntese dos resultados obtidos.

Geleira	Período	Nº anos	Área inicial (km ²)	Área final (km ²)	Retração (%)	Tx retração anual
Sierra Nevada de Santa Marta	1985-2015	30	17,39	7,79	55,21	-2,64
Sierra Nevada del Cocuy	1985-2016	31	31,93	14,63	54,19	-2,49
Nevado del Ruiz	1985-2016	31	17,15	6,47	62,29	-3,10
Nevado Santa Isabel	1985-2016	31	6,40	0,96	85,06	-5,95
Nevado del Tolima	1985-2016	31	1,89	0,58	69,13	-3,72
Nevado del Huila	1986-2016	31	16,25	6,41	60,56	-2,96
Sierra Nevada de Mérida	1986-2015	29	1,84	0,14	92,22	-8,43

Apesar da resolução espacial dos sensores TM, ETM+ e OLI não permitir a identificação de detalhes na área de geleiras pequenas, a resolução espectral se mostrou adequada para a identificação de áreas de gelo.

Além disso, a longa série de dados disponíveis fornece um importante registro histórico, que possibilita comparar as mudanças ocorridas ao longo de várias décadas.

Embora haja incertezas inerentes ao tipo de dado utilizado, destaca-se que o nível de correção L1T aplicado a maior parte das imagens utilizadas, as quais foram disponibilizadas pelo USGS (2016b), dispensa a necessidade de co-registro, facilitando a comparação de cenas multitemporais.

Nas imagens em que foi necessário efetuar esse tipo de correção, considera-se que o resultado foi satisfatório, tornando viável o

comparativo com as cenas multitemporais já co-registradas. Em função da ocorrência de cobertura de nuvens ser frequente na área, especialmente na Cordilheira Central, onde estão localizados quatro nevados considerados nesses estudos, não foi possível utilizar os mesmos intervalos de tempo, nem os mesmos anos em todas as geleiras.

Por isso, os anos de início variam entre 1985 e 1986 e os anos de fim da série temporal variam entre 2015 e 2016, resultando em intervalos de dados que variam de 29 a 31 anos.

O monitoramento das áreas ocupadas com neve e gelo mediante do uso de imagens de sensoriamento remoto se mostrou satisfatório e permitiu obter um panorama das mudanças ocorridas na área nas últimas três décadas, mesmo sem a execução de trabalho em nível de campo.

REFERÊNCIAS

- BRAUN, C. & BEZADA, M. The history and disappearance of glaciers in Venezuela. *Journal of Latin American Geography*, v. 12, p. 85–124, 2013.
- CARRILLO, E & YÉPES, S. 2010. Evolución de los glaciares en los Andes venezolanos: glaciares de los Picos Humboldt y Bonpland. In: ARENAS, C.D.L.; CADENA, J.R. (Comp.). *Glaciares, nieves y hielos de América Latina: Cambio climático y amenazas*. Bogotá: Ingeominas. p. 123-136.
- CEBALLOS, J.L.; TÓBON, E.; ARIAS, M.; CARVAJAL, J.; LÓPEZ, O; BUITRAGO, V.; VALDERRAMA, J.; RAMÍREZ, J. Glaciares Santa Isabel y el Cocuy (Colombia): Seguimiento a su dinámica durante el período 2006-2008. In: ARENAS, C.D.L. & CADENA, J.R. (Org.). *Glaciares, nieves y hielos de América Latina: Cambio climático y amenazas*. Bogotá: Ingeominas, p. 91-114, 2010.
- HOYOS-PATÍÑO, F. Glaciers of Colombia. In: WILLIAMS Jr. R.S; FERRIGNO J.G (Comp.). *Satellite Image Atlas of Glaciers of the World - South America*. United States Geological Survey Professional Paper 1386-1. United States Government Printing Office, Washington. p. I11-I30, 1998.
- IDEAM - *Los glaciares Colombianos, expresión del cambio climático global*. Bogotá, 19 p., 2000. Disp. em: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/009724/glaciares.pdf>. Acesso em fevereiro de 2016.
- IDEAM - *Glaciares de Colombia, más que montañas con hielo*. Bogotá, D.C., 344p., 2012
- LEON, G.A.S. *Tipos y subtipos climáticos de Venezuela*. 2010. Venezuela. Trabajo de ascenso a la categoría de titular.
- LEPPÄRANTA, M.P. & GRANBERG, H.B. Physics of glacier remote sensing. In: PELLIKA, P. & REES, W.G. (eds.). *Remote Sensing of glaciers: Techniques for topographic, spatial and thematic mapping of glaciers*. London: CRC Press, p. 81-98, 2010.
- POVEDA, G.; WAYLEN, P.R.; PULWARTY, R.S. Annual and inter-annual variability of the present climate in northern South America and southern Mesoamerica. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, v. 234, p. 3–27, 2006.
- SAGREDO, E.A.; RUPPER, S.; LOWELL, T.V. Sensitivities of the equilibrium line altitude to temperature and precipitation

- changes along the Andes. **Quaternary Research**, v. 81, p. 355-366, 2014.
- SCHUBERT, C. Glaciation and Periglacial Morphology in the Northwestern Venezuelan Andes. **Quaternary Science**, v. 26, p. 196-211, 1975.
- SCHUBERT, C.. Glaciers of Venezuela. In: WILLIAMS Jr. R. S; FERRIGNO J.G (Comp.). **Satellite Image Atlas of Glaciers of the World - South America**. United States Geological Survey Professional Paper 1386-1. United States Government Printing Office, Washington. p. I1-I10, 1998.
- VUILLE, M & BRADLEY, R.S. Mean annual temperature trends and their vertical structure in the tropical Andes. **Geophysical Research Letters**, v. 27, n. 23, p. 3885-3888, 2000.
- USGS-United States Geological Survey. 2016a. **EarthExplorer**. Disp. em: <http://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em: junho de 2015.
- USGS-United States Geological Survey. 2016b. **Landsat Processing Details**. Disp. em: http://landsat.usgs.gov/Landsat_Processing_Details.php. Acesso em março de 2016.

*Submetido em 27 de outubro de 2016
Aceito em 28 de fevereiro de 2018*