

Efecto de la sequía y del cambio climático sobre la acumulación de nieve en la cordillera de los Andes de Chile Central

JAMES MCPHEE

Para empezar, como tengo poco tiempo, lo primero de lo que quiero hablar es sobre la nieve porque es interesante hacer un ejercicio mental -ya que todos son hidráulicos acá-, podrían pensar en un embalse, todos conocen lo que son los embalses. La gracia de un embalse es que acumula agua, que tiene una cota que la puedo conocer y puedo saber que, en realidad, la cota que estoy mirando de agua es la misma que en todo el embalse, así que puedo saber cuánto volumen tengo almacenado. Después de tres o cuatro garabatos, tienes un celador o administrador que me dice cuánta agua me va a entregar para la temporada. La nieve es lo mismo, la diferencia es que uno no puede saber cuánto volumen tengo almacenado por simple inspección, porque tiene 1000 Km de longitud a partir de Chile central, y además, no puedo controlar cuánta agua voy a tener en algún instante del tiempo desde ese embalse, porque los procesos de derretimiento responden a un montón de distintos mecanismos que son muy difíciles de controlar y de predecir.

Me fui interesando a lo largo de mi carrera sobre este tema. La importancia de la Cordillera de los Andes, de la acumulación de nieve a efectos del uso del agua y del suministro del agua en la mayor parte de Chile, del punto de vista tal vez no geográfico pero del punto de vista económico, en realidad no tengo que hablar mucho de eso. Podemos ver una foto MODIS sobre la Cordillera y podemos ver cómo en realidad este rasgo de la superficie del terreno domina, en ciertas épocas del año el paisaje, y nuestra hidrología y sistemas ambientales también.

Es fácil ver, y todos los que son hidrólogos aquí han visto hidrogramas como éste en algún momento, de la inspección simple de la relación en el tiempo entre el flujo de agua en los ríos y la ocurrencia de precipitaciones durante el año. Uno puede ver la relevancia que tiene este almacenamiento, que típicamente se hace mayor hacia el norte y un poco menor hacia el sur, porque la Cordillera de los Andes va disminuyendo su elevación. Hay una combinación más compleja de fenómenos de precipitación líquida y derretimiento, así que ese es nuestro contexto espacial. Tenemos una Cordillera que es muy larga pero donde las zonas que nos interesan, desde el punto de vista de acumulación de nieve, tiene del orden de 1000 Km, tiene elevaciones que van entre los 5000 msnm y los 1800 – 2000 msnm a medida que vamos hacia el sur, y tenemos este gran terreno, un territorio donde hay un reservorio de agua el cual es muy difícil de observar, y del que es más o menos difícil poder predecir cuánta agua va a llegar desde él, y cómo va a evolucionar ese comportamiento en el tiempo

¿Qué es lo que ha pasado hasta la fecha? Lo que nos muestra la historia es que, como decía René hace un rato atrás, las temperaturas han venido, sistemáticamente, incrementándose en la zona cordillerana de Chile central y Chile centro sur, y eso debería reducirse, como se ha reducido en otras partes del mundo, en alguna modificación del régimen hidrológico. Cuando hablo del régimen

hidrológico, me refiero a la temporalidad de ocurrencia en los caudales de los ríos como resultado de los derretimientos de nieve. Sin embargo, cuando uno mira la estadística, y mira esta característica del hidrograma de caudales de primavera y de verano, no se ve ese efecto. Aquí hay harta información, pero lo que quiero mostrar en esta diapositiva es que, si uno mira las tendencias pasadas de la evolución en el cambio del tiempo, de cuándo ocurren los caudales, los círculos de tamaño pequeño indican que no ha habido cambios significativos -estadísticamente hablando- en los últimos 40 años o 50 años hasta la fecha en el régimen hidrológico de estos ríos de Chile central, que son alimentados por cuencas de gran elevación. Sin embargo, en el sur sí se pueden verificar tendencias estadísticas en el régimen de flujo de los ríos que están mucho más asociadas a variaciones de la precipitación más que cambios de la temperatura en esa región. No tenemos evidencia de que los cambios que estamos observando en el clima, en el pasado, estén afectando hasta el momento -de manera significativa- este recurso.

Otra pregunta que tenemos tiene que ver con las observaciones. Veíamos hace un rato mapas de anomalías de precipitación, pero si hacen un zoom a esa figura, podemos ver que todas estas estaciones están ubicadas en las zonas bajas, en los valles, zonas de fácil acceso y en el dominio que nos interesa, sobre los 1500 msnm, tenemos bastantes menos observaciones. Son suficientes estas observaciones para efectos de uso del agua, de pronósticos de caudales de deshielo, por ejemplo. Un alumno mío hizo, hace unos años atrás, un análisis estadístico sobre los pronósticos de los caudales de deshielo en algunas cuencas de Chile central, y es un análisis estadístico de cómo andaban esos errores comparado con el volumen que efectivamente ocurrió después de la temporada. Vemos que el desempeño de los pronósticos que típicamente se dispone en Chile, tienden a ser un poco mejor en la zona centro sur, estamos hablando de Ñuble, Tinguiririca, Cachapoal, Maipo, Aconcagua, pero cuando nos vamos al norte chico, ese desempeño tiende a ser un poco menos bueno, en general. Entonces surge la noción o idea de que, como vemos aquí también del punto de vista de estos histogramas que muestran la distribución de errores de los pronósticos en los últimos 30 años aproximadamente, en general, uno puede ver que en algunos casos el cero está contenido dentro de la distribución, así que los pronósticos, sí, efectivamente hacen algo, pero los errores estándares que están asociados a estas distribuciones pueden llegar al orden de un 10%, 20%, y en algunos casos hasta un 40%, lo cual sigue siendo menos que ideal del punto de vista de la gestión de recursos hídricos, porque le agrego una incertidumbre que quisiéramos no tener, de cuánta agua vamos a tener en la temporada.

En esta presentación, lo que quiero hacer es resumir un poco de la investigación que se está haciendo y se ha hecho, esencialmente la de mi grupo -perdonen por la publicidad innecesaria- para tratar de abrir algunas preguntas sobre los temas que están pendientes, del punto de vista de conocimiento, entendimiento, respecto de este recurso.

En primer lugar, conversar un poquito sobre lo que sabemos y lo que no sabemos del balance de masa y energía de la nieve. Esta es una figura muy simple, que

esencialmente trata de resumir las cosas que, para mi gusto, son importantes cuando uno empieza a estudiar nieve. En general, cuando hablamos de nieve en zonas mediterráneas o semi áridas, podemos distinguir dos temporadas; una temporada de acumulación, donde las cosas que nos importan son la precipitación típicamente -cuando hablamos de nieve, estamos hablando 80% de precipitación-, pero también hay otros fenómenos que nos interesan, que mueven la nieve de un lugar a otro en el espacio, y ese movimiento también tiene relevancia sobre cómo se va a derretir después. Cuando entramos a la fase de derretimiento de la nieve, nos interesa cómo esa nieve interactúa con la atmósfera, con la radiación, si es que el albedo es muy importante, y para el albedo nos van a interesar las impurezas acumuladas sobre la nieve; polvo, material biológico, y el tamaño de granos que incide sobre el albedo en el espectro más cercano al infrarrojo. La energía solar incidente, los patrones de nubosidad pueden ser importantes, y después los flujos turbulentos que también están asociados típicamente al viento y a la humedad relativa del aire, que inciden sobre la sublimación y evapotranspiración de agua y nieve desde el manto. Todos estos elementos están aquí, tenemos precipitaciones que pueden incidir de forma líquida sobre el manto, y después flujo que finalmente va a ser el agua que nos interesa a todos nosotros.

Si uno conoce los elementos que intervienen en el flujo de energía, uno puede reproducir razonablemente bien cuál es la evolución en el tiempo de un manto de nieve. Por ejemplo, tenemos una estación, siguiendo la tradición iniciada por la Universidad de Chile en los años '60 -al menos uno de los iniciadores aquí, que encontró bien importante estudiar esto en detalle y en terreno-. Tenemos instalaciones en el centro de ski de Valle Nevado -a todo esto, el '98 los centros de ski no abrieron, solamente abrió el colorado que tenía cañones de nieve- con todos los flujos medidos, y como se ve en esta figura de simulación, algunas observaciones manuales también -siempre hay bastante variación-, pero podemos simular la acumulación y el derretimiento de la nieve en ese sitio para esa temporada, el año 2015, bastante bien. Nos interesa la capacidad máxima de nieve acumulada, la duración de la temporada de nieve, y la tasa a la cual esta nieve se va a derretir, que finalmente lo vamos a traducir a un hidrograma a la salida del río.

Si tenemos un buen modelo de balance de energía al cual le podemos crear sus parametrizaciones físicas, podríamos también hacer estudios de impacto. Por ejemplo, ¿Qué le pasa a este manto de nieve si disminuyo la precipitación observada en un 20%? ¿Y si aumento la temperatura de la temporada en 1°? Podemos encontrar cosas interesantes, como que si vemos la simulación original -que es la amarilla- y aumentamos la temperatura en 1°, la línea que resulta no es demasiado diferente en Valle Nevado, lo que significa que este es un sitio -siguiendo la temática del Congreso- resiliente, porque, aunque cambie el clima, la dinámica de la acumulación nival no va a cambiar demasiado. Si aumentamos en 2°, ahí cambia un poco la acumulación, pero no cambia tanto el derretimiento. Ahora, si disminuyo la precipitación en un 20% y aumento la temperatura en 1°, ahí empezamos a tener efectos más visibles. Estos son los que llamamos modelos de impacto, que nos van a poder decir cuál es la sensibilidad de un sistema ante futuros cambios ambientales. Esto es trabajo de una tesis de pregrado que está haciendo

una estudiante, ahora está desesperada por terminar su memoria antes de que yo desaparezca.

Después, tenemos todos estos estudios de nieve que requieren un esfuerzo importante para recopilar información, porque estos son territorios difícilmente observables. Hay un montón de esfuerzos logísticos asociados a poder medir directamente cuáles son las propiedades de la nieve en algún sitio, y nosotros hemos -con mi grupo, aproximadamente desde el año 2009- estado recolectando observaciones directas de las propiedades de la nieve. Más de 3000 observaciones a lo largo de la Cordillera, desde Ovalle hasta Chillán, aproximadamente, con todo tipo de técnicas, desde las más básicas, pasando por apoyo logístico, hasta redes automáticas de sensores, e instrumentos más sofisticados que pueden medir las propiedades y la distribución de la nieve en todo el territorio.

La disponibilidad de imágenes satelitales, desde los años '70 y hasta la fecha, ha sido súper importantes para entender cuáles son las características de la nieve en un territorio grande, que de lo contrario podría ser muy difícil de observar.

Típicamente las imágenes MODIS o Landsat nos entregan información que tiene que ver con dónde hay nieve y donde no hay nieve, lo cual es bastante útil por muchas razones. Estábamos hablando de volumen de acumulación, pero queríamos saber más, tener más información que simplemente saber dónde hay y dónde no hay nieve, sino que además queremos saber cuánta agua hay acumulada en esa nieve.

Así que hicimos un ejercicio con un estudiante de magíster un par de años atrás, donde combinábamos la información de cobertura de nieve con un modelo balance energía, que se puede ver aquí -no importan las ecuaciones, son terribles-. Lo corrimos de manera retrospectiva, hicimos una reconstrucción del Equivalente Agua Nieve (EAN). Para hacer eso, se observa para cualquier pixel del producto MODIS, el último momento del año donde ya no hay nieve en ese pixel. Luego, se toma toda la serie de tiempo hacia atrás, reconstruyendo todos los forzantes atmosféricos y va sumando las energías hacia atrás en el tiempo. Con eso puedo obtener una reconstrucción del EAN al inicio de la temporada de derretimiento sin tener que depender de una estimación de la precipitación, que es difícil de obtener. Entonces uno puede tener cosas como ésta, donde construimos una climatología de la nieve acumulada en la región, entre Copiapó y Ñuble, en los años 2001 y 2014 -e graduó hace un par de años atrás- a partir del registro MODIS.

Este es un mapa con pixeles de 500 metros de lado, que muestran la climatología, es decir, el promedio de cómo se acumula a la fecha del primero de septiembre -al final de la temporada de acumulación- la nieve en la Cordillera. Aquí tenemos una escala de colores, pero el detalle no es tan importante en este caso. Lo importante es que podemos calcular las anomalías, es decir, cuáles son las diferencias para cada año respecto de este promedio sobre todo este dominio. Aquí ligamos esta figura con uno de los temas de la reunión, que tiene que ver con la sequía, donde podemos ver expresados y en combinación con las anomalías de precipitación, las

anomalías de acumulación de nieve. Los colores azules son años de superávit y en rojo los años de déficit. 2001, 2002 *se da esta cosa como culebreada*, años de déficit, años de superávit, 2004, año bastante seco, así suma y sigue. Típicamente, hay una especie de dipolo, donde se intercalan los años de superávit y de déficit en la zona norte y en la zona sur. El 2008 y hacia el 2009 empieza a pegar -esto lo hemos conversado con René alguna vez, no sabemos si es real o no es real esta cosa porque los años de déficit en la zona norte, dependen de una o dos tormentas que no llegaron-. Si uno lo mira con buena voluntad, de cierta forma esto se va propagando este patrón, desde el 2008 en adelante, cuando el 2010 se expresa completamente la sequía en todo el territorio. Hay algunas zonas en donde es menos severa, pero en general, desde el 2010 en adelante se puede ver cómo la acumulación de nieve sobre la Cordillera es deficitaria en todo el dominio.

Las sutilezas sobre dónde es más deficitaria o donde es menos deficitaria, son temas de interés y de más investigación, porque tiene que ver con cosas que los meteorólogos dominan más que yo, como las bajas segregadas, por ejemplo, que mueven los frentes un poco más hacia el norte, un poco más hacia el sur, etcétera. Pueden ser de interés para el sector de recursos hídricos a escala regional.

A partir de una reconstrucción como esta -que, una vez más, no incluye datos de precipitación para poder construirse, esa es la gracia que tiene un producto como este- uno puede estudiar cosas como, por ejemplo, si miramos sub regiones, centro norte, centro sur, uno podría ver los patrones de acumulación de nieve respecto de la elevación. No es un misterio que en la zona centro de Chile, la región que está entre los 2000 m y los 4000 m, es muy importante porque tiene mucha área y la acumulación de nieve es bastante significativa. Si nos vamos a la zona que está entre los 4000 m y los 5000 m, que esta que está acá, el tamaño del círculo es proporcional al área de la región, es un área mucho más pequeña, pero la acumulación promedio en los últimos 15 años, es aproximadamente un 30% mayor. Tenemos menos área, pero mucha más acumulación de nieve, y estamos hablando de una zona que puede ser importante, que debería ser importante para el suministro de agua. Si pensamos en las operaciones, es una zona sub informada, sub estudiada respecto a la zona que estaba más abajo. Uno puede hacer proyecciones con respecto a qué tipo de cosas podrían ser interesantes seguir estudiando en el futuro.

Otra cosa que es bastante interesante que encontramos, si miramos, por ejemplo, un detalle para la cuenca del Río Maipo -esta es la zona de Maipo en "El Manzano", aquí tenemos las acumulaciones año por año- es que cuando calculamos el promedio del equivalente en agua obtenido mediante este producto, muestra una correlación, yo diría muy buena, con los volúmenes de escorrentía. Entonces, algo que nos falta por hacer es comparar la correlación entre este producto espacial y la observación de una ruta de nieve o de un snowpillow ubicado en una cuenca respecto a los caudales, pues eso nos podría dar una indicación de que efectivamente hay un valor -desde el punto de vista de recursos hídricos- al momento de estudiar esta cosa espacialmente, y no solamente en un punto, o con

una estaca, o una estación. Eso respecto a las imágenes satelitales y la cosa espacial.

Después, hay estudios mucho más de nichos, más boutique si se quiere, respecto al impacto ambiental, al cambio climático, la interacción que hay entre la vegetación y la nieve. En Chile, a diferencia del hemisferio norte, no hay grandes extensiones de terreno donde haya bosques y nieves, pero sí hay zonas importantes económicamente y socialmente, donde las nieves y los bosques interactúan y son importantes.

La pregunta es ¿Qué pasa con la vegetación y la nieve? La vegetación tiene dos efectos sobre la nieve; por una parte la intercepta, y por otro lado le provee sombra. Estas son fotos tomadas en el sector de Las Trancas hace un mes atrás, o dos meses atrás, el 3 de septiembre -el 3 de septiembre, a todo esto, es el peak de la temporada de acumulación, históricamente-. Esto en Las Trancas, es una ladera sur, o sea que mira al norte, y se puede ver algo, que -por lo menos para mí es muy interesante- tenemos una zona *pelada* del cerro donde no hay nada de nieve, esto mira hacia el norte así que le llega mucha radiación, y acá tenemos bosques. Estos son bosques de hoja caduca, *Nothofagus* típicamente, y ustedes pueden ver que hay nieve en la zona boscosa. Después me doy vuelta y miro para el otro lado, en la ladera norte, ¡Oh! ¿Qué diablos? Aquí tengo otros bosques, no tengo nieve en la zona boscosa pero tengo nieve en la zona *pelada*. Yo no fui, yo saqué la foto nomás.

Queremos saber cuál es esa interacción, qué es lo que está pasando entre los árboles y la nieve, y qué va a pasar en un escenario de cambio climático, porque en un escenario de cambio climático no es solamente la acumulación de nieve, el clima y la precipitación van a cambiar, sino que además las dinámicas poblacionales de la vegetación van a cambiar también.

Pusimos algunas estaciones donde medimos automáticamente la altura de la nieve, y la medimos en un mismo sitio, en el bosque y fuera del bosque para ver cómo cambia esta cosa en el tiempo. Aquí tenemos el año 2015, y efectivamente, en este valle -un valle experimental que tenemos instrumentado en la Universidad, en la zona de Chillán- vemos un par de cosas en esta figura. Tenemos cuatro ubicaciones distintas, y en cada ubicación distinta hay dos sensores; un sensor en el bosque y un sensor en el claro. Lo que tenemos acá son: un sitio de baja elevación y exposición hacia el sur, baja elevación y exposición norte, y alta elevación y exposición sur, exposición norte.

Evidentemente el efecto de la elevación queda bastante claro aquí sobre la tasa de acumulación, una diferencia de aproximadamente 800 m de elevación significa una diferencia de acumulación de nieve de aproximadamente 1 m para este año.

Por otro lado, en el caso del claro se acumula más nieve -la línea roja es la que está en el claro, la línea morada es la que está dentro del bosque- y en el bosque se acumula menos. Eso confirma lo que la teoría indica, que la vegetación intercepta la nieve.

Sin embargo, lo que también podemos ver que es interesante, es que a pesar de que se acumula menos en todos los casos en el bosque, la fecha de desaparición de la nieve, aproximadamente, -salvo en este caso que está muy bajito- la fecha es más o menos la misma. Es decir, la nieve bajo el bosque dura más, se derrite mucho más lento y, finalmente, la duración de la temporada de nieve es la misma, a pesar de que haya habido menos nieve originalmente en el bosque. Esto incluso con árboles que pierden las hojas. La ciencia típicamente se ha desarrollado en el hemisferio norte donde tengo coníferas que tienen otro tipo de comportamiento desde el punto de vista radiativo.

Lo último, creo que es lo último, ¿qué pasa en la zona norte o la zona árida, donde no tengo vegetación? Tengo otro cuento completamente diferente; tengo mayores elevaciones, menos humedad, humedad relativa muy baja, bajas precipitaciones en general, y tengo todo tipo de situaciones sociales aguas abajo. Entonces, ¿qué ocurre en las zonas áridas? Lo que estamos haciendo acá con otro estudiante de pregrado, él lo que hizo fue tomar datos de esta estación meteorológica que con mucha gentileza, el CEAZA, nos facilitó información. Esta es la estación Trascadero, y aplicamos un modelo de balance de masa y balance de energía desarrollado en Suiza, el modelo Snowpack, aquí hay un dibujo súper bonito sobre qué es lo que hace el modelo.

Primero que nada, miramos los patrones y diferencias, tenemos datos para tres años. La gracia de esto es que podemos comparar años bien diferentes desde el punto de vista climático, 2013, 2014 y 2015. Esta figura muestra el equivalente en agua acumulado en la estación -en mm de agua-. Esto va desde el 15 de mayo en la horizontal, hasta el 17 de noviembre. Tenemos el año '13, plena sequía, poquita acumulación -menos de 50 mm de acumulación- y tenemos esta dinámica. Luego, en el 2014, empezó a nevar más tarde y fue mucho más seco que el 2013 -tuvimos esencialmente una nevada ese año y luego la nieve se derritió-. El '15 se recuperó un poquito -cada uno de estos aumentos es una tormenta-, tuvimos cuatro nevadas durante la temporada y después, típicamente más tardía, empezó en junio y la nieve duró hasta más tarde también, noviembre, algo distinto. Aquí se acabó la nieve en agosto, aquí se acabó la nieve en julio, esencialmente.

Con el modelo, que es bastante sofisticado y entrega figuras bien bonitas, hemos calculado otras cosas como la temperatura de la nieve. El modelo tiene una representación horizontal en capas, y por cada tormenta genera una capa, así que calcula explícitamente el transporte de energía en la vertical del manto. Entonces, lo que vemos aquí, es estas tres figuras en los mismos años, en la misma escala en la horizontal, y en la vertical tenemos altura de nieve acumulada. Los colores representan la temperatura de la nieve, -20° es el azul oscuro, y 0° en rojo, después de 0° ya no hay más nieve y tenemos agua.

Cosas simpáticas que empiezan a aparecer aquí, tienen que ver con cómo la nieve se calienta y enfría a muy alta frecuencia, es decir, los ciclos diarios de temperatura están penetrando bien fuertemente hasta casi la base del manto. El manto alcanza

casi temperaturas de 0° casi en toda la temporada. Ese es un manto que está muy propicio a derretirse.

La escala vertical en estas dos figuras es la misma, pero la escala vertical aquí es distinta porque había tanta más acumulación que no nos cabía en la figura. En el caso del año 2014 es diferente porque tenemos muy poquita nieve, pero esa nieve está proporcionalmente más fría, está más fría en general que esta nieve que está acá. Ahí aparece la primera no linealidad, en términos ingenieriles. Menos nieve, menos precipitación, pero menos temperatura, menos contenido de frío, tal vez más duración de la nieve, y esas cosas querríamos poder predecirlas.

El año 2015, extraño o sorprendente el resultado, una nieve más tardía, más acumulación, pero el patrón de temperaturas es completamente diferente. La respuesta de esta nieve respecto a la entrega de agua de esta nieve tiene una temporalidad y una dinámica completamente diferente a la de este, y completamente diferente a la de este. ¿Cómo vas a responder a la del próximo año? Depende de cuándo ocurrió la nieve, depende de la secuencia, de la superposición, de las tormentas, de los patrones de temperaturas, temperaturas máximas y mínimas -aquí las dos son importantes-. Son preguntas que estamos tratando de responder.

Finalmente, estamos en un momento interesante para la investigación de nieve, porque tenemos muchas herramientas tecnológicas a disposición. La información satelital es de tremenda relevancia, permite mapear muchas propiedades -no solamente la cobertura, sino que otras propiedades también- que nos dan conocimiento-. La red de observaciones actuales, si bien es adecuada para algunos propósitos, para muchos otros propósitos debiera ser mejorada y aumentada, sobre todo en un ambiente de cambios acelerados. Y, finalmente, con los modelos, mientras más conocemos de los procesos individuales, mientras más podemos observar la nieve y pasar tiempo cerca de ella, podemos entender cómo va reaccionando físicamente ante estos cambios, y si tenemos ese conocimiento, podemos, ojalá, en algunos casos predecirlo en combinación con otros escenarios futuros de climas y de meteorología. Gracias por la invitación, y felicitaciones por el evento, que ha estado muy interesante.

Preguntas

Creo que todos tenemos que felicitar a James de haber iniciado esta investigación tan amplia y tan extensa y compleja después de varios años que, con una iniciativa de la Universidad de Chile y la Universidad de California se inició ahí por el año '66, y que estuvo detenida hasta que llegó James, y que felizmente le ha dado un vuelto a la investigación de hidrología de nieve. Así que creo que todos lo tenemos que felicitar por esta iniciativa. Quería hacerte una consulta. ¿Has tenido la oportunidad o tienen programado una investigación que permita calibrar el modelo Snowpack?

Sí.

Porque las conclusiones que se pueden sacar, tú las pusiste recién, son tremendamente interesantes, importantes más bien. Pero están basados en lo que tú mostraste, entiendo, por una aplicación directa, no una modelación calibrada o validada.

Sí, no mostré -no tenía mucho tiempo para mostrar- los datos de evaluación del modelo y de validación. Validando contra alturas de nieve acumuladas -que es lo que tenemos disponible operacional- da bastante bien. Agradezco la pregunta porque en esta estación no teníamos datos de precipitación observada, y los datos de temperatura tampoco teníamos observados. Eso es una limitación, efectivamente. Contra altura de nieve, anduvo bastante bien. La incertidumbre que entrega la falta de datos de precipitación en el sitio, es tremenda, es enorme. Este año, acabamos de terminar el experimento en Valle Nevado, donde pusimos cadenas de sensores en el manto de nieve, además lo combinamos con un sistema de covarianza turbulenta para medir los flujos turbulentos directamente. Espero que de aquí a este verano podamos empezar a procesar esos datos y tener una validación un poco más precisa o más certera de cómo anda el modelo.

La gracia -solamente para complementar- es que muchos de estos modelos tienen parámetros calibrables, pero muchos de los otros parámetros son directamente observables en terreno, entonces dependemos menos de la calibración y de la manera que podamos hacer sobre las ecuaciones.

La granulometría de la nieve, si se considera en el modelo y si actualmente la pueden medir con otros equipos. ¿Qué tanto podría afectar en cuanto al resultado de eso?

La granulometría de la nieve es bien importante por varias razones. No me quiero extender demasiado. Es muy importante sobre todo en el albedo de infrarrojo cercano. Se puede demostrar que es bastante variable respecto a la granulometría. También las propiedades de almacenamiento de energía y de líquido de la nieve importan mucho. El problema que tiene esto son las observaciones, observar la granulometría es muy difícil. Hemos estado experimentando, primero con lupa, pero esas observaciones son un desastre y dependen del observador de manera terrible. Este año hemos estado experimentando con fotografías infrarrojas, tenemos datos pero no los hemos procesado así que tampoco quise mostrar mucho. Efectivamente, es todo un tema para desarrollar.

Yo me sumo a las felicitaciones, porque es un tema en Chile muy relevante y no es muy explorado.

O sea, hay mucha gente que trabaja mucho en esto, yo no quiero dar la impresión de que estoy solo en esta cuestión, pero sí me gusta y he logrado crear en la Universidad un programa que involucra también toma de datos en terreno de muchos tipos distintos, que antiguamente, o por mucho tiempo no se tuvieron. Esos

datos, espero que mucha gente los pueda aprovechar para avanzar en su propio trabajo.