

Tabla de contenido

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Ubicación y zona de estudio	5
1.2 Hipótesis de Trabajo	7
1.3 Objetivos	8
1.3.1 Objetivo General:	8
1.3.2 Objetivos Específicos:	8
2. MARCO TEÓRICO.....	9
2.1 Marco geológico regional.....	9
2.1.1 Antecedentes tectónicos y morfoestructurales.....	9
2.1.2 Principales unidades geológicas	10
2.2 Marco climático.....	13
2.2.1 Antecedentes climáticos generales de los Andes Semiáridos del norte de Chile	13
2.2.2 Fenómenos asociados al ENSO y a otros índices climáticos en las precipitaciones y temperaturas.....	14
2.2.3 Condiciones locales de temperatura y precipitaciones en el área estudiada	15
2.2.4 Antecedentes paleoclimáticos y glaciaciones de los Andes Semiáridos del norte de Chile	17
2.2.5 Antecedentes sobre geomorfología glacial en los Andes semiáridos ...	18
2.3 Ambiente periglacial y glaciares rocosos.....	20
2.3.1 Permafrost.....	20
2.3.2 Glaciares rocosos	22
2.4 Geomorfología glacial	31
2.4.1 Formas de erosión glacial	31
2.4.2 Formas deposicionales asociadas a glaciares	32
2.5 Fotogrametría	33
2.5.1 Ortorectificación.	34
2.5.2 Modelos Digitales de Elevación (MDE).....	35
3 METODOLOGÍA	36
3.1 Introducción.....	36
3.2 Caracterización geomorfológica del área de estudio	36
3.2.1 Mapeo geomorfológico remoto y en terreno	36
3.2.2 Criterios de identificación de depósitos y formas glaciales	36
3.2.3 Criterios de identificación de glaciares rocosos	37
3.2.4 Confeción de un mapa geomorfológico	39

3.2.5	Análisis morfométrico: pendientes y exposición solar	39
3.2.6	Cálculo de contenido en hielo teórico y grosor de glaciares rocosos ...	39
3.3	Caracterización litológica y sedimentaria de los glaciares rocosos.....	40
3.4	Estudio de cambios volumétricos y morfológicos de los glaciares rocosos .	41
3.4.1	Adquisición de fotografías aéreas.....	41
3.4.2	Toma de puntos de control y de elevación a través de GNSS	43
3.4.3	Ortorectificación de las fotografías aéreas HYCON 1955, GEOTEC 2000 y generación de MDEs	46
3.4.4	Cálculo de las diferencias altimétricas entre los MDE generados	48
3.4.5	Ajuste de los modelos de elevación HYCON 1955 y GEOTEC 1999	48
3.4.6	Exactitud de los MDE generados.....	50
3.4.7	Estimación de cambios de volumen para el periodo 1955 – 1999, 1999 – 2018 y 1955 - 2018	51
3.4.8	Estimación del error de los cambios de volumen para cada periodo ..	51
3.4.9	Estimación del Δ volumen de agua equivalente	51
3.4.10	Generación de MDE año 2018.....	52
3.5	Cambios morfológicos observados entre 1955 – 2008	53
4	RESULTADOS	54
4.1	Geomorfología de la sub-cuenca del río Cochiguás	54
4.2	Geoformas glaciales	55
4.2.1	De erosión glacial.....	55
4.2.2	De acumulación glacial – morrenas	58
4.3	Geoformas periglaciales y criogénicas.....	67
4.3.1	Glaciares rocosos	67
4.3.2	Protalus Rampart.....	72
4.3.3	Laderas criogénicas.....	73
4.3.4	Lobulos y laderas de geliflujión	74
4.3.5	Rasgos criogénicos sobreimpuestos	75
4.4	Geoformas de remoción en masa	79
4.4.1	Conos de talud.....	79
4.4.2	Conos mixtos.....	80
4.4.3	Flujos de detritos	81
4.4.4	Avalancha de roca	81
4.5	Mapa geomorfológico	83
4.6	Morfología y sedimentología de los glaciares rocosos de la quebrada Caballos	84
4.6.1	Características y dimensiones	84

4.6.2	Caracterización morfológica	87
4.6.3	Cubierta detrítica	97
4.7	Variación histórica y estimación de volumen de los glaciares rocosos de la quebrada Caballos	106
4.7.1	Generación de Modelo Digital de Elevación (DEM) a partir de puntos GNSS	106
4.7.2	Ortorectificación y generación de MDE a partir de fotografías aéreas	107
4.7.3	Cambios de altura para cada período	112
4.7.4	Estimación del error en las diferencias de altura de los MDE	117
4.7.5	Estimación de cambios de volumen para el periodo 1955 – 1999, 1999 – 2018 y 1955 - 2018	117
4.7.6	Estimación del error de los cambios de volumen para cada periodo	117
4.7.7	Estimación del Δ volumen de agua equivalente	118
4.8	Cambios morfológicos observados entre 1955 – 2008	119
4.8.1	Fotografías Hycon 1955 – imágenes satelitales 2008	119
4.8.2	Fotografías GEOTEC 1999 – imágenes satelitales 2008	120
4.8.3	Mapeo de <i>ridges</i> en la superficie de ambos glaciares	121
4.9	Tendencias climáticas históricas	123
4.9.1	Datos meteorológicos: pluviometría y temperatura histórica en estaciones cercanas	123
5	DISCUSIÓN	128
5.1	Geomorfología de la sub-cuenca del río Cochiguás	128
5.1.1	Propuesta de evolución geomorfológica del sector de estudio	130
5.2	Glaciares rocosos de la cuenca	133
5.2.1	Glaciares rocosos de estudio 1 y 2: generalidades	134
5.2.2	Características sedimentológicas de los glaciares rocosos 1 y 2	135
5.2.3	Actividad de los glaciares rocosos 1 y 2	137
5.3.4	Contenido en hielo teórico	138
5.3	Variación histórica y estimación de volumen de los glaciares rocosos de la quebrada Caballos	140
5.3.1	Exactitud en los MDE generados el año 2018	140
5.3.2	Exactitud de los MDE generados y error estimado en las diferencias de altura calculadas	140
5.3.3	Variación altimétrica 1955 – 2018	142
5.3.4	Influencia de factores climáticos, geológicos y geográficos en el desarrollo y variaciones de los glaciares rocosos	144
5.3.5	Comportamiento de los glaciares rocosos 1 y 2 frente a las tendencias climáticas 1955 – 2018 y predicciones futuras	148

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	151
6.1 Conclusiones	151
6.2 Recomendaciones para trabajos futuros	152
BIBLIOGRAFÍA	154
ANEXOS	170
ANEXO A: MAPA DE PENDIENTES DEL SECTOR DE ESTUDIO	170
ANEXO B: MAPA DE RADIACION DEL SECTOR DE ESTUDIO.....	171
ANEXO C: GENERACION DE OTROS DEM A PARTIR DE INSUMOS DISPONIBLES Y CALCULO DE RMSE ASOCIADO	173
ANEXO D: MAPA GEOMORFOLOGICO DESARROLLADO POR PASKOFF (1968) 176	
ANEXO E: TEMPERATURA MEDIA ANUAL DEL AIRE (MAAT)	177
ANEXO F: TEST DE SIGNIFICANCIA ESTADISTICA PARA DATOS DE PRECIPITACION ESTACIONES CERCANAS.....	178
ANEXO G: ABSTRACT CONGRESO INTERNACIONAL DEL CAMBIO CLIMATICO Y SUS IMPACTOS, HUARAZ, PERU, 2017.	182
ANEXO H: ABSTRACT 5 TH EUROPEAN CONFERENCE ON PERMAFROST, CHAMONIX, FRANCIA, JUNIO 2018.	180
ANEXO I: ABSTRACT XV CONGRESO GEOLOGICO CHILENO, CONCEPCION, CHILE.....	115
ANEXO J: MAPA GEOMORFOLOGICO DE LA ZONA DE ESTUDIO (adjunto)	117