

INFORME TECNICO Y DE GESTIÓN FINAL

EJECUTOR:

Nombre	Universidad de Talca
Giro	Educación
Rut	
Representante Legal	Alvaro Rojas Marín

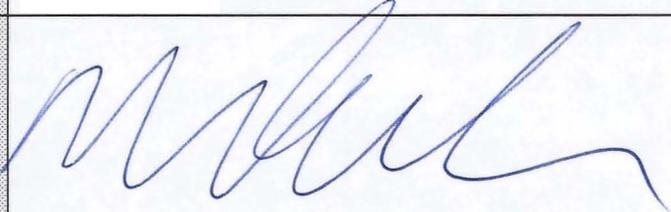
NOMBRE DEL PROYECTO: Estimación del volumen de nieve acumulada sobre grandes superficies utilizando vehículos aéreos no tripulados

CODIGO: EST-2016-0136

N° INFORME: FINAL

PERIODO: desde Marzo 2016 hasta Agosto 2017

NOMBRE Y FIRMA COORDINADOR PROYECTO

Nombre	Matthew Bardeen
Rut	
Firma	

OFICINA DE PARTES 2 FIA. RECEPCIONADO	
Fecha	10/11/2017
Hora	10:46
Nº Ingreso	43992

I. RESUMEN EJECUTIVO

La Dirección General de Aguas (DGA), elabora anualmente un pronóstico de deshielos en donde analiza los datos de precipitaciones, acumulación de nieve y caudales de los principales ríos, con el propósito de pronosticar los caudales medios mensuales esperables para la temporada de riego primavera-verano, basado en información de 19 cuencas entre Copiapó y Ñuble. Las bases del pronóstico se realizan de acuerdo a diversos criterios y supuestos, destacando un 20% de error aproximado, el cual está en directa relación con la calidad y cantidad de antecedentes disponibles y características hidrológicas de cada cuenca. El volumen de agua almacenada en los principales embalses proviene mayoritariamente de recursos nivales, cuyos usos primordiales son: riego, agua potable y generación eléctrica.

La innovación principal que se pretende desarrollar a través de este estudio corresponde a la descripción de una metodología basada en fotogrametría a través de SfM para determinar el volumen de nieve acumulada en una superficie a través del uso de Vehículos Aéreos No Tripulados UAV. En términos del grado de novedad, esta es la primera vez que la fotogrametría basada en SfM es utilizada por UAV para estudiar la factibilidad de usar técnicas fotogramétricas basado en SfM para estimar el volumen acumulado de nieve sobre grandes superficies, tanto a nivel nacional como internacional.

Lo anterior se pretende lograr a través de la generación de un modelo digital tridimensional durante el verano, la medición de la profundidad de la nieve en puntos estratégicos de la superficie en estudio con el apoyo de instrumentos terrestres, generación de modelos digitales tridimensionales durante el invierno, análisis de la diferencia de elevación entre los modelos digitales capturados en invierno y verano para estimar el volumen de nieve acumulada y precisión de la estimación,

Entre los principales resultados a alcanzar con esta iniciativa se encuentra la generación de modelos digitales base, generación de modelo digital invernal de la superficie de estudio, generación de mapas de diferencia de elevación, obtención de la precisión de mapas de elevación y la estimación del volumen de nieve acumulada sobre la superficie de estudio. De esta forma será posible determinar la factibilidad de utilizar esta metodología para la medición del volumen de nieve acumulada.

Los beneficiarios actuales y potenciales de los resultados obtenidos con la ejecución de la propuesta corresponden a todas aquellas entidades involucradas en el suministro y gestión de recursos hídricos para regadío, como por ejemplo: Junta de Vigilancia del Maule, comunidades del Maule Norte, asociaciones de canalistas del Maule sur, cooperativas de riego, entre otras organizaciones similares presentes en la Región del Maule y el resto del país. De forma indirecta, los beneficiarios corresponderían a todos aquellos pequeños y medianos agricultores que utilicen los recursos hídricos suministrados y gestionados por las entidades anteriormente descritas para sus cultivos. Además, se incluyen todas aquellas entidades que actualmente realizan mediciones del volumen de nieve acumulado, como por ejemplo la ONEMI y Centros de Sky, además de otras organizaciones con el mismo propósito a nivel internacional.

Este estudio se llevará a cabo en una de las estaciones que actualmente la DGA utiliza para realizar el pronóstico, que corresponde a la estación Río Maule en Armerillo.

II. TEXTO PRINCIPAL

1. Breve resumen de la propuesta

El objetivo principal de este proyecto es estudiar la factibilidad de usar fotogrametría basada en SfM para estimar el volumen de nieve en una superficie desde un vehículo no tripulado. Las técnicas usadas actualmente para medir la altura de la nieve son costosas o intensivas en términos de horas hombre y producen un error en el pronóstico de agua de alrededor de 20%. Con una mejor estimación de agua durante el año, las autoridades pueden tomar mejores decisiones acerca de su uso para los varios sectores que lo necesitan. Para calcular el volumen y medir la factibilidad, usamos el UAV para tomar imágenes de la superficie durante el verano, y en varias ocasiones durante el invierno. Al mismo tiempo que se tomaron las imágenes en el invierno, tomamos mediciones manuales de la altura de la nieve en 15 puntos predefinidos, para usarlos más tarde con el objetivo de valorar la precisión de la técnica. Con las imágenes construimos modelos tridimensionales y sus modelos digitales de la superficie (DEM para sus siglas en inglés, *Digital Elevation Model*). Comparamos los DEMs de cada modelo invernal al DEM de modelo construido en verano para estimar la diferencia, y por lo tanto, la altura de la nieve en cada punto de la superficie. Finalmente, comparamos las mediciones manuales de la altura de la nieve con la altura determinada por los DEMs. La precisión más alta que logramos obtener fue de 5.7cm promedio, y 10.6cm promedio absoluto (21% y 41% de error, respectivamente), en sólo uno de los modelos. Los otros modelos tuvieron errores desde 20cm (77%) hasta 18m (1566), dependiendo de la metodología usada para crear los modelos.

2. Cumplimiento de los objetivos del proyecto

Los objetivos del proyecto consisten de los siguientes:

General: Estudiar la factibilidad de usar técnicas fotogramétricas basadas en SfM para estimar el volumen acumulado de nieve sobre grandes superficies usando vehículos no tripulados (UAV).

Específicos:

1	Generar un modelo digital tridimensional durante el verano para más tarde compararlo con los modelos digitales tridimensionales invernales.
2	Medir la profundidad de la nieve en puntos estratégicos de la superficie en estudio con el apoyo de instrumentos terrestres para la comparación con los modelos digitales tridimensionales invernales.
3	Generar modelos digitales tridimensionales durante el invierno para su comparación con el modelo tridimensional de verano y mediciones de profundidad de nieve en puntos estratégicos de la superficie en estudio.
4	Analizar la diferencia de elevación entre los modelos digitales capturados en invierno y verano para estimar el volumen de nieve acumulada y la precisión de la estimación.
5	Evaluar y validar la eficacia y efectividad del sistema de estimación de volumen de nieve acumulada (pre-factibilidad técnica, económica y/o de mercado).
6	Difundir y transferir los resultados del estudio a través de la realización de un seminario de cierre dirigido a los beneficiarios directos e indirectos y a la comunidad en general.

De los objetivos específicos hemos logrado en su totalidad los numerales 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

Hasta el momento, el impacto más importante que hemos logrado fue establecer vínculos con varios de los actores que trabajan en el sector, incluyendo contactos de ENEL y Colbún.

3. Aspectos metodológicos del proyecto:

Método objetivo 1: Generación de un modelo digital tridimensional durante el verano para más tarde compararlo con los modelos digitales tridimensionales invernales.
<ol style="list-style-type: none">1. Identificar una superficie de estudio que cumpla con las siguientes condiciones, contando con el apoyo de profesionales de la DGA.<ol style="list-style-type: none">1. Área de no más 5 hectáreas.2. Fácil acceso por vehículo durante los meses invernales.3. La superficie de estudio debe contar con áreas no cubiertas con nieve en el invierno, para proveer puntos de referencia en los modelos de superficie digitales invernales.2. Hacer múltiples vuelos durante el verano del área con un vehículo aéreo no tripulado que cuenta con una cámara comercial que registre mediante imágenes la superficie en estudio.3. Construir modelos digitales de la superficie (Digital Elevation Model o DEM) usando software de fotogrametría (Agisoft Photoscan o Pix4d) y técnicas de Structure from Motion (SfM).4. Establecer la precisión de los modelos usando puntos georeferenciados y la variabilidad entre los modelos invernales.
Método objetivo 2: Medir la profundidad de la nieve en puntos estratégicos de la superficie en estudio con el apoyo de instrumentos terrestres para la comparación con los modelos digitales tridimensionales invernales.
<p>Es necesario identificar 15 puntos GPS para tomar mediciones manuales de la profundidad de la nieve que sean accesibles en el invierno. Lo anterior será apoyado por profesionales del Centro de Geomática de la Universidad de Talca.</p> <p>Las mediciones de profundidad en los 15 puntos seleccionados se realizarán de forma manual, cada vez que se visite la zona en estudio para realizar los vuelos que tomarán imágenes aéreas. Con ello, se estimarán las mediciones del volumen de nieve acumulada realizadas utilizando ambos métodos, de modo de estimar su precisión en cada medición.</p>
Método objetivo 3: Generar modelos digitales tridimensionales durante el invierno para su comparación con el modelo tridimensional de verano y mediciones de profundidad de nieve en puntos estratégicos de la superficie en estudio.
<p>Los modelos digitales de la superficie en invierno se construirán mediante las imágenes aéreas tomadas de la superficie en estudio identificada en el método objetivo 1, durante los meses de invierno, con vuelos de vehículos aéreos no tripulados durante varias horas del día.</p> <p>Paralelamente a ello, se irá corroborando manualmente la acumulación de nieve en los 15 puntos de medición pasiva instalados en el Método objetivo 2.</p> <p>Con la información rescatada se generarán los modelos digitales de la superficie usando software de fotogrametría (Agisoft Photoscan o Pix4d) para cada uno de los vuelos sobre la superficie en estudio.</p>

Método objetivo 4: Analizar la diferencia de elevación entre los modelos digitales capturados en invierno y verano para estimar el volumen de nieve acumulada y la precisión de la estimación.

Generaremos seis mapas de la diferencia elevación digital (dDEM) usando los resultados de objetivos 1 y 3 para dar la profundidad de nieve en cualquier parte de la superficie. Compararemos las profundidades indicadas en los puntos de medición manual con las profundidades indicada por el dDEM para cada uno de los seis mapas. Estimaremos el error promedio entre las mediciones manuales y las mediciones generadas por el UAV.

1. Generar los mapas de la diferencia en elevación digital (dDEMs) calculando las diferencias en altura del modelo de la superficie generado en objetivo 1 y los modelos generados en el objetivo 3.
2. Comparar las diferencias identificadas manualmente con las diferencias dadas por los dDEMs.
3. Estimar la precisión de las mediciones realizadas por el UAV.
4. Calcular el volumen total de nieve acumulada en la superficie para cada una de las 6 visitas al sitio.

Método objetivo 5: Evaluar y validar la eficacia y efectividad del sistema de estimación de volumen de nieve acumulada (pre-factibilidad técnica, económica y/o de mercado)

Analizaremos la factibilidad técnica de la metodología usada para capturar los datos y estimar el volumen en términos del error en la estimación, caracterización de vuelos, horas-hombre utilizadas y dificultades técnicas. Pretendemos evaluar la factibilidad económica la precisión obtenida en base de las horas-hombre utilizadas.

Método objetivo 6: Difundir y transferir los resultados del estudio a través de la realización de un seminario de cierre dirigido a los beneficiarios directos e indirectos y la comunidad en general

Difundiremos los resultados del estudio en un reporte para la DGA y CIREN y un seminario de cierre dirigido a los beneficiarios directos e indirectos y a la comunidad en general.

Principales problemas metodológicos enfrentados

Uno de los principales problemas con la metodología fue la falta de nieve en la temporada de 2016. Planificamos seis visitas durante la temporada, una cada mes desde Junio hasta Diciembre, para recoger las imágenes necesarias para crear los modelos invernales. Sin embargo, en Julio de 2016 hubo sólo una tormenta de nieve importante, la cual impidió acceso al sitio. En otras ocasiones durante la temporada de 2017, el gobierno de Talca cerró acceso al sector Lo Aguirre, donde el terreno del estudio está ubicado. Esto significó que no logramos las seis visitas al terreno, como originalmente estaba planificado.

En algunas ocasiones, fallas del equipamiento impidieron la recolección de las imágenes. En dos de las visitas, la batería de la cámara se agotó prematuramente, antes del fin de los vuelos. La razón más probable para este hecho fueron las bajas temperaturas verificadas durante esas visitas. En otra visita, intentamos un vuelo usando un estabilizador para la cámara, pero debido a su peso y el frío, las baterías se agotaron rápidamente, forzando el aborto del vuelo.

La falta de más GCPs fue otro problema metodológico. Con solo cuatro GCPs obtuvimos buena precisión de los modelos en el eje horizontal, pero no en el plano vertical.

El problema metodológico final fue que la cámara Canon A2200 que usamos en la temporada de 2016 presentó problemas antes de la temporada 2017. Por lo tanto, usamos una cámara Canon SX220IS para la temporada 2017. Estas cámaras tienen el mismo sensor de imágenes, pero tienen lentes diferentes. Esa diferencia puede causar errores sistemáticos en las imágenes que afectarán el modelo tridimensional.

Modificaciones de metodología introducidas durante la ejecución del proyecto

Inicialmente la metodología planificó la instalación de pértigas en los 15 puntos. Descartamos esa opción por razones legales -- el terreno pertenece al gobierno nacional, pero un parte es arrendado a ENEL para su uso durante la construcción de un proyecto hidroeléctrico. Debido a la breve duración del proyecto y la dificultad para conseguir el permiso necesario para instalar las pértigas en forma semi-permanente, cambiamos la metodología. En vez de pértigas, definimos 15 puntos GPS usando el equipo de GPS-RTK. En cada visita al terreno, medimos la altura de la nieve manualmente en cada uno de esos puntos.

Descripción detallada de la metodología y protocolos usado en el proyecto.

1. Ubicar el radio del GPS-RTK en el punto establecido
2. Ubicar y marcar de los GCPs (puntos de control en tierra). En verano marcamos los GCPs con bolsas blancas y una roca al medio para marcar el punto. En invierno marcamos los GCPs con un círculo de pintura negra y un cruz centrado en la posición del GCP.
3. Volar el dron, 80m a 100m de altura, con una velocidad de 3m/s. Captura de imágenes usando cámara fotográfica Canon SX210IS o Canon A2200 con CHDK Firmware y Intervalometer Script para tomar una imagen cada tres segundos. La duración del vuelo era aproximadamente de 22 minutos y la superposición de las imágenes de a lo menos 60%.
4. Ubicación y Medición de los puntos de muestreo. Ubicamos los puntos usando GPS-RTK y luego hicimos la medición insertando un palo metálico en la nieve hasta llegar al fondo, marcando el nivel de la nieve en el palo, y midiendo la distancia entre esta marca y el punto del palo. Las mediciones fueron registradas en papel.
5. Procesamiento de imágenes
 1. Usando Pix4D Pro, licencia educacional
 2. Importar las imágenes
 3. Marcar cada GCP en a lo menos 3 imágenes individuales (projection 32719)
 4. Empezar el procedimiento para crear el DEM (Digital elevation model)
6. Comparación de DEMs

1. Cargar el modelo base y el modelo con nieve en QGIS
2. Alinear los modelos para que tengan las mismas dimensiones.
3. Usar el Raster Calculator para obtener la diferencia entre los modelos
4. Cargar los puntos de medición y extraer el valor de los puntos de medición desde la diferencia calculada
5. Calcular el volumen de la nieve

4.

Actividad	Ejecutada	Análisis de Brecha
Identificación y caracterización de área de estudio	Si	
Reunión General (Inicio de marzo)	Si	
Generación de modelos para línea base	Si	
Estimar precisión de los modelos	Si	
Reunión General (Fin de abril)	No	
Definición de puntos GPS-RTK	Si	
Reunión General (Fin de Mayo)	Si	
Generación de modelos invernales	Parcialmente	Falta de nieve/acceso a sitio.
Reunión General (Fin de Junio)	No	Falta de quórum
Reunión General (Fin de Agosto)	No	Falta de quórum
Reunión General (Fin de Noviembre)	No	Falta de quórum
Mediciones manuales de la nieve acumulada.	Si	
Generación de las mapas de diferencia de elevaciones	Parcialmente	5 modelos generados de 6 planificados
Estimación de la precisión de las mediciones aéreas	Parcialmente	4 estimaciones completas, 1 parcial
Estimación del volumen de nieve aculado y error asociado	Parcialmente	Con el error encontrado, una calculación del volumen no tendrá sentido
Reunión General (Fin de Enero)	No	Falta de quórum
Preparación de reporte	No	Realicemos las últimas mediciones el 10 de octubre. No tuvimos tiempo finalizar el reporte.
Seminario de Cierre	Si	

5. Resultados del proyecto:

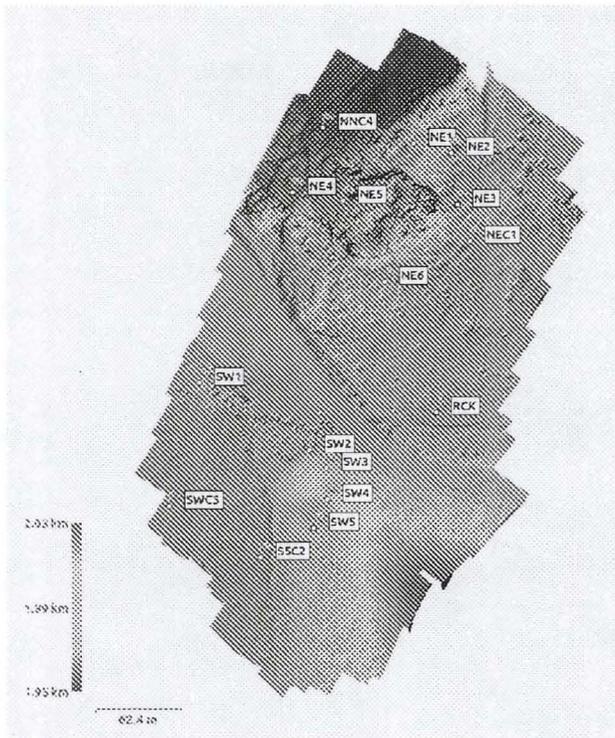
Nº OE	Nº RE	Resultado Esperado (RE)	Indicador de Resultados (IR)				
			Nombre del indicador	Fórmula de cálculo	Línea base del indicador (situación actual)	Meta del indicador (situación intermedia y final)	Metas logradas
1	1	Caracterización de la superficie de estudio	Superficie de estudio	Nº de condiciones cumplidas	0	3	3
1	2	Generación de modelos digitales base	Modelos digitales base	Nº de modelos base generados	0	2	1
1	3	Obtención de la precisión del modelo digital base generado	Precisión de modelo digital base	$\frac{\sqrt{\sum r^2}}{N \text{ Puntos}}$	0	9 cm.	6.6cm
2	4	Instalación de pértigas en la superficie de estudio	Pértigas instaladas	Nº de pértigas instaladas	0	15	15 Puntos de medición definidos
3	5	Generación de modelo digital invernal de la superficie de estudio	Modelos invernales	Nº de modelos invernales generados	0	6	5
3	6	Profundidad de nieve en la totalidad de pértigas instaladas durante las 6 visitas a la superficie de estudio.	Medición de la profundidad de nieve en pértigas	Nº de mediciones	0	90	90
4	7	Generación de mapas de diferencia de elevación	Mapas de diferencia de elevación	Nº de mapas generados	0	6	5
4	8	Obtención de la precisión de mapas de elevación	Precisión de los mapas de elevación	$\frac{\sqrt{\sum r^2}}{N \text{ Puntos}}$	0	9,9 cm.	10.67cm (mejor) 1876cm (peor)

Resultado 1

El área definida corresponde al sector de Lo Aguirre, kilometro 134 de Ruta CH-115, en las cercanías de la Laguna del Maule, definido como el trapecoide bajo las siguientes coordenadas GPS: (-35.969123, -70.567717), (-35.971553, -70.56904), (-35.969688, -70.566429), (-35.972634, -70.567715).

Resultado 4

Definimos 15 puntos de medición (4 Ground control points/GCPs más 11 puntos de muestreo)



Punto	Easting (m)	Northing (m)	Altura (m)
NEC1	358744.949	6018245.155	1983.752
SSC2	358589.804	6018012.5	1989.172
SWC3	358524.082	6018049.734	1989.65
NWC4	358636.471	6018328.928	1954.892
NE3	358735.16	6018271.613	1981.563
NE2	358730.846	6018310.583	1981.384
NE1	358702.76	6018317.517	1976.327
NE6	358681.061	6018215.216	1979.963
SW2	358625.521	6018090.907	1987.619
SW4	358638.705	6018054.854	2001.616
SW5	358628.775	6018033.699	1995.097
SW1	358545.603	6018141	1980.271
SW3	358638.134	6018077.98	1991.875
NE4	358613.975	6018280.939	1961.453
NE5	358650.818	6018274.696	1962.212

Resultado 2

Generemos solo un modelo base (anexo 2) debido a error de cámara en el segundo vuelo.

Resultado 3

Para saber el error absoluto del proceso, comparemos la altura marcado por el GPS con la altura indicado por el DEM base (de verano).

Tabla 1: Precisión del DEM relacionado al puntos medidos por GPS-RTK

Punto de medición	Altura GPS (m)	Altura DEM (m)	Error (cm)	Error Absoluto (cm)
NEC1	1983.752	1983.7073	4.47	4.47
SSC2	1989.172	1989.2347	-6.27	6.27
SWC3	1989.65	1989.7752	-12.51	12.51
NNC4	1954.892	1954.8987	-0.67	0.67
NE1	1976.327	1976.2875	3.95	3.95
NE2	1981.384	1981.3341	4.99	4.99
NE3	1981.563	1981.5363	2.67	2.67
NE4	1961.453	1961.3811	7.19	7.19
NE5	1962.212	1962.1394	7.26	7.26
NE6	1979.963	1979.8395	12.35	12.35
SW1	1980.271	1980.2428	2.82	2.82
SW2	1987.619	1987.5369	8.21	8.21
SW3	1991.875	1991.8125	6.25	6.25
SW4	2001.616	2001.5217	9.43	9.43
SW5	1995.097	1995.1176	-2.05	2.05
Error Promedio			-3.21	6.076

Para medir el error de la creación del modelo, hicimos dos vuelos durante el mismo día y generamos dos modelos con Pix4D en base de las imágenes captadas durante cada vuelo. Exportamos los modelos como un raster DEM (modelo de elevación digital). Importamos los DEMs a QGIS 2.14.11, alineamos los rasters y generamos la diferencia entre ellos usando el Raster Calculator. Con la diferencia calculada, usamos el algoritmo v.sample desde el Processing Toolkit para calcular el valor de raster de diferencia por cada punto de medición. Omitimos el punto SWC3 por su proximidad al borde del área de medición en el modelo base.

Tabla 2: Variación de altura entre dos vuelos en el mismo día.

Punto de medición	Diferencia de altura medido en el primer vuelo vs segundo vuelo (cm)	Error Absoluto (cm)
SW2	9.34	9.34
SW3	3.05	3.05
SW4	-10.57	10.57
SW5	-20.47	20.47
SSC2	-22.44	22.55
SWC3		
SW1	4.85	4.85
NE4	44.13	44.13
NNC4	44.8	44.8
NE5	46.6	46.6
NEC1	11.58	11.58
NE3	16.3	16.3
NE2	11.13	11.13
NE1	26.59	26.59
NE6	36.78	36.78
Error Promedio (cm)		14.41

Como muestra la tabla 2, el error base de los dos vuelos durante el mismo día era 14.4cm promedio con un error absoluto de 22cm.

Resultados 5, 6, 7, y 8

Tabla 3: Error de Snow, Dia Soleado (2017-06-10) vuelo 1 y vuelo 2, 4 GCPs + 3 GCPs ad-hoc

Puntos	Snow Height (cm) – 10-06-2017 1st				Snow Height (cm) – 10-06-2017 2nd		
	Medido	Inferido	Diferenci a	Error Abs	Inferido	Diferenci a	Error Abs
SW2	44.5	69.74	25.24	25.24	60.4	15.9	15.9
SW3	0	23.58	23.58	23.58	18.49	18.49	18.49
SW4	0	3.75	3.75	3.75	14.46	14.46	14.46
SW5	39	20.21	-18.79	18.79	40.6	1.6	1.6
SSC2	38	2.29	-35.71	35.71	24.646	-13.35	13.35
SWC3	28.5						
SW1	36	56.25	20.25	20.25	51.45	15.45	15.45
NE4	34	88.43	54.43	54.43	44	10	10
NNC4	24.5	68.13	43.63	43.63	21.59	-2.91	2.91
NE5	35.5	95.3	59.8	59.8	50.36	14.86	14.86
NEC1	36	42.62	6.62	6.62	31.55	-4.45	4.45
NE3	34	46.52	12.52	12.52	30.09	-3.91	3.91
NE2	0	5.43	5.43	5.43	-6.25	-6.25	6.25
NE1	0	23.22	23.22	23.22	-3.37	-3.37	3.37
NE6	43.5	103.69	60.19	60.19	67.35	23.85	23.85
		Error Promedio	20.30	28.08		5.74	10.67

Como muestra Tabla 3, en el vuelo 1 obtuvimos un error de 20.30cm promedio con error RMS de 33.89cm. En vuelo 2, el error era 5.74cm promedio con un error RMS de 12.55cm.

En el vuelo del día nublado, no marquemos los GCPs originales por razones del tiempo y del clima. Con este modelo elegimos cuatro puntos que eran visibles (no cubierto por la nieve) en ambos el modelo base y el modelo del nieve y usemos ellos como GCPs, tomando la altura y coordenados desde el modelo base. Esta situación es más cercano a un uso real de la metodología, donde no hay acceso fácil al terreno de medir durante el invierno para marcar los puntos. Además, en esta visita hubo nubes bajas y poco contraste en la nieve. Está significa que aunque los vuelos era completos, Pix4D no era capaz de ubicar algunas imágenes -- específicamente las imágenes con solo nieve -- resultando en un modelo incompleto. Como Tabla 4 muestra, el error resultante es muy elevado en comparación a los otros modelos, con un promedio de 533cm de diferencia.

Tabla 4: Error de Snow, Dia nublado (2016-07-20) 4 GCPs ad-hoc

Puntos	Altura de la Nieve (cm) – 20-07-2016			
	Medido	Inferido	Diferenci a	Error Abs
SW2	95			
SW3	59			
SW4	51			
SW5	107			
SSC2	83			
SWC3	87			

SW1	100				
NE4	97	-310	-407	407	
NNC4	86	-668	-754	754	
NE5	91	-108	-199	199	
NEC1	89	-377	-466	466	
NE3	104	-524	-628	628	
NE2	79	-743	-822	822	
NE1	30	-726	-756	756	
NE6	87	-147	-234	234	
			-533.25	533.25	

Las últimas mediciones estaban hechos el día 7 de Octubre, 2017 con un DJI Mavic. En esta visita quisimos probar dos cosas: la precisión con un gimbal (que el Mavic tiene integrado) y las fotos georeferenciadas. Tuvimos la esperanza que podemos mejorar los resultados anteriores con ambas. Lamentablemente, como muestra la tabla siguiente, no fue así.

Tabla 5: Altura de la nieve calculado por el DJI Mavic

Puntos	Altura de la Nieve (cm) – 07-10-2017 4GCPs				07-10-2017 NoGCPs	
	Medido	Inferido	Diferencia	Error Abs	Inferido	Diferencia
SW2	110	25.45	9.76	9.76	1873.99	1889.34
SW3	51	-340.49	-391.49	391.49	1601.69	1550.69
SW4	39.5	-685.32	-724.82	724.82	1302.35	1262.85
SW5	153	154.19	1.19	1.19	2363.69	2210.69
SSC2	172	169.17	-2.83	2.83	2149.25	1977.25
SWC3	169.5					
SW1	164	4.27	-159.73	159.73	1976.94	1812.94
NE4	143	101.84	-41.16	41.16	2107.92	1964.92
NNC4	149	178.77	29.77	29.77	2120.12	1971.12
NE5	127	74.89	-52.11	52.11	2056.9	1929.9
NEC1	131.5	119.76	-11.74	11.74	1999.34	1867.84
NE3	122	127.83	5.83	5.83	2073.16	1951.16
NE2	74	129.6	55.6	55.6	2017.72	1943.72
NE1	32	74.62	42.62	42.62	2003.83	1971.83
NE6	159	81.77	-77.23	77.23	2120.5	1961.5
	Error Promedio		-94.02	114.70		1876.12

Con 4 GCPs, tuvimos un error absoluto de más que 114cm. Analizando los resultados con más detalle, notamos que dos puntos (SW3, SW4) que explican mucho del error. Cuando analizamos el modelo, notamos que no era creado correctamente en esos dos puntos. Si eliminamos ellos de los cálculos, el error absoluto baja a 40.79cm. Sin usar los GCPs para construir el modelo, el error aumentó a más que 18m. Claramente un par de GCPs son necesarios.

En total, fuimos al terreno del estudio ocho veces. Logremos completar 13 vuelos, en cual captamos imágenes en seis de ellos. En otro dos vuelos captamos videos en vez de imágenes (por error de setting en la cámara). En el otro cuatro vuelos tuvimos fallos de equipamiento o de batería. En las ocho visitas, gastamos en promedio cuatro a cinco horas estableciendo el radio base del GPS-RTK, marcando los GCPs, haciendo los vuelos, y midiendo la altura de la nieve. Otro cuarto horas eran gastados en el viaje desde Talca hacia el terreno del estudio. Cada visita contempló a lo menos tres

personas. En total, gastamos más que 189 horas hombre en solo las vistas al terreno. Estimamos tres horas hombres de preparación antes cada visita y otro cuatro horas hombre en el procesamiento de las imágenes y análisis de los datos. Cada conjunto de imágenes tomó cercano de 12 horas de procesamiento en un moderno computador tipo escritorio con procesador Intel I7 con cuatro núcleos.

Debido a los resultados encontrados y las horas hombres metido, creamos que la metodología tiene su desafíos. Por una parte, abre la posibilidad de revisar superficies más extensas y estimar, con un error de alrededor de 20 a 30%, el volumen de la nieve acumulada. Sin embargo, el requisito para marcar los GCPs antes cada vuelo significa una inversión de tiempo grande, especialmente debido a la necesidad de tener más que cuatro que definimos originalmente. La literatura sugiere que 15 GCPs es un buen número para lograr una precisión alta. Con este número de GCPs, la técnica pierde su atractividad. Significa que técnicos tienen meterse en la nieve y enfrentar los riesgos inherentes en hacerlo. Si este es el caso, las mediciones de las rutas de nieve tradicionales ofrecen mejores resultados al mismo costo, debido a la información adicional que pueden entregar, como la densidad de la nieve, información que no se puede medir del dron.

Las limitaciones del equipamiento usado en esta metodología y su susceptibilidad de fallas definitivamente límite su utilidad. Consideramos nuestra experiencia y los pocos resultados que pudimos obtener como una lección a otros que quieran hacer estudios similares. Sin embargo, existe la posibilidad que otro equipo comercial (como los drones de DJI) con cámara estabilizada podría ofrecer más confianza y más precisión. Además, la técnica podría ser combinado con otras (como la ruta de nieve) para desarrollar modelos matemáticos que ofrecen mejores predicciones.

5.1 Resultados parciales obtenidos

- La metodología propuesta es capaz de crear los modelos 3D con nieve bajo ciertas condiciones
 - Día soleado
 - Poco viento
- La precisión de los modelos 3D depende por gran parte en las condiciones del luz y del establecimiento de puntos de control en tierra (Ground Control Points o GCPs en inglés)
- Calculamos que el error promedio absoluto de los modelos es 6.07cm y el error promedio es -3.21cm los puntos de control manual.
- El error promedio del modelo digital es -3.21cm en comparación a los puntos de medición definidos por GPS-RTK, aunque no es claro en qué medición quedo el error.
- Puntos débiles de la metodología:
 - Con solo los 4 GCPs marcados, obtuvimos un error significativamente más alto – 40cm error promedio.
 - Cambio de equipo (por ejemplo, la cámara) tiene la potencial a afectar los resultados.
 - El requisito de marcar los puntos de control en tierra complicaría la metodología en lugares de difícil acceso.
 - La baja temperatura del aire en una visita causó la rápida desgaste de baterías de la cámara y del dron.

5.2 Logro de Hitos

Hitos críticos	Fecha de cumplimiento (mes y año)	Cumplimiento (SI / NO)	Documentación de respaldo (indique en que n° de anexo se encuentra)
Superficie de estudio identificada y aprobada por el equipo del proyecto	31.03.2016	Si	1
Modelo N° 1 de línea base generado	15.04.2016	Si	2
Modelo N° 2 de línea base generado	15.04.2016	No	
Estimación de la precisión del modelo digital base realizada	29.04.2016	Si	3
Definición de puntos de las mediciones manuales	29.04.2016	Si	4
Modelo N° 1 digital invernal generado	31.05.2016	Si	5
Modelo N° 2 digital invernal generado	30.06.2016	Si	5
Modelo N° 3 digital invernal generado	15.07.2016	Si	5
Modelo N° 4 digital invernal generado	29.07.2016	Si	5
Modelo N° 5 digital invernal generado	19.08.2016	Si	5
Modelo N° 6 digital invernal generado	31.08.2016	No	
Estimación N° 1 de la profundidad de nieve en las 15 puntos GPS realizada	31.05.2016	Si	6
Estimación N° 2 de la profundidad de nieve en las 15 puntos GPS realizada	30.06.2016	Si	6
Estimación N° 3 de la profundidad de nieve en las 15 puntos GPS realizada	15.07.2016	Si	6
Estimación N° 4 de la profundidad de nieve en las 15 puntos GPS realizada	29.07.2016	Si	6
Estimación N° 5 de la profundidad de nieve en las 15 puntos GPS realizada	19.08.2016	Si	6
Estimación N° 6 de la profundidad de nieve en las 15 puntos GPS realizada	31.08.2016	No	
Mapa N° 1 de diferencias generado	23.09.2016	Si	6
Mapa N° 2 de diferencias generado	14.10.2016	Si	6

Mapa N° 3 de diferencias generado	4.11.2016	Si	6
Mapa N° 4 de diferencias generado	25.11.2016	Si	6
Mapa N° 5 de diferencias generado	16.12.2016	Si	6
Mapa N° 6 de diferencias generado	13.01.2017	No	
Estimación de la precisión de mapas de elevación realizada	20.01.2017	Si	7
Cálculo del volumen del nieve realizado	20.01.2017	No	
Determinación de la factibilidad de usar técnicas fotogramétricas basado en SfM para estimar el volumen acumulado de nieve sobre grandes superficies usando vehículos no tripulados (UAVs)	28.01.2017	Si	
Difundir los resultados del estudio	28.02.2017	Si	8
Resultados esperados logrados	28.02.2017	No	

5.3 Actualizar análisis económico con y sin proyecto

Análisis económico de la situación sin proyecto

La Dirección General de Aguas (DGA), organismo encargado de promover la gestión y administración del recurso hídrico, elabora anualmente (desde 1971) un pronóstico de deshielos en donde analiza los datos de precipitaciones, acumulación de nieve y caudales de los principales ríos hasta el 31 de agosto, con el propósito de pronosticar los caudales medios mensuales esperables para la temporada de riego primavera-verano, basado en información de 19 cuencas entre Copiapó y Ñuble, entre ellas, la cuenca Río Maule en Armerillo. Las bases del pronóstico se realizan de acuerdo a diversos criterios y supuestos, destacando un 20% de error aproximado, el cual está en directa relación con la calidad y cantidad de antecedentes disponibles y características hidrológicas de cada cuenca.

La estimación del volumen de nieve acumulada hoy en día se realiza a través de una red de monitoreo (sensores) que registran la información y la transmiten de forma instantánea a la central regional respectiva, sin embargo, ante una falla se debe inspeccionar en terreno, para su reactivación y rescate de datos, siempre y cuando las condiciones climáticas lo permitan. Además, el costo de cada estación bordea los 70 millones de pesos.

El volumen de agua almacenada en los principales embalses proviene mayoritariamente de recursos nivales, cuyos usos primordiales son: riego, agua potable y generación. Estimar con mayor precisión el volumen de nieve acumulada y a un menor costo dan origen al estudio propuesto.

Análisis económico de la situación con proyecto

Basados en la situación sin proyecto, se sabe que el costo de cada estación de monitoreo alcanza un valor aproximado de 70 millones de pesos. Si cada una de las estaciones se reemplaza por un Dron Industrial tipo DJI, más el piloto respectivo, añadiendo también las horas de análisis de datos, se

esperaba lograr con el proyecto a un costo no superior a los 50 millones de pesos. Considerando además de ello, disminuir el 20% en la estimación del pronóstico de nieve.

Con los resultados alcanzados, tras la ejecución del estudio, no fue posible determinar en su totalidad, dadas las diversas condiciones climáticas que resultaron en las grandes limitantes del proyecto, la factibilidad de utilizar esta metodología para la medición del volumen de nieve acumulada. Dada esta experiencia, se concluye que se requieren mayores recursos a los destinados en el presente proyecto para determinar la factibilidad técnica de utilizar esta metodología para disminuir el error del 20% en el pronóstico del volumen de nivel, insistiendo en la adversidad climática vivida durante la ejecución del proyecto.

Por esta razón, del punto de vista técnico es posible igualar y disminuir el porcentaje de error en la estimación solamente en algunos casos y no en la totalidad de ellos. Del punto de vista práctico no es una opción, por lo cual la determinación del impacto económico de una situación con proyecto, entendiendo ello como la realización del estudio, alcanzado los resultados propuestos totales en un comienzo, no aplica, puesto que la recomendación es mantener los actuales sistemas de medición.

5.4 Análisis de impacto logrado a la fecha medido y diferenciando en al menos los siguientes aspectos: descripción y cuantificación de los impactos obtenidos, y estimación de lograr otros en el futuro, comparación con los esperados, y razones que explican las discrepancias; ventas y/o anuales (\$), nivel de empleo anual (JH), número de productores o unidades de negocio que pueden haberse replicado y generación de nuevas ventas y/o servicios; nuevos empleos generados por efecto del proyecto, nuevas capacidades o competencias científicas, técnicas y profesionales generadas.

En la Tabla siguiente, se detallan los indicadores de impacto como línea base, metas al término de la propuesta y metas a los dos años finalizada la propuesta.

Indicadores de impacto					
Clasificación del indicador	Descripción del indicador	Fórmula del indicador	Línea base del indicador¹³	Meta del indicador al término de la propuesta¹⁴	Meta del indicador a los 2 años de finalizado la propuesta¹⁵
<i>Productivos, económicos y comerciales</i>	<i>Reducción del costo de una estación de monitoreo de acumulación de nieve</i>	<i>\$/estación de monitoreo</i>	<i>70 millones</i>	<i>50 Millones</i>	<i>50 Millones</i>
<i>Sociales</i>	<i>Nuevos conocimientos difundidos a beneficiarios durante ejecución de seminario de cierre</i>	<i>(Nº de asistentes beneficiarios)/(Nº de asistentes totales)*100</i>	<i>0</i>	<i>50%</i>	<i>60%</i>

En este sentido, y considerando el primer indicador "Productivos, económicos y comerciales" no se logra la meta, puesto que al no ser factible el uso de esta metodología para la estimación del volumen de nieve acumulado, se mantiene el costo actual correspondiente a 70 millones de pesos, aproximadamente. Pese a esto, se espera poder reducir este costo en el tiempo con el apoyo de nuevas técnicas de medición, resultado del avance tecnológico.

Del punto de vista social y teniendo en cuenta los resultados alcanzados, se realiza un seminario de difusión logrando una participación de 15 personas, en su mayoría estudiantes. Esto último dado al bajo compromiso de los beneficiarios durante la ejecución del proyecto.

5.5 Resultados e impactos

Considerando los resultados logrados con el proyecto, no es posible recomendar la replicabilidad de la metodología, en zonas con condiciones climáticas similares (alta montaña), tomando como base las 18 estaciones de medición restantes (excluida la estación Río Maule en Armerillo, donde se llevará a cabo el estudio) que actualmente la DGA utiliza para realizar el pronóstico, dados los desafíos adversos, del punto de vista tecnológico y práctico durante la ejecución.

En cuanto al desarrollo de nuevas capacidades y fortalecimiento de potencialidades locales, fue posible mediante el estudio, poder transmitir principalmente a la población estudiantil nuevo conocimiento relacionado a los avances de este estudio y finalmente sus resultados finales, sembrando los diversos desafíos actuales en futuros ingenieros que en un futuro cercano pueden cooperar en el avance tecnológico necesario para el uso de esta metodología en el foco original del proyecto.

Los demás enfoques se detallan en los apartados anteriores.

6. Fichas técnicas y análisis económico.

No aplicable

7. Problemas enfrentados durante la ejecución proyecto

Enfrentamos varios problemas durante la ejecución del proyecto. El mayor de ellos fue la variabilidad de la clima. En el año 2016 tuvimos pocos días de nieve, y la nieve que cayó desapareció rápidamente, por lo tanto solo logramos un par de mediciones. Una de esas mediciones mostró una debilidad de la técnica. Esa variabilidad provocó la extensión del plazo del proyecto a 2017, pero sin la entrega de recursos adicionales.

Otro problema significativo era el acceso limitado al terreno. Después de tormentas grandes, el gobierno provincial de Talca cerró acceso de la Ruta CH-115 en el sector Las Minas (km 101) o en el sector El Campanario (km 126). Esos cierres prohibieron el paso de personas civiles y limitaron nuestro acceso a terreno cuando era más importante haber realizado mediciones *in situ* (o sea, cuando hubo nieve).

8. Difusión de los resultados obtenidos

Presentemos los resultados del proyecto en un seminario de cierre, cual asistieron 14 personas. La presentación y registro de asistencia están incluidos en anexo 8.

9. Antecedentes globales de participación de productores

No aplicable.

10. Conclusiones

En conclusión, podemos decir que aunque la técnica estudiada tiene aspectos prometedores, hay muchos desafíos en su implementación práctica. Hemos probado que podemos construir modelos tridimensionales de superficies cubiertas por la nieve usando imágenes captadas con un dron. Hemos mostrado que también podemos obtener una precisión adecuada, con un error promedio de la altura de nieve de 5cm y absoluto de 10cm en uno de los modelos. Los otros modelos que hemos construido tuvieron errores más grandes, pero estamos seguros de que con más GCPs, podemos obtener resultados mejores. Sin embargo, la necesidad de tener más GCPs marcados significa que la medición usando drones no es ventajosa en comparación con las técnicas actuales. El interés en medir la altura de la nieve desde UAV ha crecido en los últimos años, y hay mucha literatura nueva que describe nuevas técnicas para la toma y pos-procesamiento de las imágenes. Por lo tanto, creemos que ese tema requiere mas estudio.

11. Anexos

1. Superficie definido

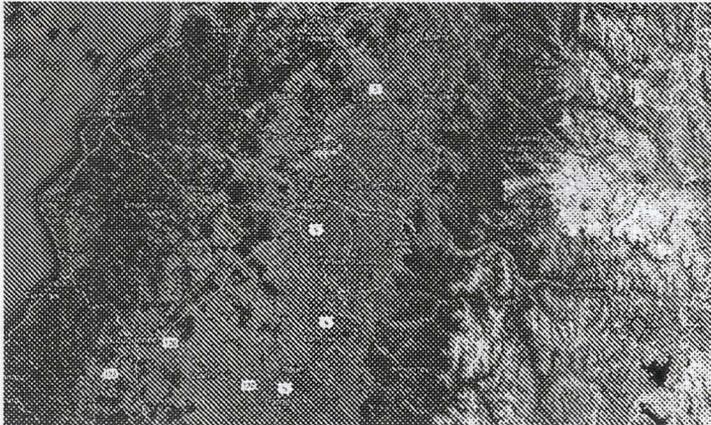


Figura 1: Area general de la Superficie Estudiada



Figura 2: Superficie Aproximada, Ruta CH115, km134

2. Modelo 1 (base)

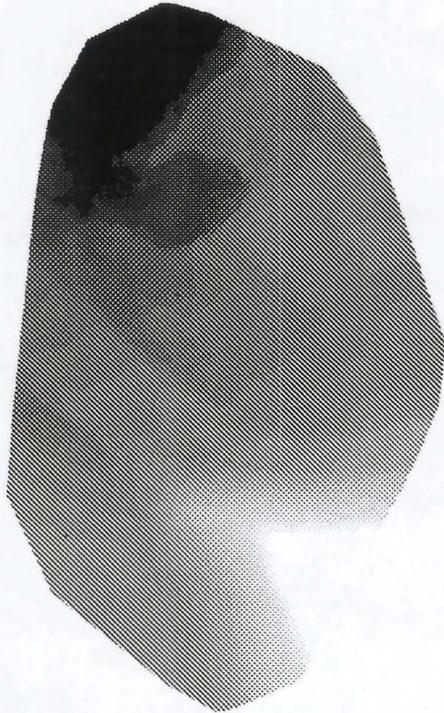


Figura 3: DEM sin nieve



Figura 4: Ortomosaico de Superficie

3. Estimación de precisión

Tabla 1: Precisión del DEM relacionado al puntos medidos por GPS-RTK

Punto de medición	Altura GPS (m)	Altura DEM (m)	Error (cm)	Error Absoluto (cm)
NEC1	1983.752	1983.7073	4.47	4.47
SSC2	1989.172	1989.2347	-6.27	6.27
SWC3	1989.65	1989.7752	-12.51	12.51
NNC4	1954.892	1954.8987	-0.67	0.67
NE1	1976.327	1976.2875	3.95	3.95
NE2	1981.384	1981.3341	4.99	4.99
NE3	1981.563	1981.5363	2.67	2.67
NE4	1961.453	1961.3811	7.19	7.19
NE5	1962.212	1962.1394	7.26	7.26
NE6	1979.963	1979.8395	12.35	12.35
SW1	1980.271	1980.2428	2.82	2.82
SW2	1987.619	1987.5369	8.21	8.21
SW3	1991.875	1991.8125	6.25	6.25
SW4	2001.616	2001.5217	9.43	9.43
SW5	1995.097	1995.1176	-2.05	2.05
Average Error			-3.21	6.076

Tabla 2: Variación de altura entre dos vuelos en el mismo día.

Punto de medición	Diferencia de altura medido en el primer vuelo vs segundo vuelo (cm)	Error Absoluto (cm)	Porcentaje de Error
SW2	9.34	9.34	
SW3	3.05	3.05	
SW4	-10.57	10.57	
SW5	-20.47	20.47	
SSC2	-22.44	22.44	
SWC3			
SW1	4.85	4.85	
NE4	44.13	44.13	
NNC4	44.8	44.8	
NE5	46.6	46.6	
NEC1	11.58	11.57	
NE3	16.3	16.3	
NE2	11.13	11.13	
NE1	26.59	26.59	
NE6	36.78	36.78	
Total	14.405	22.04	

4. Definiciones de puntos de las mediciones manuales

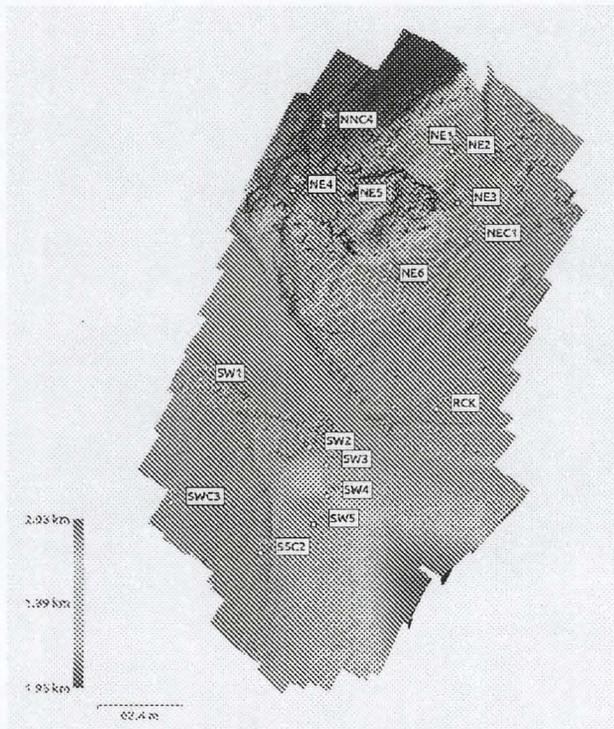


Figura 5: Los puntos de medición en la superficie

Tabla 3 :Los puntos de Mediciones Manuales.

Punto	Easting (m)	Northing (m)	Altura (m)
NEC1	358744.949	6018245.155	1983.752
SSC2	358589.804	6018012.5	1989.172
SWC3	358524.082	6018049.734	1989.65
NWC4	358636.471	6018328.928	1954.892
NE3	358735.16	6018271.613	1981.563
NE2	358730.846	6018310.583	1981.384
NE1	358702.76	6018317.517	1976.327
NE6	358681.061	6018215.216	1979.963
SW2	358625.521	6018090.907	1987.619
SW4	358638.705	6018054.854	2001.616
SW5	358628.775	6018033.699	1995.097
SW1	358545.603	6018141	1980.271
SW3	358638.134	6018077.98	1991.875
NE4	358613.975	6018280.939	1961.453
NE5	358650.818	6018274.696	1962.212

5. Modelos invernales

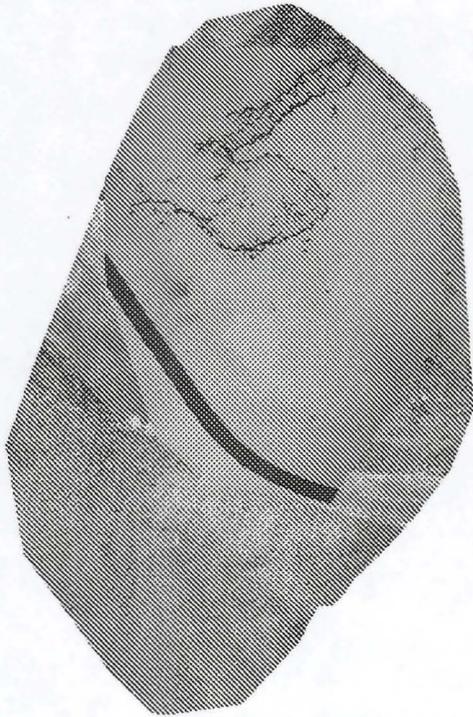


Figure 7: Ortomosaico 2016-07-20



Figure 6: Ortomosaico - 2017-06-10

Presentamos sólo los modelos generados en diferente días, en vez de todos los modelos.



Figure 8: Ortomosaico - 2017-10-03

6. Estimaciones y Mapas de profundidad de la nieve

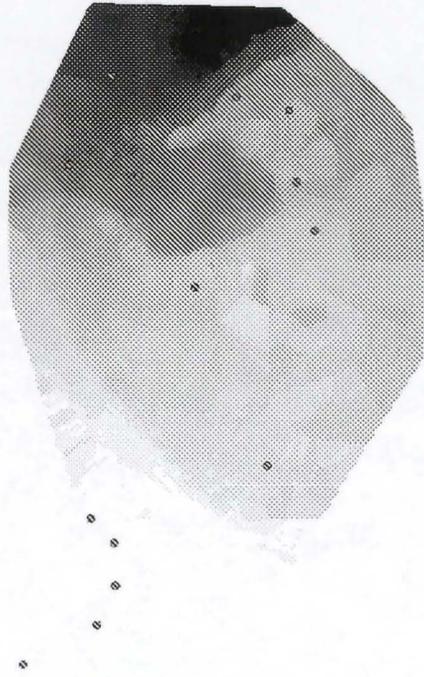


Figura 9: DEM de 2016-07-20. El DEM era incompleto debido a las condiciones climáticas.

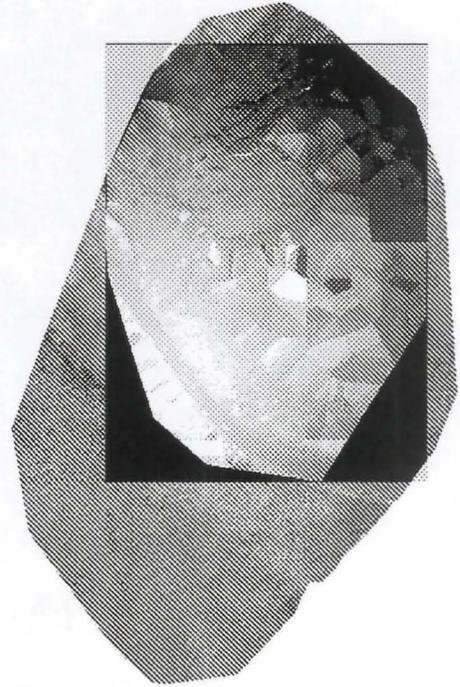


Figura 10: Altura de la Nieve 2016-07-20, derivado desde los DEMs. Los polígonos grandes son indicaciones de poca detalle en esas áreas.



Figure 11: Altura de la Nieve 2017-06-10, derivado desde los DMSs



Figure 12: DEM 2017-06-10



Figure 14: Altura de la Nieve
2017-10-03

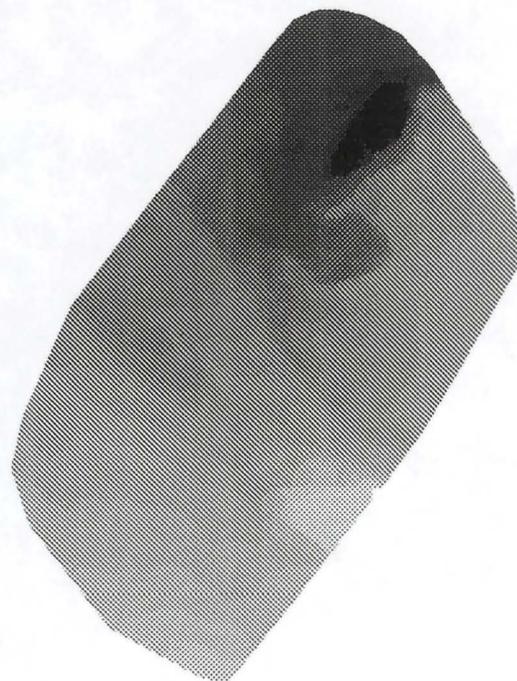


Figure 13: DEM 2017-10-03

7. Estimación de precisión de los mapas.

Tabla 4: Precisión de los mapas

	Altura Promedio (cm)	Error (cm)	% Error	Error Absoluto (cm)	% Error Absoluto
Snow Height (cm) – 20-07-2016 – Inferred GCPs	83.00	-533.25	-642.47	533.25	642.47
Snow Height (cm) – 10-06-2017 1st	26.23	20.30	77.37	28.08	107.05
Snow Height (cm) – 10-06-2017 2nd	26.23	5.74	21.88	10.63	40.53
Snow Height (cm) – 07-10-2017 4GCPs	119.77	-94.02	-78.51	114.71	95.77
Snow Height (cm) – 07-10-2017 NoGCPs	119.77	1876.13	1566.48	1876.13	1566.48

8. Difusión de los resultados

Lista de Resultados
Informe de Campo
Informe de Difusión de Resultados

Nº	Descripción	Fecha	Estado	Responsable
1	Informe de Campo	2016	Finalizado	[Firma]
2	Informe de Difusión	2016	Finalizado	[Firma]
3	Informe de Campo	2016	Finalizado	[Firma]
4	Informe de Difusión	2016	Finalizado	[Firma]
5	Informe de Campo	2016	Finalizado	[Firma]
6	Informe de Difusión	2016	Finalizado	[Firma]
7	Informe de Campo	2016	Finalizado	[Firma]
8	Informe de Difusión	2016	Finalizado	[Firma]
9	Informe de Campo	2016	Finalizado	[Firma]
10	Informe de Difusión	2016	Finalizado	[Firma]
11	Informe de Campo	2016	Finalizado	[Firma]
12	Informe de Difusión	2016	Finalizado	[Firma]
13	Informe de Campo	2016	Finalizado	[Firma]
14	Informe de Difusión	2016	Finalizado	[Firma]
15	Informe de Campo	2016	Finalizado	[Firma]
16	Informe de Difusión	2016	Finalizado	[Firma]
17	Informe de Campo	2016	Finalizado	[Firma]
18	Informe de Difusión	2016	Finalizado	[Firma]
19	Informe de Campo	2016	Finalizado	[Firma]
20	Informe de Difusión	2016	Finalizado	[Firma]

FIA EST-2016-0136

Estimación del Volumen de Nieve Acumulada
 Sobre Grandes Superficies Utilizando
 Vehículos Aéreos No Tripulados

