Investigación sobre Análisis de Derretimiento de Nieve en la cuenca del Río Maipo

Francisco Alvarado Esturillo

Experto JICA: Jun Kurosawa

29 de Abril de 2005

Índice

1. Introducción 3
2. Descripción de la Cuenca del Río Maipo 4
3. Datos Meteorológicos, Fluviométricos y de Nieve Existentes en la Cuenca 7
4. Entrevistas a Expertos 14
   4.1 1ª Reunión (Dirección General de aguas) 15
   4.2 2ª Reunión (Centro de Estudios Espaciales) 16
   4.3 Visita a Terreno 19
5. Documentos Relacionados y Modelo de Derretimiento 26
   5.1 Documentos Relacionados 26
   5.2 Metodologías de Derretimiento 28
   5.3 Modelo de Derretimiento y Escorrentía 30
      5.3.1 Snowmelt Runoff Model (SRM). Modelo de Escorrentía de Fusión de Nieve .. 31
6. Conclusión 36
7. Anexo 37

1. Introducción

En la agricultura, el agua es un factor indispensable. La fuente de esta agua, en general, se obtiene de los rios o aguas subterráneas y de las lluvias que se presentan en el año. Existen muchos estudios e investigaciones relacionadas con el ciclo circulatorio del agua y otras investigaciones que tratan de pronosticar la cantidad de lluvia que caerá dentro del año, pero hay pocos estudios que traten de pronosticar cuando lloverá exactamente al año siguiente, ya que es muy difícil saber cuanta agua caerá producto de las lluvias y en que zonas de los ríos será.

En algunas determinadas zonas agrícolas de Chile, el recurso de agua de todo el año depende exclusivamente del derretimiento de la nieve acumulada en la época invernal, debido que durante el resto del año no se presentan precipitaciones. Por lo tanto, el factor determinante de estas zonas esta dado por lograr saber el tamaño que tendra el caudal del rio debido a los deshielos. Si se logra tener una predicción de éste, se podrá tener una proyección eficaz de la actividad agrícola.

Razón por la cual es muy importante conocer el estado de acumulación de nieve en la cordillera, para poder asi estimar la cantidad de agua que se agregara al caudal de los ríos producto del derretimiento de la nieve.

El pronóstico de volúmenes de aguas proveniente de los deshielos y del derretimiento de las nieves es de mucha importancia en la agricultura, donde los regantes requieren de información que les permita tomar adecuadas decisiones acerca del tipo, extensión y distribución de los cultivos. Sin embargo para poder pronosticar la cantidad de ésta agua existe un gran número de inconvenientes. Teóricamente es posible poder conocer la cantidad de nieve acumulada en la cordillera y la diferencia de ésta entre un año y otro. Pero el problema real que existe en la cordillera de los andes es que hay limitaciones en la medición de ésta y es necesario definir metodologías.

El presente trabajo tiene por objetivo entregar un pequeño resumen de todas las actividades desarrolladas en la investigación sobre el análisis de derretimiento de nieves, desde la recolección de documentos relacionados al tema hasta la entrega de una de las posibles metodologías que se podrían aplicar en el estudio.

2. Descripción de la Cuenca del Río Maipo

A continuación se describe en forma muy general y breve algunas caracteristicas de la cuenca del Maipo, por ser esta cuenca una de las mas importantes en este estudio.

La cuenca del río Maipo se encuentra situada entre las latitudes 32°55' - 34°15' Sur, y tiene una extensión estimada de 15.157 Km2.

Geográficamente, esta cuenca cubre tres regiones político – administrativas: La Quinta Región, la Región Metropolitana y la Sexta Región.

El clima predominante en la cuenca del Río Maipo, puede clasificarse como templado calido con abundantes lluvias en los meses de invierno y una estación seca prolongada.

Las temperaturas medias no varían entre la costa y el interior del valle. La diferencia media entre las máximas y minimas diarias es de 14 °C a 16 °C.

La precipitación media es del orden de los 350 mm año alcanzando valores de 1500 mm/año en la parte alta de la cordillera.

Las alturas excepcionales que presenta la cordillera de los andes en esta parte, (sobre los 5000 mts.), originan una glaciación importante con nevazones estacionales considerables.

Su régimen hidrológico es de alimentación mixta, o nivo-pluvial. En sus zonas alta y media el río Maipo es de régimen marcadamente nival, presentando un gran aumento de caudal en los meses de primavera producto de los deshielos cordilleranos. En la zona baja, el río Maipo posee un régimen pluvial, por lo cual presenta crecidas asociadas directamente con las precipitaciones.

El río nace en las laderas del volcán Maipo a 5.623 m.s.n.m. con las caracteristicas de una quebrada cordillerana. La altura considerable que presenta la cordillera de Los Andes en esta zona permite una glaciación importante y una nivación estacional considerable que contribuye a fijar las características hidrológicas del río.

En las inmediaciones de San Gabriel (1.240 m.s.n.m.) ya tiene las características de un río importante luego de haber recibido los aportes de los ríos Volcán y Yeso. Al nor-poniente del poblado de San José de Maipo recibe los aportes de su afluente más importante del sector cordillerano, el río Colorado, cuyo caudal en el sector de confluencia tiene un promedio anual de 26 m3/s.

Entra al valle central en el sector de La Obra, corriendo en dirección oeste por un cauce profundo, presentando un caudal medio anual de 100 m3/s. Luego, y cerca de la

Cordillera de la Costa recibe desde el sur los aportes provenientes del estero Angostura, los que a su vez provienen en parte importante de sus tributarios los ríos Peuco y San Francisco.

Al iniciar su recorrido a través de la Cordillera de Costa, recibe por su ribera derecha, los aportes del río Mapocho. Este es su principal afluente tanto por la cuantía de sus aportes como por la superficie agrícola que beneficia, así como por ser el principal receptor de las descargas de aguas servidas de la ciudad de Santiago

El sector comprendido entre La Obra y la confluencia con el río Mapocho, es también denominado Maipo Central, en donde el río se desliza por un cauce cada vez más ancho, presentado hasta tres corrientes separadas, las que producto de la alta pendiente que posee el cauce del río no producen meandros de importancia.

Entre La Obra y la confluencia del río Clarillo, el río está limitado por riberas bastante profundas, al sur de las cuales se encuentra el área de riego de la zona de Pirque. Es en este sector donde se producen las extracciones más importantes de las aguas del río.

En el curso inferior, luego de recibir los aportes del Mapocho, su principal tributario corresponde al estero Puangue, recibiendo escasos aportes de los esteros Popeta, El Sauce y San Juan. El estero Puangue se abastece de recursos propios provenientes de precipitaciones ocurridas en la cuenca, así como también recibe retornos de riego de las áreas servidas por los canales Las Mercedes (7.732 hectáreas) y Mallarauco (6.275 hectáreas), ambos servidos con recursos del río Mapocho.

Es necesario señalar que al estero Puangue se descargan en algunas oportunidades los recursos provenientes de la Central Hidroeléctrica Carena que se abastece en parte con los recursos del Canal Las Mercedes (aproximadamente 5.0 m3/s), en la época en que los regantes del Canal las Mercedes deciden verter sus excedentes a dicho estero.

Finalmente, y luego de un recorrido de aproximadamente 250 kilómetros desde su nacimiento, desemboca al Océano Pacífico, en Llolleo, inmediatamente al sur del Puerto de San Antonio, Quinta Región.

El río Maipo, administrativamente, y desde el punto de vista de la realidad como se ha operado normalmente, se encuentra dividido en tres secciones:

- Primera Sección: Abarca desde la Cordillera de los Andes hasta el puente del ferrocarril Paine – Talagante.

- Segunda Sección: Esta sección comprende desde el fin de la primera hasta la confluencia de los ríos Maipo y Mapocho.

- Tercera Sección: Comprende desde la confluencia de los ríos Maipo y Mapocho, hasta el Océano Pacífico.

Para el estudio de los deshielos en la alta montaña, solo se trabaja con la Primera sección del río Maipo, en el cual Los recursos de agua disponibles en este tramo provienen del caudal propio del río Maipo y sus afluentes cordilleranos tales como los ríos Yeso, Volcán y Colorado, y los esteros Clarillo, Manzano, El Canelo, San José y Coyanco; Esta sección es la única de las tres que posee organización legal denominada "Junta de Vigilancia de la Primera Sección del Río Maipo". Esta sección corresponde a un tramo netamente de pérdidas en el cauce, sin presentar ningún tipo de recuperaciones.

La Junta de Vigilancia de la Primera Sección del Río Maipo administra y distribuye en todo el año un total de 8.133 acciones (1 acc.= 20 l/s), aproximadamente 160 m3/s, correspondientes a derechos consuntivos permanentes, 12.577 acciones (1 acc.= 15 l/s), 190 m3/s, correspondientes a derechos no consuntivos permanentes y 2.351 acciones (1 acc.= 15 l/s), 35 m3/s, correspondientes a derechos consuntivos eventuales.

Los primeros van esencialmente al riego y al abastecimiento del agua potable de la ciudad de Santiago. Los segundos a la generación de energía eléctrica que realizan cuatro Generadoras a través de siete centrales hidroeléctricas. A su vez los derechos eventuales que hoy en día se encuentran en uso, están destinados en su gran mayoría al agua potable de Santiago, mediante su embalsamiento en la represa del Yeso, ubicada a 2.500 m. de altura, cerrando el río del mismo nombre.

Los regantes se encuentran organizados en Asociaciones de Canalistas, que cubren una superficie cercana a las 100.000 hectáreas de riego, los que están bajo la jurisdicción de la junta de vigilancia. Estas asociaciones son las siguientes:

1. Asociación Canal Pirque.
2. Sociedad de Canal del Maipo
3. Asociación Canal Huidobro
4. Asociación Canales de Maipo
5. Asociación Canales Unidos de Buin
6. Asociación de Canalistas Lonquén – Isla.

De acuerdo a estatutos, la Junta de Vigilancia posee la facultad administrar y distribuir los recursos disponibles en el cauce del río, a los que tienen derechos sus asociados, hasta el puente del ferrocarril de Paine a Talagante.

3. Datos Meteorológicos, Fluviométricos y de Nieve Existentes en la Cuenca

Tanto para la Cuenca del Maipo como para la Cuenca del Elqui, la Dirección General de Aguas (DGA) tienen a su cargo una gran cantidad de estaciones meteorológicas y fluviometricas, las cuales poseen registros tanto de variables meteorológicas, como son temperaturas, precipitaciones, etc. y fluviometricas, como por ejemplo caudales, alturas de agua, etc. estos registros abarcan una gran cantidad de años. que va aproximadamente desde 1975 hasta la fecha, existiendo claro en algunas estaciones años en los cuales no existen registros debido a diferentes circunstancias que afectaron la estación.

Es por eso que para esta investigando, la información disponible para la cuenca del Maipo es amplia ya que las estaciones existentes en esta región funcionan desde hace ya más de 25 años, a diferencia de la Cuenca del Elqui, en donde el registro de la información no es tan antiguo y tan sistemático, existiendo años en los cuales la información no se encuentra.

A continuación se entregan el listado y la ubicación geográfica de las estaciones de medición. las cuales servirán para obtener la información necesaria para el estudio a realizar.

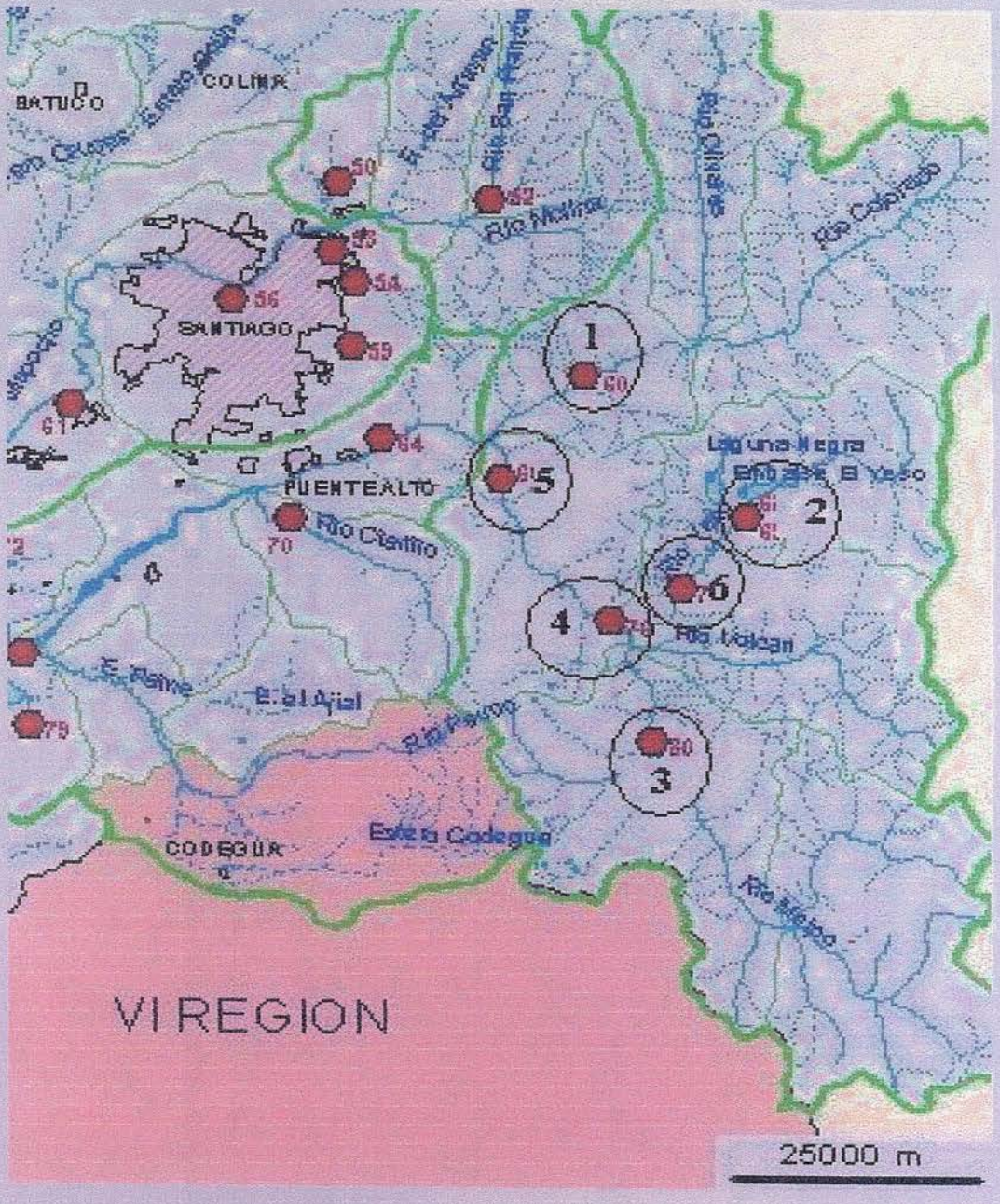
Para la Cuenca superior del Río Maipo las Estaciones son las Siguientes:

- Estaciones Meteorológicas

N° **1**	Estación Bocatoma Maitenes
N° **2**	Estación Embalse El Yeso
N° **3**	Estación Las Melosas
N° **4**	Estación San Gabriel
N° **5**	Estación San Jose Reten
N° **6**	Estación El Manzanito

Nota: estas estaciones son solo para la cuenca superior del río Maipo. las que se encuentran en la primera sección.

La ubicación geográfica se puede observar en el siguiente mapa, en donde cada estación esta indicada con su respectiva numeración.

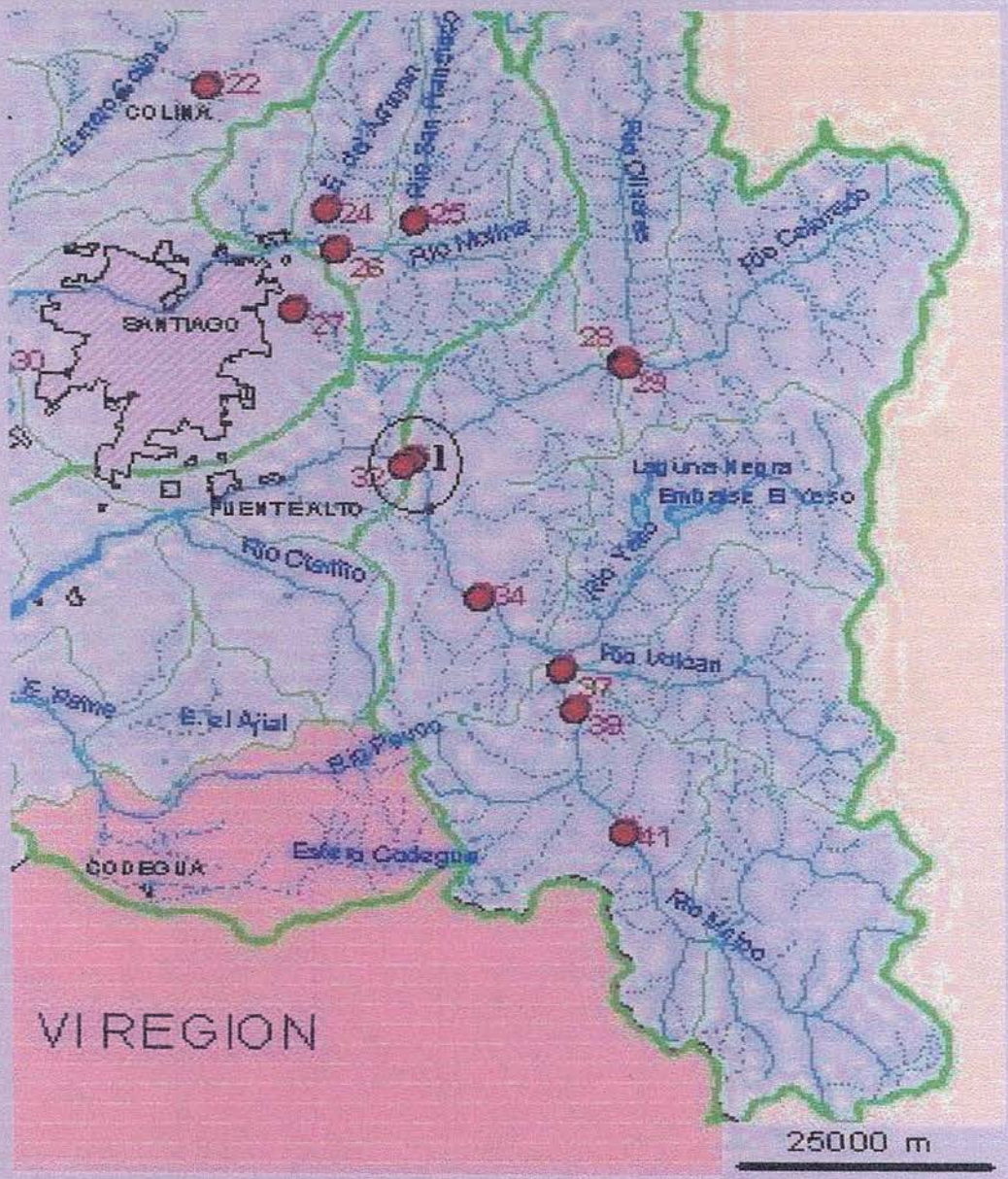


N° 1	Estación Bocatoma Maitenes
N° 2	Estación Embalse El Yeso
N° 3	Estación Las Melosas
N° 4	Estación San Gabriel
N° 5	Estación San Jose Reten
N° 6	Estación El Manzanito

Estaciones Fluviometricas

N° 1 Estación Río Maipo en el Manzano

Su ubicación geográfica se aprecia en la siguiente figura.

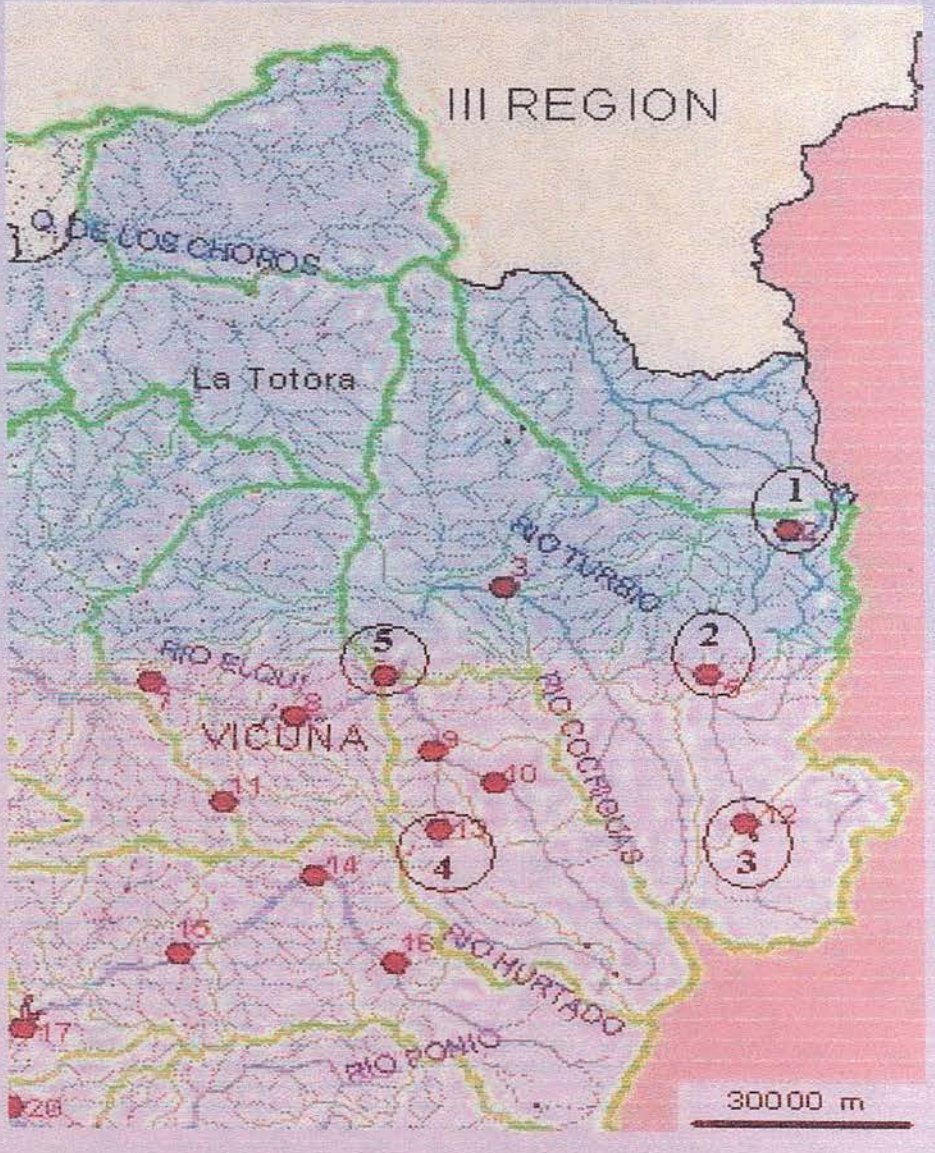


Para la Cuenca superior del Río Elqui las Estaciones son las Siguientes:

- Estaciones Meteorológicas

Nº **1**	Estación El Indio
Nº **2**	Estación Juntas Del Toro
Nº **3**	Estación La Laguna
Nº **4**	Estación La Ortiga
Nº **5**	Estación Rivadavia

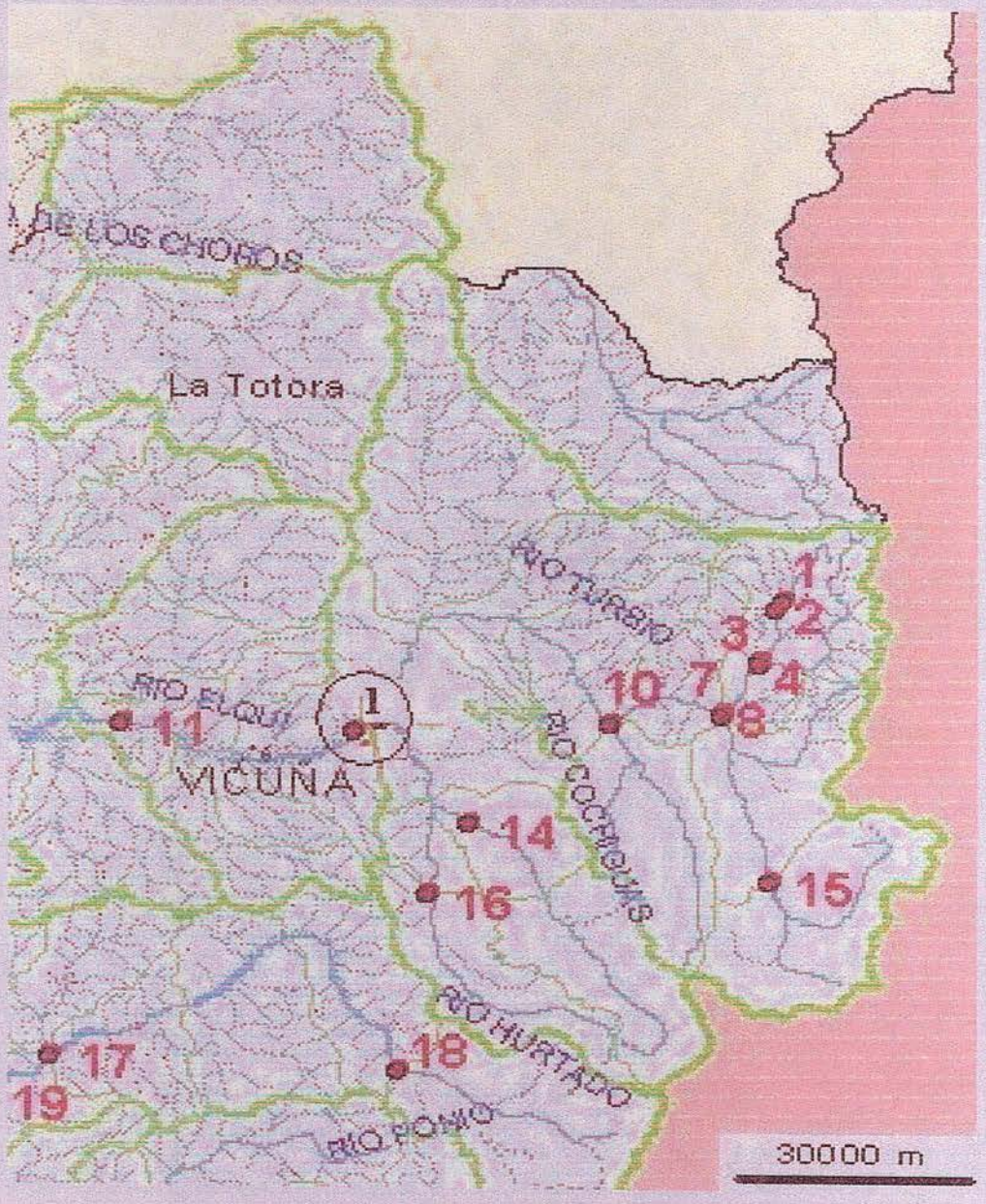
La ubicación geográfica se puede observar en el siguiente mapa, en donde cada estación esta indicada con su respectiva numeración.



- Estaciones Fluviometricas

Nº 1 Estación Elqui en Algarrobal

Su ubicación geográfica se aprecia en la siguiente figura. La estación mencionada es la que aparece encerrada en un círculo.



Las estaciones meteorológicas fueron seleccionadas de modo que abarcaran en la forma más representativa toda el área de análisis, para así poder tener un conjunto de datos que permitan definir muy bien la zona y con los cuales se puedan relacionar datos de distintas estaciones para ver de qué forma se comportan en la cuenca

La estaciones fluviométricas fueron seleccionadas en los puntos donde el rió en estudio ya cuenta con todos los aportes de los afluentes que llegan a él. de modo de que los caudales medidos sean los que aporta toda la zona en estudio.

Los datos proporcionados por estas estaciones que será necesario conocer son los siguientes:

Datos de Estaciones Meteorológicas

Datos de Precipitación	: Precipitación diaria y totales. : Precipitación diaria nival. : Precipitación total diaria, total mensual y total anual.
Datos de Temperaturas	: Temperaturas Diarias Extremas. : Velocidad y dirección del viento diario. total y media a horas sinópticas. : Radiación Solar Diaria. : Nubosidad diaria. : Resumen Climatológico diario. mensual y anual.

Datos de Estaciones Fluviometricas

: Caudales medios Diarios y Promedios Mensuales.
: Curvas de descarga.

Todas las mediciones que realizan las estaciones son diarias. por lo que la información se encuentra disponible para todos los días de un año. Para este estudio en particular el periodo de medición que se necesita es de 10 años. esto es desde el 01/01/94 hasta el 31/12/2004.

En relación con la información de nieve, es poca la que se tienen de ésta a nivel de profundidad, ya que están se hacían manualmente, en expediciones que realizaba la DGA una o dos veces al año y en la actualidad no se realizan demasiado. Con lo que si se cuenta y las estaciones la miden es la cantidad de precipitación nival caída.

Para poder determinar la distribución de la nieve caída en la cuenca, es necesaria la utilización de fotos satelitales que muestren las zonas de la cuenca cubiertas por nieve y

poder determinar la superficie involucrada. Esto se puede realizar, ya que existe el Centro de Estudios Espaciales (CEE), de la Universidad de chile, que cuenta con imágenes satelitales. Pero el tiempo que lleva la realización de esta tarea abarcaba más del tiempo programado.

Más adelante se da a conocer la reunión realizada con ellos y la metodología propuesta por el CEE, para una posible realización.

4. Entrevistas a Expertos

Para un mejor entendimiento del tema en estudio, se llevaron a cabo dos reuniones con expertos en temas muy relacionados con la investigación, para saber así su opinión referente al estudio y poder sacar conclusiones que puedan ayudar la realización del proyecto. Además se realizo una visita a terreno, para poder conocer las estaciones de Medición y poder ver el instrumental utilizado.

A continuación se presentan los resúmenes de las dos reuniones realizadas y de la visita a terreno.

La primera reunión fue con el señor Fernando Escobar, el pertenece a la Dirección General de Aguas (DGA), y trabaja con temas relacionados a Glaciares y Nieve, es experto el Glaciología y a realizado muchos estudios referentes al tema de investigación.

La segunda reunión fue con el señor Pedro Paolini, el pertenece al Centro de Estudios Espaciales (CEE) y trabaja en el procesamiento, análisis y estudio de imágenes satelitales de Chile, como imágenes Landsat, Noaa, Aster, etc.

La visita a terreno fue realizada con la ayuda del señor Antonio Vergara, el pertenece a la DGA y trabaja en el departamento de meteorologia y nivología de esa entidad.

4.1 1ª Reunión (Dirección General de aguas)

Lugar : Comisión Nacional de Riego
Fecha : 18 de Enero de 2005
Participantes : Comisión Nacional de Riego
: Jun Kurosawa
: Gastón Sagredo
: Francisco Alvarado
Dirección General de aguas
: Fernando Escobar
: Guillermo Tapia

Tema : Análisis de Derretimiento de Nieve en la zona central y Norte de Chile

Como resumen de la reunión Realizada se puede concluir lo siguiente:

En lo referente a información disponible (ya sea de estaciones meteorológicas y fluviométricas, imágenes satelitales e registros anteriores, por ejemplo: temperaturas máximas y mínimas, precipitaciones, caudales medios, etc.) para la cuenca del Maipo se cuenta con la información necesaria como para poder aplicar un modelo, a nivel de anteproyecto, para poder estimar el aporte de agua del derretimiento de nieve a los caudales de los ríos.

Para la cuenca del río Elqui, la información con la que se cuenta no es suficiente y no se tienen muchos registros de información de glaciares o de datos en zonas de gran altitud, razón por la cual, como primera aproximación, se podría aplicar el modelo en la cuenca del río Maipo y ver si es factible y representativo, para poder así, luego aplicarlo en la cuenca del río Elqui.

En lo referente a imágenes satelitales, para poder estimar la superficie y cantidad de nieve y glaciares existentes en las cuencas del Maipo como y del Elqui, la información de glaciares requiere ser actualizada. Para el caso de la cuenca del Maipo, dado el tamaño de los glaciares existentes en la zona, es factible utilizar imágenes del satélite NOAA. Sin embargo, para la cuenca del Elqui, debido a que el tamaño de los glaciares existentes es pequeño, se requieren como mínimo imágenes del satélite LANDSAT. La otra variable que es difícil de medir según los expertos es la profundidad de la nieve existente, ya que esta se realiza manualmente y no se dispone de muchos registros anteriores.

4.2 2ª Reunión (Centro de Estudios Espaciales)

Lugar : Centro de Estudios Espaciales
Fecha : 25 de Enero de 2005
Integrantes : Centro de Estudios Espaciales:

Pedro Paolini

Comisión Nacional de Riego:

Francisco Alvarado

Tema : Imágenes Satelitales

Como resumen de la reunión realizada se puede concluir lo siguiente

El Centro de Estudios Espaciales (CEE), ubicado en el Departamento de Ing. Eléctrica de la Universidad de Chile, sede Beauchef, cuenta con una amplia galeria de imágenes satelitales de la cuenca del Maipo, ya sea tanto del satelite NOAA, como del satélite LANDSAT. El registro de imágenes Landsat que posee el CEE, data de el año 1996 hasta el año pasado (2004), manteniendo una cantidad de imágenes aproximadamente de entre 4 a 5 por año, y para el satélite NOAA el registro con el que cuenta el CEE es diario y a partir del año 1989 en adelante.

Pedro Paolini me explicaba que las imágenes NOAA se utilizan para estudios mas grandes, ya sea a nivel regional o nacional, debido a que la resolución de las imágenes es mayor y una sola imagen abarca miles de kilómetros, pero estas imágenes pueden servir para poder diferenciar en la cuenca del Maipo la nieve de los glaciares y poder hacer un análisis de los sectores donde se encuentren los glaciares. Pero para poder definir bien un glaciar y la superficie que abarca en la zona se necesitan imágenes Landsat, ya que éstas tienen una resolución menor (metros) y la imagen es mucho mas pequeña, pudiendo visualizarse y diferenciarse mejor los distintos elementos que se encuentren en la zona.

Si es que se llegaran a necesitar mas imágenes Landsat, el precio de una imagen es alrededor de US$ 600, pero si se utilizaran las imágenes con que cuenta el CEE, el precio seria menor, además lo que me comentaba Pedro Paolini es que en este tipo de estudios lo que implica un mayor costo es la mano de obra que utilizaria, ya sea para definir bien los elementos y sus dimensiones, y dependiendo lo que se desee hacer es el tiempo que se utilizaria.

Cabe hacer notar que realizar el trabajo de reconocimiento e inventario de glaciares para la cuenca del Maipo llevaria mucho tiempo, razón por la cual hay que definir bien lo que realmente se quiere hacer para ver el tiempo que demoraria el trabajo.

A continuación se entrega una posible metodología entregada por el señor Pedro Paolini, para realizar el trabajo de inventariar los glaciares existentes en la Cuenca del Maipo.

Propuesta Metodológica para el Catastro y Seguimiento de Glaciares y Nieves en la Cuenca Superior del Maipo

Se propone la utilización de imágenes satelitales multiespectrales de resolución espacial media. Dichas características son necesarias para la identificación de las principales masas de hielo permanente y nieves ubicadas en la zona de interés.

El CEE de la Universidad de Chile cuenta con una base de datos satelital Landsat (TM y ETM+) y Terra/ASTER que cubren (cada uno por separado) la totalidad del territorio nacional y un período de tiempo suficiente para realizar un seguimiento temporal. Debido a que las imágenes Terra/ASTER no poseen una frecuencia de revisita sistemática sobre un determinado sector en la superficie terrestre, estas imágenes sólo podrán complementar la cobertura temporal entregada por la serie Landsat. En las tablas 1, 2 y 3 se especifican las características principales de cada uno de los sensores mencionados a utilizar.

Características Técnicas de las imágenes Landsat-7			
Satélite	Landsat		
Sensor	Enhanced Thematic Mapper + (ETM+)		
Número de bandas	8		
Resolución espacial	30*30m (bandas 1, 2, 3, 4, 5, 7)	60*60m (banda 6, IRT)	15*15m pan.
Ancho de escena	185*185Km		

Tabla 1. Ficha del sensor ETM+.

Características Técnicas de las imágenes Landsat-5		
Satélite	Landsat	
Sensor	Thematic Mapper (TM)	
Número de bandas	7	
Resolución espacial	30*30m (bandas 1, 2, 3, 4, 5, 7)	120*120m (banda 6, IRT)
Ancho de escena	185*185Km	

Tabla 2. Ficha del sensor TM.

Características Técnicas de las imágenes Terra/ASTER	
Satélite	Terra
Sensor	ASTER
Número de bandas	3 (Visible: verde rojo, e IR cercano)
Resolución espacial	15*15 metros (bandas 1, 2, 3)
Ancho de escena	60*60Km

Tabla 3. Ficha del sensor ASTER.

Propuesta Metodológica

Se tiene a disposición una serie de imágenes Landsat que va desde el año 1975 hasta la actualidad. Dicha serie temporal presenta secuencias intra-anuales con escenas de las estaciones de máximas precipitaciones y seca, las cuales son necesarias para la determinación y cuantificación de la máxima área cubierta por nieve y del área de masas de hielo (sin nieve).

En una primera etapa (previa georreferenciación y ortorectificación de las imágenes involucradas), el estudio se enfocará en la identificación de nieve y hielos (glaciares) en la escena Landsat 233_83, que abarca la zona de la cuenca superior del sistema Maipo-Mapocho; es decir, se realizaría un proceso de clasificación sobre las imágenes correspondientes. Como resultado de ello se obtendrá una o más imagenes temáticas, de las cuales se podrá obtener una cuantificación de superficies (máximo dominio espacial de nieves y hielos).

Una segunda etapa contemplará un análisis temporal de la cobertura nival y glaciológica de la cuenca en estudio. Primero se realizará un análisis estacional, que se enfocaría en los resultados de la primera etapa (clasificación) para las imágenes de la estación lluviosa y seca (Imagen de julio 2002 y marzo 2004, respectivamente). Posteriormente, se realizará un análisis interanual, que incluirá la serie temporal completa que tendrá como objetivo central identificar y cuantificar la variacion de la cobertura nival y glacial de la cuenca en estudio.

La serie temporal Landsat será complementada con imágenes Terra/ASTER del mismo sector y que corresponden a la estación lluviosa y seca.

Cabe destacar que, el carácter del estudio propuesto no tendría características de continuidad con los mencionados sensores y satélites debido, principalmente, a la falta de seguridad de permanencia del servicio de la serie Landsat (en estos momentos sólo se encuentra operativo el Landsat-5/TM, ya que el Landsat-7/ETM+ presenta desperfectos). Así, la presente propuesta puede tener el carácter de servicio continuo en el tiempo, pero no asegurando la utilización de los sensores antes mencionados.

En la presente no se hace mención a plazos ni costos, debido a la falta de información de contexto presupuestario y de objetivos generales de la propuesta general. Por lo tanto, el carácter de esta propuesta es preliminar y sólo expresa la voluntad y capacidad del CEE en la participación del proyecto final.

Respecto a este tema, las imágenes que se pretenden utilizar en la determinación de la acumulación de nieve se encuentran en el CEE, y hasta el momento no se necesitaría la adquisición de nuevas imágenes.

4.3 Visita a Terreno

Participantes :	Juan Pablo Schuster.	(CNR)
	Gastón Sagrado.	(CNR)
	Jun Kurosawa.	(CNR)
	Francisco Alvarado.	(CNR)
	Antonio Vergara.	(DGA)

Lugar : Cajón del Maipo

Fecha : 09 de febrero de 2005

El objetivo de la salida a terreno fue visitar tres estaciones de medición, conocer su ubicación geográfica, conocer los instrumentos presentes en cada estación y a su vez saber los datos que se miden en cada una de ellas, las estaciones visitadas fueron las siguientes:

- Estación Meteorológica Embalse el yeso, perteneciente a la DGA.
- Estación de Medición de una Ruta de Nieve, perteneciente a la DGA.
- Estación Fluviométrica Río Maipo en el Manzano, perteneciente a la DGA.
- y también visitamos una nueva estación meteorológica en el embalse el Yeso, perteneciente a Aguas Andinas.

El itinerario de la visita fue el siguiente:

1) La primera estación visitada fue la estación Embalse el Yeso, la cual pertenece a la Dirección General de Aguas, su instalación es de hace más de 30 años y es una estación convencional y no cuenta con ningún instrumento de ultima tecnología, se podría decir que es de operación es manual.

   Esta estación se encuentra ubicada cerca del Embalse el Yeso, en el Cajón del Maipo, situada a los 33° 40' de latitud sur, a una altura de 2475 m.s.n.m.

   La estación cuenta con los siguientes instrumentos de Medición:

   Higrotermógrafo: que mide la temperatura y humedad relativa del aire, su unidad de medida es el grado Celsius (°C) y el porcentaje (%), respectivamente.

Pluviómetro y Pluviógrafo: miden la cantidad de agua caída (lluvia) en un periodo de tiempo determinado. La diferencia entre uno y otro es que el Pluviógrafo grafica las variaciones de la precipitación en un diagrama que está adherido a un sistema de relojería semanal.

Heliógrafo: Instrumento que mide la duración de las horas de sol (insolación) diaria.

Los datos que se miden en esta estación son principalmente, Temperaturas, cantidad de Precipitación, Evaporación, Cantidad de horas de Sol, Velocidad del Viento, Radiación Solar, cantidad de Nieve caída

Estación Embalse el Yeso, DGA

Higrotermógrafo

Heliógrafo

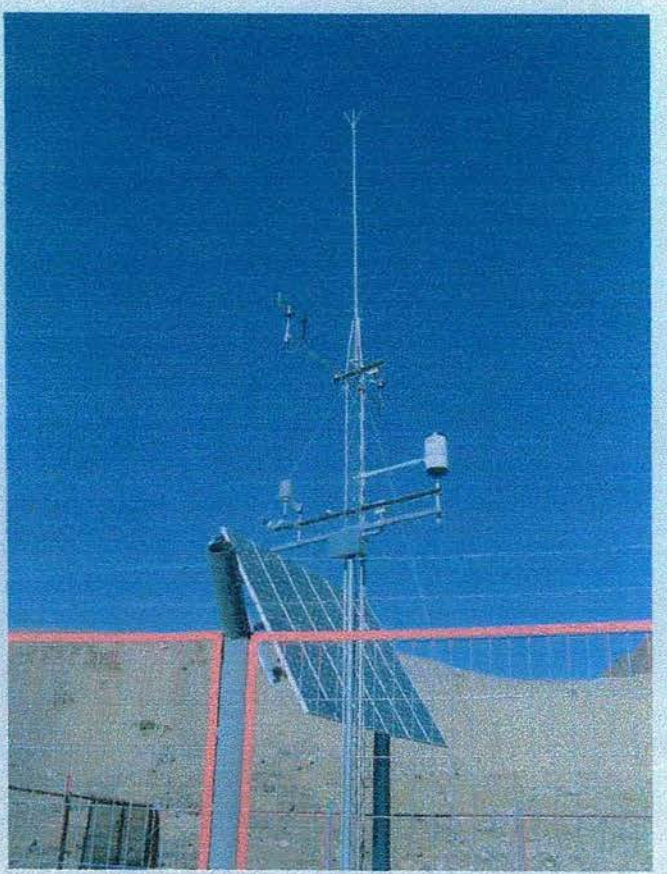
2) La segunda estación en visitar fue la estación Meteorológica perteneciente a Aguas andinas, la cual no tiene más de dos años de funcionamiento y a diferencia de la anterior esta totalmente equipada con instrumentos de última tecnología, los cuales están constantemente tomando mediciones y enviándolas satelitalmente a la oficina de aguas andinas.

Esta estación de medición cuenta con una Estación Automática, la cual mediante censores capta los parámetros meteorológicos, siendo estos procesados y posteriormente la información es transmitida a un usuario remoto. Además, posee paneles solares y baterías de respaldo lo que posibilita largos periodos de funcionamiento sin atención permanente.

Los parámetros meteorológicos que se miden son: temperatura y humedad del aire, presión atmosférica, precipitación, radiación solar, velocidad y dirección del viento

Su ubicación esta a un costado de el embalse el Yeso, muy cerca de la estación mencionada anteriormente.

Estación Embalse el Yeso, Aguas andinas



Estación Automática

3) La estación de Medición de La Ruta de Nieve, se encuentra a una hora de caminata aproximadamente en dirección Este del embalse el Yeso. Esta estación se encarga de medir la cantidad de nieve caída, la cual luego se transforma en su equivalente en agua, para tener la cantidad de agua que cae en forma de nieve. Además se miden la profundidad que alcanza la nieve caída

Metodológicamente la ubicación se una ruta de nieve tiene que ser en sentido Suroeste para que la nieve permanezca por mas tiempo. Pero nos comento don Antonio Vergara que esta ruta específicamente esta ubicada en el sentido más desfavorable, Noreste, donde la nieve se encuentra mas tiempo expuesta al sol, por lo que no cuenta con las condiciones que necesita una ruta de nieve, pero los datos, estudios y pronósticos que se han hecho con esta ruta de nieve han dado resultados muy buenos, con un error aproximado de un 10%, por lo que aunque no cuenta con la ubicación correcta, los datos que entrega son buenos y perfectamente utilizables.

Estación Ruta de Nieve, DGA

4) La última estación visitada fue la estación fluviométrica de Río Maipo en el Manzano. la cual pertenece a la dirección General de aguas y esta en funcionamiento hace más de 20 años. Se encuentra ubicada en la localidad del manzano. en donde se juntan el Río colorado y el Río Maipo. situada a los 33° 35' de latitud sur y 70° 27'de longitud oeste, a una altura de 850 msnm y abarca una superficie de la cuenca de unos 4.968 km^2.

La estación cuenta con un instrumento llamado molinete, el cual es operado por dos personas, las cuales comenzando de un lado del río, avanzan de un lado hasta el otro y cada dos metros van introduciendo el instrumento al río y van anotando los datos que entrega el molinete, estos datos son velocidad del agua. profundidad del agua y el caudal que pasa por la zona de influencia del molinete, que aproximadamente son 50 cm. para cada lado del instrumento.

Antiguamente la medición de caudal se hacia una vez al mes, pero hace aproximadamente dos años, esta medición se realiza cada 2 meses.

También la estación cuenta con un limnímetro, el cual permite medir el nivel del agua.

Estación Fluviométrica El Manzano, DGA

5. Documentos Relacionados y Modelo de Derretimiento

5.1 Documentos Relacionados

A continuación se presentan una serie de resúmenes de documentos extraídos de la biblioteca de la Dirección General de Aguas (DGA) y de la biblioteca de la Universidad de Chile, los cuales tratan estudios relacionados con el análisis de derretimiento de nieve. Estos documentos tratan en general metodologías y distintas formulas utilizadas en el cálculo de la ablación y la posterior escorrentía que se agrega al caudal del río. Los documentos completos ya fueron entregados, razón por la cual en este informe solo se entrega un pequeño resumen de cada documento.

- Pronóstico de Caudales de Deshielo en el Corto Plazo.

  Este documento es de la Dirección General de Aguas, del año 1983 su autor es el Ing. Civil Don Humberto Peña Torrealba. Este documento propone un procedimiento de pronóstico de caudales de deshielo en el corto plazo en base a un modelo de simulación muy simplificado. Los datos de entrada que utiliza son la temperatura máxima diaria, la línea de nieve y el caudal del dia anterior.

  Para la determinación del derretimiento de nieve, se utiliza el factor grado – día. El modelo de derretimiento que se utiliza en este documento esta construido sobre las siguientes bases:

  1. se subdivide la cuenca en bandas de igual elevación.
  2. el derretimiento de cada banda se determina diariamente en base a una relación del tipo

     $$Di = a \cdot (T_{xi} - T_b) \quad \text{Con} \quad T_{xi} > T_b \qquad (1)$$

     Siendo : Di = derretimiento diario de la banda i.
     T_{xi} = temperatura máxima diaria en la banda i.
     a = factor de fusión por grado-día.
     T_b = temperatura de referencia (temperatura base).

  3. las temperaturas máximas diarias presentan un gradiente con la elevación única y constante durante toda la temporada.

- Procedimientos Para la Estimación de Crecidas en Cuencas Nivales.

  Este documento, al igual que el anterior, es de la Dirección General de Aguas, del año 1985 su autor es el Ing. Civil Don Humberto Peña Torrealba. El Documento propone un Método de evaluación de crecidas por derretimiento de nieves para la

zona central del país en cuencas donde no halla información fluviométrica. El método propuesto requiere de poca información y su aplicación es sencilla.

- Estimación de Tasas de Derretimiento de Nieve

  Este documento también es de la Dirección General de Aguas, del año 1985 y sus autores son Don Humberto Peña Torrealba y Don Fernando Escobar. Este documento investiga métodos para la estimación de la tasa de derretimiento diaria de la nieve en los Andes Centrales de Chile. Utilizando distintas formulas propuestas en otros países en base a mediciones directas de ablación realizadas por la DGA en lugares de la cuenca del río Maipo.

- Medición de la Variable Cobertura de Nieve y su Aplicación al Estudio del Deshielo en Cuencas andinas Chilenas

  Este documento fue desarrollado por la Dirección General de aguas en conjunto con la Universidad de Chile en el año 1983. Sus autores son el señor Humberto Peña Torrealba y Don Alejandro Farías. Este trabajo contiene los principales aspectos de una investigación desarrollada para la medición de superficie cubierta de nieve en cuencas de la Cordillera de los Andes, Zona Central de Chile, con miras a su empleo en la elaboración de pronósticos de deshielo.

Con respecto a documentos pertenecientes a la Universidad de Chile, fueron entregados anteriormente extractos de dos memorias de títulos que tratan de la aplicación de un modelo de simulación para el cálculo de caudales en cuencas nivo-glaciales. Estos documentos se encuentran en forma integra en la Biblioteca Central de la Universidad de Chile. Para una Posterior consulta a continuación se entregan los nombres y autores de ellas.

- Optimización de un Modelo Matemático de Simulación de los Procesos de Acumulación y Derretimiento de Nieves.

  Autor: Patricio Ferrer Artigas
  Año: 1967

- Pronostico de Caudales en Cuenca Nivo-Glacial Mediante un Modelo de Simulación

  Autor: Cecilia Riveros Luna
  Año: 1985

Referente a documentos e Investigaciones de glaciares, existen estudios realizados años atrás, que dan a conocer todos los glaciares existentes en la cuenca del Maipo, así como también sus propiedades físicas y geométricas. Estos documentos pueden ser útiles solo como referencia, ya que los estudios son de muchos años atrás y a la fecha los glaciares ya han cambiado todas sus propiedades. Pero debido a lo extensos que son, ya que abarcan una gran cantidad de volúmenes no se incluyeron.

Para una posterior consulta o utilización, se da a conocer su ubicación física y su clasificación para una fácil ubicación. Los documentos son los siguientes:

Todos los documentos se encuentran en la Biblioteca de la Dirección General de aguas (DGA), la cual tiene sus oficinas en calle Morande 59, piso 8.

1._ Titulo : Inventario de Glaciares Hoya del Rio Maipo
Autor : Marangunic Cedomir
Clasificación : Gla – 1046
Año : 1979

2._ Titulo : Inventario de Glaciares Hoya del Río Maipo. listado Computacional actualizado.
Autor : Valdivia Pedro
Clasificación : Gla – 1075
Año : 1983

3._ Titulo : Inventario de Glaciares Andes de Chile Central (32° - 35° Lat. Sur): Hoyas de los rios Aconcagua, Maipo, Cachapoal y Tinguiririca
Autor : Valdivia Pedro
Clasificación : Gla – 388
Año : 1984

5.2 Metodologías de Derretimiento

Las metodologías utilizadas para el cálculo de la cantidad de nieve derretida son muchas y variadas, dependiendo del lugar físico y del país donde se realice la investigación. Ya que aunque existen formulas teóricas y bien desarrolladas, no siempre estas formulas se adecuan perfectamente a la cuenca donde se quieran aplicar, razón por la cual se desarrollan o formulan muchas ecuaciones empíricas que funcionan perfectamente para una cuenca en particular, pero considerando todos los factores originales, y creando un ambiente lo mas parecido al original se pueden aplicar y ver que resultados dan en otras cuencas.

Básicamente existen dos metodologías teóricas que se utilizan para el cálculo del derretimiento de nieve. Una es la metodología del balance calórico y la otra es el método del factor Grado-día.

Balance Calórico

El manto de nieve para comenzar a fundirse requiere primero alcanzar un punto de temperatura homogénea de cero grado centígrado. Antes de esto, se producen procesos de fusión superficial y recongelación por un tiempo cuya duración esta relacionado estrechamente con la magnitud de la acumulación de nieve.

Cuando se produce el calor suficiente para llevar las condiciones del manto a cero grado, es considerado isotermo a 0 °C. El calor adicional que penetra en el manto produce el derretimiento de la nieve.

La ecuación de balance calórico que considera los diferentes aportes de calor hacia y desde el manto es:

$$Q_m = Q_{rol} + Q_{roc} + Q_{ll} + Q_{cond} + Q_{conv} + Q_s$$

Donde los componentes del balance calórico son:

Q_m : Calor neto total.

Q_{rol} : Radiación de onda larga.

Q_{roc} : Radiación de onda corta.

Q_{ll} : Calor otorgado por la lluvia.

Q_{cond} : Calor producido por procesos de condensación o evaporación (calor latente).

Q_{conv} : Calor cedido por convección.

Q_s : Intercambio de calor entre la nieve y el suelo.

Esta ecuación se puede modificar, dependiendo de los factores que estén involucrados en el proceso de derretimiento de nieve, pudiendo por ejemplo eliminar el término Q_{ll} en el caso de que en la zona no existiese precipitación en un determinado periodo.

Factor Grado – Día

Como para la utilización de la formula antes descrita se necesita contar con una gran cantidad de datos meteorológicos que son difíciles de obtener, como por ejemplo, temperatura de la nieve, temperatura de nubes, nubosidad, presión de vapor, temperatura del punto de rocío, etc. en la práctica, por ser un método que utiliza poca información meteorológica, solo se utiliza como expresión del balance de energía el método del factor grado-día, que se define como la diferencia de un grado de temperatura por día entre la temperatura media del día y una temperatura de referencia.

La ecuación del factor grado-día es la siguiente:

$$BE = \alpha \times (t_a - t_b) \times 80$$

Donde

BE	: Balance de Energía.
α	: Factor grado-día.
t_a	: Temperatura media diaria del aire.
t_b	: Temperatura base.
80	: calor latente de fusión (cal/cm^2).

5.3 Modelo de Derretimiento y Escorrentía

En la zona central de chile los ríos tienen un régimen marcadamente nival, proveniente del derretimiento de las nieves acumuladas en los meses de invierno y de la ablación producida en los glaciares existentes.

El conocimiento anticipado de los caudales a escurrir en el periodo de deshielo, permitirá planificar y optimizar el uso de estos caudales, favoreciendo principalmente la generación de energía y la agricultura.

Si se cuenta con un buen registro de caudales en épocas de deshielo y estadísticas de variables meteorológicas, se pueden establecer relaciones que permitan cuantificar los recursos hídricos en el periodo de deshielo, es decir, confeccionar un pronóstico.

El pronostico de caudales de deshielo, corresponde entonces a determinar con la máxima exactitud los caudales que se producirán en el periodo de deshielo en una cuenca determinada.

Una vez obtenida la cantidad de nieve derretida a través de las metodologías mencionadas anteriormente, se debe determinar cual es la escorrentía que llega a los ríos, para poder saber en forma anticipada el caudal disponible para las distintas actividades que se requiera.

Para poder determinar el caudal aportante por los deshielos, en la actualidad existen modelos matemáticos y computacionales que relacionan los distintos factores climáticos y meteorológicos para poder así entregar una simulación de los caudales que se generaran en un cierto periodo de tiempo.

Uno de estos modelos es el Snowmelt Runoff Model (SRM), modelo de escorrentía de fusión de nieve, el cual ha sido utilizado por una gran cantidad de investigadores en todo el mundo entregando simulaciones bastantes aproximadas a la realidad, por lo que es un modelo aprobado y que tiene la particularidad que se necesitan muy pocos datos de entrada para su aplicación.

A continuación se presenta un pequeño resumen del método, explicando como funciona y las variables de entrada que necesita par su aplicación.

5.3.1 Snowmelt Runoff Model (SRM), Modelo de Escorrentía de Fusión de Nieve

Introducción

El modelo SRM (Snowmelt Runoff Model; en alguna bibliografía también llamado Modelo de Martinec y Rango) es un modelo de escorrentía de la nieve fundida. Está diseñado para simular y predecir el caudal diario en cuencas de montaña, donde la fusión de nieve tiene un papel importante. Recientemente también ha sido utilizado para evaluar el efecto del cambio climático sobre la cobertura de nieve y su escorrentia. El modelo SRM fue desarrollado por Martinec (1975) y aplicado a pequeñas cuencas en Europa. Gracias a los avances en teledetección de nieve mediante satélites el modelo SRM se ha ido aplicando a cuencas cada vez mayores, siendo la mayor donde se ha aplicado de 120.000 km2. Los cálculos de escorrentía del modelo suelen ser fácilmente asimilados.

El modelo SRM puede ser aplicado a cuencas de montaña de casi cualquier tamaño (desde 0.76 km2 hasta 120.000 km2) y cualquier rango de alturas (por ejemplo 305-7690 m). El modelo se inicializa con un valor de caudal conocido o estimado y puede calcular el caudal de un número ilimitado de días siempre que se le suministren las variables de entrada (temperatura, precipitación y porcentaje de superficie cubierta de nieve).

El Modelo SRM sirve para la Simulación del caudal diario durante el período de fusión, para uno o varios años consecutivos. Los resultados pueden ser comparados con el

caudal medido para evaluar la simulación y para verificar los parámetros utilizados. Las simulaciones sirven también para evaluar patrones de caudal de cuencas sin mediciones, usando teledetección con satélites para la superficie de nieve y extrapolando temperaturas y precipitación de estaciones cercanas.

Estructura del Modelo

El modelo calcula la cantidad diaria de agua procedente de la fusión de la nieve y de la lluvia. Esta cantidad se añade al caudal de recesión para obtener el caudal total diario según la siguiente ecuación:

$$Q_{n+1} = \left[c_{Sn} a_n \left(T_n + \Delta T_n\right) S_n + c_{Rn} P_n\right] \frac{A \cdot 10000}{86400} \left(1 - k_{n-1}\right) + Q_n k_{n+1}$$

Donde: Q = caudal medio diario [m3 s-1]

c = coeficiente de escorrentía, considera las pérdidas como un cociente (escorrentía/precipitación), con c_S referido a fusión de nieve y c_R referido a lluvia.

a = factor de grados-día [cm °C-1 d-1], indica el espesor de nieve fundida debido a un grado-día.

T = número de grados-día [°C d].

ΔT = ajuste de grados-día mediante la razón de variación de temperatura (lapse rate), cuando se extrapolan temperaturas desde una estación de referencia a una zona de elevación [°C d].

S = cociente del área cubierta de nieve al área total.

P = aportación de la precipitación [cm]. La temperatura crítica T_{CRIT} determina cuando esta aportación es en forma de lluvia e inmediata. En caso de ser nieve nueva, se almacena hasta que se reúnan las condiciones de fusión.

A = área de la cuenca o zona [km2].

K = coeficiente de recesión, indica el decremento del caudal en ausencia de aportaciones de lluvia o fusión de nieve:

$$k = \frac{Q_{m+1}}{Q_m}$$ (m, m+1 son días consecutivos de un periodo de recensión)

n = secuencia de días durante el período de cálculo de caudal. La ecuación (1) considera un tiempo de retraso (time lag) de 18 horas entre el ciclo diario de temperatura y el ciclo de caudal resultante, de modo que los grados-día registrados el día n se traducen en caudal del día n+1. Se pueden introducir diferentes tiempos de retraso mediante una subrutina.

$\frac{10000}{86400}$ = factor de conversión de $cm*km^2*d^{-1}$ a m^3*s^{-1}.

Las variables T, S y P han de ser medidas o determinadas a diario. Los parámetros c_2, c_3, la *razón de variación* (lapse rate) para hallar ΔT, T_{CRI}, k y el *tiempo de retraso* (lag time) son todos ellos característicos de una cuenca particular o, mas en general, de un clima particular.

Si el rango de alturas de la cuenca es mayor de 500 m., se recomienda subdividir la cuenca en zonas de elevación de unos 500 m. cada una para un mejor resultado de la simulación.

Datos necesarios para operar el modelo

Características de la cuenca:

Se necesita saber el punto más bajo y el punto mas alto de la cuenca, para separar la cuenca en zonas de altura, cada zona se separa cada 500 m. además se necesita conocer la altura media hipsométrica de cada zona y su superficie.

Variables:

Las variables necesarias para poder aplicar el modelo son los siguientes:

Temperatura: El modelo puede trabajar, tanto con las temperaturas medias diarias de la zona o con las temperaturas extremas, independiente de cual sea el dato que se tiene los resultados son los mismos.

Precipitaciones: El modelo trabaja con las precipitaciones diarias, las cuales pueden ser las que se registren en la estación base o por zonas de elevación, si es que se cuenta con estaciones en esos puntos.

Área Cubierta de Nieve: el área cubierta de nieve va disminuyendo por la fusión de ésta, razón por la cual se necesita conocer el porcentaje de área cubierta por nieve en las distintas zonas de la cuenca, esta información se obtiene a partir de fotografías aéreas, para cuencas muy pequeñas, y a través de imágenes

satelitales, por ejemplo imágenes del satélite Landsat, las cuales entregan una mejor información.

Parámetros:

Los parámetros de SRM no han de ser calibrados ni optimizados con datos históricos. Pueden ser, o bien calculados a partir de medidas o bien estimados mediante criterios hidrológicos que tengan en cuenta las características de la cuenca, leyes físicas y relaciones teóricas o relaciones empíricas mediante regresión. Los eventuales ajustes que se hagan a los parámetros no deben nunca sobrepasar los límites de los valores física e hidrológicamente aceptables.

Algunos de los parámetros son los siguientes:

Coeficiente de escorrentía, de lluvia y de nieve: Este coeficiente tiene en cuenta las pérdidas, esto es, la diferencia entre el volumen de agua disponible (fusión + lluvia) y el caudal saliente de la cuenca. A largo plazo ha de ser el cociente entre la precipitación medida y el caudal medido. De los parámetros de SRM, el coeficiente de escorrentía es el primer candidato a ajustar en caso de no obtener una buena simulación.

Factor grado-día: El factor grados-día [cm $°C^{-1}d^{-1}$] convierte el número de grados-día T [°Cd] en espesor diario de agua M [cm] procedente de la fusión de la nieve. Una forma de hallar este factor es comparar los grados-día registrados en una cuenca con la disminución de agua en forma de nieve. Esta disminución puede calcularse con dispositivos de medida de radioactividad, con las llamadas "almohadas de nieve" (snow pillows) o con lisímetros.

Razón de variación de temperatura (γ): Si se dispone de estaciones de medida de temperatura a distintas alturas se puede hallar γ a partir de datos históricos. En caso contrario ha de ser evaluada por analogía con otras cuencas o por consideraciones climáticas. En simulaciones SRM, un valor típico es 0.65 °C cada 100 m.

Además de otros parámetros que se encuentran explicados en el documento entregado anteriormente.

El Programa

El modelo de escorrentía de la nieve fundida de Martinec/Rango (modelo SRM) originalmente fue escrito en FORTRAN para ordenadores de la serie IBM 370. La primera versión computerizada del modelo fue escrita por Martinec *et al.* (1983). En 1986 el código en FORTRAN se instaló en un PC IBM y fue modificado para funcionar en un entorno PC.

Ese año se decidió hacer una versión específica para PC que aprovechase las posibilidades inherentes al PC. Como resultado se obtuvo el programa Micro-SRM, Versión 1.0.

En versiones sucesivas se han ido introduciendo mejoras hasta la versión actual WinSRM, versión 1.0. El programa gestiona automáticamente las entradas múltiples de temperatura y precipitación para un máximo de 10 zonas de altura de una cuenca, cualquier tiempo de retraso y situaciones complejas que varían entre lluvia y nieve. El cálculo de los 365 días de un año se realiza en cuestión de segundos, el hidrograma calculado frente al medido se representa inmediatamente y, si se desea, se imprimen estas gráficas rápidamente. También se calcula y se muestra la precisión alcanzada. Se puede mostrar un resumen de los parámetros utilizados después de cada ejecución, permitiendo realizar ajustes y valorar sus efectos.

La versión actual del Modelo WinSRM, versión 1.0, fue desarrollado usando Microsoft Visual Basic 6.0.

6. Conclusión

El modelo de Escorrentia de nieves (Snowmelt Runoff Model) es la herramienta que mejor puede representar el estudio que se quiere realizar, debido a que es un modelo que requiere poca información meteorológica de entrada, su aplicación se permite para cualquier tamaño de cuenca y ya ha sido probado en numerosas cuencas del mundo con resultados muy aceptables. El único inconveniente que se puede presentar, es que los parámetro que utiliza el programa algunos deben ser estimados por personas que tengan experiencia en hidrológica de nieves y que en el caso de que los resultados entregados por el programa no sean los esperados, puedan determinar que parámetro modificar para que los datos se ajusten mejor a la realidad.

Por otro lado, para la aplicación de este modelo, se requiere conocer muy bien el área de la cuenca cubierta por la nieve, ya que este es una variable muy importante para el programa. Conocer esta superficie implica mucho trabajo, ya que se debe realizar analizando imágenes satelitales, las cuales no son de fácil acceso, y el trabajo que requiere la determinación de esta área implica mucho tiempo. Razón por la cual se necesita disponer de un periodo de tiempo extenso para poder desarrollar por completo este estudio. Esta información satelital se encuentra en el Centro de Estudios Espaciales (CEE), y a modo netamente educacional el CEE nos facilitara las imágenes para poder trabajar en la memoria de titulo. A priori no se tiene claro exactamente si es que se necesitará adquirir más imágenes y el precio que esto tendría, por tanto no se puede estimar aun un valor ni un presupuesto para las imágenes.

Otro aspecto muy importante es definir muy bien la cuenca en la cual se va a desarrollar el estudio, ya que algunas cuencas al no contar con mucha información, tanto meteorológica, como de nieves y de glaciares, es muy difícil poder pronosticar la cantidad de agua disponible por derretimiento de nieves. Por ejemplo, para la cuenca del Elqui, es poca la información que se tiene de nieve, además que como es una cuenca pequeña, los glaciares existentes en la zona son muy pequeños y no existe un inventario muy actualizado de ellos, por lo que es muy difícil definir sus tamaños y superficies.

Referente a información sobre nieve, las estaciones meteorológicas miden solamente la cantidad de precipitación nival, y no la profundidad de nieve que halla acumulada en un momento dado, por lo que el dato de profundidad de nieve es difícil determinarlo. La única forma de determinar ese dato es a través de campañas en terreno que se deben realizar en una fecha adecuada para determinar la máxima profundidad de ésta.

Los demás datos meteorológicos, como precipitación y temperatura se encuentran en la DGA, y para la cuenca del Maipo se dispone de un registro muy completo de una cantidad de años bastante amplia.

7. Anexo

Como anexo al estudio se entrega un trabajo realizado en argentina, el cual trata en forma muy general una metodología para la estimación del área nevada en las altas cuencas de la cordillera, que puede ser muy útil y parecido al procedimiento que se debería realizar para este estudio.

Estimación del Área Nevada en la Alta Cuenca del Río Mendoza, Argentina, mediante la Teledetección Satelital

José M. Zuluaga, Luis Fornero, Alejandro Drovandi y Marta Nuñez

Instituto Nacional del Agua - Centro Regional Andino

Resumen

Se realizó un análisis multitemporal combinando la alta resolución espacial de las imágenes LANDSAT con la alta repetitividad temporaria del satélite NOAA, a partir de sus bandas visibles infrarroja cercana y térmicas con lo que se pudo evaluar el área cubierta por la nieve (SCA) durante el período de fusión nival.

En la primera etapa se analizaron dos imágenes de buena calidad del satélite LANDSAT TM de los meses de octubre de 1997 y marzo de 1998 que cubren los 1.858 Km^2 de la cuenca de estudio del Río Tupungato que es uno de los principales afluentes del Río Mendoza. Estas imágenes corregidas geométricamente con la cartografía base, permitieron una adecuada superposición con las imágenes NOAA-AVHRR de menor resolución espacial y mayor deformación, debido a la precisión propia de un satélite meteorológico. Toda esta información se volcó en una base de datos georeferenciada a partir de la cartografía del IGM escala 1:100.000 la que pudo cruzarse con el análisis morfométrico de las cuencas para inferir la influencia topográfica en la fusión nival utilizando un modelo digital de terreno WODITEM (Cazorzi, F., 1993).

Otra aplicación interesante fue la de usar el área cubierta con nieve en la calibración de modelos del tipo morfoenergético distribuido, como es el NEVE (Universidad de Padova-Italia) para luego aplicar el modelo SRM (U.S.Agricultural Research Service), basado en el método grado-día, y así poder estimar la incidencia del cambio climático en el escurrimiento por fusión nival.

Introducción

El aprovechamiento eficiente de los recursos hídricos en cuencas con aporte nival requiere de un profundo conocimiento de la hidrología de nieves y hielos. Dicho conocimiento presenta hoy en día importantes vacíos, los que deben ser investigados para alcanzar una

comprensión cabal de los fenómenos y, posteriormente, desarrollar los procedimientos de estudio y diseño adecuados a las necesidades de la ingeniería.

Uno de los datos imprescindibles para alimentar los modelos de simulación y para su posterior calibración es la superficie cubierta por la nieve (SCA) . Debido a la amplitud y a la inaccesibilidad de la zona de estudio. el uso de la teledetección surge como una valiosa herramienta. Cualquier estudio destinado al aprovechamiento o control del recurso hídrico en la zona andina no puede prescindir de considerar la contribución por fusión nival al escurrimiento superficial directo (70% en el año medio).

El caudal base invernal está generado por el agua infiltrada y que aparece en las laderas de los cauces como aporte subsuperficial. El proceso de fusión nival comienza en la primavera (en la segunda quincena de setiembre o primeros días de octubre) y su finalización depende de la cobertura y espesor del manto nival, llegando en casos extremos a fines de marzo. Luego el hidrograma anual de escurrimiento está comprendido entre julio y junio del año siguiente produciéndose los caudales máximos a fines de diciembre o primeros días de enero.

Objetivos

Utilizar los datos provenientes de satélites meteorológicos (NOAA-AVHRR) y de observación de la tierra (LANDSAT-TM) para el mapeo del área nevada y su posterior utilización en los modelos de fusión nival.

Materiales Y Métodos

Área de estudio

El área de estudio comprende la cuenca del río Tupungato (afluente del río Mendoza) que se ubica entre 69°45' y 70°10' de longitud Oeste y entre 32°35' y 33°21' de latitud Sur. El límite oeste de la cuenca se halla recostado sobre la divisoria de aguas de la cordillera andina que es a su vez límite entre Argentina y Chile. La superficie de la cuenca Tupungato es de 1858 km^2 y su altitud media es de 4251 m s.n.m.

Imágenes satelitales utilizadas

Para alcanzar los objetivos previstos se utilizaron fundamentalmente dos tipos de información: por un lado la proveniente de satélites meteorológicos como el NOAA-AVHRR cuyos datos fueron suministrados por el Centro de Estudios Espaciales (CEE) de la Universidad de Chile. Estas imágenes de alta frecuencia temporal tienen una baja resolución espacial de 1,1 km2 y la pasada seleccionada fue la de las primeras horas de la tarde, los datos brutos de las bandas visibles e infrarrojas fueron tratados en el Centro Regional Andino del INA. Por otro lado se recurrió a imágenes de alta resolución (30 m.) como son las de LANDSAT 5, provistas por la estación Córdoba de CONAE

De todas las fechas disponibles se selecionaron aquellas, en que la nubosidad era escasa o nula y con un buen ángulo de vista sobretodo en caso de NOAA.

Tratamientos realizados

Debido a que tanto en el Centro Regional Andino del INA como en el Centro de Estudios Espaciales de la Universidad de Chile se disponía de un programa muy difundido en todo el mundo y de fácil utilización se decidio utilizar para el tratamiento de la información satelital IDRISI para Windows; desarrollado por la Facultad de Geografía de la Universidad de Clark que es uno de los programas más utilizados en el manejo de archivos raster y vectoriales, permitiendo una buena georeferenciación de la imagen y su posterior clasificación.

La información de todas las imágenes disponibles fue tratada en modo raster. Para facilitar la comparación de imágenes de distintas fechas se elaboraron máscaras superponiendo el perímetro de la cuenca con la imagen raster respectiva. De esta forma se recorta la cuenca de interés manteniendo la información original en la parte interna y asignando un valor arbitrario en la parte externa que puede ser el valor 0.

Clasificación de la imagen

Una vez corregidas geométricamente todas las imágenes y recortada la cuenca de interés se realiza la clasificación de la información radiométrica, que varía de 0 a 255 niveles de gris para las imágenes LANDSAT y de 0 a 1024 para el caso del NOAA. Se denomina clasificación a cualquier técnica donde los datos se agrupan en un número más pequeño de clases más generales.

En la segunda etapa se pasa a una clasificación supervisada que consiste en elegir sectores de la imagen perfectamente conocidos y con datos de terreno de donde se extraen los valores característicos del hielo y la nieve para cada una de las fechas, posteriormente se realiza el análisis estadístico de estos datos para definir el rango de reflectancia adecuado para la clasificación final.

Resultados

La metodología desarrollada permitió determinar el área cubierta con nieve (SCA) de la cuenca del Río Tupungato para diferentes fechas.

La información de la superficie nevada se puede cruzar con el análisis morfométrico de la cuenca para inferir la influencia topográfica en la fusión nival utilizando un modelo digital de terreno WODITEM (Watershed Oriented Digital Terrain Model) desarrollado Cazorzi, F., 1993 el que a parte de las principales características morfométricas de las cuencas: hipsometría, exposición y pendiente; permite incorporar otros temas como por ejemplo: red de drenaje, contornos de cuencas y subcuencas como lo muestran los resultados obtenidos por Vargas A et al. , 2001 en la cuenca del Río Tupungato.

El área de la cuenca cubierta por nieve, para distintas fechas ha sido de gran utilidad para el trabajo realizado por Maza et al 2001 para poder calibrar el modelo morfoenergético distribuido NEVE de la Universidad de Padova, Italia (Cazorzi, 1999).

El modelo produce como salida una secuencia de mapas de SWE (Fig. 7), que se asemejan con el área cubierta de nieve (SCA) obtenida por teledetección. La diferencia de precisión de SCA que existe entre ambos tipos de sensores remotos se explica en el tamaño del píxel de cada uno: LANDSAT TM 30 m y NOAA 1,1 km y en que, para una SCA de 50% y un píxel de 1.1 km la cantidad de elementos puros es de 30% mientras que, para igual SCA pero con píxel de 30 m, la cantidad de elementos puros es de 80% (Baumgartener, M.F. et al, 1987). El modelo además proporciona la fusión nival acumulada en fechas que el usuario selecciona. También produce archivos con valores medios horarios para toda la cuenca de SWE, fusión nival, lluvia y precipitación nival., que resultan de gran utilidad para aplicarlos en el modelo SRM (U.S. Agricultural Research Service), basado en el método grado-día, para estimar la incidencia del cambio climático en el escurrimiento por fusión nival. Previamente el modelo SRM fue calibrado por Maza et al 2001, contemplando el hidrograma observado durante el período mencionado.

Figura 7. Salida del Modelo NEVE

Conclusiones

Los datos de teledetección ya sean provenientes de satélites de observación de la tierra como LANDSAT5 o de tipo meteorológico como NOAA, si son adecuadamente corregidos y georeferenciados permiten conocer el área nevada con una buena precisión para lograr la calibración de modelos de fusión nival.

Para el caso de grandes cuencas como las de la región andina, donde además se suma la inaccesibilidad sobre todo a fines del invierno y en primavera, la información satelital es la única herramienta disponible. Si bien la precisión obtenida con imágenes de Landsat es mayor que la obtenida con NOAA, la disponibilidad de imágenes de buena calidad y sin nubes es escasa comparada con las posibilidades que ofrece el pasaje diario de NOAA, que además posee la información térmica en dos bandas lo que permite conocer la temperatura de superficie y mejorar los pronósticos de escurrimiento.

Los aciertos que se logren por medio de dichos pronósticos (mayores semejanzas logradas entre los volúmenes previstos en cantidad, secuencia y oportunidad con los realmente ocurridos) significarán utilizar con propiedad los recursos hidráulicos disponibles, al tiempo que permitirán un sustancial ahorro de divisas.

Por otra parte la simulación con parámetros que reflejan de algún modo el cambio climático va a proveer a los organismos gubernamentales de un elemento de previsión y planificación a largo plazo sobre la utilización del recurso hídrico que tiene características de estratégico para la región.