



UNIVERSIDAD DE CHILE
Facultad de Arquitectura y Urbanismo
Escuela de Pregrado
Carrera de Geografía

ANÁLISIS DE VARIACIONES AREALES DE LOS GLACIARES
UBICADOS EN LAS CUENCAS DE VODUDAHÜE Y CAHUELMÓ
DURANTE EL PERÍODO 1985-2017

Memoria para optar al título profesional de Geógrafo

CRISTÓBAL ANTONIO DÍAZ BRAVO

Profesor Guía: María Victoria Soto Bäuerle

SANTIAGO – CHILE

2018

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a mi familia, gracias a la cual tuve la oportunidad de acceder y llevar de buena manera una vida universitaria y llegar hasta este momento de la titulación. Gracias Papá, Mamá, Pauli y Abuela. También quiero agradecer a todas las mascotas que me acompañaron durante toda la vida, especialmente a las últimas, Flora, Lily y Bi.

Luego agradecer a mi familia ñuñoína, la cual me acogió y trató bien durante la gran mayoría de mi período universitario, durante toda la licenciatura. Gracias Javi, Nico, tía Mónica, tío Juan Carlos. Y a las noches de fiesta.

A mis amigas y amigos de Puerto Varas, mi origen: José, Ricardo, Franco y Christofer, a quienes conozco desde que tengo memoria y me han acompañado y apoyado siempre. A Felipe Pingüino, mi conviviente y amigo, los Matías y su buen humor, Martín, con quien compartimos la misión de nuestras vidas. A Felipe, Natalia y Belén, quienes pese a llegar relativamente tarde en lo que va de mi vida, me han acompañado y apoyado desde entonces y han sido compañeros de aventuras y nerderías. También a Valentina y Fernanda, compañeras de cafés, chocolates y pizzas.

A mis amigas y amigos de la universidad, que a pesar de llevar relativamente pocos años en mi existencia, han pasado a constituir pilares fundamentales de mí y me han llevado a ser quién soy ahora. A Paula, Patricia y Josefa, quienes han sabido ayudarme a ver un futuro brillante y acercarme a la superficie y más allá, sacándome de agujeros. A Daniel, Fernando, Marcela, Eduardo, Eduardito, Javier, Carolina, María Cristina, Lissette, Tamsin, Frances, Christofer, Pablo, Javiera, Caterine, Valeria, Dannery, Mariam, Orlando, Maximiliano, Nicol, Luis, Hugo, Ruth, Mariana, Valdovino, Damián, Cristian, Daniela, Juan y Geocompañeros.

Finalmente, quiero agradecer a la profesora María Victoria Soto y su equipo, por la oportunidad de realizar esta memoria de título, a través del Proyecto Fondecyt 1151087, a Ignacio Ibarra mi guía, a Pablo Sarricolea por la ayuda que me brindó y a todo el laboratorio de Geografía Física, por darme el espacio para poder desarrollarla. A Pablo, Camila, Ricardo y Misael.

Gracias.

TABLA DE CONTENIDOS

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	12
2. HIPÓTESIS	13
3. OBJETIVOS	13
3.1.1. <i>Objetivo General</i>	13
3.1.2. <i>Objetivos Específicos</i>	13
4. ESTADO DEL ASUNTO	14
4.1. Área de Estudio.....	14
4.1.1. <i>Geomorfología</i>	15
4.1.2. <i>Geología</i>	15
4.1.3. <i>Glaciología</i>	16
4.1.4. <i>Demografía</i>	16
4.1.5. <i>Clima</i>	16
4.1.6. <i>Flora y Fauna</i>	17
4.1.7. <i>Actividades Antrópicas</i>	17
4.2. Glaciares.....	18
4.2.1. El concepto de glaciar.....	18
4.2.2. Tipos de Glaciares en Área de Estudio.....	19
4.2.2.1. Glaciares según estado térmico.....	19
4.2.2.1.1. <i>Glaciares fríos</i>	19
4.2.2.1.2. <i>Glaciares templados</i>	19
4.2.2.1.3. <i>Glaciares politermales</i>	19
4.2.2.2. Morfologías glaciares en área de estudio.....	20
4.2.2.2.1. <i>Glaciares de montaña</i>	20

4.2.2.2.2. <i>Glaciares de circo</i>	20
4.3. Tendencias de Cambio Areales y Volumétricas.....	20
4.3.1. Tendencias de Cambio Areales.....	21
4.3.2. Tendencias de Cambio Volumétricas.....	23
4.3.2.1. <i>Zona Norte</i>	24
4.3.2.2. <i>Zona Centro</i>	24
4.3.2.3. <i>Zona Sur</i>	24
4.3.2.4. <i>Zona Austral</i>	24
4.4. Análisis de variaciones areales.....	25
4.5. Cambio Climático.....	26
4.5.1. Variaciones climáticas de las últimas décadas a nivel global y en Chile.....	26
4.5.2. Variabilidad Climática y Glaciares.....	27
4.5.3. Proyecciones climáticas para el Siglo XXI.....	29
5. METODOLOGÍA	31
5.1. Imágenes Satelitales.....	31
5.1.1. Compilación de escenas.....	31
5.1.2. Correcciones de imágenes Landsat.....	32
5.1.2.1. <i>Transformación a valores de Radianza</i>	32
5.1.2.2. <i>Corrección Atmosférica</i>	33
5.1.2.3. <i>Corrección Radiométrica</i>	34
5.1.3. Utilización de <i>software</i> ARCGIS.....	34
5.1.4. <i>Estimación de error</i>	35
5.2. Información Climatológica.....	35

6. RESULTADOS	37
6.1. Área de Estudio y Combinaciones de Bandas.....	37
6.1.1. <i>Año 1985</i>	38
6.1.2. <i>Año 1998</i>	39
6.1.3. <i>Año 2005</i>	40
6.1.4. <i>Año 2010</i>	41
6.1.5. <i>Año 2017</i>	42
6.2. Glaciares Identificados por Cuenca.....	43
6.2.1. <i>Cuenca Cahuelmó (1985)</i>	43
6.2.2. <i>Cuenca Vodudahüe (1985)</i>	44
6.3. Variaciones Superficiales Areales.....	45
6.3.1. Glaciar Cahuelmó.....	45
6.3.2. Glaciar Vodudahüe N°1.....	47
6.3.3. Glaciar Vodudahüe N°2.....	49
6.3.4. Glaciar Vodudahüe N°3.....	51
6.3.5. Glaciar Vodudahüe N°4.....	53
6.3.6. Glaciar Vodudahüe N°5.....	55
6.3.7. Glaciar Vodudahüe N°6.....	57
6.3.8. Glaciar Vodudahüe N°7.....	59
6.3.9. Glaciar Vodudahüe N°8.....	61
6.3.10. Glaciar Vodudahüe N°9.....	63
6.3.11. Glaciar Vodudahüe N°10.....	65
6.3.12. Glaciar Vodudahüe N°11.....	67
6.3.13. Glaciar Vodudahüe N°12.....	69

6.3.14. Glaciar Vodudahüe N°13.....	71
6.3.15. Glaciar Vodudahüe N°14.....	73
6.3.16. Glaciar Vodudahüe N°15.....	75
6.3.17. Glaciar Vodudahüe N°16.....	77
6.4. Síntesis de Variación Areal (km ²) Glaciares Vodudahüe.....	79
6.5. Tasa de Variación Areal Anual.....	83
6.6. Análisis Climatológico de Huinay.....	87
6.6.1. Promedio de Temperaturas (°C) por año en período 1985-2017.....	87
6.6.2. Precipitaciones Totales Anuales (mm) Período 1985-2017.....	89
6.6.3. Precipitación Acumulada durante días de frío (<11,4°C).....	91
6.7. Exposición y Emplazamiento Morfológico.....	93
7. DISCUSIÓN.....	94
8. CONCLUSIONES.....	97
9. BIBLIOGRAFÍA.....	98

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N°1: Área de estudio.....	14
Figura N°2: Síntesis de variaciones frontales de Chile.....	23
Figura N°3: Anomalía del promedio global de temperaturas en superficie, terrestres y oceánicas, combinadas.....	26
Figura N°4: Líneas de Equilibrio regionales calculadas por Condom et al., (2007) y Carrasco et al., (2005) comparadas con observaciones (Carrasco et al., 2008).....	28
Tabla N°1: Parámetros para conversión a reflectividades de las imágenes Landsat 5 TM.....	33
Figura N°5: Ejemplo de corrección atmosférica.....	33
Figura N°6: Combinación Color Natural 3-2-1, Escala Regional, Año 1985; Área de Estudio Color Natural 3-2-1, Año 1985; Combinación 7-5-4, Año 1985.....	38

Figura N°7: Combinación Color Natural 3-2-1, Escala Regional, Año 1985; Área de Estudio Color Natural 3-2-1, Año 1998; Combinación 7-5-1, Año 1998.....	39
Figura N°8: Combinación Color Natural 3-2-1, Escala Regional, Año 2005; Área de Estudio Color Natural 3-2-1, Año 2005; Combinación 7-4-3, Año 2005.....	40
Figura N°9: Combinación Color Natural 3-2-1, Escala Regional, Año 2010; Área de Estudio Color Natural 5-4-1, Año 2010; Combinación 5-4-1, Año 2010.....	41
Figura N°10: Combinación Color Natural 3-2-1, Escala Regional, Año 2017; Área de Estudio Color Natural 3-2-1, Año 2017; Combinación 7-5-4, Año 2017.....	42
Figura N°11: Glaciar Cuenca Cahuelmó 1985, Combinación de bandas 7-5-4.....	43
Figura N°12: Glaciares Cuenca Vodudahüe Año 1985, Combinación 7-5-4.....	44
Figura N°13: Variación Areal Superficial Glaciar Cahuelmó, período 1985-2017.....	45
Tabla N°2: Variación superficial y Tasas de Variación Glaciar Cahuelmó 1985-2017.....	46
Figura N°14: Gráfico de Variación Superficial de Glaciar Cahuelmó 1985-2017.....	46
Figura N°15: Variación Areal Superficial Glaciar Vodudahüe N°1 (1985-2017).....	47
Tabla N°3: Variación superficial y Tasas de Variación Glaciar Vodudahüe N°1 1985-2017.....	48
Figura N°16: Gráfico de Variación Superficial de Glaciar Vodudahüe N°1 1985-2017.....	48
Figura N°17: Variación Areal Superficial Glaciar Vodudahüe N°2 (1985-2017).....	49
Tabla N°4: Variación superficial y Tasas de Variación Glaciar Vodudahüe N°2 1985-2017.....	50
Figura N°18: Gráfico de Variación Superficial de Glaciar Vodudahüe N°2 1985-2017.....	50
Figura N°19: Variación Areal Superficial Glaciar Vodudahüe N°3, (1985-2017).....	51
Tabla N°5: Variación superficial y Tasas de Variación Glaciar Vodudahüe N°3 1985-2017.....	52
Figura N°20: Gráfico de Variación Superficial de Glaciar Vodudahüe N°3 1985-2017.....	52
Figura N°21: Variación Areal Superficial Glaciar Vodudahüe N°4, (1985-2017).....	53
Tabla N°6: Variación superficial y Tasas de Variación Glaciar Vodudahüe N°4 1985-	

Análisis de variaciones areales de los glaciares ubicados en las cuencas de Vodudahüe y Cahuelmó durante el período 1985-2017

2017.....	54
Figura N°22: Gráfico de Variación Superficial de Glaciar Vodudahüe N°4 1985-2017.....	54
Figura N°23: Variación Areal Superficial Glaciar Vodudahüe N°5, (1985-2017).....	55
Tabla N°7: Variación superficial y Tasas de Variación Glaciar Vodudahüe N°5 1985-2017.....	56
Figura N°24: Gráfico de Variación Superficial de Glaciar Vodudahüe N°5 1985-2017.....	56
Figura N°25: Variación Areal Superficial Glaciar Vodudahüe N°6, (1985-2017).....	57
Tabla N°8: Variación superficial y Tasas de Variación Glaciar Vodudahüe N°6 1985-2017.....	58
Figura N°26: Gráfico de Variación Superficial de Glaciar Vodudahüe N°6 1985-2017.....	58
Figura N°27: Variación Areal Superficial Glaciar Vodudahüe N°7, (1985-2017).....	59
Tabla N°9: Variación superficial y Tasas de Variación Glaciar Vodudahüe N°7 1985-2017.....	60
Figura N°28: Gráfico de Variación Superficial de Glaciar Vodudahüe N°7 1985-2017.....	60
Figura N°29: Variación Areal Superficial Glaciar Vodudahüe N°8, (1985-2017).....	61
Tabla N°10: Variación superficial y Tasas de Variación Glaciar Vodudahüe N°8 1985-2017.....	62
Figura N°30: Gráfico de Variación Superficial de Glaciar Vodudahüe N°8 1985-2017.....	62
Figura N°31: Variación Areal Superficial Glaciar Vodudahüe N°9, (1985-2017).....	63
Tabla N°11: Variación superficial y Tasas de Variación Glaciar Vodudahüe N°9 1985-2017.....	64
Figura N°32: Gráfico de Variación Superficial de Glaciar Vodudahüe N°9 1985-2017.....	64
Figura N°33: Variación Areal Superficial Glaciar Vodudahüe N°10 (1985-2017).....	65
Tabla N°12: Variación superficial y Tasas de Variación Glaciar Vodudahüe N°10 1985-2017.....	66
Figura N°34: Gráfico de Variación Superficial de Glaciar Vodudahüe N°10 1985-2017.....	66
Figura N°35: Variación Areal Superficial Glaciar Vodudahüe N°11, (1985-2017).....	67

Tabla N°13: Variación superficial y Tasas de Variación Glaciar Vodudahüe N°11 1985-2017.....	68
Figura N°36: Gráfico de Variación Superficial de Glaciar Vodudahüe N°11 1985-2017....	68
Figura N°37: Variación Areal Superficial Glaciar Vodudahüe N°12, (1985-2017).....	69
Tabla N°14: Variación superficial y Tasas de Variación Glaciar Vodudahüe N°12 1985-2017.....	70
Figura N°38: Gráfico de Variación Superficial de Glaciar Vodudahüe N°12 1985-2017.....	70
Figura N°39: Variación Areal Superficial Glaciar Vodudahüe N°13, (1985-2017).....	71
Tabla N°15: Variación superficial y Tasas de Variación Glaciar Vodudahüe N°13 1985-2017	72
Figura N°40: Gráfico de Variación Superficial de Glaciar Vodudahüe N°13 1985-2017.....	72
Figura N°41: Variación Areal Superficial Glaciar Vodudahüe N°14, (1985-2017).....	73
Tabla N°16: Variación superficial y Tasas de Variación Glaciar Vodudahüe N°14 1985-2017	74
Figura N°42: Gráfico de Variación Superficial de Glaciar Vodudahüe N°14 1985-2017.....	74
Figura N°43: Variación Areal Superficial Glaciar Vodudahüe N°15, (1985-2017).....	75
Tabla N°17: Variación superficial y Tasas de Variación Glaciar Vodudahüe N°15 1985-2017.....	76
Figura N°44: Gráfico de Variación Superficial de Glaciar Vodudahüe N°15 1985-2017....	76
Figura N°45: Variación Areal Superficial Glaciar Vodudahüe N°16, (1985-2017).....	77
Tabla N°18: Variación superficial y Tasas de Variación Glaciar Vodudahüe N°16 1985-2017	78
Figura N°46: Gráfico de Variación Superficial de Glaciar Vodudahüe N°16 1985-2017.....	78
Tabla N°19: Síntesis de Variación Areal (km ²) y Porcentual de Glaciares Vodudahüe 1-16 para el período 1985-2017 Landsat.....	79
Figura N°47: Variación Superficial de Glaciares Vodudahüe en el período 1985-2017.....	80
Tabla N°20: Síntesis de Variación Areal (km ²) y Porcentual de Glaciares Vodudahüe 1-16 para el período 1985-2017 Sentinel.....	81

Análisis de variaciones areales de los glaciares ubicados en las cuencas de Vodudahüe y Cahuelmó durante el período 1985-2017

Figura N°48: Glaciar Cahuelmó y Glaciares Vodudahüe identificados en imagen Sentinel...82

Figura N°49: Tasa de Variación Areal Anual (km²) Glaciar Cahuelmó Período 1985-2017.....83

Tabla N°21: Síntesis de Tasas de Variación (km²) de Glaciares Vodudahüe 1-16 para el período 1985-2017.....84

Figura N°50: Tasas de Variación Areal Anual (km²) Glaciares Vodudahüe N°1 y N°2 Período 1985-2017.....86

Figura N°51: Tasas de Variación Areal (km²) Anual Glaciares Vodudahüe N°3-N°16 Período 1985-2017.....86

Figura N°52: Promedio de Temperaturas (°C) por año en período 1985-2017.....87

Figura N°53: Promedio de Temperaturas (°C) entre intervalos de años correspondientes a captura de las imágenes satelitales.....88

Tabla N22°: Superficie glaciar total v/s Temperatura promedio anual.....88

Figura N°54: Superficie glaciar total (km²) v/s Temperatura promedio anual (°C).....89

Figura N°55: Precipitaciones Totales Anuales (mm) Período 1985-2017.....90

Figura N°56: Promedio de Precipitaciones (mm) durante intervalos de años correspondientes a captura de las imágenes satelitales.....90

Figura N°57: Precipitación acumulada durante días de frío (<11,4°C).....91

Tabla N°23: Superficie glaciar total v/s Precipitación acumulada durante días de frío.....92

Figura N°58: Superficie glaciar total (km²) v/s Precipitación acumulada durante días de frío (mm).....92

Tabla N24°: Exposición y Morfologías de emplazamiento de los glaciares identificados.....93

Tabla N°25: Variaciones areales (kilómetros cuadrados por año) de glaciares Zonas Sur B y Austral.....95

Tabla N°26: Variaciones areales (kilómetros cuadrados por año) de glaciares Zonas Sur B y Austral.....97

RESUMEN

El derretimiento de glaciares y cuerpos de hielo alrededor del mundo y en Chile constituye una problemática global al generar un aumento en el nivel del mar y un descenso en la cantidad de reservas de agua dulce. A partir del procesamiento multi-espectral de imágenes satelitales, se analizaron los patrones de cambio espacial de los glaciares en el Fjordo Comau, Región de Los Lagos, Chile (zona glaciológica sur B) y, obteniendo bases de datos climáticas de la zona, se relacionaron estos con tendencias de temperatura y precipitación. Para lograr el propósito de la investigación, se pre-procesaron y corrigieron imágenes satelitales Landsat para posteriormente, utilizando distintas composiciones de bandas espectrales identificar cuerpos glaciares. Luego se emplearon estas imágenes para determinar la pérdida superficial y tasas de variación anuales de 17 glaciares durante el período 1985-2017. Con el objetivo de relacionar las variaciones superficiales observadas con información climatológica de temperatura y precipitación para el período señalado, se realizó un relleno de datos de la estación meteorológica Huinay mediante una regresión lineal simple a partir de estaciones meteorológicas cercanas que poseen bases de datos más completas. Los resultados demuestran retrocesos en todos los glaciares analizados, siendo ejemplos importantes el glaciar Vodudahüe N°3 que vio reducida su superficie areal en un 83,56% o el glaciar Vodudahüe N°15 que perdió el 77,27% de su superficie inicial. Las tasas de variación anuales, por su parte, mostraron una tendencia generalizada a aumentar su valor durante el período de estudio, siendo la mayor tasa la experimentada por el glaciar Vodudahüe N°8 (-0,014 km² por año). De las temperaturas promedio anuales registradas en el período 1985-2017, se observó un aumento de 10,32°C a 10,46°C y, por su parte, las precipitaciones totales anuales registraron una disminución de 5548mm anuales a 5295mm anuales. En su conjunto, esto indica que las tendencias climatológicas mencionadas contribuyen a explicar la aceleración del retroceso de los glaciares analizados, las cuales coinciden con las expuestas por otras investigaciones sobre glaciares en Chile.

ABSTRACT

The melting of glaciers and ice bodies all around the world and in Chile constitutes a global problem due to the contribution to the rise of the sea level and a decline in the number of freshwater reserves. From multi-spectral satellite imagery processing, the patterns of spatial change of the glaciers from the *Comau Fjord*, *Los Lagos* region, Chile (glaciological zone Sur B) were analyzed and associated with temperature and precipitation tendencies obtained from nearby weather stations. To achieve the purpose of this research, Landsat images were pre-processed and corrected for a posterior identification of ice bodies by using different spectral band compositions. Then, these images were used to determine the superficial loss and annual variation rate of 17 glaciers during the period between 1985 and 2017. In order to obtain climatic information about temperature and precipitations in the study area for the aforementioned period, a data fill for the *Huinay* weather station was made by simple linear regression from close weather stations that have a more complete database. The results show that every single analyzed glacier retreated, important examples being the *Vodudahüe* N°3 glacier, which mass decreases by 83,25%, and the *Vodudahüe* N°15, which lost 77,27% of its initial mass. On the other hand, The annual variation rates, showed a widespread tendency to accelerate during the study period, the highest rate being the one experienced by *Vodudahüe* N°8 glacier (-0,014 square kilometers per year). While the annual average temperatures registered in the 1985-2017 period experimented an increase from 10,32°C to 10,46°C, the total annual precipitations recorded a decrease from 5548mm per year to 5295mm per year. Therefore, this indicates that the climatic tendencies mentioned contribute to the acceleration of the regression of the analyzed glaciers, aligning with the tendencies exposed by other investigations about glaciers in Chile.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El cambio climático es uno de los temas de contingencia mundial más importantes. La emisión de gases de invernadero por parte de la humanidad son probablemente la principal causa de estos fenómenos observados desde aproximadamente la mitad del siglo XX (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2014a, en WWF (2016)). Los glaciares son afectados en gran medida por el cambio climático, teniendo por ejemplo que el Ártico es la región del planeta que cambia más rápidamente que casi cualquier otro punto de la Tierra (Jakobsson et al., 2014) y sus cambios de temperatura han sido de 3 o 4 veces el promedio de ese hemisferio o del promedio mundial en los últimos 4 millones de años (Miller et al., 2010, en Jakobsson et al., 2014). Entre el período 1880-2012, los promedios globales de temperatura combinados de la tierra y de la superficie del océano, muestran un calentamiento de 0,85°C (IPCC, 2013b).

Una considerable cantidad de pérdida de masa glaciar ha ocurrido en la mayoría de los glaciares y capas de hielo a nivel mundial, a ritmos cada vez más acelerados, pasando de 0.37 ± 0.16 mm/año durante el período 1960/61 – 1989/90 a 0.77 ± 0.22 mm/año para los años 1990/91 – 2003/04 (Bates et al., 2008). Esto representa un problema dado que los glaciares son una importantísima fuente de agua dulce. Por otro lado, el derretimiento de estos contribuye al aumento del nivel del mar y en glaciares emplazados en volcanes, a riesgos por generación de lahares (Brock et al, 2012). Chile posee una alta importancia en temas glaciares, ya que el país concentra un 62% de la superficie glaciar del Hemisferio Sur, 76% de Sudamérica y 3,8% de la superficie glaciar mundial (Centro de Estudios Científicos (CECS), 2009), y pese a aquellos datos, la situación de los glaciares de Chile no es distinta a la situación mundial descrita anteriormente, ya que se registran retrocesos y pérdidas de masa glaciar en todo el país (con aproximadamente 140 de los glaciares inventariados a nivel nacional) (DGA, 2011), siendo particularmente apreciable en las zonas sur y austral, producto del ya mencionado calentamiento global (Rivera et al., 2012).

Además, en el último tiempo, las pérdidas de masa glaciar han resultado en eventos problemáticos y generación de tragedias para comunidades. Un ejemplo lo constituye el aluvión ocurrido el mes de Diciembre del año 2017 en Villa Santa Lucía, el cual ocurrió debido a un desprendimiento glaciar que luego derivó en flujos de barros y de detritos (Emol, 2017a). Este evento destruyó 28 casas y dejó a 79 familias damnificadas y, a la fecha de realización de este informe, acabó con la vida de 20 personas (Emol, 2017b).

En un caso similar más reciente, el 12 de Marzo de 2018 un desprendimiento del Glaciar Perito Moreno en Argentina, provocó el ingreso de una importante masa de agua a la localidad de El Calafate. Las ondas generadas por este desprendimiento ocasionaron una onda de tsunami en el Lago Argentino que afectó entre 3 y 4 manzanas poco pobladas (Diario Jornada, 2018).

Es debido a estos antecedentes que se estudiará la dinámica glaciar de los glaciares ubicados en el área del Fiordo Comau en la Región de Los Lagos en la Zona Sur de Chile, con el fin de identificar patrones de cambio espacial. En la presente investigación se estudian específicamente 3 cuencas que se encuentran en el fiordo: Huinay, Cahuelmó y Vodudahüe.

2. HIPÓTESIS

La superficie de los glaciares identificados dentro de las cuencas del área de estudio, presentan una tendencia generalizada a la disminución superficial a lo largo del período de estudio 1985-2017.

Ha ocurrido un aumento en la temperatura registrada durante los últimos decenios en la zona, así como también una disminución de las precipitaciones.

La tendencia a la disminución de la superficie glaciar de los glaciares identificados en el área de estudio, se relaciona con las tendencias observadas de temperatura y precipitaciones.

3. OBJETIVOS

3.1.1 Objetivo General:

Relacionar los patrones de cambio espacial de los glaciares de las cuencas de Cahuelmó, Huinay y Vodudahue con las tendencias de temperatura y precipitación entre los años 1986-2017 y su relación con variabilidad/cambio climático.

3.1.2 Objetivos Específicos:

- O1: Identificar cuerpos glaciares en el área de estudio del Fiordo Comau.
- O2: Identificar tendencias de temperatura y precipitación en el área de estudio para el período 1985-2017.
- O3: Establecer las tendencias de cambio de los cuerpos glaciares en el área de estudio en el período 1985-2017.
- O4: Comparar las tendencias de cambio encontradas en los glaciares con tendencias de temperatura y precipitación en la zona.

4. ESTADO DEL ASUNTO

4.1 Área de Estudio

El Fiordo Comau se encuentra en la Región de Los Lagos, provincia de Palena, comuna de Hualaihué. En este fiordo se hallan 3 cuencas: Huinay, Cahuelmó y Vodudahüe, con las cuales se trabajó en este estudio (Figura N°1).

La cuenca Vodudahüe posee una superficie de 885 km² y se emplaza entre la cordillera de los andes limítrofes con Argentina y la costa oriente del Golfo de Ancud. Al norte se encuentra con la cuenca Huinay y al sur aparece la reserva privada Parque Pumalín.

Desde el año 1998 hasta hoy, gran parte del territorio de Huinay, pertenece a la Fundación San Ignacio de Huinay, la cual fue fundada por ENDESA Chile y la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, quienes en 2001 inauguraron en este lugar el centro científico Huinay, buscando promover y facilitar la investigación científica en diversos campos en las áreas terrestres y marítimas del fiordo Comau (Figura N°1).

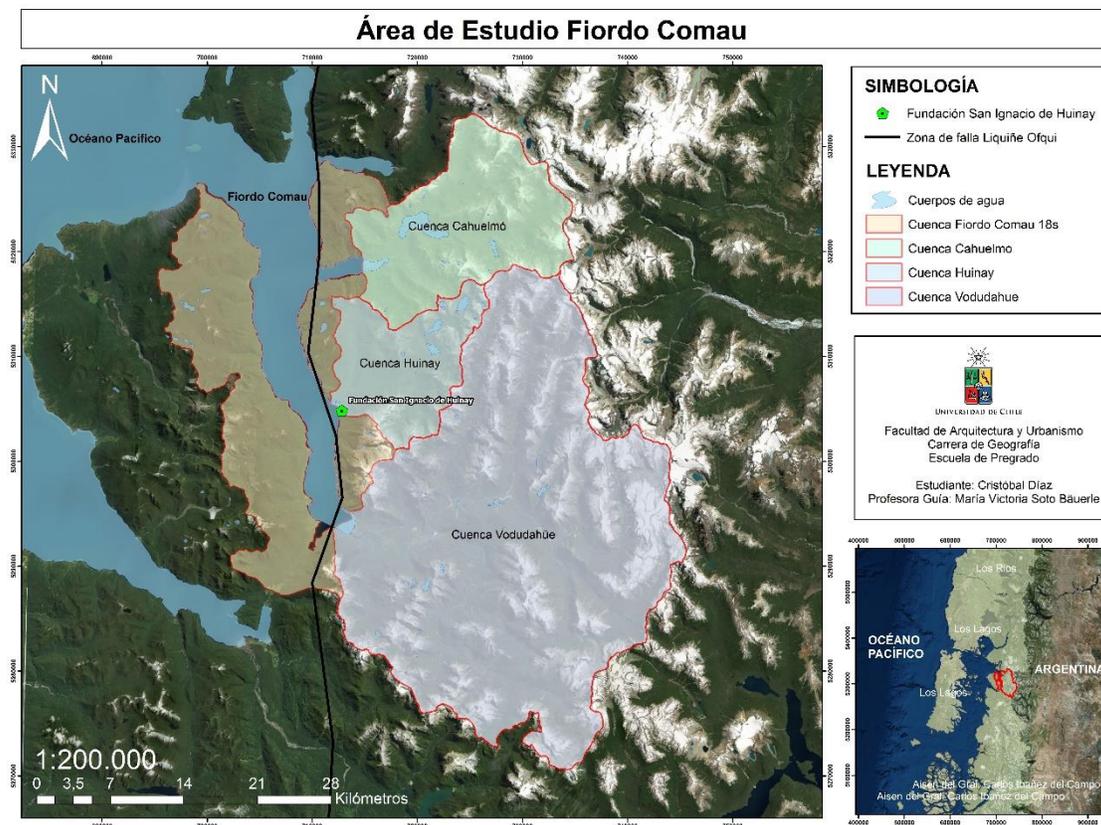


Figura N°1: Área de Estudio. Fuente: DGA (2011) Fuente: Proyecto Fondecyt 1151087.

4.1.1 Geomorfología

En la sección sur de la Décima Región de Los Lagos, se distinguen 3 grandes unidades morfológicas del territorio: Cordillera de la Costa, Depresión Intermedia que aquí se halla sumergida en el Golfo de Ancud, y Cordillera Principal, los cuales aquí se denominan Andes Norpatagónicos (Molina, 2016). Es en esta última unidad que se halla el área de estudio Fiordo Comau.

4.1.2 Geología

En esta zona se puede encontrar la extensa Zona de Falla Liquiñe-Ofqui (ZFLO), la cual se extiende desde los 38° de latitud Sur hasta los 46° de latitud Sur, teniendo una longitud de 1000 kilómetros (Cembrano et al., 2002) (Figura N°1). La actividad de esta falla se manifiesta en actividad volcánica, generando centros eruptivos menores y estrato volcanes de gran envergadura en los últimos 15.000 años (López-Escobar et al., 1995). El área de estudio, según López-Escobar & Moreno (1994), se halla dentro de la Zona Volcánica Sur (SVZ), la cual está comprendida entre los 33° de latitud Sur y los 46° de latitud Sur. Esta zona volcánica posee una longitud de 1.400 kilómetros y comprende a más de 70 de los 100 estratovolcanes con actividad del Pleistoceno-Holoceno del país y numerosos centros eruptivos menores.

En el área de estudio se encuentran unidades geológicas correspondientes a distintas eras y períodos. De la Era Cenozoica se encuentran depósitos propios del período Cuaternario y del Neógeno. Del período Cuaternario se hallan las unidades Q1 (Depósitos aluviales; coluviales; remociones en masa (Época: Pleistoceno-Holoceno)); Qf (Depósitos fluviales (Época: Pleistoceno-Holoceno)); Q3i (Estratovolcanes y complejos volcánicos: lavas basálticas a riolíticas y depósitos piroclásticos andesítico-basálticos (Época: Pleistoceno-Holoceno). Por su parte, el período neógeno ve 2 unidades dentro del área de estudio: PPI3 (Secuencia y centros volcánicos parcialmente erosionados (Época: Plioceno-Pleistoceno) y Mg (Granodioritas, Dioritas, Tonalitas (Época: Mioceno) (Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), 2003).

También es posible encontrar depósitos de la Era Mesozoica en el área de estudio, principalmente pertenecientes al período Cretácico y al período Jurásico. La unidad Kig consiste de granitos, granodioritas, tonalitas y biotita (Época: Cretácico Inferior), mientras que la unidad Jig se compone de dioritas; gabros; monzodioritas, granodioritas, tonalitas y biotita (Época: Jurásico Inferior) (SERNAGEOMIN, 2003).

Finalmente, en el área de estudio existen depósitos de la Era Paleozoica correspondientes a los períodos Pérmico y Carbonífero. Del período Pérmico es posible reconocer las unidades PzTr4(a): Esquistos pelíticos (Época: Paleozoico-Triásico); y PzTr4 (b) Esquistos, anfibolitas, rocas metamórficas ultramáficas (Época: Paleozoico-Triásico). Por su parte, del período Carbonífero es posible reconocer la unidad CPg, la cual consiste de granitos, granodioritas; tonalidades; dioritas; biotita y muscovita (Época: Carbonífero-Pérmico).

4.1.3 Glaciología

Según Ferrando (1975), en el Golfo de Ancud existen islas y conjuntos de islas que pertenecen a remanentes de arcos morrénicos de la última glaciación. Aquí se encuentran depósitos glaciales y fluvioglaciales que se sitúan en la mayor parte de la depresión central. Los depósitos morrénicos de la última glaciación pertenecen a 3 unidades glaciares: Glaciar Todos los Santos-Llanquihue, Glaciar Reloncaví y Glaciar Comau o Leptepu. Estos depósitos en general están compuestos por rodados (ya sean graníticos o volcánicos), que varían considerablemente de tamaño entre un sector y otro.

En el informe de la Dirección General de Aguas (DGA) sobre Variaciones recientes de glaciares en Chile según zonas glaciológicas (2011), el sur de Chile se divide en las subzonas Sur A y Sur B, centrándose principalmente en los cuerpos de hielo que se ubican en los volcanes de estas zonas del país. Según estas divisiones, el área de estudio Fiordo Comau se ubicaría en la Zona Sur B, en donde se emplazan volcanes como el Michinmahuida, Melimoyu y Mentolat. El área de estudio se localiza en una zona de glaciares templados de Chile.

4.1.4 Demografía

En Vodudahüe se ubica un caserío en la ribera norte del río Vodudahüe, el cual está constituido por un número no determinado de viviendas espacialmente dispersas entre sí y una iglesia. Mientras que en la ribera sur se encuentran 2 embarcaderos, un asentamiento provisional del Cuerpo Militar del Trabajo y una instalación de Carabineros de Chile, así como también un pequeño número de viviendas.

Respecto a características demográficas, no existen datos exactos de la población total que habita el fiordo. Sin embargo, el Censo de población 2017 arrojó que viven 8.944 personas en la comuna de Hualaihué.

4.1.5 Clima

Siguiendo la regionalización climática del Chile continental (Sarricolea et al., 2017), sobre el área de estudio opera una variedad de climas: Clima templado lluvioso (Cfb); Clima templado lluvioso frío (Cfc); Clima templado lluvioso frío con leve sequedad estival (Cfc(s)); Clima de tundra (ET) y Clima de tundra de lluvia invernal (ET(s)). Si bien existen precipitaciones durante todo el año, estas se acentúan durante los meses de Mayo y Agosto. En invierno la humedad relativa alcanza un 93% y durante el verano su valor es de aproximadamente 83%, mientras que durante la época estival la radiación es alta.

La estación meteorológica ubicada en San Ignacio de Huinay registra que las precipitaciones anuales varían entre los 5.000 y 6.000 mm (Centro Científico de Huinay, 2015). Durante los periodos invernales, la precipitación de nieve puede llegar a los 300 m.s.n.m. Por su parte, la temperatura anual promedio corresponde a 10,3° (Fitzek, 2014).

4.1.6 Flora y fauna

En el área de estudio, Luebert & Pliscoff (2006) identifican 2 tipos de bosque siempreverde que cubren la zona del valle principal y las laderas bajas y medias: bosque siempreverde templado andino de Coigüe (*Nothofagus dombeyi*) y Mañío hembra (*Saxegothaea conspicua*), y el bosque siempreverde templado interior de Coigüe de Chiloé (*Nothofagus nitida*) y Mañío macho (*Podocarpus nubigena*). Este tipo de formación boscosa se encuentra hasta los 600 m.s.n.m. en Huinay (Soto & Flores, 2011).

Entre los 600 m.s.n.m. y 1.000 m.s.n.m. se ubica el bosque de coníferas de alerce (*Fitzroya cupressoides*) caracterizado por proliferar en ambientes húmedos, fríos y de altas pendientes (Soto & Flores, 2011). Según Luebert & Pliscoff (2006), denominan a esta formación boscosa como bosque resinoso templado andino de *Fitzroya cupressoides* y lo establecen como el piso vegetacional más alto dentro del área de estudio, entre los 700 m.s.n.m. y 1.200 m.s.n.m.

Por sobre los 1.100 m.s.n.m. se sitúa el bosque caducifolio achaparrado, el cual se compone principalmente de Lengua (*Nothofagus pumilio*), Coigüe Blanco (*Nothofagus betuloides*) y Alerce (*Fitzroya cupressoides*). La característica achaparrada de este bosque es gracias a las condiciones restrictivas del ambiente tales como temperaturas bajas, vientos fuertes y permanencia de nieve durante gran parte del año (Soto & Flores, 2011).

Ramírez Morales (1996) entre especies de fauna teoriza la presencia de Puma (*Felis concolor*), Gato Colo Colo (*Felis colocola*), Gato de Geoffroy o Gato Montés (*Felis geoffroyi*), Pudú (*Pudu pudu*), Monito del Monte (*Dromiciopes australis*), Coipo del Sur (*Myocastor coipos melanops*), Huillín (*Lutra provocax*), Jabalíes (*Sus scrofa*), Comadreja (*Marmosa elegans*), Ranita de Darwin (*Rinoderma darwinii*), Ciervo Volante (*Hiasognathus granti*), y Madre de la Culebra (*Ancestratus cumingii*).

Por su parte, las aves identificadas corresponderían a Chucao (*Scelorchilus rubecula*), Carpintero Grande (*Ipocrantor magellanicus*), Canquén (*Chloephaga* spp.), Loro Choroy (*Enicognathus leptorhynchus*), Pato Jergón (*Anas specularis*), Pato (*Merganetta amata*), el Pato Corriente (*Leucogenis turneri*), Cóndor (*Vultur gryphus*) (RAMÍREZ MORALES, 1996).

4.1.7 Actividades antrópicas

El comienzo de la intervención antrópica en el área de estudio se remonta al siglo XVIII, en donde se registran explotaciones intensas de los bosques de alerce a lo largo del fiordo Comau, indicando que hacheros viajaban desde zonas aledañas (principalmente desde Chiloé) a talar y extraer madera. Luego, a comienzos del siglo XX, empezaron los procesos de colonización (Ramírez-Morales, 1996), quedando como vestigios de este proceso un cementerio, una parroquia, una escuela internado y 4 familias de colonos. A partir de este punto, se incrementa la deforestación según las necesidades de los colonos, así como también incendios permanentes con el fin de habilitar terrenos de pastoreo (Soto & Flores, 2011).

Actualmente por parte de los habitantes de la zona no existe una mayor perturbación del entorno, debido a que en general solamente realizan quemas de quila y matorrales para despejar terreno ante el crecimiento de la vegetación local. En cambio, los trabajos realizados por el Cuerpo Militar del Trabajo en la ruta 7, sector Leptepú, consistente en una senda de penetración que busca dar continuidad terrestre a la ruta 7 para disminuir los tiempos de navegación del fiordo Comau y potenciar las actividades turísticas y productivas de la zona (principalmente atribuible a la industria salmonera).

De momento no existe mucho turismo en la zona debido a la inaccesibilidad del sector por vía terrestre, pero se espera que en un futuro con los trabajos aquí mencionados esta actividad se vea incrementada.

4.2 Glaciares

4.2.1 El Concepto de Glaciar

Los glaciares son uno de los componentes más importantes del ciclo hidrológico y en Chile, ya que pueden ser ocupados como reservas estratégicas de agua en estado sólido. Debido a sus cambios históricos claramente relacionados con variaciones en el clima, se les considera buenos indicadores del cambio climático (DGA, 2009).

Chile es uno de los países que contiene una de las mayores superficies glaciares del planeta, y la mayor del hemisferio sur (sin contar la Antártida), del que representa un 62% de la superficie glaciar, un 76% de la superficie glaciar de Sudamérica y un 3,8% de la superficie glaciar mundial excluyendo Antártica y Groenlandia (UNEP, 2007 en DGA, 2009).

Existen múltiples definiciones de glaciar, el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2001: 84) define glaciar como: "masa de hielo terrestre que fluye pendiente abajo (por deformación de su estructura interna y por el deslizamiento en su base), confinado por los elementos topográficos que lo rodean, como las laderas de un valle o las cumbres adyacentes. Un glaciar subsiste merced a la acumulación de nieve a gran altura, que se compensa con la fusión del hielo a baja altura o la descarga en el mar". Sin embargo, esta definición presenta problemas ya que la nieve puede presentar propiedades de flujo y es posible que existan masas de hielo importantes que no puedan moverse debido a que la topografía que las rodee no se los permita o al estancamiento de un glaciar anteriormente activo (DGA, 2009).

Otras definiciones también muestran problemas como la propuesta por la DGA en su Estrategia Nacional de Glaciares (2009), la cual señala que un glaciar es: "Toda superficie de hielo y nieve permanente generada sobre suelo, que sea visible por períodos de al menos 2 años y de un área igual o superior a 0,01 km² (una hectárea). O cualquier superficie rocosa con evidencia superficial de flujo viscoso, producto de un alto contenido de hielo actual o pasado en el subsuelo. Los glaciares se presentan en distintos tipos, existiendo aquellos que se encuentran descubiertos y aquellos cubiertos" (DGA, 2009). El problema de esta definición radica en que no necesariamente incluye glaciares que no estén reconocidos debido a un tamaño pequeño o puede incluir algunos cuerpos que por otras definiciones no

corresponderían a glaciares como glaciares de roca inactivos (DGA, 2009). La definición de glaciar planteada por IPCC en (2001) es hasta hoy una de las definiciones con mayor nivel de aceptación internacional y, además, utilizada en Chile por la DGA en la Estrategia Nacional de Glaciares (2009).

4.2.2 Tipos de Glaciares en Área de Estudio

4.2.2.1 Glaciares según estado térmico

Los glaciares pueden ser clasificados de acuerdo a su estado térmico, tales como glaciares fríos, templados y politermales.

4.2.2.1.1 Glaciares fríos: Los glaciares fríos poseen temperaturas del hielo inferiores a los 0°C en su zona de alimentación, causando que la ablación por sublimación sea muy escasa. Al ser inexistente la fusión superficial, la transformación de nieve a hielo es lenta. En Chile, este tipo de glaciar se encuentra en la Cordillera de Los Andes a grandes alturas, en la zona norte, entre Tarapacá y Santiago, con temperaturas que varían entre los -20°C a -15°C (Herr, 2014).

4.2.2.1.2 Glaciares templados: La totalidad de su masa se halla a temperatura de fusión del hielo, 0°C en superficie y fluctuante en profundidad según la presión a la que esté siendo sometido el hielo por a su propio peso, dependiendo de su espesor, densidad y aceleración de gravedad a la que está expuesto el cuerpo de hielo. En Chile, gran parte de los glaciares hallados desde la zona central hasta los campos de hielo sur, pertenecen a este tipo de glaciares (Herr, 2014). Por lo tanto, los glaciares encontrados dentro del área de estudio corresponden a glaciares templados.

4.2.2.1.3 Glaciares politermales: Estos glaciares se caracterizan por poseer temperaturas más bajas en profundidad que en superficie. Es decir, son fríos en la parte superior, y templados en la parte inferior ya que la masa de hielo se encuentra a temperaturas por debajo de los 0°C, propio de los glaciares fríos, mientras que en la base de la lengua terminal es posible hallar temperaturas cercanas a los 0°C, lo que ocasiona una pequeña fusión estival. Esto se explica debido a que el calor estival solo permite el derretimiento parcial del hielo, ya que la temperatura no logra alcanzar el punto de fusión, desarticulando las consecuencias de la onda fría que afecta a los glaciares en los meses de invierno. Este tipo de glaciares se halla en el norte de Chile, pese a ello, es en las zonas andinas de las regiones de Coquimbo, Valparaíso y Metropolitana donde se aprecian mejor los glaciares politermales (Herr, 2014).

Esta categorización posee gran relevancia debido a que permite analizar la influencia del cambio climático sobre la actualidad de los glaciares en Chile. Se aprecia que los glaciares fríos son afectados más por las variaciones en precipitaciones que por las variaciones en temperatura ya que, aunque la temperatura terrestre aumente en un par de °C, la isoterma cero se mantendrá por debajo de la ubicación de los glaciares debido a que se estos están a grandes alturas.

De esta forma, el derretimiento de los glaciares fríos se asocia a menores acumulaciones de nieve producto de la disminución de las precipitaciones, ocasionando el retroceso de las masas de hielo.

De forma contraria, los glaciares templados sí se ven afectados por las variaciones globales de temperatura, ya que, al encontrarse estas masas de hielo a menor altura, no alcanzan un equilibrio entre el incremento de temperatura y la acumulación de nieve, lo que produce el derretimiento y posterior retroceso de este tipo de glaciar.

4.2.2.2 Morfologías glaciares en área de estudio

Por otro lado, la DGA en su Estrategia Nacional de Glaciares (2009) reconoce y describe una serie de morfologías glaciares que es posible encontrar en Chile, las que se describirán a continuación.

4.2.2.2.1 Glaciares de montaña: Corresponden a glaciares emplazados en partes altas de la cordillera, cuyas formas son variables y poseen evacuación desde las zonas de acumulación (cuyo ancho es mayor que su longitud) por medio de una pequeña lengua glaciar. La zona de acumulación de estos glaciares está bien definida. En Chile es posible encontrar estos glaciares en la Patagonia y extremo sur del país.

4.2.2.2.2 Glaciares de circo: Ocupan una depresión semicircular generada por erosión glaciar (circo glaciar), la cual está rodeada por paredes rocosas de alta pendiente que acaban en cumbres o cordones de tipo “arete”. Una vez retroceden o desaparecen los glaciares de circo, las depresiones aquí existentes son ocupadas por recurrentemente por un lago, el cual se embalsa por un umbral rocoso o quiebre de pendiente por donde la lengua glaciar salía en forma de cascada de hielo. En Chile es posible hallar estos glaciares en la Patagonia y extremo sur del territorio nacional.

4.3 Tendencias de Cambio Areeles y Volumétricas

Una considerable cantidad de pérdida de masa glaciar ha ocurrido en la mayoría de los glaciares y capas de hielo a nivel mundial, a ritmos cada vez más acelerados pasando de 0.37 ± 0.16 mm/año durante el período 1960/61 – 1989/90 a 0.77 ± 0.22 mm/año para los años 1990/91 – 2003/04 (Bates et al., 2008). Esto representa un problema dado que los glaciares son una importantísima fuente de agua dulce. Por otro lado, el derretimiento de estos contribuye al aumento del nivel del mar y, en glaciares emplazados en volcanes, a peligros por generación de lahares (Brock et al, 2012). Chile posee una alta importancia en el tema de los glaciares, ya que, como se señaló en capítulos anteriores, el país concentra un 62% de la superficie glaciar del hemisferio sur, 76% de Sudamérica y 3,8% de la superficie glaciar mundial (CECS, 2009). Pese a aquellos datos, la situación de los glaciares de Chile no es distinta a la situación mundial descrita anteriormente, ya que se registran retrocesos y pérdidas de masa glaciar en todo el país (con aproximadamente 140 de los glaciares inventariados a nivel nacional) (DGA, 2011) siendo particularmente apreciable en las zonas sur y austral, producto del ya mencionado calentamiento global (Rivera et al., 2012).

4.3.1 Tendencias de Cambio Areeles

En Chile, el último estudio/inventario sobre glaciares nacionales del año (2011) elaborado por DGA. En éste, se presenta una síntesis de variaciones de 147 glaciares (de los 24.114 glaciares inventariados hoy en día en Chile) a lo largo del país con el principal objetivo de completar y actualizar la información glaciológica existente en el país. Cabe señalar que este número de glaciares es pequeño en comparación a la cantidad total de glaciares de Chile, en donde se pueden encontrar, por ejemplo, inventarios glaciares como el correspondiente a las islas al sur del Estrecho de Magallanes (incluyendo Tierra del Fuego, Isla Santa Inés, Monte Sarmiento e Isla Hoste) que señalan la existencia de 1.681 glaciares en esa área (Rivera et al., 2012) y para el año 1999, existían 1.751 glaciares inventariados en Chile (Rivera et al., 2000). Por ejemplo, Rivera et al., (2000) señala que los casi 100 glaciares con mediciones de variaciones frontales históricas, representa aproximadamente apenas el 5,6% de los glaciares inventariados hasta esa fecha.

Parte del objetivo del estudio llevado a cabo por la DGA, responde a la necesidad de determinar y visualizar las variaciones (principalmente retrocesos) areales de los glaciares del país. Los resultados de este estudio arrojaron que para la mayoría de los glaciares (salvo 3 casos correspondientes a los glaciares Pío XI y Garibaldi en la Cordillera de Darwin y el glaciar Perito Moreno en Argentina) estudiados, se registraron variaciones negativas, destacando retrocesos en Chile central y los volcanes de la zona centro Sur. Como se mencionó anteriormente, en Rivera et al., (2000) se señala que se han calculado las variaciones frontales históricas para casi 100 glaciares chilenos, de los cuales solo un 6% mostró avance neto en los períodos de estudio correspondientes, destacando el glaciar Pío XI con un promedio de 206 metros por año en el período 1945-1997.

Por otro lado, el 7% de los glaciares estudiados no experimentó un cambio significativo y por último, el 87% restante ha tenido tasas de variación negativas, desde pocos metros por año hasta un valor máximo de 278 metros por año en el glaciar Amalia entre los años 1945 y 1986 (Figura N°2). En la zona Sur y Austral (Patagonia) se registraron los mayores retrocesos. En consecuencia, se evidencia que la mayoría de las masas glaciares del país han retrocedido y reducido sus superficies desde los primeros registros históricos hasta la actualidad. La aceleración de estos retrocesos se ha manifestado fuertemente en zonas como la zona central por el porcentaje de pérdida de superficie de hielo (Rivera et al., 2000) o la Patagonia, en donde las tasas se han duplicado en las últimas décadas (DGA, 2011).

El Informe Final sobre variaciones recientes de glaciares en Chile según principales Zonas Glaciológicas de la DGA (2011) establece la condición de los glaciares de Chile según 8 subzonas glaciológicas: Norte A, Norte B, Norte C, Centro, Sur A, Sur B, Austral A y Austral B.

En la Zona Norte, debido a la significancia menor en cuanto a superficie relativa y una dinámica glaciar de características moderadas en comparación al resto de zonas glaciológicas, se consideraron las variaciones de los glaciares ubicados en los centros montañosos y volcánicos más importantes.

En la Zona Norte A se han estudiado volcanes tales como el Pomerape y el volcán Parinacota debido a que representan los centros montañosos principales del extremo norte del país. Por otro lado, en la Zona Norte B, se priorizaron glaciares de cuencas como la del Huasco superior, que han sido poco estudiados como los glaciares Estrecho y Guanaco, entre otros. Por su parte, en la Zona Norte C se estudiaron las variaciones areales del Cerro Volcán.

El total de glaciares inventariados en la Zona Norte equivale a 35, de los cuales 30 se ubican en la sub-zona Norte A, 4 en Norte B y 1 en Norte C. Todos los glaciares estudiados en la Zona Norte presentan disminución de su superficie a diferentes tasas. Por ejemplo, están los Nevados de Payachatas, cuya área glaciaria vio una reducción del 38% entre los años 1972 y 2007. O también glaciares como Ortigas 1 y Ortigas 2, los cuales debido a su menor tamaño (0,81 kilómetros cuadrados y 0,71 kilómetros cuadrados respectivamente) podrían desaparecer en un mediano plazo (DGA, 2011).

Las Zonas Centro, Sur y Austral poseen un mayor número de glaciares estudiados con sus respectivas variaciones superficiales gracias a que poseen una mayor prioridad debido a su cercanía a centros poblados, razones socio-económicas y superficies de hielo almacenadas.

En la Zona Centro se trabajó con glaciares de las sub-cuencas del Aconcagua alto y Maipo alto, tales como el Cerro Marmolejo y el Volcán Tupungatito. El número de glaciares estudiados en esta sub-zona corresponde a 25. Existen centros montañosos como Volcán San José, el cual ha experimentado una reducción en su superficie del orden del 30% desde 1986 hasta la fecha de la publicación del estudio (2011) o el Glaciar Cipreses, el cual ha retrocedido casi 5 kilómetros desde el año 1842. Por el contrario, existe un solo caso de avance glaciario, protagonizado por 2 lenguas glaciares del Volcán Tupungatito, a un ritmo de 9 metros por año aproximadamente (DGA, 2011).

Más hacia el sur (Zonas Sur y Austral) la superficie de glaciares tiende a disminuir debido a la reducción en altura de la Cordillera de los Andes (Rivera et al., 2000) y principalmente en la Zona Sur son destacables los riesgos potenciales de grandes casquetes de hielo en conos volcánicos activos, que pueden generar la ocurrencia de lahares (Moreno & Fuentealba, 1994 en Rivera et al., 2000).

En las sub-zonas Sur A y Sur B la predominancia es de glaciares en volcanes y cadenas volcánicas. Ejemplos son los Nevados de Chillán, Volcán Villarrica y Volcán Osorno, además de otros ubicados en Chiloé continental como Michinmahuida y Mentolat.

En la Zona Sur, se analizó la variación areal de 40 glaciares. El comportamiento general de los glaciares en esta zona es de tendencia a la disminución, con ejemplos como Nevados de Solipulli, el cual entre 1961 y 2011 vio una reducción superficial de 8,09 kilómetros². De igual manera, el Volcán Osorno ha visto una reducción de su superficie glaciaria entre los años 1961 y 2011 de aproximadamente 5,97 kilómetros². El mismo Volcán Michinmahuida vio una reducción de su superficie glaciaria del orden de 24% desde 1979 hasta 2011; sin embargo, durante el período 2007-2009, su principal glaciar, Glaciar Amarillo, experimentó avances posiblemente debido a la erupción del Volcán Chaitén.

La Zona Austral corresponde a la zona con más glaciares analizados, ascendiendo este número a 42, divididos en 24 en Austral A y 18 en Austral B. Los Campos de Hielo Norte y Sur han sido estudiados ampliamente durante las últimas décadas, poseyendo sus glaciares la característica común de que sus frentes finalizan en cuerpos de agua tales como lagunas o fiordos de dominio mareal, lo que genera vulnerabilidad gracias a esta condición.

En la sub-zona Austral A se destacó el glaciar Jorge Montt del Campo de Hielo Sur, debido a sus altas tasas de retroceso (19,5 km) o los glaciares Reicher y Gualas, con reducciones de 6 y 2 kilómetros respectivamente para el período 1979-2011. Por último, en la Zona Austral B, se incluyeron glaciares como Conway y Schiaparelli con reducciones de 3 kilómetros desde 1836 y hasta 2005. O el Glaciar Marinelli, el cual entre los años 1913 y 2011 experimentó un retroceso de 15. (DGA, 2011). Sin embargo, en esta zona existen glaciares como Pío XI y Garibaldi en la Cordillera de Darwin, los cuales presentan avances en comienzos del siglo XXI.

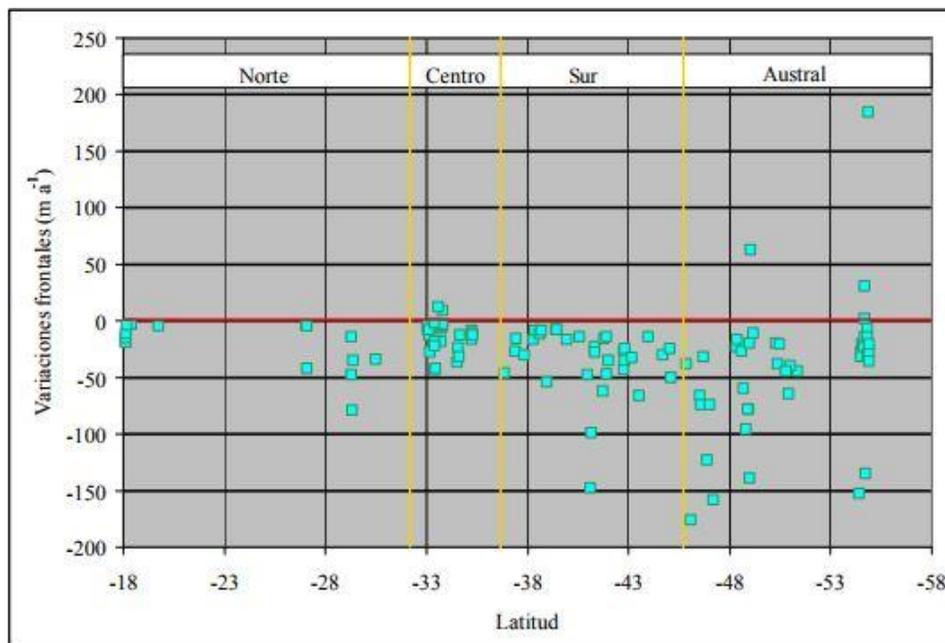


Figura N°2: Síntesis de variaciones frontales de Chile. *Fuente:* DGA (2011)

4.3.2 Tendencias de cambio volumétricas

Si bien la variación de la superficie glaciar es importante para analizar la dinámica glaciar, es la masa la cual resulta como una variable de interés, cuya variación se mide a través del volumen de las masas de hielo. Para llevar a cabo estas mediciones, se requieren observaciones y técnicas más específicas, las cuales son escasas en Chile, existiendo estudios volumétricos de superficies glaciares desde mediados de la década de 1980 en adelante (DGA, 2009).

4.3.2.1 Zona Norte

En la Zona Norte, de acuerdo al estudio realizado por Rivera et al., (2002) en el glaciar que se ubica en el Cerro Tapado que abarcó el período comprendido entre los años 1955 y 1999. Se realizó la comparación de datos topográficos generados a partir de fotografías aéreas y datos obtenidos mediante GPS en tierra, obteniéndose que no se apreciaron variaciones en el espesor.

4.3.2.2 Zona Centro

El mismo autor (Rivera et al., 2002) analizó cambios volumétricos en el glaciar Esmeralda para el período 1955-2000, sin detectarse cambios en su zona de acumulación. Por su parte, Acuña (2001) definió cambios de volumen mediante técnicas fotogramétricas con pares estereoscópicos de fotos de los años 1955 y 1997 y observó adelgazamientos de 1,44 metros por año y 1,09 metros por año en los glaciares Olivares Gamma y G32, respectivamente.

4.3.2.3 Zona Sur

Para la Zona Sur, Zenteno (2008) analizó cambios volumétricos presentes en glaciares ubicados en volcanes activos entre los 36° y 41° de latitud Sur (correspondiente a la Subzona Sur A), mediante la utilización de datos topográficos del año 2000 y del IGM obtenidos de restituciones fotogramétricas llevadas a cabo entre los años 1956 y 1961. Los adelgazamientos más grandes se registraron en el glaciar principal del volcán Copahue, observándose un total de 40 a 21 metros en el período 1961-2000. Las menores tasas de adelgazamiento de hielo se apreciaron en el volcán Nevados de Chillán.

Rivera et al., (2005) y Rivera et al., (2006) estudiaron los cambios volumétricos de los glaciares ubicados en los volcanes Villarrica y Mocho-Choshuenco, mediante mediciones GPS, topografía derivada de cartografía IGM y modelos de elevación digital obtenidos del sistema AirSAR C de JPL/NASA, para determinar disminuciones de áreas, retrocesos frontales y balances de masa negativos.

4.3.2.4 Zona Austral

En el Glaciar Tyndall se llevaron a cabo 3 campañas (Naruse et al., 1987; Kadota et al., 1992; Nishida et al., 1995), en donde se evidenció un adelgazamiento de 4 metros por año entre 1985 y 1990 y de 3,1 metros por año entre 1990 y 1993 (Nishida et al., 1995). Skvarca et al., (2004) hallaron en el glaciar Perito Moreno un adelgazamiento leve a lo largo de un perfil transversal entre 1990 y 1996, el cual luego se revirtió, mediante un importante engrosamiento de 5 metros entre los años 1996 y 2002.

Por su parte, Rivera & Casassa (1999), encontraron en el glaciar Pío XI, además del avance de su frente, un engrosamiento de su zona de ablación equivalente a 44,1 metros entre 1975 y 1995. Para realizar esto, los autores compararon cartografías regulares de distintas fechas.

4.4. Análisis de variaciones areales

Para realizar un seguimiento de las variaciones de las superficies glaciares, se han desarrollado variadas metodologías: unas consistentes en la instalación de estaciones climatológicas automáticas (AWSs por sus siglas en inglés) que se han realizado por ejemplo en investigaciones acerca de interacciones glacio-climático-volcánicas en el sur de Chile (Brock et al., 2012).

Otro método reconocido para examinar y mapear y las variaciones glaciares a lo largo de los años, es en base al procesamiento de imágenes satelitales para luego mediante sistemas de información geográfica, delimitar los cuerpos de hielo. Se recolectan imágenes satelitales de sensores remotos tales como ASTER (*Advanced Spaceborn Thermal Emission and Reflection Radiometer*), Landsat TM (Thematic Mapper) y Landsat ETM+ (Enhanced Thematic Mapper). Se tiene especial cuidado con que las imágenes seleccionadas sean de los meses correspondientes al fin del período estival (dependiendo de en qué hemisferio se encuentre el área de estudio) debido a que en estas fechas se reduce al mínimo la nieve estacional y se distingue con mayor facilidad la diferencia entre nieve y hielo, así como también teniendo cuidado con que la presencia de nubes sobre el área de estudio sea la menor posible (Kääb et al., 2003; Falaschi et al., 2013).

Las imágenes satelitales ocasionalmente (y especialmente las más antiguas) presentan diversas distorsiones que deben ser corregidas para lograr análisis más fidedignos a la realidad representada. Por ejemplo, las imágenes satelitales por defecto poseen su información en valores de Nivel Digital (ND), pero para realizar distintos tipos de análisis a las imágenes satelitales se requiere que la información de las imágenes se encuentre en valores de radianza. Estos valores se necesitan para posteriormente llevar a cabo correcciones atmosféricas y radiométricas (Finn et al., 2002). La primera es necesaria debido a que la energía capturada por los sensores Landsat es influenciada por la atmósfera de la Tierra. Estos efectos incluyen dispersión y absorción gracias a las interacciones entre la radiación electromagnética y las partículas de la atmósfera (gases, vapor de agua y aerosoles). La corrección atmosférica se ocupa para lidiar con estos efectos, existiendo variadas metodologías para llevarla a cabo (Young et al., 2017). Por su parte, la corrección radiométrica se requiere debido a que las imágenes satelitales (y en especial si se quiere realizar un análisis multitemporal) presentan diferentes condiciones de iluminación debido a factores como nubosidad, por lo que se hace necesaria una corrección de reflectancia o radiométrica (Ambrosio et al, 2002).

Posteriormente a la realización de las correcciones a las imágenes satelitales, se realizan composiciones falso color de las bandas espectrales correspondientes al infrarrojo visible o al infrarrojo cercano que faciliten la identificación de cuerpos de hielo. Para los sensores Landsat, estas pueden ser combinaciones de las bandas 5-4-3 o 5-4-1 (Rivera & Bown, 2013), 5-4-3 (Falaschi et al., 2013). La DGA (2009) para el sensor Landsat MSS utilizó combinaciones falso color con las bandas 6-5-4 y 7-5-4 mientras que para las imágenes obtenidas de los sensores Landsat TM y ETM+ también se combinaron las bandas 5-4-3 y 5-4-1 y falso color 4-3-2.

4.5 Cambio Climático

4.5.1 Variaciones climáticas de las últimas décadas a nivel global y en Chile

Importantes organismos como el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) señalan que la influencia humana sobre el clima mundial es evidente y va en aumento, manifestándose sus impactos en todos los continentes y océanos. Varios de los cambios climáticos observados desde la década de 1950 no tienen precedentes en los últimos decenios e incluso milenios (IPCC, 2014). Este mismo organismo, asevera con un 95% de certeza, que la actividad humana actualmente es la principal causa del calentamiento climático. También, señalan que mientras mayor sea la perturbación producida por actividades humanas sobre el clima, mayores irán a ser los riesgos de impactos graves, generalizados e irreversibles en las personas y los ecosistemas, y más duraderos serán los cambios en los componentes del sistema climático (IPCC, 2014).

Según el Informe de síntesis del cambio climático publicado el año 2014 por el IPCC, cada uno de los últimos 3 decenios ha sido sucesivamente más cálido que cualquier decenio anterior desde el año 1850. Existe la posibilidad de que el período comprendido entre los años 1983 y 2012 haya sido intervalo de 30 años más cálido en los últimos 1400 años en el hemisferio norte. Los datos de temperatura superficial terrestre y oceánica, combinados y promediados globalmente, calculados mediante una tendencia lineal, evidencian un calentamiento de 0,85°C para el período 1880-2012 (Figura N°3).

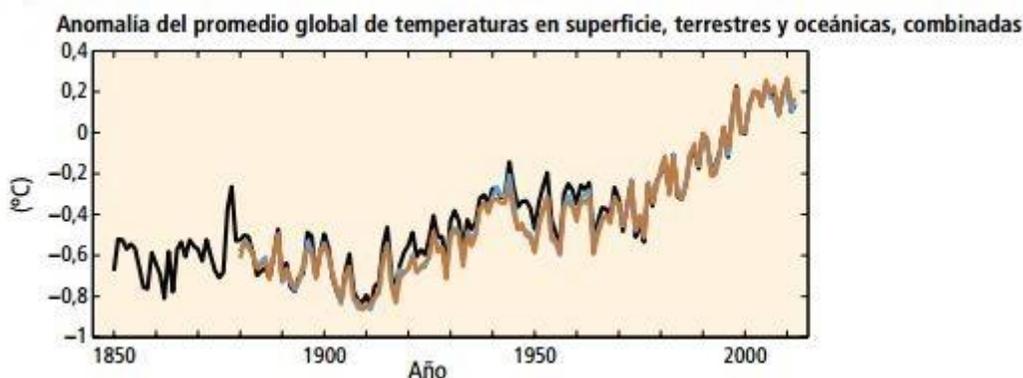


Figura N°3: Anomalia del promedio global de temperaturas en superficie, terrestres y oceánicas, combinadas. *Fuente: IPCC (2014).*

En Chile, la tendencia en las temperaturas medias hasta el año 2010 es de un calentamiento constante en los valles centrales y en los Andes y de enfriamiento en las costas. En lo que respecta a los siglos XX y XXI, las tendencias dependen de la región y el período que se considere. En la zona sur del país, por ejemplo, la tendencia es a la disminución de precipitaciones desde mediados del siglo XX (Quintana y Aceituno, 2012 en MMA, 2016).

Existen investigaciones realizadas en el sur de Chile basadas en anillos de árboles (dendrocronología), fluctuaciones glaciares y revisión de documentos históricos que han ayudado a comprender la variabilidad climática de los últimos 1000 años, la cual resulta útil para comparar los cambios más actuales. Estas reconstrucciones muestran un aumento

constante de la temperatura durante el siglo XX en comparación a siglos anteriores (Lara et al., 2005 en DGA, 2009).

Mediante la reconstrucción de variabilidad de las precipitaciones basadas en anillos de árboles (Le Quesne et al., 2008), se reconstruyeron los últimos 712 años en los que se evidencian importantes variaciones anuales y decadales. Además, se observa que, hacia el final de esa serie temporal, existe una clara tendencia a la disminución en los últimos 150 años en Chile central, lo que constituiría parte de la explicación al porqué del retroceso glaciar experimentado en dicha zona. Por su parte, en la Patagonia en el período 1960-1999, se ha determinado que, si bien no existe un descenso en el monto de precipitaciones totales, es el aumento de las temperaturas lo que ha disminuido las precipitaciones de nieve, lo cual a su vez ha llevado a pérdida de masa en los Campos de Hielo (Rasmussen et al., 2007 en DGA, 2009).

Un factor importante a considerar corresponde al fenómeno ENSO (El Niño Oscilación del Sur), el cual se define como una fluctuación periódica que va de 2 a 7 años, en la temperatura superficial del mar y en la presión del aire sobre el Océano Pacífico Ecuatorial (NOAA, s/f). El fenómeno ENSO es una variación periódica irregular en los vientos y en las temperaturas superficiales del Océano Pacífico tropical. El Niño corresponde a la fase cálida del fenómeno ENSO y se asocia a altas presiones en el Pacífico del oeste y bajas presiones en el Pacífico del este. La fase fría del fenómeno ENSO es llamada La Niña, con temperaturas superficiales del mar por debajo del promedio en el Pacífico del este y bajas presiones en el Pacífico del oeste. Este ciclo ENSO causa cambios globales en temperatura y precipitaciones. En las décadas más recientes, los eventos El Niño se han vuelto más recurrentes y los eventos La Niña han visto reducida su frecuencia (Carballo & Bell, 2017). En Chile, los eventos El Niño suelen asociarse a un aumento en las precipitaciones, mientras que los eventos La Niña, se pueden atribuir a un descenso en las precipitaciones (Maturana et al., 2004).

4.5.2 Variabilidad Climática y Glaciares

Otro indicador de variabilidad climática corresponde a las líneas de nieve, debido a que son sensibles tanto a cambios en la temperatura como a cambios en las precipitaciones (Condom et al., 2007 en DGA, 2009). Además, la estimación de cobertura nival y sus cambios son un importante tópico en materia de disponibilidad de recursos hídricos. La línea de nieve sirve como indicador para la línea de equilibrio (ELA, por sus siglas en inglés), cuya oscilación incide sobre la superficie donde se acumula nieve, y a su vez, incide sobre la alimentación de los glaciares (DGA, 2008). Cada glaciar posee características propias que definen su línea de equilibrio propia, por lo que metodologías de línea de equilibrio a una gran escala no son aplicables, sin embargo, a niveles regionales y bajo el contexto del cambio climático, las líneas de equilibrio no dejan de ser un indicador importante de la respuesta glaciar (Condom et al., 2007).

En Carrasco et al, (2008), se determinó de forme general una tendencia positiva de la isoterma 0°C, lo que indica un aumento altitudinal de la línea de nieves entre 1958 y 2006 (Figura N°4).

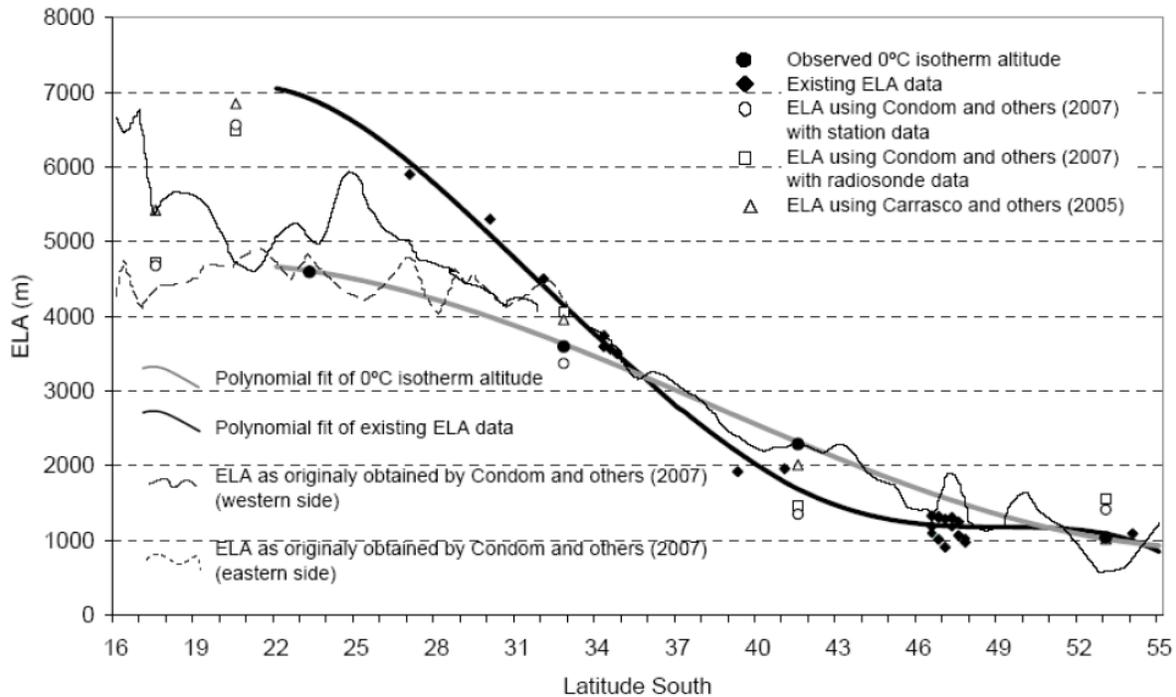


Figura N°4: Líneas de Equilibrio regionales calculadas por Condom et al., (2007) y Carrasco et al., (2005) comparadas con observaciones (Carrasco et al., 2008). *Fuente: DGA, 2009.*

Como ya se ha mencionado anteriormente, el cambio climático ha producido derretimientos de nieve y hielo (componentes de la criósfera) a nivel global. El Cuarto Informe del IPCC (2007) evalúa el estado de la criósfera. Se indica en dicho trabajo que los glaciares y casquetes de hielo han evidenciado una reducción generalizada en las décadas recientes, con muchas probabilidades de que se deba al calentamiento atmosférico que se observa a partir de la segunda mitad de la década de 1970.

El adelgazamiento y pérdida de superficie glaciar ha sido observado en esencialmente todas las grandes cadenas montañosas del planeta, entre las que se incluyen Alaska, el noroeste de EE.UU, el suroeste de Canadá y la Patagonia. La extensión glaciar actualmente es la menor observada en los últimos 5.000 años, y las tasas de retroceso actuales se encuentran fuera de los límites de la variabilidad natural y pueden ser atribuidas principalmente al calentamiento producido por el hombre (IPCC, 2007).

Los impactos de la reducción de los glaciares y campos de hielo incluyen aumento del nivel del mar a nivel mundial, cambios en escorrentía, cambios gracias a inestabilidades de taludes en zonas montañosas por la desaparición de los glaciares, levantamiento de corteza por isostasia (levantamiento de corteza terrestre en respuesta al derretimiento glaciar en Alaska según Larsen et al., 2005), impactos en el turismo y en deportes de montaña (Rosenzweig et al., 2007).

Por último, es posible señalar que la variabilidad climática constituye un fenómeno que debe seguir estudiándose y ser considerado en la planificación a futuro debido a que nos afectará al largo plazo en aspectos esenciales para la vida como lo son los recursos hídricos.

4.5.3 Proyecciones climáticas para el Siglo XXI

En el quinto informe del IPCC (2013) AR5, se llevaron a cabo nuevos escenarios de emisiones y concentraciones de gases de efecto invernadero, llamadas Trayectorias de Concentración Representativas (RCP, por sus siglas en inglés). Con estos escenarios, se elaboraron simulaciones de proyecciones de cambio climático. Los patrones de proyecciones de cambios en temperatura y precipitaciones, para Chile en el siglo XXI, período 2031-2050, serían parecidos. El patrón de temperatura resulta similar en todos los escenarios distintos, habiendo un calentamiento mayor en la zona altiplánica y menor en la zona austral. Para el caso de las precipitaciones, las tendencias apuntan a que durante el período 2031-2050, estas disminuirían, constituyendo un período más seco comparativamente hablando con la media histórica, proyectando disminuciones del orden de entre el 5% y el 15% para el área comprendida entre las cuencas de los ríos Copiapó y Aysén. Las proyecciones aquí señaladas, se acentúan hacia la zona sur, entre las cuencas del BíoBío y el límite sur de la Región de Los Lagos (Rojas, 2012 en Ministerio del Medio Ambiente, 2016).

Para la Patagonia, por ejemplo, se espera que se marque un comportamiento marcadamente estacional del clima, presentándose grandes diferencias en los montos de precipitación entre los meses de verano e invierno (Carrasco et al., 2002 en DGA, 2009).

No existen proyecciones respecto a cambios de la cobertura nival en Chile, existiendo solo descripciones de la cobertura nival relacionada a factores como la estacionalidad, topografía, altitud y latitud para el período comprendido entre 2000 y 2007 (DGA, 2008). Pese a ello, si se asume un aumento de la altitud de la isoterma 0°C, es factible esperar disminuciones en las superficies máximas de cobertura nival determinada para las distintas zonas de Chile estudiadas por la DGA (2008).

El Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile, cumpliendo los requerimientos de CONAMA, elaboró modelos de proyección del comportamiento climático de Chile (DGF, 2006). Aquí se determinó la variabilidad climática para la sección final del siglo XX y se realizaron proyecciones para el siglo XXI tanto a una escala local como a un nivel superficial. Se utilizó una resolución espacial equivalente a 25 kilómetros para cubrir toda la superficie continental de Chile, dividiéndolo en 5 zonas: Norte Grande (17°S - 27°S); Norte Chico (26°S - 32°S); Chile Central (31°S - 37°S); Región Sur (36°S - 45°S) y Región Austral (44°S - 56°S).

Las proyecciones realizadas para los años comprendidos entre el período 2071-2100, señalan que habrá un aumento en la temperatura del aire desde la I Región hasta la XI Región de aproximadamente entre 2°C a 4°C, acentuándose hacia las regiones andinas y en las vertientes orientales de la Cordillera de los Andes y disminuyendo de norte a sur, habiendo sectores de la Región Austral en que la temperatura del aire no aumentaría lo suficiente como para llegar a 1°C. Por el contrario, en algunos sectores de los Andes se registrarían los mayores calentamientos, excediendo los 5°C. De igual forma a como se señalaba en el informe AR5

del IPCC, en el trabajo de DGF (2006), en general las precipitaciones disminuirán tanto en la estación invernal y durante el período estival, entre el territorio nacional comprendido entre 30°S y 40°S para la primera, y entre 38°S y 50°S para el segundo.

Por cada zona nacional el comportamiento puede variar, esperándose un aumento de las precipitaciones en el Norte Grande y en el Norte Chico, aumentando estas en los meses de verano (pudiendo llegar incluso a un aumento del orden del 100% de precipitaciones) para la primera zona mencionada, y en los meses de otoño para el segundo. Por el contrario, para las zonas Centro y Sur del país, es esperable una disminución de las precipitaciones (entre un 10% y un 20%) y finalmente se esperan aumentos de entre 10% a 20% concentrados en los meses de invierno para la Región Austral.

A estas disminuciones se les asocian impactos hidrológicos, los cuales son expresiones del cambio de precipitaciones nivales a líquidas, lo que genera disminuciones en el área andina de acumulación de nieve gracias al aumento de la altura de la isoterma 0°C antes mencionada (DGF, 2006). Las disminuciones pluviométricas en conjunto con los impactos hidrológicos señalados, conforman un escenario preocupante especialmente para las Regiones Centro y Centro Sur, ya que aquí se esperan condiciones de alta vulnerabilidad a eventos extremos (CONAMA, 1998).

5. METODOLOGÍA

5.1 Imágenes Satelitales

5.1.1 Compilación de escenas

A grandes rasgos, la metodología consiste en la recopilación de imágenes satelitales desde la página web del Servicio Geológico de los Estados Unidos para su posterior procesamiento y corrección.

Para la selección y compilación de imágenes satelitales se consideraron en primer lugar, imágenes LANDSAT, de los satélites y sensores Landsat 5 TM y Landsat 8 OLI/TIRS, del sitio web del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), para un período de 32 años, desde 1985 hasta el actual año 2017. Se buscaron imágenes con un intervalo de 5 años a partir de la década de los ochenta y dentro de lo posible, cuya fecha se ubique durante el fin del período estival (finales de Marzo, Abril y Mayo), para contar con la menor cantidad de nieve que pueda dificultar la identificación de superficies glaciares, como también la menor cantidad de nubosidad (Kääb et al., 2003; Rivera et al., 2002).

Sin embargo, debido a amplios vacíos de información de la captura de datos, desde la imagen satelital correspondiente al 7 de Marzo de 1985, la imagen más próxima y que, metodológicamente hablando, era más adecuada de procesar, correspondía al 7 de Febrero de 1998. Posteriormente, la selección y descarga de imágenes satelitales del sensor Landsat 5 TM prosiguió sin problemas para la imagen de 30 de Marzo de 2005, sin embargo, al seleccionar y descargar una imagen del año 2010 captada por el sensor Landsat 7 ETM, ésta presentaba franjas de datos inválidos. Esto ocurrió debido a que este sensor presenta un problema causado por una falla en el instrumento que corrige las líneas escaneadas, resultando en que todas las imágenes adquiridas desde el 14 de Julio de 2003 posean las franjas de datos inválidos (*gaps*) ya mencionadas (Ramos et al., 2009). Debido a esto, se recurrió nuevamente al sensor Landsat 5 TM para obtener una imagen del 28 de Marzo de 2010. Finalmente, la última imagen satelital del período, correspondiente al 16 de Abril de 2017, fue seleccionada y descargada desde el archivo de imágenes del sensor Landsat 8 OLI/TIRS.

Para trabajar con estas imágenes, se usó principalmente el software ENVI 5.3, el cual se es un programa geomático que permite el procesamiento de imágenes satelitales. Por otro lado, es importante corregir los errores que las imágenes podrían tener para aumentar la precisión de los procesos posteriores. Para la corrección de imágenes, ya sea atmosférica o radiométrica, se utilizó, de igual manera, el software ENVI 5.3, ocupando variadas operaciones, detalladas más adelante.

Debido a que el área de estudio se encuentra abarcada por 2 distintas imágenes satelitales (“*Path*” = 232 y “*Row*” = 89 & 90), fue necesario realizar un mosaico, con el fin de obtener una sola imagen, de mayor tamaño, que mezclara ambas escenas mencionadas. Para aquello, se utilizó la operación “*Mosaicking by georeferencing*” del software ENVI 5.3, la cual une imágenes basadas en sus coordenadas geográficas. En su defecto, en caso de que la operación anterior fallara, el mosaico se realizó utilizando el software ArcGis 10.2 con la herramienta

Análisis de variaciones areales de los glaciares ubicados en las cuencas de Vodudahüe y Cahuelmó durante el período 1985-2017

“*Mosaic to New Raster*”, la que permite unir 2 o más imágenes satelitales, y a la vez crea un nuevo raster.

Por otra parte, también se trabajó con una imagen satelital Sentinel-2 debido a su buena resolución espacial y acceso gratuito en el portal online de acceso abierto de Copernicus. Se utilizó una que fue tomada el 17 de Marzo de 2017 por el satélite Sentinel-2A y su instrumento MIL (resolución: 10-60 metros. 10 metros para el color verdadero utilizado).

Si bien se utilizaron principalmente imágenes Landsat para la delimitación de glaciares y su posterior análisis, la imagen satelital Sentinel se empleó para validar las tendencias de retrocesos glaciares de las imágenes Landsat y detectar posibles diferencias sustanciales en las superficies glaciares finales correspondientes al año 2017. Debido a esto no se le aplicaron las correcciones detalladas en la siguiente sección.

5.1.2 Correcciones de imágenes Landsat

5.1.2.1 Transformación a valores de Radianza

El software ENVI 5.3 se utilizó para aplicar las correcciones a las imágenes satelitales colectadas: transformación a valores de radianza, corrección atmosférica y corrección radiométrica.

Las imágenes satelitales por defecto, poseen su información en valores de Nivel Digital ND (o DN, por sus siglas en inglés). Sin embargo, para realizar distintos tipos de análisis a estas imágenes en sensores remotos de distintos tipos, se necesita que la información espectral esté expresada en valores de radianza, que posteriormente sea utilizada para calcular la reflectancia (Finn et al., 2012). Para realizar este cálculo, se usó la herramienta *Band Math* del software ENVI 5.3, ingresando la siguiente fórmula (USGS, s/f):

$$Lsen_k = a_{0(k)} + a_{1(k)}ND_{(k)}$$

en donde $Lsen$ corresponde a la radianza ($W m^{-2} \mu m^{-1} str^{-1}$)

a_0 y a_1 son los parámetros de calibración

ND es el nivel digital

y el subíndice (k) corresponde a cada imagen

Es importante tener en cuenta que cada sensor, posee en cada una de sus bandas espectrales un parámetro de calibración específico, por lo que deben ingresarse cada uno de estos valores manualmente, cambiándose para cada banda de la imagen satelital que se adquirió y procesó. Para el caso del sensor Landsat 5 TM, los parámetros de calibración pueden verse en la Tabla N°1.

Tabla N°1: Parámetros para conversión a reflectividades de las imágenes Landsat 5 TM.

Banda	$E0_k$	$a0_k$	$a1_k$	T_k
TM1	1957	1.5	0.602	0.5
TM2	1829	-2.9	1.17	0.3
TM3	1557	-1.2	0.806	0.25
TM4	1047	-1.5	0.815	0.2
TM5	219.3	-0.37	0.108	0.125
TM7	74.52	-0.15	0.057	0.075

Fuente: SIGMUR, s/f

5.1.2.2 Corrección Atmosférica

La energía capturada por los sensores Landsat es influenciada por la atmósfera de la Tierra. Estos efectos incluyen dispersión y absorción gracias a las interacciones entre la radiación electromagnética y las partículas de la atmósfera (gases, vapor de agua y aerosoles). La corrección atmosférica se ocupa para reducir estos efectos, existiendo variadas metodologías para llevarla a cabo (Young et al., 2017). Para este trabajo, se ocupó la metodología de Chávez (1988), la cual asume una transmisividad atmosférica constante, y propone corregir las imágenes restando el valor de radiancia mínimo (L_{min}) de cada banda mediante la herramienta *Dark Subtract*. Para obtener los valores mínimos de cada banda, las bandas deben estar agrupadas para obtener los valores mínimos de cada banda instantáneamente y de forma ordenada mediante la herramienta *Layer Stacking*. Un ejemplo del resultado de esto se presenta en la Figura N°5. Aquí se muestra un histograma de frecuencias con influencia atmosférica (a) y sin influencia atmosférica (b) (Morales & Lang, 2010).

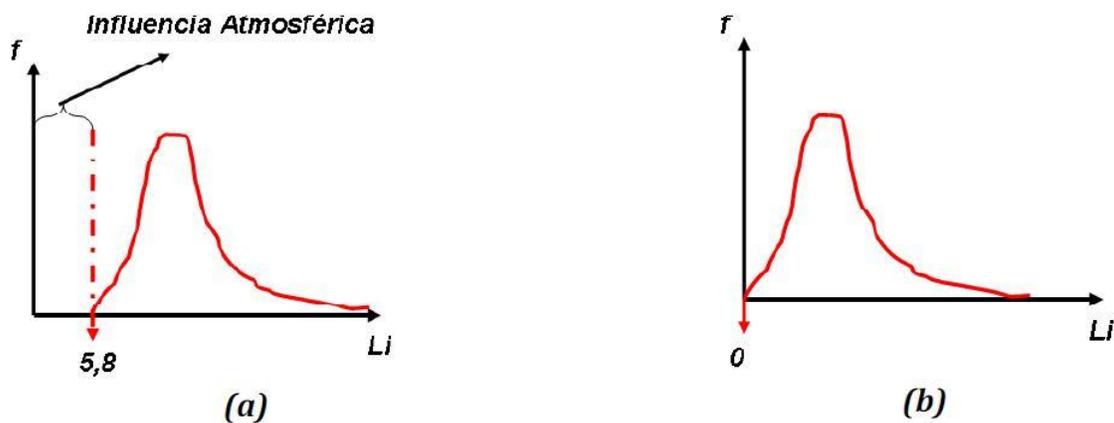


Figura N°5: Ejemplo de corrección atmosférica. Fuente: Morales & Lang, 2010.

El software ENVI 5.3 también se aplicó para llevar a cabo el procesamiento espectral de escenas como, por ejemplo, la composición falso color ocupando las bandas del infrarrojo cercano (LANDSAT bandas 5-4-3), así como también las bandas 4/5 con el fin de determinar con mayor facilidad las diferencias entre hielo y nieve en el área de estudio (Rivera & Brown,

2013; Hall et al, 1995).

5.1.2.3 Corrección Radiométrica

Siguiendo la línea de la corrección atmosférica, las imágenes satelitales presentan diferentes condiciones de iluminación debido a factores como nubosidad, por lo que se hace necesaria una corrección de reflectancia o radiométrica (Ambrosio et al, 2002). Para calcular cada banda en reflectancia se utilizó la siguiente ecuación en la herramienta *Band Math* (Morales & Lang, 2010):

$$\rho_{(k)} = \frac{D\pi L_{sen(k)}}{E_{0(k)} * \cos \theta}$$

en donde ρ es la reflectancia (%)

D es la distancia tierra-sol medida en tanto por uno

$\pi = 3,141529$

L_{sen} es la radiancia antes calculada

E_0 es la irradiancia solar equivalente ($W m^{-2} \mu m^{-1} str^{-1}$), que significa la cantidad de energía que debería llegar potencialmente según el ancho de banda

θ es el ángulo complemento de la elevación solar y el subíndice k corresponde al número de cada banda

Por su parte, la Distancia tierra-sol está dada por la siguiente fórmula (Morales & Lang, 2010):

$$D = \left(1 + 0.0167 * \left[\sin \frac{2\pi(n - 93.5)}{365} \right] \right)^2$$

en donde $\pi = 3,141529$

y n es el día Juliano

Para calcular el día Juliano, primero se procedió a identificar la fecha en que fue captada la imagen satelital mediante la metadata que acompaña la información adquirida al momento de la descarga de las imágenes. Luego, mediante una calculadora online de conversión de Fecha y Tiempo a Día Juliano online de la Universidad de Granada, se convirtieron las fechas a sus equivalentes Días Julianos (Aznar, s/f).

5.1.3 Utilización de *software* ARCGIS

Finalmente, los mosaicos de las imágenes satelitales con la corrección radiométrica aplicada, se exportaron a de un ambiente SIG mediante la herramienta *Mask* del software ArcGis 10.2, utilizando como base un shapefile del área de estudio. Para las imágenes satelitales con menor resolución y/o con presencia de sombras que imposibiliten la visión, se ocupó un número de softwares libres como Google Earth y HERE WeGo debido a su buena resolución espacial para delimitar glaciares.

Se procedió a delimitar los cuerpos glaciares utilizando distintas combinaciones de bandas para cada imagen: 7-5-4 para la imagen satelital del año 1985; 7-5-1 para el año 1998; 7-4-3 para el año 2005; 5-4-1 para el año 2010 y finalmente la combinación de bandas 7-5-4 para el año 2017. Se utilizó la imagen satelital Sentinel 2017 para apoyar la delimitación conforme a las laderas y fondos de valle que generan efectos de sombra sobre los glaciares, lo cual contribuyó a incrementar la precisión en la delimitación de los bordes glaciares. Se eligió un glaciar de menor tamaño en la imagen satelital de 1985 para utilizar como umbral de referencia y así establecer qué glaciares delimitar en la cuenca de Vodudahüe. Este glaciar corresponde al llamado N°15 dentro de la cuenca, el cual en 1985 poseía una superficie de 0,218 km².

La energía mencionada con anterioridad y que puede ser absorbida por las masas de hielo se relaciona con la exposición solar que estas tengan. Para buscar alguna posible relación entre superficie perdida por los glaciares, la velocidad de derretimiento de ésta y la exposición de los cuerpos de hielo, se obtuvo un Modelo de Elevación Digital DEM (Digital Elevation Model, por sus siglas en inglés) que incluyera el área de estudio, desde LP DAAC (Land Process Distributed Active Archive Center, por sus siglas en inglés) del sitio web de la USGS. A través de ese Modelo de Elevación Digital se generó un mapa de exposición solar mediante la herramienta *Aspect* de ArcGIS y luego se determinó la exposición de cada glaciar, observando cuál dirección de exposición (Norte, Noroeste, Noreste, Oeste, Este, Sur, Suroeste o Sureste) contaba con un mayor número de píxeles dentro de cada polígono glaciar dibujado con la imagen satelital correspondiente al año 1985.

5.1.4 Estimación de error

Si bien la conversión a valores de radianza y las correcciones atmosférica y radiométrica busca eliminar complicaciones tales como la dispersión y absorción de energía y problemas de iluminación, también existe un margen de error de las mediciones de las imágenes satelitales con respecto a la realidad. Este error fue calculado por Williams et al (1997) mediante la siguiente fórmula:

$$E * \sqrt{n}$$

en donde E es el error de las mediciones o resolución del sensor utilizado (30m para las imágenes Landsat)

y n es el número de mediciones (6, correspondiente a las 6 fechas consideradas por las imágenes satelitales)

Entonces, el error estimado corresponde a ± 67 metros.

5.2 Información Climatológica

Para conseguir la información climática de temperatura y precipitación para Huinay en el período 1985-2017, se solicitaron los datos meteorológicos directamente a la fundación San Ignacio de Huinay. Sin embargo, esta información presentaba vacíos y, además, contaba con

Análisis de variaciones areales de los glaciares ubicados en las cuencas de Vodudahüe y Cahuelmó durante el período 1985-2017

datos solo a partir del mes de Julio de 2005 y finalizaba en Diciembre de 2015, por lo que había que reconstruir datos para el período de estudio 1985-2017.

Debido a esta brecha de información, se procedió a realizar un relleno de datos de la Estación Huinay mediante otras estaciones meteorológicas cercanas y completas. Las estaciones seleccionadas fueron Chaitén, Esquel, Puerto Montt y Bariloche y su información fue compilada a través del Explorador Climático del Centro del Clima y Resiliencia (CR2). Dichos datos permitieron a modo diario completar y reconstruir la serie de la estación Huinay mediante regresiones lineales simples considerando las más altas correlaciones y significancias estadísticas. Dicho procedimiento permite entender la variabilidad de las últimas décadas y son orientadoras de dicha variabilidad, es decir, en ningún caso reproducen el comportamiento local, sino más bien lo estiman a modo general.

Se construyeron gráficos para evidenciar el comportamiento de los promedios anuales de temperatura y precipitaciones totales anuales para el período 1985-2017 para su posterior análisis.

Posteriormente, se procedió a calcular la cantidad de precipitación acumulada durante días de frío, en conjunto con sus valores de precipitación asociados y una acumulación de precipitaciones en estos días a lo largo del período de estudio. Para esto, se calculó un umbral de temperatura para definir días fríos. Tomando en cuenta que la estación meteorológica perteneciente a la fundación San Ignacio de Huinay, que se ubica en la costa a una altura de 17 metros sobre el nivel del mar y que los glaciares se ubican en zonas cordilleranas y a mayor altura, fue necesario considerar un umbral que permita condiciones de isoterma cero a las alturas cordilleranas, la cual en sus mayores puntos dentro de la cuenca de Vodudahüe alcanza aproximadamente los 1900 metros sobre el nivel del mar.

Así se aplicó el gradiente adiabático para definir los días fríos. Siguiendo este principio y considerando que cada 1000 metros de ascenso la temperatura desciende 6°C (Martens, 2013), se estableció que, cuando en la estación meteorológica Huinay se registran $11,4^{\circ}\text{C}$ o menos, en las alturas mayores de la cuenca de Vodudahüe se debiesen presentar temperaturas iguales o menores que 0°C , alcanzando el grado de congelación.

Finalmente, se contrastó la información de precipitación acumulada durante los días de frío con las superficies glaciares totales (tanto de Cahuelmó como de Vodudahüe) durante cada uno de los 5 años correspondientes a las fechas de las imágenes satelitales mediante una tabla y un gráfico.

6. RESULTADOS

Se obtuvieron imágenes satelitales corregidas radiométricamente para los años 1985, 1998, 2005, 2010 y 2017 que en el presente capítulo se presentan en cartografías del color natural para cada uno de estos años en el área de estudio y la combinación de bandas con las cuales se procedió a delimitar las superficies glaciares.

Las diferencias que es posible apreciar en las distintas imágenes en cuanto a claridad se deben a diferentes condiciones climáticas presentes durante la toma de las imágenes, como lo puede ser la presencia de nubosidad. La diferencia en los colores mostrados en las distintas cartografías de bandas espectrales responde a las distintas combinaciones de bandas espectrales que se emplearon buscando una muestra más clara de la presencia de hielo dentro del área de estudio.

Posteriormente se presentan los resultados de cuerpos glaciares identificados en las cuencas de Cahuelmó y Vodudahüe, debido a que la cuenca de Huinay no presenta glaciares. Por último, se obtuvieron las variaciones superficiales de los glaciares entre los años 1985 y 2017.

6.1 Área de Estudio y Combinaciones de Bandas.

Las imágenes según años de análisis, se observan en la Figuras N°6, N°7, N°8, N°9 y N°10. Estas se componen por combinación color natural 3-2-1 a escala regional (a); área de estudio al color natural 3-2-1 (b); y área de estudio con combinaciones de bandas que permiten apreciar con mayor claridad las masas de hielo (c)).

6.1.1 Año 1985

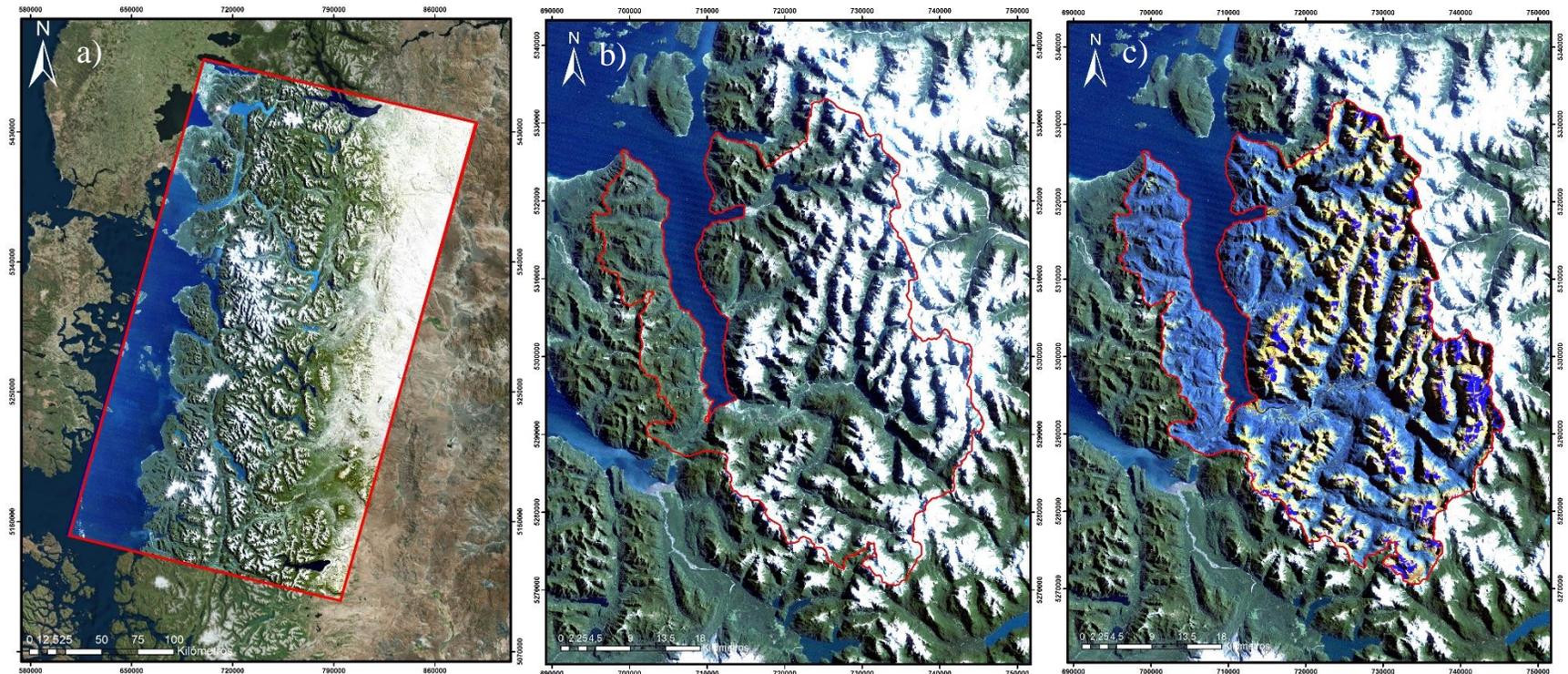


Figura N°6: a) Combinación Color Natural 3-2-1, Escala Regional, Año 1985; b) Área de Estudio Color Natural 3-2-1, Año 1985; c) Combinación 7-5-4, Año 1985. Fuente: elaboración propia en base a imágenes satelitales obtenidas de USG.

6.1.2 Año 1998

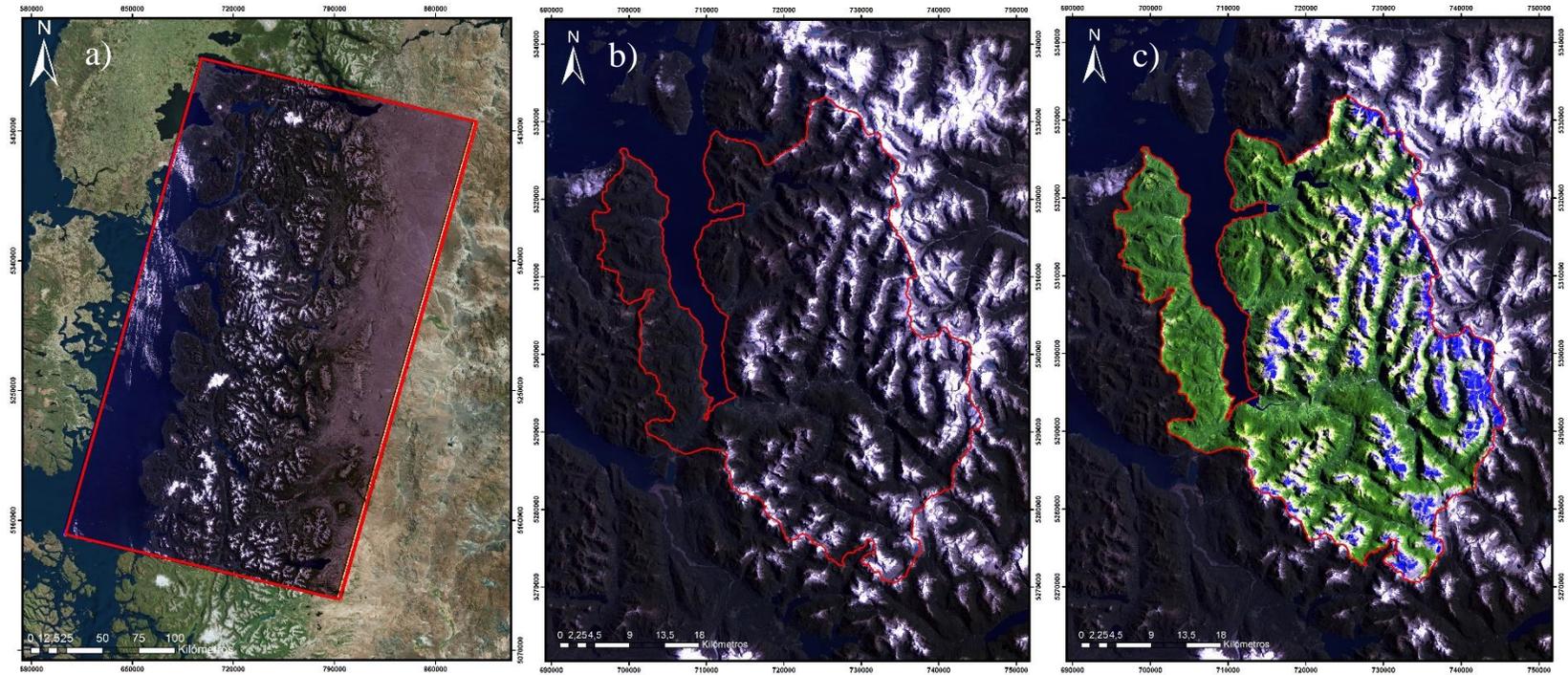


Figura N°7: a) Combinación Color Natural 3-2-1, Escala Regional, Año 1985; b) Área de Estudio Color Natural 3-2-1, Año 1998; c) Combinación 7-5-1, Año 1998. Fuente: elaboración propia en base a imágenes satelitales obtenidas de USG.

6.1.3 Año 2005

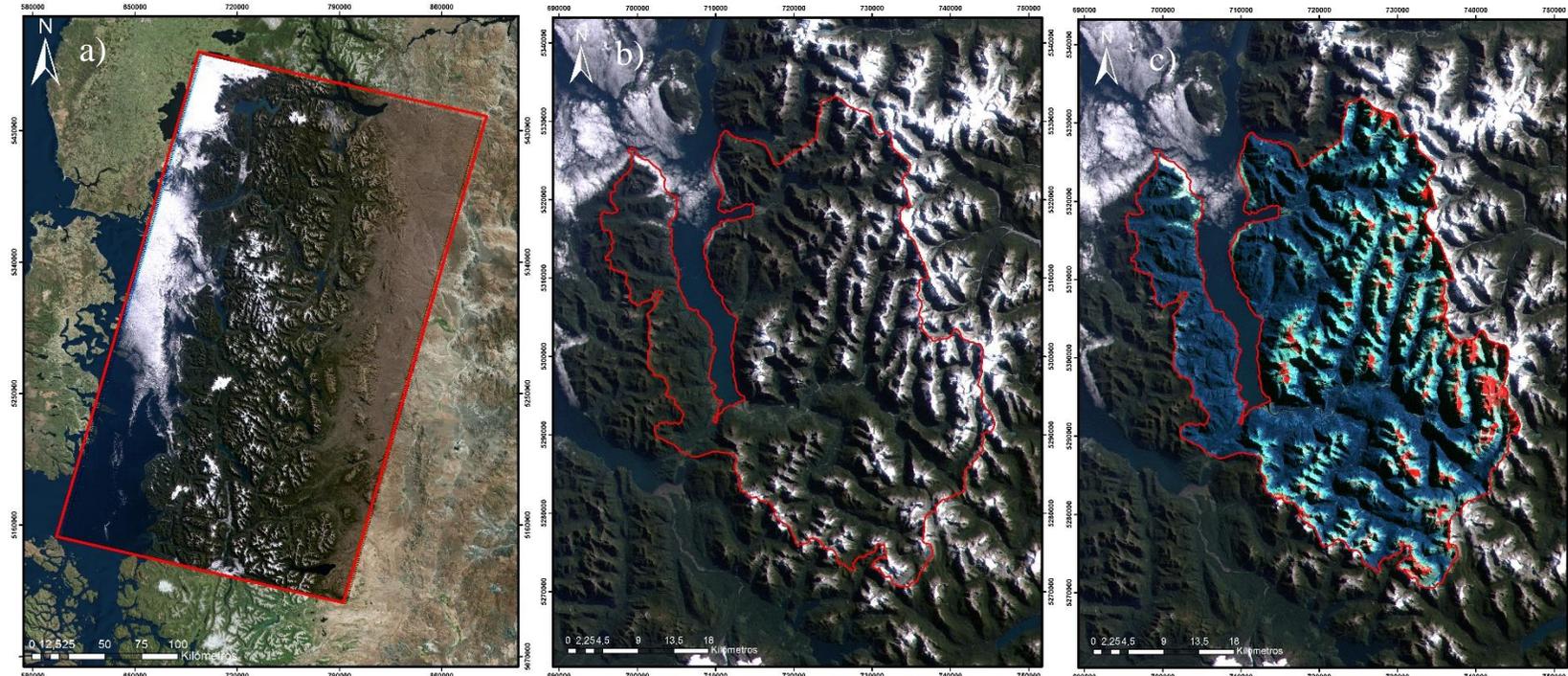


Figura N°8: a) Combinación Color Natural 3-2-1, Escala Regional, Año 2005; b) Área de Estudio Color Natural 3-2-1, Año 2005; c) Combinación 7-4-3, Año 2005. Fuente: elaboración propia en base a imágenes satelitales obtenidas de USG.

6.1.4 Año 2010

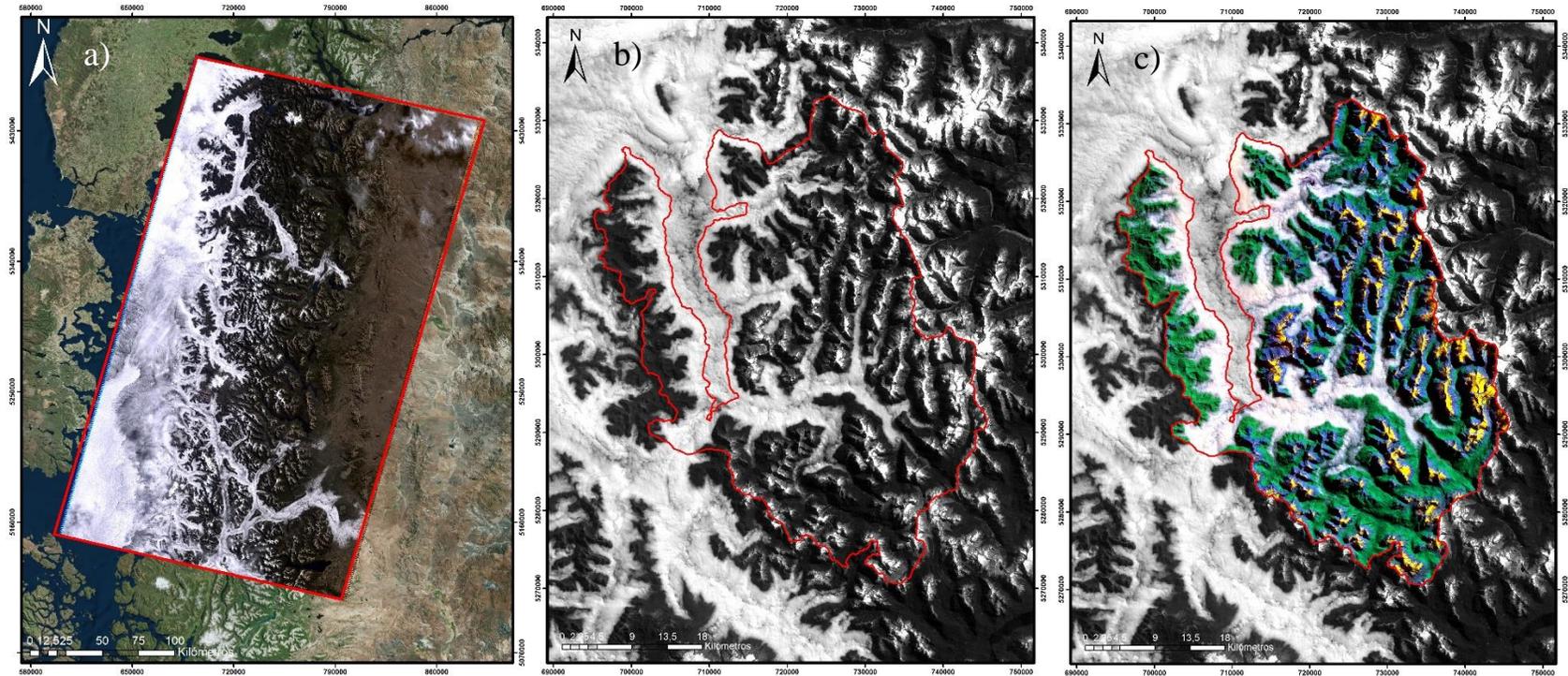


Figura N°9: a) Combinación Color Natural 3-2-1, Escala Regional, Año 2010; b) Área de Estudio Color Natural 5-4-1, Año 2010; c) Combinación 5-4-1, Año 2010. Fuente: elaboración propia en base a imágenes satelitales obtenidas de USG.

6.1.5 Año 2017

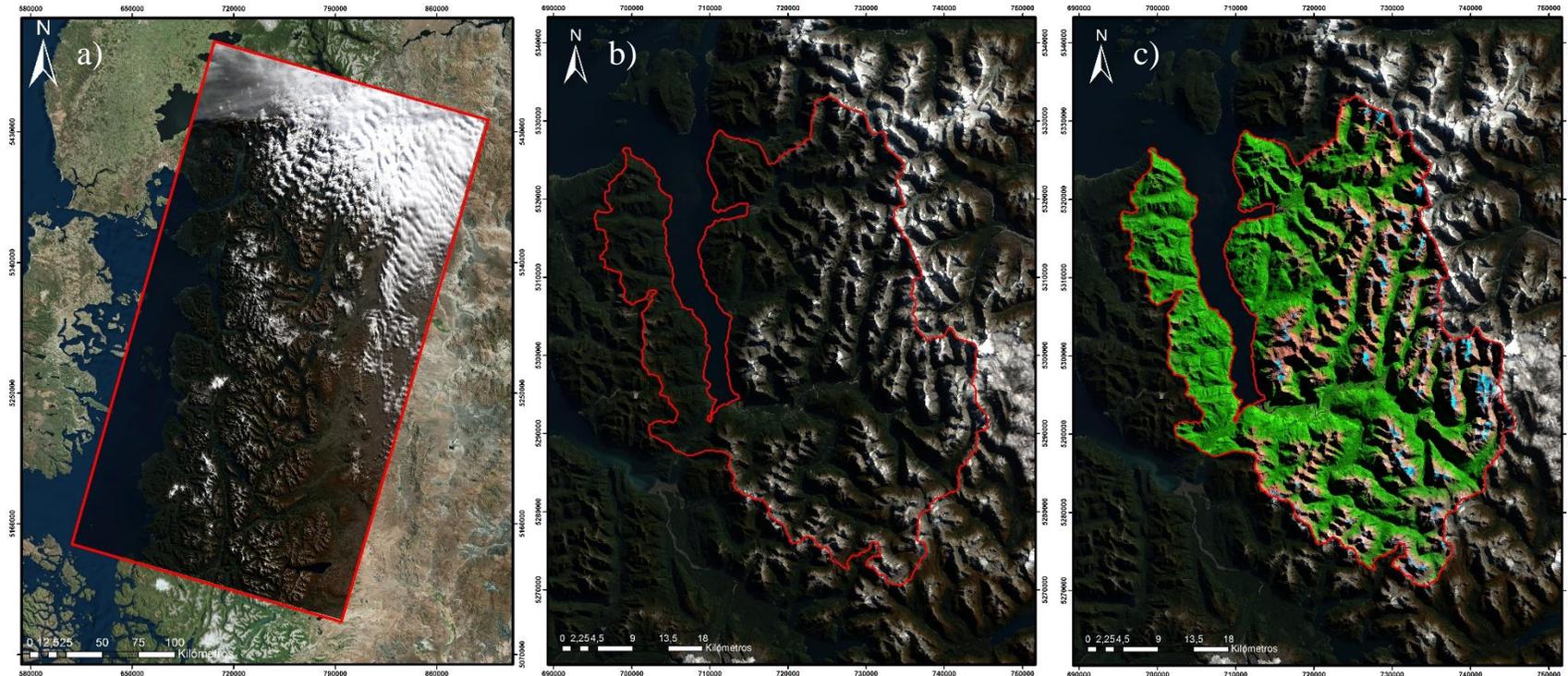


Figura N°10: a) Combinación Color Natural 3-2-1, Escala Regional, Año 2017; b) Área de Estudio Color Natural 3-2-1, Año 2017; c) Combinación 7-5-4, Año 2017. Fuente: elaboración propia en base a imágenes satelitales obtenidas de USG.

6.2 Glaciares Identificados por Cuenca

Se detectaron cuerpos glaciares solamente en las cuencas de Cahuelmó y Vodudahüe, por lo que no se incluye Huinay en las siguientes cartografías. Dentro de la cuenca de Cahuelmó se identificó un solo glaciar, llamado en este trabajo Glaciar Cahuelmó (Figura N°11). Este es un circo, el cual en el año 1985 poseía una superficie de 0,25 km².

Por su parte, en la cuenca Vodudahüe se identificaron y delimitaron 16 glaciares, los cuales fueron nombrados en base a números (Figura N°12), considerándose solamente glaciares de plateau y de circo.

A continuación se presentan 2 cartografías, una correspondiente a la cuenca de Cahuelmó y una correspondiente a la cuenca de Vodudahüe. Estas fueron realizadas sobre la imagen satelital correspondiente al año 1985, punto en el que los cuerpos glaciares se encontraban, mayormente, con sus mayores superficies registradas en el período de estudio.

6.2.1 Cuenca Cahuelmó (1985)

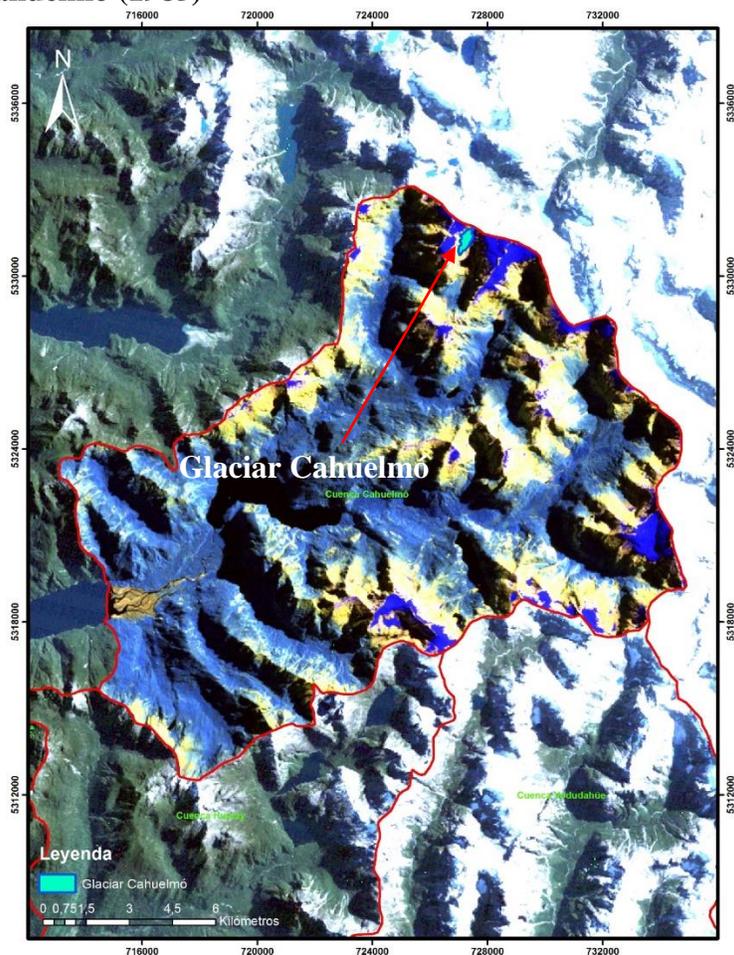


Figura N°11: Glaciar Cuenca Cahuelmó 1985, Combinación de bandas 7-5-4. Fuente: elaboración propia en base a fointerpretación mediante imágenes satelitales obtenidas de USG. Los otros cuerpos de color azul en la imagen corresponden a parches de nieve o cuerpos de hielo muy pequeños como para ser considerados glaciares.

6.2.2 Cuenca Vodudahüe (1985)

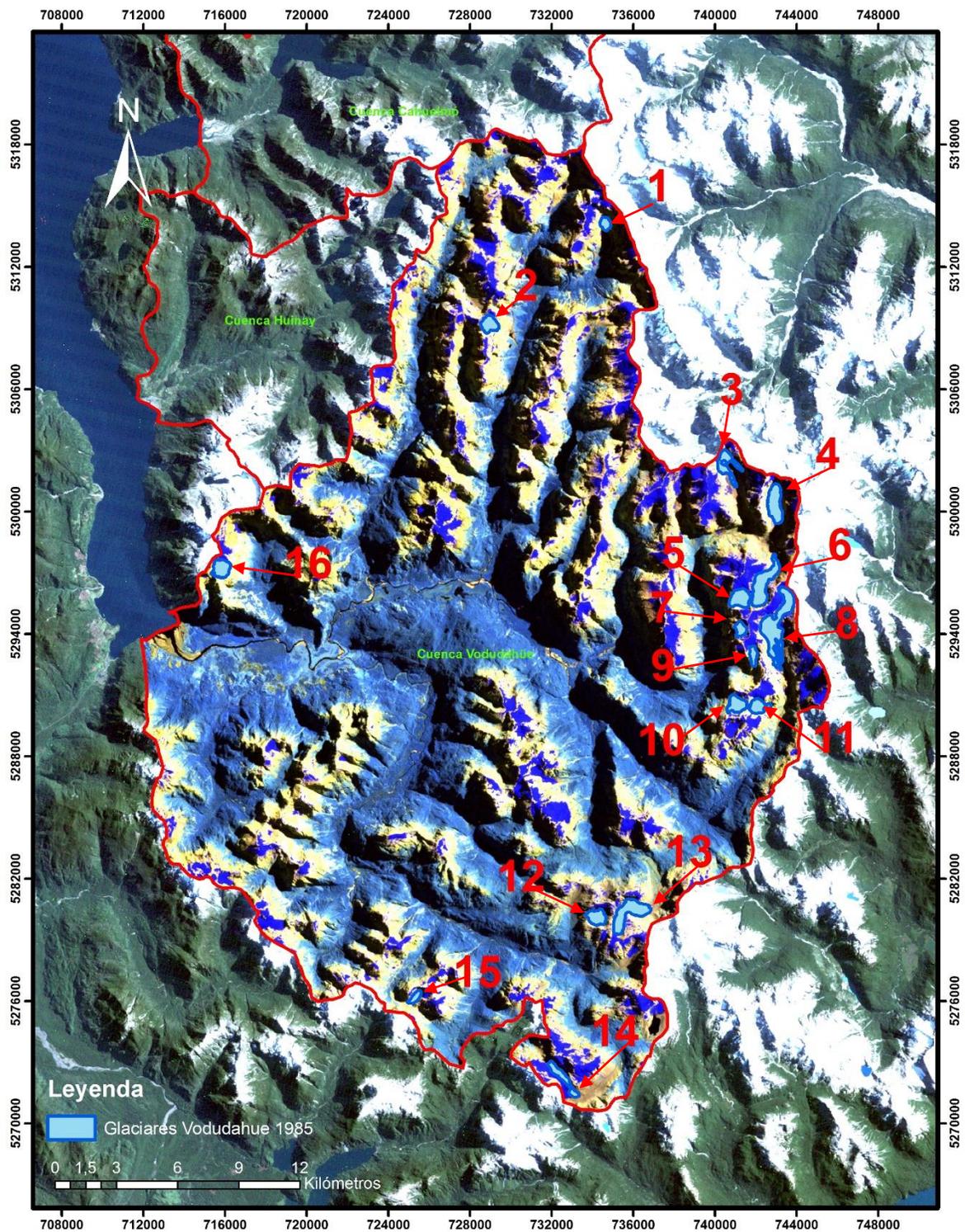


Figura N°12: Glaciares Cuenca Vodudahüe Año 1985, Combinación 7-5-4. Fuente: elaboración propia en base a foteointerpretación mediante imágenes satelitales obtenidas de USG.

6.3 Variaciones Superficiales Areales

Luego de la digitalización de todos los glaciares considerados tanto en Cahuelmó como en Vodudahüe, se superpusieron espacialmente (*Overlap*) los 5 polígonos correspondientes para cada glaciar en cada año (1895, 1998, 2005, 2010 y 2017) para una apreciación visual de las posibles variaciones areales de estos. Se presentan las cartografías que expresan las variaciones areales encontradas y tablas y gráficos para cada glaciar, para posteriormente resumir los datos de superficie calculados en ArcGis, así como también tasas de variación areal anual.

6.3.1 Glaciar Cahuelmó

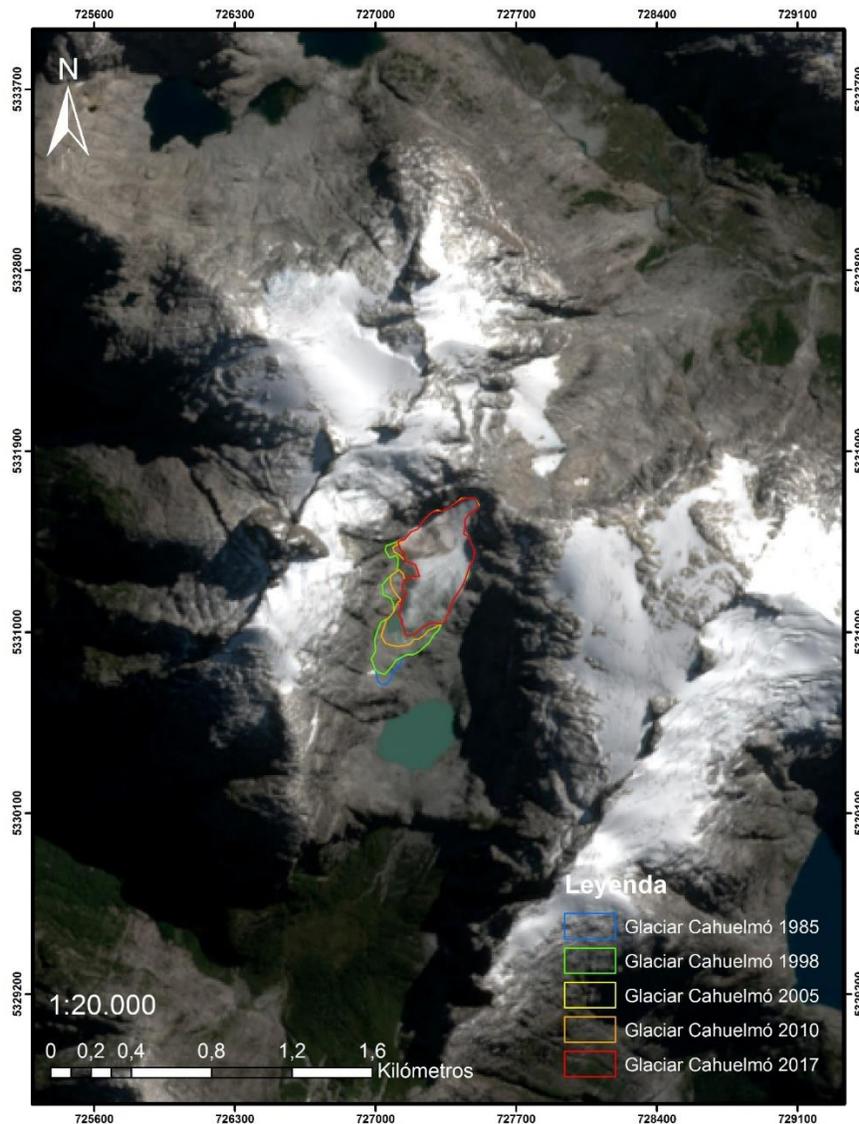


Figura N°13: Variación Areal Superficial Glaciar Cahuelmó, período 1985-2017. *Fuente: elaboración propia en base a fotointerpretación mediante imágenes satelitales Landsat obtenidas de USG.*

Se observa en la Tabla N°2 que el Glaciar Cahuelmó, debido a una tasa de variación anual correspondiente a $-0,01$ kilómetros cuadrados al año, pasó de poseer una superficie de $0,25$ km^2 en 1985 a $0,16$ km^2 el año 2017 (Figura N°14). Las mayores variaciones superficiales registradas ocurrieron entre los años 1998 y 2005 y entre los años 2010 y 2017, ambos casos en los que el glaciar Cahuelmó retrocedió $0,04$ km^2 aproximadamente mientras que, por el contrario, entre los años 1985 y 1998 y 2005 y 2010 se registró un retroceso aproximadamente nulo. Por su parte, las tasas de variación anual corresponden a $-0,001$ km^2 por año para el intervalo 1985-1998, $-0,01$ km^2 por año para 1998-2005, 0 km^2 por año para 2005-2010 y $-0,01$ km^2 por año para 2010-2017. Finalmente, la Tasa de Variación para el período 1985-2017 corresponde a $-0,0028125$ km^2 por año. En la Figura N°14 se observa una clara tendencia general a la reducción de la superficie del Glaciar Cahuelmó en el período 1985-2017.

Tabla N°2: Variación superficial y Tasas de Variación Glaciar Cahuelmó 1985-2017

Año	Superficie (km^2)	Variación (km^2)	Variación (km^2) Acumulada	% Variación	% Acumulado	Tasa Variación Areal Anual km^2a^{-1}	Tasa Variación Areal Anual Período 1985-2017 km^2a^{-1}
1985	0,25	0	0	0	0	0	-0,0028125
1998	0,24	-0,01	-0,01	-4,00	-4,00	-0,001	
2005	0,2	-0,04	-0,05	-16,00	-20,00	-0,01	
2010	0,2	0	-0,05	0	-20,00	0	
2017	0,16	-0,04	-0,09	-16,00	-36,00	-0,01	

Fuente: Elaboración propia, Proyecto Fondecyt 1151087.

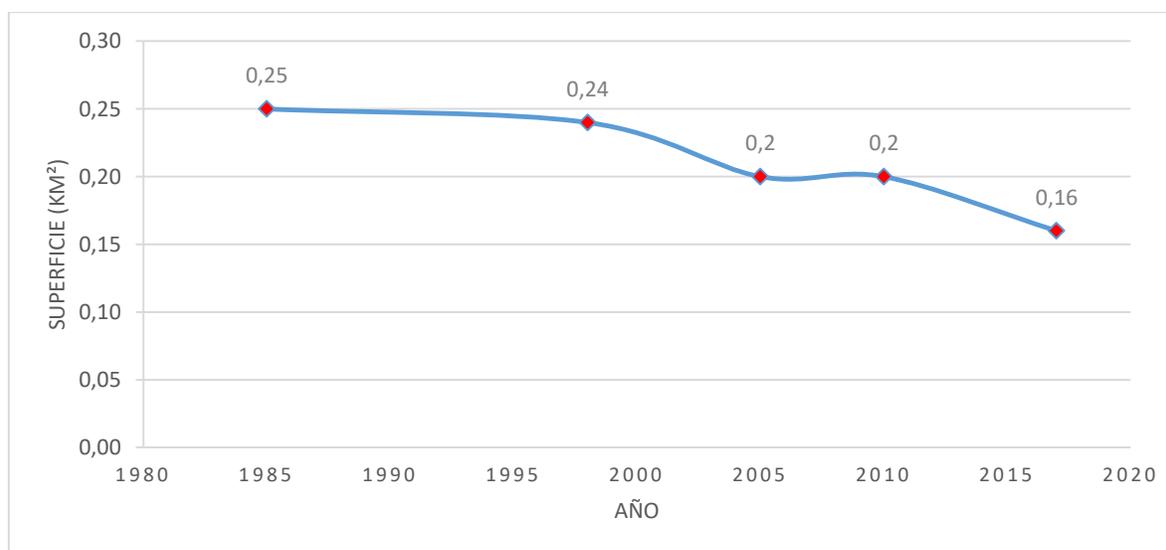


Figura N°14: Gráfico de Variación Superficial de Glaciar Cahuelmó 1985-2017. *Fuente: Proyecto Fondecyt 1151087.*

6.3.2 Glaciar Vodudahüe N°1

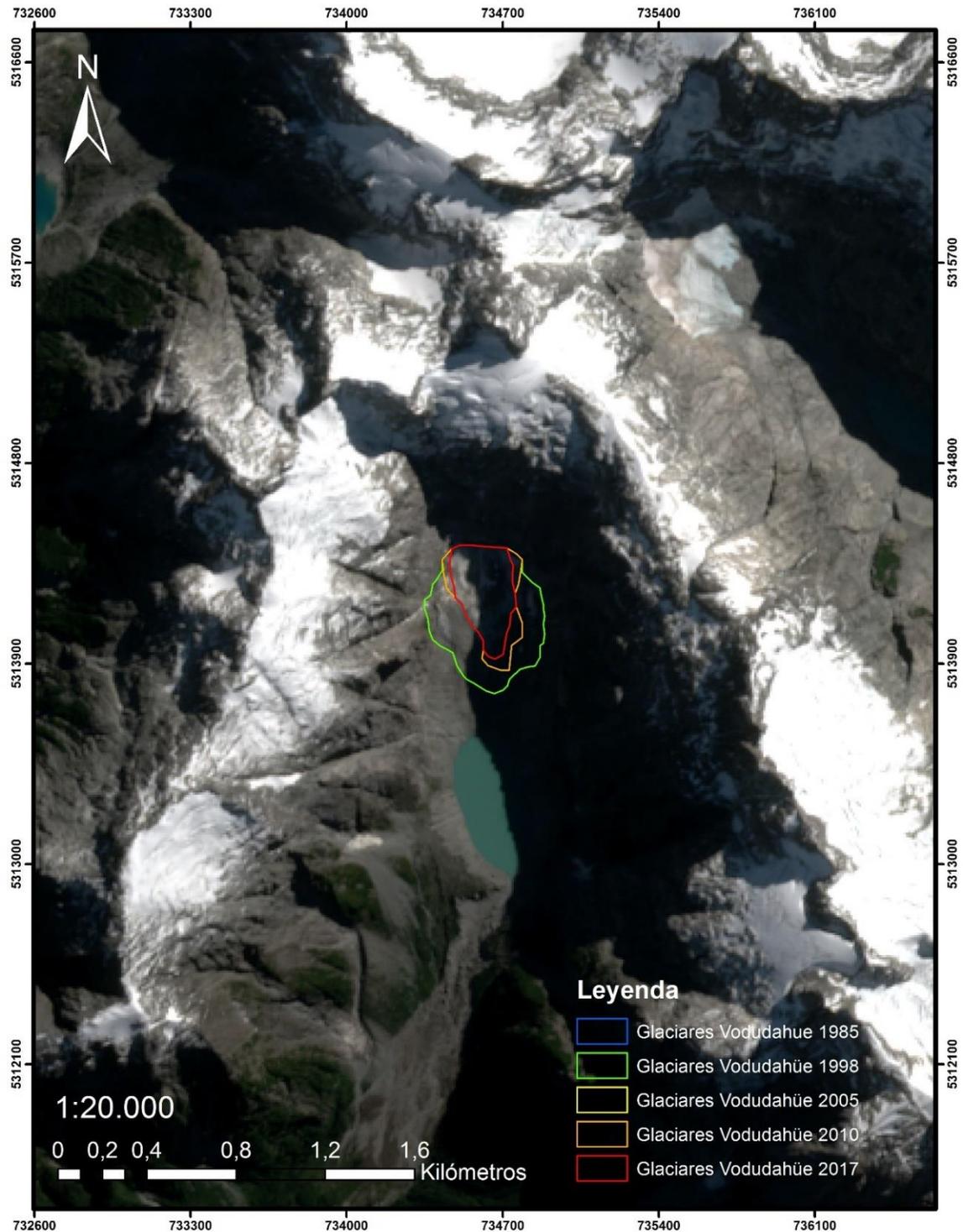


Figura N°15: Variación Areal Superficial Glaciar Vodudahüe N°1 (1985-2017). Fuente: elaboración propia en base a fointerpretación mediante imágenes satelitales Landsat obtenidas de USG.

La Tabla N°3 evidencia que el Glaciar Vodudahüe N°1 pasó de poseer una superficie de 0,26 km² en 1985 a 0,11 km² el año 2017 (Figura N°16). Las variaciones superficiales importantes ocurren entre los años 1998 y 2005 y entre los años 2010 y 2017, retrocediendo 0,13 km² aproximadamente en el primer intervalo y 0,03 km² en el segundo mientras que, por el contrario, entre los años 1985 y 1998 y 2005 y 2010 se registró un retroceso aproximadamente nulo. Finalmente, el porcentaje acumulado de retroceso glaciar corresponde a -61,39% para el período 1985-2017. Por su parte, las tasas de variación anual corresponden a 0 km² por año para el intervalo 1985-1998, -0,02 km² por año para 1998-2005, 0 km² por año para 2005-2010 y -0,004 km² por año para 2010-2017. Finalmente, la Tasa de Variación para el período 1985-2017 corresponde a -0,0009375 km² por año. En la Figura N°16 se observa una clara tendencia general a la reducción de la superficie del Glaciar Vodudahüe N°1 durante el período 1985-2017, con una fuerte caída en el intervalo 1998-2005 (Tabla N°3).

Tabla N°3: Variación superficial y Tasas de Variación Glaciar Vodudahüe N°1 1985-2017

Año	Superficie (km ²)	Variación (km ²)	Variación (km ²) Acumulada	% Variación	% Acumulado	Tasa Variación Areal Anual km ² a ⁻¹	Tasa Variación Areal Anual Período 1985-2017 km ² a ⁻¹
1985	0,26	0	0	0	0	0	-0,0009375
1998	0,26	0	0,00	0,39	0,39	0	
2005	0,13	-0,13	-0,13	-50,19	-49,81	-0,02	
2010	0,13	0	-0,13	0	-49,81	0	
2017	0,1	-0,03	-0,16	-11,58	-61,39	-0,004	

Fuente: Proyecto Fondecyt 1151087.

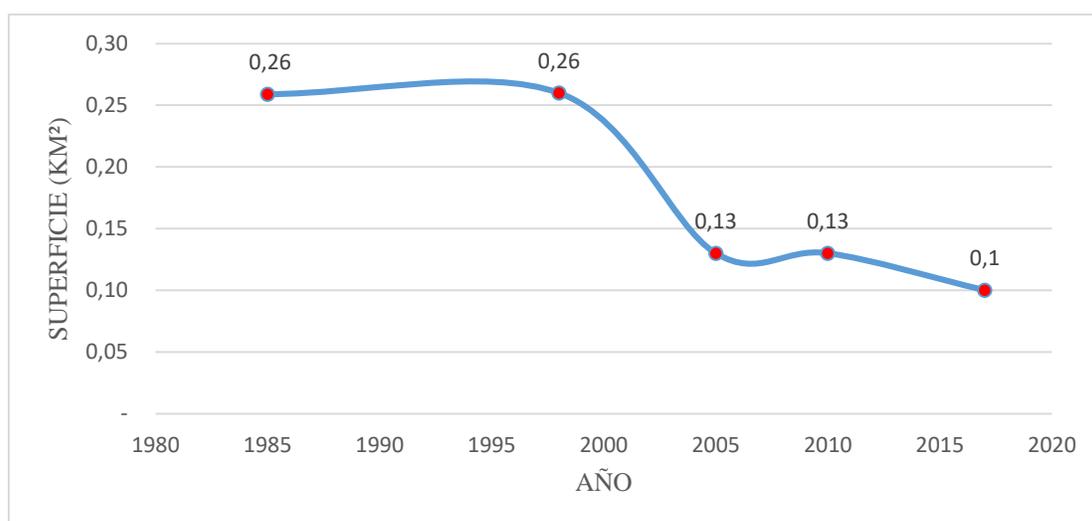


Figura N°16: Gráfico de Variación Superficial de Glaciar Vodudahüe N°1 1985-2017. *Fuente: Proyecto Fondecyt 1151087.*

6.3.3 Glaciar Vodudahüe N°2

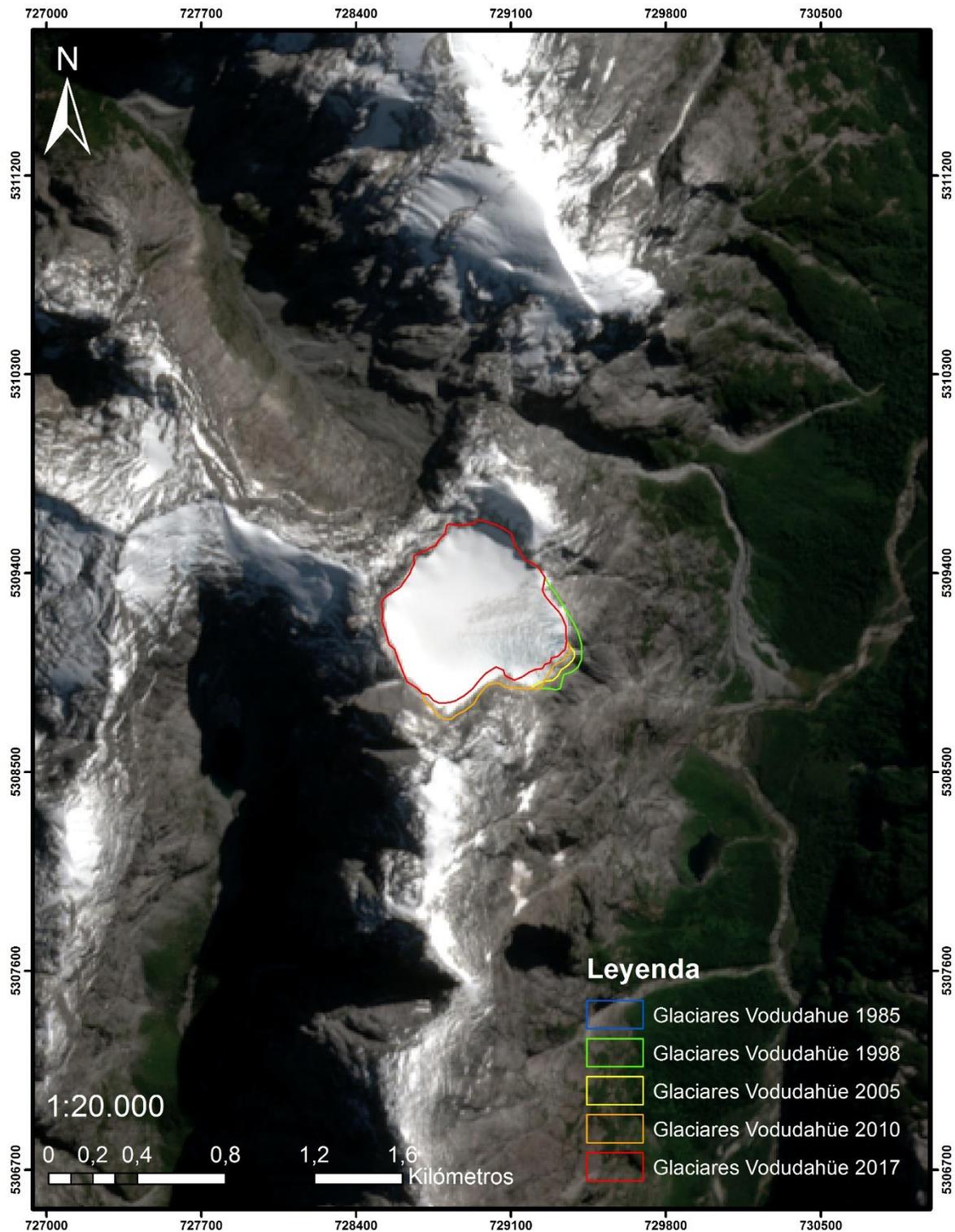


Figura N°17: Variación Areal Superficial Glaciar Vodudahüe N°2 (1985-2017). Fuente: elaboración propia en base a fotointerpretación mediante imágenes satelitales Landsat obtenidas de USG.

La Tabla N°4 presenta que el Glaciar Vodudahüe N°2 en un inicio poseía una superficie de 0,53 km² en 1985 y tenía una superficie de aproximadamente 0,46 km² el año 2017 (Figura N°18). Las variaciones superficiales importantes ocurren entre los años 1998 y 2005 y entre los años 2010 y 2017, retrocediendo 0,03 km² aproximadamente en el primer intervalo y 0,04 km² en el segundo mientras que, por el contrario, entre los años 1985 y 1998 y 2005 y 2010 se registró un retroceso aproximadamente nulo. Por su parte, las tasas de variación anual corresponden a 0,03 km² por año para el intervalo 1985-1998, -0,004 km² por año para 1998-2005, 0 km² por año para 2005-2010 y -0,006 km² por año para 2010-2017. Finalmente, la Tasa de Variación fue de -0,00125 km² por año para la totalidad del período 1985-2017. En la Figura N°18 se observa una clara tendencia general a la reducción de la superficie del Glaciar Vodudahüe N°2 para el período 1985-2017, a excepción del intervalo 1985-1998, en el que hay un leve incremento de masa en la superficie glaciar (Tabla N°4).

Tabla N°4: Variación superficial y Tasas de Variación Glaciar Vodudahüe N°2 1985-2017

Año	Superficie (km ²)	Variación (km ²)	Variación (km ²) Acumulada	% Variación	% Acumulado	Tasa Variación Areal Anual km ² a ⁻¹	Tasa Variación Areal Anual Período 1985-2017 km ² a ⁻¹
1985	0,53	0	0	0	0	0	-0,00125
1998	0,53	0	0,00	0,57	0,57	0,03	
2005	0,5	-0,03	-0,03	-5,69	-5,12	-0,004	
2010	0,5	0	-0,03	0	-5,12	0	
2017	0,46	-0,04	-0,07	-7,59	-12,71	-0,006	

Fuente: Proyecto Fondecyt 1151087.

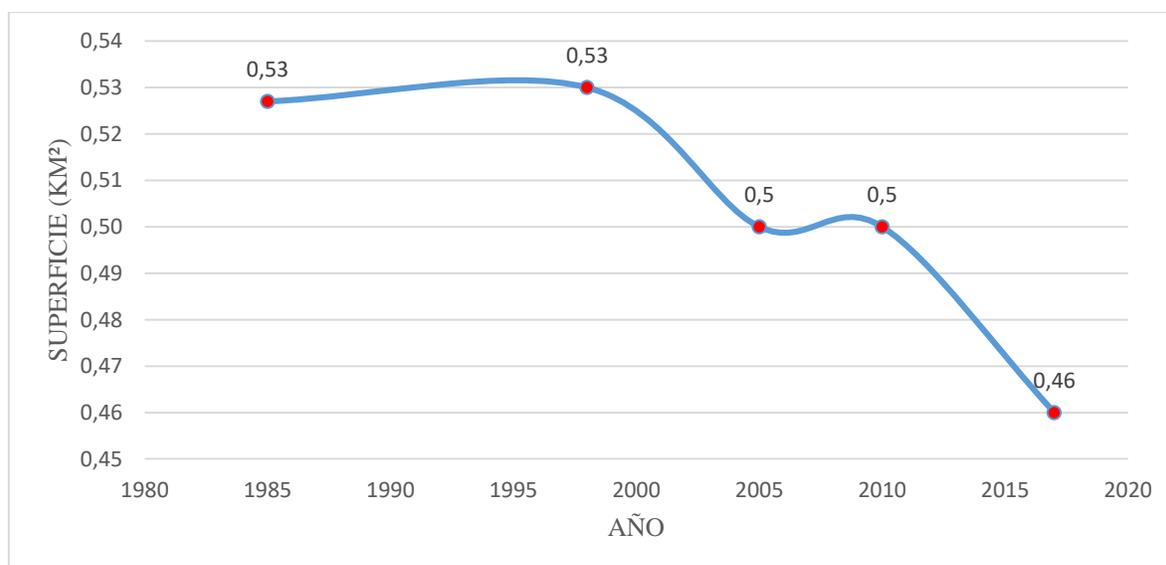


Figura N°18: Gráfico de Variación Superficial de Glaciar Vodudahüe N°2 1985-2017. Fuente: Proyecto Fondecyt 1151087.

6.3.4 Glaciar Vodudahüe N°3

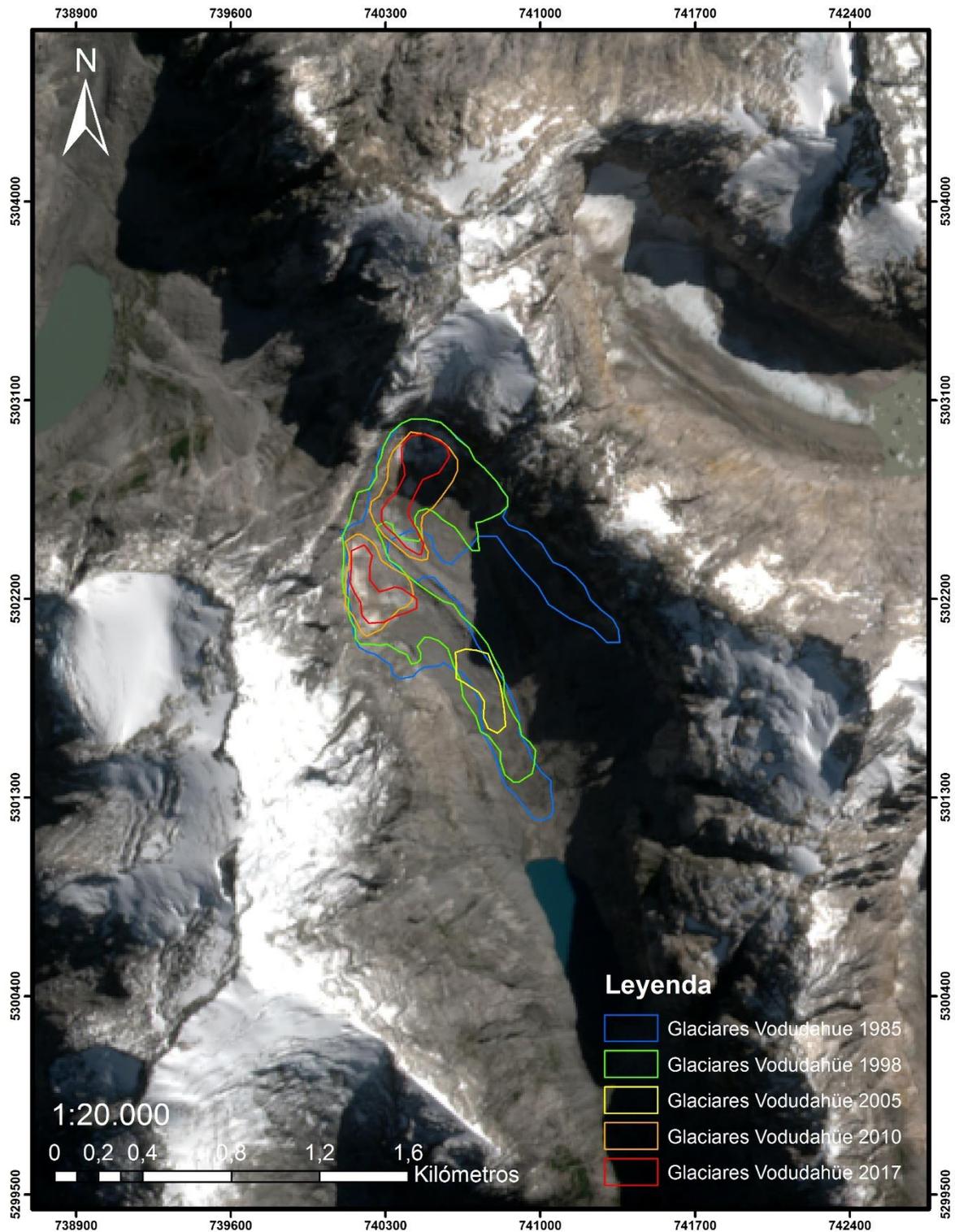


Figura N°19: Variación Areal Superficial Glaciar Vodudahüe N°3, (1985-2017). Fuente: elaboración propia en base a fointerpretación mediante imágenes satelitales Landsat obtenidas de USG.

La Tabla N°5 presenta que el Glaciar Vodudahüe N°3 en un inicio poseía una superficie de 0,73 km² en 1985 y tenía una superficie de aproximadamente 0,12 km² el año 2017 (Figura N°20). Las variaciones superficiales más importantes ocurren entre los años 1985 y 1998 y entre los años 1998 y 2005, retrocediendo aproximadamente 0,19 km² y 0,27 km² respectivamente, mientras que, por otro lado, entre los años 2005 y 2010, 2010 y 2017 se registró un retroceso aproximadamente de 0,05 km² y 0,10 km² respectivamente. Finalmente, el porcentaje acumulado de retroceso glaciar corresponde a -83,47% para el período 1985-2017. Por su parte, las tasas de variación anual corresponden a 0,01 km² por año para el intervalo 1985-1998, -0,04 km² por año para 1998-2005, -0,01 km² por año para 2005-2010 y -0,014 km² por año para 2010-2017. Finalmente, la Tasa de Variación del período 1985-2017 equivale a -0,003125 km² por año. En la Figura N°20 se observa una clara tendencia general a la reducción de la superficie del Glaciar Vodudahüe N°3 durante el período 1985-2017, con una fuerte caída en el intervalo 1998-2005 (Tabla N°5).

Tabla N°5: Variación superficial y Tasas de Variación Glaciar Vodudahüe N°3 1985-2017

Año	Superficie (km ²)	Variación (km ²)	Variación (km ²) Acumulada	% Variación	% Acumulado	Tasa Variación Areal Anual km ² a ⁻¹	Tasa Variación Areal Anual Período 1985-2017 km ² a ⁻¹
1985	0,73	0	0	0	0	0	-0,003125
1998	0,54	-0,19	-0,19	-25,62	-25,62	-0,01	
2005	0,27	-0,27	-0,46	-37,19	-62,81	-0,04	
2010	0,22	-0,05	-0,51	-6,89	-69,70	-0,01	
2017	0,12	-0,10	-0,61	-13,77	-83,47	-0,014	

Fuente: Proyecto Fondecyt 1151087.

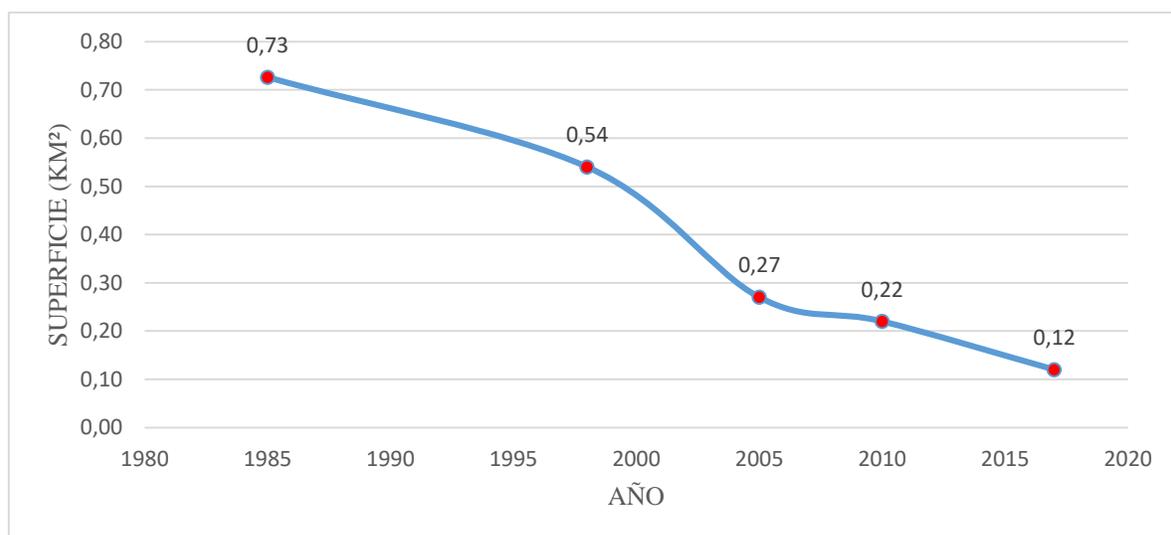


Figura N°20: Gráfico de Variación Superficial de Glaciar Vodudahüe N°3 1985-2017. Fuente: Proyecto Fondecyt 1151087.

6.3.5 Glaciar Vodudahüe N°4

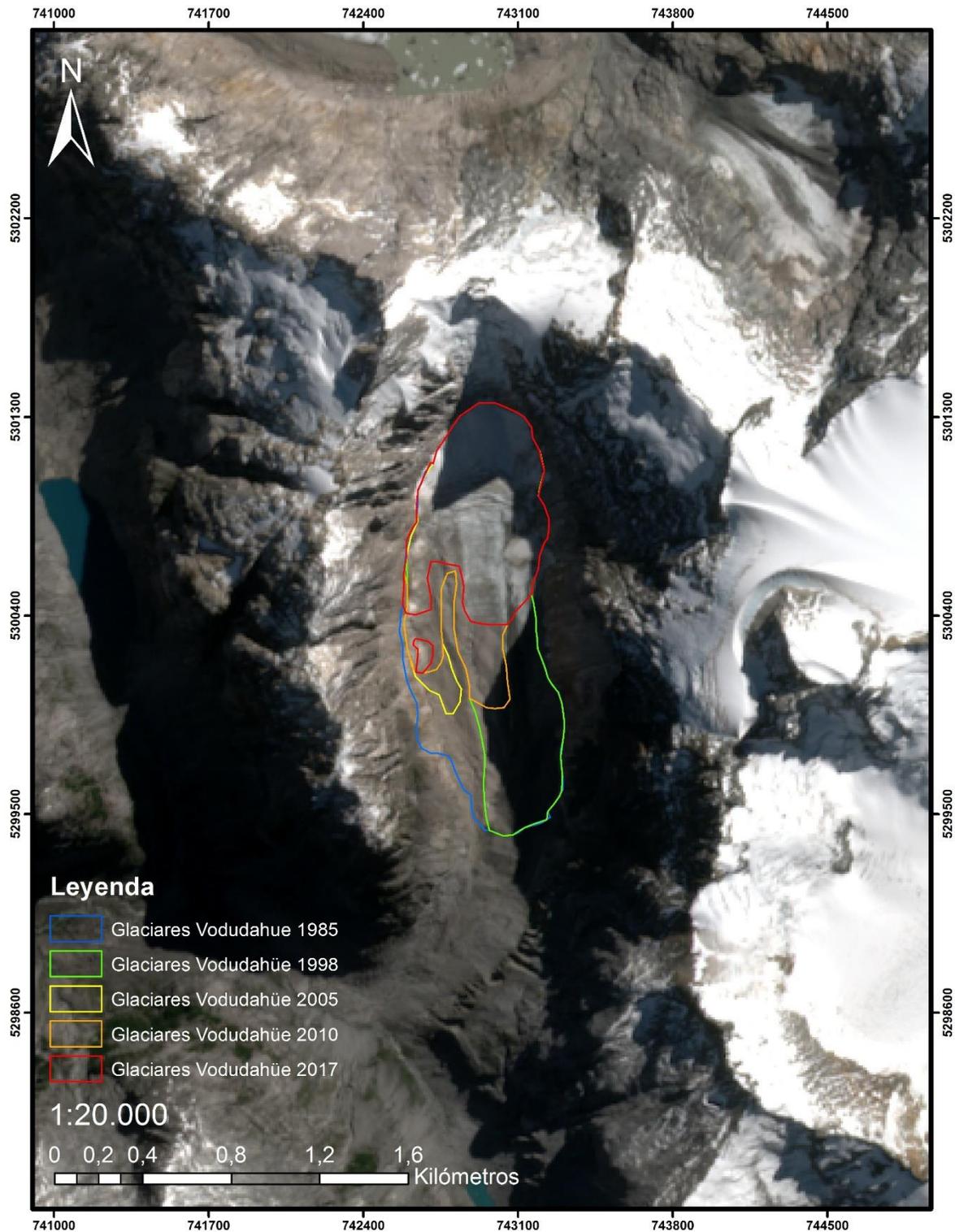


Figura N°21: Variación Areal Superficial Glaciar Vodudahüe N°4, (1985-2017). Fuente: elaboración propia en base a fointerpretación mediante imágenes satelitales Landsat obtenidas de USG.

La Tabla N°6 evidencia que el Glaciar Vodudahüe N°4 en un inicio tenía una superficie de 1,04 km² el año 1985 y tenía una superficie de aproximadamente 0,48 km² para el año 2017 (Figura N°22). Las variaciones superficiales más importantes ocurren entre los años 1985 y 1998 y entre los años 1998 y 2005, retrocediendo aproximadamente 0,14 km² y 0,27 km² respectivamente, mientras que, por otro lado, entre los años 2005 y 2010, 2010 y 2017 se registró un retroceso aproximadamente de 0,03 km² y 0,12 km² respectivamente. Finalmente, el porcentaje acumulado de retroceso glaciar corresponde a -54,02% para el período 1985-2017. Por su parte, las tasas de variación anual corresponden a -0,01 km² por año para el intervalo 1985-1998, -0,04 km² por año para 1998-2005, -0,01 km² por año para 2005-2010 y -0,017 km² por año para 2010-2017. Finalmente, la Tasa de Variación del período 1985-2017 equivale a -0,00375 km² por año. En la Figura N°22 se observa una clara tendencia general a la reducción de la superficie del Glaciar Vodudahüe N°4 en el período 1985-2017.

Tabla N°6: Variación superficial y Tasas de Variación Glaciar Vodudahüe N°4 1985-2017

Año	Superficie (km ²)	Variación (km ²)	Variación (km ²) Acumulada	% Variación	% Acumulado	Tasa Variación Areal Anual km ² a ⁻¹	Tasa Variación Areal Anual Período 1985-2017 km ² a ⁻¹
1985	1,04	0	0	0	0	0	-0,00375
1998	0,9	-0,14	-0,14	-13,79	-13,79	0,01	
2005	0,63	-0,27	-0,41	-25,86	-39,66	-0,04	
2010	0,6	-0,03	-0,44	-2,87	-42,53	-0,01	
2017	0,48	-0,12	-0,56	-11,49	-54,02	-0,017	

Fuente: Proyecto Fondecyt 1151087.

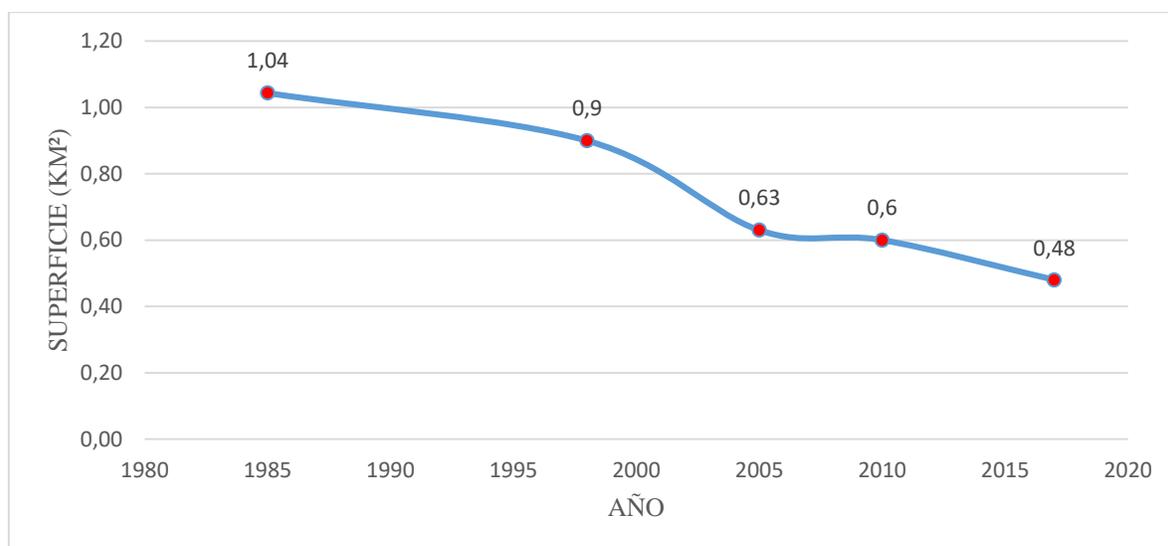


Figura N°22: Gráfico de Variación Superficial de Glaciar Vodudahüe N°4 1985-2017. Fuente: Proyecto Fondecyt 1151087.

6.3.6 Glaciar Vodudahüe N°5

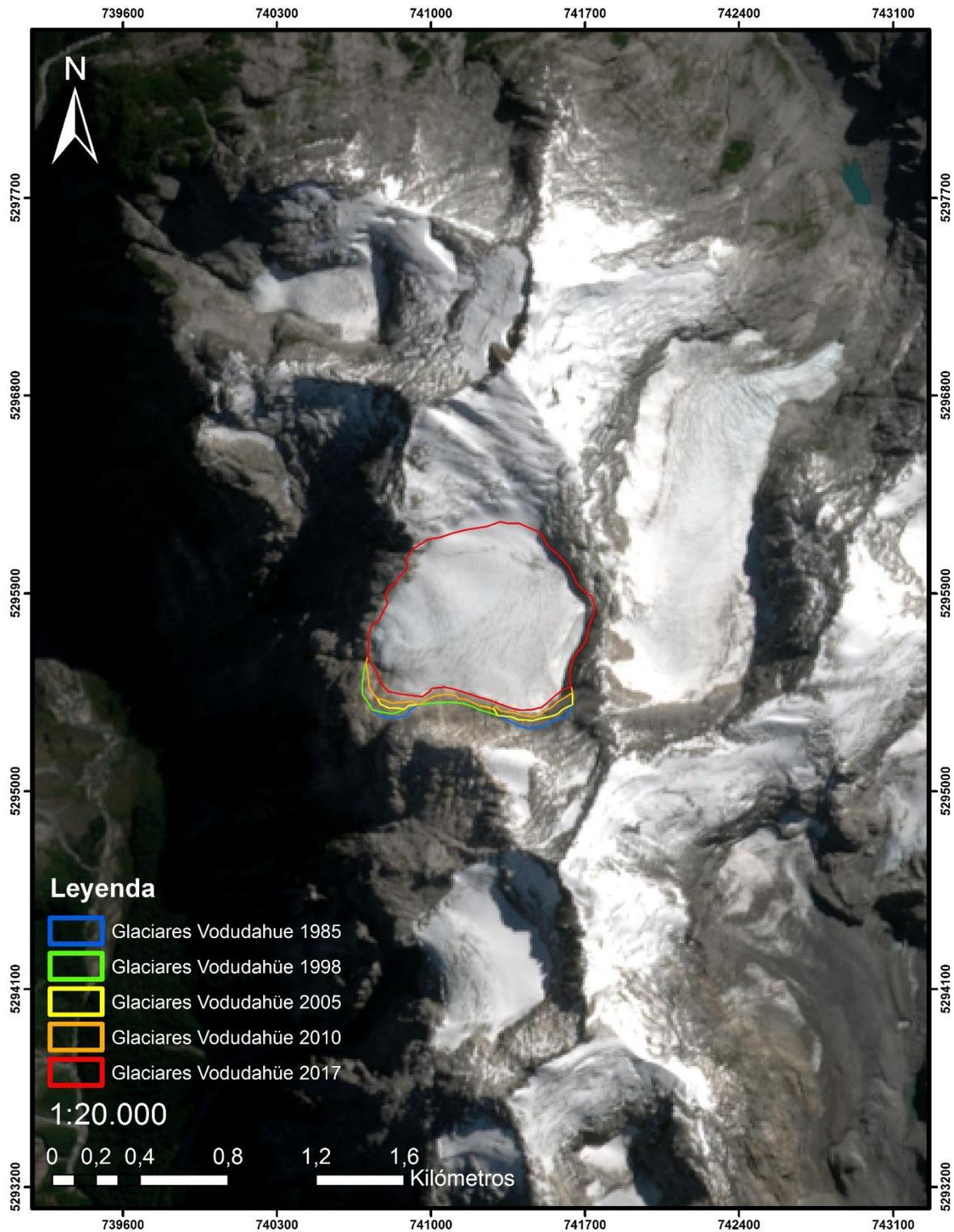


Figura N°23: Variación Areal Superficial Glaciar Vodudahüe N°5, (1985-2017). Fuente: elaboración propia en base a fotointerpretación mediante imágenes satelitales Landsat obtenidas de USG.

La Tabla N°7 muestra que el Glaciar Vodudahüe N°5 poseía una superficie de 0,73 km² el año 1985 y para el año 2017 tenía una superficie de 0,64 km² (Figura N°24). Las variaciones superficiales más importantes ocurren entre los años 1985 y 1998, entre los años 1998 y 2005, y entre 2010-2017, retrocediendo aproximadamente 0,02 km², 0,02 km² y 0,04 km² respectivamente, mientras que, por otro lado, entre los años 2005 y 2010 se registró un retroceso aproximadamente 0,01 km² respectivamente. Finalmente, el porcentaje acumulado de retroceso glaciar corresponde a -11,72% para el período 1985-2017. Por su parte, las tasas de variación anual corresponden a -0,001 km² por año para el intervalo 1985-1998, -0,003 km² por año para 1998-2005, -0,002 km² por año para 2005-2010 y -0,006 km² por año para 2010-2017. Finalmente, la Tasa de Variación del período 1985-2017 equivale a -0,00125 km² por año. En la Figura N°24 se observa una clara tendencia general a la reducción de la superficie del Glaciar Vodudahüe N°5 en el período 1985-2017.

Tabla N°7: Variación superficial y Tasas de Variación Glaciar Vodudahüe N°5 1985-2017

Año	Superficie (km ²)	Variación (km ²)	Variación (km ²) Acumulada	% Variación	% Acumulado	Tasa Variación Areal Anual km ² a ⁻¹	Tasa Variación Areal Anual Período 1985-2017 km ² a ⁻¹
1985	0,73	0	0	0	0	0	-0,00125
1998	0,71	-0,02	-0,02	-2,07	-2,07	-0,001	
2005	0,69	-0,02	-0,04	-2,76	-4,83	-0,003	
2010	0,68	-0,01	-0,04	-1,38	-6,21	-0,002	
2017	0,64	-0,04	-0,09	-5,52	-11,72	-0,006	

Fuente: Proyecto Fondecyt 1151087.

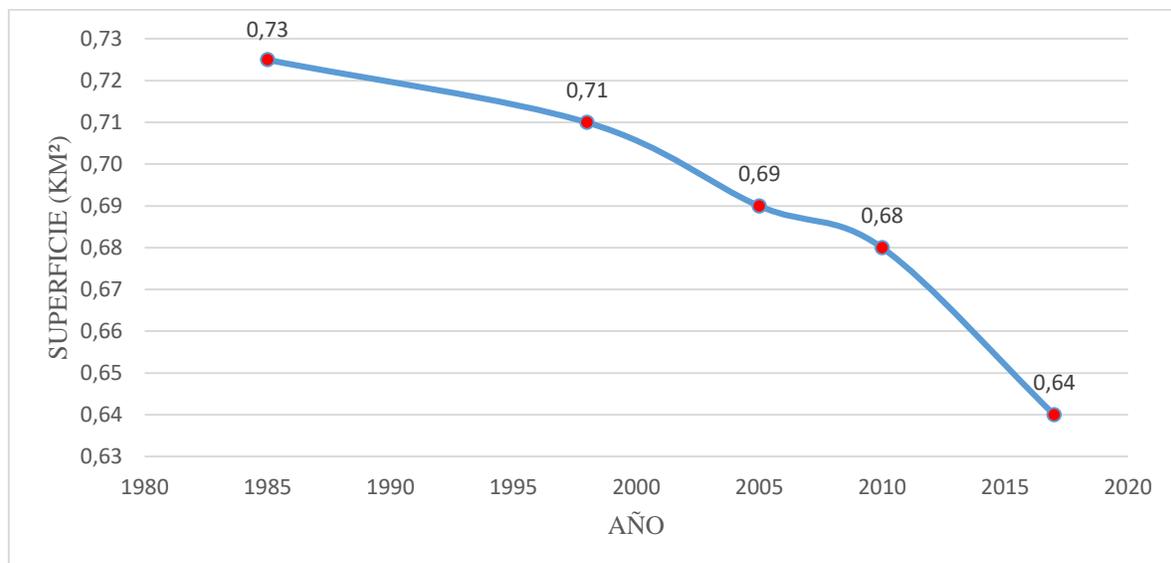


Figura N°24: Gráfico de Variación Superficial de Glaciar Vodudahüe N°5 1985-2017. Fuente: Proyecto Fondecyt 1151087.

6.3.7 Glaciar Vodudahüe N°6

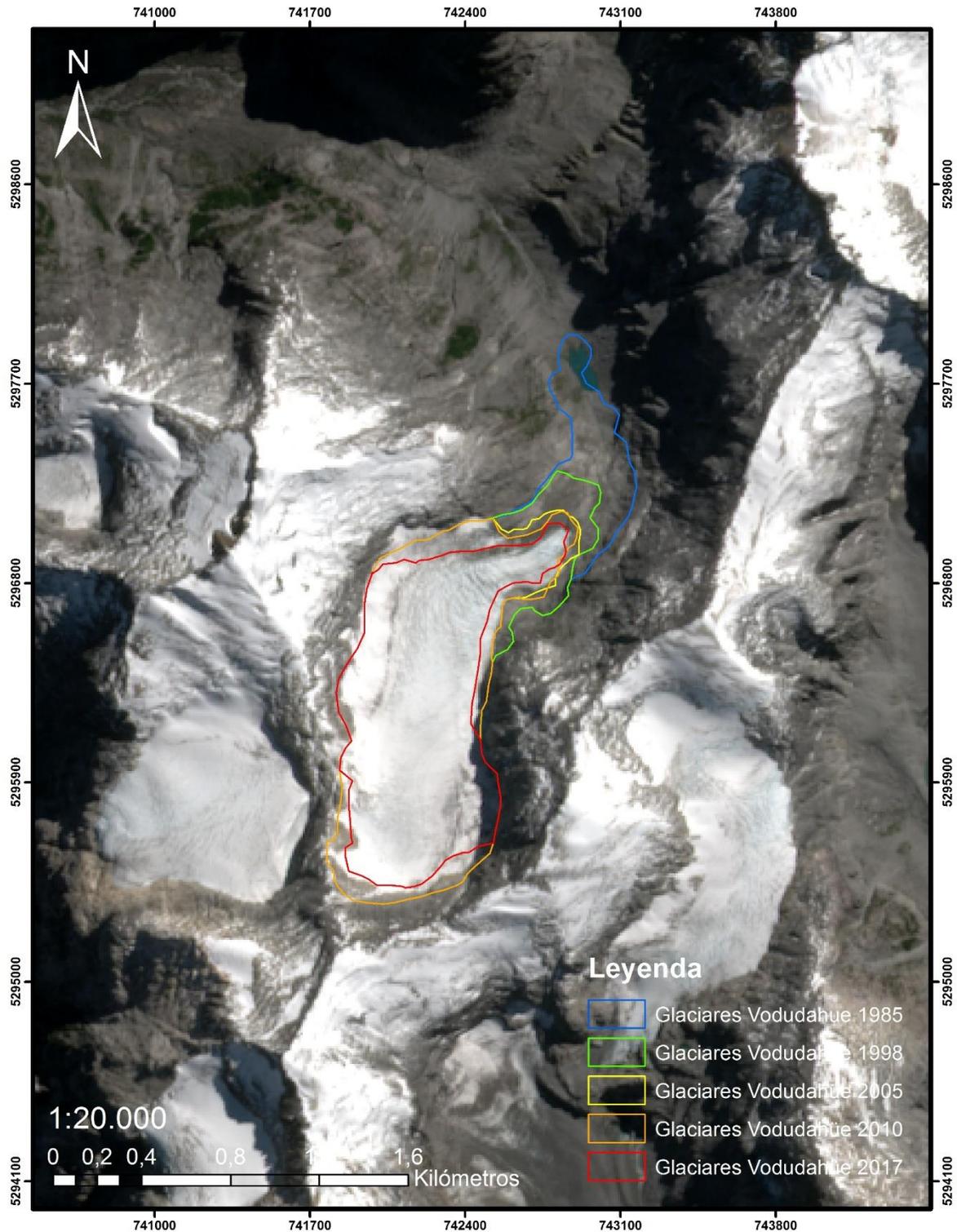


Figura N°25: Variación Areal Superficial Glaciar Vodudahüe N°6, (1985-2017) Fuente: elaboración propia en base a fotointerpretación mediante imágenes satelitales Landsat obtenidas de USG.

La Tabla N°8 muestra que el Glaciar Vodudahüe N°6 tenía una superficie de 1,45 km² el año 1985 y para el año 2017 tenía una superficie de 0,92 km² (Figura N°26). Las variaciones superficiales más importantes ocurren entre los años 1985 y 1998, entre los años 1998 y 2005, y entre 2010-2017, retrocediendo aproximadamente 0,19 km², 0,11 km² y 0,22 km² respectivamente, mientras que, por otro lado, entre los años 2005 y 2010 se registró un retroceso aproximadamente 0,01 km². Finalmente, el porcentaje acumulado de retroceso glaciar corresponde a -36,55% para el período 1985-2017. Por su parte, las tasas de variación anual corresponden a -0,01 km² por año para el intervalo 1985-1998, -0,02 km² por año para 1998-2005, -0,002 km² por año para 2005-2010 y -0,03 km² por año para 2010-2017. Finalmente, la Tasa de Variación del período 1985-2017 equivale a -0,006875 km² por año. En la Figura N°26 se observa una clara tendencia general a la reducción de la superficie del Glaciar Vodudahüe N°6 en el período 1985-2017.

Tabla N°8: Variación superficial y Tasas de Variación Glaciar Vodudahüe N°6 1985-2017

Año	Superficie (km ²)	Variación (km ²)	Variación (km ²) Acumulada	% Variación	% Acumulado	Tasa Variación Areal Anual km ² a ⁻¹	Tasa Variación Areal anual Período 1985-2017 km ² a ⁻¹
1985	1,45	0	0	0	0	0	-0,006875
1998	1,26	-0,19	-0,19	-13,10	-13,10	-0,01	
2005	1,15	-0,11	-0,30	-7,59	-20,69	-0,02	
2010	1,14	-0,01	-0,31	-0,69	-21,38	-0,002	
2017	0,92	-0,22	-0,53	-15,17	-36,55	-0,03	

Fuente: Proyecto Fondecyt 1151087.

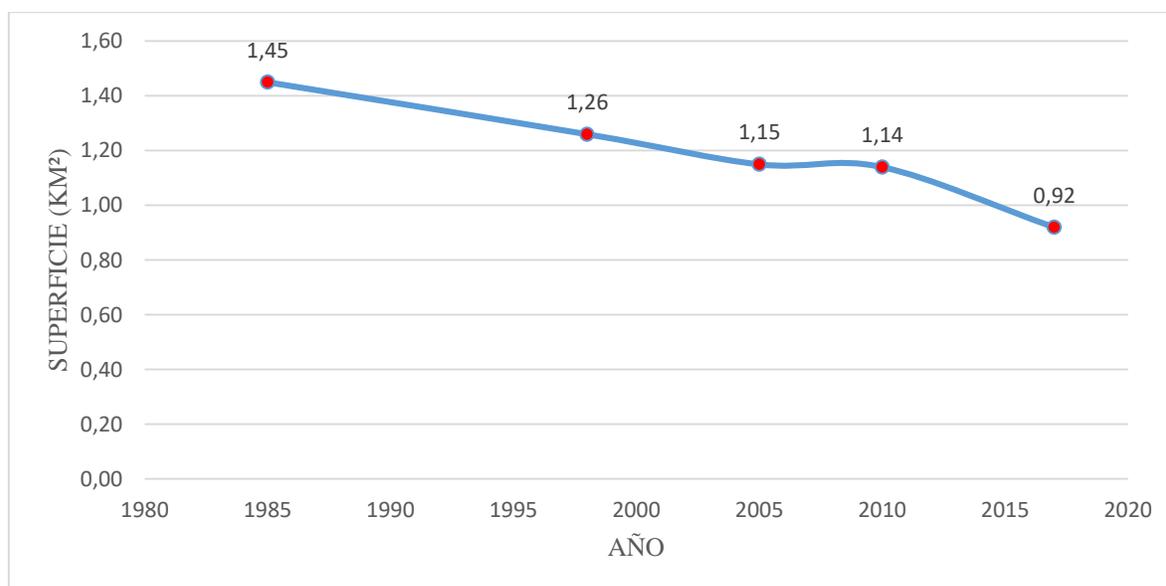


Figura N°26: Gráfico de Variación Superficial de Glaciar Vodudahüe N°6 1985-2017- Fuente: Proyecto Fondecyt 1151087.

6.3.8 Glaciar Vodudahüe N°7

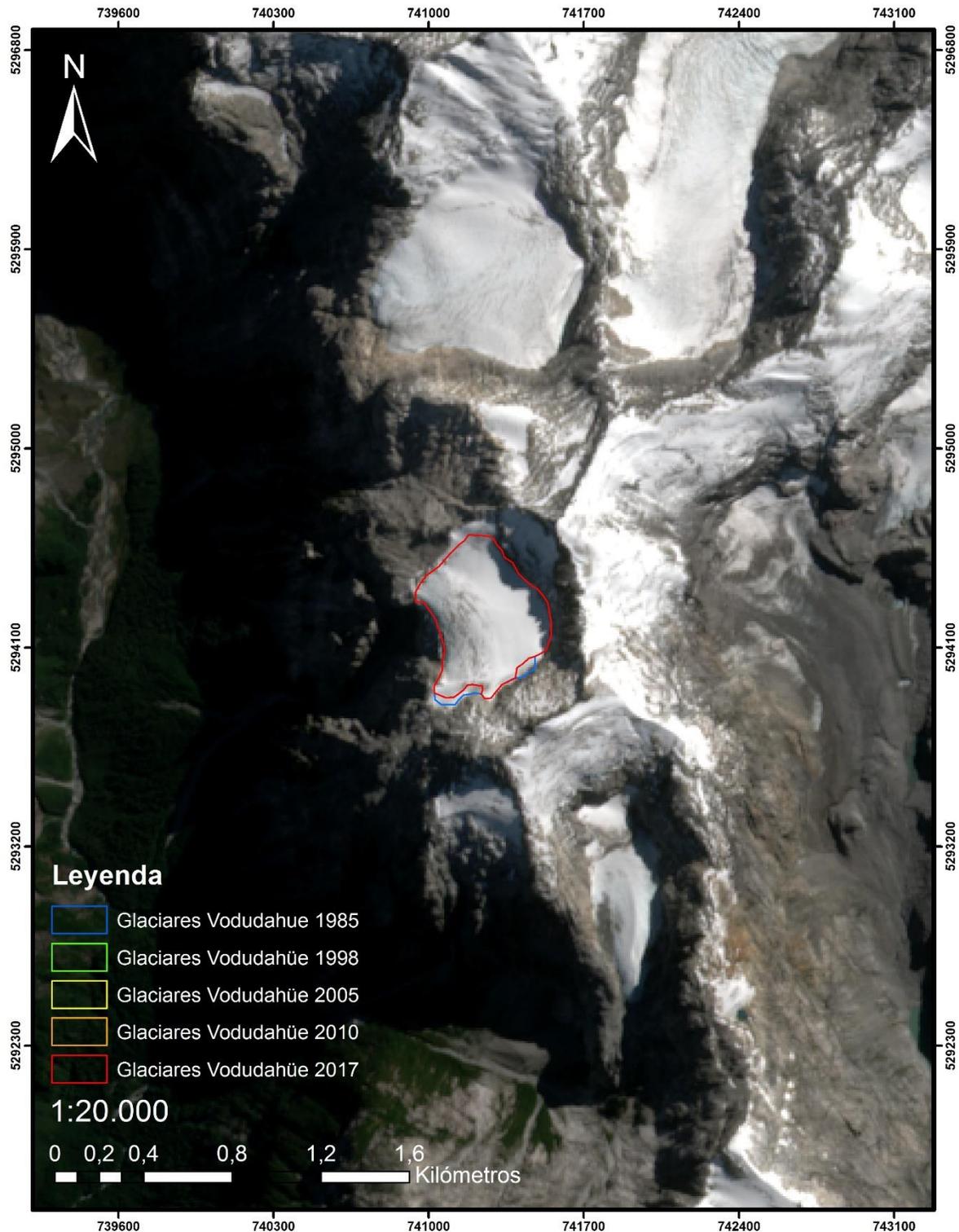


Figura N°27: Variación Areal Superficial Glaciar Vodudahüe N°7, (1985-2017). Fuente: elaboración propia en base a fointerpretación mediante imágenes satelitales Landsat obtenidas de USG.

La Tabla N°9 evidencia que el Glaciar Vodudahüe N°7 tenía una superficie de 0,30 km² el año 1985 y para el año 2017 poseía una superficie de 0,29 km² (Figura N°28). Las variaciones superficiales más importantes ocurren entre los años 1985 y 1998 y entre los años 2010-2017, retrocediendo aproximadamente 0,001 km² y 0,01 km² respectivamente, mientras que, por otro lado, entre los años 1998 y 2005 y entre 2005 y 2010 se registraron retrocesos de 0 km² en ambos casos. Finalmente, el porcentaje acumulado de retroceso glaciar corresponde a -3,65% para el período 1985-2017. Por su parte, las tasas de variación anual corresponden a -0,0001 km² por año para el intervalo 1985-1998, 0 km² por año para 1998-2005, 0 km² por año para 2005-2010 y -0,001 km² por año para 2010-2017. Finalmente, la Tasa de Variación del período 1985-2017 equivale a -0,0003125 km² por año. En la Figura N°28 se observa una clara tendencia general a la reducción de la superficie del Glaciar Vodudahüe N°7 en el período 1985-2017.

Tabla N°9: Variación superficial y Tasas de Variación Glaciar Vodudahüe N°7 1985-2017

Año	Superficie (km ²)	Variación (km ²)	Variación (km ²) Acumulada	% Variación	% Acumulado	Tasa Variación Areal Anual km ² a ⁻¹	Tasa Variación Areal Anual Período 1985-2017 km ² a ⁻¹
1985	0,30	0	0	0	0	0	-0,0003125
1998	0,3	-0,001	-0,001	-0,33	-0,33	-0,0001	
2005	0,3	0	0,00	0	-0,33	0	
2010	0,3	0	0,00	0	-0,33	0	
2017	0,29	-0,01	-0,01	-3,32	-3,65	-0,001	

Fuente: Proyecto Fondecyt 1151087.

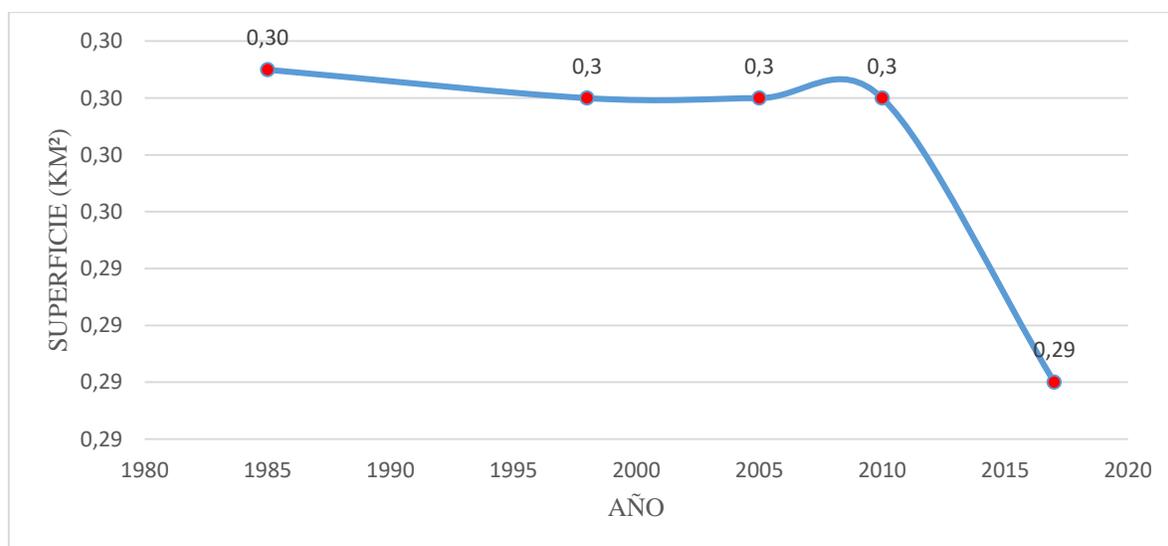


Figura N°28: Gráfico de Variación Superficial de Glaciar Vodudahüe N°7 1985-2017. Fuente: Proyecto Fondecyt 1151087.

6.3.9 Glaciar Vodudahüe N°8

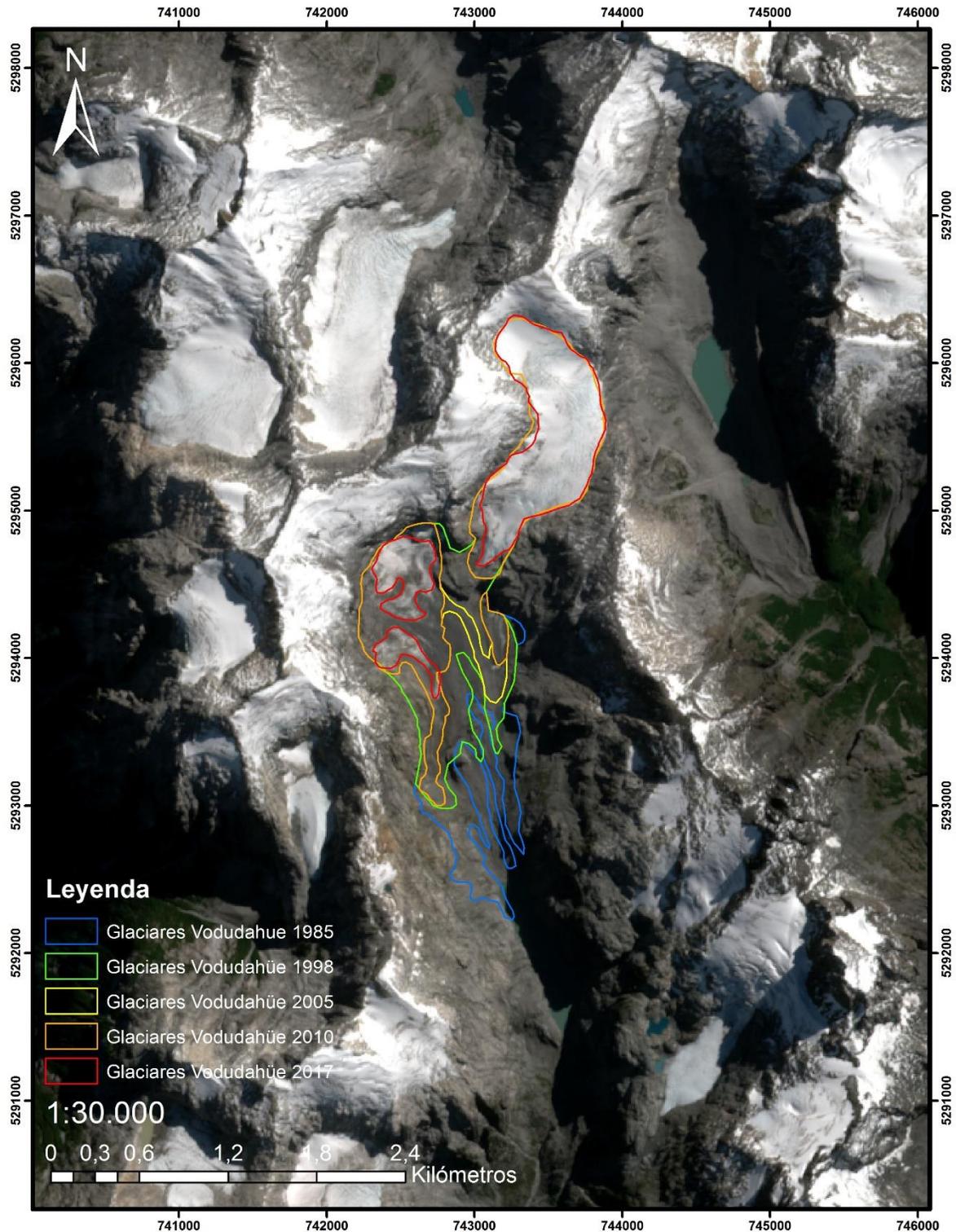


Figura N°29: Variación Areal Superficial Glaciar Vodudahüe N°8, (1985-2017). Fuente: elaboración propia en base a fointerpretación mediante imágenes satelitales Landsat obtenidas de USG.

En la Tabla N°10 se aprecia que el Glaciar Vodudahüe N°8 tenía una superficie de 2,35 km² el año 1985 y para el año 2017 presentaba una superficie de 0,99 km² (Figura N°30). Las variaciones superficiales más importantes ocurren entre los años 1985 y 1998, 1998 y 2005, y entre los años 2010-2017, retrocediendo aproximadamente 0,37 km², 0,45 km² y 0,46 km² respectivamente, mientras que, por otro lado, entre los años 2005 y 2010 se registró un retroceso de 0 km² aproximadamente. Finalmente, el porcentaje acumulado de retroceso glaciar corresponde a -57,87% para el período 1985-2017. Por su parte, las tasas de variación anual corresponden a -0,0285 km² por año para el intervalo 1985-1998, -0,06 km² por año para 1998-2005, -0,02 km² por año para 2005-2010 y -0,066 km² por año para 2010-2017. Finalmente, la Tasa de Variación del período 1985-2017 equivale a -0,014375 km² por año. En la Figura N°30 se observa una clara tendencia general a la reducción de la superficie del Glaciar Vodudahüe N°8 para el período 1985-2017.

Tabla N°10: Variación superficial y Tasas de Variación Glaciar Vodudahüe N°8 1985-2017

Año	Superficie (km ²)	Variación (km ²)	Variación (km ²) Acumulada	% Variación	% Acumulado	Tasa Variación Areal Anual km ² a ⁻¹	Tasa Variación Areal Anual Período 1985-2017 km ² a ⁻¹
1985	2,35	0	0	0	0	0	-0,014375
1998	1,98	-0,37	-0,37	-15,74	-15,74	-0,0285	
2005	1,53	-0,45	-0,82	-19,15	-34,89	-0,06	
2010	1,45	-0,08	-0,90	-3,40	-38,30	-0,02	
2017	0,99	-0,46	-1,36	-19,57	-57,87	-0,066	

Fuente: Proyecto Fondecyt 1151087.

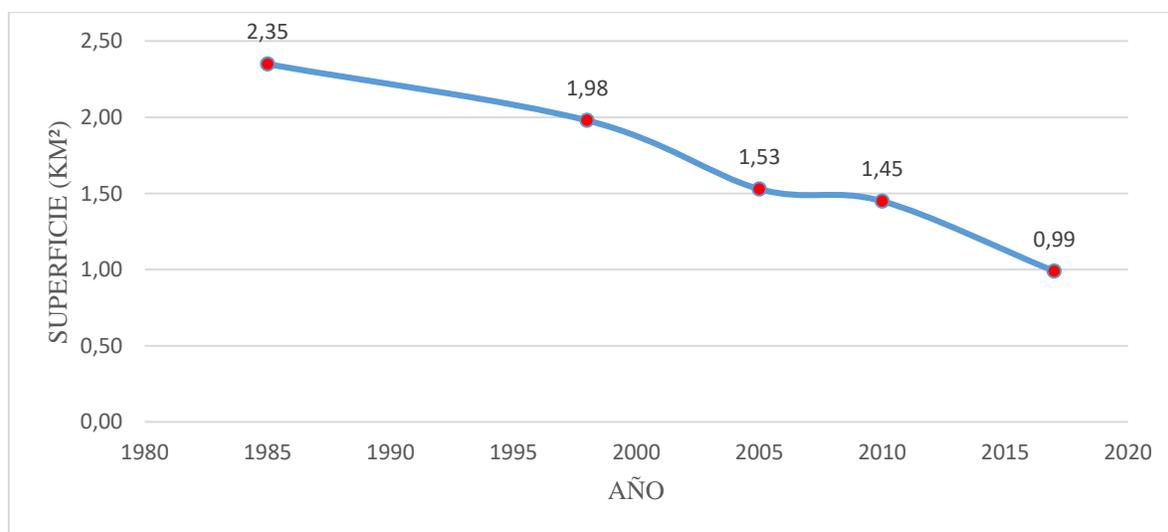


Figura N°30: Gráfico de Variación Superficial de Glaciar Vodudahüe N°8 1985-2017. Fuente: Proyecto Fondecyt 1151087.

6.3.10 Glaciar Vodudahüe N°9

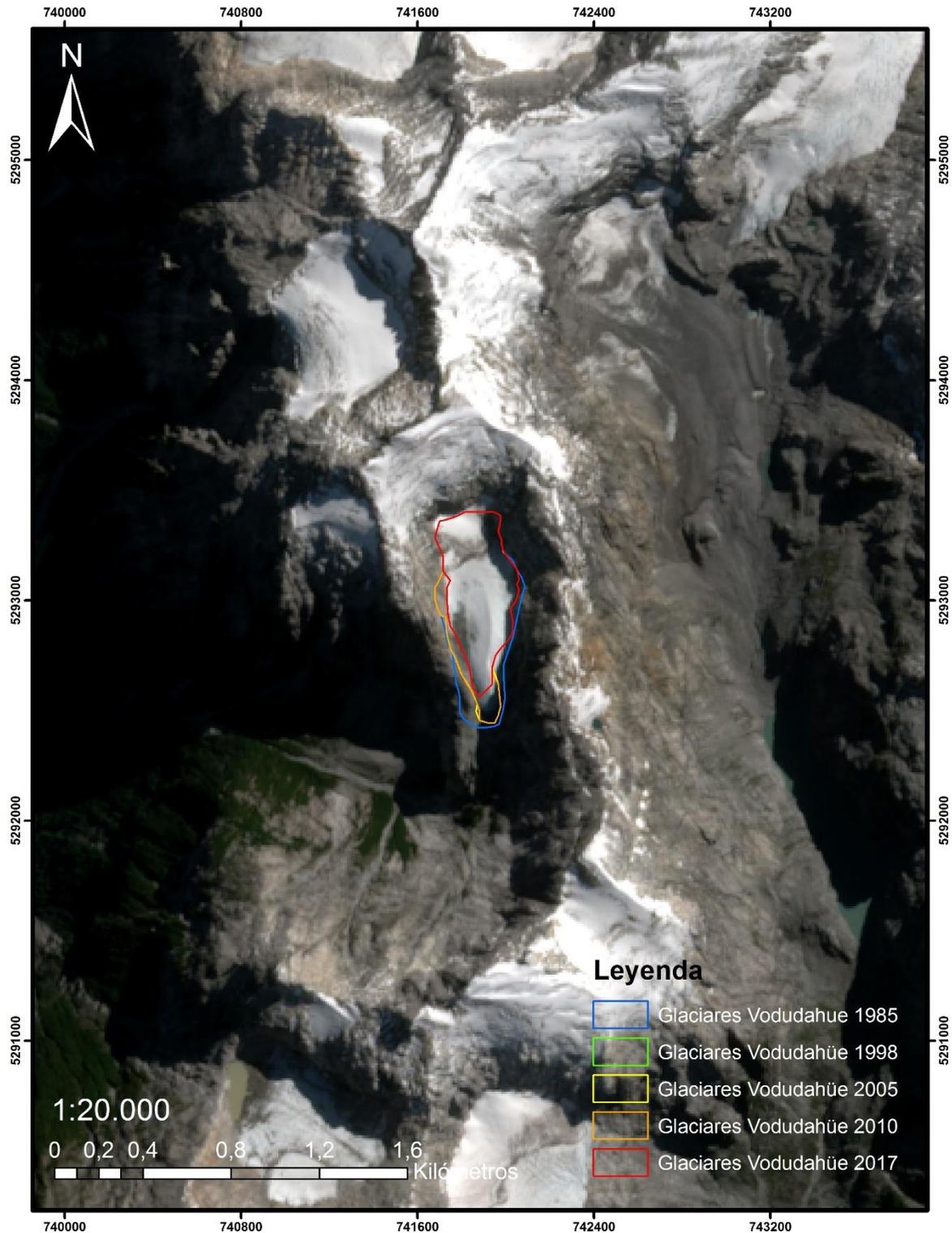


Figura N°31: Variación Areal Superficial Glaciar Vodudahüe N°9, (1985-2017). Fuente: elaboración propia en base a fotointerpretación mediante imágenes satelitales Landsat obtenidas de USG.

La Tabla N°11 evidencia que el Glaciar Vodudahüe N°9 tenía una superficie de 0,27 km² el año 1985 y para el año 2017 presentaba una superficie de 0,2 km² (Figura N°32). Las variaciones superficiales más importantes ocurren entre los años 1998 y 2005, y entre los años 2010-2017, retrocediendo aproximadamente 0,03 km² en ambos casos, mientras que, por otro lado, entre los años 1985 y 1998 y entre 2005 y 2010 se registraron retrocesos de 0,003 km² y 0,01 km² respectivamente. Finalmente, el porcentaje acumulado de retroceso glaciar corresponde a -26,74% para el período 1985-2017. Por su parte, las tasas de variación anual corresponden a -0,0002 km² por año para el intervalo 1985-1998, -0,004 km² por año para 1998-2005, -0,002 km² por año para 2005-2010 y -0,004 km² por año para 2010-2017. Finalmente, la Tasa de Variación del período 1985-2017 equivale a -0,0009375 km² por año. En la Figura N°32 se observa una clara tendencia general a la reducción de la superficie del Glaciar Vodudahüe N°9 para el período 1985-2017.

Tabla N°11: Variación superficial y Tasas de Variación Glaciar Vodudahüe N°9 1985-2017

Año	Superficie (km ²)	Variación (km ²)	Variación (km ²) Acumulada	% Variación	% Acumulado	Tasa Variación Areal Anual km ² a ⁻¹	Tasa Variación Areal Anual Período 1985-2017 km ² a ⁻¹
1985	0,27	0	0	0	0	0	-0,0009375
1998	0,27	-0,003	-0,003	-1,10	-1,10	-0,0002	
2005	0,24	-0,03	-0,03	-10,99	-12,09	-0,004	
2010	0,23	-0,01	-0,04	-3,66	-15,75	-0,002	
2017	0,2	-0,03	-0,07	-10,99	-26,74	-0,004	

Fuente: Proyecto Fondecyt 1151087.

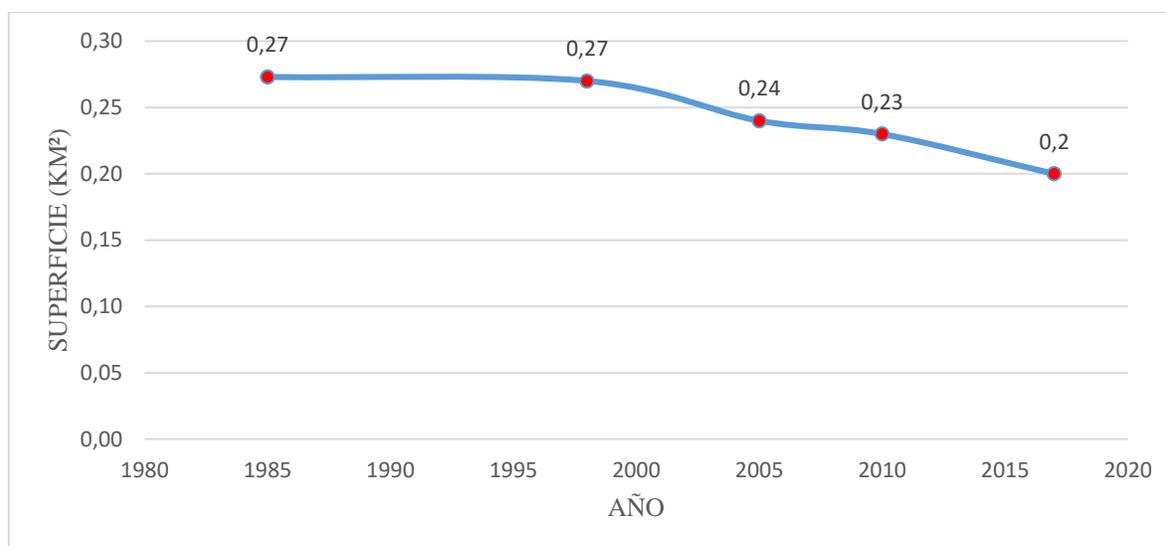


Figura N°32: Gráfico de Variación Superficial de Glaciar Vodudahüe N°9 1985-2017. Fuente: Proyecto Fondecyt 1151087.

6.3.11 Glaciar Vodudahüe N°10

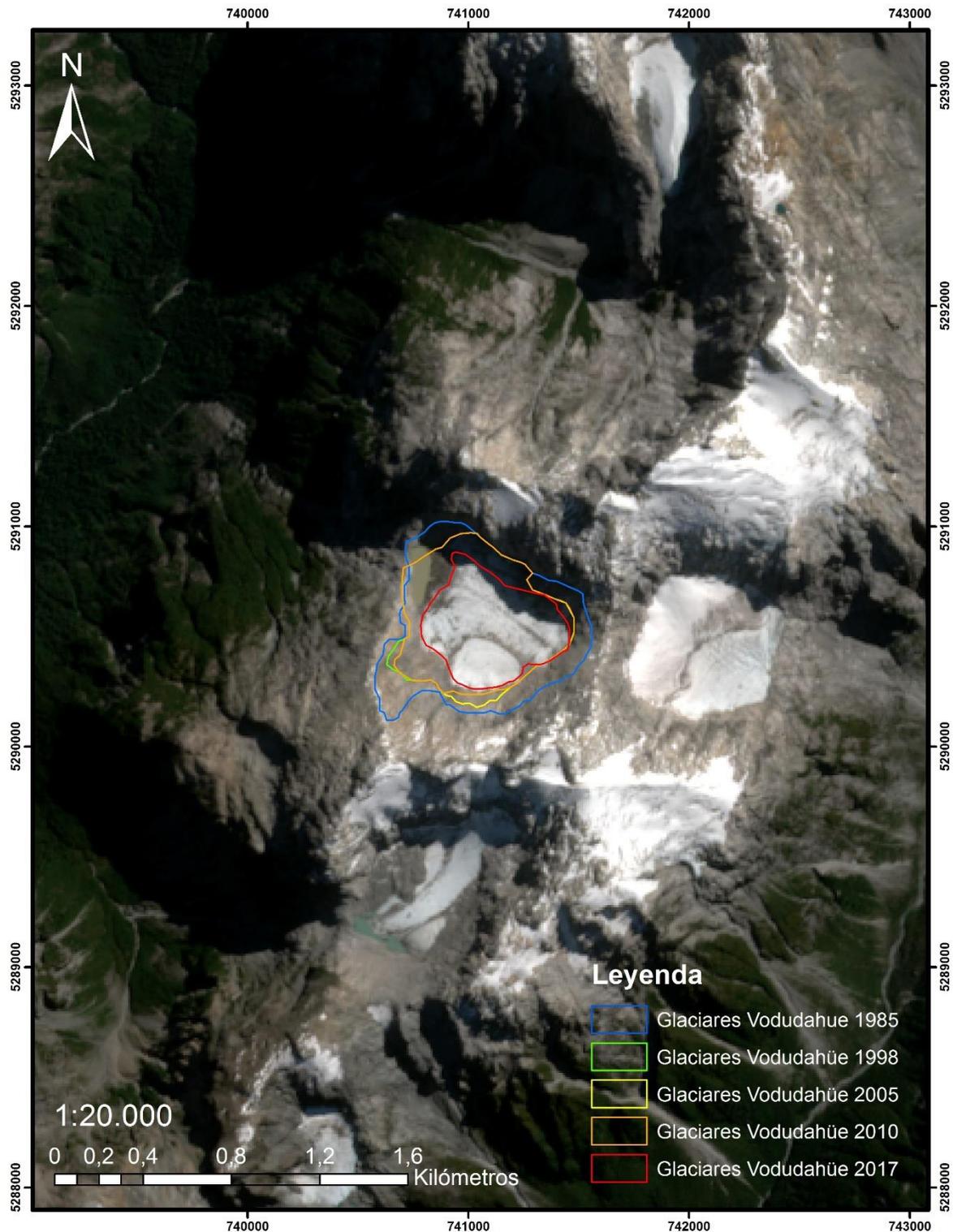


Figura N°33: Variación Areal Superficial Glaciar Vodudahüe N°10, (1985-2017). Fuente: elaboración propia en base a fotointerpretación mediante imágenes satelitales Landsat obtenidas de USG.

En la Tabla N°12 se muestra que el Glaciar Vodudahüe N°10 tenía una superficie de 0,58 km² el año 1985 y para el año 2017 presentaba una superficie de 0,26 km² (Figura N°34). Las variaciones superficiales más importantes ocurren entre los años 1985 y 1998, y entre los años 2010-2017, retrocediendo aproximadamente 0,152 km² y 0,15 km² respectivamente, mientras que, por otro lado, entre los años 1998 y 2005 y entre 2005 y 2010 se registraron retrocesos de 0,01 km² en ambos casos. Finalmente, el porcentaje acumulado de retroceso glaciar corresponde a -55,33% para el período 1985-2017. Por su parte, las tasas de variación anual corresponden a -0,0117 km² por año para el intervalo 1985-1998, -0,001 km² por año para 1998-2005, -0,002 km² por año para 2005-2010 y -0,021 km² por año para 2010-2017. Finalmente, la Tasa de Variación del período 1985-2017 equivale a -0,0046875 km² por año. En la Figura N°34 se observa una clara tendencia general a la reducción de la superficie del Glaciar Vodudahüe N°10 para el período 1985-2017.

Tabla N°12: Variación superficial y Tasas de Variación Glaciar Vodudahüe N°10 1985-2017

Año	Superficie (km ²)	Variación (km ²)	Variación (km ²) Acumulada	% Variación	% Acumulado	Tasa Variación Areal Anual km ² a ⁻¹	Tasa Variación Areal Anual Período 1985-2017 km ² a ⁻¹
1985	0,58	0	0	0	0	0	-0,0046875
1998	0,43	-0,152	-0,15	-26,12	-26,12	-0,0117	
2005	0,42	-0,01	-0,16	-1,72	-27,84	-0,001	
2010	0,41	-0,01	-0,17	-1,72	-29,55	-0,002	
2017	0,26	-0,15	-0,32	-25,77	-55,33	-0,021	

Fuente: Proyecto Fondecyt 1151087.

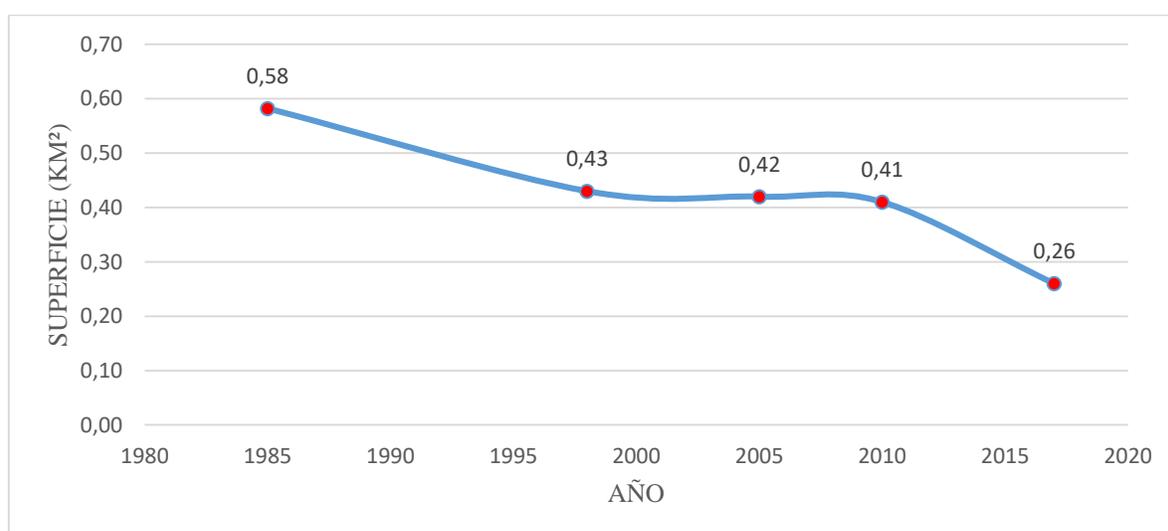


Figura N°34: Gráfico de Variación Superficial de Glaciar Vodudahüe N°10 1985-2017. Fuente: Proyecto Fondecyt 1151087.

6.3.12 Glaciar Vodudahüe N°11

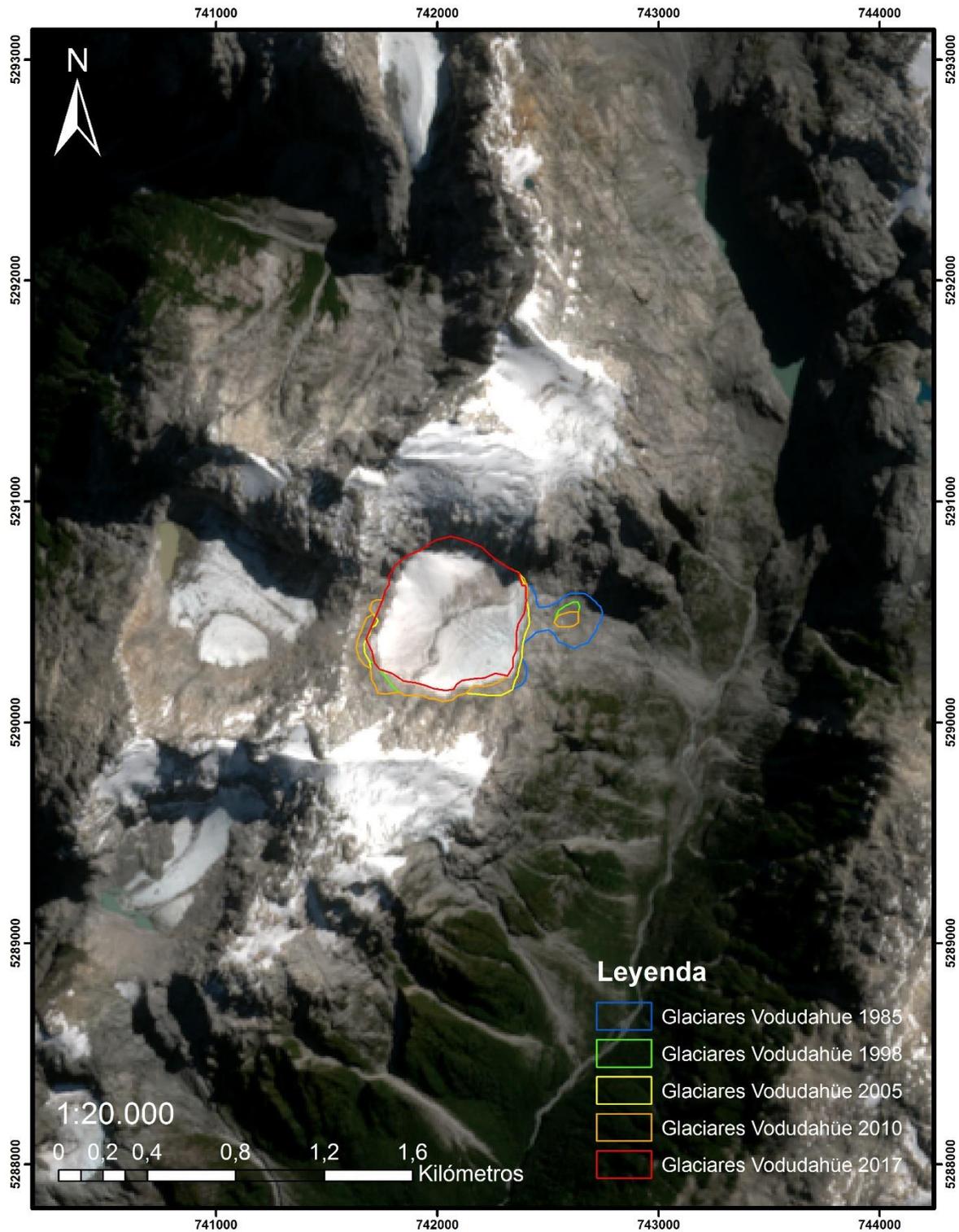


Figura N°35: Variación Areal Superficial Glaciar Vodudahüe N°11, (1985-2017). Fuente: elaboración propia en base a fotointerpretación mediante imágenes satelitales Landsat obtenidas de USG.

En la Tabla N°13 se evidencia que el Glaciar Vodudahüe N°11 el año 1985 tenía una superficie de 0,48 km² y para el año 2017 mostraba una superficie de 0,37 km² (Figura N°36). Las variaciones superficiales más importantes ocurren entre los años 1985 y 1998, y entre los años 2010-2017, retrocediendo aproximadamente 0,054 km² y 0,05 km² respectivamente, mientras que, por otro lado, entre los años 1998 y 2005 y entre 2005 y 2010 se registraron retrocesos de 0 km² y 0,01 km² respectivamente. Finalmente, el porcentaje acumulado de retroceso glaciar corresponde a -23,55% para el período 1985-2017. Por su parte, las tasas de variación anual corresponden a -0,0042 km² por año para el intervalo 1985-1998, 0 km² por año para 1998-2005, -0,002 km² por año para 2005-2010 y -0,007 km² por año para 2010-2017. Finalmente, la Tasa de Variación del período 1985-2017 equivale a -0,0015625 km² por año. En la Figura N°36 se observa una clara tendencia general a la reducción de la superficie del Glaciar Vodudahüe N°11 para el período 1985-2017.

Tabla N°13: Variación superficial y Tasas de Variación Glaciar Vodudahüe N°11 1985-2017

Año	Superficie (km ²)	Variación (km ²)	Variación (km ²) Acumulada	% Variación	% Acumulado	Tasa Variación Areal Anual km ² a ⁻¹	Tasa Variación Areal Anual Período 1985-2017 km ² a ⁻¹
1985	0,48	0	0	0	0	0	-0,0015625
1998	0,43	-0,054	-0,05	-11,16	-11,16	-0,0042	
2005	0,43	0	-0,05	0	-11,16	0	
2010	0,42	-0,01	-0,06	-2,07	-13,22	-0,002	
2017	0,37	-0,05	-0,11	-10,33	-23,55	-0,007	

Fuente: Proyecto Fondecyt 1151087.

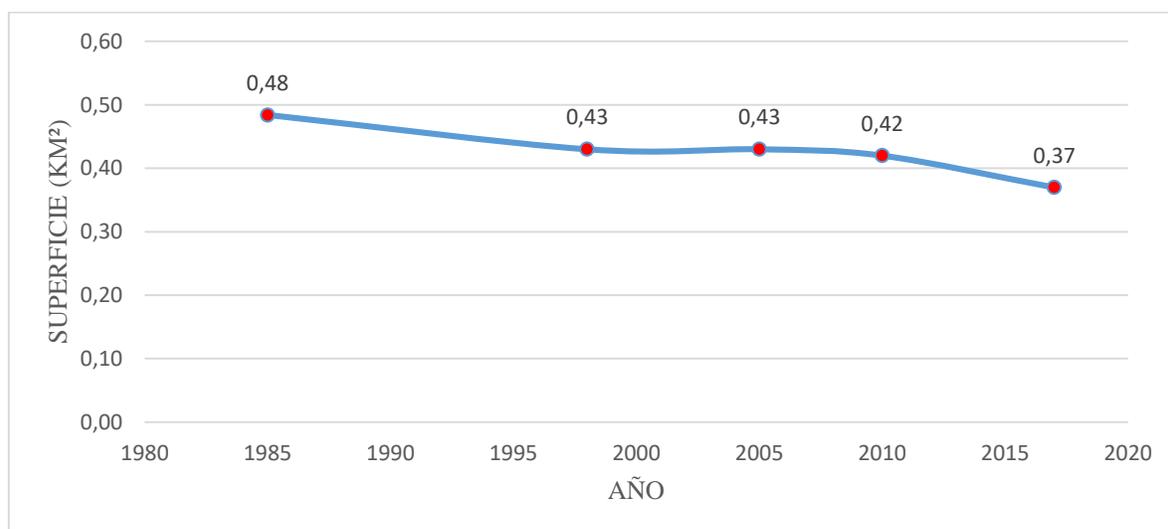


Figura N°36: Gráfico de Variación Superficial de Glaciar Vodudahüe N°11 1985-2017. Fuente: Proyecto Fondecyt 1151087.

6.3.13 Glaciar Vodudahüe N°12

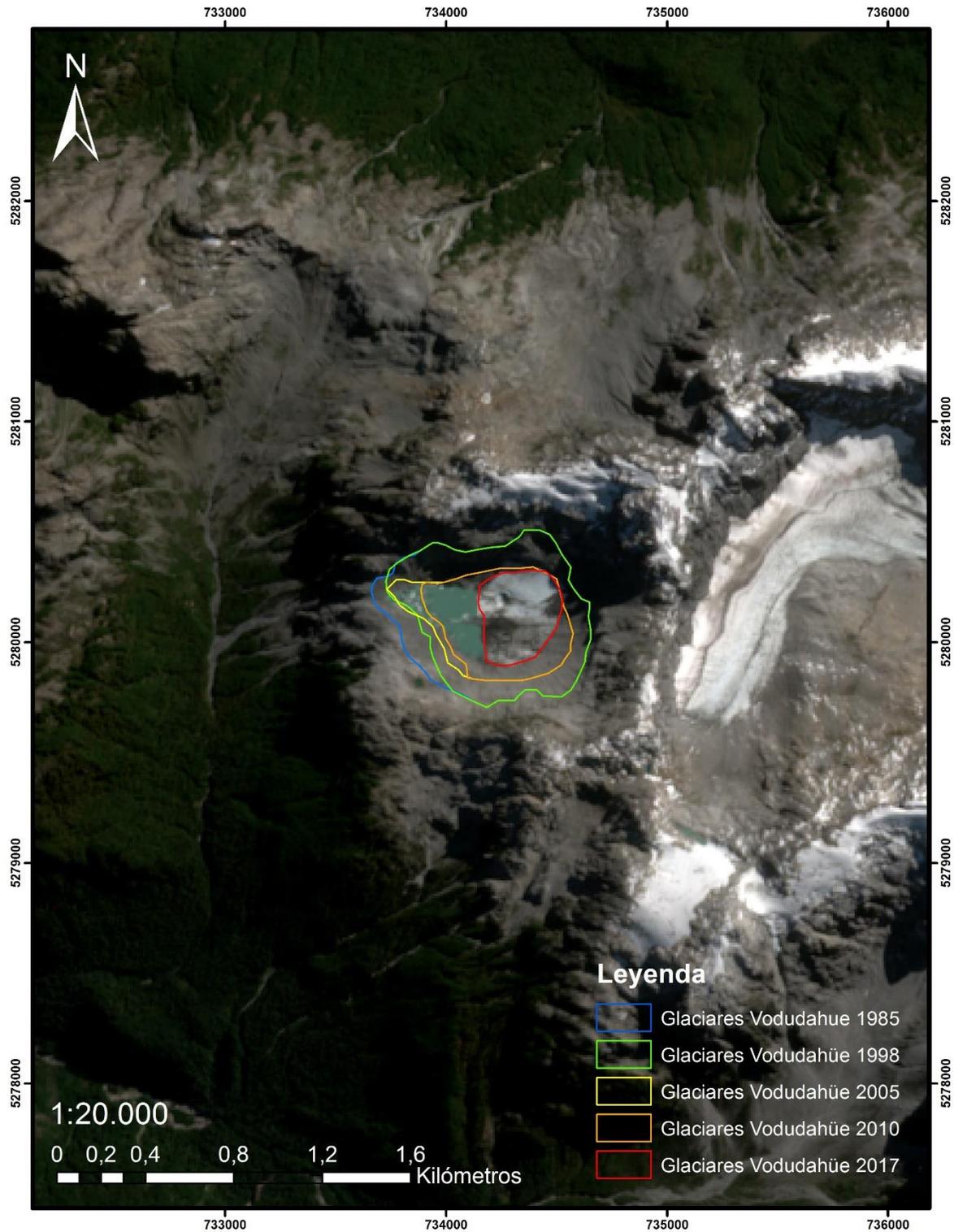


Figura N°37: Variación Areal Superficial Glaciar Vodudahüe N°12, (1985-2017). Fuente: elaboración propia en base a fotointerpretación mediante imágenes satelitales Landsat obtenidas de USG.

En la Tabla N°14 se muestra que el Glaciar Vodudahüe N°12 el año 1985 tenía una superficie de 0,55 km² y para el año 2017 presenta una superficie de 0,13 km² (Figura N°38). Las variaciones superficiales más importantes ocurren entre los años 1998 y 2005, y entre los años 2010-2017, retrocediendo aproximadamente 0,21 km² y 0,14 km² respectivamente, mientras que, por otro lado, entre los años 1985 y 1998 y entre 2005 y 2010 se registraron retrocesos de 0,04 km² y 0,03 km² respectivamente. Finalmente, el porcentaje acumulado de retroceso glaciar corresponde a -76,53% para el período 1985-2017. Por su parte, las tasas de variación anual corresponden a -0,0034 km² por año para el intervalo 1985-1998, -0,030 km² por año para 1998-2005, -0,006 km² por año para 2005-2010 y -0,020 km² por año para 2010-2017. Finalmente, la Tasa de Variación del período 1985-2017 equivale a -0,004375 km² por año. En la Figura N°38 se observa una clara tendencia general a la reducción de la superficie del Glaciar Vodudahüe N°12 para el período 1985-2017, con fuertes caídas en los intervalos 1998-2005 y 2010-2017.

Tabla N°14: Variación superficial y Tasas de Variación Glaciar Vodudahüe N°12 1985-2017

Año	Superficie (km ²)	Variación (km ²)	Variación (km ²) Acumulada	% Variación	% Acumulado	Tasa Variación Areal Anual km ² a ⁻¹	Tasa Variación Areal Anual Período 1985-2017 km ² a ⁻¹
1985	0,55	0	0	0	0	0	-0,004375
1998	0,51	-0,04	-0,04	-7,94	-7,94	-0,0034	
2005	0,3	-0,21	-0,25	-37,91	-45,85	-0,030	
2010	0,27	-0,03	-0,28	-5,42	-51,26	-0,006	
2017	0,13	-0,14	-0,42	-25,27	-76,53	-0,020	

Fuente: Proyecto Fondecyt 1151087.

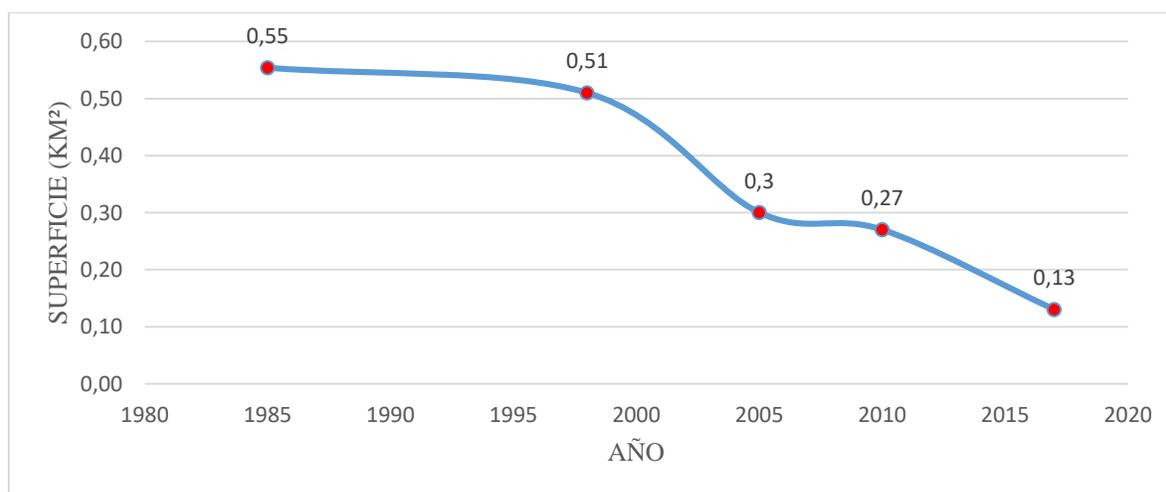


Figura N°38: Gráfico de Variación Superficial de Glaciar Vodudahüe N°12 1985-2017. Fuente: Proyecto Fondecyt 1151087.

6.3.14 Glaciar Vodudahüe N°13

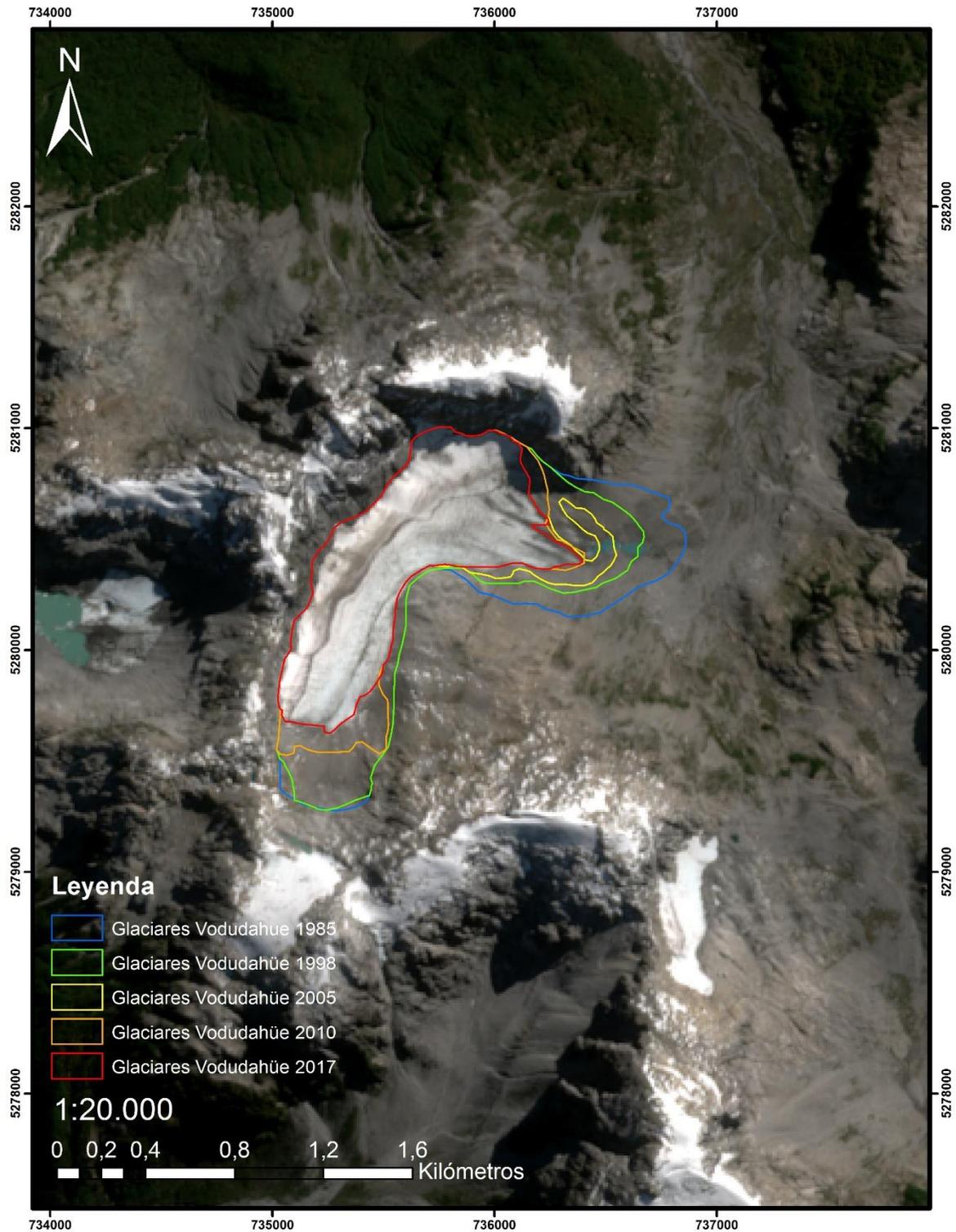


Figura N°39: Variación Areal Superficial Glaciar Vodudahüe N°13, (1985-2017). Fuente: elaboración propia en base a fotointerpretación mediante imágenes satelitales Landsat obtenidas de USG.

En la Tabla N°15 se pone en evidencia que el Glaciar Vodudahüe N°13 el año 1985 poseía una superficie de 1,35 km² y para el año 2017 tenía una superficie de 0,76 km² (Figura N°40). Las variaciones superficiales más importantes ocurren entre los años 1985 y 1998, y entre los años 1998-2005, retrocediendo aproximadamente 0,18 km² y 0,24 km² respectivamente, mientras que, por otro lado, entre los años 2005 y 2010 y entre 2010 y 2017 se registraron retrocesos de 0,06 km² y 0,11 km² respectivamente. Finalmente, el porcentaje acumulado de retroceso glaciar corresponde a -43,66% para el período 1985-2017. Por su parte, las tasas de variación anual corresponden a -0,0138 km² por año para el intervalo 1985-1998, -0,034 km² por año para 1998-2005, -0,012 km² por año para 2005-2010 y -0,016 km² por año para 2010-2017. Finalmente, la Tasa de Variación del período 1985-2017 equivale a -0,0034375 km² por año. En la Figura N°40 se observa una clara tendencia general a la reducción de la superficie del Glaciar Vodudahüe N°13 para el período 1985-2017. (Tabla N°15).

Tabla N°15: Variación superficial y Tasas de Variación Glaciar Vodudahüe N°13 1985-2017

Año	Superficie (km ²)	Variación (km ²)	Variación (km ²) Acumulada	% Variación	% Acumulado	Tasa Variación Areal Anual km ² a ⁻¹	Tasa Variación Areal Anual Período 1985-2017 km ² a ⁻¹
1985	1,35	0	0	0	0	0	-0,0034375
1998	1,17	-0,18	-0,18	-13,27	-13,27	-0,0138	
2005	0,93	-0,24	-0,42	-17,79	-31,06	-0,034	
2010	0,87	-0,06	-0,48	-4,45	-35,51	-0,012	
2017	0,76	-0,11	-0,59	-8,15	-43,66	-0,016	

Fuente: Proyecto Fondecyt 1151087.

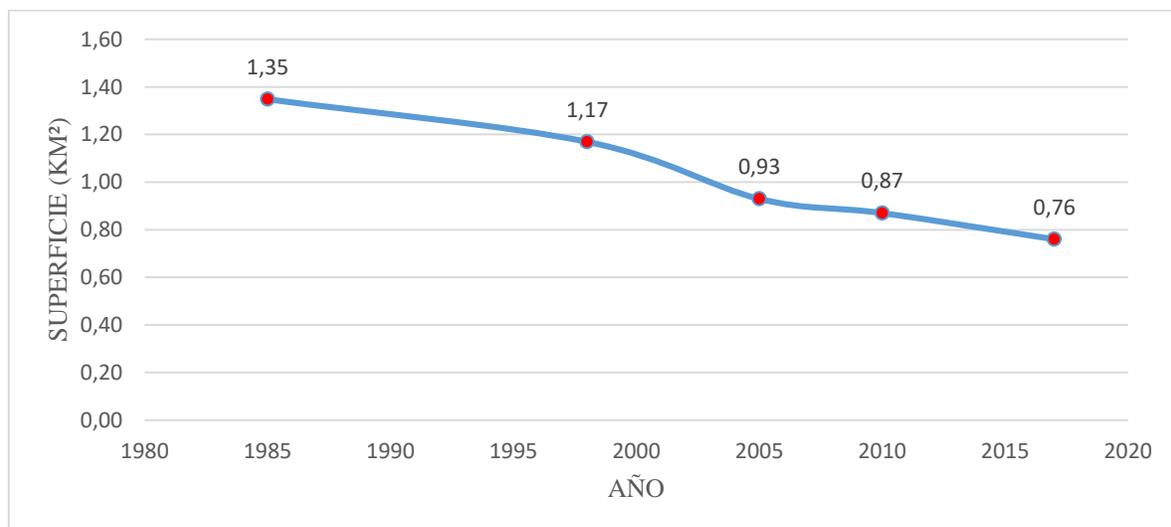


Figura N°40: Gráfico de Variación Superficial de Glaciar Vodudahüe N°13 1985-2017.

Fuente: Proyecto Fondecyt 1151087.

6.3.15 Glaciar Vodudahüe N°14

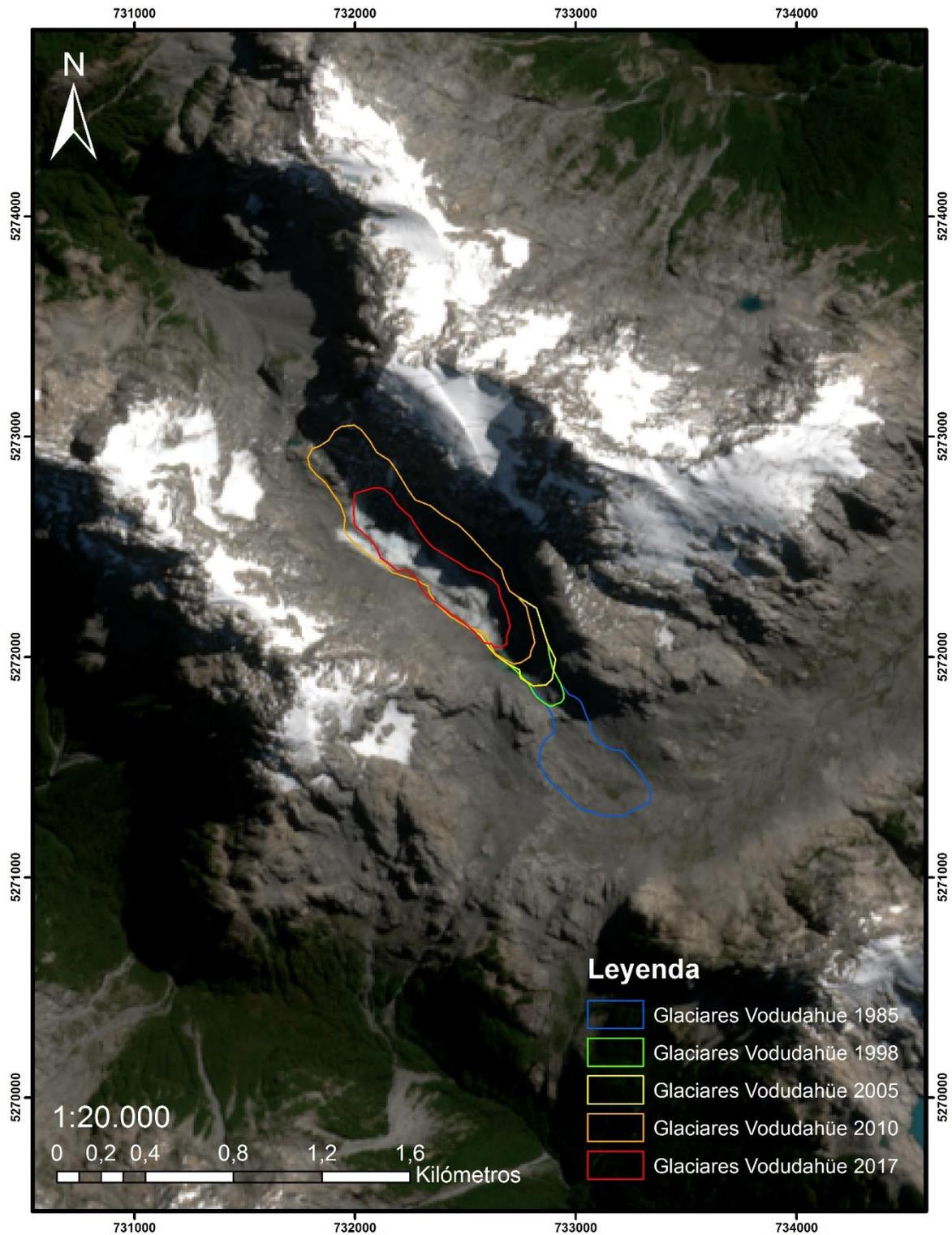


Figura N°41: Variación Areal Superficial Glaciar Vodudahüe N°14, (1985-2017). Fuente: elaboración propia en base a fotointerpretación mediante imágenes satelitales Landsat obtenidas de USG.

En la Tabla N°16 se evidencia que el Glaciar Vodudahüe N°14 el año 1985 tenía una superficie de 0,59 km² y para el año 2017 mostraba una superficie de 0,18 km² (Figura N°42). Las variaciones superficiales más importantes ocurren entre los años 1985 y 1998, y entre los años 2010-2017, retrocediendo aproximadamente 0,15 km² y 0,21 km² respectivamente, mientras que, por otro lado, entre los años 1998 y 2005 y entre 2005 y 2010 se registraron retrocesos de 0,02 km² y 0,03 km² respectivamente. Finalmente, el porcentaje acumulado de retroceso glaciar corresponde a -69,49% para el período 1985-2017. Por su parte, las tasas de variación anual corresponden a -0,0115 km² por año para el intervalo 1985-1998, -0,003 km² por año para 1998-2005, -0,006 km² por año para 2005-2010 y -0,030 km² por año para 2010-2017. Finalmente, la Tasa de Variación del período 1985-2017 equivale a -0,0065625 km² por año. En la Figura N°42 se observa una clara tendencia general a la reducción de la superficie del Glaciar Vodudahüe a lo largo del período 1985-2017, con un fuerte descenso en el intervalo 2010-2017 (Tabla N°16).

Tabla N°16: Variación superficial y Tasas de Variación Glaciar Vodudahüe N°14 1985-2017

Año	Superficie (km ²)	Variación (km ²)	Variación (km ²) Acumulada	% Variación	% Acumulado	Tasa Variación Areal Anual km ² a ⁻¹	Tasa Variación Areal Anual Período 1985-2017 km ² a ⁻¹
1985	0,59	0	0	0	0	0	-0,0065625
1998	0,44	-0,15	-0,15	-25,42	-25,42	-0,0115	
2005	0,42	0	-0,17	-3,39	-28,81	-0,003	
2010	0,39	-0,03	-0,20	-5,08	-33,90	-0,006	
2017	0,18	-0,21	-0,41	-35,59	-69,49	-0,030	

Fuente: Proyecto Fondecyt 1151087.

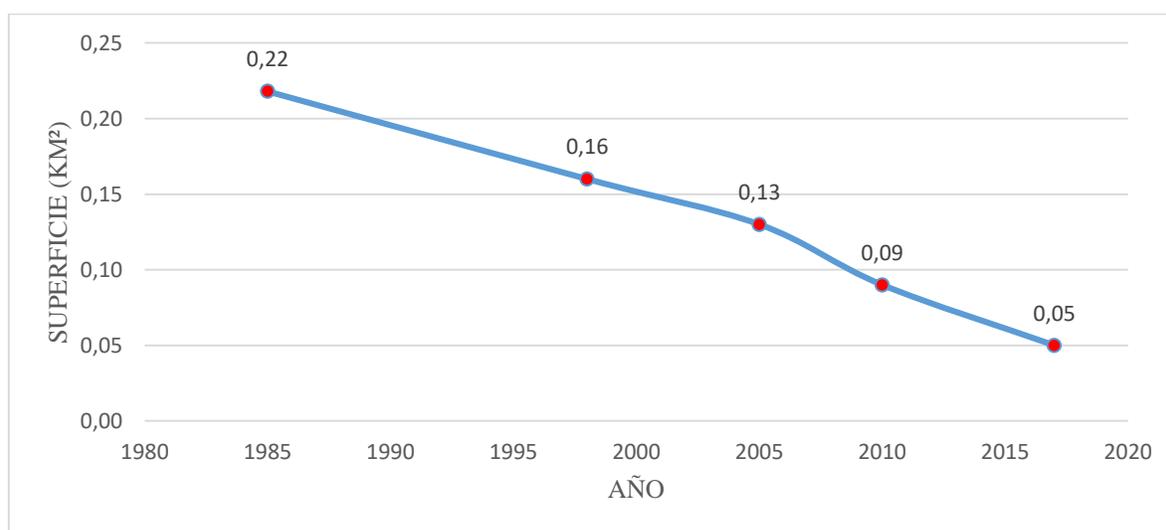


Figura N°42: Gráfico de Variación Superficial de Glaciar Vodudahüe N°14 1985-2017. Fuente: Proyecto Fondecyt 1151087.

6.3.16 Glaciar Vodudahüe N°15

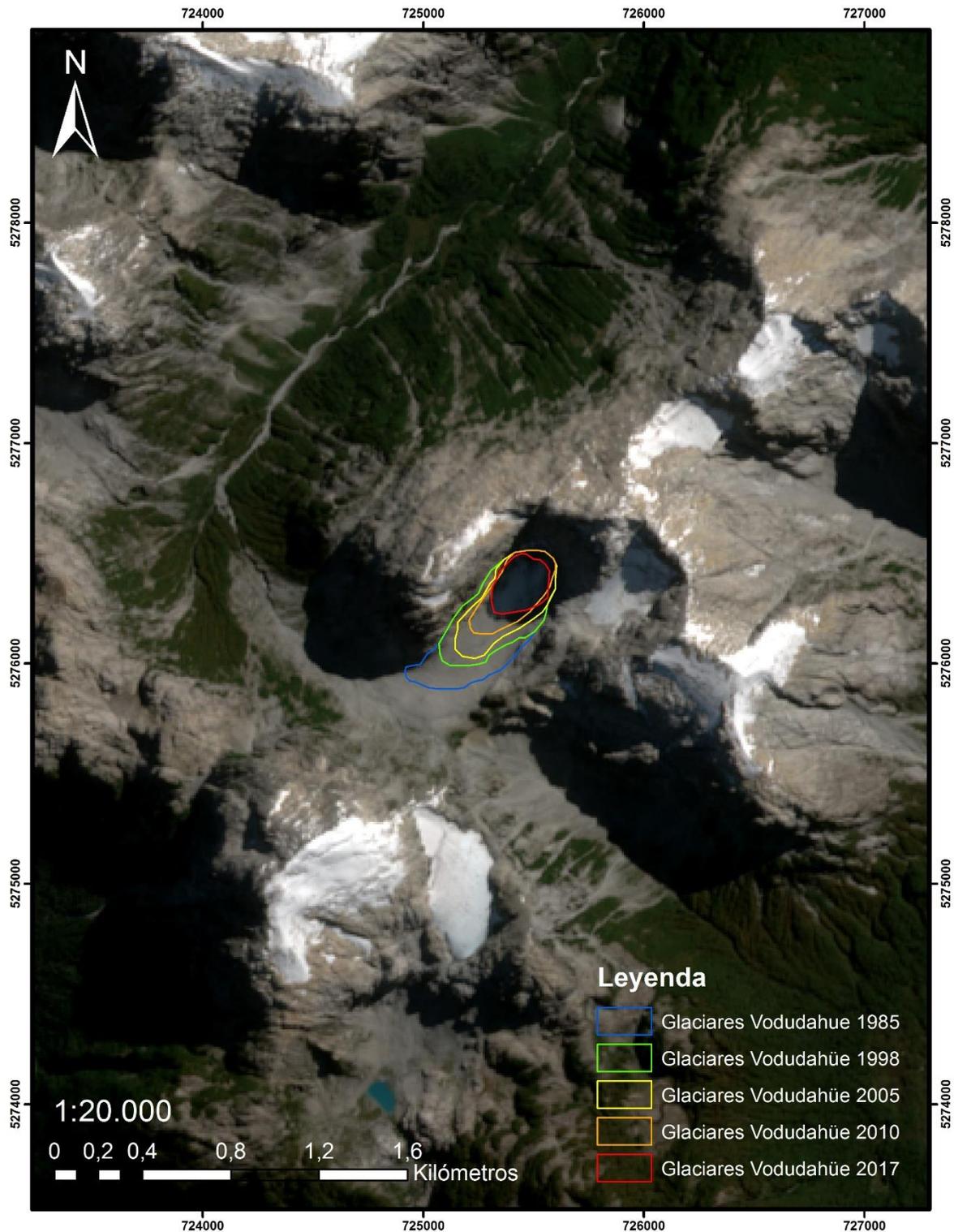


Figura N°43: Variación Areal Superficial Glaciar Vodudahüe N°15, (1985-2017). Fuente: elaboración propia en base a fotointerpretación mediante imágenes satelitales Landsat obtenidas de USG.

La Tabla N°17 muestra que el Glaciar Vodudahüe N°15 el año 1985 tenía una superficie de 0,22 km² y para el año 2017 presenta una superficie de 0,05 km² (Figura N°44). Las variaciones superficiales importantes ocurren entre los años 1985 y 1998, entre los años 2005 y 2010, y entre los años 2010-2017, retrocediendo aproximadamente 0,06 km², 0,04 km² y 0,04 km² respectivamente, mientras que, por otro lado, el intervalo comprendido entre los años 1998 y 2005 se registró un retroceso de 0,03 km². Finalmente, el porcentaje acumulado de retroceso glaciar corresponde a -77,06% para el período 1985-2017. Por su parte, las tasas de variación anual corresponden a -0,0045 km² por año para el intervalo 1985-1998, -0,004 km² por año para 1998-2005, -0,008 km² por año para 2005-2010 y -0,006 km² por año para 2010-2017. Finalmente, la Tasa de Variación del período 1985-2017 equivale a -0,00125 km² por año. En la Figura N°44 se observa una clara tendencia general a la reducción de la superficie del Glaciar Vodudahüe N°15 para el período 1985-2017 (Tabla N°17).

Tabla N°17: Variación superficial y Tasas de Variación Glaciar Vodudahüe N°15 1985-2017

Año	Superficie (km ²)	Variación (km ²)	Variación (km ²) Acumulada	% Variación	% Acumulado	Tasa Variación Areal Anual km ² a ⁻¹	Tasa Variación Areal Anual Período 1985-2017 km ² a ⁻¹
1985	0,22	0	0	0	0	0	-0,00125
1998	0,16	-0,06	-0,06	-26,61	-26,61	-0,0045	
2005	0,13	-0,03	-0,09	-13,76	-40,37	-0,004	
2010	0,09	-0,04	-0,13	-18,35	-58,72	-0,008	
2017	0,05	-0,04	-0,17	-18,35	-77,06	-0,006	

Fuente: Proyecto Fondecyt 1151087.

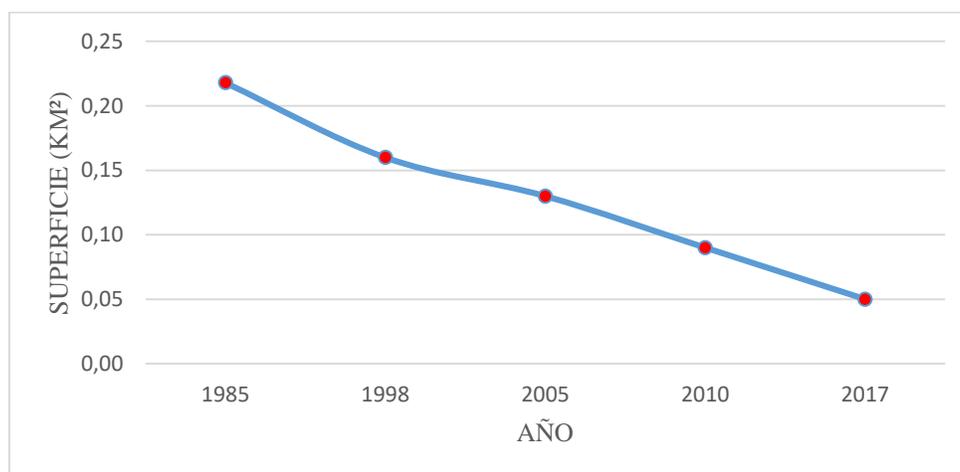


Figura N°44: Gráfico de Variación Superficial de Glaciar Vodudahüe N°15 1985-2017. Fuente: Proyecto Fondecyt 1151087.

6.3.17 Glaciar Vodudahüe N°16

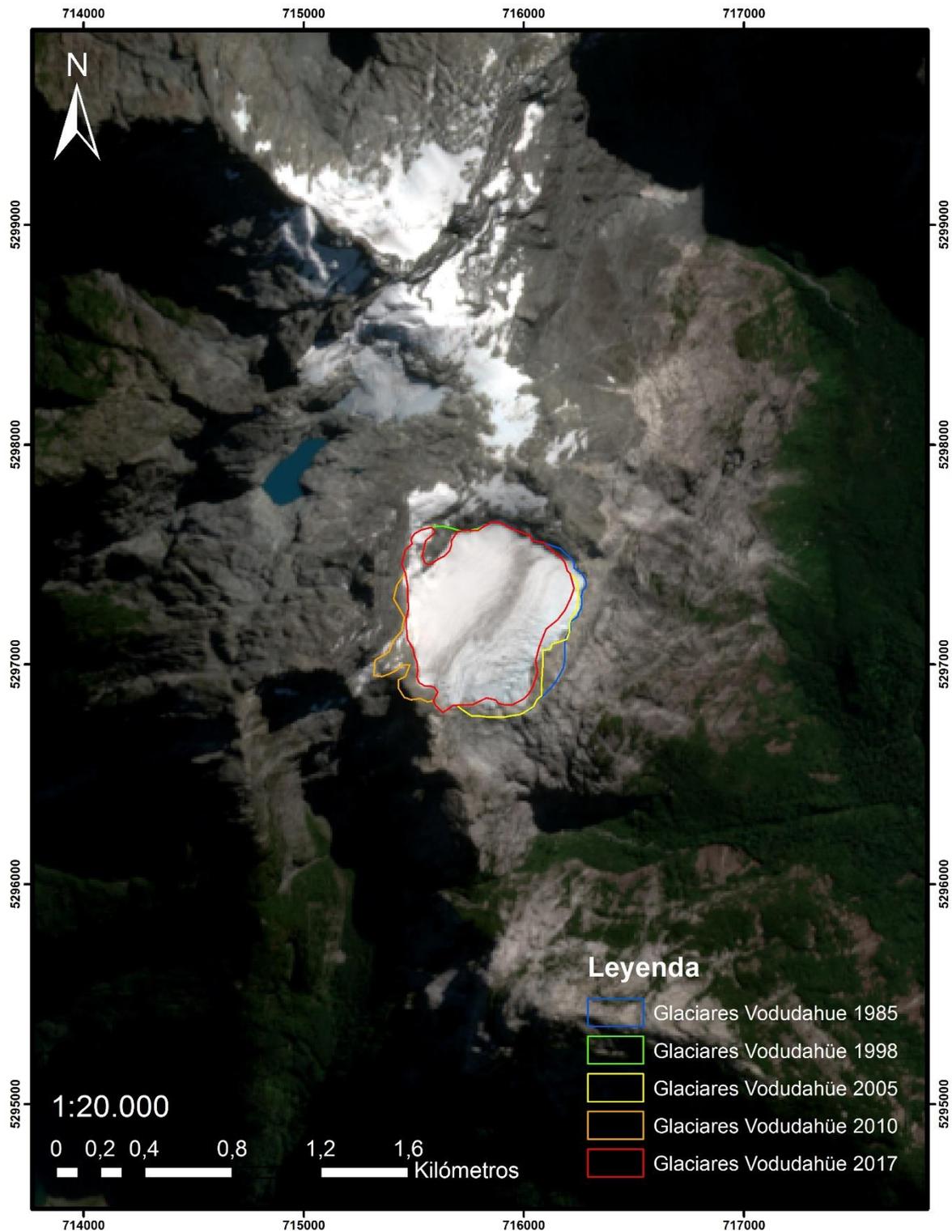


Figura N°45: Variación Areal Superficial Glaciar Vodudahüe N°16, (1985-2017). Fuente: elaboración propia en base a fotointerpretación mediante imágenes satelitales Landsat obtenidas de USG.

En la Tabla N°18 se pone en evidencia que el Glaciar Vodudahüe N°16 el año 1985 poseía una superficie de 0,62 km² y para el año 2017 tenía una superficie de 0,48 km² (Figura N°46). Las variaciones superficiales más importantes ocurren entre los años 1985 y 1998, entre los años 2005 y 2010, y entre los años 2010-2017, retrocediendo aproximadamente 0,03 km², 0,04 km² y 0,05 km² respectivamente, mientras que, por otro lado, entre los años 1998 y 2005 se registró un retroceso de 0,02 km² aproximadamente. Finalmente, el porcentaje acumulado de retroceso glaciar corresponde a -22,33% para el período 1985-2017. Por su parte, las tasas de variación anual corresponden a -0,0022 km² por año para el intervalo 1985-1998, -0,003 km² por año para 1998-2005, -0,008 km² por año para 2005-2010 y -0,007 km² por año para 2010-2017. Finalmente, la Tasa de Variación del período 1985-2017 equivale a -0,0015625 km² por año. En la Figura N°46 se observa una clara tendencia general a la reducción de la superficie del Glaciar Vodudahüe N°16 para el período 1985-2017. (Tabla N°18).

Tabla N°18: Variación superficial y Tasas de Variación Glaciar Vodudahüe N°16 1985-2017

Año	Superficie (km ²)	Variación (km ²)	Variación (km ²) Acumulada	% Variación	% Acumulado	Tasa Variación Areal Anual km ² a ⁻¹	Tasa Variación Areal Período 1985-2017 km ² a ⁻¹
1985	0,62	0	0	0	0	0	-0,0015625
1998	0,59	-0,03	-0,03	-4,53	-4,53	-0,0022	
2005	0,57	-0,02	-0,05	-3,24	-7,77	-0,003	
2010	0,53	-0,04	-0,09	-6,47	-14,24	-0,008	
2017	0,48	-0,05	-0,14	-8,09	-22,33	-0,007	

Fuente: Proyecto Fondecyt 1151087.

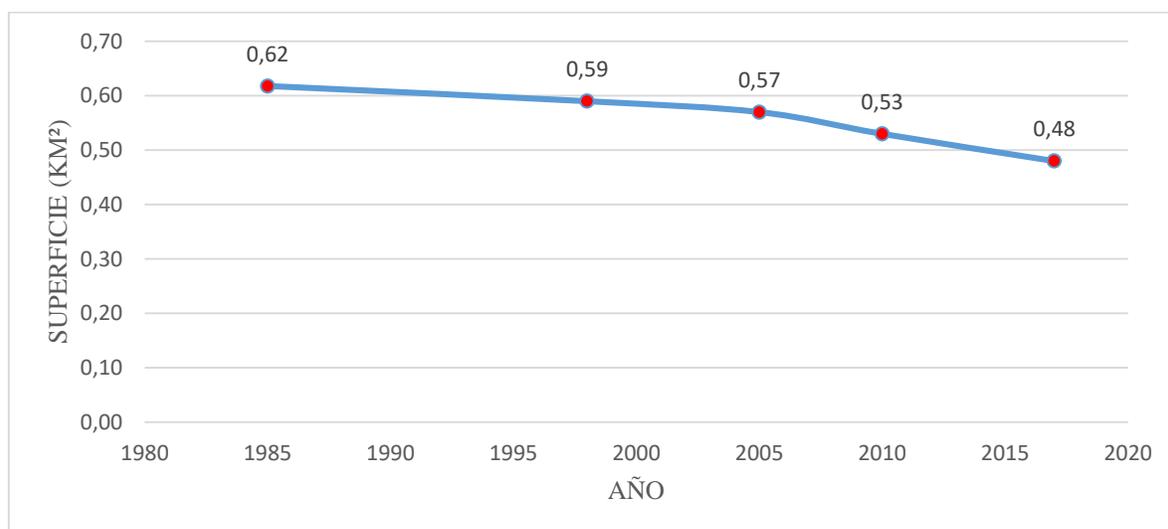


Figura N°46: Gráfico de Variación Superficial de Glaciar Vodudahüe N°16 1985-2017.

Fuente: Proyecto Fondecyt 1151087.

6.4 Síntesis de Variación Areal (km²) Glaciares Vodudahüe

En lo que respecta a la variación areal de los glaciares identificados y analizados en Vodudahüe, se encontró retroceso en todos los casos. El retroceso de menor magnitud, corresponde al experimentado por el Glaciar N°7, el cual es apenas equivalente a -0,01 km² (Tabla N°19 y Figura N°47) y se experimentó a una tasa de 0,0003 km² por año (Tabla N°20). También es el glaciar que menos masa perdió porcentualmente, debido a que su variación representa el 3,33% de su área inicial (Tabla N°19). Por el contrario, el glaciar que presentó los retrocesos más severos en el período 1985-2017 corresponde al Glaciar N°8, el cual vio la pérdida de 1,36 km² hacia el fin del período de estudio (Tabla N°19 y Figura N°47), lo cual correspondería a un retroceso de 0,043 km² por año y la pérdida del 57,87% de su masa inicial (Tabla N°19). Otros glaciares con un retroceso notable son los glaciares N°13, N°3 y N°4, con 0,589 km², 0,577 km² y 0,554 km² respectivamente y un retroceso de 0,018 km² por año y 0,017 km² por año, respectivamente (Tabla N°19 y Figura N°47).

Tabla N°19: Síntesis de Variación Areal (km²) y Porcentual de Glaciares Vodudahüe 1-16 para el período 1985-2017 Landsat

Zona	Glaciar	Área (km ²)		Variación Areal	Variación en %
		Inicial	Final	km ²	%
Vodudahüe	N°1	0,26	0,1	-0,16	-61,54
	N°2	0,53	0,46	-0,07	-13,21
	N°3	0,73	0,12	-0,61	-83,56
	N°4	1,04	0,48	-0,56	-53,85
	N°5	0,73	0,64	-0,09	-12,33
	N°6	1,45	0,92	-0,53	-36,55
	N°7	0,3	0,29	-0,01	-3,33
	N°8	2,35	0,99	-1,36	-57,87
	N°9	0,27	0,2	-0,07	-25,93
	N°10	0,58	0,26	-0,32	-55,17
	N°11	0,48	0,37	-0,11	-22,92
	N°12	0,55	0,13	-0,42	-76,36
	N°13	1,35	0,76	-0,59	-43,70
	N°14	0,59	0,18	-0,41	-69,49
	N°15	0,22	0,05	-0,17	-77,27
	N°16	0,62	0,48	-0,14	-22,58

Fuente: Proyecto Fondecyt 1151087.

Si bien el Glaciar N°8 es el glaciar que presenta el mayor retroceso de entre los glaciares aquí presentados, no es el cuerpo glaciar con una mayor pérdida porcentual de su superficie, ya que este puesto es ocupado por el Glaciar N°3, el cual perdió el 82,78% de su masa inicial entre los años 1985 y 2017, a una tasa de 0,018 km² por año. Otros glaciares con importantes pérdidas porcentuales de su área son los glaciares N°15, N°12 y N°14, con retrocesos de 77,06%, 76,53% y 69,49% respectivamente. Por el contrario, los glaciares con menores pérdidas porcentuales son los glaciares N°2 como ya se mencionó anteriormente, N°5 con 18,71%, N°7 con 20,73% y N°16 con 22,33%.

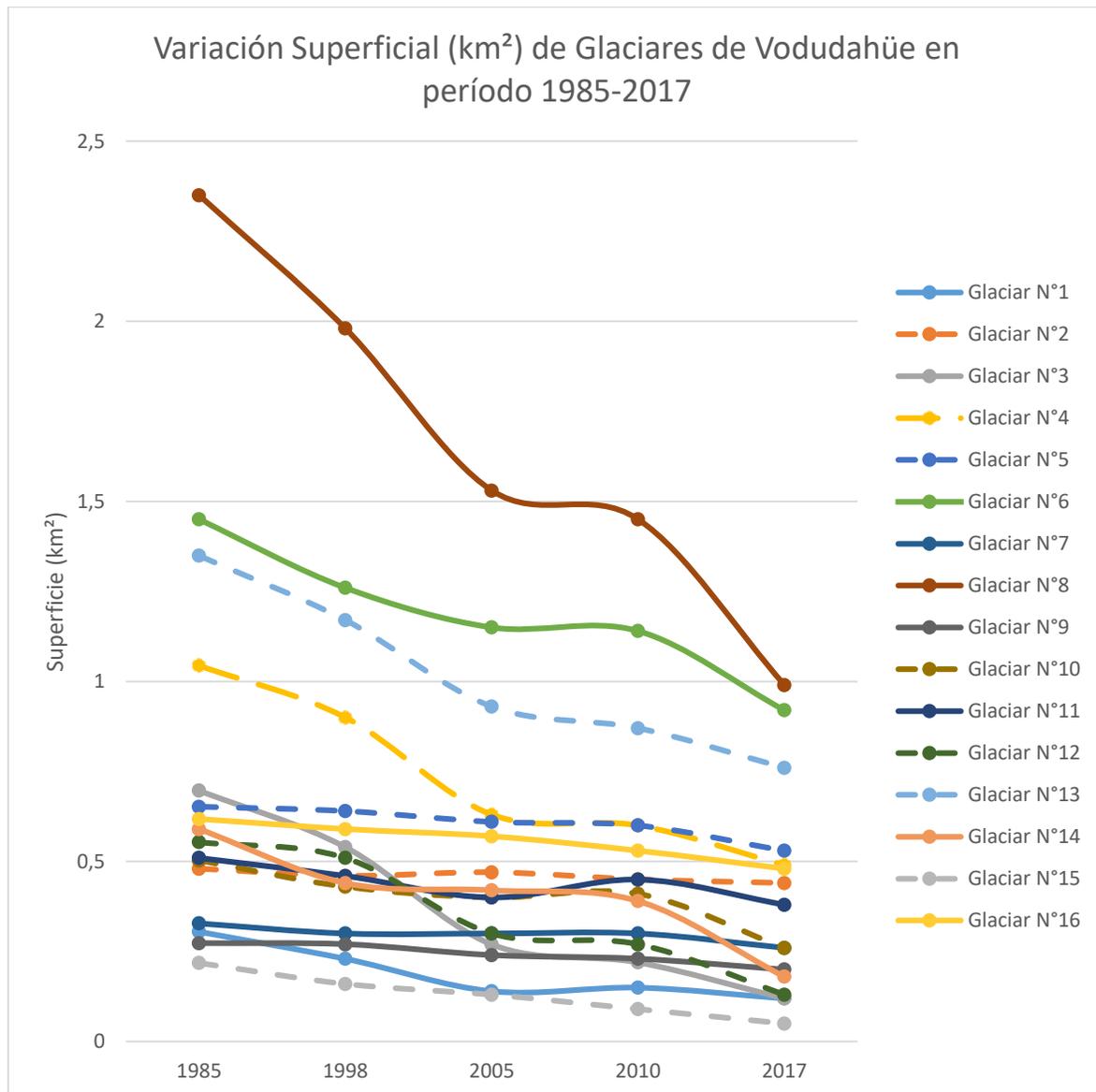


Figura N°47: Variación Superficial de Glaciares Vodudahüe en el período 1985-2017.
 Fuente: Proyecto Fondecyt 1151087.

Por otra parte, las superficies de los mismos glaciares, esta vez delimitados sobre la imagen Sentinel-2A correspondiente al año 2017, si bien arrojaron resultados similares, existen algunas diferencias con respecto a las superficies digitalizadas en Landsat (Ver Tabla N°20).

Tabla N°20: Síntesis de Variación Areal (km²) y Porcentual de Glaciares Vodudahüe 1-16 para el período 1985-2017 Sentinel

Zona	Glaciar	Área (km ²)		Variación Areal	Tasa Variación Areal Anual	Variación
		Inicial	Final	km ²	km ² a ⁻¹	%
Vodudahüe	N°1	0,26	0,1	-0,16	-0,005	-61,54
	N°2	0,53	0,47	-0,06	-0,002	-11,32
	N°3	0,73	0,11	-0,62	-0,019	-84,93
	N°4	1,04	0,45	-0,59	-0,018	-56,73
	N°5	0,73	0,62	-0,11	-0,003	-15,07
	N°6	1,45	0,94	-0,51	-0,016	-35,17
	N°7	0,3	0,3	0	0,000	0,00
	N°8	2,35	0,92	-1,43	-0,045	-60,85
	N°9	0,27	0,22	-0,05	-0,002	-18,52
	N°10	0,58	0,27	-0,31	0,010	-53,45
	N°11	0,48	0,34	-0,14	0,004	-29,17
	N°12	0,55	0,13	-0,42	0,013	-76,36
	N°13	1,35	0,72	-0,63	0,020	-46,67
	N°14	0,59	0,12	-0,47	0,015	-79,66
	N°15	0,22	0,05	-0,17	0,005	-77,27
	N°16	0,62	0,51	-0,11	0,003	-17,74

Fuente: Proyecto Fondecyt 1151087.

Aproximadamente en el 90% de los casos las diferencias son pequeñas, consistentes en un par de m² menos o unos cuantos puntos porcentuales, con diferencias de 5% o menos. Ejemplos destacables están constituidos por el Glaciar N° 7, que en Landsat tiene una variación porcentual de su superficie del orden de 3,33% con respecto a su superficie inicial (Ver Tabla N°19), mientras que en Sentinel posee una variación porcentual de 0% (Ver Tabla N°20). También existen glaciares que no presentan variaciones entre las imágenes Landsat y Sentinel tales como el Glaciar Cahuelmó o los glaciares Vodudahüe N°1 y N°12. Por otro lado, los glaciares Vodudahüe N°9 y N°14 presentan diferencias entre sus digitalizaciones sobre imágenes Landsat y Sentinel, presentando diferencias en su variación porcentual del orden de 7% aproximadamente el primero (25,93% en Landsat y 18,52% en Sentinel), y 10% el segundo (69,49% en Landsat y 79,66% en Sentinel). Estas diferencias se deben a las distintas resoluciones espaciales de los sensores Landsat y Sentinel, las cuales equivalen a 30 metros en el caso de Landsat y a 10 metros en el caso de Sentinel.

Análisis de variaciones areales de los glaciares ubicados en las cuencas de Vodudahüe y Cahuelmó durante el período 1985-2017

A pesar de dichas diferencias, queda demostrada la tendencia generalizada al retroceso por parte de todos los glaciares analizados.

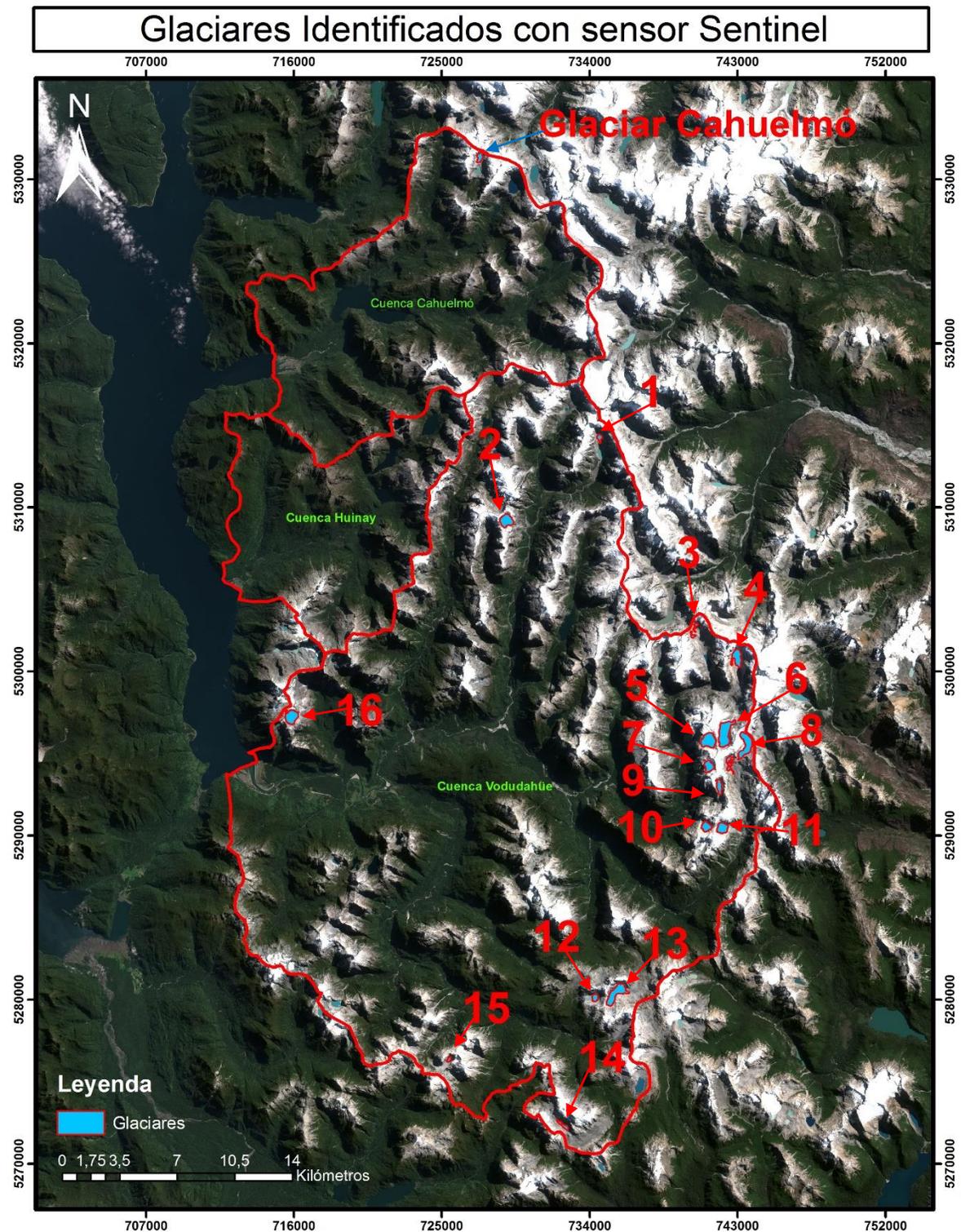


Figura N°48: Glaciar Cahuelmó y Glaciares Vodudahüe identificados en imagen Sentinel
Fuente: Proyecto Fondecyt 1151087.

6.5 Tasa de Variación Areal Anual

Se observa en la Tabla N°2 y en la Figura N°49 que el Glaciar Cahuelmó presenta una tasa de variación areal que lleva a un constante retroceso de dicha masa glaciar. En el intervalo correspondiente a 1985-1998 no hay una tasa de variación significativa, mientras que durante el intervalo 1998-2005 la tasa de variación areal asciende a $-0,001$ kilómetros cuadrados por año. Para el intervalo 2005-2010, la tasa de variación areal anual vuelve a ascender para alcanzar $-0,01$ kilómetros cuadrados por año y finalmente mantiene ese valor para el intervalo 2010-2017. Cabe señalar que, como se mostró en la Tabla N°2, la Tasa de Variación Areal Anual para la totalidad del período 1985-2017 corresponde a $-0,003$ kilómetros cuadrados por año.

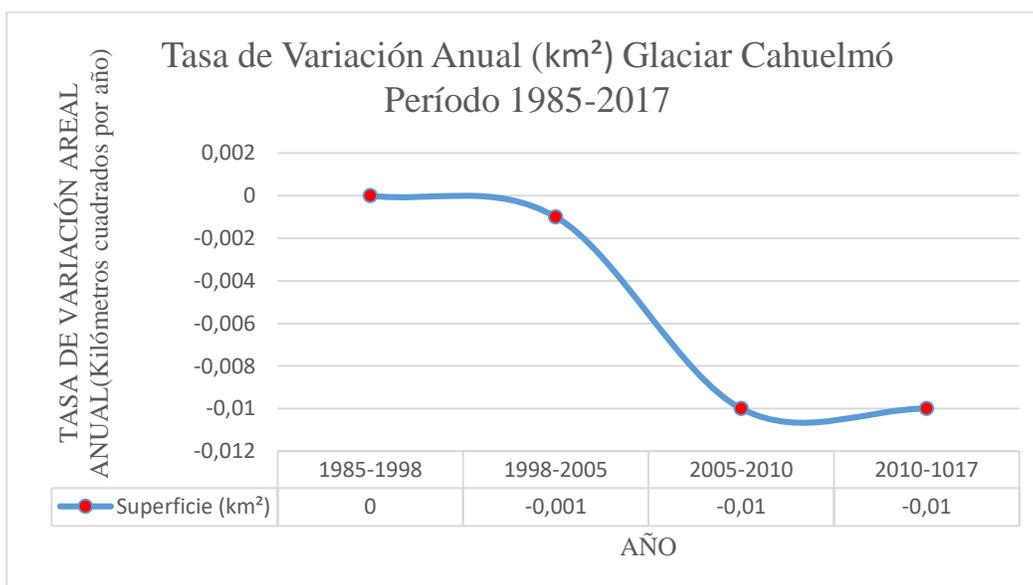


Figura N°49: Tasa de Variación Areal Anual (km²) Glaciar Cahuelmó Período 1985-2017.
Fuente: Proyecto Fondecyt 1151087.

La Tasa de Variación Anual Areal de los glaciares Vodudahüe N°1 y N°2 se representan en un gráfico aparte de los demás glaciares debido a que sus valores son superiores a los del resto.

En lo que respecta a las Tasas de Variación de los Glaciares Vodudahüe, en primer lugar, puede apreciarse que, para todos los glaciares en Vodudahüe en el período 1985-2017, existen tasas de variación de superficie negativas (Ver Tabla N°21 y Figuras N°50 y 51). Si bien constituyen una minoría, existen glaciares cuya tasa de variación anual aumenta (o se ve acelerada) con cada intervalo consecutivo, tales como el Glaciar Cahuelmó o el Glaciar Vodudahüe N°16 (Ver Tabla N°21 y Figuras N°49 y N°51).

Durante el primer intervalo (1985-1998) llaman la atención los glaciares Vodudahüe N°1, N°2 y N°4, de los cuales el primero no presenta una tasa de variación areal anual apreciable, mientras que tanto el segundo como el tercero presentan las únicas tasas de variación areal anual positivas de todo el período, correspondientes a $0,3$ kilómetros cuadrados por año y $0,01$ kilómetros cuadrados por año respectivamente (Ver Tabla N°21 y Figuras N°50 y 51).

Dentro de este intervalo, las tasas de variación areal anual más altas fueron experimentadas por los glaciares Vodudahüe N°8, N°10 y N°13, con valores de -0,0285 kilómetros cuadrados por año, -0,0117 kilómetros cuadrados por año y -0,0138 kilómetros cuadrados por año respectivamente. Por el contrario, las tasas más bajas aparecen en los glaciares N°7 y N°8, con -0,0001 kilómetros cuadrados por año y -0,0002 kilómetros cuadrados por año respectivamente (Ver Tabla N°21 y Figura N°51).

Tabla N°21: Síntesis de Tasas de Variación (km²) de Glaciares Vodudahüe 1-16 para el período 1985-2017

Cuenca	Glaciar	Intervalo				Tasa Variación Areal Anual Período 1985-2017
		1985-1998	1998-2005	2005-2010	2010-2017	km ² a ⁻¹
Vodudahüe	N°1	0	-0,2	0	-0,004	-0,001
	N°2	0,3	-0,004	0	-0,006	-0,001
	N°3	-0,01	-0,04	-0,01	-0,014	-0,003
	N°4	0,01	-0,04	-0,01	-0,017	-0,004
	N°5	-0,001	-0,003	-0,002	-0,006	-0,001
	N°6	-0,01	-0,02	-0,002	-0,03	-0,007
	N°7	-0,0001	0	0	-0,001	-0,0003
	N°8	-0,0285	-0,06	-0,02	-0,066	-0,014
	N°9	-0,0002	-0,004	-0,002	-0,004	-0,001
	N°10	-0,0117	-0,001	-0,002	-0,021	-0,004
	N°11	-0,0042	0	-0,002	-0,007	-0,001
	N°12	-0,0034	-0,03	-0,006	-0,02	-0,004
	N°13	-0,0138	-0,03	-0,01	-0,016	-0,003
	N°14	-0,01	-0,003	-0,006	-0,03	-0,007
	N°15	-0,0045	-0,004	-0,008	-0,006	-0,001
	N°16	-0,002	-0,003	-0,008	-0,007	-0,002

Fuente: Proyecto Fondecyt 1151087.

En el intervalo 1998-2005, los glaciares N°7 y N°11 presentan tasas de variación areal anual nulas, mientras que los demás glaciares presentan en su totalidad tasas negativas. Existen glaciares cuyas tasas de variación areal anual vieron un incremento en este intervalo tales como los glaciares N°3 (de -0,01 kilómetros cuadrados por año a -0,04 kilómetros cuadrados por año, N°8 (-0,0285 kilómetros cuadrados por año a -0,06 kilómetros cuadrados por año) o N°12 (-0,0034 kilómetros cuadrados por año a -0,03 kilómetros cuadrados por año) y glaciares que experimentaron un descenso en su tasa de variación areal anual como los glaciares N°2 (de 0,3 kilómetros cuadrados por año a -0,004 kilómetros cuadrados por año), N°4 (0,01 kilómetros cuadrados por año a -0,04 kilómetros cuadrados por año) o N°14 (-0,01 kilómetros cuadrados por año a -0,003 kilómetros cuadrados por año).

Las tasas de variación areal anual más altas aparecen en los glaciares N°1, N°4 y N°8 con -0,2 kilómetros por año, -0,04 kilómetros cuadrados por año y -0,06 kilómetros cuadrados por año respectivamente. Mientras que los glaciares con tasas más bajas corresponden a los glaciares N°5, N°14, N°16 (todos con -0,003 kilómetros cuadrados por año) y N°10 (-0,001 kilómetros cuadrados por año) (Ver Tabla N°21 y Figuras N°50 y N°51).

Para el intervalo 2005-2010, son esta vez los glaciares N°1, N°2 y N°7 los que poseen tasas de variación areal anual nulas y, de igual manera que en el intervalo 1998-2005, todos los demás glaciares presentan tasas negativas. Similar a lo descrito sobre el intervalo anterior, algunos glaciares muestran un incremento en sus tasas de variación areal anual como los glaciares N°10 (de -0,001 kilómetros cuadrados por año a -0,002 kilómetros cuadrados por año), N°14 (de -0,003 kilómetros cuadrados por año a -0,006 kilómetros cuadrados por año) o N°16 (de -0,003 kilómetros cuadrados por año a -0,008 kilómetros cuadrados por año) (Ver Tabla N°21 y Figuras N°50 y N°51).

Por el contrario, glaciares que evidencian una disminución en sus tasas de variación areal anual son los glaciares N°6 (de -0,02 kilómetros cuadrados por año a -0,002 kilómetros cuadrados por año), N°8 (de -0,06 kilómetros cuadrados por año a -0,02 kilómetros cuadrados por año) o N°12 (de -0,03 kilómetros cuadrados por año a -0,006 kilómetros cuadrados por año). Las tasas de variación areal anual de mayor valor aparecen en los glaciares N°3, N°4 (-0,01 kilómetros cuadrados por año en ambos casos) y N°8 (-0,02 kilómetros cuadrados por año). Por el contrario, las tasas de variación areal anual de menor valor en este intervalo corresponden a las de los glaciares N°5, N°6, N°9, N°10 y N°11 (-0,002 kilómetros cuadrados por año para todos los casos) (Ver Tabla N°21 y Figura N°51).

En el caso del intervalo 2010-2017 todos los glaciares analizados en Vodudahüe presentan tasas de variación areal anual negativas. En este intervalo, los glaciares N°15 y N°16 ven sus tasas disminuidas, de -0,008 kilómetros cuadrados por año a -0,006 kilómetros cuadrados por año el primero, y de -0,008 kilómetros cuadrados por año a -0,007 kilómetros cuadrados por año el segundo. Por su parte, entre los glaciares que ven aumentada su tasa de variación areal anual con respecto al intervalo pasado, se cuentan como ejemplos el glaciar N°6 (de -0,002 kilómetros cuadrados por año a -0,03 kilómetros cuadrados por año), el glaciar N°10 (de -0,002 kilómetros cuadrados por año a -0,021 kilómetros cuadrados por año) y N°14 (de -0,006 kilómetros cuadrados por año a -0,03 kilómetros cuadrados por año). Los glaciares con menores tasas de variación areal anual son los glaciares N°7 (-0,001 kilómetros cuadrados por año) y N°9 (-0,004 kilómetros cuadrados por año). Por el contrario, glaciares con mayores tasas de variación corresponden a los N°6 (-0,03 kilómetros cuadrados por año) y N°8 (-0,066 kilómetros cuadrados por año) (Ver Tabla N°21 y Figura N°51).

Finalmente, en el caso de las Tasas de Variación Areal Anual para la totalidad del período 1985-2017, ejemplos de los glaciares con una menor tasa de variación son N°1, N°9, N°15 (-0,001 kilómetros cuadrados por año en todos los casos) y ejemplos de glaciares que poseen las mayores tasas de variación son N°6, N°14 (-0,007 kilómetros cuadrados por año en ambos casos) y N°8 (-0,014 kilómetros cuadrados por año) (Ver Tabla N°21 y Figuras N°50 y N°451)

Análisis de variaciones areales de los glaciares ubicados en las cuencas de Vodudahüe y Cahuelmó durante el período 1985-2017

Se aprecia en general una tendencia generalizada a la aceleración o incremento de las tasas de variación areal anual de los glaciares analizados tanto en la zona de Cahuelmó como en la zona de Vodudahüe (Ver Tabla N°21 y Figuras N°49, N°50 y N°51).

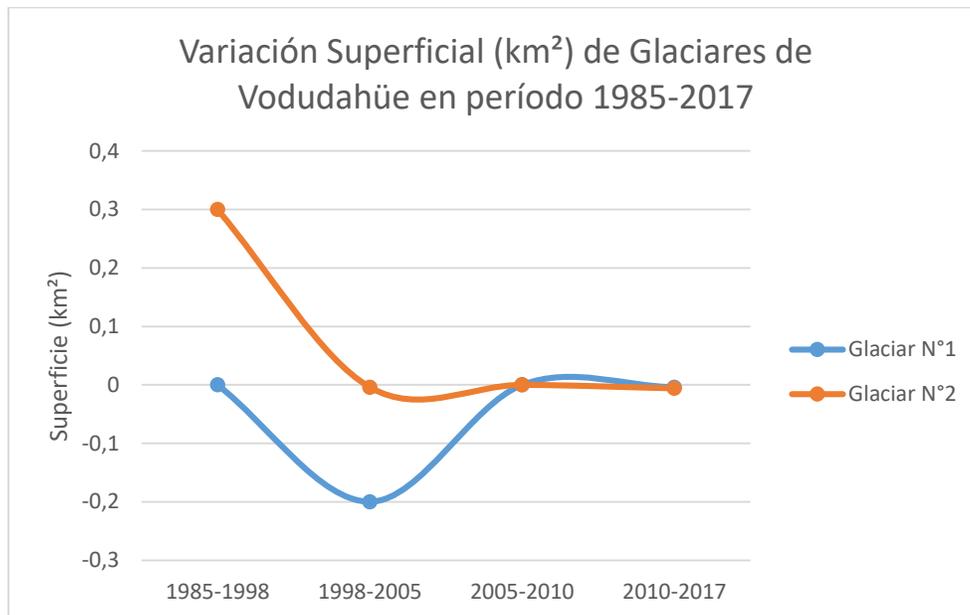


Figura N°50: Tasas de Variación Areal Anual (km²) Glaciares Vodudahüe N°1 y N°2 Período 1985-2017. Fuente: Proyecto Fondecyt 1151087.

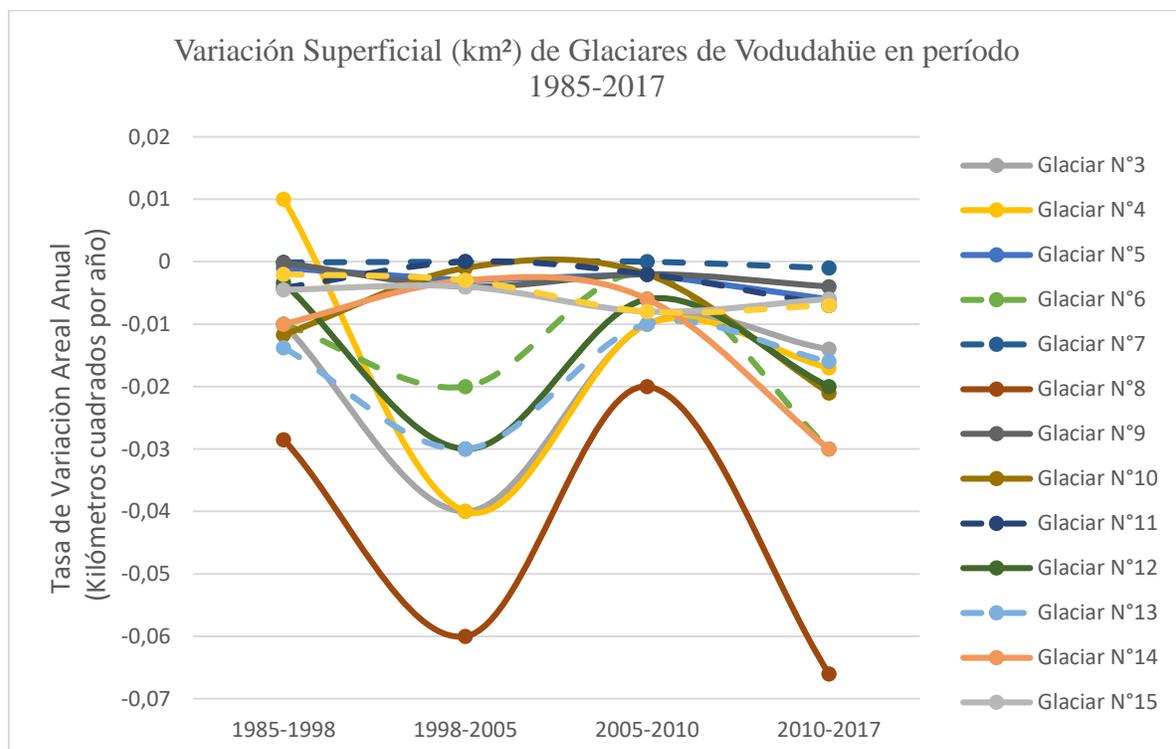


Figura N°51: Tasas de Variación Areal (km²) Anual Glaciares Vodudahüe N°3-N°16 Período 1985-2017. Fuente: Proyecto Fondecyt 1151087.

6.6 Análisis Climatológico de Huinay

6.6.1 Promedio de Temperaturas (°C) por año en período 1985-2017

Se aprecia en la Figura N°52 que los promedios de temperaturas anuales en el período de estudio fluctúan aproximadamente entre los 9,8°C y los 10,8°C (siendo el valor mínimo el año 2000 y el máximo durante el año 2008), es decir, una variación de aproximadamente 1°C.

Por su parte, la línea de tendencia (representada como una línea punteada de color rojo), indica que existe un alza continua en los valores de temperatura media anual durante el período de estudio. A diferencia de esto, los valores correspondientes a los años de las imágenes satelitales utilizadas en este trabajo son: 10,4°C para 1985; aproximadamente 10,6°C para 1998; 10,4°C para 2005; aproximadamente 10,1°C para 2010 y cerca de 10,4°C durante 2017.

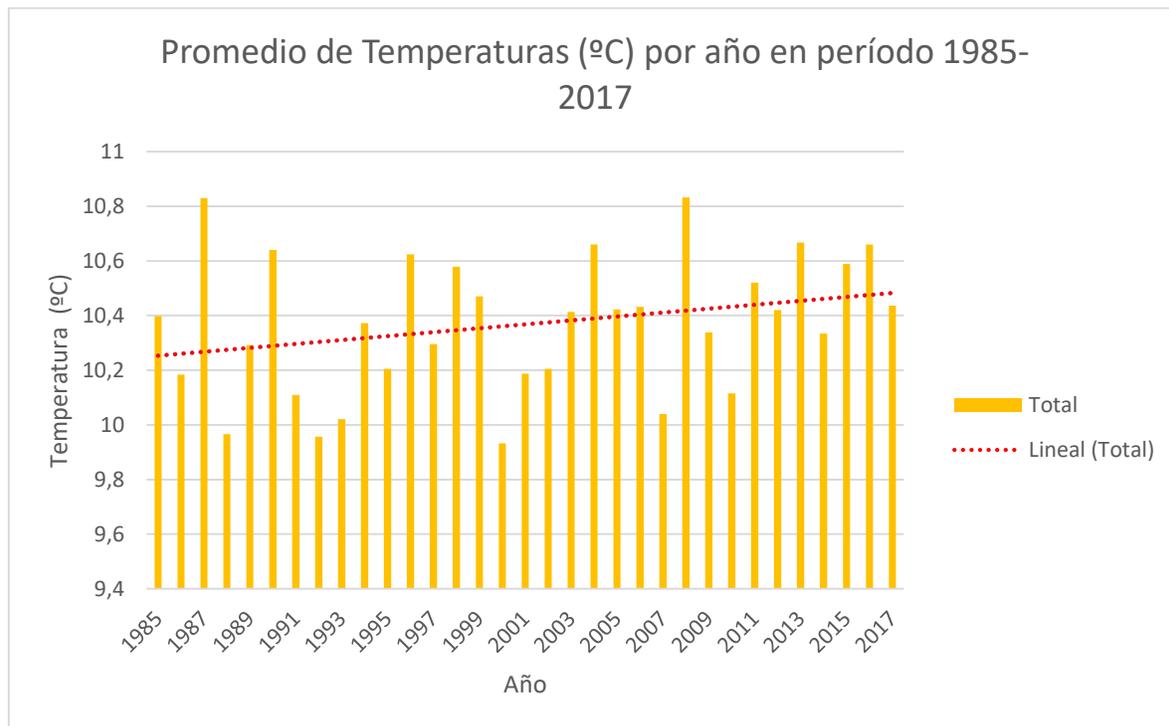


Figura N°52: Promedio de Temperaturas (°C) por año en período 1985-2017. Fuente: Proyecto Fondecyt 1151087.

Para reforzar esta idea, también se elaboró un gráfico con los promedios de temperatura en grados Celsius registrados en los intervalos de años en que fueron captadas las imágenes satelitales (Figura N°53). Durante el intervalo 1985-1998, el promedio de temperatura alcanzó los 10,320°C, para ascender a 10,359°C en el período comprendido entre los años 1998 y 2005. Esta tendencia continúa hacia el intervalo 2005-2010, en donde la temperatura promedio aumenta levemente a los 10,363°C y, finalmente, alcanza 10,468°C (el alza más marcada) para el intervalo 2010-2017.

A pesar de las oscilaciones observadas en los promedios de temperatura, la tendencia general indica un alza constante de esta, lo cual se condice con la regresión experimentada por los glaciares identificados y estudiados y puede ser observado en la Tabla N°22 y en la Figura N°54. Aquí se aprecia nuevamente la oscilación térmica ya descrita, en donde desde el año 1985 al año 2017 la temperatura promedio anual asciende desde los 10,4°C a los 10,44°C respectivamente pasando por un período de aumento en 1998 con respecto a 1985 (de 10,4°C a 10,58°C), y luego descenso (10,58°C a 10,42°C de 1998 a 2005; y de 10,42°C a 10,12°C de 2005 a 2010). Mientras tanto, la superficie glaciar total presenta un descenso constante, desde 12,3 km² en 1985, a 10,72 km² en 1998, 8,84 km² en 2005, 8,43 km² para 2010 y finalmente 6,59 km² el año 2017.

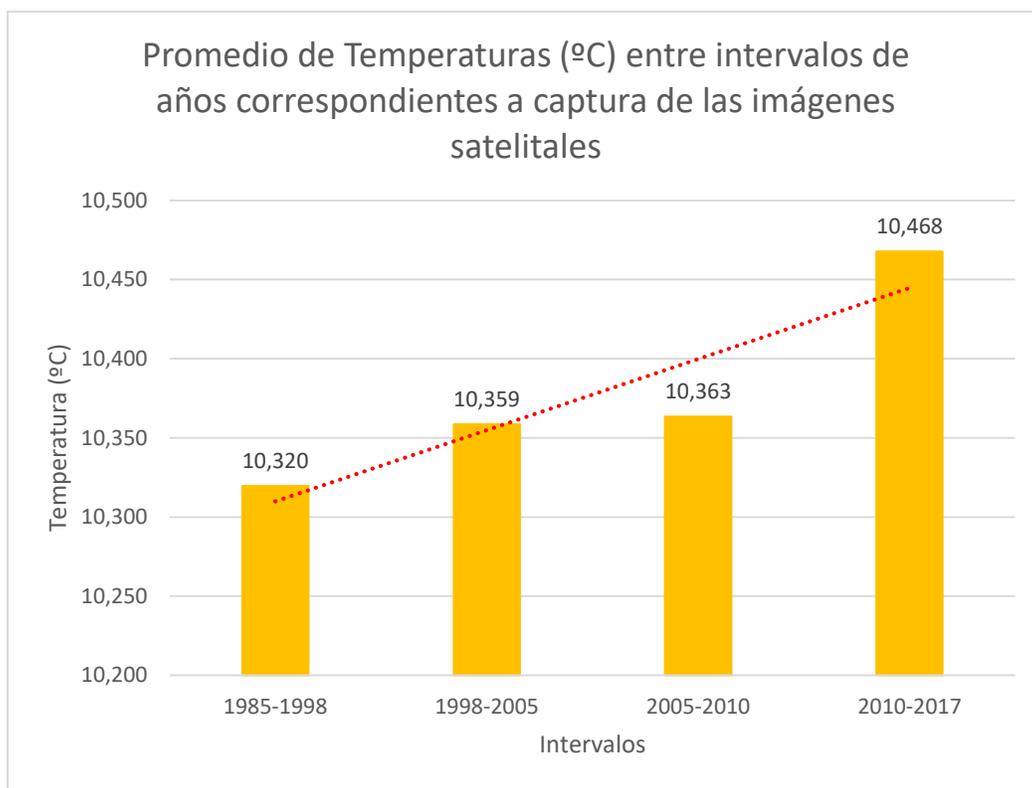


Figura N°53: Promedio de Temperaturas (°C) entre intervalos de años correspondientes a captura de las imágenes satelitales. *Fuente: Proyecto Fondecyt 1151087.*

Tabla N°22: Superficie glaciar total v/s Temperatura promedio anual

Año	Superficie glaciar total (km ²)	Temperatura promedio (°C)
1985	12,3	10,4
1998	10,72	10,58
2005	8,84	10,42
2010	8,43	10,12
2017	6,59	10,44

Fuente: Proyecto Fondecyt 1151087.

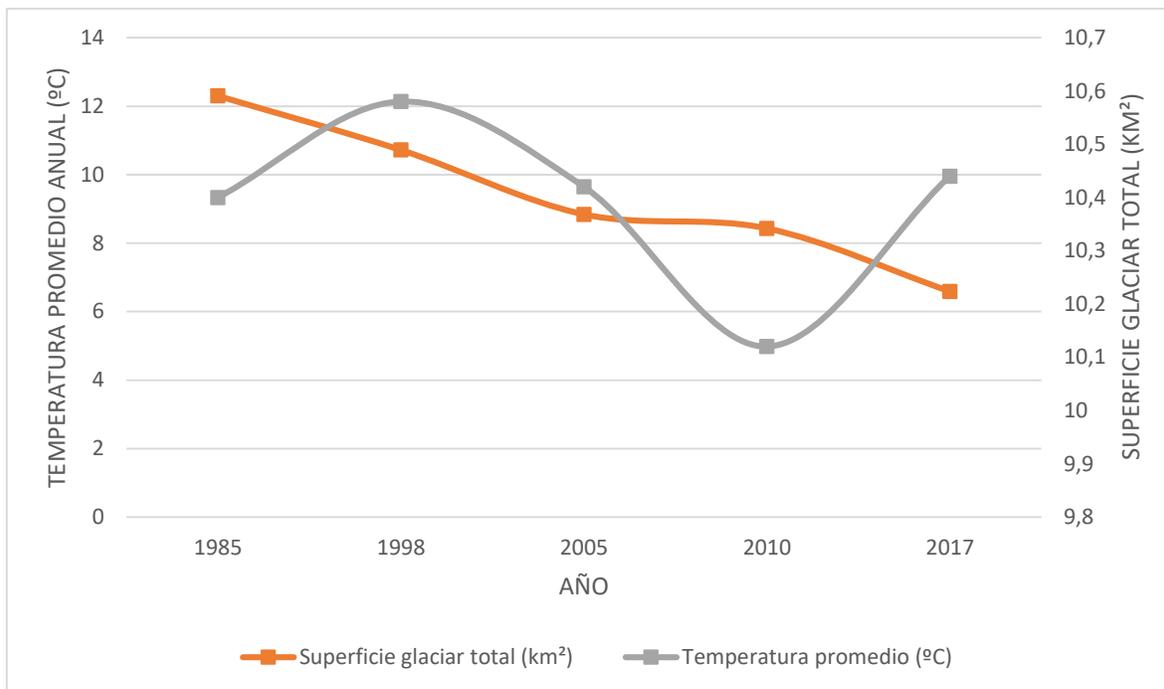


Figura N°54: Superficie glaciaria total (km²) v/s Temperatura promedio anual (°C). *Fuente: Proyecto Fondecyt 1151087.*

6.6.2 Precipitaciones Totales Anuales (mm) Período 1985-2017

En la Figura N°55 se evidencia que las precipitaciones totales anuales para el período de estudio fluctúan entre los 4100-4200mm y los 6600-6700mm aproximadamente período 1985-2017 (registrándose el valor mínimo el año 2000 y el valor máximo durante el año 2009), es decir, una variación de aproximadamente 2500-2600mm.

La línea de tendencia aquí presentada (representada como una línea punteada de color rojo), muestra un leve pero constante descenso en los valores de precipitaciones totales anuales dentro del período de estudio. Los valores registrados en los años correspondientes a las imágenes satelitales utilizadas en este trabajo son: 5800mm aproximadamente para 1985; cerca de 4200mm para 1998; aproximadamente 5900mm para 2005; cerca de 5300mm para 2010 y aproximadamente 5500mm para 2017.

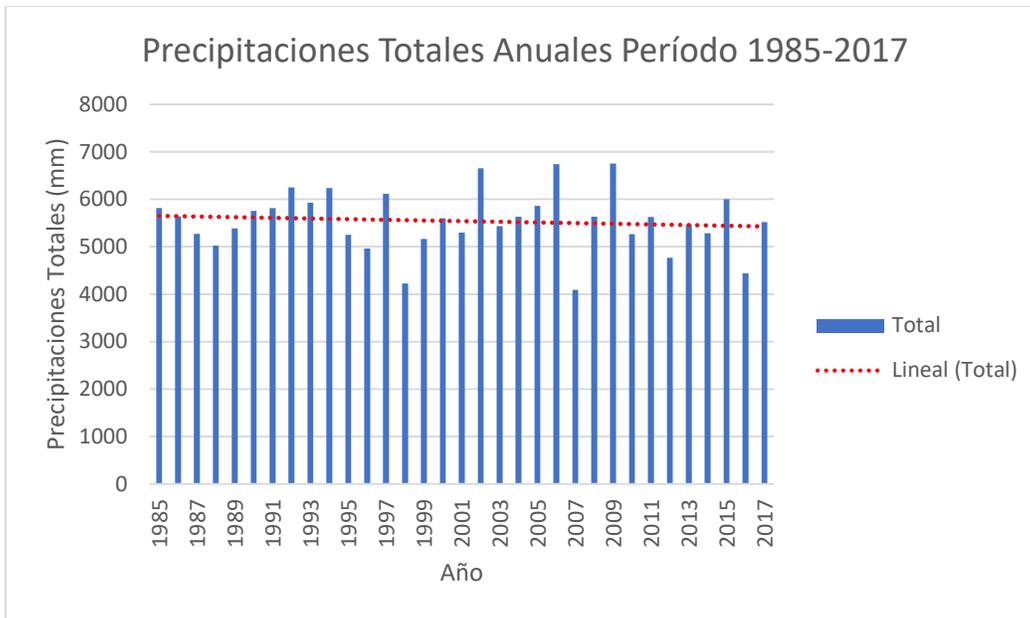


Figura N°55: Precipitaciones Totales Anuales (mm) Período 1985-2017. *Fuente: Proyecto Fondecyt 1151087.*

También se realizó un gráfico para ilustrar las precipitaciones promedio (en mm) durante los intervalos de años correspondientes a la captura de las imágenes satelitales para determinar el comportamiento de estas (Figura N°56). Aquí se aprecia que para el período 1985-1998 la precipitación promedio alcanzó el valor de 5548mm, para posteriormente descender en el intervalo 1998-2005 a 5482mm. Hacia el intervalo 2005-2010 las precipitaciones promedio ascendieron hasta los 5723mm y, finalmente, descendieron hasta los 5295 en el período 2010-2017, su valor más bajo entre los 4 períodos aquí analizados.

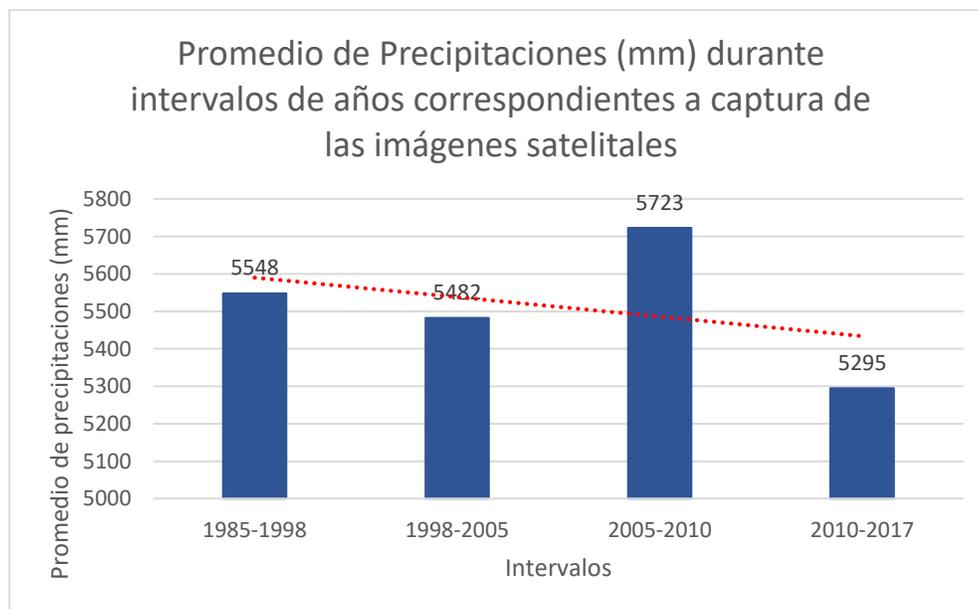


Figura N°56: Promedio de Precipitaciones (mm) durante intervalos de años correspondientes a captura de las imágenes satelitales. *Fuente: Proyecto Fondecyt 1151087.*

Pese a la notable alza en precipitaciones promedio y a la oscilación de las mismas a lo largo del período de estudio, la tendencia generalizada es al descenso constante de las precipitaciones totales anuales, lo cual puede explicar un déficit de precipitaciones en estado sólido en la alta cordillera, evitando la alimentación de los glaciares.

En síntesis se aprecia que por un lado el promedio de temperatura anual durante el período de estudio, mantiene un constante aumento, mientras que las precipitaciones totales anuales mantienen un constante descenso, las cuales son tendencias que contribuyen a explicar y se condicen con los retrocesos glaciares encontrados.

6.6.3 Precipitación Acumulada durante días de frío (<11,4°C)

Se observa en la Figura N°57 que los 5 años correspondientes a las imágenes satelitales utilizadas en este trabajo, se mantienen constantemente acumulando precipitación (posiblemente en estado sólido) durante los días de frío. El año con una menor acumulación de grados durante días de frío corresponde al año 2005, el cual alcanza aproximadamente 800mm, mientras que, por el contrario, el año con una mayor acumulación corresponde al año 2010, con poco más de 1000mm aproximadamente. Así, entre estos 2 años, la diferencia es de aproximadamente 200mm acumulados durante días de frío. Por otra parte, el año 2017 llega a aproximadamente 900mm acumulados durante días de frío, y, tanto el año 1985, como el año 1998 alcanzan aproximadamente 1000mm.

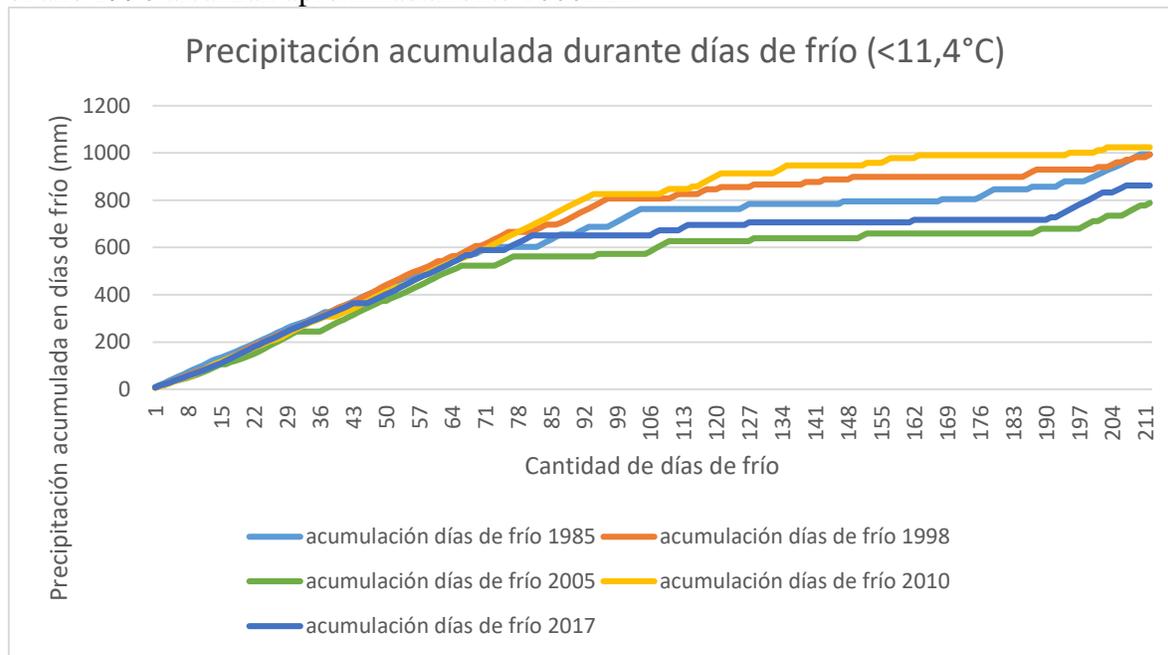


Figura N°57: Precipitación acumulada durante días de frío (<11,4°C). Fuente: Proyecto Fondecyt 1151087.

Se aprecia en la Tabla N°23 y en la Figura N°58 que, el contraste entre las superficies glaciares totales indica un comportamiento similar. Si bien la precipitación acumulada durante días de frío aumenta notablemente durante el año 2010 y su curva no presenta un descenso constante como el de la superficie glaciar total, ambas series de datos comparten el hecho de que su valor correspondiente al año 2017 es inferior a aquel valor expresado durante

Análisis de variaciones areales de los glaciares ubicados en las cuencas de Vodudahüe y Cahuelmó durante el período 1985-2017

el año 1985. En este año la superficie glaciaria total era de 12,3 km² y la precipitación acumulada durante días de frío correspondía a 994,68 mm, mientras que el año 2017, la primera equivalía a 6,59 km² y la segunda a 862,12 mm.

Como ya se señaló, la superficie glaciaria total ve un descenso constante de su valor, mientras que la precipitación acumulada desciende constantemente hasta el año 2010, en donde alcanza el valor más alto de la serie (1023,3mm) y luego desciende a 862,12 mm, valor que no representa el mínimo de la serie (el cual corresponde a 787,82mm el año 2005 (Ver Tabla N°23 y Figura N°58).

Tabla N°23: Superficie glaciaria total v/s Precipitación acumulada durante días de frío.

Año	Superficie glaciaria total (km ²)	Precipitación acumulada durante días de frío (mm)
1985	12,3	994,68
1998	10,72	992,67
2005	8,84	787,82
2010	8,43	1023,3
2017	6,59	862,12

Fuente: Proyecto Fondecyt 1151087.

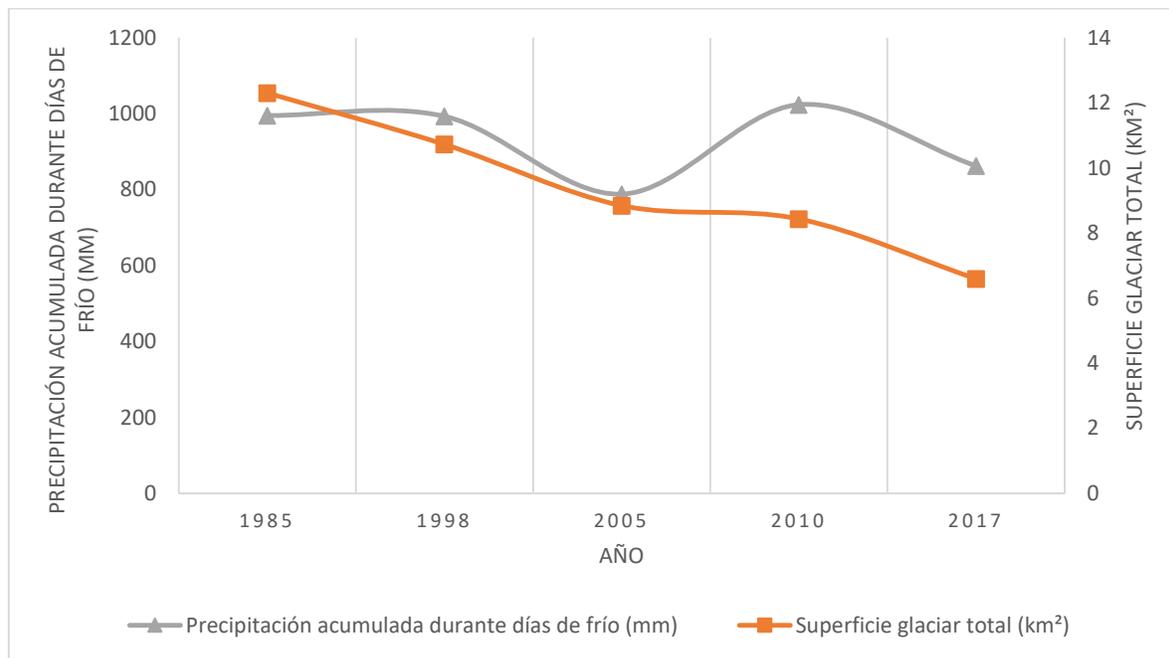


Figura N°58: Superficie glaciaria total (km²) v/s Precipitación acumulada durante días de frío (mm). *Fuente: Proyecto Fondecyt 1151087.*

6.7 Exposición y Emplazamiento Morfológico

Se identificaron tanto la exposición de los glaciares como las morfologías en donde se emplazan los glaciares con el fin de establecer una relación entre estos factores y la regresión de las masas de hielo. Estas características son especificadas para cada glaciar en la Tabla N°24. Se observa una predominancia de exposiciones Sur y Suroeste o Sureste, con 12 glaciares que poseen dicha exposición, entre los que se cuentan tanto los glaciares que registraron menor pérdida de su masa glaciar como los que presentaron mayores retrocesos de las mismas. Por ejemplo, el glaciar Vodudahüe N°7 (-3,33% para el período de estudio 1985-2017) y el glaciar Vodudahüe N°3 (-83,56%) tienen exposición Suroeste y Sur, respectivamente, así como ambos se emplazan en morfologías de circo y valle glaciar.

Tabla N°24: Exposición y Morfologías de emplazamiento de los glaciares identificados

<i>Exposición y Morfologías de emplazamiento los glaciares identificados</i>			
Cuenca	Glaciares	Exposición	Morfología
<i>Cahuelmó</i>	Cahuelmó	Sur	Circo (Figura N°13)
<i>Vodudahüe</i>	N°1	Suroeste	Fondo de valle glaciar (Figura N°15)
	N°2	Sureste	Circo (Figura N°17)
	N°3	Sur	Circo y fondo de valle glaciar (Figura N°19)
	N°4	Sur	Circo y fondo de valle glaciar (Figura N°21)
	N°5	Sur	Circo (Figura N°23)
	N°6	Noreste	Circo y fondo de valle glaciar (Figura N°25)
	N°7	Suroeste	Circo (Figura N°27)
	N°8	Sur	Circo y fondo de valle glaciar (Figura N°29)
	N°9	Sur	Circo (Figura N°31)
	N°10	Norte	Circo (Figura N°33)
	N°11	Este	Circo (Figura N°35)
	N°12	Oeste	Circo (Figura N°37)
	N°13	Este	Circo y fondo de valle glaciar (Figura N°39)
	N°14	Sur	Fondo de valle glaciar (Figura N°41)
	N°15	Sur	Circo y fondo de valle glaciar (Figura N°43)
	N°16	Sureste	Circo (Figura N°45)

Fuente: Proyecto Fondecyt 1151087.

Por otra parte, el glaciar Vodudahüe N°6 posee exposición noreste y morfología de circo y fondo de valle, con un retroceso del -36,55% de su masa inicial; el glaciar Vodudahüe N°10 exposición norte y morfología de circo con una regresión de -55,17%. Por su lado, los glaciares Vodudahüe N°11 y Vodudahüe N°13 poseen exposición este y se emplazan en morfologías de circo el primero (y con pérdida del 22,92% de su superficie inicial) y circo y fondo de valle glaciar el segundo (-43,70% de su masa en 1985). Finalmente, el glaciar Vodudahüe N°12 es el único que posee una exposición oeste y se emplaza en una morfología de circo, habiendo perdido el 76,36% desde 1985 y hasta 2017 (Tabla N°24).

7. DISCUSIÓN

Las metodologías empleadas para la corrección de imágenes satelitales resultaron efectivas para el caso de las imágenes satelitales empleadas para identificar y analizar los glaciares que se encuentran en el Fiordo Comau y arrojaron resultados similares a los presentados en otras investigaciones que hacen uso de estas metodologías en casos de Chile, tales como los estudios de Falaschi et al (2013), Paul & Mölg (2014) o DGA (2011), así como también en trabajos internacionales de Copé de los Mozos (2014) en la zona antártica o Ding (2010) en los Himalayas.

Como señala Paul & Mölg (2014), la mayoría de los glaciares poseen superficies entre los 0.1 km² y 1 km², lo cual es el caso para todos los glaciares analizados en este estudio (tanto Cahuelmó como los de Vodudahüe), excluyendo los glaciares Vodudahüe N°4, N°6, N°8 y N°13.

Tal como sucede con la mayoría de los glaciares identificados y estudiados en Chile y en particular en concordancia con las tendencias observadas en las zonas sur y austral del país (Rivera et al., 2012), los cuerpos glaciares identificados y analizados en el presente informe sobre variación superficial de glaciares en Cahuelmó y Vodudahüe, muestran una marcada tendencia a la reducción de su superficie total respondiendo a los efectos del cambio climático.

En el informe de la DGA sobre Variaciones recientes de glaciares en Chile según zonas glaciológicas (2011), el sur de Chile se divide en las subzonas Sur A y Sur B, centrándose principalmente en los cuerpos de hielo que se ubican en los volcanes de estas zonas del país. Según estas divisiones, el área de estudio Fiordo Comau se ubicaría en la Zona Sur B, en donde se emplazan volcanes como el Michinmahuida, Melimoyu y Mentolat. Aquí, dicho estudio arrojó resultados similares a los presentados, es decir, el retroceso generalizado de todos los glaciares identificados y analizados y a ritmos dispares, variando de un glaciar a otro.

En el estudio de DGA, todos los glaciares de la Zona Sur B presentan pérdidas de masa superiores al 20% de su masa inicial. Por ejemplo, los 3 volcanes mencionados anteriormente presentaron retrocesos de gran magnitud según describe DGA, mostrando retrocesos de -27,49 km² en el caso del volcán Michinmahuida (equivalente a aproximadamente el 27% de su masa inicial para el período 1961-2011); -13,98 km² en el volcán Melimoyu (el 20% de su masa inicial durante el período 1976-2011); y -2,27 km² en el volcán Mentolat (el 40% de su masa inicial para el período 1979-2011, siendo el glaciar con mayor porcentaje perdido de la Zona Sur B) (Tabla N°22).

Entre los glaciares analizados, a excepción del glaciar Vodudahüe N°2, el porcentaje de variación de todos los glaciares supera el 18% (siendo 18,71% el mínimo, correspondiente al glaciar Vodudahüe N°5, que perdió 0,12 km² en el período 1985-2017), manifestándose el máximo porcentaje de pérdida de masa glaciar en el glaciar Vodudahüe N°3, equivalente al 82,78% de su masa inicial (-0,57 km² durante el período 1985-2017).

En el mismo estudio de DGA se señala que a nivel país la situación es similar, pérdida generalizada de superficie areal de los glaciares, con unas pocas excepciones, tales como el glaciar Pío XI, con un engrosamiento y un fuerte avance que embalsó el río Greve debido a factores dinámicos. También, el glaciar “N°16” ha registrado un avance de 567 m entre 1991 y 2004.

Por su parte, los resultados encontrados en lo que respecta a las tasas de variación areal apuntan a un comportamiento similar al descrito en otros artículos científicos, en los que la tendencia generalizada es a glaciares que presentan tasas de variación areal negativa. El mejor caso a comparar corresponde al ya citado trabajo de la DGA acerca de variaciones recientes de glaciares en Chile según zonas glaciológicas (2011). Aquí en la zona glaciológica Sur B (donde se emplaza el área de estudio de este trabajo) se aprecia que todos los glaciares estudiados evidencian tasas de variación negativas para su período de estudio (Tabla N°25).

Tabla N°25: Variaciones areales (kilómetros cuadrados por año) de glaciares Zonas Sur B y Austral

Zona Glaciológica	Centro Montañoso/Glaciár	N° Glaciares	Área (km ²)		Variación Areal	Tasa Variación Areal	Variación	Período
			Inicial	Final	(km ²)	(km ² a ⁻¹)	(%)	
SUR B	Vn. Calbuco	2	2,31	1,79	-0,52	-0,03	-23	1987-2005
	Vn. Yates	2	16,83	13,16	-3,67	-0,15	-22	1987-2011
	Mte. Inexplorado 1	1	14,40	9,65	-4,75	-0,20	-33	1987-2011
	Mte. Inexplorado 2	1	18,69	13,48	-5,21	-0,22	-28	1987-2012
	Mte. Inexplorado 3	1	17,65	12,49	-5,16	-0,22	-29	1987-2013
	Vn. Michinmahuida	11	102,64	75,15	-27,49	-0,55	-27	1961-2011
	Vn. Corcovado	6	7,61	5,00	-2,61	-0,09	-34	1979-2007
	Cerro Yanteles	20	66,39	46,24	-20,15	-0,72	-30	1979-2007
	Vn. Melimoyu	7	69,57	55,59	-13,98	-0,40	-20	1976-2011
	Nevado de Queulat	3	108,37	84,83	-23,54	-1,07	-22	1986-2011
	Vn. Mentolat	5	5,62	3,35	-2,27	-0,07	-40	1979-2011
	Vn. Cay	7	9,05	5,81	-3,24	-0,10	-36	1979-2011
	Vn. Maca	15	45,08	27,62	-17,46	-0,54	-39	1979-2011
	Vn. Hudson	3	90,79	69,84	-20,95	-0,65	-23	1979-2011
	Erasmus	1	52,96	42,07	-10,89	-0,39	-21	1979-2011

Fuente: DGA, 2011

Es posible observar que, en su mayoría, los glaciares analizados por DGA (2011) tienen tasas de variaciones areales con valores negativos más altos que aquellos trabajados en este informe, esto posiblemente explicado por las superficies mayores de los glaciares presentados por DGA con respecto a los de este trabajo y mayores números de glaciares como sucede por ejemplo con el Volcán Michinmahuida o el Volcán Melimoyu. Por ejemplo, la tasa de variación areal más baja corresponde al glaciar del Volcán Calbuco (-0,03 km²a⁻¹ para

el período 1987-2005), mientras que la tasa más alta es experimentada por el glaciar Nevado de Queulat ($-1,07 \text{ km}^2\text{a}^{-1}$ durante el período 1986-2011). Mientras que en esta investigación informe se evidencia que la tasa de variación areal más baja corresponde a la del glaciar Vodudahüe N°2 ($-0,001 \text{ km}^2\text{a}^{-1}$) y la más alta la del glaciar Vodudahüe N°8 ($-0,043 \text{ km}^2\text{a}^{-1}$).

Conforme el análisis de los datos climáticos la tendencia acelerada a la reducción de los glaciares puede asociarse positivamente a las tendencias evidenciadas por los promedios de temperaturas anuales para el período de estudio al aumento constante y a las precipitaciones anuales totales a la disminución (considerando que esto puede significar un descenso en la precipitación sólida en la alta montaña).

Los resultados obtenidos acerca de la precipitación acumulada durante días de frío pueden ser contrastadas con la ocurrencia de eventos atmosféricos El Niño y La Niña. Se observa en la Tabla N°26 que el año 1985 cae dentro de un evento La Niña Débil ocurrido entre 1984 y 1985 y pese a ello, ocupa el segundo lugar en cuanto a años con mayores mm de lluvia acumulada durante días de frío (1000mm).

El año 1998 cae bajo un evento La Niña Fuerte ocurrido entre los años 1998 y 1999, y de igual manera ocupa el segundo puesto más alto (1000mm).

Por su parte, el año 2005 vio un evento El Niño Débil, ocurrido entre los años 2004 y 2005 y presenta la menor precipitación acumulada durante días de frío (aproximadamente 800mm) de los 5 años de las imágenes satelitales de este trabajo.

Por otro lado, en el año 2010 aparece tanto un evento El Niño Moderado (2009-2010), como un evento La Niña Fuerte (2010-2011), presentando este año la mayor acumulación de mm en días de frío de los 5 años ya mencionados, con un poco más de 1000mm aproximadamente.

Por último, el año 2017 vio un evento La Niña Débil (2017-2018), llegando a aproximadamente 900mm acumulados durante días de frío. Pese a aquello, los valores de precipitación acumulada durante días de frío no coinciden del todo con la variación de superficie glaciar total en sus años respectivos, por lo que debe ser otro el factor que influye directamente sobre este descenso de superficie glaciar.

Por otro lado, esto podría significar que las precipitaciones registradas no corresponden a precipitación sólida, sino que a precipitaciones líquidas.

En lo que respecta a exposición y el emplazamiento morfológico en donde se ubican los glaciares, no existe una relación entre estos factores y la magnitud de sus retrocesos, como queda mejor evidenciado en el caso de los glaciares con exposición sur, entre los cuales se cuentan el glaciar con menor retroceso porcentual de las masas de hielo analizadas (Vodudahüe N°7 con $-3,33\%$ de su masa inicial) y el glaciar con mayor pérdida porcentual de superficie de los mismos (Vodudahüe N°3 con $-83,56\%$).

Tabla N°26: Variaciones areales (kilómetros cuadrados por año) de glaciares Zonas Sur B y Austral

El Niño				La Niña		
Weak - 10	Moderate - 7	Strong - 5	Very Strong - 3	Weak - 11	Moderate - 4	Strong - 7
1952-53	1951-52	1957-58	1982-83	1954-55	1955-56	1973-74
1953-54	1963-64	1965-66	1997-98	1964-65	1970-71	1975-76
1958-59	1968-69	1972-73	2015-16	1971-72	1995-96	1988-89
1969-70	1986-87	1987-88		1974-75	2011-12*	1998-99
1976-77	1994-95	1991-92		1983-84		1999-00
1977-78	2002-03			1984-85		2007-08
1979-80	2009-10			2000-01		2010-11
2004-05				2005-06		
2006-07				2008-09		
2014-15				2016-17		
				2017-18		

Fuente: Null, 2018.

8. CONCLUSIONES

Las imágenes satelitales adquiridas para el período de estudio, tanto de Landsat como de Sentinel resultaron de gran utilidad para llevar a cabo las metodologías y análisis correspondientes, observándose claramente los glaciares del área de estudio.

Dentro de la zona de estudio, se identificaron 17 glaciares, 1 en Cahuelmó y 16 Vodudahüe. Todos los glaciares analizados han visto reducida su superficie a ritmos variables entre sí y en montos disímiles entre glaciar y glaciar. Por un lado, se halla el glaciar Vodudahüe N°7 con una variación superficial nula para efectos de la digitalización llevada a cabo mediante el análisis de imágenes satelitales y, por el contrario, el glaciar Vodudahüe N°8, con la variación areal de mayor magnitud de toda la zona de estudio, perdiendo 1,43 km² en total durante el período 1985-2017, equivalente al 57,87% de su superficie inicial. Otros ejemplos de retrocesos porcentuales severos los constituyen los glaciares Vodudahüe N°4 (-53,85%), Vodudahüe N°10 (-55,17%), Vodudahüe N°1 (-61,54%), Vodudahüe N°14 (-69,49%), Vodudahüe N°12 (-76,36%), Vodudahüe N°15 (-77,27%), y Vodudahüe N°3 (-83,56%).

Pese a aquello, el glaciar con una mayor pérdida porcentual de superficie de todo el conjunto de glaciares corresponde al glaciar Vodudahüe N°3, el cual vio reducida su superficie inicial en un 84,93% al final del período de estudio. Por su parte, el glaciar con la menor pérdida porcentual de su superficie registrada, además del ya señalado glaciar Vodudahüe N°7, es el glaciar Vodudahüe N°2, con la pérdida del 11,32% de su masa inicial para el año 2017.

En lo que respecta a las tasas de variación areal, se puede establecer una tendencia generalizada a un incremento constante a través del tiempo del período de estudio de sus tasas de variación, pudiendo ser concluido al respecto que se observa una aceleración de este proceso. Destaca como la mayor tasa de variación la correspondiente al glaciar Vodudahüe N°8 (-0,014 kilómetros cuadrados por año), y como menor tasa de variación, la registrada por el glaciar Vodudahüe N°7, en concordancia con los datos de pérdida de superficie en km² expresados con anterioridad en esta misma sección.

La tendencia generalizada tanto al aumento de las temperaturas (de 10,32°C en el intervalo 1985-1998 a 10,46°C en el período 2010-2017) como al descenso de las precipitaciones (de 5548mm en el período 1985-1998 a 5295mm para el intervalo 2010-2017), no interfieren con las variaciones superficiales de los glaciares analizado si no que, por el contrario, no hacen más que acelerar y potenciar el retroceso de los glaciares analizados en este informe.

Si la tendencia evidenciada por los glaciares estudiados continúa, será necesario mantener e incluso incrementar el monitoreo de los glaciares tanto de la llamada zona glaciológica Zona Sur B por la DGA (2011) como del resto del país, por los eventuales impactos que estas puedan tener sobre los recursos hídricos del país y la vida humana.

BIBLIOGRAFÍA

Acuña, C. 2001. Variaciones recientes de los glaciares entre 28° y 41° de Latitud Sur y su relación con cambios climáticos. Memoria de título. Universidad de Chile. Facultad de Arquitectura y Urbanismo. Escuela de Geografía, 90 pp.

Ambrosio, G.; González, J.; Arévalo, V. 2002. Corrección radiométrica y geométrica de imágenes para la detección de cambios en una serie temporal. Departamento Ingeniería de Sistemas y Automática. Universidad de Málaga. Recuperado de: <http://mapir.isa.uma.es/varevalo/drafts/ambrosio2002crg.pdf> el 15 de Junio de 2017.

Aznar, E. s/f. Conversión dinámica: Fecha y Tiempo Día Juliano. Universidad de Granada. Departamento de Álgebra.

Bates et al., 2008. Climate Change and Water. Intergovernmental Panel on Climate Change. Brock, B.; Burger, F.; Rivera, A.; Montecinos, A. 2012. A fifty year record of winter glacier melt events in southern Chile, 38°S – 42°S. Environmental Research Letters, 7 (2012), 045403 (9pp).

Carballo, J.; Bell, James. Climate Change, Ocean Acidification and Sponges. Impacts Across Multiple Levels of Organization. Pp 144.

Carrasco, J., Casassa, G. and A. Rivera. 2002. Meteorological and Climatological aspects of the Southern Patagonia Icefields. En: Casassa, G., Sepúlveda, F., Sinclair, R. (eds.). The Patagonian Icefields. A unique natural laboratory for environmental and climate change studies. Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, 29–41.

Carrasco, J., Casassa, G. and J. Quintana. 2005. Changes of the 0°C isotherm and the equilibrium line altitude in central Chile during the last quarter of the 20th century. Hydrological Sciences Journal, 50(6), 933–948.

Carrasco, J., Osorio, R. and G. Casassa. 2008. Secular trend of the equilibrium line altitude in the western side of the southern Andes derived from radiosonde and surface observations. Journal of Glaciology, 54(186), 538 – 550.

Cembrano J., Lavenu A., Reynolds P., Arancibia G., López G., Sanhueza A., 2002. Late Cenozoic transpressional ductile deformation north of the Nazca–South America–Antarctica triple junction. Tectonophysics No.354, p. 289–311.

Centro de Estudios Científicos (CECS), 2009. Estrategia Nacional de Glaciares. Ministerio de Obras Públicas.

Centro del Clima y la Resiliencia. S/f. Explorador Climático. Disponible en: <http://explorador.cr2.cl/>.

Análisis de variaciones areales de los glaciares ubicados en las cuencas de Vodudahüe y Cahuelmó durante el período 1985-2017

Chávez, P. S. 1988. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. *Remote Sensing of Environment* 24:459–479.

Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA). 1998. Plan de acción nacional de cambio climático 2008 – 2012. CONAMA, 86.

Condom, T., Coudrain, A., Sicart, J.E. and S. Théry. 2007. Computation of the space and time evolution of equilibrium-line altitudes on Andean glaciers (10° N–50° S latitude). *Global and Planetary Change*, 59, 189–202.

Copé de los Mozos, R. 2014. Cálculo del retroceso glaciar en Isla Livingston y de su línea de costa para actualización de cartografía. Máster en Tecnologías de Información Geográfica. Pp.20.

DGA (Dirección General de Aguas). 2008. Dinámica de la cobertura nival entre las cuencas de los ríos Copiapó y Petrohué utilizando imágenes satelitales. Serie de Informes Técnicos 169.

DGA (Dirección General de Aguas). 2009. Estrategia Nacional de Glaciares. Fundamentos. Serie de Informes Técnicos 205.

DGA (Dirección General de Aguas); Rivera, A; Bown, F; Carrión, D; Caro, D; Gimeno, F; Farías, D; Cisternas, S; 2011. Variaciones Recientes de Glaciares de Chile, Según Principales Zonas Glaciológicas. Informe Final.

DGF (Departamento de Geofísica, Universidad de Chile). 2006. Estudio de la variabilidad climática en Chile para el siglo XXI. Informe elaborado por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile para CONAMA, 71 pp.

Diario La Jornada. 2018. La ruptura del Perito Moreno provocó un “tsunami” que inundó El Calafate. Recuperado de: http://www.diariojornada.com.ar/207920/sociedad/la_ruptura_del_glaciar_perito_moreno_provoco_un_tsunami_que_inundo_el_calafate/ el 27 de Marzo de 2018.

Ding, J. 2014. Retreating Glaciers of the Himalayas: A Case Study of Gangotri Glacier Using 1990-2009 Satellite Images. PP. 6-7.

Emol, 2017a. Las tres teorías que explicarían el deslizamiento de tierra en Villa Santa Lucía. Recuperado de: <http://www.emol.com/noticias/Nacional/2017/12/17/887681/Las-tres-teorias-que-explicarian-el-deslizamiento-de-tierra-en-Villa-Santa-Lucia.html> el 24 de Abril de 2018.

Emol, 2017b. Aluvión en Villa Santa Lucía: Esta mañana se reanudan labores de búsqueda de desaparecidos. Recuperado de: <http://www.emol.com/noticias/Nacional/2017/12/24/888617/Onemi-mantiene-alerta-roja-en-provincia-de-Palena-y-esta-manana-se-reanudan-labores-de-busqueda.html> el 24 de Abril de 2018.

Falaschi, D.; Bravo, C.; Masiokas, M.; Villalba, R.; Rivera, A. 2013. First Glacier Inventory and Recent Changes in Glacier Area in the Monte San Lorenzo Region (47°S), Southern Patagonian Andes, South America.

Falvey, M. and R. Garreaud. 2009. Regional cooling in a warming world: recent temperature trends in the Southeast Pacific and along the West Coast of Subtropical South America (1979 – 2006). *Journal of Geophysical Research*, 114, D04102, doi: 10.1029/2008JD010519.

Finn, M. P.; Reed, M. D.; Yamamoto, K. H. 2012. A Straight Forward Guide for Processing Radiance and Reflectance for EO-1 ALI, Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM+, and ASTER.

Fitzek, R. 2014. Restauración Ecológica de Bosque Siempreverde Templado Andino y de Bosques de Fitzroya Cupressoides y Pilgerodendron Uviferum en Huinay, Región de Los Lagos, Chile. Tesis de magister, Facultad de Ciencias forestales y Recursos Naturales. Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile. 206 pp.

Hall, D. K.; Riggs, G. A. & Salomonson, V. 1995. Development of methods for mapping global snow cover using moderate resolution imaging spectroradiometer data. *Remote Sensing of Environment*, 54, 127-140.

Herr. L. 2014. Los Glaciares y su Protección Jurídica en Chile. Memoria de Prueba para optar al grado de Licenciada en Ciencias Jurídicas y Sociales.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2007. Synthesis Report. Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2013b. Cambio Climático 2013. Bases Físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Resumen para responsables de políticas.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2014a. Climate change 2014: synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [Pachauri, R. and L.A. Meyer (Eds.)]. IPCC, Ginebra, Suiza.

Jakobsson et al., 2014. The dynamic Arctic. *Quaternary Science Reviews*. Volume 92, 15 May 2014, Pages 1–8.

Kääb, A.; Huggel, C; Paul, F.; Wessels, R.; Raup, B.; Kieffer, H. & Kargel, J. 2003. Glacier monitoring from ASTER imagery: accuracy and application. *Journal of EARSeL eProc*, 2(1), 43–53.

Kadota, T., Naruse, R., Skvarcam P. and M. Aniya. 1992. Ice Flow and Surface lowering of Tyndall Glacier, Southern Patagonia. *Bulletin of Glacier Research*, 10, 63-68.

Lara, A., Wolodarasky-Franke, A., Aravena, J.C., Villalba, R., Solari, M., Pezoa, L., Rivera, A. and C. Le Quesne. 2005. Climate fluctuations derived from tree-rings and other Proxy-records in the Chilean Andes: State of the art and future prospects. En: Huber, H., H. Gugman and M. Reasoner (Eds), *Global Change and Mountain Regions - A State of Knowledge Overview*. Advances in global change research, The Netherlands, 145 – 159.

Larsen, C.F., R.J. Motyka, J.T. Freymueller, K.A. Echelmeyer and E.R. Ivins, 2005: Rapid uplift of southern Alaska caused by recent ice loss. *Geophys. J. Int.*, 158, 1118-1133

Le Quesne, C., Acuña, C., Boninsegna, J.A., Rivera, A. and J. Barichivich. 2008. Longterm glacier variations in the Central Andes of Argentina and Chile, inferred from historical records and tree-ring reconstructed precipitation. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, doi:10.1016/j.palaeo.2008.01.039.

López-Escobar, L., Cembrano, J., Moreno, H. 1995. Geochemistry and tectonics of the Chilean Southern Andes basaltic quaternary volcanism (37-46°S). *Revista Geológica de Chile*, Vol.22, No.2, p. 219-234.

Miller et al., 2010. Temperature and precipitation history of the Arctic. *Quat. Sci. Rev.*, 29 (2010), pp. 1679–1715.

Luebert, F. & P. Plissock. 2006. *Sinopsis bioclimática y vegetacional de Chile*. Editorial Universitaria, Santiago, Chile. 316 p.

Martens, B. 2007. *Thermal Flying: A Guide for Paraglider and Hang Glider Pilots*. Pp 216.

Maturana, J; Bello, M; Manley, Michelle. 2004. Antecedentes históricos y descripción del fenómeno El Niño, Oscilación del Sur.

Ministerio del Medio Ambiente. 2016. Tercera Comunicación Nacional de Chile ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático.

Molina, C. 2016. Análisis de susceptibilidad de remociones en masa en las costas del Fiordo Comau, X Región, Chile. Memoria para optar al Título de Geóloga. Universidad de Chile. Santiago.

Morales, L. S.; Lang, F. T. 2010. *Práctico 2 ENVI: Correcciones, Transformación a Parámetros Físicos e Índices Radiométricos*. Universidad de Chile. Departamento de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales. Taller de Aplicaciones a la Percepción Remota. Semestre Primavera 2010.

Moreno, H. & Fuentealba, G., 1994. The May 17-19 1994 Llaima Volcano Eruption, Southern Andes (38°42'-71°44'W). *Revista Geológica de Chile* 21 (1): 167-171

Naruse, R., Peña, H., Aniya, M. and J. Inoue. 1987. Flow and Surface Structure of Tyndall Glacier, the Southern Patagonia Icefield, *Bulletin of Glacier Research*, 4, 133-140.

Análisis de variaciones areales de los glaciares ubicados en las cuencas de Vodudahüe y Cahuelmó durante el período 1985-2017

National Centers For Environmental Information. S/f. El Niño/Southern Oscillation (ENSO). Disponible en: <https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/enso/>.

Nishida, K., Satow, K., Aniya, M., Casassa, G. and T. Kadota 1995. Thickness Change and Flow of Tyndall Glacier, Patagonia. *Bulletin of Glacier Research*, 13, 29-34.

Null, J. 2018. El Niño and La Niña Years and Intensities. Disponible en: <http://ggweather.com/enso/oni.htm>.

Paul, F.; Mölg, N. 2014. Hasty retreat of glaciers in northern Patagonia from 1985 to 2011. *Journal of Glaciology*, Vol. 60. No. 224, 2014. Pp 1034-1036.

Quintana, J. M., y Aceituno, P. (2012). "Changes in the rainfall regime along the extratropical west coast of South America (Chile): 30°-43°S". *Atmósfera*, 25(1), pp. 1-22.

Ramírez-Morales, F —1996— Ecohistoria y destrucción en Chiloé Continental: El Valle del Vodudahue 1700-1996. In: Facultad de Filosofía y Humanidades, Universidad de Chile (Eds.). *Bases Históricas del Desarrollo Regional de Chile: 225-256 — Actas de la VII Jornada Nacional de Historia Regional de Chile*. Santiago.

Ramos, N.; Bell-lloch, I.; Galano, S.; Estrada, R.; Martín, G. 2009. Software para corregir los datos inválidos en las imágenes Landsat 7. *Cub@: Medio ambiente y Desarrollo; Revista electrónica de la Agencia de Medio Ambiente Año 9, No. 17, 2009 ISSN: 1683-8904*.

Rasmussen, L., Conway, H. and C. Raymond 2007. Influence of upper air conditions on the Patagonia icefields. *Global and Planetary Change*, 59, 203-216.

Rivera, A. and G. Casassa. 1999. Volume changes on Pío XI glacier, Patagonia: 1975–1995, *Global and Planetary Change*, 22, 233–244.

Rivera, A.; Casassa, G & Acuña, C. 2002. Mediciones de espesor en glaciares de Chile centro-sur.

Rivera, A; Acuña, C; Casassa, G; Bown, F. 2002. Use of remotely sensed and field data to estimate the contribution of Chilean glaciers to eustatic sea-level rise. *Annals of Glaciology*, 34, 367-372.

Rivera, A., Bown, F., Casassa, G., Acuña, C. and J. Clavero. 2005. Glacier shrinkage and negative mass balance in the Chilean Lake District (40°S). *Hydrological Sciences Journal*, 50(6), 963-974.

Rivera, A., Bown, F., Mella, R., Wendt, J., Casassa, G., Acuña, C., Rignot, E., Clavero, J. and B. Brock. 2006. Ice volumetric changes on active volcanoes in southern Chile. *Annals of Glaciology*, 43, 111–122.

Rivera, A.; Bown, F.; Wendt, A.; Bravo, C. 2012. Recent glacier changes in southern Chile and in the Antarctic Peninsula. *Anales Instituto Patagonia (Chile) vol.40 no.1 Punta Arenas*.

Análisis de variaciones areales de los glaciares ubicados en las cuencas de Vodudahüe y Cahuelmó durante el período 1985-2017

Rivera, A. & Bown, F. 2013. Recent glacier variations on active ice volcanoes in the Southern Volcanic Zone (37°S – 46°S), Chilean Andes. *Journal of South American Earth Sciences*.

Rivera, A.; Casassa, G.; Acuña, C.; Lange, H. 2000. Variaciones recientes de glaciares en Chile. *Investigaciones geográficas, Chile*, 34. pp. 29-60.

Rivera, A; Bown, F; 2013. Recent glacier variations on active ice capped volcanoes in the Southern Volcanic Zone (37°-46°S), Chilean Andes. *Journal of South American Earth Sciences*.

Rosenzweig, C., Casassa, G., Karoly, D.J., Imeson, A., Liu, C., Menzel, A., Rawlins, S., Root, T.L., Seguin, B. and P. Tryjanowski. 2007. Assessment of Observed Changes and Responses in Natural and Managed Systems. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 79-131.

Sarricolea, P., Herrera-Ossandon, M., & Meseguer-Ruiz, Ó. (2017). Climatic regionalization of continental Chile. *Journal of Maps*, 13(2), 66-73.

Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN). 2003. Mapa geológico de Chile. Escala 1:1.000.000.

SIG y Teledetección en la Universidad de Murcia. S/f. Fotointerpretación y Teledetección. Tema 7: Correcciones a las imágenes de satélites. Recuperado de: <http://www.um.es/geograf/sigmur/teledet/tema07.pdf> el 15 de Junio de 2017.

Skvarca, P.; Naruse, R. and H. Angelis. 2004. Recent thickening trend of Glaciar Perito Moreno, southern Patagonia. *Bulletin Glaciological Research*, 21, 45-48.

Soto, R., & L. Flores. 2011. Estudio fitosociológico de la vegetación boscosa de Huinay, Provincia de Palena (Región de Los Lagos, Chile). *LAZAROA* 32: 137-151.

Tele13. 2017. Desprendimiento de glaciar causó el aluvión en Villa Santa Lucía. Recuperado de: <http://t13.cl/238010> el 27 de Marzo de 2018.

Tele 13. 2018. Aluvión en Villa Santa Lucía: balance final deja 28 casas destruidas y 79 familias damnificadas. Recuperado de: <http://t13.cl/240192> el 27 de Marzo de 2018.

Tele 13. 2018. Encuentran nuevo cadáver en Villa Santa Lucía. Recuperado de: <http://t13.cl/246378> el 27 de Marzo de 2018.

UNEP. 2007. *Global Outlook for Ice and Snow*. UNEP/GRID-Arendal, Norway, 235.

United States Geological Survey. S/f. How is radiance calculated? Recuperado de <https://landsat.usgs.gov/how-radiance-calculated> el 14 de Junio de 2017.

Análisis de variaciones areales de los glaciares ubicados en las cuencas de Vodudahüe y Cahuelmó durante el período 1985-2017

Williams, R.; Hall, D.; Sigurdsson, O.; Chien, J. 1997. Comparison of satellite-derived with ground-based measurements of the fluctuations of the margins of Vanajökull, Iceland, 1973-92. Pp. 77.

Young, N. E.; Anderson, R. S.; Chignell, S. M.; Vorster, A. G.; Lawrence, R. & Evangelista, P. H. 2017. A survival guide to Landsat preprocessing. Concepts & Synthesis: Emphasizing New Ideas to Stimulate Research in Ecology. Ecology, 98(4), 2017, pp. 920–932.

Zenteno, P. 2008. Variaciones recientes de los glaciares en la zona centro sur de Chile y su relación con los cambios climáticos y la actividad volcánica. Memoria para optar al título de Geógrafo, Universidad de Chile, Santiago, 288 pp.