



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y
MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**“COMPARACIÓN DE LA COBERTURA NIVAL E
HIDROGRAMAS SIMULADOS A DISTINTAS ESCALAS
TEMPORALES EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO MAIPO,
POR DISTINTAS CONCEPTUALIZACIONES DEL
PROCESO NIVAL”**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

FELIPE ANDRÉS URIBE VALENZUELA

PROFESORA GUÍA:

XIMENA VARGAS MESA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

MIGUEL ÁNGEL LAGOS ZUÑIGA

EDWARD CORNWELL VARELA

SANTIAGO DE CHILE

JULIO 2015

RESUMEN

Hoy en día la estimación de los recursos hídricos ha sido de gran relevancia para el desarrollo hidroeléctrico, industria agrícola y consumo de agua potable en la zona central del país. Es por ello, que en cuencas centrales como la del Maipo alto se han implementado distintos modelos hidrológicos, que teóricamente permiten estimar los caudales durante el año.

La presente memoria, está enfocada principalmente a analizar los resultados que se obtienen al simular los caudales y la cobertura nival en distintas subcuencas de la cuenca alta del río Maipo, usando tres modelos hidrológicos diferentes llamados VIC, CRHM y WEAP.

Los modelos seleccionados, que han sido previamente calibrados para distintos niveles temporales y usando diferentes conceptualizaciones, estos se implementarán en las subcuencas Volcán en Queltehues, Maipo en las Melosas, Afluente embalse el Yeso, Olivares antes junta río Colorado y Colorado antes junta río Olivares, todas estas correspondientes a subcuencas del Maipo alto. Se analiza en detalle tanto la metodología que se adopta en cada modelo para el proceso de acumulación y derretimiento nival, como la representatividad y validez de los valores de los parámetros asociados, obtenidos en cada caso.

También se estudia la sensibilidad de la resolución temporal y espacial de cada modelación, junto con una comparación tanto de las coberturas nivales simuladas con aquellos porcentajes de nieve observados a través de imágenes satelitales MODIS, como de los caudales simulados a distintas resoluciones temporales con aquellos registrados en las estaciones fluviométricas de la zona. Por otro lado, se analiza la complejidad de los modelos a la hora de usarlos, dado la importancia del tiempo de aprendizaje al momento de obtener las primeras simulaciones.

Los resultados asociados a fluviometría en el modelo VIC fueron excelentes, dado que los coeficientes de Nash arrojaron valores entre 0.65 y 0.84. Sin embargo en CRHM y VIC los resultados fueron no esperados, dado que los Nash fueron todos menores que cero.

En términos de cobertura nival, todos los modelos sobreestimaron en exceso la nieve con respecto a lo observado en MODIS, por lo que conllevaron a Nash menores que cero, independiente de la cuenca y de la escala temporal. No obstante a lo anterior, en la cuenca Afluente embalse el Yeso la variable SWE dio muy buenos resultados con las simulaciones en WEAP y CRHM, adoptando coeficientes de Nash 0.52 y 0.75 respectivamente.

Se concluye que ningún modelo estudiado es apto para modelar adecuadamente la nieve, debido a que estos no están hechos para abordar el área glaciar existente y no despreciable en estas zonas de estudio.

AGRADECIMIENTOS

Finalmente el largo y complejo camino de la titulación está terminando. A veces fue desmotivador y difícil, pero también ha sido con muchas alegrías y celebraciones. Sería muy falso y egoísta decir que este proceso fue solamente el trabajo de tesis, ya que desde que entré a la U muchas personas han sido partícipes de los buenos y malos momentos que viví, y por supuesto de lo que he llegado a lograr.

En primer lugar quiero agradecer a mi familia por siempre estar apoyándome, en especial a mis padres, que me enseñaron y dieron todo, junto con el espíritu de salir adelante sin importar lo que pase, y por supuesto a mis hermanas Daniela y Catalina. Mis amigos del colegio que también siempre han estado presentes con sus apapamientos, como Daniel, pito, toni, kuky, kiwi y galaz. También agradezco a mi polola Geraldine, que me ha apoyado y dado infinitas alegrías desde que estamos juntos, siendo una persona que se ha ganado un puesto en mis prioridades.

Otros grandes personajes indudables fueron mis amigos de la U, que estoy seguro que son con los que más compartí durante este proceso. Hay mucha gente que se me viene a la mente, personas que siempre resaltarán serán Alexis, Mauricio, Nico, Pao, Camila, Tore, Rolo, Mota, Pirata, Peter, William, Xino, Jorge, Max, Pipe, Romi, Danai, Bazofia, Sewasted, Gerardo, Alex, Pino, Montse, Vicky, Paci, Javivi, Jopinto, Abuja y podría seguir, pero desafortunadamente en esta página no caben todos :(.

Personas más recientes pero no por eso menos importantes también han destacado notablemente, y entre ellas está la Jaqui y mi profesora guía Ximena Vargas, a las cuales le tengo un aprecio invaluable no solo por su apoyo en ámbitos académicos, sino por su sencillez y amabilidad como personas. Además de ellas, por supuesto agradecer al resto de mi comisión como Miguel y Edward, que siempre mostraron interés en ayudarme, incluso sin saber que serían parte de esto.

También doy las gracias a Felipe Páez y Yohann Videla, que sin conocerme siempre estuvieron dispuestos a resolver las dudas de los modelos empleados en este trabajo.

Con mucha alegría por fin puedo decir: **TERMINÉ ESTA CARRERA CTM!!**

Tabla de contenido

Índice de Figuras	VI
Índice de Tablas	VIII
Capítulo 1 : INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Motivación	1
1.2 Objetivos	2
1.2.1 General	2
1.2.2 Específicos	2
1.3 Organización del Informe.....	3
Capítulo 2 : REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 Hidrología de Nieves.....	4
2.1.1 Generalidades	4
2.1.2 Equivalente agua nieve (SWE).....	4
2.2 Imágenes Satelitales	5
2.2.1 Imágenes MODIS.....	6
2.3 Modelación hidrológica.....	7
2.3.1 Modelo WEAP	7
2.3.2 Modelo CRHM.....	10
2.3.3 Modelo VIC.....	17
Capítulo 3 : CARACTERIZACION DE LA ZONA Y PERÍODO DE ESTUDIO	23
3.1 Ubicación y Fisiografía	23
3.2 Clima	25
3.3 Hidrología	26
3.4 Período de estudio	28
Capítulo 4 : ANÁLISIS DE LA INFORMACION DISPONIBLE Y PREPARACIÓN DE DATOS DE CADA MODELO	29
4.1.- Caudales observados en estaciones fluviométricas	29
4.2- Inputs modelo WEAP	31
4.3- Inputs modelo CRHM.....	40
4.4- Inputs modelo VIC.....	43

4.5- Análisis de imágenes MODIS para cada subcuenca	44
4.6 Extrapolación de escalas temporales	47
4.7 Validación de eficiencias	47
Capítulo 5 : ANÁLISIS DE RESULTADOS	48
5.1 Comparación de resultados Fluviométricos entre modelos.....	48
5.1.1 Resultados Fluviométricos de VIC y CRHM.....	48
5.1.2 Resultados Fluviométricos de WEAP Y CRHM.....	51
5.2 Comparación nival de los modelos	52
5.2.1 Comparación nival entre WEAP Y CRHM	52
5.2.2 Comparación nival entre VIC Y CRHM.....	54
5.2.3 Comparación de SWE entre WEAP Y CRHM en AEY	57
5.6 Resumen de coeficientes de Nash Sutcliffe para cada modelo en cada escala temporal	58
5.6.1 Nash Sutcliffe Fluviométricos.....	58
5.6.2 Nash Sutcliffe Nivales.....	59
Capítulo 6 : CONCLUSIONES Y COMENTARIOS	61
6.1 Conclusiones generales	61
6.2 Comentarios de la fluvimetría de los modelos	61
6.3 Comentarios de la simulación nival de los modelos	62
6.4 Comentarios acerca de las diferentes metodologías para preparar los inputs y outputs.....	62
6.5 Comentarios acerca de la dificultad o facilidad de usar los modelos hidrológicos	63
6.6 Recomendaciones finales	64
BIBLIOGRAFÍA.....	65
ANEXOS.....	68
Anexo A Parámetros topográficos de las 40 URH's de CRHM	68
Anexo B Anexos Digitales.....	70

Índice de Figuras

Figura 2-1. Snow Scale de la estación UChile-Valle Nevado.....	5
Figura 2-2: Espectrometría de distintas longitudes de onda por imágenes MODIS, en la montaña Mammoth en Sierra Nevada. Fuente: Adaptado de Dozier et al. 2009.....	7
Figura 2-3. Esquema de interfaz gráfica de WEAP. Fuente: http://www.weap21.org/img/weapschematicES.gif	8
Figura 2-4. Esquema de estanques modelados por cuenca. Fuente: Centro de Cambio Global- Universidad Católica de Chile, Stockholm Environment Institute (2009).....	9
Figura 2-5. Snowpack representa un volumen de control de manto de nieve en una URH para el cálculo de derretimiento. Las flechas T representan transferencia de masa de nieve por viento, K representa las radiaciones de onda corta y L las radiaciones de onda larga. Fuente: Pomeroy et al. (2007).	12
Figura 2-6. Esquema de la programación posible a utilizar en CRHM. La imagen de la izquierda corresponde a un modelo secuencial con URH's conectadas, mientras que el de la derecha corresponde a un enfoque basado en sumatoria de unidades. Fuente: Modificado de Gonthier (2011).	12
Figura 2-7. Modificada de plataforma CRHM; Esquema simplificado de módulos para construir el modelo. Fuente: Adaptado de Videla (2013).	13
Figura 2-8. Representación de celdas en modelo VIC. Fuente: Maurer 2011.....	18
Figura 2-9. Simulación de nieve en VIC. Fuente: Gao et al. 2009.....	19
Figura 2-10. Algoritmo de compresión de nieve en VIC.	20
Figura 2-11. Definiciones de tipos de suelos según relación porcentual de arena, arcilla y limo. Fuente: www.fao.org/climatechange/54273/en/	20
Figura 2-12. Esquema conceptual del modelo Route. Fuente: Gao et al. (2010).....	21
Figura 2-13. Representación del modelo VIC y del modelo Routing. Fuente: Adaptado de Ulloa (2012).	22
Figura 3-1. Esquema de la cuenca alta del Río Maipo. Fuente: Modificado de Videla (2013).	24
Figura 3-2. Temperaturas medias mensuales para las estaciones meteorológicas Pirque y El Yeso embalse entre el período 2000 y 2012.....	25
Figura 3-3. Curva de variación estacional en estación Maipo en las Melosas. Período de estudio 1980 a 2001.	26
Figura 3-4. Curva de variación estacional en estación embalse el Yeso. Período de estudio 1983 a 2003.....	27
Figura 4-1. Correlación para rellenar Maipo en las Melosas a partir de Maipo en las Hualtatas.	31
Figura 4-2. Esquema modelo WEAP modificado de Serrano (2014).	33
Figura 4-3. Representación de las 40 URH's adoptadas en la cuenca alta del modelo CRHM. Fuente: Adaptado de Videla 2013.	40
Figura 4-4. Esquema de series de tiempo con y sin procesamiento en subcuenca Olivares	46
Figura 5-1. Fluviometría de modelos VIC Y CRHM en Olivares a escala diaria.	48
Figura 5-2. Fluviometría de modelos VIC Y CRHM en Olivares a escala semanal.	49
Figura 5-3. Fluviometría de modelos VIC Y CRHM en Olivares a escala mensual.....	49

Figura 5-4. Fluviometría de modelos VIC Y CRHM en Colorado a escala diaria.....	50
Figura 5-5. Fluviometría de modelos VIC Y CRHM en Colorado a escala semanal.....	50
Figura 5-6. Fluviometría de modelos VIC Y CRHM en Colorado a escala mensual.	51
Figura 5-7. Fluviometría de modelos WEAP Y CRHM en Volcán en Queltehues a escala mensual.	51
Figura 5-8. Fluviometría de modelos WEAP Y CRHM en Maipo en las Melosas a escala mensual.	52
Figura 5-9. Comparación nival de modelos WEAP y CRHM en Volcán en Queltehues a escala mensual.	52
Figura 5-10. Comparación nival de modelos WEAP y CRHM en Afluente embalse el Yeso a escala mensual.	53
Figura 5-11. Comparación nival de modelos WEAP y CRHM en Maipo en las Melosas a escala mensual	53
Figura 5-12. Comparación nival de modelos VIC y CRHM en Olivares a escala diaria.	54
Figura 5-13. Comparación nival de modelos VIC y CRHM en Olivares a escala semanal.	55
Figura 5-14. Comparación nival de modelos VIC y CRHM en Olivares a escala mensual.....	55
Figura 5-15. Comparación nival de modelos VIC y CRHM en Colorado a escala diaria.....	56
Figura 5-16. Comparación nival de modelos VIC y CRHM en Colorado a escala semanal.....	56
Figura 5-17. Comparación nival de modelos VIC y CRHM en Colorado a escala mensual.	57
Figura 5-18. Comparación de SWE en CRHM Y WEAP.....	57

Índice de Tablas

Tabla 2-1: Tabla de módulos nomenclatura y salidas a utilizar en la modelación de la cuenca.	14
Tabla 2-2: Tabla de módulos nomenclatura y salidas a utilizar en la modelación de la cuenca.	15
Tabla 2-3: Tabla de módulos nomenclatura y salidas a utilizar en la modelación de la cuenca.	16
Tabla 3-1. Superficie total destinada a cada uso de suelo dentro de la cuenca de estudio. Fuente: Adaptada de DGA, 2004.	23
Tabla 4-1. Resumen de la calibración temporal, las cuencas simuladas y autores de cada modelo.	29
Tabla 4-2. Estaciones fluviométricas usadas para calibrar el modelo WEAP.	32
Tabla 4-3. Parámetros topográficos de las nuevas bandas de elevación.	32
Tabla 4-4. Estación meteorológica a utilizar en precipitación.	33
Tabla 4-5 Resumen coeficientes de ajuste logarítmico. Fuente: Serrano (2014)	34
Tabla 4-6. Resumen gradiente de temperatura lineal mensual. Fuente: Ahumada (2012).	35
Tabla 4-7. Rendimientos Unitarios mensuales por parte de glaciares.	36
Tabla 4-8. Cobertura de nubes mensual	37
Tabla 4-9. Velocidades mensuales en las cuencas. Fuente: DGF, Universidad de Chile	38
Tabla 4-10. Parámetros asociados a Maipo en las Melosas y Afluente embalse el Yeso.	39
Tabla 4-11. Parámetros asociados a Volcán en Queltehues. Fuente: Modificados de Serrano (2014)	39
Tabla 4-12. Ubicación y Altitud de la central Alfalfal.	43
Tabla 4-13. Parámetros de la relación lineal entre MODIS LST y la temperatura del aire registrada en Alfalfal.	43
Tabla 4-14. Estaciones meteorológicas a utilizar en algoritmo MODIS para detectar precipitación según subcuenca.	46
Tabla 5-1. Coeficientes fluviométricos de Nash Sutcliffe en modelo VIC.	58
Tabla 5-2. Coeficientes fluviométricos de Nash Sutcliffe en modelo WEAP.	58
Tabla 5-3. Coeficientes fluviométricos de Nash-Sutcliffe en modelo CRHM.	58
Tabla 5-4. Coeficientes Nash Sutcliffe de áreas nivales en modelo VIC.	59
Tabla 5-5. Coeficientes Nash Sutcliffe de áreas nivales en modelo WEAP.	59
Tabla 5-6. Coeficientes Nash Sutcliffe de áreas nivales en modelo CRHM.	59
Tabla 5-7. Coeficientes Nash Sutcliffe de SWE con modelos WEAP Y CRHM en subcuenca AEY.	60

Capítulo 1 : INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

La hidrología de nieves en ambientes de montaña, cumple un importante rol en la disponibilidad de los recursos hídricos en zonas con efectos de altura, ya que la distribución espacial y temporal de la nieve es altamente relevante al momento de estimar la capacidad hídrica de la zona en estudio. Sin embargo, estos ambientes fríos de altura, son altamente complejos y comúnmente no son abordados en el ciclo hidrológico convencional, como por ejemplo, el transporte, redistribución y sublimación de nieve por efecto del viento e intercepción de nieve por la cubierta vegetal. A esto se suma que el estudio de la hidrología de nieves está condicionado a efectuar importantes inversiones para colocar una estación que mida espesor del manto de nieve o su equivalente en agua (SWE), junto con dificultades de acceso para instalar las estaciones y monitorear los fenómenos de interés.

Dado lo anterior, se considera importante estudiar la cuenca alta del río Maipo con tres modelos hidrológicos, para tener una idea de cómo estos se comportan en simulaciones con distintas resoluciones espaciales y temporales en los hidrogramas de salida, con respecto a las cinco estaciones escogidas. Estas cuencas presentan marcados regímenes nivo-pluviales, debido a la existencia de numerosos glaciares, sin contar que en invierno la precipitación cae en forma de nieve, lo que hace que sean ambientes de alta montaña.

Adicionalmente a este trabajo, se añade el uso de percepción remota como pilar fundamental de medición espacial de nieve, que para este estudio son las imágenes MODIS, específicamente el producto “snow cover fractional”. Estas están en constante desarrollo, permitiendo contribuir a distintas disciplinas como la ingeniería, la agronomía o la Oceanografía

Memorias o trabajos de título de la Universidad de Chile como las de Serrano (2014), Videla (2013) y Páez (2014) se han enfocado en analizar la modelación de nieve de la cuenca alta del río Maipo, sin embargo, cada uno de ellos ha ocupado sólo uno de los tres modelos hidrológicos con objetivos independientes y con metodologías muy distintas.

Este trabajo se enfoca en adoptar como nivel temporal de análisis de resultados de caudales diarios, semanales y mensuales, para definir si el nivel temporal de simulación del proceso de acumulación y derretimiento de cada modelo resulta suficiente para modelar adecuadamente la evolución de ambas variables, caudal y cobertura nival.

1.2 Objetivos

1.2.1 General

- Analizar el detalle de la resolución temporal y espacial de cada modelación hidrológica, y de la conceptualización del proceso nival tanto en la evolución de los caudales como en la cobertura nival en la cuenca alta del río Maipo.

1.2.2 Específicos

- Visualizar las diferentes metodologías para abordar el proceso de acumulación y derretimiento de nieves en los modelos VIC, CRHM y WEAP.
- Comparación espacial de coberturas nivales simuladas con las observadas a través de imágenes satelitales obtenidas con los satélites AQUA y TERRA.
- Comparar SWE simulado por CRHM Y VIC en la cuenca Afluente embalse el Yeso
- Comparar los hidrogramas de los caudales simulados a distintas resoluciones temporales, como nivel diario, semanal y mensual entre los distintos modelos hidrológicos durante un período de tiempo en que exista información disponible.
- Comparar a nivel de usuario la facilidad o dificultad de uso de los modelos, poniendo énfasis en el conocimiento previo del usuario, las guías o manuales disponibles, características visuales y soporte técnico.

1.3 Organización del Informe

Este trabajo de memoria está organizado en 6 capítulos, junto con la bibliografía y anexos correspondientes. La organización de los capítulos se expone a continuación:

En el Capítulo 2 se presenta una revisión bibliográfica de los tópicos a abordar. Luego de una breve introducción, se presenta la descripción de las imágenes MODIS, su funcionamiento y su aplicabilidad a distintos estudios realizados nacionalmente como internacionalmente. Además se incluye la las descripciones generales de cada modelo hidrológico escogido, las aplicaciones realizadas en cada uno, junto con sus respectivas conceptualizaciones de abordar la modelación y fundamentos físicos.

En el Capítulo 3 se realiza una caracterización de la zona de estudio, dando a conocer las características geomorfológicas principales, junto con las forzantes meteorológicas registradas estadísticamente como temperatura y precipitación. Paralelamente se da a conocer la información hidrológica disponible, junto con la justificación del período de estudio de este trabajo.

En el Capítulo 4 se enseña la metodología utilizada de cada modelo, la forma de definir las forzantes meteorológicas, la herramienta de validar la eficiencia de cada modelo, junto con un algoritmo desarrollado para limpiar imágenes MODIS temporalmente cuando existe una alta presencia de nubes en el día.

En el Capítulo 5 se presentan los resultados obtenidos de las simulaciones de cada cuenca y cada modelo, contrastando cada caso con lo observado en la realidad, tanto fluviométricamente como nivalmente.

En el Capítulo 6 finalmente se exponen las conclusiones y recomendaciones de esta investigación.

Capítulo 2 : REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 Hidrología de Nieves

2.1.1 Generalidades

La hidrología de nieves se entiende como el área de la hidrología que estudia el comportamiento, distribución espacial y temporal, cantidad y calidad de la nieve, además de los factores que influyen en su derretimiento y la consiguiente generación de escorrentía (Cartes 2009).

La nieve es agua formada por una precipitación a baja temperatura que se convierten en cristales de hielo, adoptando una geometría fractal que se agrupa en copos de manera granular. El interés de este fenómeno meteorológico está dado por su composición física, ya que presenta estacionalidad de acumulación y derretimiento.

La dinámica de acumulación y derretimiento se consideran procesos continuos en el tiempo, por ende, es de suma importancia al momento de la modelación entender la escala temporal a la que ocurren.

2.1.2 Equivalente agua nieve (SWE)

El equivalente en agua de la nieve o SWE (snow water equivalent) es una variable espacial-temporal del manto nival, que depende de la profundidad y densidad de la nieve. Físicamente corresponde al contenido efectivo de agua dentro del manto de nieve. Se define como:

$$SWE = \frac{\rho_s}{\rho_w} \cdot h \quad (2.1)$$

Donde:

ρ_s : Densidad de la nieve.

ρ_w : Densidad del agua.

h: Altura de nieve del manto nival.

Hay que hacer notar que la densidad del manto, ρ_s , no es constante a lo largo de la altura, principalmente porque la columna de nieve se va aplastando a sí misma, lo que hace que en el fondo sea más denso a medida que sea más profunda. Esto genera que la medición directa de SWE en una columna de agua no sea tan sencilla como medir una altura de nieve, ya que se requiere instrumentación como snow scales o snow pillows, los cuales miden el SWE mediante placas de aluminio instaladas en un marco metálico sobre la superficie del suelo, tal como se muestra en la Figura 2-1.

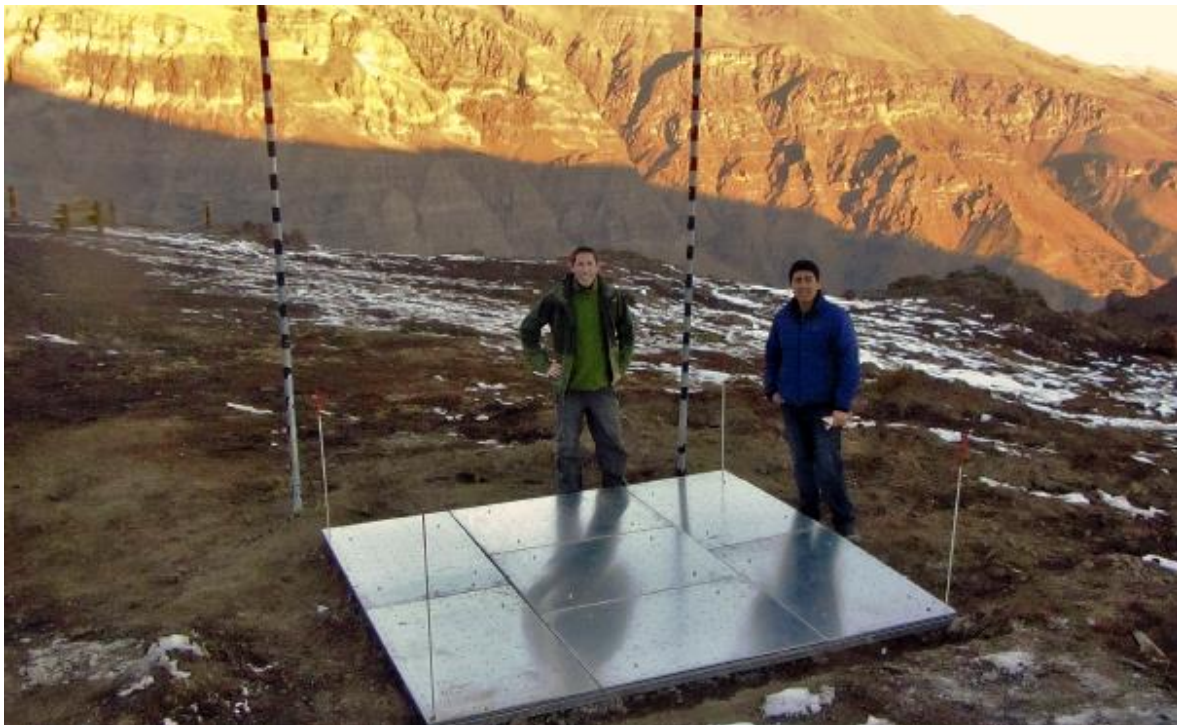


Figura 2-1. Snow Scale de la estación UChile-Valle Nevado.

2.2 Imágenes Satelitales

Las imágenes satelitales son una representación espectral de la información capturada por un dispositivo que está instalado en un satélite artificial. Estas surgen a principios de los años 60, como una competencia entre Estados Unidos y Rusia a causa de la guerra fría.

La primera imagen satelital fue tomada por la NASA a través del satélite estadounidense *Explorer 6*, la cual corresponde a una imagen de la luna.

Actualmente, el uso de esta tecnología ha ido en aumento, y los productos que se obtienen de las imágenes satelitales han contribuido a diversos ámbitos de la ingeniería u otras ciencias, ya sea para agronomía, geografía, hidrología, meteorología, oceanografía, etc.

2.2.1 Imágenes MODIS

Las imágenes MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) corresponden a imágenes satelitales proporcionadas por la NASA. La tecnología como su nombre lo indica, está basada en espectrometrías, es decir, para distintas longitudes de onda emitidas por el satélite se obtienen distintas interpretaciones de la imagen en función del tipo de respuesta espectral medida en ciertos intervalos de longitud de onda. Esta información adquiere datos en 36 bandas espectrales, y pueden ser traducidos en parámetros como tamaño del grano de nieve, albedo, reflectancia de la nieve o suelo, superficie cubierta con nieve, vapor de agua, tipos de vegetación, temperatura, entre otros.

Las imágenes MODIS asociadas a cobertura nival o snow-cover (Hall et al. 2001) se realiza a través de los satélites TERRA y AQUA, cada uno con una frecuencia de pasada sobre la tierra de 24 horas, y desfasados 12 horas entre ellos. Estudios realizados en el hemisferio norte indican que el error de los productos asociados a snow-cover es de aproximadamente un 8% en ausencia de nubes (Ackerman et al. 1998).

Diversos estudios nacionales como internacionales se han realizado en base a la información obtenida por MODIS, como una forma de corroborar o entender la dinámica global sobre los procesos que ocurren sobre la superficie terrestre. Trabajos de la Universidad de Chile como Cartes (2009) o Páez (2012), han utilizado los productos snow-cover para ver la distribución espacial en cuencas de los Andes, como el Maipo y Aconcagua en Chacabuco. Internacionalmente Dozier et al. (2009) ha utilizado los productos snow-cover, albedo y grain size en la montaña Mammoth en Sierra Nevada, con el fin de profundizar las propiedades de la nieve tal como se indica en la figura 2-2.

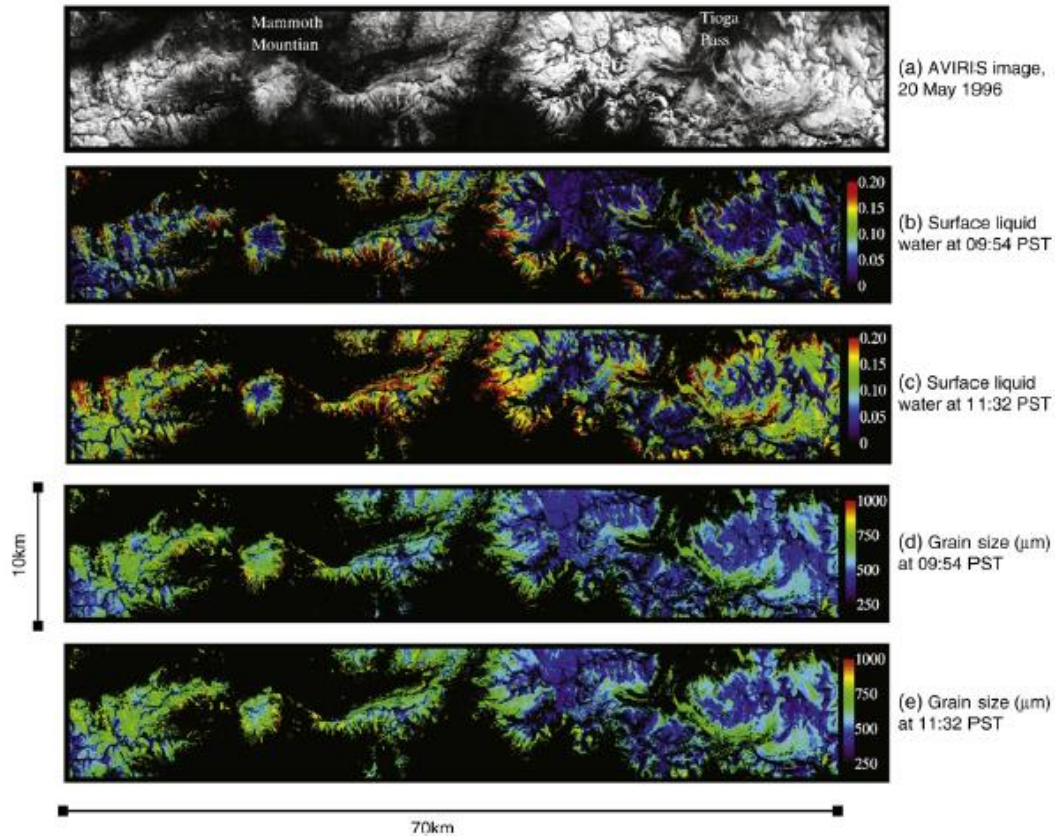


Figura 2-2: Espectrometría de distintas longitudes de onda por imágenes MODIS, en la montaña Mammoth en Sierra Nevada. Fuente: Adaptado de Dozier et al. 2009

2.3 Modelación hidrológica

2.3.1 Modelo WEAP

Water Evaluation and Planning o WEAP (Yates, Sieber, Purkey, & Huber-Lee, 2005), es una plataforma creada por el instituto ambiental de Estocolmo. Fue creado como una herramienta computacional para la planificación y distribución de aguas, funcionando en base a un balance de oferta y demanda del recurso hídrico.

Este modelo hidrológico es semidistribuido y tiene una base física, el cual lo hace ser un modelo forzado por variables meteorológicas, como por ejemplo, temperatura, precipitación, velocidad del viento, nubosidad, entre otras.

A diferencia de otros modelos hidrológicos, WEAP ofrece a través de una interfaz gráfica basada en SIG, una manera simple para construir, visualizar y modificar la configuración. El usuario, tal como se muestra en la figura 2-3, diseña un esquema del sistema usando el mouse para “arrastrar y soltar” los elementos a ser agregados al sistema.

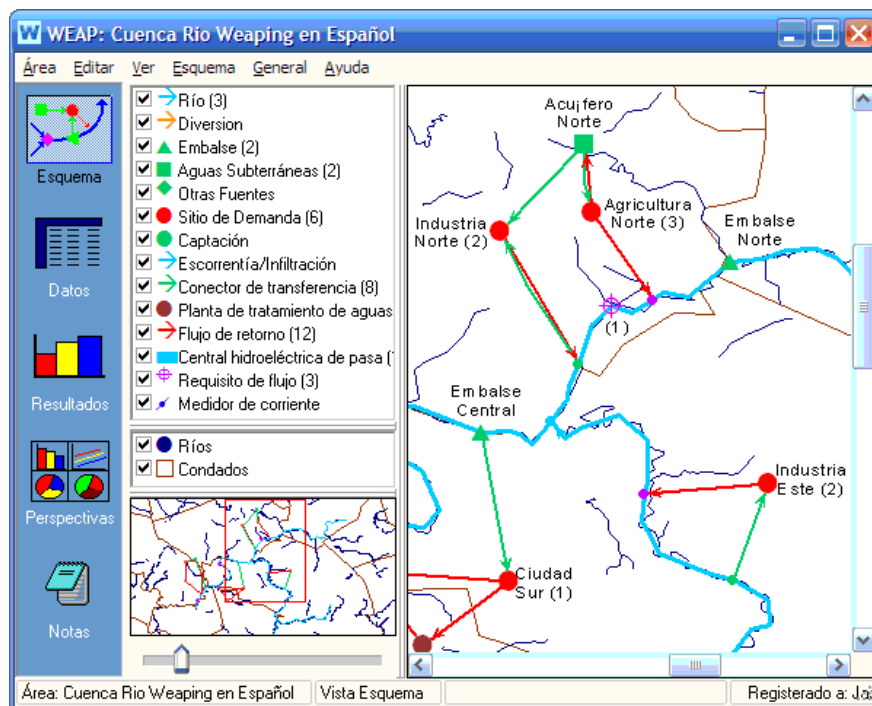


Figura 2-3. Esquema de interfaz gráfica de WEAP. Fuente:
<http://www.weap21.org/img/weapschematicES.gif>

La zona de análisis del modelo se divide en un set de subcuencas contiguas y continuas, donde a cada una se le asigna sets de forzantes meteorológicas, características de suelo, u ofertas y demandas de aguas. Para representar los efectos de altitud de cada subcuenca, se pueden agregar bandas de elevación, que son zonas geográficas delimitadas por cotas. Otra opción es delimitar por unidades de respuesta hidrológica o URH's (Flügel 1995), que son áreas de la cuenca delimitadas por uso de suelo, topografía u orientación.

El modelo posee dos estanques de balance de agua para cada tipo de uso/cobertura de suelo tal como se muestra en la Figura 2-3, donde el balance se reparte entre escorrentía superficial, infiltración, evaporación, flujo base y percolación¹.

¹ Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile, Stockholm Environment Institute, 2009. Guía Metodológica – Modelación Hidrológica y de Recursos Hídricos con el Modelo WEAP.

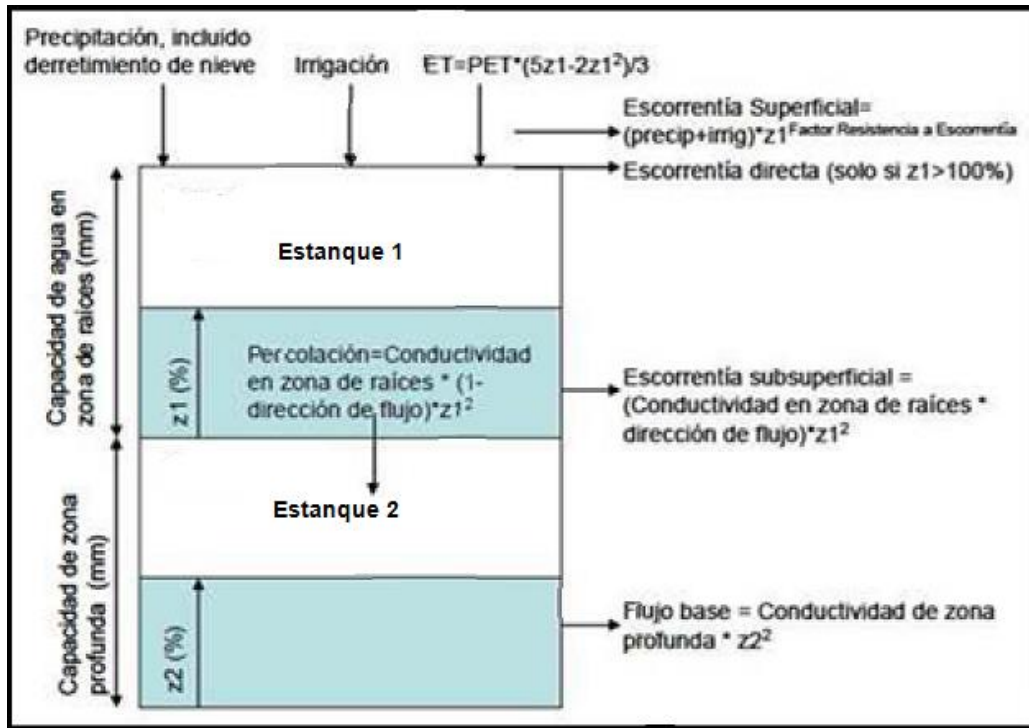


Figura 2-4. Esquema de estanques modelados por cuenca. Fuente: Centro de Cambio Global- Universidad Católica de Chile, Stockholm Environment Institute (2009).

Las ecuaciones (2) y (3) rigen lo expuesto, y están dadas por:

Estanque superior:

$$SW_j \frac{dz_{1,j}}{dt} = P_e(t) - PET(t)k_{c,j}(t) \left(\frac{5z_{1,j} - 2z_{1,j}^2}{3} \right) - P_e(t)z_{1,j}^2 - f_j k_s z_{1,j}^2 - (1 - f_j)k_s z_{1,j}^2 \quad (2.2)$$

Estanque inferior:

$$DW_j \frac{dz_{2,j}}{dt} = -k_d z_{1,j}^2 + (1 - f_j)k_s z_{2,j}^2 \quad (2.3)$$

En el estanque superior, los términos de izquierda a derecha, representan: cambio en la humedad del suelo, precipitación efectiva, evapotranspiración, escorrentía superficial, flujo intermedio y percolación.

Análogamente para el estanque inferior: cambio en la humedad del suelo, flujo base y percolación.

Los términos de la ecuación de balance representan:

Sw_j : Capacidad de almacenamiento en la zona de raíces.

$z_{1,j}$: Nivel de humedad en la zona de raíces.

P_e : Precipitación efectiva, incluye derretimiento de nieve y riego.

PET : Evaporación potencial cultivo referencia, aproximación de Penman-Monteith.

$k_{c,j}$: Coeficiente de cultivo para las diferentes porciones de cobertura de suelo.

RRF_j : Índice de resistencia a la escorrentía para cada cobertura de suelo.

k_s : Conductividad de zona de raíces.

f_j : Dirección preferencial de flujo.

Dw_j : Capacidad de almacenamiento en la zona profunda.

$z_{2,j}$: Nivel de humedad en la zona profunda.

k_d : Conductividad de zona profunda.

2.3.2 Modelo CRHM

El modelo hidrológico para regiones frías o CRHM (Cold Regions Hydrological Model) (Pomeroy et al. 2007), es una plataforma desarrollada por el centro de hidrología de la Universidad de Saskatchewan, Canadá, con el propósito de, tal como su nombre lo indica: aportar a la investigación en ambientes fríos. CRHM simula procesos como fusión, acumulación del manto nival, balance de humedad del suelo, infiltración, evapotranspiración, balance energético, sublimación, transporte de nieve, y seguimiento vectorial de flujos subterráneos y superficiales.

Al igual que WEAP, CRHM es un modelo de base física semidistribuido, el cual es dependiente de forzantes meteorológicas. A pesar de esto, la filosofía de CRHM difiere bastante en WEAP, ya que no fue hecho para calibrar parámetros del suelo y/o

topográficos, ya que su idea es usarlo en cuencas sin control fluviométrico (Sivapalan et al. 2003), donde conociendo la física del problema se puede aplicar en cualquier zona.

Las unidades de respuesta hidrológica o URH's son los elementos espaciales básicos de cálculo del modelo CRHM como se esquematiza en la Figura 2-5. Éstas caracterizan la zona de estudio con un enfoque semi-distribuido, razón por la cual gran parte del éxito de la modelación radica en una “sabia distribución y delimitación de las URH's en la cuenca”. En general, se puede definir una URH como una unidad espacial que tiene un comportamiento hidrológico similar, dado que presenta ciertos atributos en común. Estos atributos se pueden clasificar en tres grupos:

- Estructura biofísica: Suelos, vegetación, pendiente, aspecto, elevación y área.
- Estado hidrológico: Equivalente agua nieve (SWE), energía interna del manto nival, nieve interceptada por la cubierta vegetal, humedad del suelo, y nivel freático del agua subterránea.
- Flujo nivológico: Transporte por viento, sublimación, evaporación, deshielo, infiltración, drenaje y escorrentía.

A diferencia de WEAP, las URH's de CRHM son las zonas que discretizan la cuenca o subcuenca en estudio. Estas no necesariamente son bandas de elevación, ya que si bien se ocupan estos elementos espaciales para representar altitudes u efectos orográficos, estas pueden estar delimitadas sin estar necesariamente entre curvas de nivel. No obstante a lo anterior, una URH debe tener cierto grado de aproximación geográfica o una ubicación definida dentro de una secuencia hidrológica, con el objetivo de representar naturalmente los flujos que ocurren dentro de una cuenca (Gonthier 2011).

Los datos de entrada mínimos para una modelación en CRHM son: Precipitación, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento (Ellis et al. 2010).

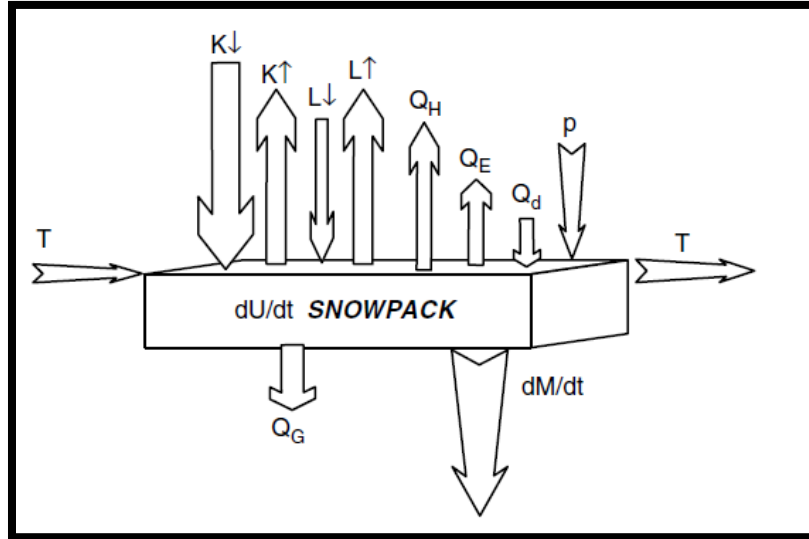


Figura 2-5. Snowpack representa un volumen de control de manto de nieve en una URH para el cálculo de derretimiento. Las flechas T representan transferencia de masa de nieve por viento, K representa las radiaciones de onda corta y L las radiaciones de onda larga. Fuente: Pomeroy et al. (2007).

Como se ve en la Figura 2-6, el modelo CRHM tiene dos formas de construirse, una consiste en programar las URH's sin conexión entre ellas, donde se modela el flujo de agua de cada URH de forma independiente para después aplicar un ruteo hacia el punto de drenaje. La otra forma consiste en programar las URH's conectadas entre ellas secuencialmente, para finalmente conducir los flujos a la URH de más aguas abajo asociada al punto de drenaje.

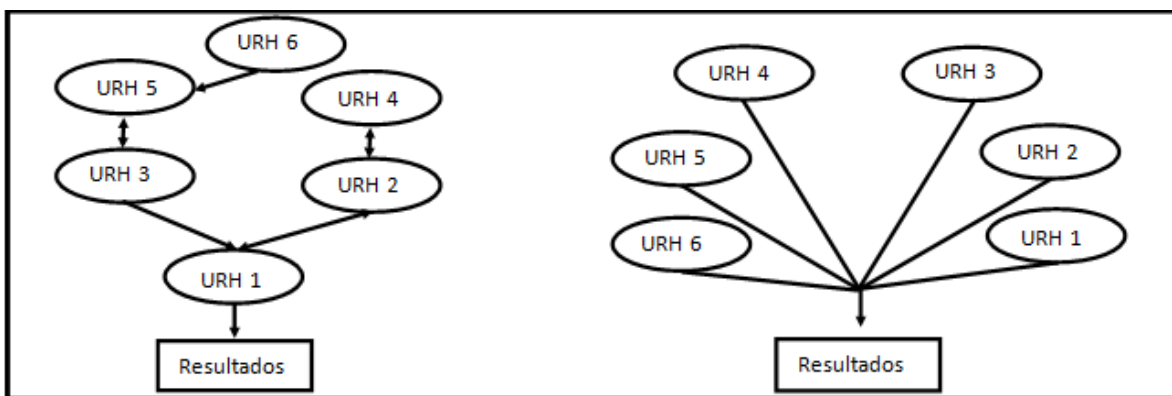


Figura 2-6. Esquema de la programación posible a utilizar en CRHM. La imagen de la izquierda corresponde a un modelo secuencial con URH's conectadas, mientras que el de la derecha corresponde a un enfoque basado en sumatoria de unidades. Fuente: Modificado de Gonthier (2011).

Finalmente en la Figura 2-6 se muestra un esquema simplificado de las interacciones de los módulos ocupados en la memoria de Videla (2013). Por simplicidad, debido a la gran cantidad de parámetros y variables manejadas por cada módulo, se presentan las tablas 2-1,2-2 y 2-3 que exponen de acuerdo a la nomenclatura adoptada por CRHM, las variables asociadas a cada uno de los módulos considerados.

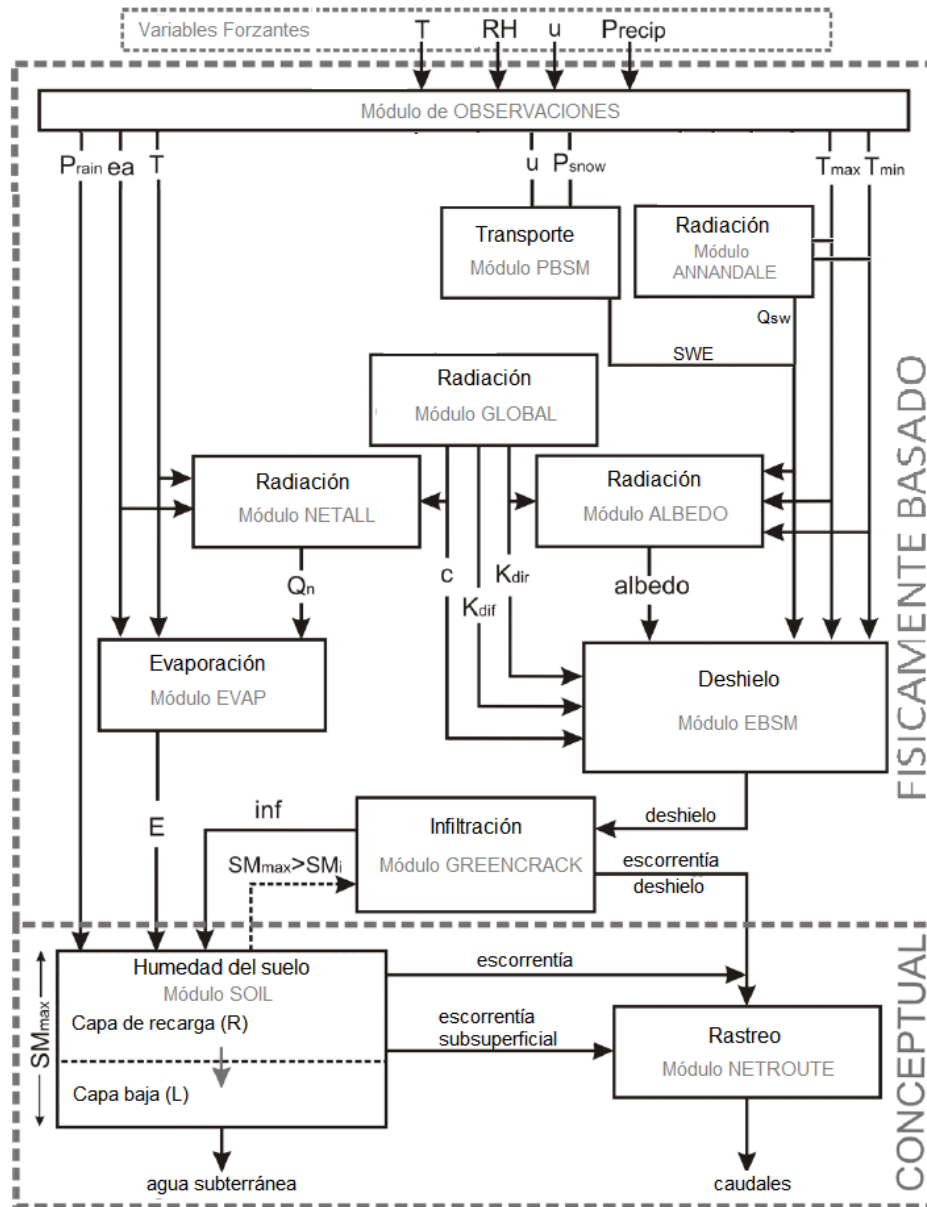


Figura 2-7. Modificada de plataforma CRHM; Esquema simplificado de módulos para construir el modelo. Fuente: Adaptado de Videla (2013).

Tabla 2-1: Tabla de módulos nomenclatura y salidas a utilizar en la modelación de la cuenca.

Módulo	Variable	Unidad	Descripción
global	QdroD	MJ /m ² d	Radiación solar directa diaria sobre cielo despejado
	QdroDext	MJ /m ² d	Radiación solar directa diaria en el tope de la atmósfera, independiente de la pendiente y el aspecto
	QdfoD	MJ /m ² d	Radiación solar difusa diaria sobre cielo despejado
	Qdro	W/m ²	Radiación solar directa sobre cielo despejado
	Qdfo	W/m ²	Radiación solar difusa sobre cielo despejado
	Qdflat	W/m ²	Radiación solar neta sobre la superficie terrestre, independiente de la pendiente y el aspecto
	QdflatE	W/m ²	Radiación solar neta en el tope de la atmosfera, independiente de la pendiente y el aspecto
	SolAng	Rad	Angulo solar en radianes
	SunMax	H	Horas diarias teóricas de sol
obs	hru_t	° C	Temperatura
	hru_rh	%	Humedad relativa
	hru_ea	kPa	Presión de vapor
	hru_u	m / s	Magnitud de la velocidad del viento
	hru_p	mm / int	Precipitación
	hru_rain	mm / int	Precipitación pluvial
	hru_snow	mm / int	Precipitación nival
	hru_tmax	° C	Temperatura máxima diaria
	hru_tmin	° C	Temperatura mínima diaria
	hru_tmean	° C	Temperatura media diaria
	hru_eamean	kPa	Presión de vapor media diaria
	hru_umean	m / s	Magnitud de la velocidad del viento media diaria
	hru_rhmean	%	Humedad relativa media diaria
hru_newsnow	Adimensional	Variable binaria que indica si se tiene nieve fresca	
intcp	net_rain	mm / int	Precipitación pluvial descontada la intercepción
	net_snow	mm / int	Precipitación nival descontada la intercepción
	net_p	mm / int	Precipitación descontada la intercepción
	intcp_evap	mm / int	Intercepción evaporada
Annandale	hru_SunAct	H	Horas de sol

Tabla 2-2: Tabla de módulos nomenclatura y salidas a utilizar en la modelación de la cuenca.

Módulo	Variable	Unidad	Descripción
pbsm	SWE	Mm	Equivalente en agua del manto nival
	Subl	mm / int	Sublimación producto del blowingsnow
	Drift	mm / int	Nieve transportada fuera de la URH
	Prob	Adimensional	Probabilidad de ocurrencia de blowingsnow
	snowdepth	M	Profundidad del manto nival
albedo	Albedo	Adimensional	Albedo
	meltflag	Adimensional	Variable binaria que indica los días en que el deshielo es posible
	winter	Adimensional	Variable binaria que indica la temporada de invierno
netall	net	MJ /m ² int	Radiación neta
	netD	MJ /m ² d	Radiación neta diaria
	RnD	mm/m ² d	Radiación neta diaria
ebsm	snowmeltD	mm / d	Deshielo diario
	LW_ebsm	Mm	Agua líquida en el manto nival
	u_ebsm	MJ	Déficit de energía en el manto nival
	Qmelt	MJ / d	Energía disponible para el deshielo
evap	hru_actet	mm / int	Evapotranspiración real (limitada por la cantidad de humedad en el suelo)
	hru_evap	mm / int	Evaporación
	hru_evapD	mm / d	Poder secante según Granger
	evapGrangerD	mm / d	Evaporación diaria estimada a partir de medias diarias
Greencrack	infil	mm / int	Infiltración
	snowinfil	mm / int	Infiltración proveniente de la nieve
	runoff	mm / int	Escorrentía
	meltrunoff	mm / int	Escorrentía proveniente de la nieve
	crackstat	Adimensional	Variable de estado de la infiltración
	RainOnSnow	Mm	Precipitación acumulada sobre el manto nival
	crackon	Adimensional	Variable binaria que indica cuando la rutina crack está habilitada

Tabla 2-3: Tabla de módulos nomenclatura y salidas a utilizar en la modelación de la cuenca.

Módulo	Variable	Unidad	Descripción
soil	Sd	Mm	Almacenamiento por depresión
	soil_rechr	Mm	Contenido de humedad del suelo en la zona de recarga
	soil_moist	Mm	Contenido de humedad del suelo de la zona de raíces
	soil_gw	mm / int	Exceso desde soil_moist y Sd que va al agua subterránea
	soil_gw_D	mm / d	soil_gw acumulado diario
	soil_ssr	mm / int	Escorrentía subsuperficial desde soil_rechr y Sd
	soil_ssr_D	mm / d	soil_ssr acumulado diario
	soil_runoff	mm / int	Resto del exceso de agua en el suelo
	soil_runoff_D	mm / d	soil_runoff acumulado diario
Netroute	inflow	mm× km ² / int	Suma del aporte de otras URH y flujo superficial y subsuperficial del mismo URH
	outflow	mm× km ² / int	Salida desde la URH después de aplicar el retardo
	gwoutflow	mm× km ² / int	Salida de agua subterránea desde la URH después de aplicar el retardo
	ssrinflow	mm× km ² / int	Escorrentía subsuperficial hacia la URH
	ssroutflow	mm× km ² / int	Escorrentía subsuperficial desde la URH
	runinflow	mm× km ² / int	Suma de escorrentía y escorrentía proveniente del deshielo hacia la URH
	runoutflow	mm× km ² / int	Salida de escorrentía después de aplicar el retardo
	basinflow	m ³ / int	Salida media de escorrentía y flujo subsuperficial
	basingw	m ³ / int	Salida media de agua subterránea

2.3.3 Modelo VIC

Variable Infiltration Capacity o VIC (Liang et al. 1994) es un modelo hidrológico de macroescala semidistribuido creado por la Universidad de Washington, que resuelve balances de agua y energía mediante una discretización de celdas cuadradas en la cuenca, las cuales vienen siendo las unidades de trabajo básicas del modelo. Esta es una característica extremadamente relevante con respecto a los modelos expuestos anteriormente, ya que dividir en celdas cuadradas la cuenca hace que la resolución espacial pueda ser mucho más fina que usar URH's.

En el modelo VIC, cada celda se modela de forma independiente, y sin flujo horizontal de agua. El modelo basado en grillas simula la serie temporal sólo para cada celda de la cuadrícula, que es distribuida de manera no uniforme dentro de cada capa (muy parecido al modelo agregado de CRHM).

Para el funcionamiento de VIC, se deben generar tantos archivos de entrada como celdas tiene la cuenca, y en cada uno de estos archivos se tienen cuatro columnas de forzantes meteorológicas, que detallan la precipitación, temperatura mínima, temperatura máxima y velocidad del viento respectivamente, esto para cada paso de tiempo definido. Además de las variables ya mencionadas, VIC también genera sus propios de valores de radiación y albedo (Wood et al. 1992).

Las características más distintivas del modelo VIC incluyen: Variabilidad con celdas en los tipos de vegetación; variabilidad con celdas en la capacidad de almacenamiento de humedad del suelo; drenaje de la celda de suelo donde se encuentra el flujo base; y la inclusión de la topografía que permite tasas de caída de precipitación y temperatura orográficas, que resulta en la hidrología más realista de las zonas montañosas.

El tamaño de las celdas de VIC en calibraciones de otras cuencas continentales ha estado principalmente entre los rangos 0.125 a 2 grados de resolución (Nijssen et al. 1997), sin embargo, en el modelo de Páez (2014), la resolución de cada celda se definió en 0.033 grados en cada lado (~3.7 km). El motivo de esta resolución es que los efectos asociados a gradiente de elevación en cobertura nival pueden ser observados, lo que no es posible si se ocuparan los rangos de cuencas continentales.

En la Figura 2-8 se muestra el funcionamiento de cada celda en VIC, donde cada una debe tener todos los parámetros forzantes necesarios para la correcta simulación de los procesos, tanto hídricos como energéticos.

Las celdas no interactúan entre sí en la fase de balance energético. Esto requiere una serie de supuestos, siendo el más importante que los flujos verticales son mucho más grandes que los horizontales. Así también se considera que el flujo subterráneo es pequeño en relación al de superficie y tanto el subsuperficial como provenientes de lagos y humedales no tienen aportes significativos a los canales, y a las inundaciones sobre las planicies no son importantes (Ulloa 2012).

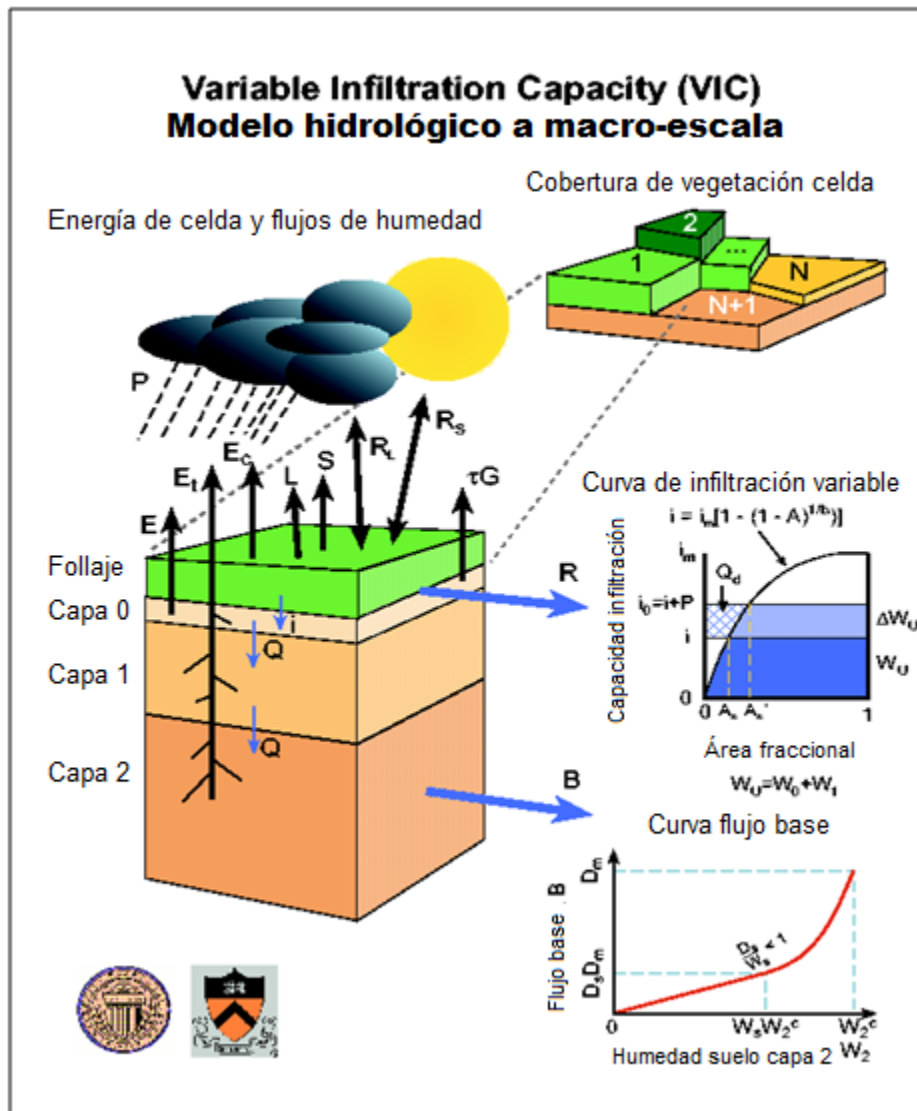


Figura 2-8. Representación de celdas en modelo VIC. Fuente: Maurer (2011).

En el modelo VIC cada celda además tiene una distribución interna de tres capas, las cuales deben definirse por profundidad y son las encargadas de modelar los procesos entre flujos. La primera de arriba hacia abajo corresponde a infiltración y escurrimiento superficial, la cual es del orden de 10 centímetros, luego viene la capa de procesos de flujo medio, midiendo entre 20 y 50 centímetros, y finalmente está la de procesos de flujo base que mide entre 70 y 150 centímetros.

La simulación en nieve como se muestra en la Figura 2-9, usa dos capas para el balance de energía en la superficie de nieve, modelando la acumulación y el derretimiento. El funcionamiento de esto, es que se utiliza una partición simple de temperatura para diferenciar precipitación líquida de sólida, para ello se identifica como lluvia todos los valores sobre 2°C y a nieve bajo 0°C, con una variación lineal aquellas temperaturas que se encuentran entre estos dos valores.

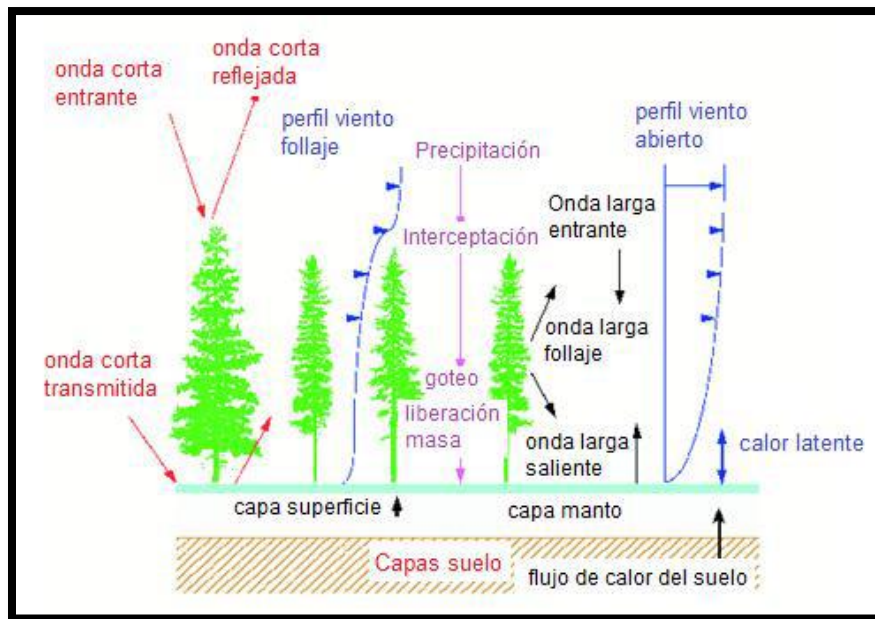


Figura 2-9. Simulación de nieve en VIC. Fuente: Gao et al. (2010).

Paralelamente el modelo supone una compresión de la nieve ya existente como se presenta en la Figura 2-10, a través de un algoritmo recursivo que genera capas de nieve comprimida mientras se tiene nieve nueva en el sistema. De la misma forma, el modelo disminuye el albedo a medida que aumenta la edad de la nieve.

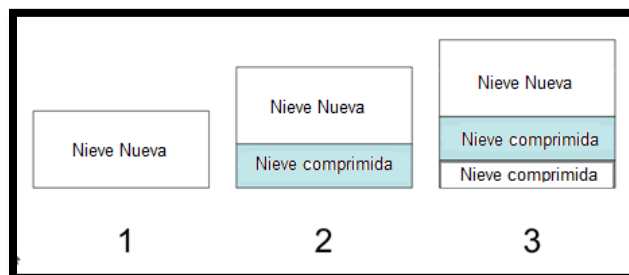


Figura 2-10. Algoritmo de compresión de nieve en VIC.

La parametrización de los suelos se basa en texturas de suelo, la cual se extrae desde la FAO². Esta parametrización es necesaria, dado que la composición del suelo es utilizada para estimar porosidad, saturación, marchitamiento, capacidad residual entre otros parámetros para casos no saturados.

Los tipos existentes de suelo se pueden observar en la Figura 2-11, dependiendo del porcentaje de arcilla, arena y limo.

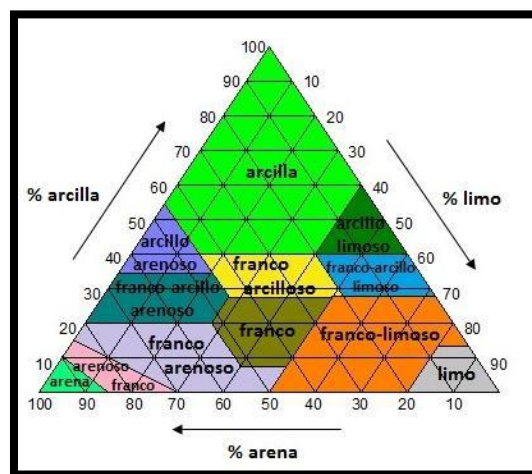


Figura 2-11. Definiciones de tipos de suelos según relación porcentual de arena, arcilla y limo.
Fuente: www.fao.org/climatechange/54273/en/

² Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura

Una vez terminados los procesos de balance de energía y masa en cada celda, se procede a relacionar las celdas entre sí con el fin de obtener el caudal de salida de la cuenca, tal como se muestra en el Figura 2-12. Este programa se conoce como el modelo Route (Lohmann et al. 1997), y utiliza además información de la topografía y también archivos de dirección de flujo de cada celda, los cuales deben ser fijados al comienzo de la modelación.

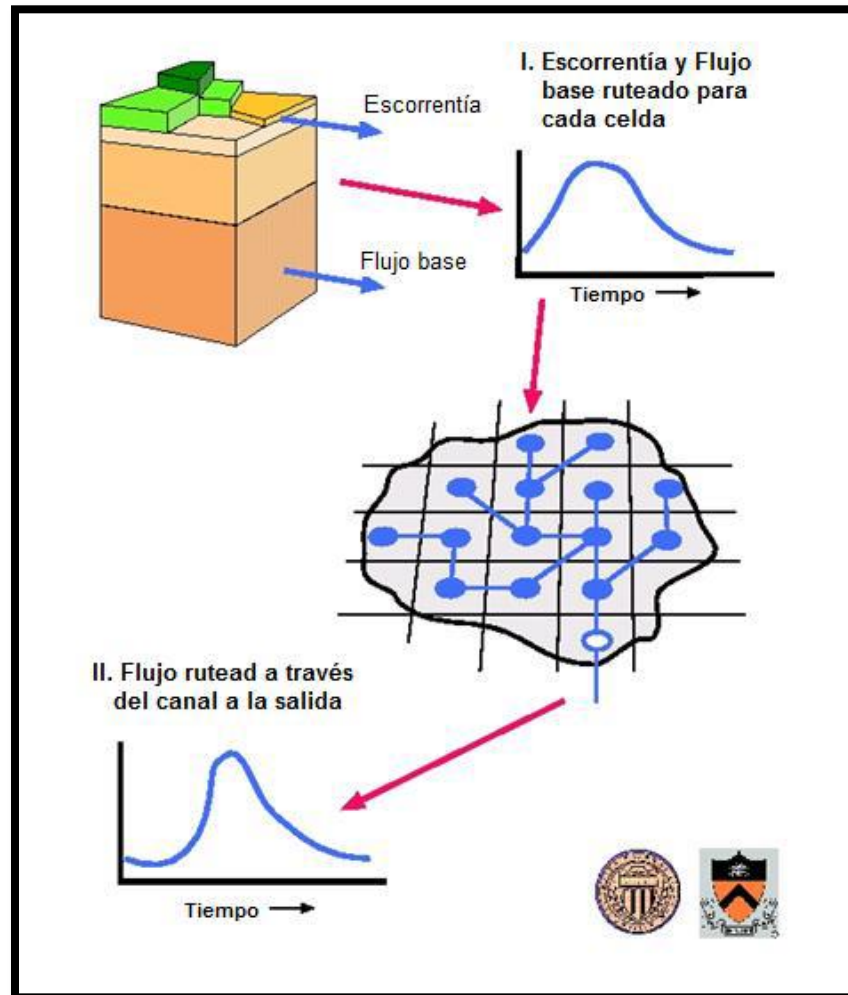


Figura 2-12. Esquema conceptual del modelo Route. Fuente: Gao et al. (2010)

El resumen del funcionamiento de los modelos VIC y Route se esquematiza en la Figura 2-12, donde se muestran qué necesitan y qué resultados entregan a través de sus procesamientos. Todos estos pasos deben ejecutarse bajo la consola de Linux, dado que el programa no posee interfaz gráfica a diferencia de los modelos anteriores.

Los archivos como fracción, dirección de flujo, máscara, ruta, parámetros globales y bandas de nieve vienen por defecto en VIC y Route. Si uno desea cambiarlos, basta con abrir el código y modificarlo.

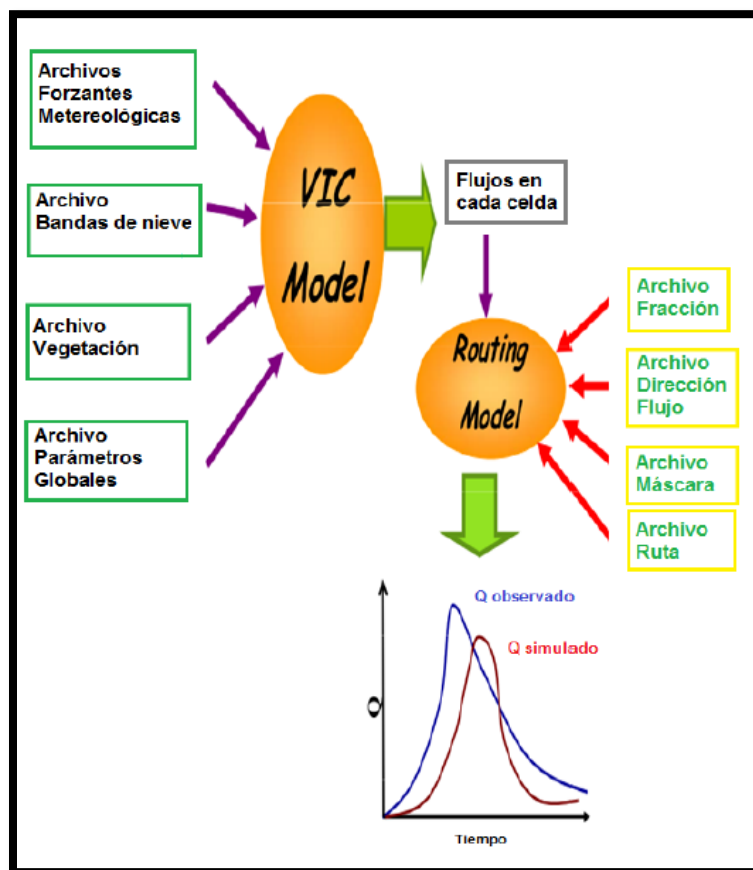


Figura 2-13. Representación del modelo VIC y del modelo Routing. Fuente: Adaptado de Ulloa (2012).

Capítulo 3 : CARACTERIZACION DE LA ZONA Y PERÍODO DE ESTUDIO

3.1 Ubicación y Fisiografía

La cuenca del Río Maipo abarca casi todo el territorio de la región Metropolitana, incluso se extiende en partes de la V y VI región entre los paralelos 32°55'-34°15' latitud sur, y meridianos 69°55'- 71°33' longitud oeste. El área total de drenaje es de aproximadamente 15.304 km², desembocando en el océano Pacífico a la altura de la localidad de Lolleo. Su génesis proviene del Volcán Maipo, donde aguas abajo los principales aportes de la parte alta de la cuenca son los ríos Volcán, Yeso, Colorado y Olivares, mientras que en la parte baja desembocan ríos como el Mapocho, Angostura y el Clarillo.

Por otro lado, el Río Maipo tiene una longitud de alrededor 250 km, y es la principal fuente de agua de la región Metropolitana. Atiende alrededor del 70% de la demanda actual de agua potable y cerca de un 90% de las demandas de regadío (Videla 2013).

Al ser un territorio ubicado en la zona central del país, el agua tiene muchas demandas distintas. Por ejemplo, comprende el uso de acuicultura, actividades mineras, pesca deportiva y recreativa, captaciones superficiales y subterráneas para abastecer la demanda de agua potable, demandas de regadío, sin contar el altísimo aprovechamiento hidroeléctrico de pasada, dominado en su mayoría por la empresa AES Gener.

Tabla 3-1. Superficie total destinada a cada uso de suelo dentro de la cuenca de estudio.
Fuente: Adaptada de DGA, 2004.

Cuenca del Río Maipo	Uso de suelo	Superficie (Ha)	(%) Destinado para cada uso
15.304 km ²	Praderas	64.736	4.2
	Terrenos agrícolas y agricultura de riego	246.447	16.1
	Plantaciones forestales	9.584	0.6
	Áreas urbanas e industriales	58.220	4
	Minería industrial	1.966	0.1
	Bosque nativo y bosque mixto	73.190	4.8
	Otros usos	633.921	41.4
	Áreas sin vegetación	442.336	28.9

En la Figura 3-1 se esquematiza la cuenca alta del río Maipo, la cual será analizada en las subcuencas definidas por las estaciones fluviométricas Volcán en Queltehues, Maipo en las Melosas, Olivares antes junta río Colorado, Colorado antes junta río Olivares y Afluente embalse el Yeso.

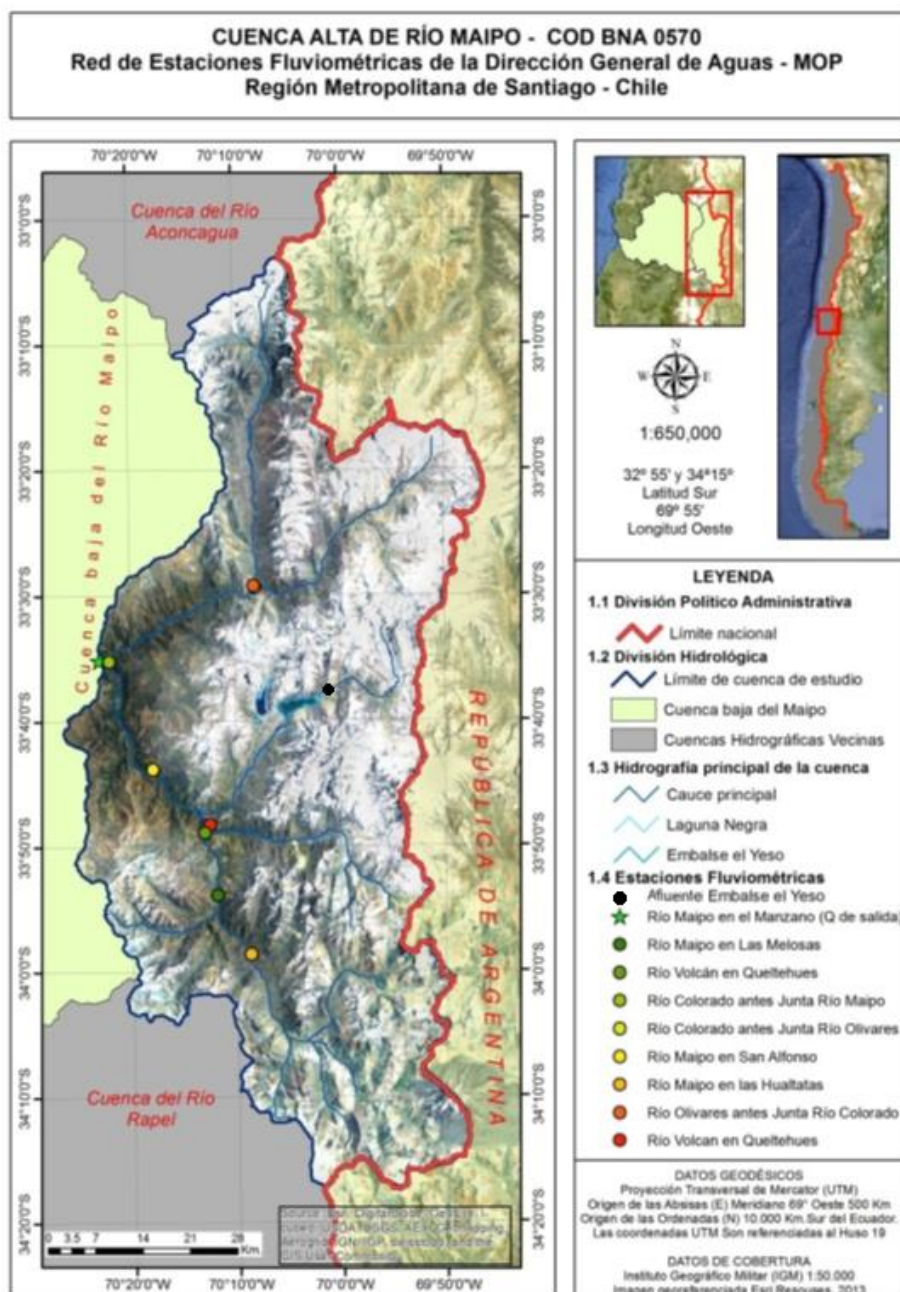


Figura 3-1. Esquema de la cuenca alta del Río Maipo. Fuente: Modificado de Videla (2013).

3.2 Clima

La precipitación de la cuenca resalta por un máximo invernal y un período estival. Este régimen se conoce como clima templado mediterráneo, y abarca desde los 30°S hasta los 40° S.

En la cuenca hay un marcado gradiente de temperatura tal como se observa en la Figura 3-2, que es ocasionado por las fuertes diferencias de cotas que se pueden encontrar.

La temperatura media anual de la parte alta (estación El Yeso Embalse) es de 9°C, donde se pueden alcanzar temperaturas máximas de 27°C en verano, mientras que en invierno puede llegar fácilmente a los -10°C. Por otro lado, en la parte baja de la cuenca (estación Pirque) la temperatura media anual es de 12°C, y las temperaturas máximas en verano rondan los 35°, mientras que en invierno las temperaturas mínimas están cerca de los -5°C, infiriendo que hay un marcado efecto meteorológico de altitud en la cuenca.

Sobre los 1500 msnm la precipitación ya se expresa en forma de nieve dependiendo de la estación del año, donde se alcanzan valores medios anuales de 536 mm en Estación San José de Maipo y 640 mm en la estación Yeso embalse.

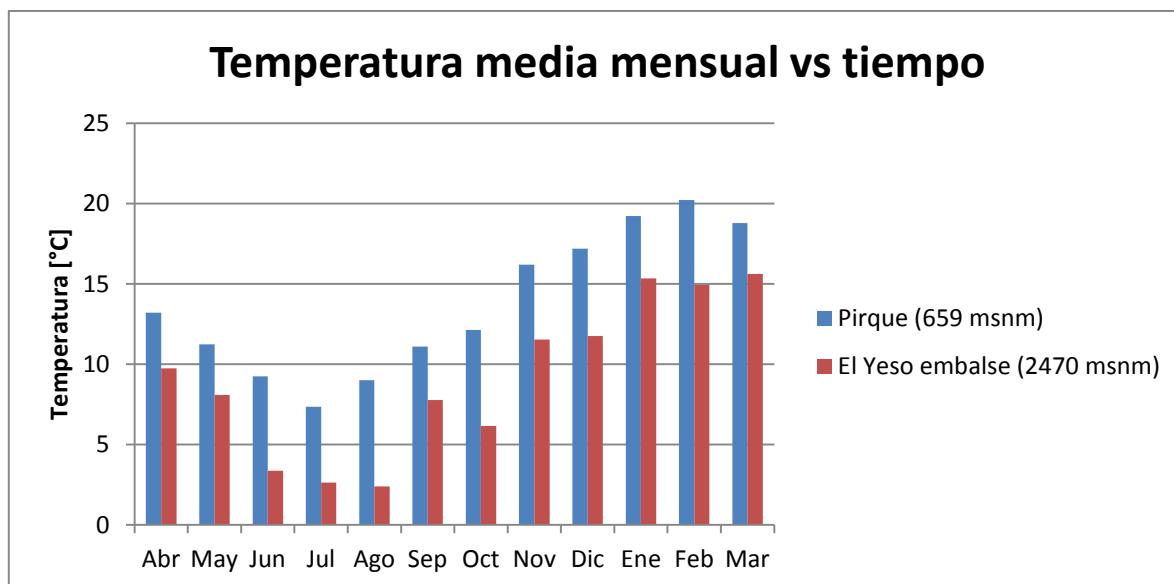


Figura 3-2. Temperaturas medias mensuales para las estaciones meteorológicas Pirque y El Yeso embalse entre el período 2000 y 2012.

3.3 Hidrología

La hidrología de las cuencas altas tienen un marcado régimen nivo-pluvial dadas sus condiciones geográficas, ya que en invierno las precipitaciones se expresan en forma sólida, lo que implica un alto deshielo en la época de verano proveniente de nieve y de glaciares. A continuación se exponen las características hidrológicas de las subcuencas en estudio.

3.3.1 Maipo en las Melosas

La estación Maipo en las Melosas (MELM) está ubicada en la latitud $33^{\circ}50'53''$ y la longitud $70^{\circ}11'46''$, tiene una elevación media de 3500 msnm y un área de 1461 km^2 . Presenta un marcado régimen nival en sus caudales medios mensuales acorde a la Figura 3-3, donde los máximos caudales están presentes en Diciembre y Enero, mientras que en la temporada invernal los mínimos caudales se presentan en Julio y Agosto, presentando un caudal medio anual de $44 \text{ m}^3/\text{s}$.

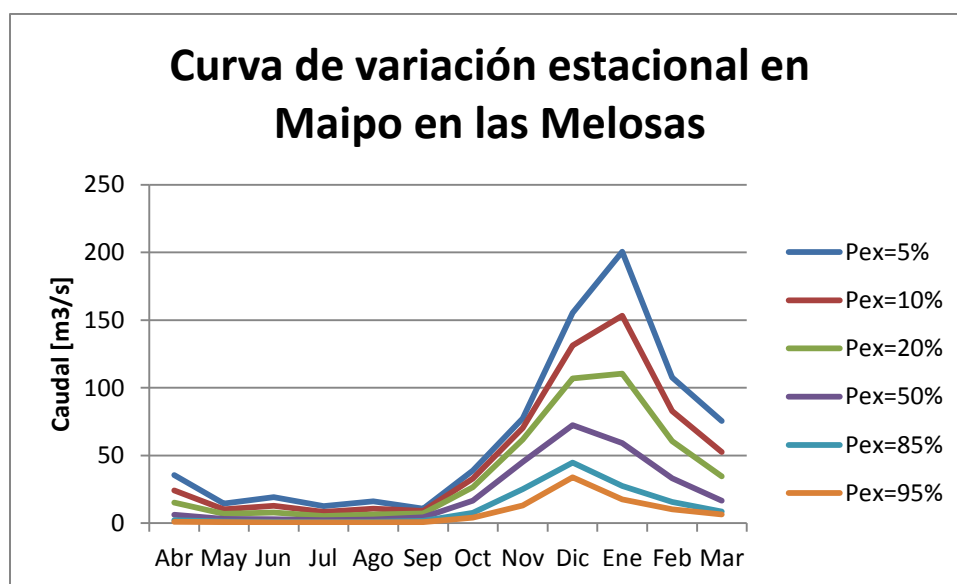


Figura 3-3. Curva de variación estacional en estación Maipo en las Melosas. Período de estudio 1980 a 2001.

3.3.2 Volcán en Queltehues

Volcán en Queltehues (VEQ) está localizada justo aguas arriba de la confluencia con el Río Maipo, ubicada en la latitud $33^{\circ}48'20''$ y la longitud $70^{\circ}12'32''$, tiene una elevación media de 3300 msnm y un área de 524 km^2 . El Río Volcán nace de los deshielos del volcán San José, el cual se encuentra en la parte sur de la cuenca alta del Río Maipo.

El caudal medio anual es de $30 \text{ m}^3/\text{s}$, y al igual que en Maipo en las Melosas, sus caudales máximos se expresan en la época de verano, mientras que en invierno se alcanzan los mínimos.

3.3.3 Afluente embalse el Yeso

La cuenca Afluente al embalse el Yeso (AEY) ubicada en el Río Yeso, se ubica en la zona central de la cuenca alta del Río Maipo, específicamente en la Latitud $33^{\circ}51'04''$ y la Longitud $70^{\circ}11'54''$. Posee una elevación media de 4000 msnm y un área de 360 km^2 , a lo que se le atribuye una hidrología nival por su gran altura al igual que las cuencas anteriores (ver Figura 3-5), con un caudal medio anual de $10 \text{ m}^3/\text{s}$ y sus peaks entre Diciembre y Enero.

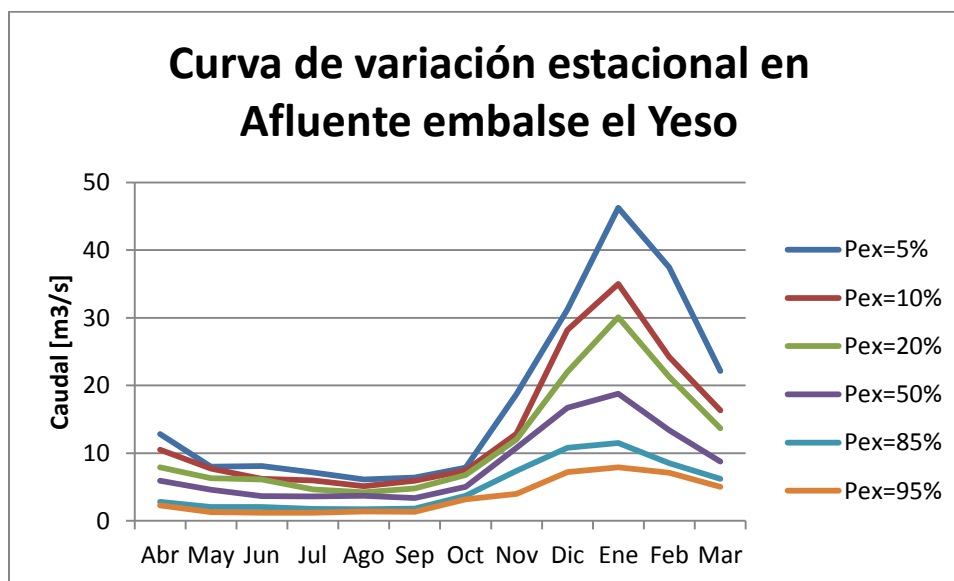


Figura 3-4. Curva de variación estacional en estación embalse el Yeso. Período de estudio 1983 a 2003.

3.3.4 Colorado antes junta con Río Olivares

Colorado antes junta río Olivares (COL) es una estación de la DGA que se ubica en el Río Colorado, en la Latitud $33^{\circ}24'24''$ y Longitud $70^{\circ}08'03''$, correspondiente a la zona norte de la cuenca alta del Río Maipo. La cuenca posee una extensión de 788 km^2 y una elevación media de 3720 msnm. El caudal medio anual de esta subcuenca es de $14 \text{ m}^3/\text{s}$, y su hidrología es predominantemente nival.

3.3.5 Olivares antes junta Río Colorado

Olivares antes junta río Colorado (OLI) se ubica en la latitud $33^{\circ}29'16''$ y en la longitud $70^{\circ}08'12''$, Olivares antes junta Río Colorado es una estación de la DGA que abarca un área de cuenca de 543 km^2 y una elevación media de 3687 msnm. Los caudales máximos al igual que las subcuencas anteriores se manifiestan en Diciembre y Enero, teniendo un caudal medio anual de $7.64 \text{ m}^3/\text{s}$.

3.4 Período de estudio

El modelo VIC fue calibrado por Páez (2014) entre los años 2001 y 2014, CRHM por Videla (2013) entre los años 2008 y 2012, y finalmente WEAP por Serrano (2014) entre 1983 y el 2004.

De acuerdo a lo anterior, el periodo de estudio fue definido entre el 1 de Enero del 2008 hasta el 31 de Diciembre del 2012. La elección de estas fechas significó aplicar el modelo WEAP en un período no probado con anterioridad, por lo que fue necesario modificar las forzantes para incluir el nuevo periodo.

Capítulo 4 : ANÁLISIS DE LA INFORMACION DISPONIBLE Y PREPARACIÓN DE DATOS DE CADA MODELO

La información digital disponible de los modelos corresponde a la Tabla 4-1, donde se identifica cuales cuencas son las que puede simular cada modelo, junto con la escala de tiempo en los que fueron calibrados. Esto es de suma relevancia al momento de simular y comparar, ya que una cuenca que ha sido calibrada en una escala temporal mensual, no podrá extrapolarse a escala diaria o semanal para compararse consigo misma en otro modelo, a menos que también sea mensual. La razón de esto es que mientras más grande la escala temporal, muchas veces algunos de los parámetros calibrados no tienen representatividad física. No obstante a lo anterior, escalas temporales diarias si pueden extrapolarse a escalas más grandes como semanal o mensual.

Dicho esto, el modelo WEAP no se comparará a escala semanal o diaria, pero VIC y CRHM si serán comparados a escalas diarias, semanales y mensuales.

Tabla 4-1. Resumen de la calibración temporal, las cuencas simuladas y autores de cada modelo.

Autor	Modelo	Calibración temporal	Cuencas simuladas
Serrano (2014)	WEAP	Mensual	AEY, MELM, VEQ
Videla (2013)	CRHM	Diaria	AEY, MELM, VEQ, OLI y COL
Páez (2014)	VIC	Diaria	OLI y COL

Los procesamientos de inputs de los modelos se detallan a continuación, las cuales son exactamente los mismos que adoptaron los autores.

4.1.- Caudales observados en estaciones fluviométricas

Dependiendo de la situación de cada subcuenca, los caudales de cuatro estaciones debieron ser rellenados o modificados para resituir su régimen natural. Uno de los motivos fue que hay intervención de bocatomas aguas arriba de las estaciones, donde la extracción es restituida aguas abajo de las estaciones, mientras que también se identificó el caso de una estación no vigente en el período de estudio, rellenándola con correlaciones con una estación cercana.

4.1.1 Fluviometría en Colorado antes junta Olivares

Se identificaron 2 bocatomas aguas arriba de la estación, estas son “captación Parraguirre” y “captación río Colorado”, ambas de la empresa AES Gener. De esta forma, el caudal en régimen natural se obtiene de la siguiente expresión:

$$Q_{\text{colorado regimen natural}} = Q_{\text{Parraguirre}} + Q_{\text{río Colorado}} + Q_{\text{Colorado DGA}} \quad (4.1)$$

4.1.2 Fluviometría en Olivares antes junta Colorado

Al igual que el caso anterior, existen 2 captaciones de AES Gener, estas son “captación la Jarilla” y “captación río Olivares”. Análogamente el caudal en régimen natural del río Olivares se obtiene de la siguiente expresión:

$$Q_{\text{olivares regimen natural}} = Q_{\text{la Jarilla}} + Q_{\text{río Olivares}} + Q_{\text{Olivares DGA}} \quad (4.2)$$

4.1.3 Fluviometría en Volcán en Queltehues

Al igual que las estaciones anteriores, esta estación fluviométrica está intervenida por otra central de pasada de AES Gener llamada “Queltehues”, la cual devuelve el agua directamente al río Maipo. El caudal del régimen natural se obtiene de la siguiente expresión:

$$Q_{\text{volcan regimen natural}} = Q_{\text{Queltehues}} + Q_{\text{Volcan DGA}} \quad (4.3)$$

4.1.4 Fluviometría en Maipo en las Melosas

Maipo en las Melosas es una estación de la DGA que dejó de registrar caudales a partir de Noviembre del año 2001, por lo que su reconstrucción tuvo que ser a partir de la estación Maipo en las Hualtatas. Esta última es una estación que se encuentra aguas arriba

de Maipo en las Melosas, siendo bastante representativa dado que no hay aportes tributarios importantes entre estas 2 estaciones, ni tampoco se encontró intervención de alguna bocatoma que derivara las aguas fuera de la cuenca intermedia. En la Figura 4-2 se da a conocer la correlación altísima que tienen estas estaciones.

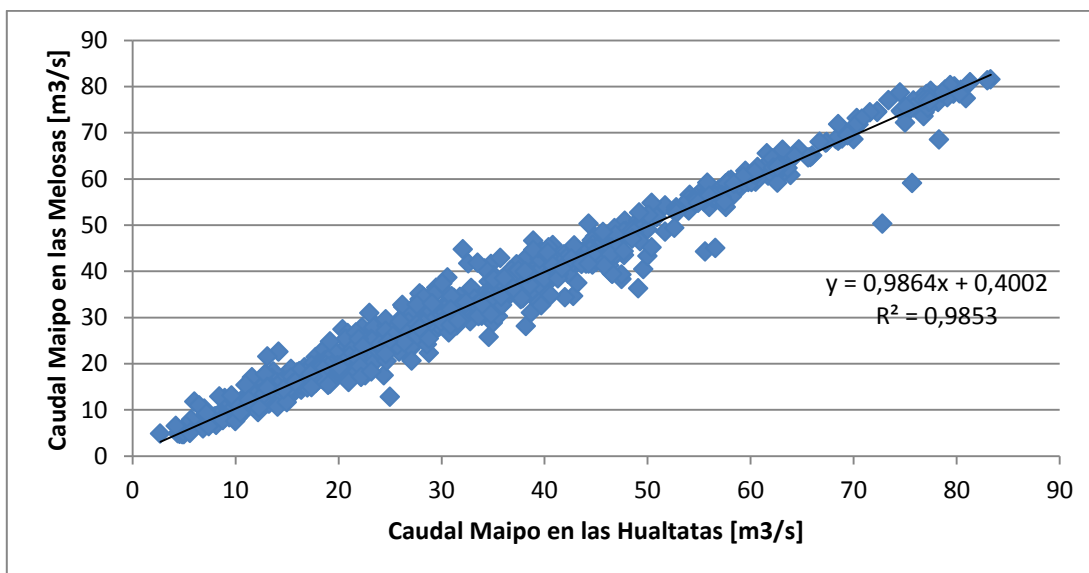


Figura 4-1. Correlación para rellenar Maipo en las Melosas a partir de Maipo en las Hualtatas.

4.1.5 Fluviometría Afluente embalse el Yeso

Al no ser una estación de la DGA, los datos de esta estación fueron descartados para la simulación y comparación fluviométrica, debido a que no se cuenta con su información de la serie de tiempo entre el período de estudio. Esta es una estación ficticia, dado que su caudal afluente se reconstruye mediante la regla de operación del embalse, la infiltración y la evaporación.

4.2- Inputs modelo WEAP

El modelo WEAP implementado por Serrano (2014) originalmente tenía tres bandas de elevación por cada subcuenca, sin embargo, esto se encontró insuficiente al momento de comparar los datos nivales espaciales. Por lo expuesto anteriormente, en el caso particular de la subcuenca Volcán en Queltehues, para ver el efecto de la nieve con mayor resolución

espacial se decidió crear dos bandas de elevación adicionales. La esquematización del modelo WEAP en las cuencas de interés, caracterizadas en la Tabla 4-2, se presenta en la Figura 4-3. En la tabla 4-3 se indican las características topográficas (elevación media y área) de cada URH.

Tabla 4-2. Estaciones fluviométricas usadas para calibrar el modelo WEAP.

Estación	Código BNA	Latitud	Longitud	Altitud [msnm]
MELM	05701002-9	33°51'04"	70°11'54"	1527
VEQ	05702001-6	33°48'31"	70°12'40"	1365
AEY	-	33°38'19"	70°02'14"	2570

Tabla 4-3. Parámetros topográficos de las nuevas bandas de elevación.

Banda	Elevación media [msnm]	Área [km²]
B3	1948	88.12
B32	2831.5	86.53
B2	3213	80.5
B21	5161	93.97
B1	6527	174.88

Como se comentó al principio del capítulo, el modelo WEAP solamente modela la parte sur de la cuenca alta del río Maipo en una escala mensual, por ende, estaciones como Olivares antes junta río Colorado y Colorado antes junta río Olivares no serán comparadas en este modelo.

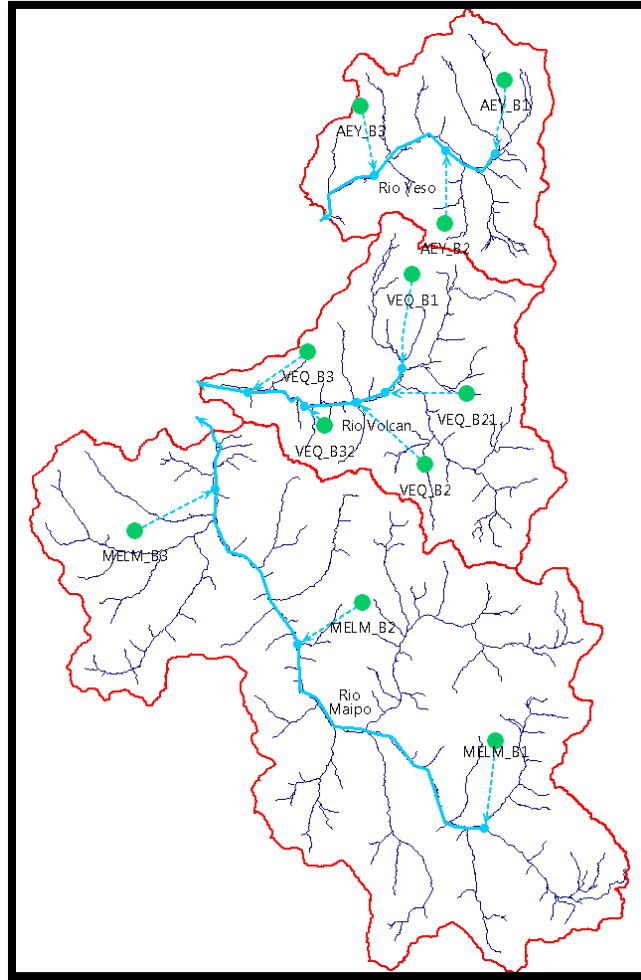


Figura 4-2. Esquema modelo WEAP modificado de Serrano (2014).

4.2.1 Precipitación WEAP

La distribución de la precipitación en el modelo WEAP se mantuvo de acuerdo a la metodología adoptada por Serrano (2014), es decir, se utilizó la estación Pirque, cuya ubicación se presenta en la Tabla 4-4, junto con un gradiente logarítmico de precipitación.

Tabla 4-4. Estación meteorológica a utilizar en precipitación.

Estación	Código BNA	Latitud	Longitud	Altitud [msnm]
Pirque	05711003-1	33°40'25"	70°35'13"	659

Con los datos mensuales y el gradiente, se calcularon las precipitaciones a partir de la siguiente expresión:

$$Pp_{z,m} = \frac{A_m \cdot \ln(z) + B_m}{Prom_m} \cdot Pp_{Pirque_m} \quad (4.4)$$

Donde,

$Pp_{z,m}$: Precipitación en altitud z y mes m .

A_m : Coeficiente A para mes m .

B_m : Coeficiente b en el mes m .

$Prom_m$: Precipitación promedio en estación base Pirque en el mes m .

Pp_{Pirque_m} : Precipitación en estación base Pirque en el mes m .

Los valores de los coeficientes A_m y B_m se exponen en la Tabla 4-5

Tabla 4-5 Resumen coeficientes de ajuste logarítmico. Fuente: Serrano (2014)

Mes	A_m	B_m	R^2
Ene	4.45	-26.96	0.88
Feb	3.27	-17.88	0.98
Mar	3.40	-14.98	0.94
Abr	8.74	-31.14	0.95
May	16.92	-30.81	0.88
Jun	30.68	-44.60	0.84
Jul	13.10	1.78	0.87
Ago	15.95	-20.04	0.95
Sep	15.22	-54.26	0.85
Oct	4.87	-16.46	0.83

Nov	5.79	-26.21	0.90
Dic	1.14	-5.74	0.93

4.2.2 Temperatura WEAP

Al igual que la precipitación, se tomó como estación meteorológica Pirque junto con un gradiente lineal de temperaturas mensuales propuesto por Ahumada (2012), dado que fue la misma forma de generar este input por Serrano (2014). En la Tabla 4-6, se ilustran los valores del gradiente lineal de temperatura.

Tabla 4-6. Resumen gradiente de temperatura lineal mensual. Fuente: Ahumada (2012).

Mes	A_m	B_m	R^2
Ene	-0.004	22.23	0.92
Feb	-0.004	21.72	0.90
Mar	-0.003	20.03	0.91
Abr	-0.003	16.45	0.96
May	-0.003	12.74	0.99
Jun	-0.002	10.52	0.96
Jul	-0.002	9.53	0.92
Ago	-0.003	10.91	0.94
Sept	-0.003	12.85	0.98
Oct	-0.003	15.82	0.99
Nov	-0.004	18.46	0.97
Dic	-0.004	20.92	0.95

Finalmente la temperatura mensual se calcula mediante la siguiente expresión:

$$T_{z,m} = \frac{A_m * z + B_m}{Prom_m} * T_{Pirque_m} \quad (4.5)$$

Donde,

$T_{z,m}$: Temperatura en altitud z y mes m.

A_m : Coeficiente A para mes m.

B_m : Coeficiente B en el mes m.

$Prom_m$: Temperatura promedio en estación base Pirque en el mes m.

T_{Pirque_m} : Temperatura en estación base Pirque en el mes m.

4.2.3 Aporte Glaciar WEAP

Se incluye en la modelación hidrológica un aporte mensual producto de los glaciares existentes en la zona. Se modela este aporte utilizando la tasa de rendimiento en conjunto con el retroceso promedio a nivel mensual de los mismos. Donde el retroceso en el mes actual, genera un aporte en el mes posterior. En la tabla 4-7 se muestran los valores de los rendimientos unitarios asociados por mes, en base a un estudio privado

$$Q_{glaciar\ mes\ i} = Rendimiento\ Unitario\ glaciar \left[\frac{m^3}{s \cdot km^2} \right] \cdot \text{Área}\ glaciar_{mes\ i-1} [km^2] \quad (4.6)$$

Tabla 4-7. Rendimientos Unitarios mensuales por parte de glaciares.

Mes	Rend. Unitario [m ³ /s/km ²]
Enero	0.5096
Febrero	0.4267
Marzo	0.2272
Abril	0.1322
Mayo	0.052
Junio	0.0242

Julio	0.0211
Agosto	0.0211
Septiembre	0.0211
Octubre	0.0305
Noviembre	0.1875
Diciembre	0.3848

4.2.4 Nubosidad WEAP

Se utilizaron los mismos datos usados por Serrano (2014). Estos pertenecen al anuario de la década de 1980, cuyos valores son mostrados en la Tabla 4-8. Los números van graduados de 0 a 1, siendo 1 el cielo totalmente despejado.

Tabla 4-8. Cobertura de nubes mensual

Mes	Cobertura de nubes [%]
Ene	0.94
Feb	0.85
Mar	0.72
Abr	0.59
May	0.44
Jun	0.14
Jul	0.16
Ago	0.40
Sep	0.49
Oct	0.56
Nov	0.58
Dic	0.75

4.2.5 Velocidad del viento WEAP

Para la determinación del viento en diferentes altitudes de las cuencas, se obtuvo la información del explorador eólico del Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile (<http://ernc.dgf.uchile.cl/Explorador/Eolico2>).

Tabla 4-9. Velocidades mensuales en las cuencas. Fuente: DGF, Universidad de Chile

Mes	Viento [m/s]
Enero	4.1
Febrero	3.4
Marzo	3.6
Abril	3.6
Mayo	3.7
Junio	5.0
Julio	5.0
Agosto	5.6
Septiembre	3.7
Octubre	4.7
Noviembre	3.9
Diciembre	4.2

4.2.6 Parámetros del modelo WEAP

En las cuencas MELM y AEY se utilizaron los parámetros por Serrano (2014) que se señalan en la Tabla 4-10, mientras que en las nuevas bandas de elevación creadas en VEQ se interpolaron linealmente los valores, tal como se muestra en la Tabla 4-11.

Tabla 4-10. Parámetros asociados a Maipo en las Melosas y Afluente embalse el Yeso.

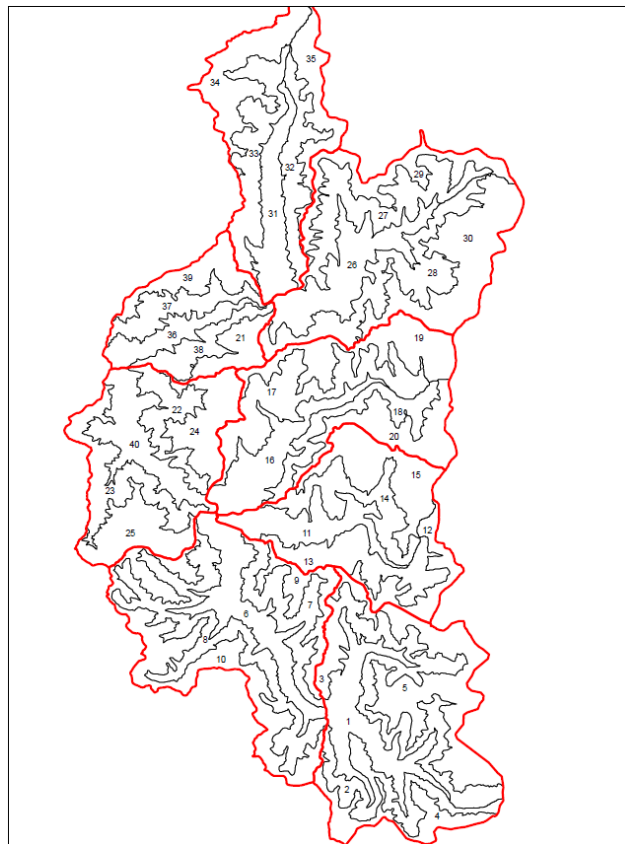
	MELM B3	MELM B2	MELM B1	AEY B3	AEY B2	AEY B1	Unidad
Kc	1	0.5	0	1	0.5	0	
SWC	3000	2000	1000	2053	2053	2053	mm
DWC	9900	6900	2900	9900	4900	100	mm
DC	7000	7000	1000	2000	2000	2000	mm/mes
PFD	0.5	0.6	0.8	0.7	0.6	0.8	
Ini Z1	7	7	7	0	0	0	%
Ini Z2	4	3	5	5.5	6.5	9	%
Epsilon	0.53	0.43	0.33	0.66	0.56	0.56	
RZC	807	807	807	1190	1190	1190	mm/mes
Freez P	-1.4	-1.4	-1.4	-1.4	-1.4	-1.4	°C
Melt P	14	14	14	14	14	14	°C
Humedad	40	50	50	40	50	50	%

Tabla 4-11. Parámetros asociados a Volcán en Queltehues. Fuente: Modificados de Serrano (2014)

	VEQ B3	VEQ B32	VEQ B2	VEQ B21	VEQ B1	Unidad
Kc	0.8	0.65	0.5	0.25	0	
SWC	5000	4000	3000	3000	3000	mm
DWC	9900	8400	6900	4900	2900	mm
DC	5000	5000	5000	3000	1000	mm/mes
PFD	0.7	0.75	0.8	0.8	0.8	
Ini Z1	13	13	13	13	13	%
Ini Z2	3.5	3.25	3	4.5	6	%
Epsilon	0.53	0.48	0.43	0.38	0.33	
RZC	795	795	795	795	795	mm/mes
Freez P	-1.4	-1.4	-1.4	-1.4	-1.4	°C
Melt P	14	14	14	14	14	°C
Humedad	40	45	50	50	50	%

4.3- Inputs modelo CRHM

El modelo CRHM ha sido implementado por Videla (2013) en la cuenca alta del río Maipo, usando 40 URH's, tal como se ve en la Figura 4-4. Acorde a esto, la URH 6 está asociada al drenaje de la subcuenca Maipo en las Melosas, la URH 11 al drenaje Volcán en Queltehues, la URH 16 al drenaje de Afluente embalse el Yeso, la URH 26 al drenaje de Colorado antes junta de río Olivares y finalmente la 31 al drenaje de Olivares antes junta río Colorado. Cada subcuenca está formada por 4 URH's.



**Figura 4-3. Representación de las 40 URH's adoptadas en la cuenca alta del modelo CRHM.
Fuente: Adaptado de Videla 2013.**

4.3.1 Precipitación CRHM

Para calcular las precipitaciones en cada URH's, se utilizaron 4 estaciones meteorológicas, las cuales son El Yeso Embalse, San Gabriel, Maipo en San Alfonso y José de Maipo Retén. La forma de calcularla viene dada por:

$$P_{URH} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{P_i}{d_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i}} \quad (4.7)$$

Dónde:

n: Número de estaciones a considerar

P_i : Precipitación en la estación i

d_i : Distancia de la estación i al centro de gravedad de la URH

4.3.2 Temperatura CRHM

Para adjudicar valores a las URH's se consideró la ecuación (11):

$$T_{URH} = T_{YE} - \lambda \cdot \frac{(Z_{URH} - Z_{YE})}{1000} \quad (4.8)$$

Dónde:

T_{URH} : Temperatura diaria en la URH

T_{YE} : Temperatura diaria registrada en la estación Embalse el Yeso en °C

λ : Tasa de lapso adoptada en 5.1 °C/Km, propuesta por Cortés (2010)

Z_{URH} : Altura en metros sobre el nivel del mar de la URH

Z_{YE} : Altura en metros sobre el nivel del mar de la estación el Embalse el Yeso.

4.3.3 Humedad Relativa

Mediante las estaciones el Yeso embalse y Maipo en San Alfonso, se creó un gradiente lineal de elevación de humedad relativa a nivel diario, quedando como resultado la siguiente expresión (11):

$$H.R_{URH} = (Z_{URH} - Z_{YE}) \frac{(H.R_{SA} - H.R_{YE})}{(Z_{SA} - Z_{YE})} + H.R_{YE} \quad (4.9)$$

Dónde:

$H.R_{URH}$: Humedad relativa en la URH.

Z_{URH} : Altura sobre el nivel del mar de la URH.

Z_{YE} : Altura sobre el nivel del mar de la estación Embalse el Yeso.

$H.R_{YE}$: Humedad relativa en la estación Embalse el Yeso.

$H.R_{SA}$: Humedad relativa en la estación San Alfonso.

Z_{SA} : Altura sobre el nivel del mar de la estación San Alfonso.

4.3.4 Velocidad del viento

Para la velocidad del viento se consideró la expresión de la FAO en Allen et al. (1998):

$$u_{URH} = \frac{u_{Maitenes\ en\ bocatoma}}{\frac{4.87}{\ln(67.8 \cdot Z_{URH}^{-5.42})}} \quad (4.10)$$

Dónde:

u_{URH} : Velocidad del viento de la URH.

$u_{Maitenes\ en\ bocatoma}$: Velocidad del viento en Maitenes en Bocatoma sobre 2 metros de la superficie.

Z_{URH} : Altura de la URH sobre el nivel del mar.

4.4- Inputs modelo VIC

4.4.1 Precipitación

Tanto para la cuenca del río Olivares como para la del río Colorado se utilizó la estación Central Alfalfal, la cual se ilustra en la Tabla 4-12. A diferencia de los otros modelos, esta fue la única estación física que se asumió representativa para ambas cuencas, sin corrección por gradiente de altura.

Tabla 4-12. Ubicación y Altitud de la central Alfalfal.

Estación	Latitud	Longitud	Altitud [msnm]
Central Alfalfal	33°30'06"	70°11'33"	1349

4.4.2 Temperatura

A diferencia de los modelos anteriores, las temperaturas máximas y mínimas del modelo VIC no fueron sacadas directamente de estaciones meteorológicas para cada celda, fueron obtenidas mediante imágenes MODIS LST de superficie terrestre (Wan 1996). Estas se calibraron con la estación Central Alfalfal, mediante una relación lineal (ver ecuación 14) obtenida por Páez (2014). Los valores de alfa y beta para cada caso se ilustran en la Tabla 4-13.

$$T_{air,max(min)} = \alpha_{max(min)} \cdot T_{modis,max(min)} + \beta_{max,min} \quad (4.11)$$

Tabla 4-13. Parámetros de la relación lineal entre MODIS LST y la temperatura del aire registrada en Alfalfal.

r^2	α	β	Descripción
0.8	0.39	14.05	MODIS TERRA vs T aire max Alfalfal
0.83	0.44	11.58	MODIS AQUA vs T aire max Alfalfal
0.87	0.6	-1.71	MODIS TERRA vs T aire min Alfalfal
0.87	0.64	-1.26	MODIS AQUA vs T aire min Alfalfal

4.4.3 Radiación de onda corta

Se utilizó un modelo llamado MTCLIM “A Mountain Microclimate Simulation Model” (Bohn et al. 2013), el cual es utilizado internamente por VIC para simular la radiación de onda corta, en función de las temperaturas máximas y mínimas, el día juliano y parámetros empíricos.

4.4.4 Velocidad del viento

Al igual que en el modelo WEAP, se adoptaron los datos del explorador eólico del departamento de Geofísica de la Universidad de Chile a escala diaria.

4.5- Análisis de imágenes MODIS para cada subcuenca

Los productos MODIS de nieve usados en este trabajo fueron provenientes de los satélites AQUA (MYD10Av5) y TERRA (MOD10Av5). Específicamente se usó el producto fractional snow obtenido de cada satélite, el cual indica el porcentaje de área nival promedio cubierta en un pixel, donde cada pixel representa teóricamente un rango espacial de 500m. Sin embargo, se constató que éste era aproximadamente 437 m.

Actualmente no existe una rutina oficial normada para rellenar datos faltantes MODIS, sin embargo, Cornwell (2012) da a conocer una forma de relleno de pixeles *null* no representativos, a través de promedios espaciales y temporales de pixeles.

Si bien el algoritmo anterior es muy útil con su enfoque diferencial, se tomó como idea y se creó un nuevo algoritmo con un enfoque integral, ya que en vez de rellenar pixeles se rellenarían directamente los días, lo cual también dio buenos resultados (Ver Figura 4-5).

La metodología de procesamiento para TERRA como para AQUA fue la siguiente:

- a) Se bajó cada una de estas imágenes con resolución diaria en formato GeoTiff, desde el 1 de Enero del 2008 hasta el 31 de Diciembre del 2012.
- b) Una vez obtenidos los productos, se procedió a enmascarar automatizadamente cada imagen bruta descargada en cada subcuenca en estudio mediante el software Quantum GIS 2.6.

- c) Se creó un algoritmo en Matlab, el cual cuenta el área nival total y el número de nubes de cada imagen diaria de cada subcuena, para valores de $n(x,y)$ entre 0 y 100 (ver ecuación 11).

Se definieron las siguientes variables:

$$X_{t,w} = \text{Área total de nieve en día } t \text{ en la subcuena } w \text{ [km}^2\text{]}$$

$$N_{t,w} = \text{Número de nubes día } t \text{ en la subcuena } w$$

Donde

$$X_{t,w} = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n 0.437^2 \cdot n(x, y) \quad (11)$$

con $n(x, y)$ = Valor del pixel $\in [0,100]$ en (x,y)

- d) Una vez obtenidos estos datos, se procedió a rellenar días faltantes del satélite o no representativos de AQUA y TERRA con el siguiente criterio:

- 1) Si $N_{t,w} > 30\%$ de los pixeles totales de la subcuena w , entonces $X_{t,w}$ se reemplaza por un “*null*”

Sino

$$X_{t,w} [\text{km}^2] = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n 0.437^2 \cdot \text{porcentaje de nieve en pixel}(x, y) \quad (4.12)$$

Luego

- 2) Si $X_{t,w} = \text{“null”}$, entonces:

$$\text{Si } Pp > 0, X_{t,w} = \text{promedio}(X_{t-2,w}, X_{t-1,w}, X_{t+1,w}, X_{t+2,w})$$

$$\text{Si } Pp = 0, X_{t,w} = \text{promedio}(X_{t-2,w}, X_{t-1,w})$$

Donde el valor de las precipitaciones estará dado por una estación meteorológica dependiendo de la subcuena en cuestión para que sea más representativa, tal como se muestra en la Tabla 4-14.

Tabla 4-14. Estaciones meteorológicas a utilizar en algoritmo MODIS para detectar precipitación según subcuenca.

Subcuenca	Estación Meteorológica	Latitud	Longitud	Altitud [msnm]
VEQ	San Gabriel	33°48'14"	70°14'30"	1.266
MELM	San Gabriel	33°48'14"	70°14'30"	1.266
AEY	El Yeso Embalse	33°40'48"	70°5'27"	2.475
OLI	Bocatoma Maitenes	33°32'4"	70°15'50"	1.143
COL	Bocatoma Maitenes	33°32'4"	70°15'50"	1.143

- 3) Repetir iterativamente el proceso desde 1) hasta que todos los $X_{t,w}$ sean distintos de “null”.
- 4) Finalmente se promedian los días las series creadas de los productos MOD10A1 Y MYD10A1 limpiados independientemente, para tener un solo valor por día.

Un resultado de este proceso iterativo se esquematiza en la Figura 4-5 en la subcuenca Olivares, donde la envolvente de las MODIS procesadas es aproximadamente la envolvente de las MODIS no procesadas, siendo consistente en que en invierno no hay días sin nieve.

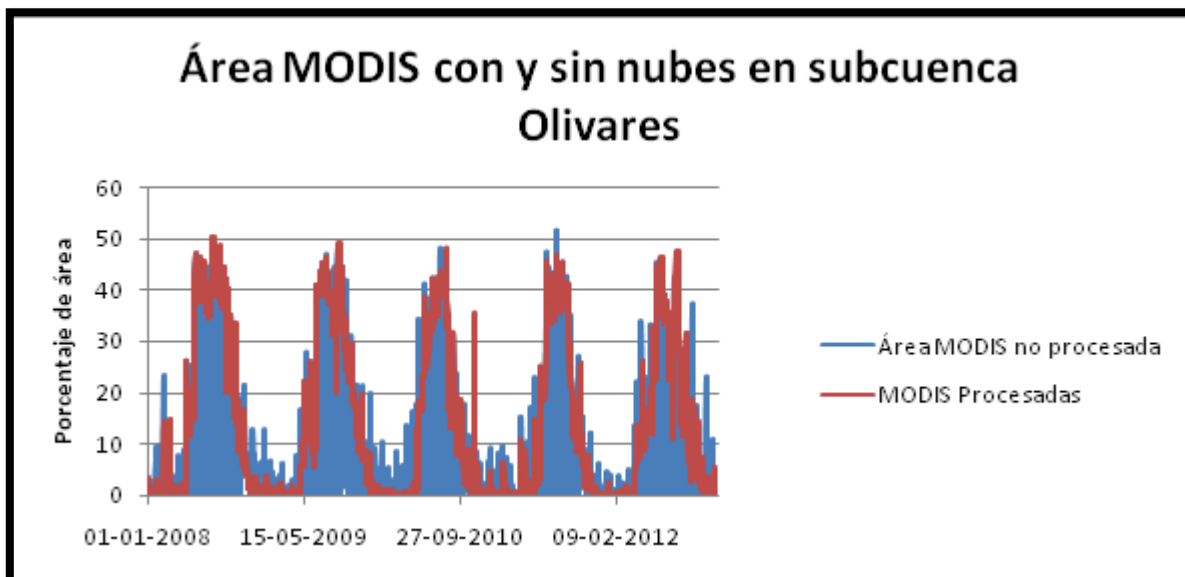


Figura 4-4. Esquema de series de tiempo con y sin procesamiento en subcuenca Olivares

4.6 Extrapolación de escalas temporales

Los modelos al no estar en la misma resolución temporal, fue necesario extrapolar sus resultados de diario a semanal o diario a mensual mediante promedios, es decir, se obtuvieron caudales medios mensuales y caudales medios semanales a partir de los caudales medios diarios.

Con la nieve fue análogo, tanto para lo observado como lo simulado en porcentaje y SWE. Los porcentajes medios mensuales de nieve y porcentajes medios semanales fueron sacados con los promedios de porcentajes de nieve diarios.

4.7 Validación de eficiencias

Finalmente para ver matemáticamente cual modelo se ajusta mejor la realidad, se adoptará el coeficiente de Nash Sutcliffe tanto para caudales como para porcentaje de nieve, el cual se define como:

$$Nash - Sutcliffe = 1 - \frac{\sum_i^n (X_o^i - X_m^i)^2}{\sum_i^n (X_o^i - \bar{X}_o)^2} \quad (4.13)$$

Dónde:

X_o^i : Variable observado en la escala i.

X_m^i : Variable modelada en la escala i.

\bar{X}_o : Variable promedio de la estación.

Este coeficiente se define como uno menos la suma de los cuadrados entre la variable modelada y la variable observada, normalizado por la varianza de los valores observados durante el periodo de investigación. El rango de Nash radica entre 1 (ajuste perfecto) y $-\infty$. Una eficiencia menor que cero indica que el valor medio de la serie observada en el tiempo sería mejor predictor que el modelo.

Capítulo 5 : ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 Comparación de resultados Fluviométricos entre modelos

5.1.1 Resultados Fluviométricos de VIC y CRHM

Tal como se dijo en el capítulo anterior, solamente fue posible comparar las cuencas Olivares y Colorado entre el modelo VIC Y CRHM. El modelo VIC da muy buenos resultados en ambas cuencas a cualquier escala, lo cual no se puede decir del modelo CRHM, tal como se esquematiza en las Figuras 5-1, 5-2, 5-3, 5-4, 5-5 y 5-6.

Una observación evidente es que el modelo CRHM no arroja resultados razonables en sus temporadas de deshielo, lo que lleva a deducir que no fue bien calibrado, o no fue planteada correctamente la física del problema.

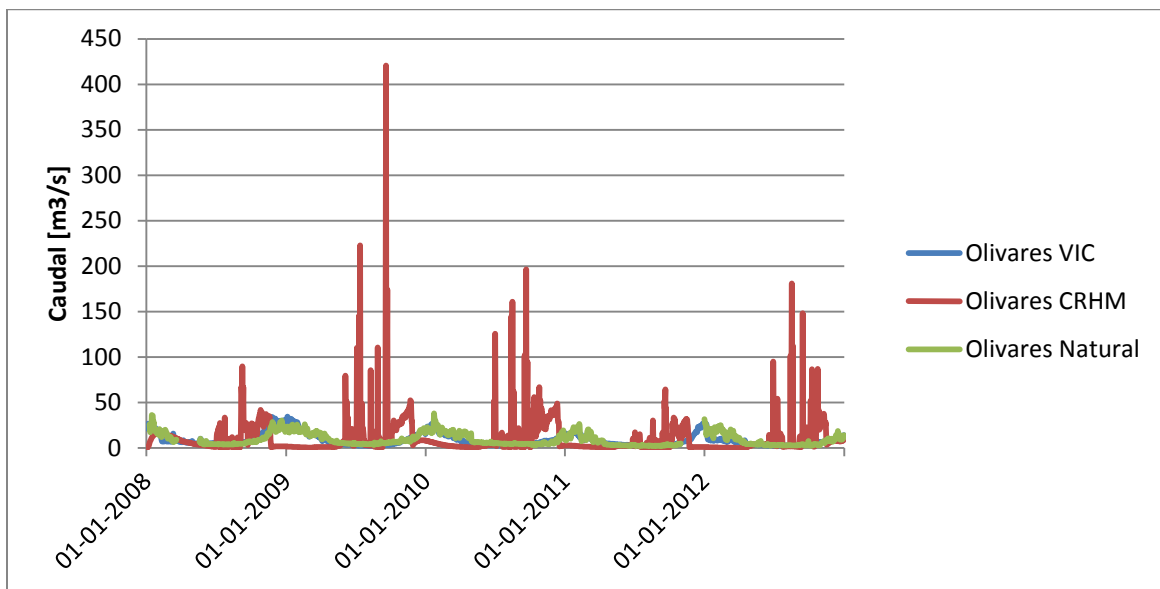


Figura 5-1. Fluvimetría de modelos VIC Y CRHM en Olivares a escala diaria.

Otra observación notoria es que a medida que se aumenta la escala temporal, el modelo CRHM va tendiendo en magnitud al caudal observado, como se aprecia en las Figuras 5-2, 5-3, 5-5 y 5-6. Sin embargo, esto no implica que los ajustes de CRHM sean positivos en alguna escala temporal, dado que existe un desfase temporal entre los peaks del periodo observado.

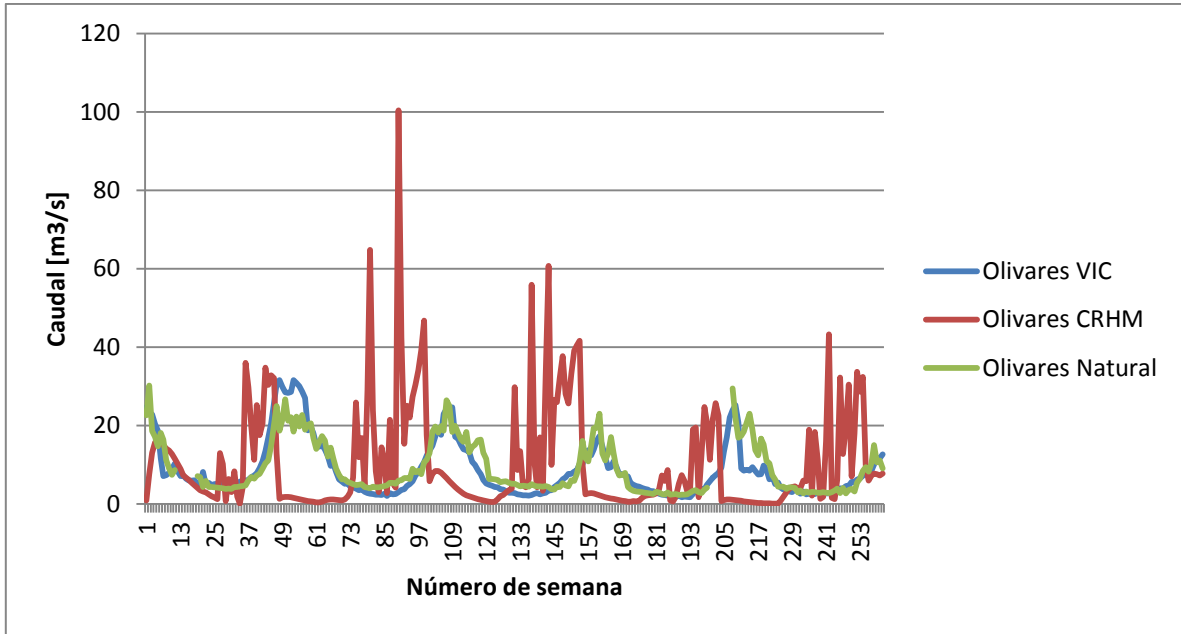


Figura 5-2. Fluviometría de modelos VIC Y CRHM en Olivares a escala semanal.

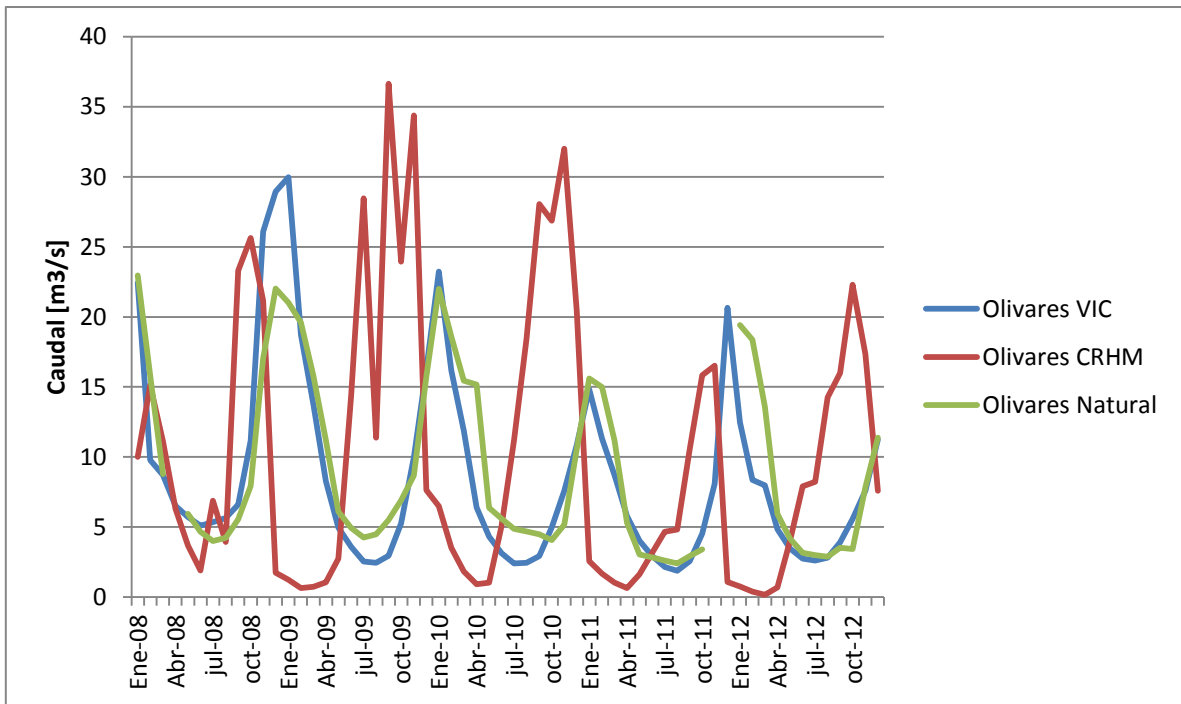


Figura 5-3. Fluviometría de modelos VIC Y CRHM en Olivares a escala mensual.

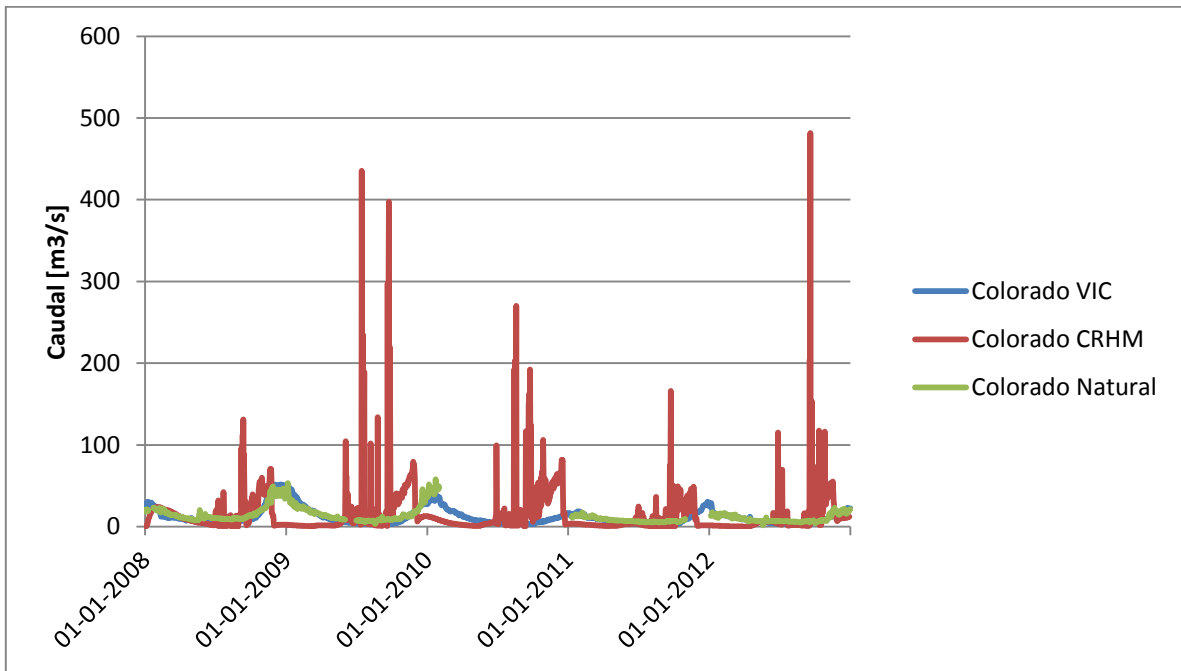


Figura 5-4. Fluviometría de modelos VIC Y CRHM en Colorado a escala diaria.

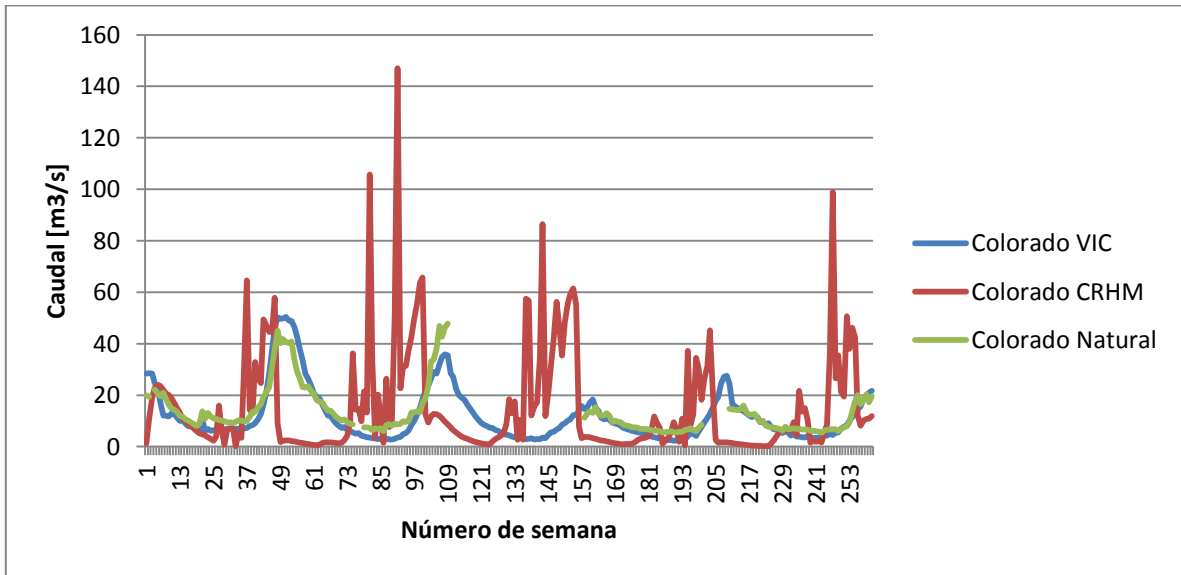


Figura 5-5. Fluviometría de modelos VIC Y CRHM en Colorado a escala semanal.

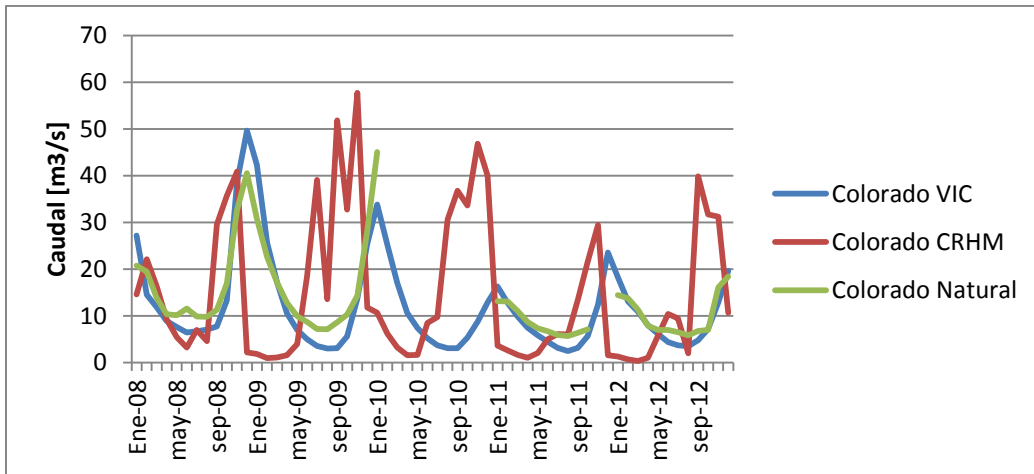


Figura 5-6. Fluviometría de modelos VIC Y CRHM en Colorado a escala mensual.

5.1.2 Resultados Fluviométricos de WEAP Y CRHM

La observación es distinta en este caso, ya que ninguno de los dos modelos logra tener un comportamiento estacional acorde al observado en ninguna cuenca (ver Figuras 5-7 y 5-8). Existe un notorio desfase temporal de ambos modelos en la escala mensual, lo que también indica que WEAP no fue bien modelado desde un principio.

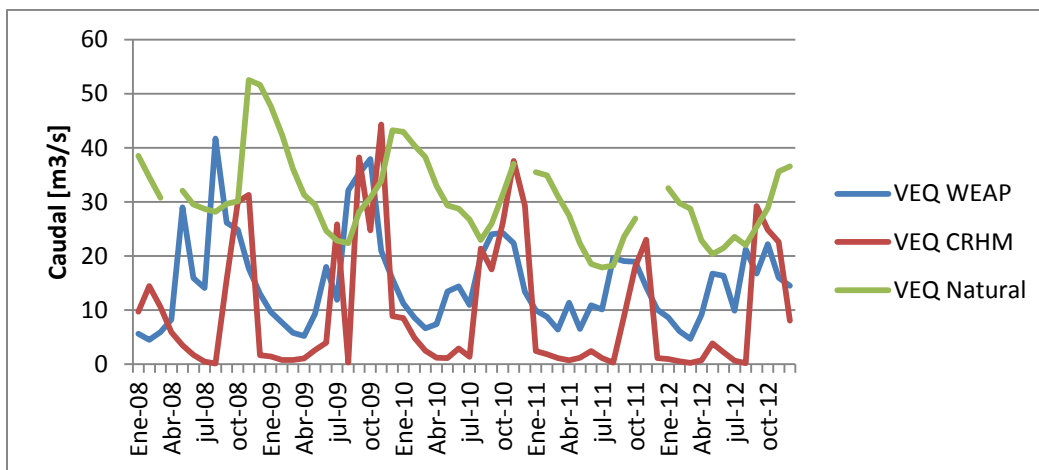


Figura 5-7. Fluviometría de modelos WEAP Y CRHM en Volcán en Queltehues a escala mensual.

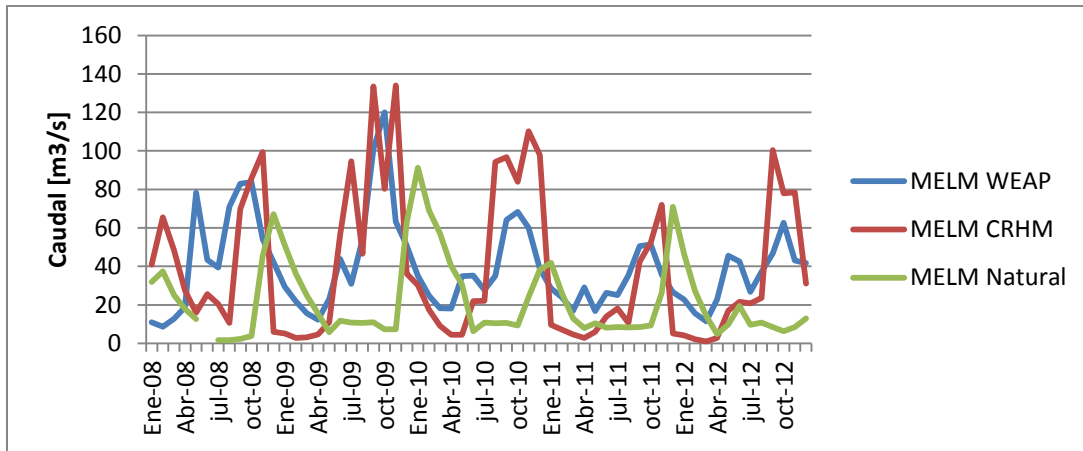


Figura 5-8. Fluviometría de modelos WEAP Y CRHM en Maipo en las Melosas a escala mensual.

5.2 Comparación nival de los modelos

5.2.1 Comparación nival entre WEAP Y CRHM

Acorde a las Figuras 5-9, 5-10 y 5-11, ninguno de los dos modelos es capaz de representar la variación espacial de nieve. Esto es esperable, dado que las URH's que fueron definidas en los modelos fueron muy gruesas (incluso VEQ donde se agregaron dos bandas adicionales) como para tener una buena representación espacial de la nieve.

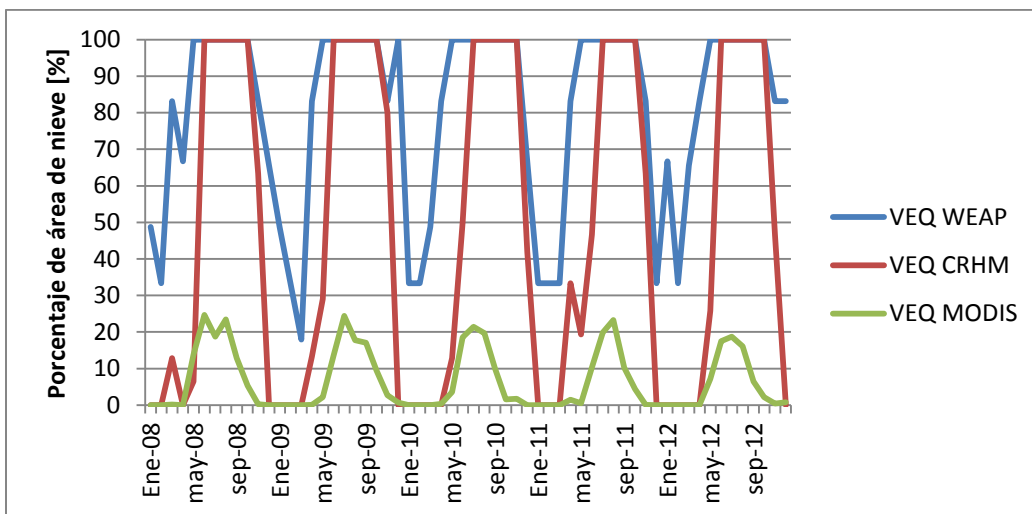


Figura 5-9. Comparación nival de modelos WEAP y CRHM en Volcán en Queltehueles a escala mensual.

La cuenca AEY presenta algo en particular que otras cuencas no presentan según la Figura 5-10, y es que si bien los valores de nieve en verano tienden a ser cero, no lo son. El modelo WEAP de cierta forma es consistente con simular que siempre existe nieve, pero se equivoca al decir que es 100% todo el año.

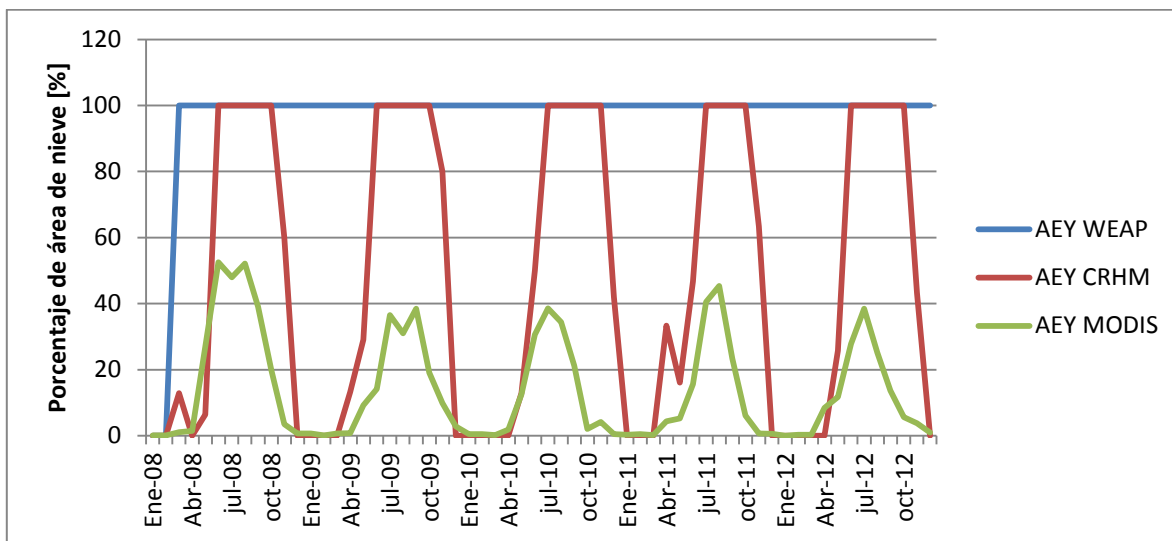


Figura 5-10. Comparación nival de modelos WEAP y CRHM en Afluyente embalse el Yeso a escala mensual.

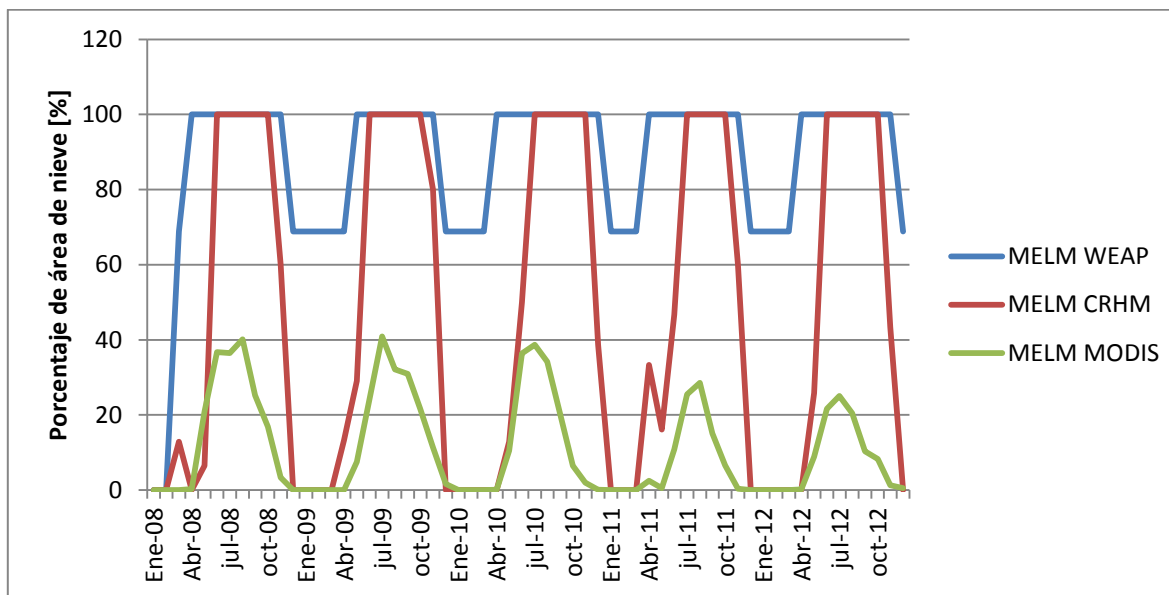


Figura 5-11. Comparación nival de modelos WEAP y CRHM en Maipo en las Melosas a escala mensual

5.2.2 Comparación nival entre VIC Y CRHM

La diferencia marcada que tiene el modelo VIC acorde a las Figuras 5-12, 5-13, 5-14, 5-15, 5-16 y 5-17 es el efecto de representar de manera más fina la estacionalidad de nieve, sin embargo, esto no implica que no la sobreestime notoriamente al igual que los demás modelos.

A diferencia de la fluvimetría, mientras se aumenta la escala temporal los resultados no necesariamente son más favorables. Esto tiene sentido, ya que al ser siempre sobreestimada el área nival, los promedios temporales mantendrán la misma brecha.

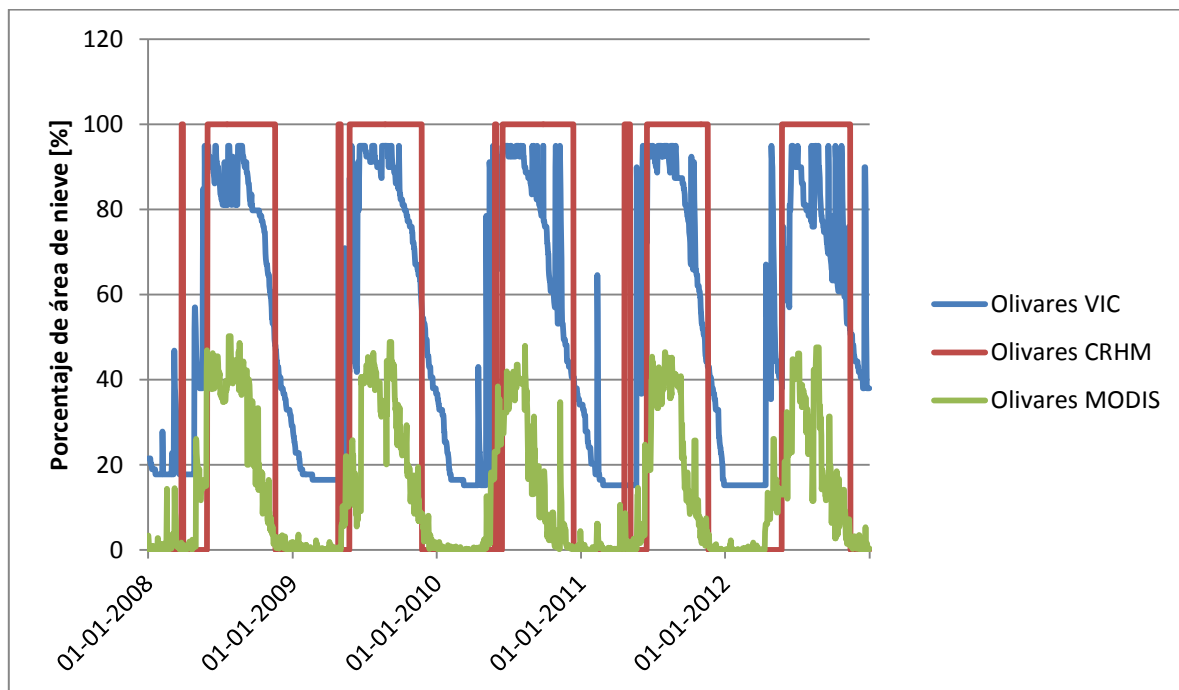


Figura 5-12. Comparación nival de modelos VIC y CRHM en Olivares a escala diaria.

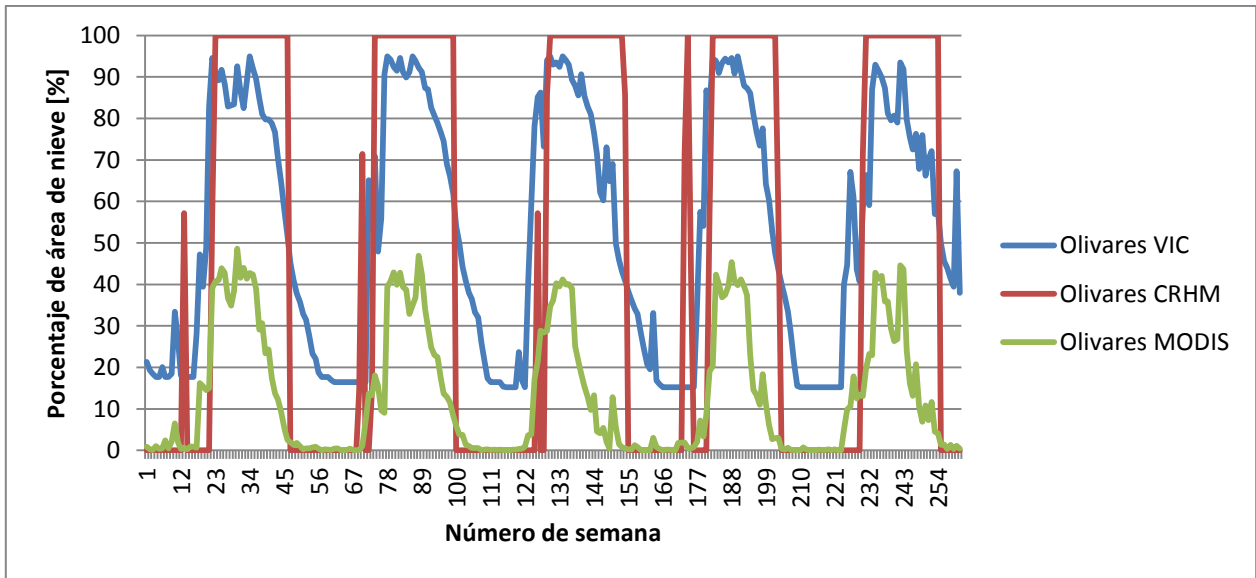


Figura 5-13. Comparación nivel de modelos VIC y CRHM en Olivares a escala semanal.

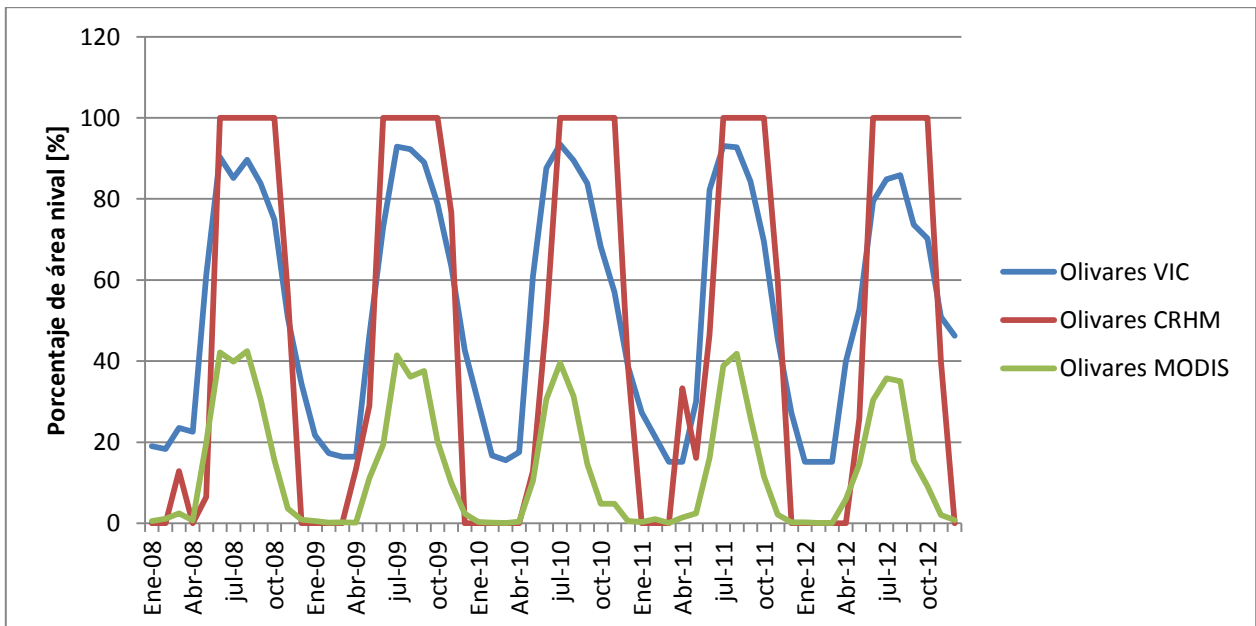


Figura 5-14. Comparación nivel de modelos VIC y CRHM en Olivares a escala mensual.

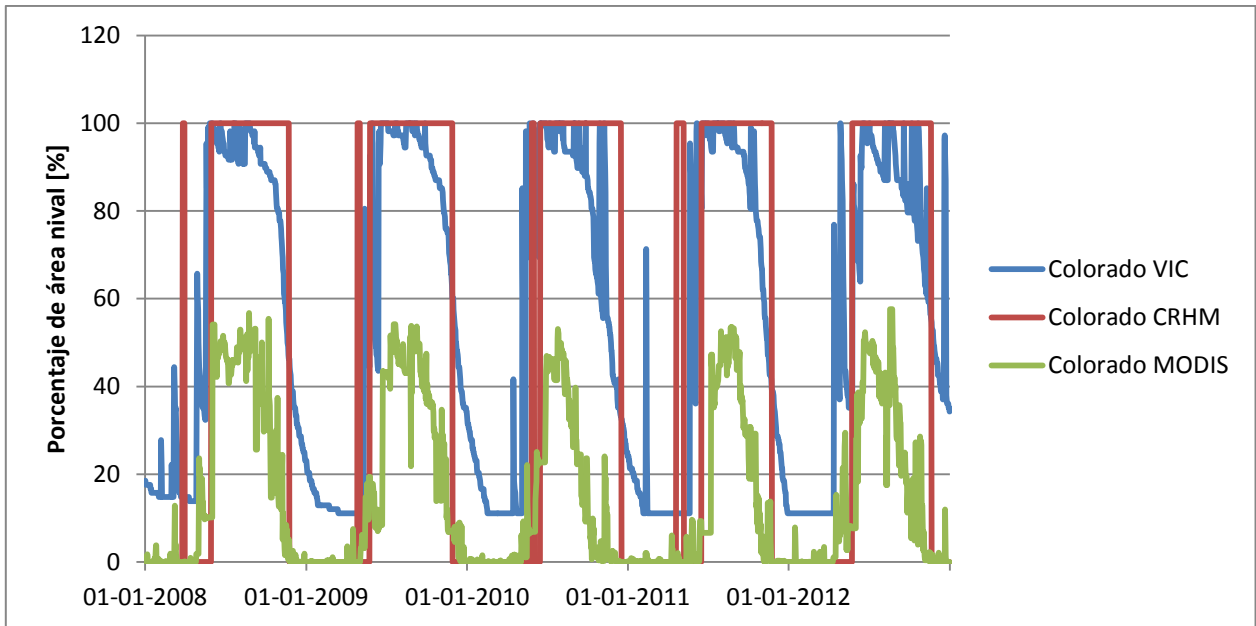


Figura 5-15. Comparación nival de modelos VIC y CRHM en Colorado a escala diaria.

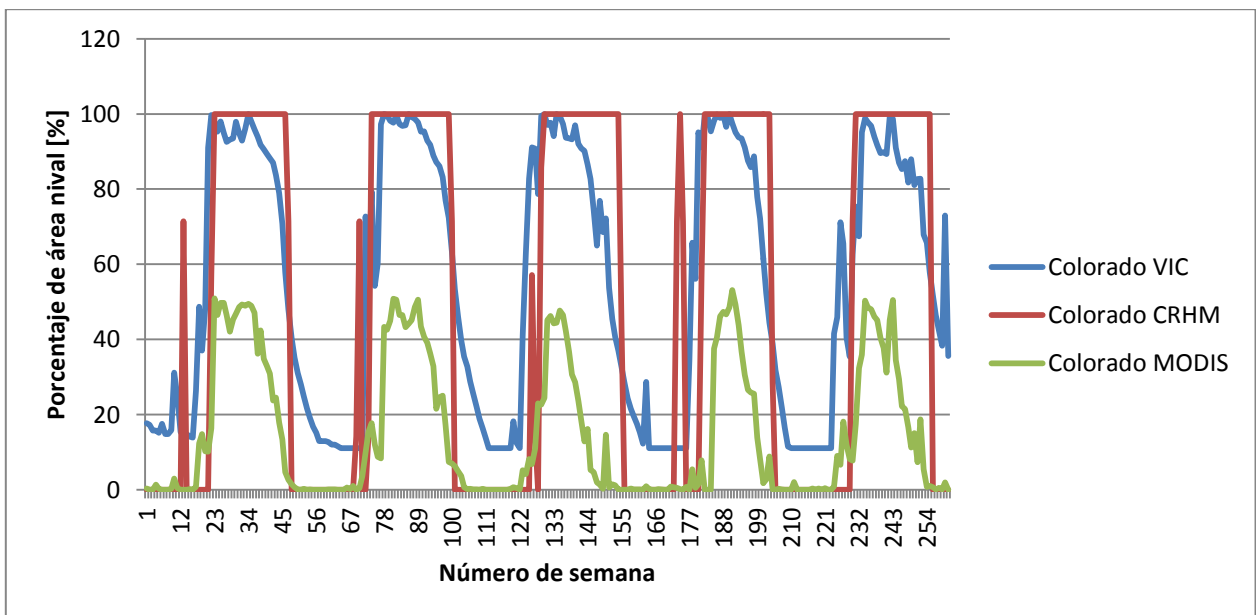


Figura 5-16. Comparación nival de modelos VIC y CRHM en Colorado a escala semanal.

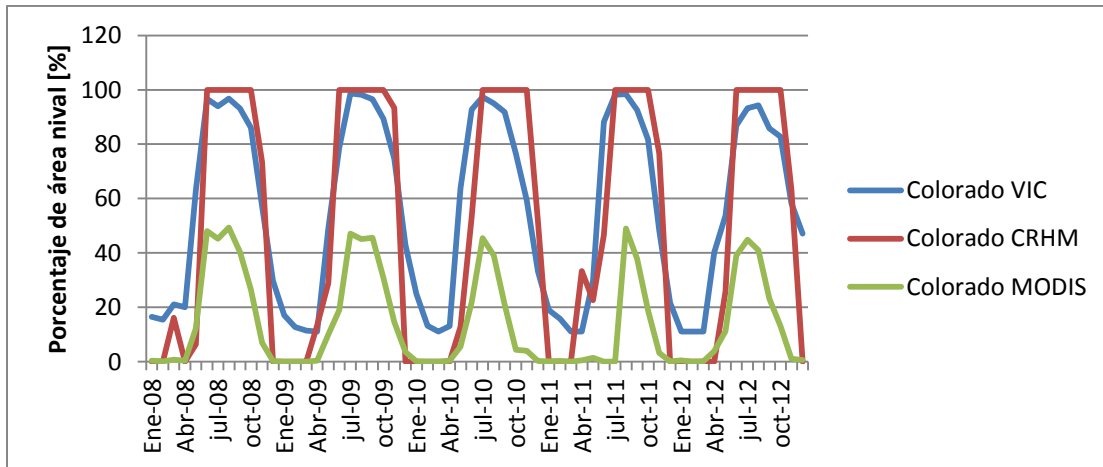


Figura 5-17. Comparación nival de modelos VIC y CRHM en Colorado a escala mensual.

5.2.3 Comparación de SWE entre WEAP Y CRHM en AEY

La cuenca del afluyente embalse es un caso especial en este estudio, dado que se ubica la estación Laguna Negra, ubicada a 2.780 msnm, que tiene un snow pillow instalado. Esto permitió comparar la nieve además con la variable SWE, como se presenta en la Figura 5-18.

Aquí tanto WEAP como CRHM muestran un similar comportamiento de SWE con respecto a lo observado, lo que da a entender que al menos en altura de nieve sí son buenos modelos.

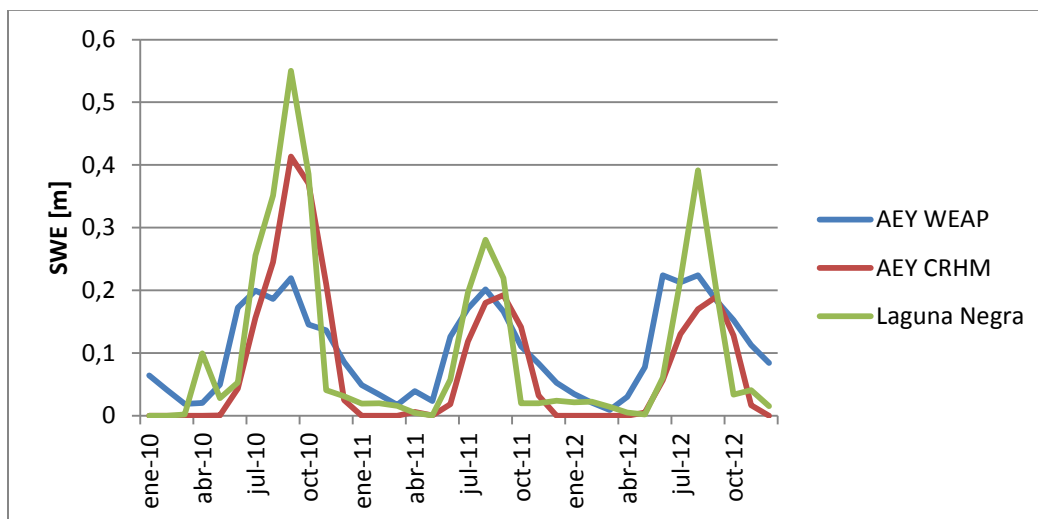


Figura 5-18. Comparación de SWE en CRHM Y WEAP.

5.6 Resumen de coeficientes de Nash Sutcliffe para cada modelo en cada escala temporal

5.6.1 Nash Sutcliffe Fluviométricos

El resumen de los coeficientes de Nash Sutcliffe fluviométricos se encuentran en las Tablas 5-1, 5-2 y 5-3, donde se aprecia que el modelo VIC es el mejor que representa la realidad. Los modelos WEAP y CRHM tienen resultados inaceptables de modelación fluviométrica ($Nash < 0$), lo que indica que el promedio mensual es mejor estimador que el modelo.

Tabla 5-1. Coeficientes fluviométricos de Nash Sutcliffe en modelo VIC.

Nash-Sutcliffe en modelo VIC			
Cuenca	Diario	Semanal	Mensual
OLI	0.65	0.69	0.71
COL	0.82	0.83	0.84

Tabla 5-2. Coeficientes fluviométricos de Nash Sutcliffe en modelo WEAP.

Cuenca	Nash Sutcliffe Mensual Modelo WEAP
MELM	-0.7
VEQ	-5.58

Tabla 5-3. Coeficientes fluviométricos de Nash-Sutcliffe en modelo CRHM.

Nash-Sutcliffe en modelo CRHM			
Cuenca	Diario	Semanal	Mensual
MELM	-4.11	-2.8	-1.79
VEQ	-6.9	-4.2	-2.3
COL	-10.8	-4.57	-2.84
OLI	-10.7	-5.13	-3.46

5.6.2 Nash Sutcliffe Nivales

Como se mencionó en los comentarios de los gráficos, ningún modelo es capaz de representar el porcentaje del área nival acorde a lo medido en MODIS. Todos los modelos deberían ser descartados al modelar el área nival, ya que todos los coeficientes de Nash Sutcliffe son menores que cero como se muestran en las Tablas 5-4, 5-5 y 5-6 .

Tabla 5-4. Coeficientes Nash Sutcliffe de áreas nivales en modelo VIC.

Nash-Sutcliffe en modelo VIC			
Cuenca	Diario	Semanal	Mensual
OLI	-6.75	-8.56	-7.26
COL	-4.9	-4.91	-5.12

Tabla 5-5. Coeficientes Nash Sutcliffe de áreas nivales en modelo WEAP.

Cuenca	Nash Sutcliffe Mensual Modelo WEAP
MELM	-32.77
VEQ	-8.23
AEY	-27.45

Tabla 5-6. Coeficientes Nash Sutcliffe de áreas nivales en modelo CRHM.

Nash-Sutcliffe en modelo CRHM			
Cuenca	Diario	Semanal	Mensual
MELM	-10.76	-9.56	-13.79
VEQ	-10.43	-12.32	-17.29
COL	-6.46	-6.33	-5.34
OLI	-10.46	-10.43	-9.81
AEY	-7.86	-7.54	-8.55

A pesar de que la variable área nival dio malos resultados, la variable SWE como se mostró en los gráficos dio buenos resultados como se muestra en la Tabla 5-7. El modelo CRHM dio un Nash de 0.75, lo que refleja un muy buen modelamiento de esta variable, mientras que WEAP arrojó un valor de 0.52, lo cual se considera aceptable.

Tabla 5-7. Coeficientes Nash Sutcliffe de SWE con modelos WEAP Y CRHM en subcuenca AEY.

Cuenca	Modelo	
	WEAP	CRHM
AEY	0.52	0.75

Capítulo 6 : CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

6.1 Conclusiones generales

El principal problema de trabajar con modelos hidrológicos como WEAP, CRHM y VIC, es la escasez de datos meteorológicos en las zonas de estudio. En la práctica no se tienen datos de manera distribuida en todas las cuencas, ya que sería extremadamente caro poner estaciones meteorológicas en cada subcuenca por tener una mejor representación de la realidad, lo que obliga a adoptar gradientes que no necesariamente representan la realidad con alta precisión.

Sin embargo, lo anterior no implica que los modelos no puedan utilizarse y tener buenos resultados de modelación con poca información meteorológica, porque lo importante está en la metodología de distribución espacial y temporal que se adopta para construir y validar los modelos. Que un fenómeno no pueda ser modelado por algún software no implica que dará malos resultados, ya que numéricamente lo que ocurre es que los coeficientes de calibración contrarrestan el efecto omitido, a costa de algunas veces adoptar un valor alejado de sentido físico.

Independiente de la metodología adquirida por cada modelador para preparar los inputs y outputs, el principal desafío que tuvieron los 3 modelos fue que no estaban hechos para modelar glaciares, el cual es un aporte no despreciable en la temporada de deshielo.

6.2 Comentarios de la fluviometría de los modelos

Acorde al resumen de los índices de Nash-Sutcliffe, sin dudas el modelo VIC fue el que tuvo los mejores resultados de simulación a cualquier escala temporal. En las temporadas de acumulación de nieve la simulación era casi perfecta, sin embargo, durante las temporadas de deshielo la simulación se desfasaba levemente con respecto a lo observado.

De WEAP y CRHM no hay mucho que decir, ya que se constató que desafortunadamente los modelos fueron calibrados en régimen no natural, por lo que sus resultados no fueron para nada representativos.

La fluviometría es inconsistente en WEAP, ya que lo simulado está indicando que los máximos caudales se dan en el mes de Octubre, y no en Diciembre o Enero que es lo observado. Por otro lado, también hay una diferencia de hasta un 50% en la magnitud de los peaks.

El modelo CRHM definitivamente fue el que entregó los resultados más malos fluviométricos. Sin contar que fue mal calibrado por caudales intervenidos, este software con su “filosofía de no calibrar” exige que se sepan muchas propiedades del terreno que no se tienen en la práctica, y también implica que no exista una rutina para calibrar estos parámetros de cada URH en el mismo software, a diferencia de WEAP y VIC que sí tienen rutinas para calibrarse.

Algo que los 3 modelos tuvieron en común, es que escalas de tiempo mayores entregaron mejores resultados. Lo anterior tiene sentido, debido a que los máximos tienden a disminuir y los mínimos tienden a aumentar, lo que provoca que no se genere tanto error por puntualidades no modeladas.

6.3 Comentarios de la simulación nival de los modelos

Todos los modelos presentan el problema de las sobreestimaciones de nieve, y la explicación de esto es debido a que al no tener módulo glaciario, la única forma de tener agua en períodos de deshielo es sobreestimando este recurso. A través de MODIS se observa que esto es falso en la realidad, dado que la nieve se acaba en Noviembre, algo que ningún modelo logra mostrar.

CRHM presenta a priori un comportamiento estacional de nieve bueno, pero el problema que tiene es que pareciera que todas las URH's son planicies sin efecto de altitud, lo que lleva a contradicciones de que no hay variaciones de precipitación a medida que se avanza en altura. Sin embargo, CRHM para las simulaciones de SWE es el que presenta el mejor NASH nival, lo que da a entender que el modelo es muy bueno pronosticando la altura en función del tiempo, y bastaría con hacer más URH's para ver si de verdad el problema es por la modelación o por la construcción del modelo.

Se concluye que para cualquier modelo que ocupa URH's para la discretización de su cuenca, le es muy difícil modelar el área nival. Esto se debe a que los modeladores siempre tratan de hacer la menor cantidad de URH's posibles cuando buscan calibrar fluvimetría, para no abusar del recurso computacional.

6.4 Comentarios acerca de las diferentes metodologías para preparar los inputs y outputs

Esto es extremadamente importante para preparar y calibrar un modelo, ya que la sensibilidad de las simulaciones dependerá 100% de esto.

En WEAP se podría haber estimado la nubosidad con información mucho más actualizada, que es la herramienta de las imágenes MODIS en vez de usar un anuario meteorológico de la década de 1980 de la estación Santiago el Bosque. La razón de esto es que es una información que puede adquirirse de manera distribuida, lo que hace más precisa la modelación por la resolución en la que está.

Otro input de extraña metodología de interpolación fue la velocidad del viento en CRHM. El inconveniente que tiene esta variable es que no existe un método que pruebe una correcta correlación para interpolar y completar datos faltantes, debido a que es una variable dominada por efectos globales de gran escala, y que también puede ser influenciada por efectos topográficos. Lo mejor hubiese sido adoptar la metodología del explorador eólico, el cual representa bastante bien los efectos según las validaciones en las que se probó.

Se comprobó que la metodología de relleno de imágenes MODIS resultó ser muy útil, pero el problema que presenta es que hay veces que se puede perder un poco de información, con el criterio de fijar un número que define en *null* los días que tienen más nubosidad que el valor fijado. No obstante a lo anterior, para fines ingenieriles resulta muy práctico y fácil de implementar.

6.5 Comentarios acerca de la dificultad o facilidad de usar los modelos hidrológicos

La facilidad de uso de los modelos es un tema no menor a la hora de escoger cuál usar, y esto se debe al tiempo que cada modelador tiene para calibrar. Asumiendo que un usuario parte sin previo conocimiento, el modelo WEAP es lejos el modelo más amigable para calibrar y usar. Esto se debe a que posee una interfaz gráfica y mucho material para auto aprender sin conocimientos avanzados de computación, ya que su soporte técnico y manuales bien explicados hacen que uno no tenga mayores complicaciones de procesar los datos.

Por otra parte, CRHM también posee la característica de tener una interfaz gráfica basada en SIG, lo cual es muy bueno para construir el modelo y hacer correr las simulaciones. Pero el problema es que su material de enseñanza no es tan guiado como el de WEAP.

Sin embargo como se ha dicho en la revisión bibliográfica, calibrar CRHM es muy tedioso ya que no fue creado con esa filosofía. Calibrar el modelo puede quitar bastante tiempo, ya que al no tener una rutina automatizada obliga a calibrarlo a mano, lo que puede generar una gran pérdida de tiempo con respecto a calibrar en WEAP.

VIC es todo lo contrario a los modelos anteriores en términos de dificultad de usar. Primero que todo es un programa para Linux, el cual no tiene interfaz gráfica y todo debe ejecutarse desde la consola de Ubuntu. Esto no sería problema si tuviese una buena guía para hacerlo correr, pero lamentablemente no es el caso. Este programa al estar escrito en Fortran hace que su lenguaje de programación no sea tan intuitivo como C++ o Java. Sin contar ese problema, el modelo Route está desactualizado en la página oficial, por lo que fue muy complicado hacerlo correr sin ayuda de alguna persona que lo haya usado.

Sin embargo, una ventaja notable es que el programa entero no pesa más allá de 20 mb, no necesita instalación y puede hacerse correr en casi cualquier computador.

6.6 Recomendaciones finales

La utilización de modelos de base física en cuencas Chilenas ha tenido buenos resultados, pero el problema principal en zonas como la cuenca alta del río Maipo, es la alta cantidad de intervenciones de bocatomas o extracciones para otros fines. Lo expuesto es de alta relevancia al momento de elegir una escala temporal en la cual calibrar y validar un modelo, porque la información con menor escala temporal (diario, subdiario) la mayoría de las veces es más complicada de conseguir que a escalas grandes (meses).

Lo ideal es que si se quiere ver el efecto de la nieve o caudales con un modelo a una escala más fina como la subdiaria, se escoja una cuenca no intervenida, y que el modelo cuente con todas las herramientas posibles para abordar los fenómenos de estudio, como por ejemplo glaciares.

Paralelamente, para modelos distribuidos o semidistribuidos debiese ser prioridad siempre utilizar forzantes meteorológicas provenientes de imágenes MODIS, no solo para cobertura nival, sino también para temperatura, precipitación, vegetación, albedo, etc. Los motivos son sencillos, primero uno tiene información espacialmente distribuida, cosa que no es posible garantizar con una estación física, y segundo, es libre y gratuito.

BIBLIOGRAFÍA

Ackerman, S. A., Strabala, K. I., Menzel, W. P., Frey, R. A., Moeller, C. C., & Gumley, L. E. (1998). Discriminating clear sky from clouds with MODIS. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984–2012), 103(D24), 32141-32157.

Ahumada, F. (2012) Impacto del calentamiento global en zonas de inundación en isla de Maipo, Chile. Memoria para optar a Título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. *FAO, Rome, 300(9)*, D05109.

Bohn, T. J., Livneh, B., Oyler, J. W., Running, S. W., Nijssen, B., & Lettenmaier, D. P. (2013). Global evaluation of MTCLIM and related algorithms for forcing of ecological and hydrological models. *Agricultural and Forest Meteorology*, 176, 38-49.

Cartes, M. (2009). Pronóstico de Volúmenes de Deshielos Mediante Redes Neuronales Recurrentes e Imágenes Satelitales MODIS. Tesis para optar al grado de Magíster en recursos y Medio Ambiente Hídrico y Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad De Chile.

Cornwell, E. (2012). Reconstrucción del equivalente en agua de nieve mediante imágenes MODIS incorporadas a un balance de masa – energía. Tesis para optar al Grado de Magister en Recursos Hídricos y Medio Ambiente y memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

Correa, H. (2013). Análisis de ruta de nieve y pronóstico de caudales en Chile central: Variabilidad espacial y temporal. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

DGA (2004). Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad, Cuenca del Río Maipo, estudio elaborado por CADE-IDEPE, Consultores e Ingeniería. Julio 2004 pag. 1-84.

Dozier, J., Green, R. O., Nolin, A. W., & Painter, T. H. (2009). Interpretation of snow properties from imaging spectrometry. *Remote Sensing of Environment*, 113, S25-S37.

Ellis, C. R., Pomeroy, J. W., Brown, T., & MacDonald, J. (2010). Simulation of snow accumulation and melt in needleleaf forest environments. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(6), 925-940.

Flügel, W. A. (1995). Delineating hydrological response units by geographical information system analyses for regional hydrological modelling using PRMS/MMS in the drainage basin of the River Bröl, Germany. *Hydrological Processes*, 9(3-4), 423-436.

Gao, H., Tang, Q., Shi, X., Zhu, C., Bohn, T. J., Su, F., & Wood, E. F. (2010). Water budget record from Variable Infiltration Capacity (VIC) model. Algorithm Theoretical Basis Document for Terrestrial Water Cycle Data Records.

Gonthier, C. (2011). Influencia de la escala espacial y representación hidrológica de una cuenca de montaña sobre la capacidad predictiva de un modelo hidrológico. Tesis para optar al Grado de Magister en Recursos Hídricos y Medio Ambiente y memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

Hall, D. K., Riggs, G. A., Salomonson, V. V., DiGirolamo, N. E., & Bayr, K. J. (2002). MODIS snow-cover products. *Remote sensing of Environment*, 83(1), 181-194.

Lohmann, D., NOLTE-HOLUBE, R. A. L. P. H., & Raschke, E. (1996). A large-scale horizontal routing model to be coupled to land surface parametrization schemes. *Tellus A*, 48(5), 708-721.

Liang, X., Lettenmaier, D. P., Wood, E. F., & Burges, S. J. (1994). A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984–2012), 99(D7), 14415-14428.

Maurer, E. 2011. VIC Hydrology Model Training Workshop. Taller Centro de Cambio Global Pontificia Universidad Católica de Chile.

Páez, F. (2012). Comportamiento de un modelo hidrológico distribuido frente a la incertidumbre de la temperatura del aire. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

Páez, F., & Vargas, X., (2014) Simulation of streamflow and validation of snow cover area in two sparsely monitored Central Chilean Andean catchments using VIC hydrological model. XXVI Congreso Latinoamericano XII de Hidrogeología XXVI de Hidráulica. Santiago: Hotel Sheraton.

Pomeroy, J. W., Gray, D. M., Brown, T., Hedstrom, N. R., Quinton, W. L., Granger, R. J., & Carey, S. K. (2007). The cold regions hydrological model: a platform for basing process representation and model structure on physical evidence. *Hydrological Processes*, 21(19), 2650-2667.

Pokhrel, B. K., Chevallier, P., Andréassian, V., Tahir, A. A., Arnaud, Y., Neppel, L., & Budhathoki, K. P. (2014). Comparison of two snowmelt modelling approaches in the Dudh Koshi basin (eastern Himalayas, Nepal). *Hydrological Sciences Journal*, 59(8), 1507-1518.

Serrano, R. (2014). Proyecciones de disponibilidad del recurso hídrico en la cuenca alta del río Maipo, bajo escenarios recientes de cambio climático. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

Sivapalan, M., Takeuchi, K., Franks, S. W., Gupta, V. K., Karambiri, H., Lakshmi, V., & Zehe, E. (2003). IAHS Decade on Predictions in Ungauged Basins (PUB), 2003–2012: Shaping an exciting future for the hydrological sciences. *Hydrological sciences journal*, 48(6), 857-880.

Ulloa, J. (2012). Calibración y uso del modelo VIC para el pronóstico de deshielo en la cuenca de Aconcagua en Chacabuquito. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

Videla, Y. (2013). Modelación hidrológica de la cuenca alta del río Maipo mediante la aplicación del software “Cold Region Hydrological Model”. Memoria para optar al título de geógrafo.

Wan, Z. (2008). New refinements and validation of the MODIS land-surface temperature/emissivity products. *Remote Sensing of Environment*, 112(1), 59-74.

Wood, E. F., Lettenmaier, D. P., & Zartarian, V. G. (1992). A land-surface hydrology parameterization with subgrid variability for general circulation models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984–2012), 97(D3), 2717-2728.

Páginas Web

Core Spatial Datasets, FAO [en línea] < www.fao.org/climatechange/54273/en/>

Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas [en línea] < <http://www.dga.cl/productosyservicios/informacionhidrologica/Paginas/default.aspx>>

NASA. Modis Website. [en línea] <<http://modis.gsfc.nasa.gov/>>

University of Washington. Variable Infiltration Capacity (VIC) Macroscale Hydrologic Model [en línea]. <<http://www.hydro.washington.edu/Lettenmaier/Models/VIC/>>

University of Saskatchewan. CRHM: The cold region Hydrological Model [en línea]. <<http://www.usask.ca/hydrology/CRHM.php>>

WEAP user manual. [en línea] < http://weap21.org/downloads/WEAP_User_Guide.pdf>

ANEXOS

Anexo A Parámetros topográficos de las 40 URH's de CRHM

Tabla A1. Resumen de parámetros topográficos en CRHM

Numero HRU	Tipo de banda	Inicio de elevación [msnm]	Fin de elevación [msnm]	Elevación media	Área [km2]
1	BAJA	874	1519	2699	123.4
2	MEDIA	1519	2320	3306	79.77
3	MEDIA	1529	2320	3334	121.4
4	ALTA	2320	4012	3942	104.5
5	ALTA	2320	4012	3962	104.25
6	BAJA	1279	2294	1959	147.65
7	MEDIA	2294	3133	2724	98.07
8	MEDIA	2294	3133	2789	196.31
9	ALTA	3133	4855	3433	65.73
10	ALTA	3133	4855	3485	229.22
11	BAJA	1285	2704	2213	104.68
12	MEDIA	2704	3542	3141	67.25
13	MEDIA	2704	3542	3240	114.91
14	ALTA	3542	5820	3920	103.21
15	ALTA	3542	5820	4284	133.2
16	BAJA	1238	2696	2255	121.72
17	MEDIA	2696	3966	3085	172.07
18	MEDIA	2696	3966	3108	80.17
19	ALTA	3966	6057	3900	142.23
20	ALTA	3966	6057	4078	110.83
21	BAJA	874	1519	1297	123.39
22	MEDIA	1519	2320	1984	79.77
23	MEDIA	1519	2320	1988	121.4
24	ALTA	2320	4012	2822	105.5
25	ALTA	2320	4012	2831	104.25
26	BAJA	1526	3075	2599	158.52
27	MEDIA	3075	3908	3522	154.86
28	MEDIA	3075	3908	3550	165.08
29	ALTA	3908	6537	4319	104.2
30	ALTA	3908	6537	4634	206.12

31	BAJA	1519	2867	2439	108.68
32	MEDIA	2867	3983	3472	88.05
33	MEDIA	2867	3983	3513	130.5
34	ALTA	3983	6015	4456	129.58
35	ALTA	3983	6015	4537	86.25
36	BAJA	892	1676	1340	67.98
37	MEDIA	1676	2416	1992	75.82
38	MEDIA	1676	2416	1994	59.96
39	ALTA	2416	4140	2855	77.67
40	ALTA	2416	4140	3052	56.58

Anexo B Anexos Digitales

En el anexo digital se incluye toda la información que se utilizó para los resultados de los modelos, específicamente:

- Modelo WEAP modificado de Serrano (2014)
- Modelo CRHM utilizado por Videla (2013)
- Modelo VIC y Route utilizado por Páez (2014)
- Imágenes MODIS de cobertura nival enmascaradas en cada subcuenca de estudio tanto de AQUA como de TERRA
- Rutina Matlab llamada finaluribe.m para el procesamiento de área y nubosidad de las imágenes MODIS