

# Tabla de Contenido

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. Introducción</b>  | <b>1</b>  |
| 1.1. Formulación del estudio . . . . .                                | 1         |
| 1.2. Hipótesis de trabajo . . . . .                                   | 2         |
| 1.3. Objetivos . . . . .  | 2         |
| 1.3.1. Objetivo general . . . . .                                     | 2         |
| 1.3.2. Objetivos específicos . . . . .                                | 3         |
| 1.4. Zona de estudio . . . . .  | 3         |
| 1.4.1. Ubicación . . . . .  | 3         |
| 1.4.2. Características del área de estudio . . . . .                  | 4         |
| <b>2. Antecedentes de la zona</b>                                     | <b>6</b>  |
| 2.1. Marco geológico . . . . .  | 6         |
| 2.1.1. Antecedentes geológicos regionales . . . . .                   | 6         |
| 2.1.2. Principales unidades geológicas . . . . .                      | 9         |
| 2.1.2.1. Rocas estratificadas . . . . .                               | 9         |
| 2.1.2.2. Rocas intrusivas . . . . .                                   | 12        |
| 2.1.2.3. Depósitos no consolidados . . . . .                          | 12        |
| 2.1.3. Geomorfología . . . . .  | 14        |
| 2.1.4. Glaciaciones del Cenozoico tardío . . . . .                    | 16        |
| 2.1.4.1. Glaciaciones del Mioceno a Pleistoceno . . . . .             | 16        |
| 2.1.4.2. Glaciaciones del Holoceno . . . . .                          | 17        |
| 2.2. Características climatológicas de Campo de Hielo Norte . . . . . | 18        |
| 2.2.1. Caracterización climática de la región . . . . .               | 18        |
| 2.2.2. Clasificación del clima en CHN . . . . .                       | 23        |
| 2.3. Actividad antrópica en la región de Aysén . . . . .              | 26        |
| 2.4. Hidrología . . . . .   | 26        |
| <b>3. Marco teórico</b>   | <b>29</b> |
| 3.1. Glaciología . . . . .  | 29        |
| 3.1.1. Definición glaciar . . . . .                                   | 29        |
| 3.1.2. Formación glaciar . . . . .                                    | 29        |
| 3.1.3. Sistema glaciar . . . . .                                      | 30        |
| 3.1.4. Clasificación glaciar . . . . .                                | 31        |
| 3.1.4.1. Clasificación morfológica . . . . .                          | 31        |
| 3.1.4.2. Clasificación térmica . . . . .                              | 32        |
| 3.1.4.3. Tipos de zonas de acumulación . . . . .                      | 32        |
| 3.1.5. Zonas de un glaciar . . . . .                                  | 33        |

|           |  |           |
|-----------|--|-----------|
| 3.1.6.    | Hidrología glaciar . . . . .   | 34        |
| 3.1.6.1.  | Acuífero de neviza . . . . .   | 36        |
| 3.1.6.2.  | Características acuíferos de neviza . . . . .  | 37        |
| 3.1.7.    | Dinámica glaciar . . . . .   | 39        |
| 3.2.      | Percepción remota . . . . .  | 41        |
| 3.2.1.    | Fundamentos básicos . . . . .  | 42        |
| 3.2.2.    | Radar de apertura sintética . . . . .  | 43        |
| 3.2.3.    | Características de SAR . . . . .   | 45        |
| 3.2.3.1.  | Distorsiones geométricas . . . . .   | 45        |
| 3.2.3.2.  | Resolución . . . . .   | 46        |
| 3.2.3.3.  | Ángulo de incidencia . . . . .   | 47        |
| 3.2.3.4.  | Retrodispersión . . . . .  | 48        |
| 3.2.3.5.  | Polarización de la señal . . . . .   | 50        |
| 3.2.3.6.  | Longitud de onda de un sensor . . . . .  | 51        |
| 3.2.4.    | Satélites . . . . .  | 52        |
| 3.2.4.1.  | Misión Sentinel-1 . . . . .  | 52        |
| 3.2.4.2.  | Landsat . . . . .  | 54        |
| 3.2.4.3.  | Sentinel-2 . . . . .   | 55        |
| 3.2.5.    | Radar de penetración terrestre (GPR) . . . . .   | 56        |
| <b>4.</b> | <b>Metodología</b>   | <b>58</b> |
| 4.1.      | Características hidrológicas . . . . .   | 58        |
| 4.1.1.    | Adquisición y procesamiento de datos de radar de penetración terrestre (GPR) . . . . .             | 58        |
| 4.1.2.    | Modelación de la profundidad del nivel freático . . . . .  | 60        |
| 4.1.3.    | Potencial hidráulico . . . . .   | 66        |
| 4.2.      | Extensión y ubicación del acuífero de neviza . . . . .   | 66        |
| 4.2.1.    | Base de datos y pre-procesamiento . . . . .  | 66        |
| 4.2.2.    | Detección y mapeo del acuífero de neviza . . . . .   | 69        |
| 4.3.      | Velocidades superficiales . . . . .  | 70        |
| 4.3.1.    | Base de datos . . . . .  | 70        |
| 4.3.2.    | Métodos y procesamiento . . . . .  | 72        |
| 4.3.2.1.  | Ajustes y filtros . . . . .  | 74        |
| 4.3.2.2.  | Selección de Datos y almacenamiento . . . . .  | 75        |
| 4.4.      | Relaciones entre velocidades superficiales e intensidades de retrodispersión S1 . . . . .          | 75        |
| <b>5.</b> | <b>Resultados</b>  | <b>80</b> |
| 5.1.      | Características hidrológicas . . . . .   | 80        |
| 5.1.1.    | Caracterización inicial . . . . .  | 81        |
| 5.1.2.    | Modelos de interpolación de las profundidades del nivel freático . . . . .                         | 90        |
| 5.1.2.1.  | Validación con el 70 % de datos de entrenamiento . . . . .   | 93        |
| 5.1.3.    | Potencia de reflexión del nivel freático (BRP) y potencia de reflexión interna (IRP) . . . . .     | 94        |
| 5.1.4.    | Potencial hidráulico . . . . .   | 96        |
| 5.2.      | Caracterización de intensidades de retrodispersión S1 y detección del acuífero de neviza . . . . . | 97        |

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| 5.2.1.    | Patrones de intensidades de retrodispersión S1 en CHN . . . . .   | 98         |
| 5.2.2.    | Caracterización temporal de patrones de intensidades de retrodispersión de S1 en base a imágenes ópticas . . . . .                              | 100        |
| 5.2.2.1.  | Octubre 2016 / Marzo 2017 . . . . .   | 101        |
| 5.2.2.2.  | Agosto 2017 / Marzo 2018 . . . . .  | 103        |
| 5.2.2.3.  | Octubre 2018 / Marzo 2019 . . . . .   | 103        |
| 5.2.2.4.  | Agosto 2019 / Marzo 2020 . . . . .  | 103        |
| 5.2.3.    | Extensión y ubicación del acuífero de neviza . . . . .  | 106        |
| 5.3.      | Velocidades superficiales . . . . .   | 112        |
| 5.3.1.    | Glaciar San Rafael . . . . .  | 112        |
| 5.3.2.    | Glaciar San Quintín . . . . .   | 115        |
| 5.3.3.    | Glaciar Steffen . . . . .   | 117        |
| 5.3.4.    | Glaciar Colonia . . . . .   | 119        |
| 5.3.5.    | Glaciar Nef . . . . .   | 121        |
| 5.3.6.    | Glaciares Gualas y Reicher . . . . .  | 123        |
| 5.3.7.    | Glaciares Acodado, Benito y HPN1 . . . . .  | 123        |
| 5.3.8.    | Glaciares Grosse y Exploradores . . . . .   | 124        |
| 5.3.9.    | Glaciares Leones, Soler y Pared Norte . . . . .   | 125        |
| 5.4.      | Relaciones entre velocidades superficiales e intensidades de retrodispersión S1 . . . . .   | 128        |
| 5.4.1.    | Glaciar San Rafael . . . . .  | 128        |
| 5.4.2.    | Glaciar San Quintín . . . . .   | 132        |
| 5.4.3.    | Glaciar Steffen . . . . .   | 136        |
| 5.4.4.    | Glaciar Colonia . . . . .   | 138        |
| 5.4.5.    | Glaciar Nef . . . . .   | 140        |
| <b>6.</b> | <b>Discusiones</b> . . . . .  | <b>144</b> |
| 6.1.      | Características hidrológicas . . . . .  | 144        |
| 6.1.1.    | Factores que determinan las profundidades del nivel freático . . . . .  | 144        |
| 6.1.2.    | Comparación de las profundidades del nivel freático con trabajo anteriores . . . . .  | 147        |
| 6.1.3.    | Potencia de reflexión del nivel freático (BRP) y potencia de reflexión interna (IRP) . . . . .  | 150        |
| 6.2.      | Caracterización y extensión de acuíferos de neviza a partir de intensidades de retrodispersión S1 . . . . .                                     | 152        |
| 6.2.1.    | Patrones y firmas en CHN a partir de intensidades de retrodispersión . . . . .  | 152        |
| 6.2.2.    | Comparación metodología de detección del nivel freático mediante GPR respecto a metodología de Brangers et al. (2020) con imágenes S1 . . . . . | 155        |
| 6.3.      | Limitaciones y consideraciones de la metodología aplicada en el estudio de las características hidrológicas de CHN . . . . .                    | 159        |
| 6.3.1.    | Datos GPR . . . . .   | 159        |
| 6.3.2.    | Imágenes satelitales S1 . . . . .   | 160        |
| 6.4.      | Análisis y comparación de velocidades superficiales . . . . .   | 160        |
| 6.4.1.    | Glaciares occidentales . . . . .  | 161        |
| 6.4.2.    | Glaciares orientales . . . . .  | 163        |

|   |            |
|---|------------|
| 6.5. Metodologías para el cálculo de las velocidades superficiales y limitaciones del estudio . . . . . | 166        |
| 6.6. Relaciones entre velocidades superficiales e intensidades de retrodispersión S1 . . . . .          | 167        |
| <b>7. Conclusiones</b>  | <b>170</b> |
| <b>Bibliografía</b>   | <b>172</b> |
| <b>Anexo A. Características hidrológicas</b>  | <b>188</b> |
| A.1. BRP y IRP relacionado a intensidades retrodispersión S1 . . . . .                                  | 189        |
| A.2. Comparaciones entre periodos para caracterización de intensidades . . . . .                        | 190        |
| A.3. Acuíferos de neviza detectados con polarización VV . . . . .                                       | 193        |
| <b>Anexo B. Velocidades superficiales</b>   | <b>195</b> |
| B.1. Campo de velocidades superficiales . . . . .   | 195        |
| <b>Anexo C. Relaciones entre series de tiempo de intensidades de retrodispersión S1 y velocidades</b>   | <b>198</b> |
| C.1. Glaciares Gualas y Reicher . . . . .   | 198        |
| C.2. Glaciares Acodado, Benito y HPN1 . . . . .   | 200        |
| C.3. Glaciares Grosse y Exploradores . . . . .  | 203        |
| C.4. Glaciares Leones, Soler y Pared Norte . . . . .  | 204        |