

Nº matric  
66620

T  
OL48e  
2014



UNIVERSIDAD DE VALPARAÍSO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



# Evaluación del uso de Información Satelital de Precipitaciones en la Modelación Hidrológica de la cuenca del Estero Upeo, Séptima Región de Chile.

Por:  
**Nathan Dennis Olivares Fuentes.**

Trabajo de Título para optar al Grado de Licenciado en Ciencias de la Ingeniería y Título de Ingeniero Civil.

Profesor Guía: Yerel Alejandra Morales Pino.

Diciembre, 2014.

R. 16876

precipitaciones  
Hidrología  
Escuela de Ingeniería Civil

## **Agradecimientos**

*Agradezco a mi profesor guía Yerel Morales, por ayudarme durante todo el proceso de esta investigación, entregando todos sus conocimientos, siempre dispuesta a responder las dudas con amabilidad y paciencia. Gracias por darme la gran oportunidad de tener esta grata experiencia de vida, me siento afortunado de trabajar y compartir con un gran profesional.*

*Agradezco a mis padres María Angélica y Horán, a mi hermano Nicolás que con su apoyo, empuje y amor, no habría podido terminar este seminario de grado, gracias por ser mi pilar, han sido mi gran fuerte para poder llegar hasta esta instancia en mi futuro profesional.*

*Y finalmente a mis amados, Tío Gato, Tía Pequeñita, Tía Tere, Jean, Negro, Kangry, Lela, Jona, Larry, Laura, Diego, Gabriela y especialmente a Camila que sin su preocupación y cariño no hubiese sido posible el término del estudio. A mi tío Choncho que por su labor como docente, siempre me incentivaba en terminar la investigación.*

## Tabla de contenido

Glosario .....	6
Lista de Abreviaturas y Siglas .....	7
Lista de Figuras .....	8
Lista de Tablas .....	10
Resumen .....	11
Introducción .....	12
Planteamiento del Problema.....	13
Objetivo General.....	13
Objetivos Específicos .....	13
1. CAPÍTULO 1: Hidrografía y Análisis de Cuenca.....	14
1.1. Ciclo hidrológico .....	15
1.1.1. Evaporación y Evapotranspiración. ....	16
1.1.2. Condensación.....	16
1.1.3. Escorrentía Superficial.....	16
1.1.4. Infiltración .....	18
2. CAPÍTULO 2: Hidrograma.....	19
2.1. Partes de un Hidrograma.....	19
2.1.1. Curva de concentración.....	20
2.1.2. Curva de descenso.....	20
2.1.3. Curva de agotamiento .....	20
2.2. Métodos para calcular un hidrograma .....	21
2.2.1. Hidrograma Unitario.....	21
2.2.2. Hidrograma Unitario Sintético.....	22
3. CAPÍTULO 3: Percepción Remota .....	24
3.1. Información Satelital .....	24

3.2.	Misión TRMM 3B42 v7 .....	25
3.3.	Influencias meteorológicas .....	25
3.4.	Obtención de datos.....	26
4.	CAPÍTULO 4: Modelación Hidrológica .....	28
4.1.	Programa de Modelación HEC-HMS .....	28
5.	CAPÍTULO 5: Análisis y Calibración de Imágenes Satelitales.....	30
5.1.	Generalidades .....	30
5.2.	Datos DGA .....	31
5.3.	Calibración.....	33
5.4.	Validación .....	39
6.	CAPÍTULO 6: Modelación de crecidas del Estero Upeo. ....	41
6.1.	Área de Estudio .....	42
6.1.1.	Geomorfología .....	42
6.1.2.	Condición Climática .....	44
6.1.3.	Hidrografía .....	44
6.1.4.	Temperatura y humedad relativa .....	46
6.1.5.	Uso de suelo.....	46
6.1.6.	Variación de precipitación.....	47
6.2.	Sistema de modelación hidrológica .....	48
6.2.1.	Identificar la decisión .....	49
6.2.2.	Identificar y seleccionar el criterio de la metodología .....	49
6.2.3.	Qué información es requerida .....	49
6.2.4.	Determinación de los eventos apropiados según espacio y tiempo .....	49
6.2.5.	Ajustar y verificar modelo .....	51
6.2.6.	Recolectar Información hidrológica.....	51
6.2.7.	Ejecución y análisis del modelo .....	51
6.3.	Desarrollo de modelación .....	51

6.3.1.	Calibración HEC-HMS .....	52
6.3.2.	Eficiencia de Nash-Sutcliffe y volumen .....	57
6.3.3.	Gráficos para calibración, caudales reales y caudales simulados DGA .....	59
6.3.4.	Gráficos para validación, caudales reales y caudales simulados reales .....	65
6.3.5.	Gráficos validados, caudales reales y caudales simulados satelital .....	68
CAPÍTULO 7: Resultados.....		76
CAPITULO 8: Conclusión.....		77
Bibliografía.....		79

## Glosario

- Raster: Formato digital que almacena, procesa e interpreta datos. Se basa en una imagen en mapa de bits (del inglés *bitmap*)
- Pixel: Abreviatura de *Picture Element*. Es un único punto en una imagen gráfica; también es la menor unidad homogénea en color que forma parte de una imagen digital (fotografía).
- GUI: (del inglés *Graphic User Interface* o Interfaz Gráfica de Usuario) Conjunto de formas y métodos que posibilitan la interacción de un sistema con los usuarios utilizando formas gráficas e imágenes. Con formas gráficas se refiere a botones, íconos, ventanas, fuentes, etc. los cuales representan funciones, acciones e información.
- GIS: (del inglés *Geographic Information System*) corresponde a un programa computacional creado para almacenar, manipular e interpretar datos espaciales y geográficos.
- Geo-Estadística: Estadísticas de variables espacialmente correlacionadas.
- Hietograma: Gráfico que permite ver la intensidad de la lluvia durante la tormenta a través del tiempo de la misma.
- Capa Freática: Nivel de agua acumulada en el subsuelo que conforma el límite superior de la zona saturada en un acuífero.
- Limnómetro y Limnígrafo: Instrumentos que permiten registrar y representar la medida de la altura de escurrimiento de un cauce o río.

## Lista de Abreviaturas y Siglas

DEM	:	del inglés, Digital Elevation Model.
CEPAL	:	Comisión Económica para América Latina y el Caribe.
DGA	:	Dirección General de Aguas.
GIS	:	del inglés, Geographic Information System.
HEC – HMS	:	del inglés, Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System.
HED	:	Hidrograma de Escorrentía Directa.
HU	:	Hidrograma Unitario.
HUS	:	Hidrograma Unitario Sintético.
IAHS	:	del inglés, International Association of Hydrological Sciences
IGM	:	Instituto Geográfico Militar.
JAXA	:	del inglés, Japan Aerospace Exploration Agency.
M.s.n.m	:	Metros sobre nivel del mar.
NASA	:	del inglés, National Aeronautics and Space Administration.
NETCDF	:	del inglés, Network Common Data Form.
OMM	:	Organización Meteorológica Mundial.
PR	:	del inglés, Precipitation Radar.
QGIS	:	del inglés, Quantum GIS.
TMI	:	del inglés, TRMM Microwave Imager.
TRMM	:	del inglés, Tropical Rainfall Measuring Mission.
UCS	:	del inglés, Union of Concerned Scientists.
UTM	:	del inglés, Universal Transverse Mercator.
WGS84	:	del inglés, World Geodetic System 84.

## Lista de Figuras

	Página
Figura 1 : Mapa Conceptual	14
Figura 1.1: Ciclo Hidrológico	15
Figura 1.2: Caudales pasado y futuro del río Maule en Armerillo	17
Figura 1.3: Esquema de infiltración	18
Figura 2.1: Partes de un Hidrograma	20
Figura 2.2: Obtención de Hidrograma Escorrentía Directa	22
Figura 3.1: Efectos cambio climático Chile CEPAL 2009	26
Figura 3.2: Capacidad TRMM	27
Figura 5.1: Zona de Calibración y Validación	31
Figura 5.2: Polígonos de Thiessen y Cuenca Estero Upeo	34
Figura 5.3: Relación Lineal Pixel 5	37
Figura 5.4: Relación Lineal Pixel 6	37
Figura 5.5: Relación Lineal Pixel 7	38
Figura 5.6: Relación Lineal Pixel 8	38
Figura 5.7: Relación Final de Calibración	39
Figura 5.8 : Correlación Validación P.M.O y P.M.S Validados.	40
Figura 6.1: Sección Baja Upeo	42
Figura 6.2: Geomorfología del Maule	43
Figura 6.3 : Afluentes del Río Mataquito	45
Figura 6.4: Catastro vegetacional cuenca Estero Upeo	47
Figura 6.5: Promedios de precipitación mensuales de 30 años	48
Figura 6.6: Ejemplo gráfico de hidrograma para la selección de datos	50
Figura 6.7; Interfaz gráfica HEC-HMS	52
Figura 6.8: Ejemplo cálculo de constante K recesión	55
Figura 6.9: Gráfico de calibración HEC-HMS tormenta 1	59
Figura 6.10: Gráfico de calibración HEC-HMS tormenta 2	60
Figura 6.11: Gráfico de calibración HEC-HMS tormenta 3	60
Figura 6.12: Gráfico de calibración HEC-HMS tormenta 4	61
Figura 6.13: Gráfico de calibración HEC-HMS tormenta 5	61
Figura 6.14: Gráfico de calibración HEC-HMS tormenta 6	62
Figura 6.15: Gráfico de calibración HEC-HMS tormenta 7	62
Figura 6.16: Gráfico de calibración HEC-HMS tormenta 8	63
Figura 6.17: Gráfico de calibración HEC-HMS tormenta 9	63

Figura 6.18: Gráfico de calibración HEC-HMS tormenta 10	64
Figura 6.19: Gráfico de validación HEC-HMS tormenta 1	65
Figura 6.20: Gráfico de validación HEC-HMS tormenta 2	65
Figura 6.21: Gráfico de validación HEC-HMS tormenta 3	66
Figura 6.22: Gráfico de validación HEC-HMS tormenta 4	66
Figura 6.23: Gráfico de validación HEC-HMS tormenta 5	67
Figura 6.24: Gráfico validados por simulación HEC-HMS tormenta 1	68
Figura 6.25: Gráfico validados por simulación HEC-HMS tormenta 2	68
Figura 6.26: Gráfico validados por simulación HEC-HMS tormenta 3	69
Figura 6.27: Gráfico validados por simulación HEC-HMS tormenta 4	69
Figura 6.28: Gráfico validados por simulación HEC-HMS tormenta 5	70
Figura 6.29: Gráfico validados por simulación HEC-HMS tormenta 6	70
Figura 6.30: Gráfico validados por simulación HEC-HMS tormenta 7	71
Figura 6.31: Gráfico validados por simulación HEC-HMS tormenta 8	71
Figura 6.32: Gráfico validados por simulación HEC-HMS tormenta 9	72
Figura 6.33: Gráfico validados por simulación HEC-HMS tormenta 10	72
Figura 6.34: Gráfico validados por simulación HEC-HMS tormenta 11	73
Figura 6.35: Gráfico validados por simulación HEC-HMS tormenta 12	73
Figura 6.36: Gráfico validados por simulación HEC-HMS tormenta 13	74
Figura 6.37: Gráfico validados por simulación HEC-HMS tormenta 14	74
Figura 6.38: Gráfico validados por simulación HEC-HMS tormenta 15	75

## Lista de Tablas

Tabla 5.1: Estaciones Meteorológicas DGA en la zona de estudio	(Página 32)
Tabla 5.2: Selección de 32 eventos de tormentas para calibración	(Página 33)
Tabla 5.3: Precipitaciones Medias Observadas por pixel	(Página 35)
Tabla 5.4: Precipitaciones Medias Satelitales por pixel	(Página 36)
Tabla 5.5: Resultados Altura Media Pixel e Intercepto para Calibración.	(Página 38)
Tabla 5.6: Resultados Altura Media Pixel e Intercepto para Validación.	(Página 39)
Tabla 5.7: Resultados P.M.O y P.M.S Validados.	(Página 40)
Tablas 6.1 y 6.2: Tramos y Afluentes Estero Upeo	(Página 45)
Tabla 6.3: Eventos para calibración	(Página 50)
Tabla 6.4: Eventos para validación	(Página 50)
Tabla 6.5: Valores de entrada subcuenca 1	(Página 56)
Tabla 6.6: Valores de entrada subcuenca 2	(Página 56)
Tabla 6.7 y 6.8: HUS, Benitez y Arteaga para la subcuenca 1 y 2	(Página 56)
Tabla 6.9 y 6.10: Valores para ejecución del proframa subcuenca 1 y 2	(Página 57)
Tabla 6.11: Resultados calibración, Nash, Volumen real y simulado real.	(Página 58)
Tabla 6.12: Resultados validación, Nash, Volumen real y simulado real.	(Página 58)
Tabla 6.13: Resultados validados de 10 tormentas, Nash, Volumen real y Volumen simulado real.	(Página 58)
Tabla 6.14: Resultados validados de 5 tormentas, Nash, Volumen real y Volumen simulado real.	(Página 59)

## Resumen

Problemas como zonas sin cobertura de estaciones meteorológicas o vacíos prolongados en registros de información de las mismas, dificultan las investigaciones hidrológicas en Chile. Las precipitaciones y caudales puntas son fundamentales para estos tipos de estudios, que mediante herramientas tecnológicas, como un programa de simulación y con ayuda de componentes hidrológicas, como el Hidrograma Unitario; podría facilitar el problema principal antes mencionado.

La primera capa de gases del planeta origina las primeras lluvias, dando vida al comienzo del Ciclo Hidrológico. El agua precipitada es almacenada por la pendiente del terreno geográfico formando cauces naturales. No toda la precipitación caída produce escorrentía, ya que dependiendo de permeabilidad del suelo, hay aguas que son filtradas formando acuíferos subsuperficiales. La relación entre precipitación y escorrentía superficial es analizada desde el año 1674, donde Pierre Perrault con su obra "De l'origine des fontaines" relata que las aguas de los ríos provienen de las precipitaciones y nevadas. La obra de Pierre origina el concepto de Hidrología, esta ciencia se dedica al estudio del comportamiento y distribución del agua, a través del ciclo hidrológico. En la actualidad existen diversos estudios hidrológicos que analizan el comportamiento de las cuencas hidrográficas de la zona centro sur del país.

La información meteorológica satelital pretende dar información necesaria para combatir el calentamiento global, amenaza climática existente en el planeta. Esta información satelital sirve como dato de entrada para programas computacionales que ejecutan un modelo simulado de caudales, no obstante la información satelital debe primero ser sometida a procesos de calibración para su posterior validación y uso.

El estudio principal se enfoca en el Estero Upeo, ubicado en la Región del Maule, Chile. El objetivo es simular las crecidas de su cauce natural con el programa HEC-HMS, estas crecidas son provocadas por datos basados en las imágenes digitales del satélite TRMM 3B24v7. Las imágenes satelitales se complementan con datos fisiométricos e hidrológicos de la hoya hidrográfica, para obtener mejores resultados de las simulaciones en la calibración y validación del modelo.

La calibración de las imágenes satelitales arroja valores estadísticos aceptables. En la validación la regresión lineal entrega un valor de correlación  $R^2=0,855$ , permitiendo así la utilización de las imágenes satelitales, para el posterior análisis del comportamiento del cauce del estero. En el proceso de simulación se obtienen valores de calibración aceptables, dando como resultado un 80% de las tormentas analizadas da magnitudes de Nash-Sutcliffe  $\geq 0,70$ . En el proceso de validación del sistema de modelación, ésta arroja valores de Nash  $\geq 0,6$  en el 70% de las tormentas estudiadas.

La cuenca del Estero Upeo supone una gran complejidad de estudio, ya que sus grandes caudales en épocas de lluvia son difíciles de simular; se estima que el tipo de suelo en todo el trayecto del río permite una gran escorrentía superficial. El análisis realizado a los caudales reales versus los caudales simulados satelitales, comprueba que la metodología propuesta planteada es factible y aceptada, pudiendo utilizarse en estudios de cálculos de caudales puntas provocados por tormentas, también hay que considerar que las tormentas son impredecibles y de difícil medición.

**Palabras clave:** precipitación efectiva, escorrentía directa, escorrentía superficial, hidrogramas de crecida, modelos de simulación, simulación integral de cuencas, HEC-HMS, Nash-Sutcliffe.

## Introducción

Las precipitaciones y caudales puntas son fundamentales para los estudios en la Ingeniería Civil. El hidrograma originado por un cauce representa de forma gráfica (en un eje cartesiano), la relación entre el caudal y la precipitación en un intervalo de tiempo; cabe mencionar que una cuenca hidrográfica tiene un Hidrograma Unitario (HU) único, donde la geografía y las condiciones meteorológicas que presenta un lugar de estudio, son de gran relevancia para determinar el HU. En la actualidad, el clima se encuentra en un cambio constante e impredecible, cambio producido por el calentamiento global y otros factores que afectan la circulación atmosférica, que se relacionan directamente con cualquier estudio hidrológico, por lo tanto, la información necesaria para una investigación podría ser alterada a futuro siendo imprescindible la obtención de datos más detallados.

Además del cambio climático existente como factor determinante, se suma la escasez de datos que son fundamentales para una obra civil; esto significa que no existen registros de periodos de tiempo completo en las estaciones meteorológicas, por lo tanto, se hace necesario buscar otra fuente de información, como por ejemplo: imágenes satelitales, que tienen la ventaja de ser accesibles y otorgan menos incertidumbre en lapsos de tiempos en comparación con las estaciones. Una alternativa de este tipo es el satélite TRMM, el cual publica información satelital 2 meses después de haber sido tomada, mientras que la información de las estaciones meteorológicas se demora 3 meses en ser publicada.

Hoy en día la NASA provee de forma gratuita y en línea información de tormentas, como las imágenes del satélite TRMM, que ofrece una variedad de datos según el instrumento de fuente, como por ejemplo: Imágenes de Microondas, Sensor de Nubes, Energía de Radiación Terrestre, Sensor de Imágenes de Rayos y el Radar de Acumulación de Precipitación. Este último será utilizado en el presente estudio, ya que entrega la precipitación media diaria o precipitaciones acumuladas e instantáneas, en intervalos de tiempo horario (registros cada 3 horas).

La información será analizada mediante el programa Quantum GIS (QGIS), éste es un sistema computacional para almacenar, manejar, analizar y representar todo tipo de información digital geográfica. A partir de él es posible obtener información necesaria para estudios hidrológicos sirviendo como base para la creación de uno o varios proyectos.

La metodología base del estudio, consiste en analizar el hidrograma de una cuenca en la Séptima Región, y simular su comportamiento mediante el programa HEC-HMS, este último utiliza los parámetros de la cuenca con finalidad central, la determinación de hidrogramas de crecidas. Los programas de simulación necesitan información fácil de interpretar, como series de tiempo fluviométricas que entregan las redes hidrológicas, las cuales son obtenidas directamente de mediciones en las estaciones.

El estudio principal se fundamenta en datos geográficos y meteorológicos de la cuenca del Estero Upeo, en las cercanías del pueblo Monte Oscuro que se caracteriza por un cálido clima y variados bosques frondosos. El estero Upeo desemboca en el estero Potrero Grande, ambos desbocan en el Río Lontue, y todos, son subcuencas de la segunda zona de captación más grande de la Región del Maule.

Con los datos ya procesados, se modelará y simulará con el programa hidrológico HEC-HMS, que mediante un método matemático utiliza algoritmos repetitivos para analizar los parámetros hidrológicos como por ejemplo el hidrograma de escorrentía, pérdidas de la cuenca, flujo de canales y flujo base. A través de la modelación se evaluará el comportamiento de la hoya hidrográfica en función de los datos registrados en las estaciones y se comparará dichos resultados con los obtenidos en la modelación, utilizando información satelital.

## **Planteamiento del Problema**

Se necesita mucha información para poder buscar un método que simule la crecida de un cauce, y en la actualidad se utilizan datos de las estaciones meteorológicas vigentes para crear cálculos necesarios de un proyecto, pero a veces las estaciones están en mantención o se dañan y se necesitan meses de reparación o simplemente el área de estudio deseada no está cubierta por las estaciones.

El estudio y análisis de una cuenca es complejo, ya que sus variables geológicas e hidrológicas son difíciles de catalogar y simular. Por esta razón se busca una concordancia entre las imágenes satelitales con respecto a la información vigente de las estaciones meteorológicas, con el fin de subsanar problemas como zonas sin cobertura de estaciones meteorológicas o vacíos prolongados en registros de información de las mismas.

## **Objetivo General**

Evaluación del uso de información satelital de precipitaciones en la cuenca del Estero Upeo a través de un análisis comparativo con registros hidrometeorológicos de la zona, mediante una modelación hidrológica.

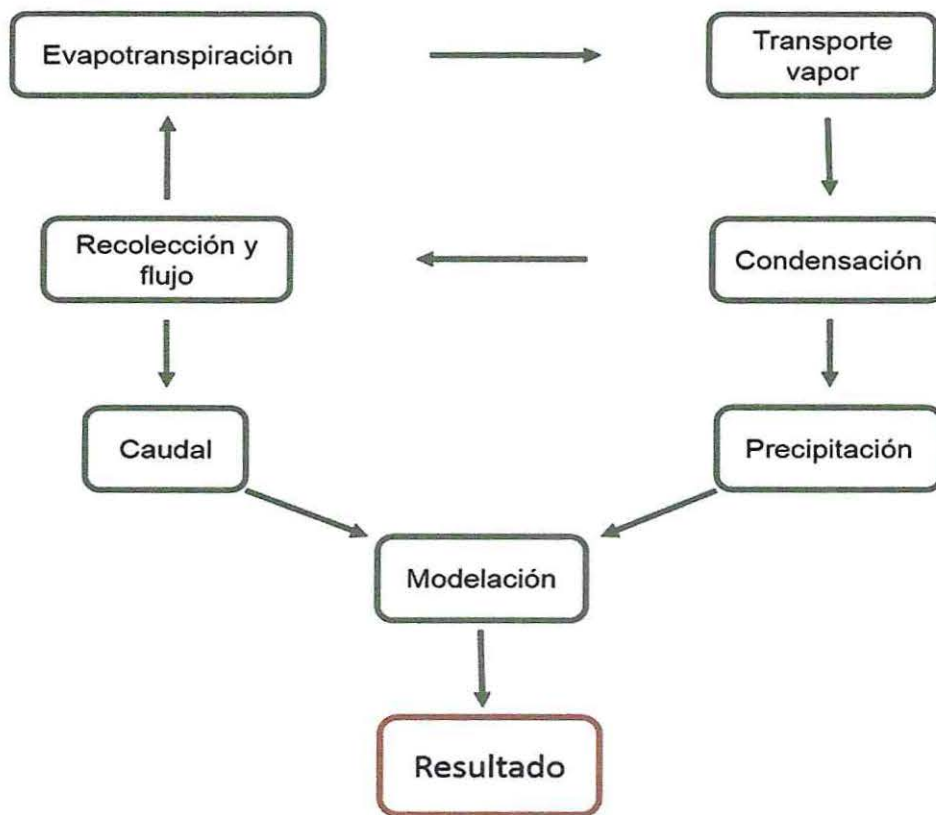
## **Objetivos Específicos**

- Realizar la calibración y validación de la información satelital con los registros meteorológicos de la zona.
- Implementar un modelo hidrológico de la cuenca del Estero Upeo en el programa HEC-HMS.
- Calibrar el modelo con información meteorológica de la zona de estudio.
- Analizar el comportamiento del modelo con información satelital calibrada.
- Analizar la validez de la calibración de la información satelital obtenida.

## 1. CAPÍTULO 1: Hidrografía y Análisis de Cuenca

La Tierra era un astro incandescente sin cobertura estable, cuando las capas exteriores comenzaban a solidificarse, el calor del planeta las detuvo y se fundieron nuevamente. Pero hubo un periodo en que las temperaturas bajaron para formarse así la corteza terrestre. Al principio no había atmósfera por causa de una gran actividad volcánica, se generaron grandes cantidades de gases que conformaron una capa sobre la superficie, donde su composición era muy distinta de la actual, pero fue la primera capa protectora que permitió la aparición del agua líquida. Aquel elemento vital permitió la vida y la formación del ciclo hidrológico.

En la **figura 1** se esquematiza el cuerpo físico de este estudio, se inicia en el ciclo hidrológico con la evaporación del agua, el transporte de vapor, la condensación de éste hasta que finalmente el agua precipita y es recolectada. En los procesos de condensación y recolección del agua se sustraen dos variables hidrológicas, las precipitaciones y los caudales respectivos de estudio; estos datos servirán como valores de entrada para el programa de modelación, obteniendo finalmente el resultado del modelo.



**Figura 1:** Mapa conceptual planteado para el análisis del estudio. Donde del ciclo hidrológico brinda dos elementos importantes a estudiar, la precipitación y el caudal del cauce. Fuente propia.

### 1.1. Ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico comienza con la producción de los primeros gases provocados por la actividad volcánica. La nueva atmósfera permitió las primeras precipitaciones, y así el primer flujo de agua, elemento que tiene la característica de encontrarse en los tres estados físicos de la materia, gaseoso, líquido y sólido. La radiación solar es el motor del ciclo, va calentando el agua de los océanos, el cual genera vapor de agua que transita por corrientes ascendentes alcanzando capas superiores de la atmósfera, llegando a temperaturas y presiones muy bajas que provocan la condensación del gas, creando finalmente las nubes. Esta unión de vapor es sometida a presiones atmosféricas que permiten una circulación constante de las nubes en el aire y cuando las partículas son alteradas por la energía calórica, se forman moléculas de agua más grandes y por su peso precipitan de forma líquida o sólida<sup>[1]</sup>.

Finalmente el agua es almacenada por la pendiente del terreno geográfico y se acumula en el suelo impermeable formando estanques o simplemente fluye por afluentes naturales que además son sustentados por arroyos creados por el derretimiento de nieve y cruzan todo el continente hasta llegar al mar, por consiguiente se repite el proceso y se mantiene el equilibrio energético. Si el suelo no fuera impermeable se drenaría el agua formando así, los acuíferos subterráneos.



Figura 1.1: Ciclo Hidrológico. Fuente: Aguas Décima.

### **1.1.1. Evaporación y Evapotranspiración.**

Las moléculas de agua necesitan algún tipo de energía para romper sus enlaces y poder pasar del estado líquido a gaseoso, este proceso forma la primera etapa del ciclo hidrológico, la evaporación. La principal fuente de vapor de agua son los océanos, que abarca más de un 70% de la superficie terrestre. Otra fuente es la transpiración, éste es el proceso biológico de las plantas de perder agua a través de sus hojas y expulsarla a la atmósfera en forma de vapor<sup>[2]</sup>. Una tercera fuente, es la sublimación de los polos (paso del estado sólido a gaseoso), que complementa las antes mencionadas.

La combinación de estas 3 fuentes (evaporación, transpiración, y sublimación), se denomina como evapotranspiración. Se considera que solo un 10% del vapor de agua lo aporta la transpiración de las plantas, el resto lo otorga la evaporación. En conjunto se estima que un 65% de agua recibida en una zona (lluvia) es devuelta a la atmósfera en estado gaseoso, mientras que el 35% restante lo entrega la escorrentía superficial y subterránea<sup>[3]</sup>.

Las altas temperaturas y la humedad relativa, al ser factores importantes para la evaporación, están presentes en la variable hidrológica en forma directa<sup>[4]</sup>. Se debe considerar que cuando la presión de vapor tiene igual valor a la presión atmosférica, se produce la ebullición, es decir, la temperatura influye en la presión directamente.

### **1.1.2. Condensación**

Es el proceso que permite la transformación del vapor de agua a estado líquido nuevamente, generalmente ocurre cuando un vapor se enfría (también cuando se comprime o aumenta la presión).

El agua en el aire sigue presente en cantidades mínimas imperceptibles, estas partículas son tan diminutas, que deben agruparse en grandes cantidades para ser vistas. Las nubes contienen vapor de agua, que producen acumulación líquida que posteriormente caerán en forma de precipitación. Las nubes son sostenidas por ráfagas ascendentes que las mantienen sin precipitar y para que ocurra el fenómeno de lluvia, varias gotas deben condensarse y producir partículas de mayor tamaño, adecuadamente pesadas para que precipiten.

La relación de masa entre el aire y agua evaporada, se denomina humedad relativa, el vapor de agua necesita llegar a un cierto punto de saturación para lograr la condensación.

Las precipitaciones son uno de los datos meteorológicos más importantes en los estudios hidrológicos, ya que sirve como base para estudios específicos.

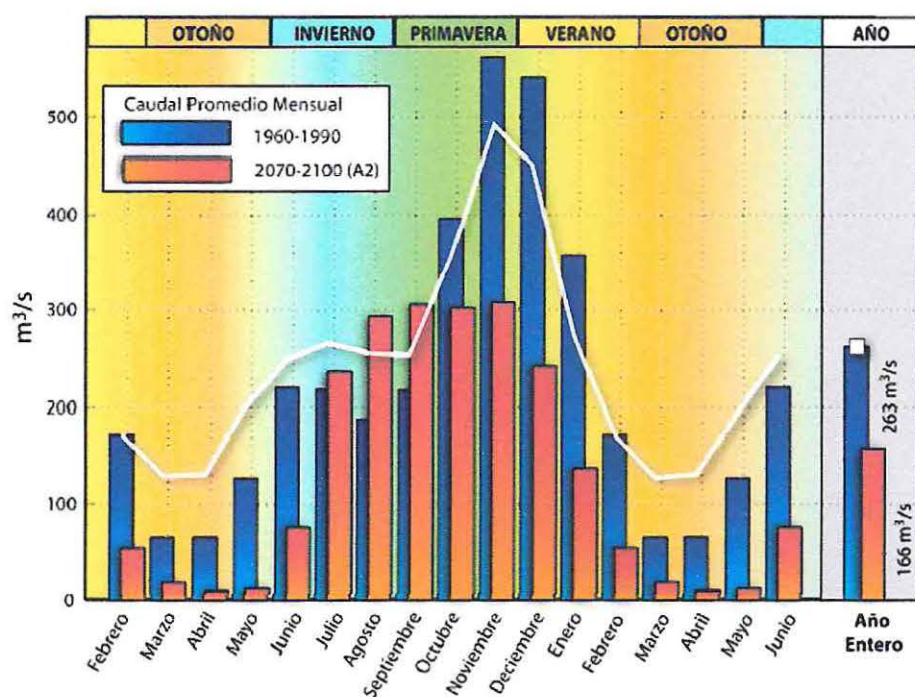
### **1.1.3. Escorrentía Superficial**

La relación entre precipitación y escorrentía superficial, varía según: la meteorología, topografía y geología física del lugar. Sólo un tercio de la lluvia precipitada llega a los océanos por escurrimiento, el resto del agua se evapora o es absorbida por el suelo de forma subterránea. Los ríos mantienen los océanos con agua ya que descargan su afluente sobre ellos. El agua transita por los afluentes naturales originados por la gravedad de la Tierra, el traslado de este elemento varía según la pendiente y el tipo de suelo del lugar.

## CAPÍTULO 1: Hidrografía y Análisis de Cuenca

Durante una tormenta, no toda la precipitación produce escorrentía, esto debido al tipo de permeabilidad del suelo, permitiéndole acumular o drenar según sea el índice de permeabilidad, es decir, es absorbida en su mayor parte hasta un punto en que el suelo no pueda retener más agua (saturación), provocando que escurra superficialmente por la pendiente natural del terreno hasta el río principal más cercano. El agua que precipite escurrirá por esa pendiente terminando en la desembocadura del río, como punto en común.

Se considera que los deshielos, en climas fríos cordilleranos, forman gran parte de la escorrentía. El aporte máximo del derretimiento de las nieves, en la zona sur de Chile, es en el comienzo de la primavera por causa de los aumentos de temperatura del aire y duración de la luz solar<sup>[5]</sup>. Los deshielos, en menor cantidad, se mantienen constante durante el año, esto es importante, dado que la mayor parte del caudal base de los ríos, proviene de la nieve.



**Figura 1.2:** Caudales pasado y futuro del río Maule en Armerillo. Fuente: Departamento de Geofísica, Universidad de Chile.

La **figura 1.2** es un estudio realizado en el Departamento de Geofísica, donde se analiza el comportamiento del caudal a lo largo de 30 años, se desprende, un claro aumento entre primavera y verano; una futura disminución del caudal en los periodos de deshielo entre los años 2070-2100 y asimismo aumentarán los caudales entre los meses de julio a septiembre. Lo antes mencionado da a entender la variación del comportamiento en los caudales, se deberá tener en cuenta en estudios futuros a realizar.

### 1.1.4. Infiltración

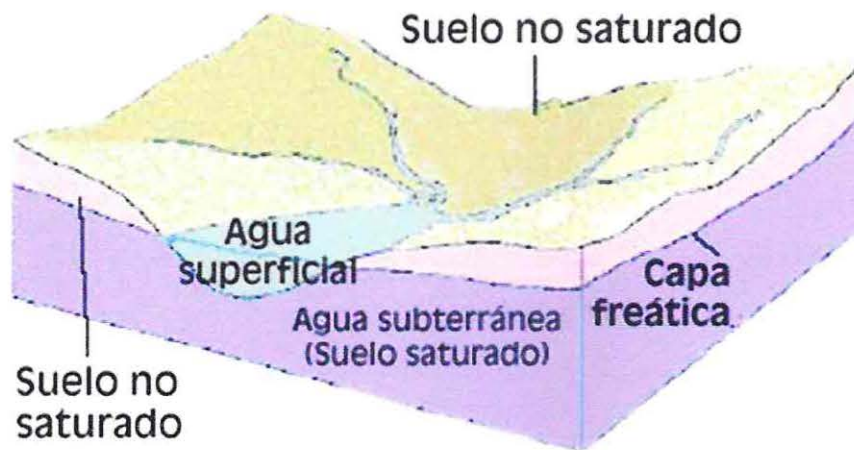
La velocidad de infiltración mide la capacidad del suelo que permite la filtración de un líquido, esta medición depende de muchos factores; un suelo desagregado y permeable tendrá una capacidad de infiltración mayor que un suelo arcilloso y compacto<sup>[5]</sup>.

Un canal o río puede transformarse directamente en agua superficial, sin embargo, hay arroyos que desaparecen en cuevas o a simple vista en el suelo. Esto es producto de la permeabilidad del sustrato, que permite que el agua se filtre y forme aguas subterráneas.

Hay dos factores importantes de por qué existen las aguas subsuperficiales, la gravedad tiende a atraer cualquier cuerpo al centro de la Tierra, esto significa que el agua intentará filtrarse hasta alcanzar un material rocoso completamente saturado, ésta desciende por la gravedad en ángulos inclinados, llegando eventualmente a arroyos, lagos u océanos. El otro factor son las rocas que se encuentran en las subsuperficie, tipos de rocas compuestas por materiales porosos capaces de filtrar agua. Existen capas rocosas o suelos de material denso como la arcilla que no permite el traspaso del agua en forma vertical, que confina el curso del líquido formando un río subterráneo.

Parte del agua infiltrada, permanece en las capas más superficiales del suelo, pero hay aguas que se convierten en acuíferos subterráneos. Sobre la capa freática (**ver figura 1.3**) existe un suelo húmedo pero no del todo saturado, la tierra y la roca en la zona no saturada contiene aire y una porción de agua que mantiene la subsistencia de la vegetación.

El área saturada bajo la capa freática tiene agua que llena las grietas y espacios porosos entre las rocas.



**Figura 1.3:** Esquema de infiltración. Fuente: Mediciones Geológicas de Norte América.

## 2. CAPÍTULO 2: Hidrograma

En el año 1674, el francés Pierre Perrault publica su obra "*De l'origine des fontaines*", en la que demuestra que el agua de los ríos proviene de las precipitaciones y nevadas, dando origen al concepto hidrológico [4], concepto por el cual, la UNESCO, la OMM y la IAHS, conmemoraron el año 1974 como el "tricentenario de la Hidrología Científica". La hidrología es la ciencia dedicada al estudio de las propiedades físicas, químicas y mecánicas de las aguas de la Tierra, cubre su distribución y circulación a través del ciclo hidrológico. Es una gran materia para el ser humano y su ambiente [6], la aplicación práctica de la hidrología es una herramienta fundamental para realizar estudios ingenieriles.

La hidrología permite el estudio del comportamiento de los caudales, según la precipitación ocurrida en un intervalo de tiempo, el hidrograma es una forma gráfica de relacionar estos dos últimos parámetros. En efecto, es una expresión integral de las características geográficas y climáticas, que relaciona la lluvia y la escorrentía de una cuenca de drenaje en particular [6]. Los periodos de tiempo de un hidrograma pueden expresarse en minutos, horas, días o años.

Con el supuesto que un hidrograma es fabricado después de una precipitación caída en una cuenca determinada, se registran componentes con distintos significados en cada intervalo de tiempo. Cabe mencionar, que la separación de los diferentes componentes del hidrograma no puede ser sino aproximada, puesto que no existe un método experimental simple que permita identificar el origen y el trayecto de los caudales que llegan a la salida.

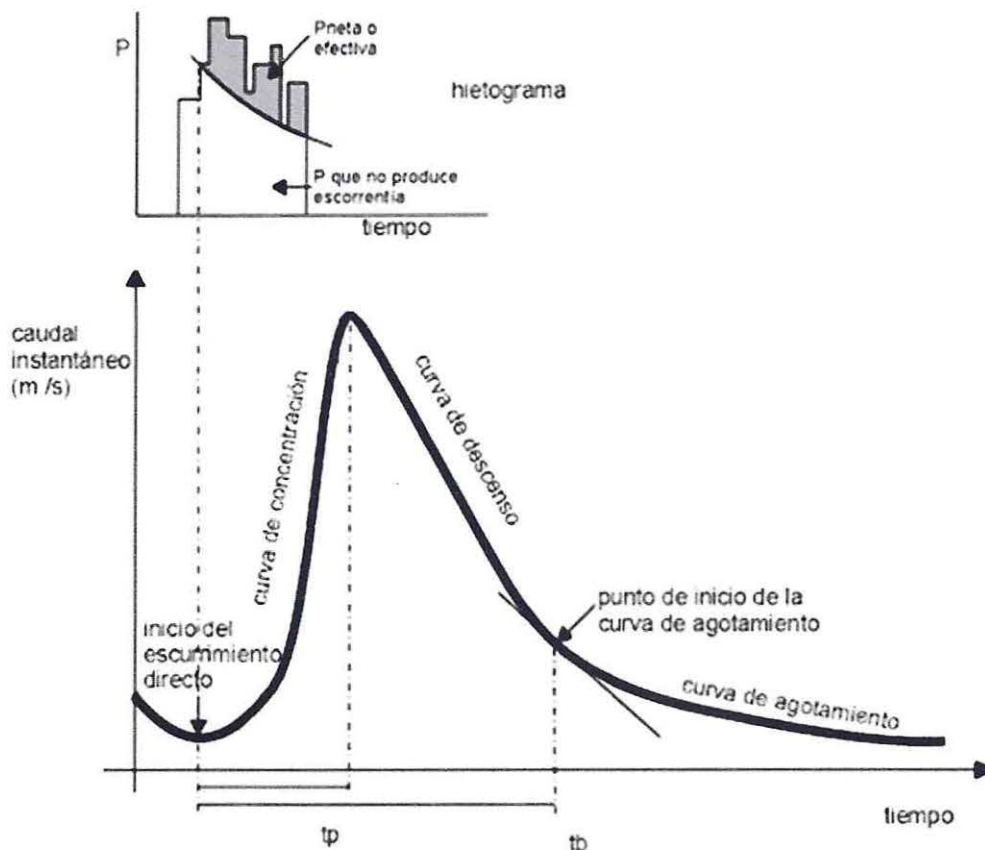
A causa de la escasez de datos hidrológicos, como mediciones de precipitaciones y escorrentía, se crean relaciones entre características generales físicas y coeficientes medibles de las cuencas que permiten estimar un Hidrograma Unitario. Es así, que a este tipo de hidrograma se le denomina sintético, ya que no proviene de parámetros reales, sino de formulaciones obtenidas utilizando datos de otras cuencas [7]. Un ejemplo de este caso es el Hidrograma Unitario Sintético de Snyder quien en 1938 fue el primero en desarrollar este tipo de hidrogramas unitarios basados no en mediciones, sino en fórmulas empíricas provenientes de datos reales.

### 2.1. Partes de un Hidrograma

La medición del caudal instantáneo de un cauce en intervalos de tiempos, origina coordenadas ortogonales en un plano cartesiano, a este registro se le denomina como curva de descarga. Según el comportamiento del cauce y la precipitación, se generan cambios en la curva señalados por puntos de inflexión, estos cambios se desglosan en los siguientes términos: curva de concentración, curva de descenso y curva de agotamiento.

La variación de tiempo entre el comienzo de la curva de concentración (ascendente) y el caudal punta, se llama tiempo de crecida. La medición de tiempo entre el comienzo de la curva ascendente y el punto de inflexión entre la curva de descenso y de agotamiento se denomina tiempo base.

## CAPÍTULO 2: Hidrograma



**Figura 2.1:** Partes de un Hidrograma. Fuente: Tesis Universidad de Talca, *Calibración y Validación del Modelo HEC-HMS, cuenca Huechún, Región Metropolitana.*

### 2.1.1. Curva de concentración

Esta curva, se define por su pendiente positiva y valores en aumento, es la sección del hidrograma que inicia la crecida del gráfico por la lluvia precipitada, la curva va en ascenso hasta llegar a un caudal punta.

### 2.1.2. Curva de descenso

La curva de descenso indica cuando la lluvia ha cesado, por lo tanto, la curva tiene pendiente negativa y disminuyen los valores del caudal. Se describe como el tramo entre el caudal punta y el fin de la afluencia de aguas superficiales.

### 2.1.3. Curva de agotamiento

La curva de recesión o agotamiento es la sección del hidrograma donde los valores del caudal provienen exclusivamente de la alimentación de aguas subterráneas y del caudal base.

### 2.2. Métodos para calcular un hidrograma

Existen varios métodos para el cálculo de un hidrograma, los importantes para este estudio son el Hidrograma Unitario (HU) realizado con parámetros hidrológicos reales y el Hidrograma Unitario Sintético (HUS) obtenido empíricamente, con parámetros no reales de cuencas cercanas o con características parecidas.

#### 2.2.1. Hidrograma Unitario

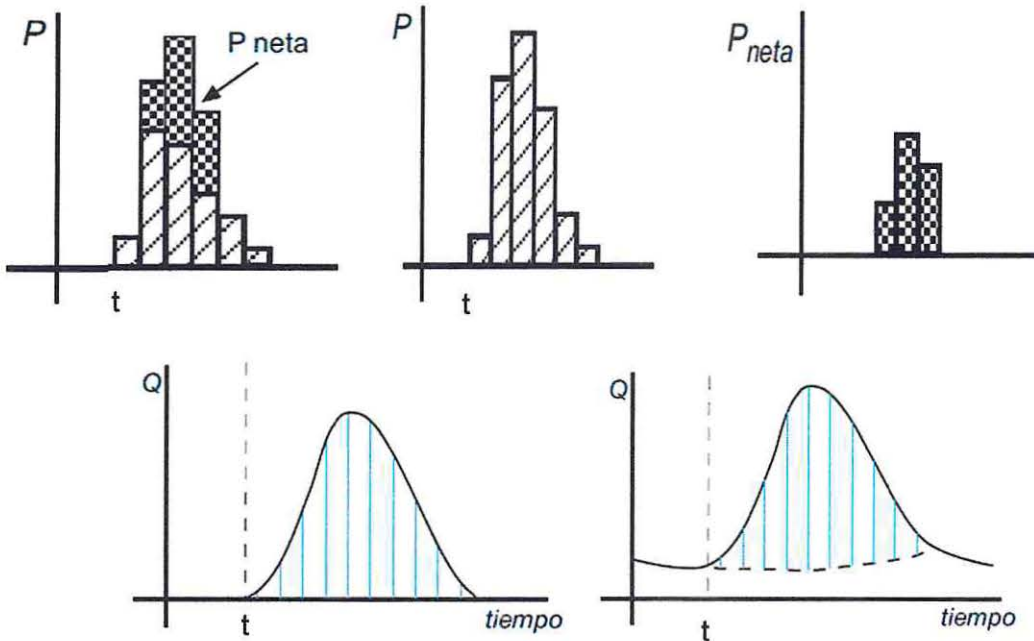
El Hidrograma Unitario (HU) está conformado por un modelo conceptual que supone a la cuenca como un sistema lineal e invariable en el tiempo, en donde el dato de entrada es la precipitación y el de salida es el caudal del río<sup>[8]</sup>.

La obtención de un Hidrograma Unitario se realiza a partir de: la desconvolución del Hidrograma de Escorrentía Directa (HED) y su respectivo hietograma de precipitación efectiva (parte de la precipitación que escurre). El HU es la función respuesta de una cuenca, originando un HED que se producirá en la salida de una hoya hidrográfica si sobre ésta se produjera una precipitación neta de una unidad en un tiempo unitario<sup>[7]</sup>, como por ejemplo 1 milímetro de lluvia en 1 hora.

Para la modelación de un Hidrograma Unitario, se consideran una serie de suposiciones:

- La precipitación efectiva produce la escorrentía directa.
- Existe una precipitación de intensidad constante con distribución uniforme sobre la cuenca mientras dure la tormenta.
- El tiempo base de los HED para precipitaciones efectivas de igual duración es constante.
- Las ordenadas de HED con igual tiempo base, son proporcionales a la cantidad de escorrentía directa representada por el hidrograma.
- Los hidrogramas obtenidos para una determinada cuenca representan todas las características físicas de ésta, y se asumen invariantes en el tiempo.

Con el registro de los datos de precipitación y caudal (escurrimiento) se puede calcular el HU de una cuenca (**ver figura 2.2**). Con el cálculo del Hidrograma Unitario se permite la predicción de crecidas futuras originadas por lluvias de diseño<sup>[9]</sup>.



**Figura 2.2:** Obtención de Hidrograma Escorrentía Directa. Las figuras muestran:

- Separación precipitación neta efectiva de la precipitación total.
- Creación del Hidrograma generado por la precipitación neta efectiva.
- Agrega el caudal base al Hidrograma generado.

Fuente: Departamento de Geología, Universidad de Salamanca, España

### 2.2.2. Hidrograma Unitario Sintético

Si la información para generar un Hidrograma Unitario de una cuenca no es suficiente o si bien, se desea estimar el caudal en una zona de la cuenca distinto al punto de medición, y sólo se cuenta con características generales de la cuenca, se recurre a los Hidrogramas Unitarios Sintéticos (HUS).

Existe una gran diversidad de HUS, estos varían según las características morfométricas específicas de la cuenca en estudio, a partir de hidrogramas adimensionales.

En la actualidad es posible encontrar numerosos estudios referentes a la modelación de HUS. En 1938 Snyder publicó una descripción de los parámetros del HU para cuencas en Los Apalaches, entregando relaciones para determinar cuencas con características similares a esta última. Basándose en este método, en Chile existen propuestas metodológicas para extender el registro de información de los HUS que se basan en la teoría de Snyder.

En el año 1974, en el país se realizaron estudios hidrológicos para encontrar la modelación de ecuaciones de trabajo que proporcionen los datos de caudales generados por una cuenca, bajo determinadas características de precipitación<sup>[10]</sup>. En ese año, se ajustaron los coeficientes del HUS de Snyder, a partir de características edafoclimáticas (parámetros de suelo y clima) de cuencas chilenas, ubicadas en la zona centro sur del país<sup>[11]</sup>. En 1985 Benítez y Arteaga realizan un estudio

## **CAPÍTULO 2: Hidrograma**

con el objetivo de verificar la veracidad de lo propuesto en 1974, donde se determinaron tres HU tras la recopilación de información fluviométricas, pluviométrica y fisiográfica de 34 cuencas controladas entre el valle de Aconcagua (Quinta Región) y el río Chamiza (Décima Región), siguiendo como base el procedimiento de Snyder<sup>[12]</sup>

### 3. CAPÍTULO 3: Percepción Remota

Una de las soluciones provistas por la tecnología, para contrarrestar la escasez de datos, consiste en el lanzamiento de más de 900 satélites que orbitan alrededor de la Tierra, lanzados por diferentes países. La UCS (*Union of Concerned Scientists*) Base de Datos Satelitales entrega un listado de todos ellos, la idea es crear una herramienta de investigación que recopile información de libre acceso sobre satélites operativos. De esta forma, los usuarios pueden: encontrar información sobre satélites concretos, buscarlos por tipo de misión o altitud, o averiguar cuántos satélites ha lanzado un país y para qué fines<sup>[13]</sup>.

#### 3.1. Información Satelital

En el año 1957 el Sputnik 1, fue el primer satélite artificial lanzado fuera de la atmósfera, a la fecha se han lanzado más de 6.000 satélites artificiales al espacio. Según el estudio de la UCS, el planeta tiene 957 satélites en órbita donde Estados Unidos lidera la operación de la carrera espacial, lo siguen Rusia y China<sup>[13]</sup>.

La información principal a analizar es captada por la misión satelital TRMM, corresponde a la unión entre la NASA y la JAXA (*Japan Aerospace Exploration Agency*), diseñada para monitorear el estudio de la lluvia tropical. TRMM 3B42v7 (*Tropical Rainfall Measuring Mission version 7*) está vigente desde su lanzamiento el 27 de Noviembre del año 1997, se lanzó desde el Centro Espacial Tanegashima en Japón. El satélite está implementado con instrumentos para medir precipitaciones críticas en la zona tropical y subtropical del planeta. El radar de precipitación o también llamado PR, puede observar a través de la columna de precipitación, donde provee nuevos acontecimientos en la estructura de la tormenta tropical y provee la magnitud de su intensidad. El TRMM también posee imágenes TMI (*TRMM Microwave Imager*) que miden la energía de microondas emitidas por la tierra, que se encuentran en la atmósfera, cuantificando así la cantidad de vapor de agua, las nubes y la intensidad de las lluvias. TRMM realiza mediciones de precipitaciones continuas y aporta datos de salida a predicciones de ciclones y eventos de precipitaciones extremas<sup>[14]</sup>.

### 3.2. Misión TRMM 3B42 v7

La misión principal del satélite meteorológico TRMM es dar información necesaria para poder combatir la amenaza latente de calor que envuelve a nuestro planeta, como por ejemplo, el aumento de dióxido de carbono de 280 ppm en el año 1750 a 393 ppm en el 2012<sup>[14]</sup>. Sumándose a la emisión del CO<sub>2</sub>, existen gases atmosféricos nocivos que gradualmente aumentan la temperatura ambiental. Cuando los rayos solares hacen contacto con la superficie de La Tierra, una parte de la energía es absorbida y el resto de la energía es reflejada por medio de ondas radioactivas fuera de la atmósfera, este fenómeno aumenta la temperatura superficial de nuestro planeta y se proyecta un incremento de entre 4 y 8°C en el promedio mundial de temperatura global. Una parte importante de la radiación es retenida por gases no naturales en la atmósfera, por lo tanto, el proceso se vuelve repetitivo, provocando el continuo aumentando la temperatura<sup>[15]</sup>.

### 3.3. Influencias meteorológicas

La circulación del aire en los trópicos es afectado por la condensación del vapor de agua, creando presiones bajas y altas según la expansión o constricción de los gases. Esta diferencia de presión modifica el patrón de las tormentas.

Cuando hay mayor circulación aérea en la atmósfera, la distribución del calor latente es más homogénea y la temperatura sería más fresca. Los factores más importantes que permiten el flujo del viento son la variación del ángulo de inclinación de los rayos solares que oscila entre el Ecuador y los polos, este ángulo incide en la radiación solar que depende de la orientación longitudinal del movimiento terrestre con respecto al Sol. El otro factor es la variación de temperatura entre los océanos y continentes, según los cambios de estaciones, los continentes reaccionan más rápido a la radiación solar con respecto a los océanos, por consiguiente, la variación de la radiación entre los polos y el Ecuador es afectado por zonas asimétricas específicas que acumulan el calor<sup>[14]</sup>.

Los informes del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (PICC) señalan que el calor latente afecta al ciclo hidrológico, se afirma que la superficie del planeta está cada vez más seca y el agua de los glaciares ha disminuido considerablemente. Estos informes advierten que en los próximos años se tendrán precipitaciones líquidas más intensas en zonas precordilleranas, en cambio, en zonas bajas y cálidas tenderán a disminuir (**ver figura 3.1**). Se tendrán mayores riesgos de sequías e inundaciones en áreas que antes no existían. Por lo tanto, el calentamiento global está directamente conectado con el estudio hidrológico, donde se debe tener en cuenta que los incrementos de temperatura hace que los ciclos hidrológicos sean inestables, por lo tanto es más complejo de estudiarlos<sup>[16]</sup>.

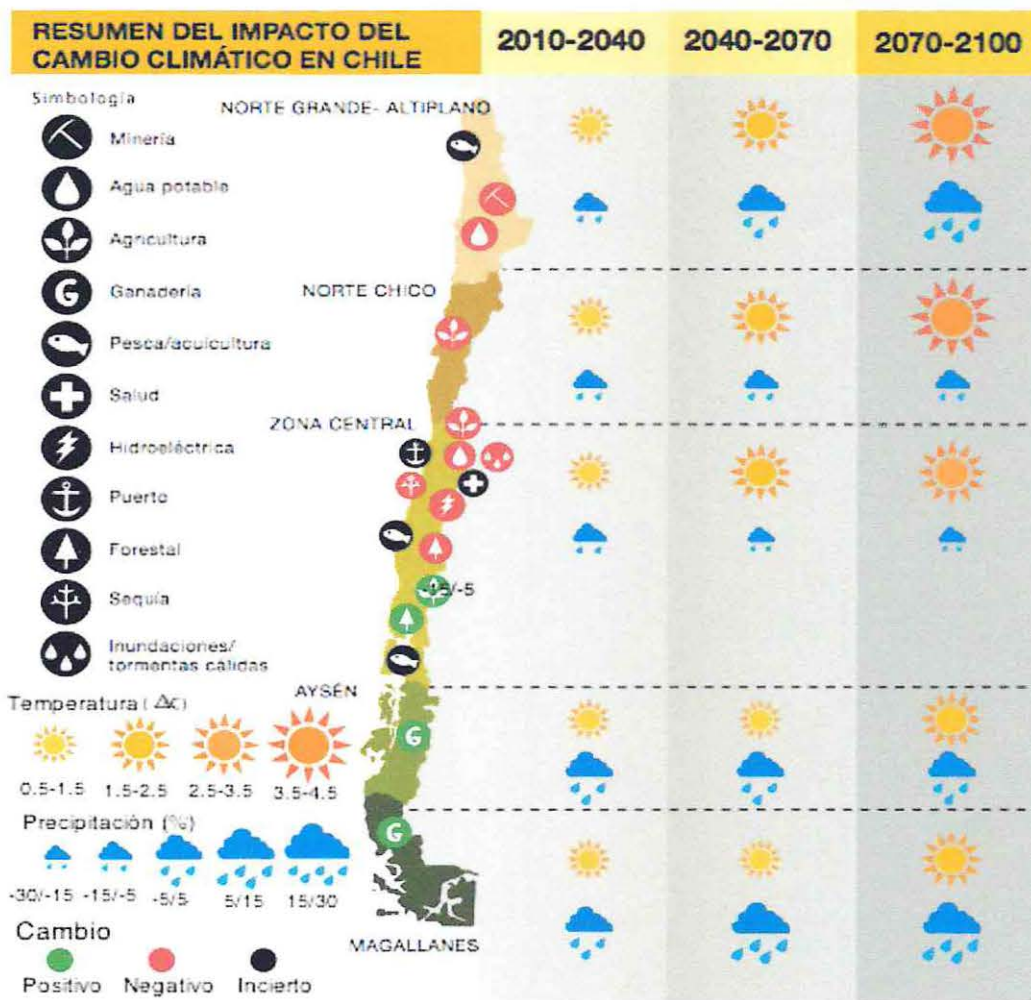


Figura 3.1: Efectos cambio climático en Chile. Fuente: CEPAL 2009.

### 3.4. Obtención de datos

Los datos son proporcionados por el satélite TRMM 3B42v7 (ver figura 3.2) que se encuentra orbitando alrededor del planeta a 403 km de altura, recorre el diámetro de La Tierra 16 veces diarias cada 92,5 minutos. El satélite está vigente desde el año 1997 y los datos obtenidos actuales tienen un periodo de desfase de 2 hasta 3 meses como máximo.

Las imágenes satelitales son obtenidas en la página web de la NASA, y vienen en formato NETCDF (lectura Raster). Los archivos de descarga de las precipitaciones, se pueden obtener como imágenes diarias o con intervalos de tiempo de cada 3 horas<sup>[17]</sup>.

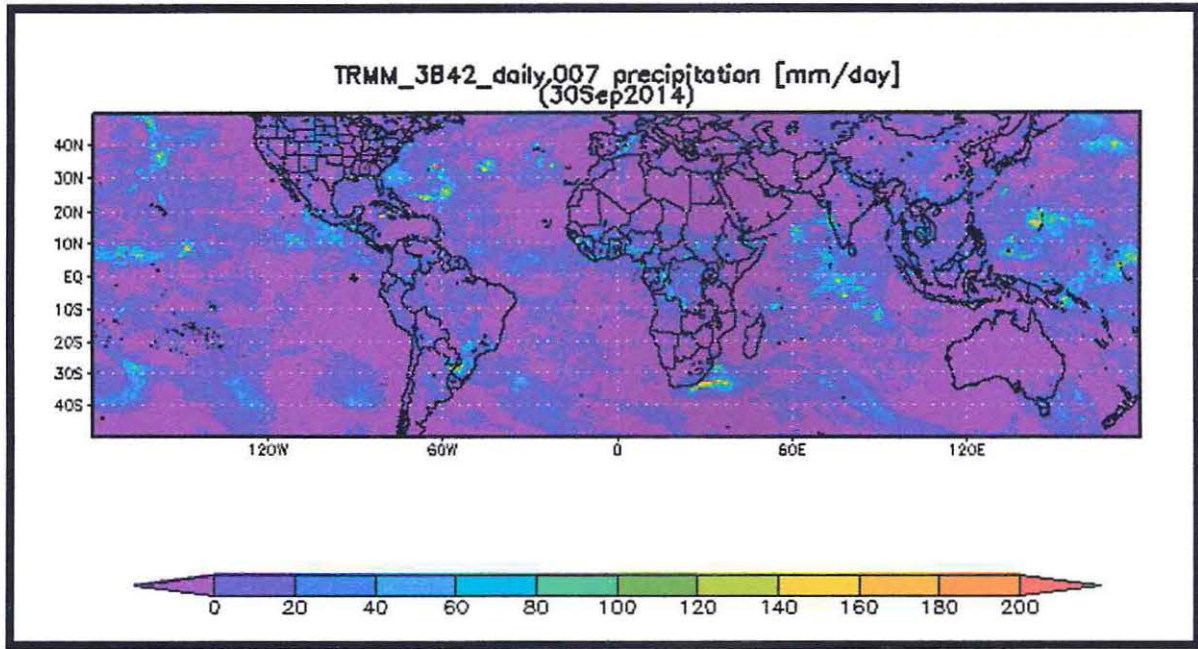


Figura 3.2: Capacidad TRMM. Fuente: NASA.

## 4. CAPÍTULO 4: Modelación Hidrológica

Uno de los aspectos importantes de los modelos, es la posibilidad de realizar simulación de procesos. Para lo antes mencionado se debe tener un completo conocimiento de las variables naturales de la cuenca, como geografía física, tipo de suelo o vegetación y por último la climatología del lugar. Los modelos simulados y la computación avanzada permiten recrear un cauce simulado para obtener los caudales punta de diseño.

Al realizar un modelo más detallado, se considerarán más variables para analizar, en consecuencia, los resultados serán cercanos a la realidad, accediendo a la capacidad de experimentar independientemente el proceso natural de cualquier evento de tormenta. La simulación permite realizar experimentos sin riesgos, alcanzando una completa independencia temporal, sin restricciones de tiempos de cálculos, y poder repetir el proceso las veces que el modelador considere necesarias, hasta obtener los resultados deseados.

Los modelos a utilizar pueden ser de tipo Explícito, donde se categorizan en Físicos Materiales y Matemáticos. Los modelos Matemáticos se dividen en Deterministas y Estocásticos.

En este estudio se utilizará un modelo Determinístico que es una clase de modelo Matemático cuya función principal consiste en hacer predicciones de forma correcta, exacta y definida de las cantidades, ya sea dentro de la distribución de probabilidades, como de alternativas [14]. El modelo no contiene ningún componente aleatorio, sino más bien: las variables, limitaciones y alternativas se encuentran dispuestas a aceptar las suposiciones previstas por el modelador en un programa computacional. El programa HEC-HMS realiza simulación de caudales, según los eventos de precipitación seleccionados por el usuario, estas simulaciones permiten la calibración de las variables definidas en los subcapítulos siguientes.

Las características topográficas de una cuenca determinan el cauce y sus afluentes. El DEM (*Digital Elevation Model*) contiene información suficiente para definir los parámetros necesarios y así caracterizar la cuenca físicamente, como la red de drenaje superficial y los límites de la cuenca geográfica que por cálculo de pendientes determina cuál es la cuenca englobada<sup>[18]</sup>. La determinación de la cuenca hidrográfica da pie para la obtención de los primeros parámetros físicos a estudiar, para su posterior implementación en los sistemas de modelación. Las otras variables se recopilan de los fenómenos meteorológicos de la zona.

### 4.1. Programa de Modelación HEC-HMS

El programa norteamericano HEC-HMS es un mejoramiento de su antecesor computacional HEC-1; es un programa sistemático donde tiene como finalidad central, la determinación de hidrogramas de crecidas sobre una cuenca. Trabaja con una serie de alternativas de modelación, las cuales están definidas tanto para las distintas situaciones físicas, como para su disponibilidad de información. Algunas principales características son: la optimización de parámetros del cauce, el Hidrograma Unitario, y la tasa de pérdida.

HEC-HMS está diseñado para simular procesos de escorrentía superficial, causadas por precipitaciones. El proceso de convertir la precipitación en escorrentía directa, puede ser modelado por el sistema para pequeñas cuencas, representando esos sistemas por medio de componentes como subcuencas, canales, controladores de agua y combinaciones de éstos<sup>[19]</sup>.

## **CAPÍTULO 4: Modelación Hidrológica**

Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System (HEC-HMS) contiene muchas mejoras sobre su predecesor en la parte gráfica y en la forma de diseñar los proyectos, a través de elementos prediseñados para la entrada de los datos y las salidas de sus resultados<sup>[20]</sup>. HEC-HMS trabaja con un sistema de modelación numérico-computacional, donde su metodología abarca diversos tipos de simulación de cuencas, ríos, y estructuras de retención o control de agua. El programa predice las etapas del flujo del caudal, según el tiempo de modelación. Los procesos naturales que estudia el programa para la simulación del caudal son:

- Precipitación y evapotranspiración de la cuenca
- Volumen de escorrentía
- Escorrentía directa, incluyendo el flujo sobre y bajo nivel.
- Flujo Base
- Flujo del cauce

La modelación de una cuenca se basa en separar el ciclo hidrológico en partes controlables; el flujo de la energía que provoca las partes del ciclo, puede ser representada con un modelo matemático, cada modelo es representado en distintas condiciones y ambientes. El área de estudio debe ser analizada, dependiendo los parámetros a utilizar, con el objetivo de encontrar los resultados más representativos de la zona.

## 5. CAPÍTULO 5: Análisis y Calibración de Imágenes Satelitales

El cruce de carreteras con cursos de agua plantea el problema del adecuado dimensionamiento de las obras ingenieriles, problema en el cual juega un papel decisivo la magnitud de los máximos caudales que cabe esperar que se presenten con una determinada frecuencia. La disyuntiva se origina cuando no se puede acceder a las magnitudes de las precipitaciones o caudales de diseño.

La DGA posee una red meteorológica con datos de libre acceso como: alturas instantáneas cada una hora, precipitaciones medias diarias y caudales instantáneos, estos factores son importantes para un estudio hidrológico, pero su cobertura espacial a lo largo del país, presenta ciertas deficiencias dejando zonas desprovistas de información. Por otra parte, la información registrada de las estaciones existentes muestra en algunos casos, vacíos prolongados o demora en la publicación de la información, lo cual dificulta su uso para estudiar el comportamiento del agua en el ambiente, por lo tanto, se hace necesario buscar alternativas.

La metodología que se presenta a continuación constará de tres etapas: calibración de datos, análisis y finalmente validación. Para la primera y segunda parte, será fundamental el uso de Quantum Gis 2.0.1<sup>[21]</sup>.

La calibración consiste en relacionar de forma lineal los datos reales con los de percepción remota, luego se analizarán y validarán para su uso posterior.

### 5.1. Generalidades

Para poder relacionar las precipitaciones, se debe realizar un análisis estadístico a ambos parámetros (precipitaciones DGA y precipitaciones satelitales). Para confeccionar el estudio, se da como referencia una imagen satelital, utilizando el perímetro cuadrado de un pixel que tiene medidas 0,25° latitud x 0,25° longitud<sup>[22]</sup>. englobando así, el área de estudio. Al seleccionar las estaciones meteorológicas, se deben considerar como mínimo tres estaciones representativas dentro del rango del pixel, lo achurado sería la zona a utilizar para la calibración, mientras que la zona con relleno simple se utilizará como validación.

Se seleccionan 32 eventos de tormentas para la primera y segunda etapa. Para la validación se hará una nueva selección con 12 eventos.

Cabe mencionar que existe una relación entre la lluvia caída y la altura geográfica del lugar, es decir, mientras mayor es la altura, más influencia tendrá en el estudio de la precipitación, por lo tanto esto se debe tener en cuenta en la parte del análisis<sup>[22]</sup>.

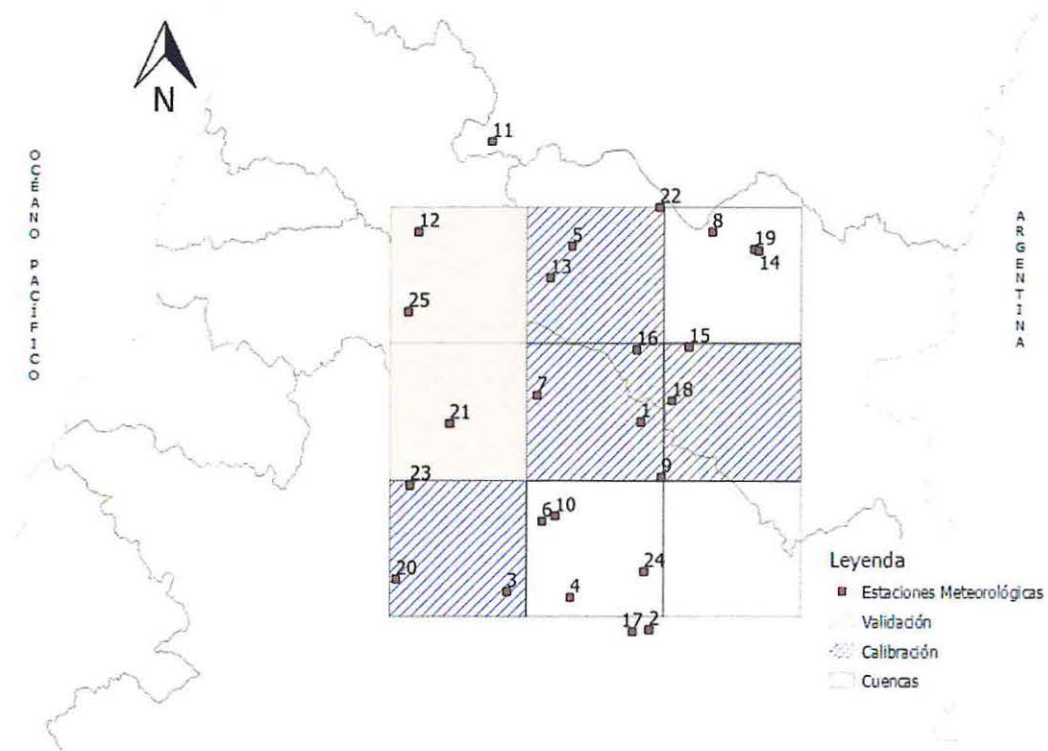


Figura 5.1: Zona de estudio para calibración de datos satelitales. Fuente propia.

## 5.2. Datos DGA

Con la obtención de las precipitaciones diarias y de los caudales, se dará como pie el uso del programa QGIS. Los dos parámetros son obtenidos de las estaciones meteorológicas y fluviométricas de la DGA, en su página web<sup>[23]</sup> se podrán descargar en formato Excel. Cuenta con motores de búsqueda según región, cuenca hidrográfica, nombre de estación y división administrativa.

Es necesario corroborar la existencia de estaciones meteorológicas con el mapa hidrológico disponible en la página. A continuación se tabulan las estaciones meteorológicas utilizadas para el estudio.

## CAPÍTULO 5: Análisis y Calibración de Imágenes Satelitales

<b>Id</b>	<b>Nombre Estación</b>	<b>Código BNA</b>	<b>UTM N</b>	<b>UTM E</b>	<b>Altitud (m)</b>
1	Aguas Frías (Las Trancas)	07371002-2	6089958	310016	560
2	Armerillo	07320002-4	6046881	311869	530
3	Colbún (Maule Sur)	07358008-0	6054765	282241	280
4	Colorado	07378003-9	6053566	295409	420
5	Curicó	07118003-4	6126392	295678	215
6	El Durazno	07376002-K	6069548	289494	275
7	El Guindo	07373003-1	6095517	288401	250
8	El Manzano	07104005-4	6129371	324900	574
9	Fundo el Radal	07370001-9	6078612	314319	685
10	Huapi	07374005-3	6070638	292201	250
11	La Candelaria	06036001-4	6148229	278885	213
12	La Palma	06130003-1	6129369	263621	120
13	Lontue	07119007-2	6119784	291136	215
14	Los Queñes	07103003-2	6125462	334570	668
15	Monte Oscuro	07116004-1	6105515	320029	645
16	Potrero Grande	07116005-K	6104610	308992	460
17	Río Maule en Armerillo	07321002-K	6046467	308431	470
18	Río Palos en Junta Colorado	07115001-1	6094333	316477	600
19	Río Teno Junta Colorado	07104002-K	6125790	333619	660
20	San Javier	07359005-1	6057345	259056	135
21	San Rafael	07373004-K	6089554	270212	136
22	Santa Susana	07106007-1	6134553	313854	410
23	Talca U.C.	07378002-0	6076996	261931	130
24	Vilches Altos	07374004-5	6058931	310749	1039
25	Villa Prat	07121003-0	6112743	261543	90

**Tabla 5.1:** Estaciones Meteorológicas DGA en la zona de estudio.

Las estaciones más representativas de la cuenca son Potrero Grande y Monte Oscuro. Esta última es la más importante de las dos, ya que se encuentra ubicada cerca del centro de gravedad de la cuenca.

Potrero Grande es la estación meteorológica más cercana a la salida de la cuenca, se encuentra en la coyuntura del Estero Upeo con el Estero Potrero Grande, ubicado en la Provincia y Comuna de Curicó. Tiene fecha de inicio de habilitación el día 31 de Marzo de 1967 y se encuentra actualmente vigente.

Para el registro de caudales, se tiene la Estación Fluviométrica Estero Upeo, que se ubica a un kilómetro al noreste de la Estación Potrero Grande. Estero Upeo, tiene fecha de inicio de actividad el 15 de Febrero de 1963 y se encuentra actualmente vigente.

**5.3. Calibración**

Se realizaron hidrogramas anuales con el caudal y la precipitación de una de las estaciones representativas (Monte Oscuro), los datos corresponden al periodo del año 1997 hasta el año 2013.

Para la calibración se seleccionan 32 eventos de duración entre dos y seis días, donde se consideran lluvias al azar con precipitaciones continuas y que formen hidrogramas aislados de una sola crecida. Se debe tomar en cuenta, que normalmente hay meses con estaciones de la DGA que no se encuentran vigentes, ya que están dañadas o en mantención, es recomendable evitar estos lapsos de tiempo para la selección de los eventos.

Ya elegidos los eventos, se descargan las precipitaciones medias diarias por estación, que deben abarcar la fecha de inicio y de término de cada tormenta. Además, es necesario verificar que no existan datos nulos entre cada tormenta, sin embargo, se permiten datos sin magnitud al principio o fin del evento.

Evento	Inicio	Término
Tormenta 1	19-may-03	22-may-03
Tormenta 2	18-jun-03	22-jun-03
Tormenta 3	03-jul-03	07-jul-03
Tormenta 4	02-ago-03	04-ago-03
Tormenta 5	01-sep-03	06-sep-03
Tormenta 6	19-jun-04	22-jun-04
Tormenta 7	03-sep-04	06-sep-04
Tormenta 8	10-oct-04	11-oct-04
Tormenta 9	03-may-05	05-may-05
Tormenta 10	06-jun-05	08-jun-05
Tormenta 11	22-may-06	25-may-06
Tormenta 12	11-jun-06	13-jun-06
Tormenta 13	15-jun-06	18-jun-06
Tormenta 14	22-jul-06	26-jul-06
Tormenta 15	29-may-07	31-may-07
Tormenta 16	12-jul-07	13-jul-07

Evento	Inicio	Término
Tormenta 17	19-jul-07	23-jul-07
Tormenta 18	12-jul-08	23-jul-08
Tormenta 19	25-ago-08	28-ago-08
Tormenta 20	01-sep-08	02-sep-08
Tormenta 21	10-may-09	13-may-09
Tormenta 22	17-ago-09	21-ago-09
Tormenta 23	20-oct-09	23-oct-09
Tormenta 24	04-jul-10	07-jul-10
Tormenta 25	15-jun-11	20-jun-11
Tormenta 26	27-jul-11	31-jul-11
Tormenta 27	14-ago-12	18-ago-12
Tormenta 28	20-ago-12	23-ago-12
Tormenta 29	17-dic-12	20-dic-12
Tormenta 30	01-may-13	03-may-13
Tormenta 31	26-jun-13	28-jun-13
Tormenta 32	01-jul-13	05-jul-13

**Tabla 5.2:** Selección de 32 eventos de tormentas para calibración.

La NASA provee información pluviométrica a través de sus imágenes satelitales, de igual forma se debe abarcar los días conformados por la tormentas de la tabla 5.2.

Para relacionar ambos parámetros, se obtendrá la precipitación media diaria por pixel. Con la ubicación geográfica de las estaciones se realiza una interpolación por cercanía con los Polígonos de Thiessen, ésta interpolación asigna una magnitud de peso que depende del área de influencia de cada estación generando una tendencia en el área poligonal que se intersecta con el perímetro de cada pixel de referencia, los pixeles se enumeran de 1 a 9

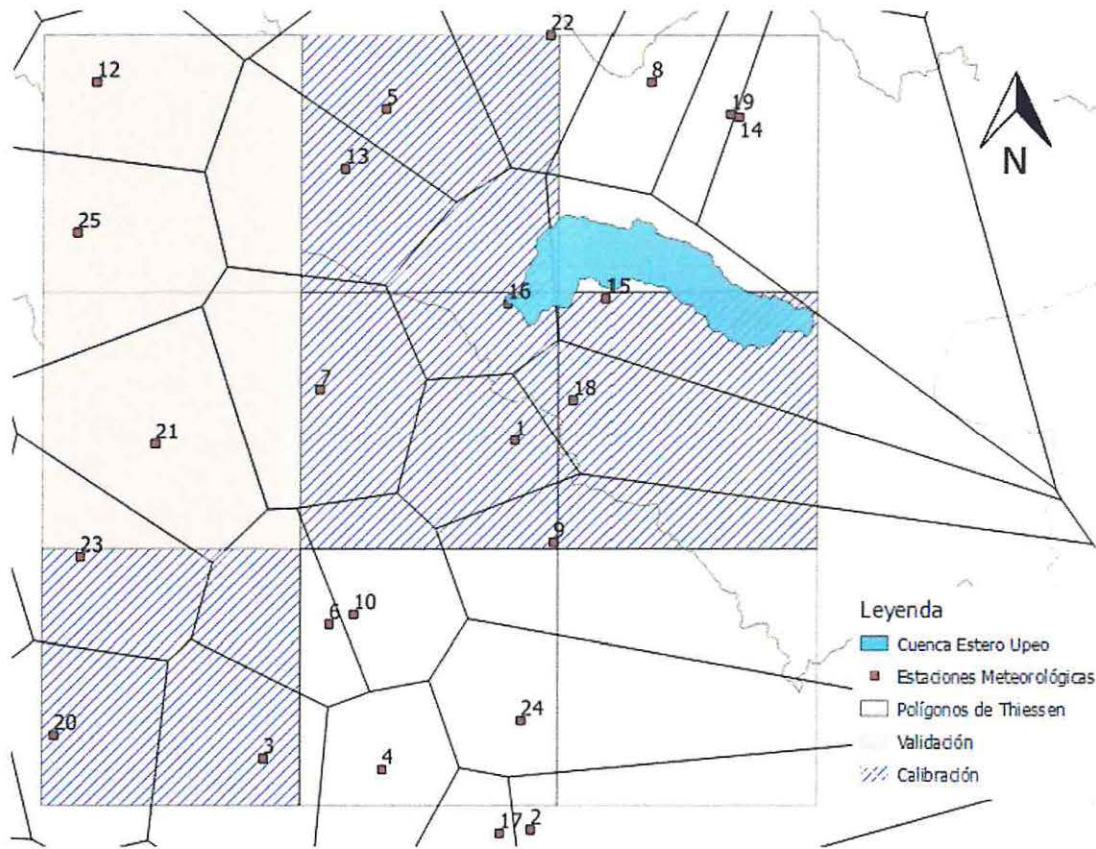


Figura 5.2: Polígonos de Thiessen y Cuenca Estero Upeo. Fuente propia.

La precipitación se pondera por el área de cada estación que quedó dentro del pixel, donde cada estación representa una magnitud de peso distinto. Se debe comprobar que la suma del área de los polígonos, debe ser igual al área del pixel. La siguiente relación expresa como obtener la Precipitación Media Observada (P.M.O) por pixel.

$$P_{ppixel} = \sum_{i=1}^n W_i * P_i \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:  $W_i$ : peso asignado a estación  $i$  en el pixel.

$P_i$ : precipitación DGA en estación  $i$ .

$n$ : número de estaciones consideradas por pixel.

Con esta ponderación se obtiene un valor único de precipitación por pixel, de cada uno de los 32 eventos, a continuación se confecciona una tabla con los P.M.O.<sup>[22]</sup>

## CAPÍTULO 5: Análisis y Calibración de Imágenes Satelitales

Evento	Inicio	Término	P.M.O. Pixel 5 (mm)	P.M.O. Pixel 6 (mm)	P.M.O. Pixel 7 (mm)	P.M.O. Pixel 8 (mm)
Tormenta 1	19-may-03	22-may-03	113,81	132,94	68,96	120,01
Tormenta 2	18-jun-03	22-jun-03	60,70	107,17	33,19	96,09
Tormenta 3	03-jul-03	07-jul-03	80,44	102,13	64,59	95,95
Tormenta 4	02-ago-03	04-ago-03	20,43	19,87	34,65	26,53
Tormenta 5	03-sep-03	06-sep-03	33,30	66,44	25,08	53,90
Tormenta 6	19-jun-04	22-jun-04	58,77	77,70	42,27	67,80
Tormenta 7	03-sep-04	06-sep-04	106,45	145,14	55,52	144,81
Tormenta 8	10-oct-04	11-oct-04	15,15	27,93	14,92	23,90
Tormenta 9	03-may-05	05-may-05	57,47	69,21	27,17	60,65
Tormenta 10	06-jun-05	08-jun-05	46,90	68,30	39,47	72,74
Tormenta 11	22-may-06	25-may-06	56,39	68,64	45,35	91,63
Tormenta 12	11-jun-06	13-jun-06	49,52	54,58	24,46	63,36
Tormenta 13	15-jun-06	18-jun-06	31,48	37,40	17,55	37,02
Tormenta 14	23-jul-06	26-jul-06	66,48	73,29	73,76	100,82
Tormenta 15	29-may-07	31-may-07	36,21	50,09	16,76	43,71
Tormenta 16	12-jul-07	13-jul-07	54,85	49,13	53,68	75,17
Tormenta 17	19-jul-07	23-jul-07	65,50	100,91	76,33	101,96
Tormenta 18	20-jul-08	23-jul-08	31,02	49,98	31,08	38,37
Tormenta 19	25-ago-08	28-ago-08	58,58	90,79	32,19	86,81
Tormenta 20	01-sep-08	02-sep-08	28,99	30,34	39,12	38,26
Tormenta 21	10-may-09	13-may-09	98,20	150,47	62,46	147,66
Tormenta 22	17-ago-09	21-ago-09	41,46	47,37	46,61	64,75
Tormenta 23	20-oct-09	23-oct-09	29,46	46,94	19,03	51,97
Tormenta 24	04-jul-10	07-jul-10	81,54	143,63	67,95	110,48
Tormenta 25	15-jun-11	20-jun-11	61,76	62,82	81,64	81,12
Tormenta 26	27-jul-11	31-jul-11	23,66	59,08	7,79	40,27
Tormenta 27	14-ago-12	18-ago-12	38,80	49,44	29,15	58,68
Tormenta 28	20-ago-12	23-ago-12	33,70	42,03	31,41	61,01
Tormenta 29	17-dic-12	20-dic-12	71,19	109,68	42,38	113,79
Tormenta 30	01-may-13	03-may-13	34,72	38,11	34,32	52,14
Tormenta 31	26-jun-13	28-jun-13	67,88	91,85	83,20	109,31
Tormenta 32	01-jul-13	05-jul-13	146,96	198,47	112,29	181,14

**Tabla 5.3:** Precipitaciones Medias Observadas por Pixel.

Luego de la obtención de la magnitud de la Precipitación Media Observada por pixel, se realiza la obtención de las Precipitaciones Medias Satelitales (P.M.S). Las imágenes satelitales son analizadas en el programa QGIS, donde se suma cada imagen diaria comprendiendo la totalidad del evento, en el cual, también se obtiene un valor único por pixel. Se tabulan los resultados en la siguiente lista.

## CAPÍTULO 5: Análisis y Calibración de Imágenes Satelitales

Evento	Inicio	Término	P.M.S. Pixel 5 (mm)	P.M.S. Pixel 6 (mm)	P.M.S. Pixel 7 (mm)	P.M.S. Pixel 8 (mm)
Tormenta 1	19-may-03	22-may-03	51,35	47,16	78,93	55,26
Tormenta 2	18-jun-03	22-jun-03	36,44	58,00	26,55	70,13
Tormenta 3	03-jul-03	07-jul-03	90,33	34,48	109,01	86,82
Tormenta 4	02-ago-03	04-ago-03	11,68	8,15	17,78	6,38
Tormenta 5	03-sep-03	06-sep-03	16,78	12,71	15,51	14,43
Tormenta 6	19-jun-04	22-jun-04	31,28	75,57	13,95	30,16
Tormenta 7	03-sep-04	06-sep-04	32,70	32,30	30,20	43,73
Tormenta 8	10-oct-04	11-oct-04	14,88	4,12	2,29	13,21
Tormenta 9	03-may-05	05-may-05	63,83	45,82	71,57	35,97
Tormenta 10	06-jun-05	08-jun-05	16,99	18,75	30,37	24,63
Tormenta 11	22-may-06	25-may-06	83,24	93,70	54,44	72,90
Tormenta 12	11-jun-06	13-jun-06	40,77	37,59	30,78	58,62
Tormenta 13	15-jun-06	18-jun-06	18,58	22,23	7,62	21,04
Tormenta 14	23-jul-06	26-jul-06	45,25	20,90	71,76	54,56
Tormenta 15	29-may-07	31-may-07	34,15	30,79	18,87	21,64
Tormenta 16	12-jul-07	13-jul-07	21,50	31,05	69,82	24,98
Tormenta 17	19-jul-07	23-jul-07	68,33	17,10	29,56	36,43
Tormenta 18	20-jul-08	23-jul-08	62,81	42,95	93,55	78,03
Tormenta 19	25-ago-08	28-ago-08	13,14	19,38	51,00	27,75
Tormenta 20	01-sep-08	02-sep-08	9,13	3,73	10,00	21,68
Tormenta 21	10-may-09	13-may-09	112,14	96,21	75,69	109,17
Tormenta 22	17-ago-09	21-ago-09	37,30	30,29	75,51	48,86
Tormenta 23	20-oct-09	23-oct-09	40,77	29,62	28,60	40,92
Tormenta 24	04-jul-10	07-jul-10	63,90	77,75	59,83	94,65
Tormenta 25	15-jun-11	20-jun-11	79,04	29,94	107,34	47,18
Tormenta 26	27-jul-11	31-jul-11	34,21	13,76	4,68	46,31
Tormenta 27	14-ago-12	18-ago-12	52,00	49,33	44,15	47,21
Tormenta 28	20-ago-12	23-ago-12	42,94	11,56	13,68	50,70
Tormenta 29	17-dic-12	20-dic-12	51,80	44,51	48,96	67,69
Tormenta 30	01-may-13	03-may-13	67,03	69,08	84,76	73,42
Tormenta 31	26-jun-13	28-jun-13	57,38	65,08	79,06	75,34
Tormenta 32	01-jul-13	05-jul-13	179,91	116,78	102,40	182,87

**Tabla 5.4:** Precipitaciones Medias Satelitales por Pixel

Se realiza un ajuste lineal entre una variable dependiente Y, con una variable independiente X más un término aleatorio B. Este modelo permite relacionar de forma lineal los datos de las estaciones meteorológicas con alguna característica de la zona y aplicarla a las imágenes satelitales. Como término aleatorio se considera el intercepto de la relación.

Con la generación de la regresión lineal, se obtienen cuatro relaciones para complementarlas con la altura media de cada pixel ( $H_{\text{pixel}}$ ) e integrar el intercepto ( $B_{\text{pixel}}$ ) de los gráficos. Con la calibración de los pixeles analizados, se obtuvo una correlación de  $R^2=0,7066$  como valor mínimo. En los siguientes gráficos se ejemplifica la comparación de las variables.

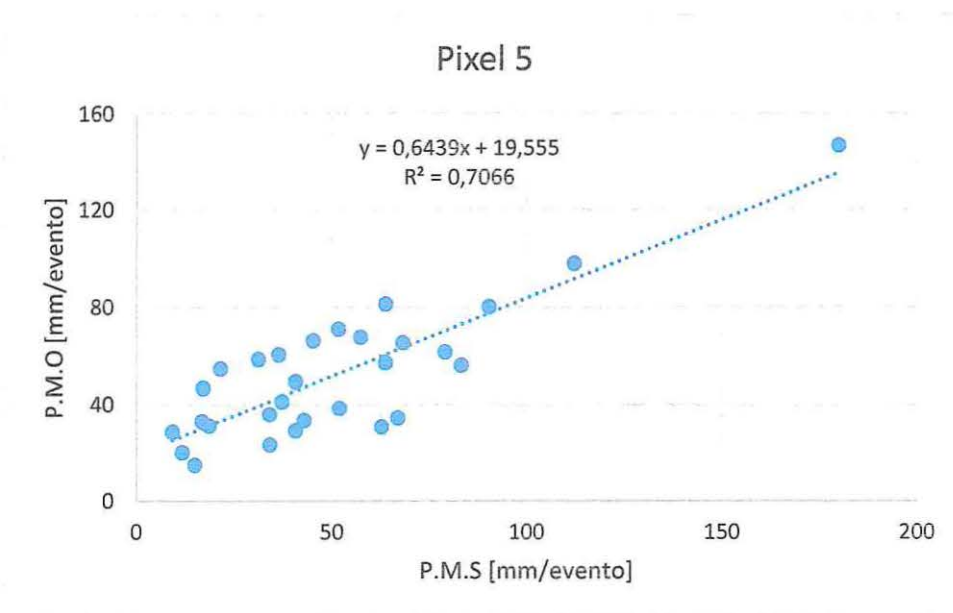


Figura 5.3: Relación Lineal Pixel 5

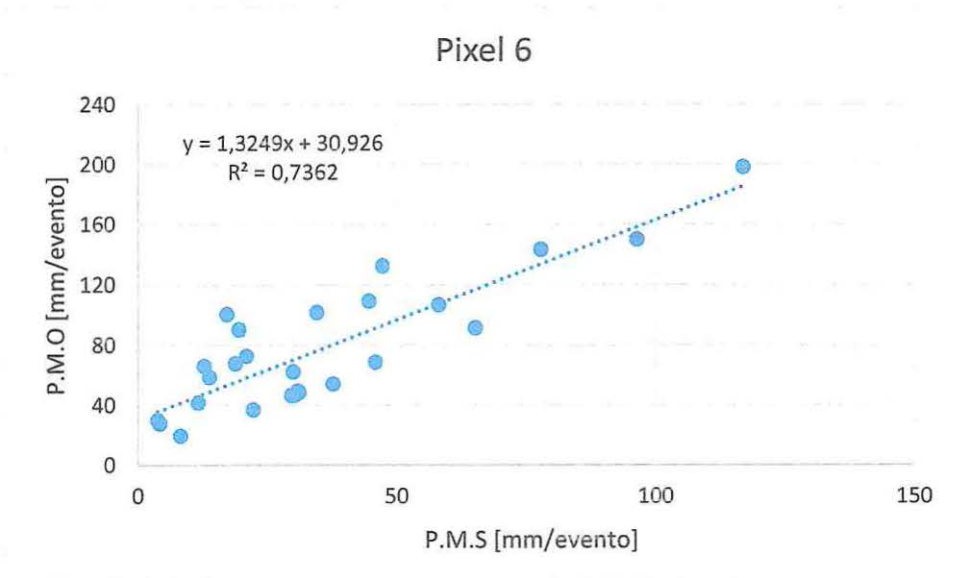
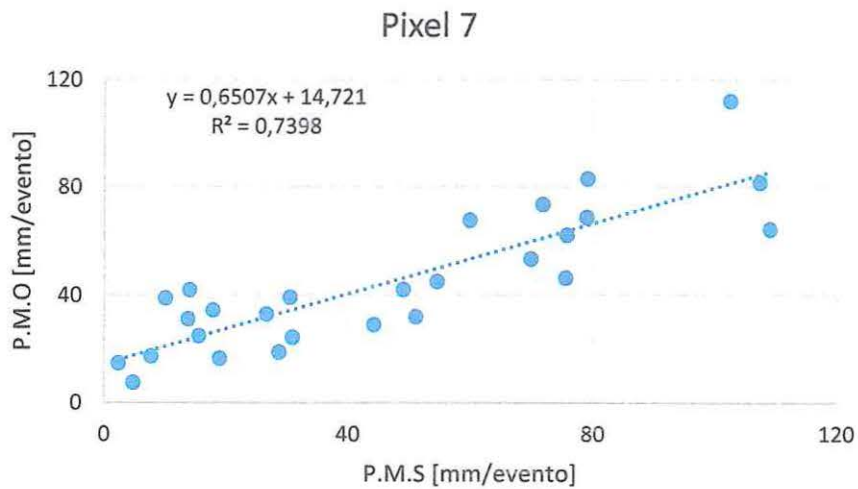
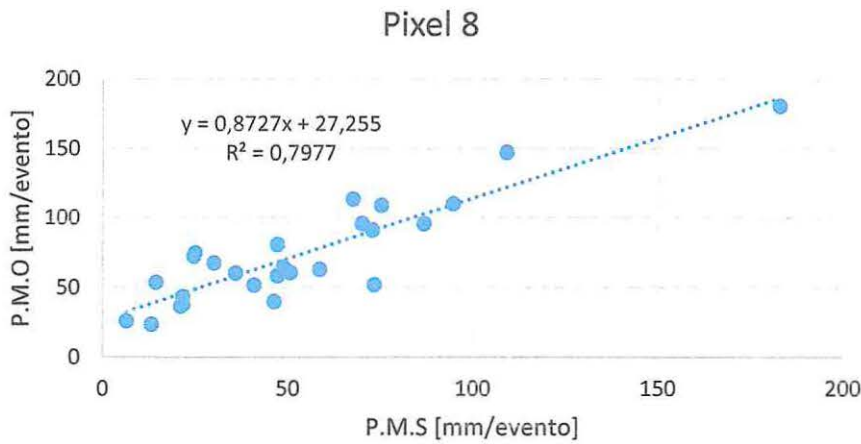


Figura 5.4: Relación Lineal Pixel 6



**Figura 5.5:** Relación Lineal Pixel 7



**Figura 5.6:** Relación Lineal Pixel 8

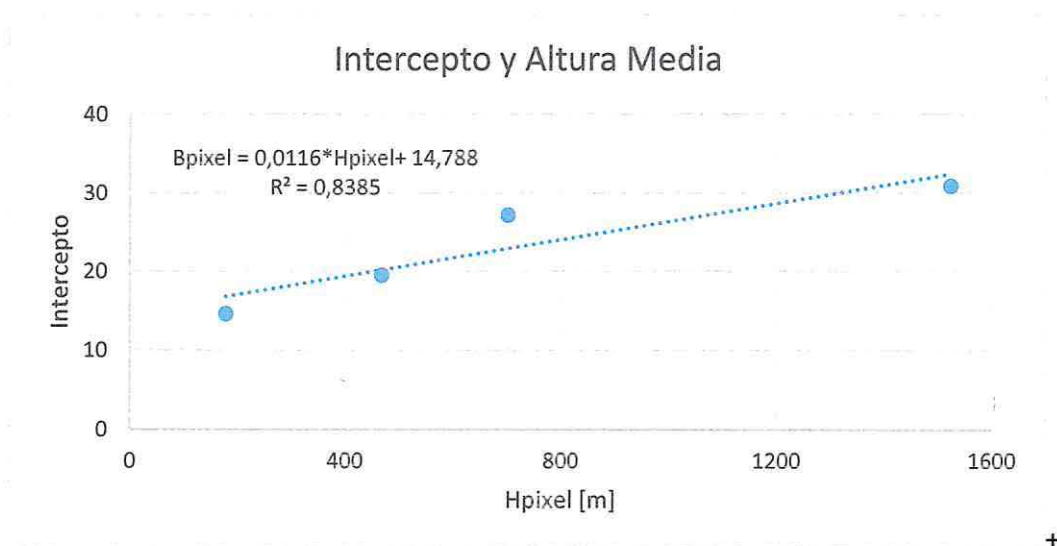
Se genera la siguiente tabla para su uso en la validación de los datos.

<b>Relación Pixel</b>	<b>Hpixel</b>	<b>Intercepto</b>
$y = 0,6439x + 19,56$	466,78	19,56
$y = 1,3249x + 30,93$	1523,28	30,93
$y = 0,6507x + 14,72$	177,69	14,72
$y = 0,8727x + 27,26$	701,47	27,26

**Tabla 5.5:** Resultados por pixel, Altura Media e Intercepto por pixel.

## CAPÍTULO 5: Análisis y Calibración de Imágenes Satelitales

Finalmente se analizan linealmente los valores Hpixel y Bpixel obteniendo la relación final.



**Figura 5.7:** Relación Final de Calibración

### 5.4. Validación

La validación consiste en aplicar el resultado obtenido en la calibración. En el cual se eligieron 12 tormentas con las mismas características explicadas en la calibración. Los resultados de la tabla 5.5 nos da un valor de pendiente media igual a 0,87305.

Se utiliza la regresión lineal de la figura 5.9  $B_{\text{pixel}} = 0,0116 * H_{\text{pixel}} + 14,788$ , para poder obtener el valor de los interceptos de cada pixel. A la relación se introduce como variable "X" la altura media de cada uno de los nueve pixeles, obteniéndose así un intercepto para cada pixel respectivamente.

Pixel	Hpixel	Intercepto
1	264,19	17,85
2	312,56	18,41
3	1075,65	27,26
4	186,91	16,96
5	466,78	20,20
6	1523,28	32,46
7	177,69	16,85
8	701,47	22,93
9	1965,01	37,58

**Tabla 5.6:** Resultados Altura Media Pixel e Intercepto para Validación.

## CAPÍTULO 5: Análisis y Calibración de Imágenes Satelitales

Entonces con los interceptos obtenidos por pixel, además de la pendiente media, se utiliza la relación lineal  $P.M.S. = 0,87305 * P_{pixel} + B_{pixel}$  y se obtienen los nuevos datos de P.M.S. validadas. Consiguiendo como resultado una correlación de  $R^2=0,8577$ , lo cual se encuentra aceptable para continuar con la modelación de la cuenca.

Tormenta	Inicio	Término	P.M.S.	P.M.O.
Tormenta 1	07-jul-01	08-jul-01	46,27	66,29
Tormenta 2	10-jul-01	13-jul-01	91,79	95,06
Tormenta 3	16-jul-01	20-jul-01	111,5	177,22
Tormenta 4	28-jul-01	31-jul-01	86,49	90,97
Tormenta 5	24-ago-01	29-ago-01	168,38	237,34
Tormenta 6	12-mar-02	15-mar-02	87,39	148,84
Tormenta 7	05-ago-02	08-ago-02	132,25	205,28
Tormenta 8	22-ago-02	25-ago-02	131,52	159,57
Tormenta 9	26-ago-02	28-ago-02	47,18	44,05
Tormenta 10	08-jun-04	09-jun-04	51,66	98,93
Tormenta 11	12-jul-04	13-jul-04	77,57	82,47
Tormenta 12	01-ago-04	04-ago-04	58,39	69,30

Tabla 5.7: Resultados P.M.O. y P.M.S. Validados.

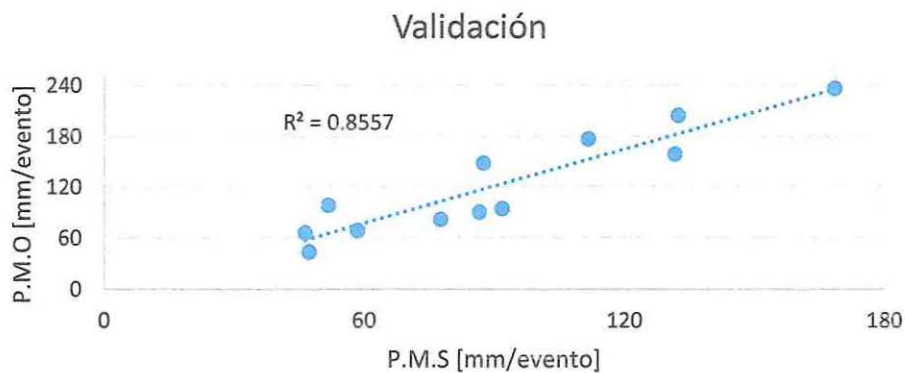


Figura 5.8: Correlación de Validación P.M.O. y P.M.S.

## 6. CAPÍTULO 6: Modelación de crecidas del Estero Upeo.

Una ventaja de los modelos de simulación es su comprensión y organización de datos requeridos como entrada para satisfacer los algoritmos matemáticos, que comprenden en conjunto el modelo del sistema. La limitación de los modelos de simulación, es la incapacidad para calibrarse correctamente y verificar aplicaciones en las cuales los datos de entrada son faltantes. La exactitud del modelo es mayoritariamente determinada por los datos de entrada y las observaciones disponibles de salida<sup>[20]</sup>.

Los Modelos de Simulación Integrada, son aquellos en los cuales los parámetros del modelo no varían espacialmente en la cuenca, por esto, la respuesta de la cuenca es evaluada sólo en la salida<sup>[19]</sup>. Un típico ejemplo de un modelo de parámetro integrado, es el Hidrograma Unitario. Los modelos de simulación distribuida, son por su parte aquellos que permiten que sus parámetros varíen espacialmente en la cuenca. Esto habilita el cálculo no sólo para todas las respuestas de las subcuencas, sino también para la respuesta de las subcuencas individuales.

Como el modelo Distribuido trabaja con un alto nivel de detalle en las simulaciones, ésta se logra de mejor manera con un programa computacional, permitiendo así el modelado de características especiales, tales como lluvias y abstracciones hidrológicas espacialmente variables. Sin embargo, para llevar los datos resultantes del modelo Distribuido a los resultados óptimos que se buscan, la calidad y cantidad de datos disponibles, deben ser correspondientes al incremento en el nivel de los detalles de la cuenca.

Los conceptos de modelos Integrados y Distribuidos, aunque opuestos en significado, no son necesariamente excluyentes entre sí, ya que los modelos Integrados de cuenca, pueden ser usados como componentes de grandes modelos Distribuidos de hoyas hidrográficas.

En el estudio de cauces torrenciales, y en general en casi todos los estudios hidrológicos, el cálculo de caudales máximos se afronta con una importante escasez de datos meteorológicos. En estos casos lo habitual es que no se disponga de datos de precipitaciones y escorrentía, lo cual ha llevado a obtener relaciones entre características fácilmente medibles en las cuencas y unos coeficientes que permitan estimar el Hidrograma Unitario<sup>[24]</sup>.

El estudio principal se enfoca en el Estero Upeo en Upeo, donde se debe simular su cauce en el programa HEC-HMS, éste fue diseñado para ser aplicado en distintos tipos de áreas geográficas con el objetivo de resolver problemas asociados al lugar de estudio, como por ejemplo, los inconvenientes que pueden afectar las grandes crecidas en una construcción.

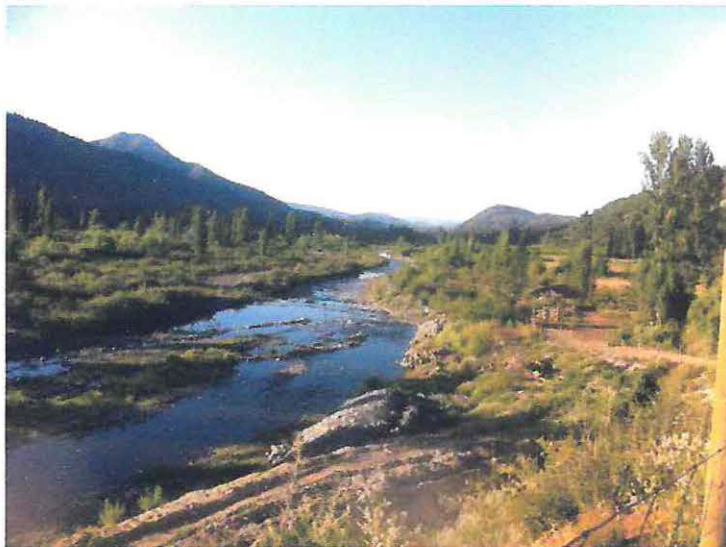
La información que entrega la aplicación depende del comportamiento de la cuenca donde se puede incluir los parámetros de escorrentía y caudales máximos en tiempos determinados.

## CAPÍTULO 6: Modelación de crecidas del Estero Upeo.

### 6.1. Área de Estudio

El estudio es realizado en la VII Región del Maule, Chile. Limita al norte con la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, al sur con la Región del Biobío, al este con la República de Argentina y al oeste con el Océano Pacífico. El nombre de la región proviene del río Maule, cuya cuenca ocupa gran parte de la superficie regional. Esta se compone por las provincias de Cauquenes, Curicó, Linares y Talca, esta última es la capital de la zona de estudio.

El cauce es un estero precordillerano con coordenadas geográficas latitud:  $-35^{\circ}00'00''$  /  $-35^{\circ}15'00''$ ; longitud:  $-70^{\circ}45'00''$  /  $-71^{\circ}00'00''$  según el IGM (Instituto Geográfico Militar). El estero es de origen pluvial. Llegando a la desembocadura predomina un cauce abierto y tranquilo, aguas arriba existe un cauce más cerrado con aguas rápidas.



**Figura 6.1:** Sección Baja Upeo. Fuente: Google Earth.

Según al relieve de la zona, da variaciones que definen climas locales. Al oriente de los cordones montañosos se observa poca precipitación y nubosidad, mientras tanto, en las bases montañosas occidentales aumentan las formaciones de nubosidad y las lluvias.

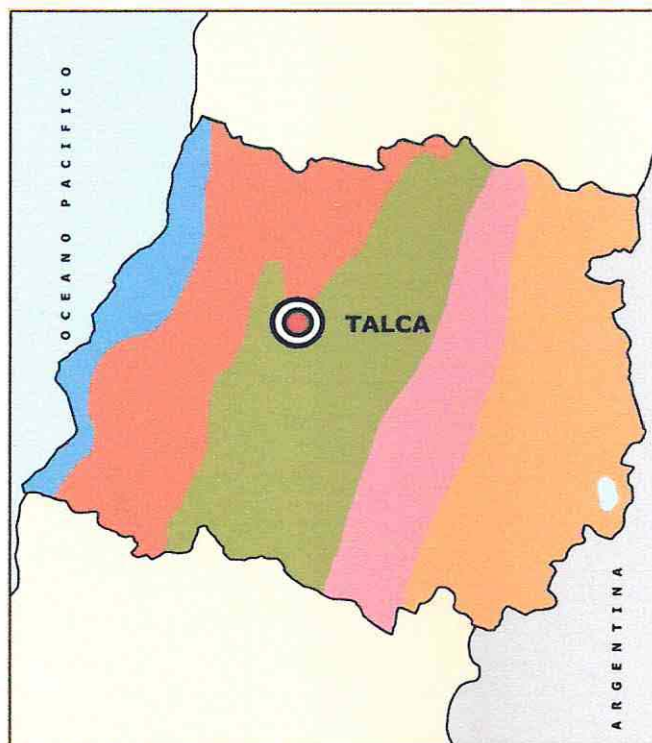
#### 6.1.1. Geomorfología

La presencia de la Cordillera de los Andes ejerce un efecto regulador en los caudales superficiales, ya que retiene las precipitaciones de invierno que caen en forma de nieve, para entregarlas posteriormente durante la primavera y verano, donde el calor produce el derretimiento que escurre por los cauces naturales. Esta característica hace que el régimen de los ríos, cuyo curso se desarrolla entre los contrafuertes cordilleranos presente un escurrimiento de tipo nival (derretimiento proveniente de nieve). A medida que se avanza al Valle Central, este acto hidrológico se va atenuando por la influencia de las precipitaciones líquidas, dando escurrimientos de tipo mixto, en que el componente pluvial va igualando o excediendo al componente nival. Acercándose a la

## CAPÍTULO 6: Modelación de crecidas del Estero Upeo.

Cordillera de la Costa, el régimen del escurrimiento es de tipo pluvial, siguiendo la variación estacional de las precipitaciones.

La región del Maule, consta con cinco divisiones geográficas de este a oeste, comunes de la zona central: Cordillera de los Andes, Precordillera, Depresión Intermedia o Valle Central, Cordillera de la Costa y Planicies Litorales. De todas las divisiones morfológicas, sólo la depresión intermedia presenta interés desde el punto de vista hidrogeológico, por estar compuesta de sedimentos modernos (permeables), mientras las otras unidades están conformadas en roca fundamental impermeable.



**Figura 6.2:** (de Izquierda a Derecha) Planicies Litorales, Cordillera de la Costa, Depresión Intermedia, Precordillera y Cordillera de los Andes. Fuente: Educar Chile, Ministerio de Educación.

La Cordillera de los Andes representa las mayores alturas de la cuenca, por lo tanto, es el factor fundamental que aporta con los ríos más importantes que pasan por la zona, presenta una suave pendiente hacia el oeste y se encuentra fragmentada por cursos de agua de valles profundos, producto de la erosión glacial.

La zona Precordillerana es una sección montañosa que se ubica al poniente de la Cordillera Principal, también cuenta con una pendiente suave hacia el oeste. Los materiales de depósitos dominantes son las morrenas (material glacial no estratificado), acarreo fluvial y glacio-fluvial, además consta con rocas sedimentarias y volcánicas, de origen continental.

## **CAPÍTULO 6: Modelación de crecidas del Estero Upeo.**

La Depresión Intermedia se ubica entre la Precordillera y la Cordillera de la Costa, corresponde a una fosa tectónica limitada, con capas superpuestas de norte a sur, la que ha sido paulatinamente rellena con los productos de la erosión y acarreo que han producido los glaciales, los ríos y el viento. Tiene una suave pendiente de este a oeste, con algunos cerros aislados que quiebran su monotonía. El valle es una de las divisiones más importantes para: la manutención humana, el sustento individual o grupal de las personas, actividad ganadera, industrial y de agricultura, estos son los rubros más solicitados en esta zona y de gran importancia para las ciudades cercanas

La Cordillera de la Costa cumple una función de barrera con la brisa marina, durante el día el movimiento de la brisa se dirige al interior, introduciéndose por los valles. Además, se conoce que las aguas oceánicas son reguladores térmicos, pero especialmente en este sector el océano es bastante frío debido a la corriente de Humboldt y a la nubosidad que está frecuentemente asociada al anticiclón subtropical.

### **6.1.2. Condición Climática**

La región de estudio está sometida a dos regímenes circulatorios muy distintos en las estaciones de frío y de calor. En verano existe un periodo seco de seis meses, con al menos dos meses sin precipitaciones, esto se origina por el desplazamiento hacia el sur del anticiclón del Pacífico subtropical que trae consigo condiciones de tiempo estables y asoleadas, sólo interrumpidas por incursiones frontales muy ocasionales. Durante el invierno, el anticiclón se traslada hacia el norte e influye en la baja presión que se desplaza hacia el este, por lo tanto acarrearán vientos oestes en conjunto con las nubes, las presiones traen tiempo variable y frecuentes precipitaciones debido a los sistemas frontales asociados. Las depresiones trae consigo las lluvias en el sector bajo y nieve en el sector andino. Durante el invierno, es predominante que en Abril se presente un aumento de las precipitaciones en el Litoral, Valle Central y Cordillera, las precipitaciones se apaciguan en el principio de la primavera.

El clima de la región es templado, con variaciones térmicas moderadas, aunque mejor definidas en lugares protegidos de la influencia marina. El régimen hídrico presenta déficit de lluvias en el periodo estival del año y excesos en las estaciones restantes. El relieve define climas locales que modifican estos rasgos generales.

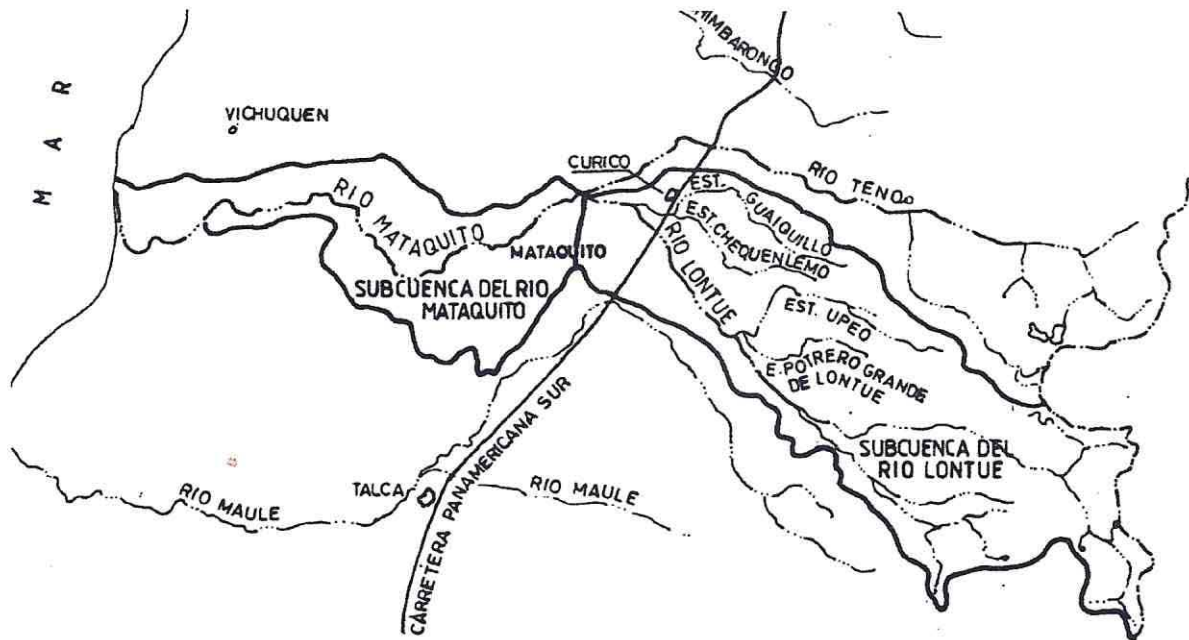
Las características climáticas de una región determinan las actividades agrícolas a realizar, para poder lograr la rentabilidad máxima de los cultivos, definiendo intervalos óptimos y marginales, tales como déficit o exceso hídrico, intervalos de temperatura y presencia de temperaturas bajas o heladas.

### **6.1.3. Hidrografía**

Los mayores caudales ocurren entre mayo y julio, producidos por lluvias invernales. En el caso de años secos, los caudales se presentan de manera más uniforme a lo largo del año, con leves aumentos entre julio y noviembre, y con menores caudales entre enero y mayo.

El afluente del Estero Upeo junto con estero Potrero Grande, desembocan en la coyuntura de los ríos Lontue y Colorado. La hoya hidrográfica que aporta al Estero Upeo esta principalmente relacionada con el Cerro Auquel, que limita al este con la provincia de Molina, al Norte se encuentran las zonas rurales El Naranjo, al noreste con los Alto del Cachu y al sur con Cerro Colorado.

## CAPÍTULO 6: Modelación de crecidas del Estero Upeo.



**Figura 6.3:** Afluentes del Río Mataquito. Fuente: *Catastro de usuarios de aguas de los ríos Lontue y Mataquito VII Región*, Dirección General de Aguas.

El estero es recargado por aguas subterráneas, el acuífero transita paralelamente al cauce por un material no consolidado de relleno. La geología está compuesta por depósitos no robustecidos, relleno por materiales aluviales y coluviales, debido a esto tiene una alta permeabilidad<sup>[25]</sup>.

El cauce es subcuenca del Río Mataquito, segunda cuenca más grande de la región del Maule. Estero Upeo consta con una cuenca hidrográfica de 206,085 kilómetros<sup>2</sup>, con un largo de cauce principal de 43,235 kilómetros de longitud con cotas mínimas y máximas de 459 metros y 2405 metros respectivamente. El estero también está compuesto por 17 tramos y 15 afluentes (tablas 6.1 y 6.2) de pequeño desarrollo que sirven de riego a 150 usuarios, los canales cubren un área de riego de 367,87 hectáreas entre 53 regantes<sup>[4]</sup>. Cada tramo está alterado artificialmente para el abastecimiento de tierras agrícolas.

Tramos de Estero Upeo:	Usuarios
1.- Ramos de Upeo	1
2.- Corvalán	1
3.- Morales	1
4.- La Mula	1
5.- Ignacio Bustamante	1
6.- El Cerro de Upeo	37
7.- El Molino de Upeo	38
8.- El Ciruelo	10

Afluentes de Estero Upeo:	Usuarios
1.- Quebrada El Manzano	1
2.- Quebrada El Ciprés	2
3.- Quebrada La Erita	1
4.- Quebrada Salto de Agua	1
5.- Quebrada Ojo de Agua	1
6.- Quebrada del Deslinde	1
7.- Quebrada Barbarán	10
8.- Quebrada Grande	11

## CAPÍTULO 6: Modelación de crecidas del Estero Upeo.

9.- El Molina del Bajo	19
10.- Tricahue	5
11.- El Membrillo	3
12.- Lo Vásquez	13
13.- Ña Quiñacha	3
14.- Castro	4
15.- Velásquez	5
16.- Los Lingues	5
17.- Los Helechos	3
<b>Total</b>	<b>150</b>

9.- Quebrada El Colo	5
10.- Las Mesillas	1
11.- Quebrada El Monte	1
12.- El Ojo	6
13.- Quebrada Araya	10
14.- La Vertiente Rojas	1
15.- Quebrada San Antonio	1
<b>Total</b>	<b>53</b>

Tabla 6.1 (izquierda) y Tabla 6.2 (derecha): Tramos y Afluentes Estero Upeo <sup>[25]</sup>.

### 6.1.4. Temperatura y humedad relativa

Es remarcable la oscilación térmica diaria en los meses de verano en el Valle Central, se origina una escasa nubosidad que permite intensos procesos radiactivos. Las temperaturas máximas medias del verano alcanzan a 29°C en el Valle Central y a 24°C en el Litoral, mientras que la temperatura mínima media del invierno desciende a 2°C en el interior y a 5°C en la costa. Si se considera la Cordillera Andina, estos valores se atenúan para la primera variable, en cambio para la segunda se hacen más extremos. Acercándose a la costa la influencia oceánica hace disminuir las temperaturas y hacia la cordillera la altitud produce también un descenso<sup>[15]</sup>.

La humedad promedio presenta valores medios anuales, con una variación marcada en el sentido Oeste-Este, acompañado de un leve ascenso de Norte a Sur. El litoral observa una humedad entre 75% - 80%. En el valle central, los valores suben a algo más de 75% descendiendo a magnitudes inferiores a 50% al acercarse a la cordillera.

### 6.1.5. Uso de suelo

La cuenca se caracteriza por una baja cobertura de vegetación, pero consta con matorrales y árboles frondosos, también existe una integración de sistemas y variedades de comunidades biológicas no autóctonas. Cercano a la bocatomía se encuentran pequeños terrenos agrícolas que son alimentados con tramos del cauce principal, estos terrenos son rodeados por especies arbóreas de Peumos, Raulí, Pino Insigne, Tevo y Quillay. A los 540 m.s.n.m disminuye considerablemente la actividad agrícola y predominan bosques de plantación de empresas forestales de Pino Insigne, también se incluyen en las cercanías, bosques de especies Coliguay, Escall Alpina, Peumo y Quillay. Aguas arriba, en la mitad de la cuenca la pendiente va aumentando, pero igualmente se encuentran nuevos terrenos agrícolas por el costado sur y grandes zonas de Raulí y Peumo en el costado norte del estero, sobre los 720 m.s.n.m desaparece la actividad agrícola por completo y se mantiene el bosque denso de Raulí y Peumo. El predominio de los Robles comienza de la cota antes nombrada hasta los 1320 m.s.n.m. Mientras más aumenta la altura se ve menos vida vegetal, desde la última cota hasta la altura máxima del cauce hay zonas sin vegetación y con afloramientos rocosos.

## CAPÍTULO 6: Modelación de crecidas del Estero Upeo.

El estero va dando vida a los pueblos precordilleranos comenzando con Monte Oscuro, donde actualmente vive una veintena de familias que se han adaptado a las dificultades geográficas y de aislamiento. En esta localidad, encumbrada ya en pleno ingreso a la gran zona andina, se cultiva una agricultura de subsistencia que sólo da para el consumo familiar y en casos excepcionales para la venta. Los lugareños cultivan la papa, algunas pequeñas hortalizas, forman tierra de hojas y crían ganado, especialmente ovejas y cabros.

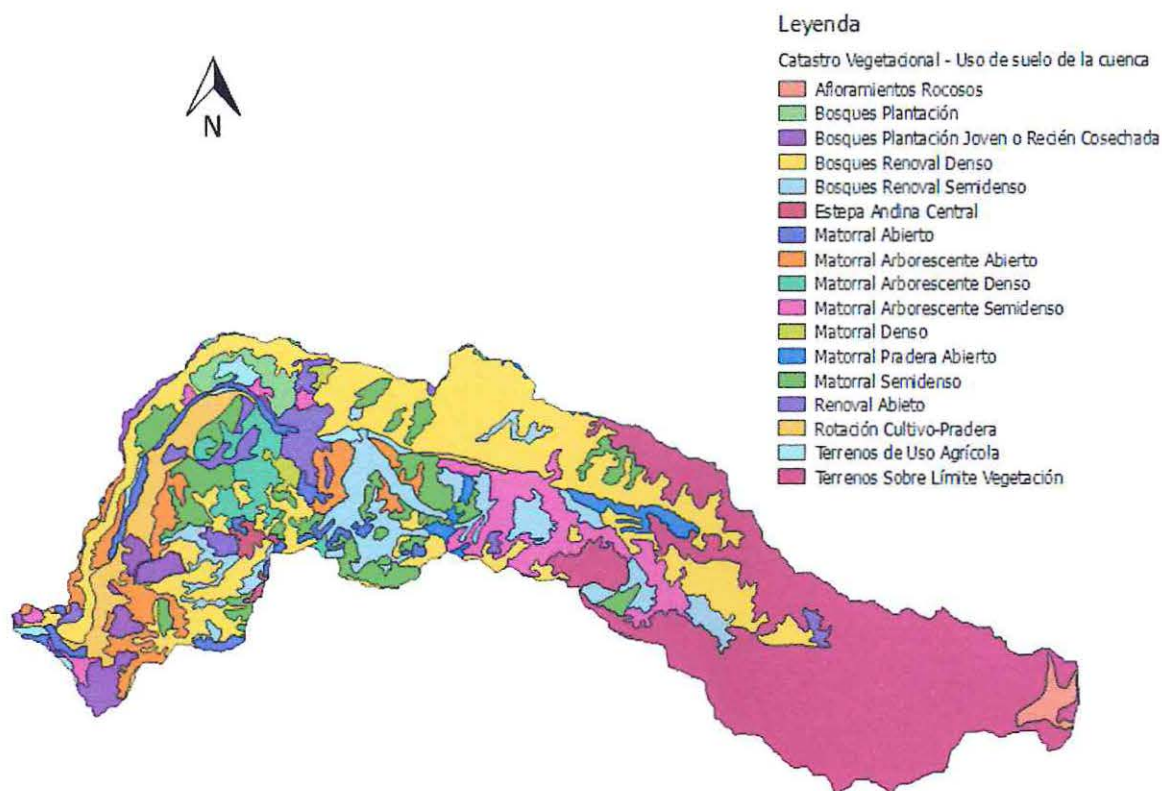
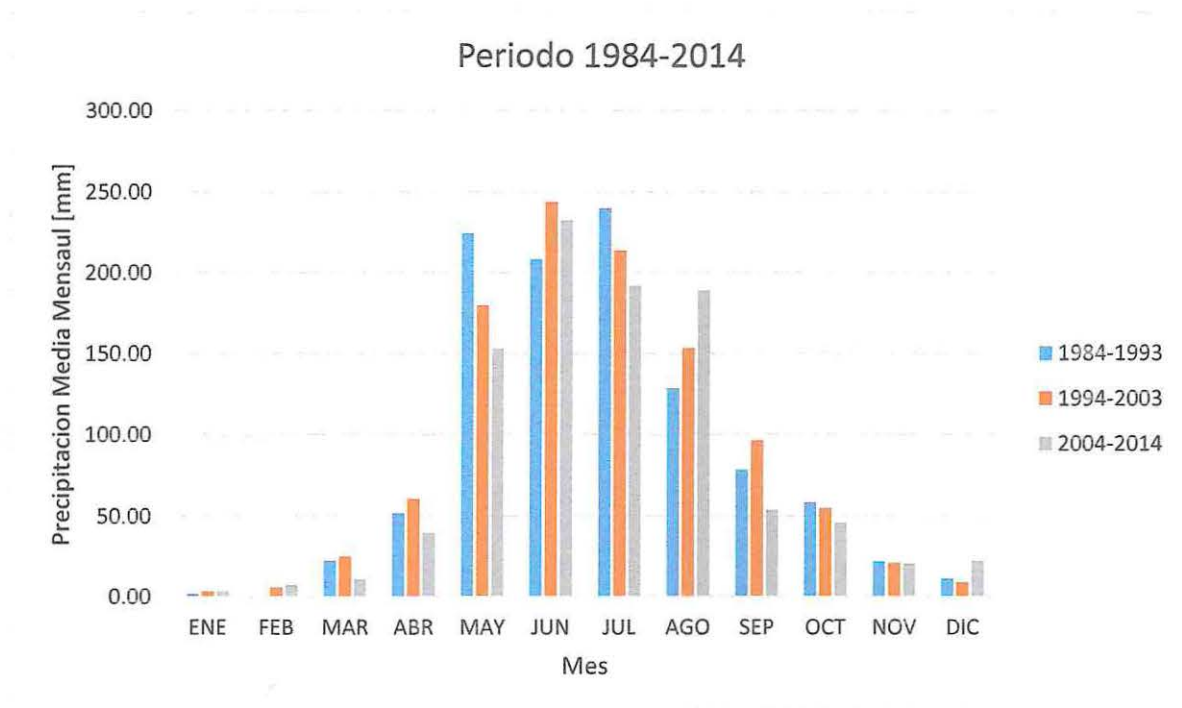


Figura 6.4: Catastro Vegetacional Cuenca Estero Upeo. Fuente: Ministerio del Medio Ambiente.

### 6.1.6. Variación de precipitación

Se realiza un análisis de la precipitación media mensual en la estación meteorológica Potrero Grande, donde se ve una clara tendencia en la disminución de las precipitaciones durante los meses mayo y julio, los cuales representan el comienzo de la estación lluviosa. Se nota un leve aumento en las precipitaciones en el mes de junio, junto con agosto, donde las precipitaciones aumentaron abruptamente, esto pudo ser ocasionado por diferencias importantes de temperatura en el cambio de estación invierno-primavera.

## CAPÍTULO 6: Modelación de crecidas del Estero Upeo.



**Figura 6.5:** Promedios de precipitación mensual de 30 años, estación Potrero Grande. Fuente propia.

### 6.2. Sistema de modelación hidrológica

La ausencia de datos de caudales es una característica común en la mayoría de estos pequeños cauces, por ello, su estimación suele hacerse normalmente a partir de la información pluviométrica disponible. Estos procedimientos llevan hipótesis implícitas y simplificaciones que siguen siendo objeto de debate entre los especialistas y ponen en entredicho la validez de sus resultados, por lo que continúan los trabajos de investigación en busca de procedimientos que, sin excesiva complejidad, proporcionen cifras de caudales con razonable precisión.

Para poder determinar los caudales puntas simulados del Estero Upeo, se analizaron los parámetros fisiométricos e hidrológicos de la hoya: permeabilidad del suelo, las pérdidas por infiltración (según los diferentes tipos de suelo), la modelación del hidrograma sintético, el flujo base del cauce y su enrutamiento. Se debe tener en consideración que la causa principal de las crecidas son las precipitaciones que se encuentran ligadas a una variable incontrolable que es el tiempo. Para el proceso de modelación del sistema, se realizó una etapa de calibración de valores y una de validación de éstos mismos, teniendo como ayuda, se consideró el ingreso de datos geométricos y físicos de la cuenca, además del uso del GIS como manejo de datos físicos invariables.

La cuenca de Upeo debe contar con un cauce libre y natural que no debe estar alterado con obras realizadas por un tercero. Debido a la naturalidad del cauce los resultados serán más simples de analizar, enfocando el estudio sólo en los datos hidrológicos de la cuenca<sup>[26]</sup>.

Para simplificar la metodología, se considera que la cuenca hidrológica se encuentra completamente saturada, este supuesto hace que la variabilidad de datos en relación a la cuenca disminuya, como por ejemplo, en el método de la curva se tendría que subdividir la información en 3

## **CAPÍTULO 6: Modelación de crecidas del Estero Upeo.**

tipos de humedad, pero como el suelo ya está colmatado de agua se obtendrán valores precisos por haber elegido la subdivisión más húmeda.

### **6.2.1. Identificar la decisión**

Analizando el caudal punta de un cauce, éste sirve como parámetro para diseñar una construcción civil, como por ejemplo, la construcción de un puente que tenga que pasar sobre un río. En este caso el caudal punta real se toma como referencia para la modelación, mientras que el programa nos entrega un nuevo caudal simulado.

### **6.2.2. Identificar y seleccionar el criterio de la metodología**

Más de algún método puede representar el modelo hidrológico y su comportamiento en la cuenca, pero se debe determinar el criterio a utilizar para simular de forma más real el flujo del estero. No obstante, la metodología se ve seriamente afectada con la obtención de datos hidrológicos o geográficos del lugar, como por ejemplo, no existe un estudio factible de qué tipo de suelo específico se encuentra alrededor del cauce, factor que es determinante para la modelación.

### **6.2.3. Qué información es requerida**

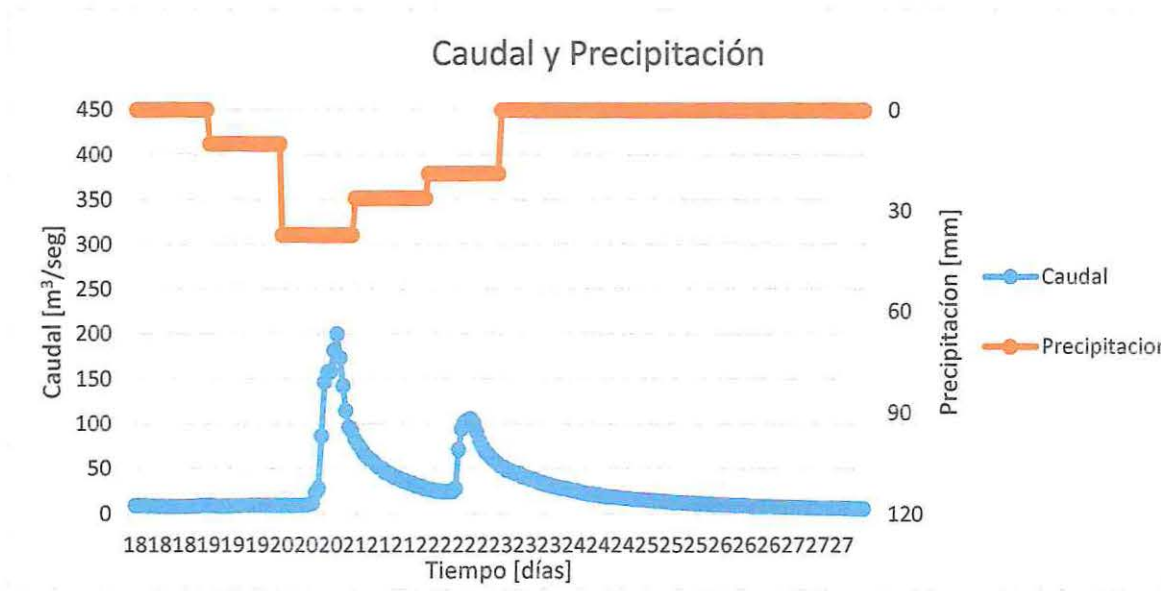
Se toma como referencia los procesos mencionados en el capítulo 4.1, en el cual se menciona que se deben ajustar los parámetros asociados a las crecidas del cauce, donde la metodología del sistema consiste en calcular el volumen de escorrentía directa siguiendo la lógica de que las precipitaciones son interceptadas, infiltradas, almacenadas y transportadas.

### **6.2.4. Determinación de los eventos apropiados según espacio y tiempo**

La cuenca del estero se divide en 2 subcuencas, tomando como valor de división la altura promedio de la hoya, que son 1235 metros, con este supuesto permite catalogar de mejor forma el uso de suelo en ambas subcuencas. Con esta segmentación, existirán más variables en cada tramo, recordar que mientras más detalles se encuentren en el modelo, la representación de los resultados serán más cercanos a la realidad.

Para la calibración se seleccionaron 10 eventos de tormenta, con condiciones de cuenca saturada. El tiempo considerado en las tormentas es el mismo que está presente cuando se produce un hidrograma que es consecutivo a otro (**ver figura 6.6**), esto explica la condición de saturación presentada. En la validación, para comprobar el modelo de simulación, se seleccionaron 5 tormentas con las mismas características utilizadas en la calibración. Cabe mencionar que las imágenes satelitales para poder analizarlas en el programa, son registradas cada 3 horas.

**CAPÍTULO 6: Modelación de crecidas del Estero Upeo.**



**Figura 6.6:** Ejemplo Gráfico de caudal y precipitación para la selección de datos, donde se toma como tormenta base la segunda crecida. Fuente Propia

Evento	Inicio	Término
Tormenta 1	13-jun-00	14-jun-00
Tormenta 2	27-may-01	31-may-01
Tormenta 3	10-jun-03	11-jun-03
Tormenta 4	21-jun-03	23-jun-03
Tormenta 5	12-abr-04	14-abr-04
Tormenta 6	05-sep-04	07-sep-04
Tormenta 7	16-jun-05	19-jun-05
Tormenta 8	03-ago-05	04-ago-05
Tormenta 9	09-jul-06	13-jul-06
Tormenta 10	05-sep-13	08-sep-13

**Tabla 6.3:** Eventos para calibración HEC-HMS.

Evento	Inicio	Término
Tormenta 1	20-jun-99	25-jun-99
Tormenta 2	13-jun-00	16-jun-00
Tormenta 3	20-may-03	23-may-03
Tormenta 4	05-jul-10	07-jul-10
Tormenta 5	16-ago-11	19-ago-11

**Tabla 6.4:** Eventos para validación HEC-HMS.

## **CAPÍTULO 6: Modelación de crecidas del Estero Upeo.**

La conformación del hietograma de precipitaciones como valor de entrada al programa, se distribuye en el tiempo tomando como base la precipitación registrada en las imágenes satelitales. Los valores se distribuyen de forma porcentual, cabe decir que la magnitud de la imagen satelital registrada cada 3 horas se expresa como un valor porcentual de la precipitación total.

### **6.2.5. Ajustar y verificar modelo**

Algunos parámetros pueden ser estimados por medio de observación de las propiedades físicas, en cambio, otros pueden ser obtenidos por calibración, con el método de prueba y error. Cada valor debe ser especificado para que el programa pueda realizar la simulación, y así obtener como resultado la precipitación que produce la escorrentía y el hidrograma del cauce.

### **6.2.6. Recolectar Información hidrológica**

El ciclo hidrológico nos da las herramientas necesarias para los estudios, en el proceso de condensación se obtiene un resultado que serían las condiciones esenciales del modelo, las precipitaciones son las que permiten el flujo y escorrentía, sin este dato base, no sería posible la simulación. Como datos de entrada para la simulación, también se deben considerar las mediciones de los caudales obtenidos de la DGA.

### **6.2.7. Ejecución y análisis del modelo**

Se debe ejecutar el modelo teniendo en cuenta los puntos presentados anteriormente, el programa posee una interfaz amigable de fácil uso, y los resultados son presentados en gráficos y tablas. Con la simulación ya realizada, los resultados se deben confirmar si son razonables y consistentes con los reales. En el análisis de los resultados de calibración, se debe tener en cuenta que si disminuye o aumenta un valor de un parámetro y a su vez se ve altamente reflejado en los resultados, se reconsiderará el modelo.

## **6.3. Desarrollo de modelación**

El programa HEC-HMS pide como datos de entrada, las variables físicas e hidrológicas de la cuenca. El modelo condiciona con la obtención de métodos hidrológicos, que permitirán el proceso de información para arrojar como resultado el objetivo principal del estudio, el caudal punta del cauce. Los primeros elementos a considerar son los parámetros físicos de la cuenca: área, longitud de cauce principal, pendiente por sector, pendiente media y centro de gravedad. Solo el área de la cuenca va como valor constante en el programa, el resto de las variables se utilizan como factores variantes para ejecutar la aplicación.

La interfaz gráfica esta creada por: 2 subcuencas, un tránsito del estero y una salida del cauce. El tránsito del caudal se toma de régimen según Muskingum con valores obtenidos de un estudio realizado en cuencas cercanas de la zona<sup>[27]</sup>.

## CAPÍTULO 6: Modelación de crecidas del Estero Upeo.

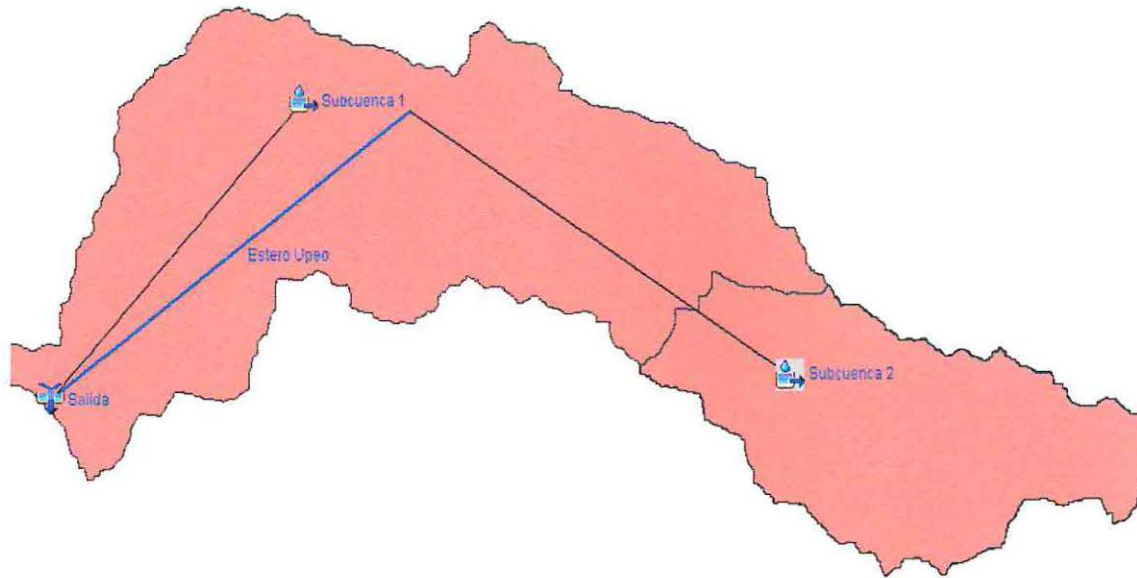


Figura 6.7 : Interfaz Gráfica HEC-HMS. Fuente propia

### 6.3.1. Calibración HEC-HMS

Las características de la cuenca representan la escorrentía producida por la tormenta, pero no toda la precipitación produce escorrentía, ya que existen infiltraciones que no aportan al cauce y son drenadas bajo la superficie del suelo. El resultado de la suma de infiltración y de precipitación sobrante debe dar igual en valor a la precipitación recibida de entrada. El tipo de suelo cumple un rol fundamental, donde el porcentaje de la cuenca que tiene suelo tipo impermeable permite escorrentía directa inmediata, mientras que el suelo permeable es causante de pérdidas de aguas. Se realiza la selección del método de pérdida acumulada SCS Curva Numero (CN), éste método estima el excedente de precipitación en función de la subdivisión de tipos de suelos y sus usos. La determinación de la CN se expresa en la siguiente ecuación:

$$CN = \frac{\sum_{i=1}^n A_i CN_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

CN<sub>i</sub> = valor de la Curva Número de cada subdivisión.

A<sub>i</sub> = área vegetal aportante en las subcuencas.

## CAPÍTULO 6: Modelación de crecidas del Estero Upeo.

Para la obtención del valor de CN para cada subcuenca, fue necesario requerir información del Ministerio del Medio Ambiente (MMA), en su sitio web se obtuvo el catastro de bosques y vegetación para saber el porcentaje de especies existentes en la zona de estudio [28].

El programa calcula la precipitación excedente de la cuenca según la siguiente fórmula:

$$Pe = \frac{(P-Ia)^2}{P-Ia+S} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

Pe = exceso de precipitación acumulada (mm).

P = precipitación acumulada en un tiempo t (mm).

Ia = abstracción inicial (mm).

S = retención potencial máxima.

Si la magnitud de la precipitación acumulada excede la abstracción inicial, la precipitación excedida es cero.

El resultado de estudios de cuencas pequeñas experimentales del método SCS, define que la abstracción  $Ia = 0,2 S$ , donde:

$$S = \frac{25400 - 254 CN}{CN} \quad (\text{Ecuación 4})$$

El valor porcentual de la impermeabilidad de la cuenca se extrajo por medio del catastro de vegetación y tipo de suelo de la cuenca del MMA, donde se consideran como capas impermeables los bosques densos y afloramientos rocosos.

De acuerdo con estudios realizados en Chile, el concepto de Hidrograma Unitario Sintético tiene validez en cuencas con áreas entre 10 y 4500 km<sup>2</sup> con un sólo cauce principal, sin lagos o embalses que pudieran alterar significativamente la onda de crecida<sup>[12]</sup>.

La metodología de Snyder se basa según las propiedades físicas de la cuenca, donde el HUS se desarrolla ajustando los parámetros del HU observado de la precipitación y los datos de descarga. Los valores considerados de Benítez y Arteaga para la ejecución del programa son el Tiempo Punta del caudal  $T_p$  y la constante  $C_{peak}$  del caudal punta del HU, donde  $T_p$  define la longitud de tiempo entre el centroide del peso de la precipitación y el caudal punta del hidrograma. El valor  $C_{peak}$  mide el flujo del hidrograma que resulta en una unidad de precipitación. Los parámetros son calculados a continuación:

## CAPÍTULO 6: Modelación de crecidas del Estero Upeo.

$$Tp = Ct \left( \frac{L Lc}{\sqrt{S}} \right)^{nt} \quad (\text{Ecuación 5})$$

- Ct = coeficiente base HU región del Maule.  
L = longitud cauce principal.  
Lc = longitud entre el centroide de la cuenca con la salida del cauce.  
S = pendiente media de la cuenca.

$$\frac{Up}{A} = C \frac{Cpeak}{tp} \quad (\text{Ecuación 6})$$

- Up = caudal punta HU.  
A = área cuenca.  
Cpeak = constante caudal punta HU.  
C = constante de conversión (con valor 2.75).

Donde:

$$Up = Cp tp^{np} \quad (\text{Ecuación 7})$$

- Cp = coeficiente HU región del Maule.  
Np = exponente HU región del Maule.

El flujo base es uno de los dos grandes componentes para medir el exceso de precipitación junto con la escorrentía directa. Este flujo o base es el caudal que se mantiene de forma permanente en un cauce. Se elige un modelo de flujo base recesivo, que consiste en un modelo de recesión exponencial representativa de la cuenca<sup>[19]</sup>; el método viene de un modelo de drenaje de almacenamiento natural de una cuenca. Se define que el flujo base  $Q_t$  en un tiempo  $t$  es:

## CAPÍTULO 6: Modelación de crecidas del Estero Upeo.

$$Q_t = Q_0 k^t \quad (\text{Ecuación 8})$$

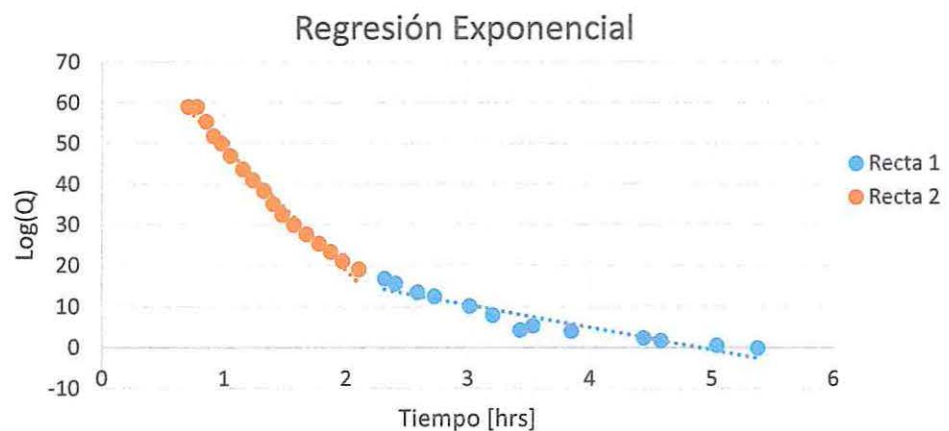
Con:

$Q_0$  = flujo base inicial en  $t=0$ .

$K$  = constante exponencial de decaimiento.

Para la obtención del parámetro  $K$ , se realiza un análisis exponencial de las tormentas seleccionadas, donde se toma como referencia el punto de inflexión entre la curva de descenso y la curva de agotamiento. Se separan las curvas y se realiza una tendencia lineal entre ambas (figura 6.8), donde se define un punto de intersección como referencia para sacar un valor promedio de la regresión exponencial.

El flujo base es reseteado al final de la curva de descenso cuando éste alcanza un valor porcentual definido por el usuario, por ejemplo si se tiene un caudal punta de  $100 \text{ m}^3/\text{s}$  con un valor de reseteo de  $0,2$ , el flujo base siempre se modificará en la curva cuando alcance el valor de  $20 \text{ m}^3/\text{s}$ , dando como origen el comienzo de la curva de agotamiento. Este valor es netamente empírico<sup>[19]</sup>.



**Figura 6.8:** Ejemplo cálculo de constante  $K$  recesión. Fuente propia.

El modelo hidrológico necesita la magnitud de la precipitación que puede ser inferida por el peso de las estaciones meteorológicas dentro de la cuenca, esto mediante la utilización de los Polígonos de Thiessen de igual forma como en la calibración de datos en el capítulo 4. El método sirve para estaciones con y sin registros pluviométricos, los datos son convertidos según los intervalos de tiempo solicitados en la entrada.

Es necesario ingresar el tiempo de inicio y término de cada tormenta para todas las simulaciones. Se debe ingresar la fecha de forma exacta en formato DDMMAAAA (día, mes y año) y el tiempo en formato de 24 horas. Además agregar el tiempo de intervalo de cada dato de precipitación, en este caso serían 3 horas. Se debe recordar que todos los parámetros que estén

## CAPÍTULO 6: Modelación de crecidas del Estero Upeo.

relacionados con el tiempo deben tener el mismo intervalo, en este caso se tuvo que interpolar los caudales para obtenerlos también cada 3 horas.

Sub-cuenca 1		
Datos	Unidad	Valor
Longitud cauce	Km	28.419
Longitud Centroide-Salida	Km	11.76
Pendiente media	%	19.67
Área	Km2	142.56

**Tabla 6.5:** Valores de entrada Sub-cuenca 1.

Sub-cuenca 2		
Datos	Unidad	Valor
Longitud cauce	Km	14,81
Longitud Centroide-Salida	Km	6,8
Pendiente media	%	25,47
Área	Km2	63,62

**Tabla 6.6:** Valores de entrada Sub-cuenca 2.

Valores HUS Snyder modificación Benítez y Arteaga, Región del Maule:

Sub-cuenca 1	
Ct	0,584
Cp	522,514
nt	0,327
np	-1,511
Tp	5,096
Qp	44,61

Sub-cuenca 2	
Ct	0,584
Cp	522,514
nt	0,327
np	-1,511
Tp	3,3
Qp	1,62

**Tabla 6.7** (izquierda) y **Tabla 6.8** (derecha): Valores del Hidrograma Unitario Sintético modificación Benítez y Arteaga para la subcuenca-1 y subcuenca-2.

## CAPÍTULO 6: Modelación de crecidas del Estero Upeo.

Valores de entrada HEC-HMS:

Subcuenca 1		
Datos	Unidad	Valor
CN		65,14
Impermeabilidad	%	54,695
S	mm	135,93
la	mm	27,19
K de recesión		0,75
Radio a Punta	%	0,35
Tp	hr	3,82
Cpeak	m <sup>3</sup> /seg	0,58
K Muskingum		0,6
X Muskingum		0,2

Subcuenca 2		
Datos	Unidad	Valor
CN		70,343
Impermeabilidad	%	36,48
S	mm	107,1
la	mm	27,24
K de recesión		0,75
Radio a Punta	%	0,35
Tp	hr	3,3
Cpeak	m <sup>3</sup> /seg	0,8
K Muskingum		0,6
X Muskingum		0,2

Tabla 6.9 (izquierda) y Tabla 6.10 (derecha): Valores de entrada para la ejecución del programa HEC-HMS de la subcuenca-1 y subcuenca-2.

En el proceso de calibración del modelo, en la subcuenca 1 se ajusta el valor de la Curva Número de 58,93 a 65,14 y para la subcuenca 2 de 65,38 a 70,343. Estos ajustes permitieron una simulación del caudal más similar a la del caudal real del estero.

### 6.3.2. Eficiencia de Nash-Sutcliffe y volumen

Para ver si los resultados de la calibración son aceptados, se realizan pruebas estadísticas para verificación. Donde la comprobación estadística de Nash-Sutcliffe propone una medida para corroborar la modelación hidrológica. El dominio matemático del valor del coeficiente E es de  $-\infty$  a 1, donde la unidad representa la simulación perfecta. Cuando  $E = 0$  la varianza de los errores es igual a la varianza observada, lo cual significa que el modelo produce estimaciones del promedio de las observaciones en todos los intervalos. Los valores negativos indican un deficiente desempeño del modelo<sup>[16]</sup>. A continuación se presenta la ecuación de Nash ecuación y se tabulan sus valores:

$$E = 1 - \frac{\sum_{t=1}^t (Q_{ot} - Q_{mt})^2}{\sum_{t=1}^t (Q_{ot} - Q_{oprom})^2} \quad (\text{Ecuación 7})$$

Con:

$Q_o$  = Caudal observado (m<sup>3</sup>/s).

$Q_m$  = Caudal modelado (m<sup>3</sup>/s).

$Q_{oprom}$  = Caudal observado promedio (m<sup>3</sup>/s).

**CAPÍTULO 6: Modelación de crecidas del Estero Upeo.**

Evento	Nash	Volumen Real (m <sup>3</sup> )	Volumen Simulado DGA (m <sup>3</sup> )
Tormenta 1	0,82	1416,04	1565,45
Tormenta 2	0,87	646,13	691,50
Tormenta 3	0,76	358,85	342,40
Tormenta 4	0,81	766,16	675,95
Tormenta 5	0,74	792,98	903,15
Tormenta 6	0,75	825,55	807,50
Tormenta 7	0,68	2732,79	2470,60
Tormenta 8	0,83	981,96	857,10
Tormenta 9	0,85	3747,42	3393,05
Tormenta 10	0,60	193,51	159,55

**Tabla 6.11:** Resultados calibración: valores de Nash, Volumen Real y Volumen Simulado Real.

Evento	Nash	Volumen Real (m <sup>3</sup> )	Volumen Simulado DGA (m <sup>3</sup> )
Tormenta 1	0,52	586,25	1010,20
Tormenta 2	0,70	1318,01	1332,85
Tormenta 3	0,67	2628,25	3180,80
Tormenta 4	0,85	146,38	123,05
Tormenta 5	0,87	381,65	328,10

**Tabla 6.12:** Resultados validación: valores de Nash, Volumen Real y Volumen Simulado Real.

Evento	Nash	Volumen Real (m <sup>3</sup> )	Volumen Simulado Satelital (m <sup>3</sup> )
Tormenta 1	0,84	1416,04	1349,62
Tormenta 2	0,78	646,13	556,50
Tormenta 3	0,61	358,85	457,80
Tormenta 4	0,82	766,16	756,95
Tormenta 5	0,51	792,98	637,50
Tormenta 6	0,71	825,55	633,15
Tormenta 7	0,57	2732,79	2944,15
Tormenta 8	0,51	981,96	716,90
Tormenta 9	0,82	3747,42	4005,55
Tormenta 10	0,75	193,52	113,55

**Tabla 6.13:** Resultados de 10 tormentas validados: valores de Nash, Volumen Real y Volumen Simulado Satelital

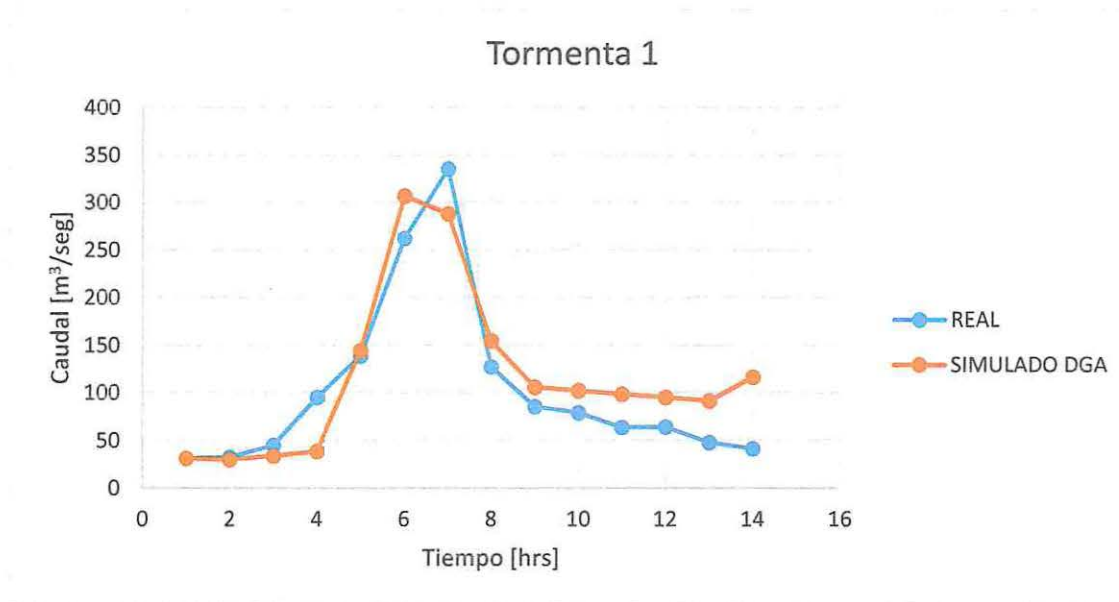
**CAPÍTULO 6: Modelación de crecidas del Estero Upeo.**

Evento	Nash	Volumen Real (m <sup>3</sup> )	Volumen Simulado Satelital (m <sup>3</sup> )
Tormenta 1	0,83	586,25	747,75
Tormenta 2	0,62	1318,01	1053,65
Tormenta 3	0,63	2628,25	2022,10
Tormenta 4	0,76	146,38	94,05
Tormenta 5	0,67	381,65	291,10

**Tabla 6.14:** Resultados de 5 tormentas validados: valores de Nash, Volumen Real y Volumen Simulado Satelital

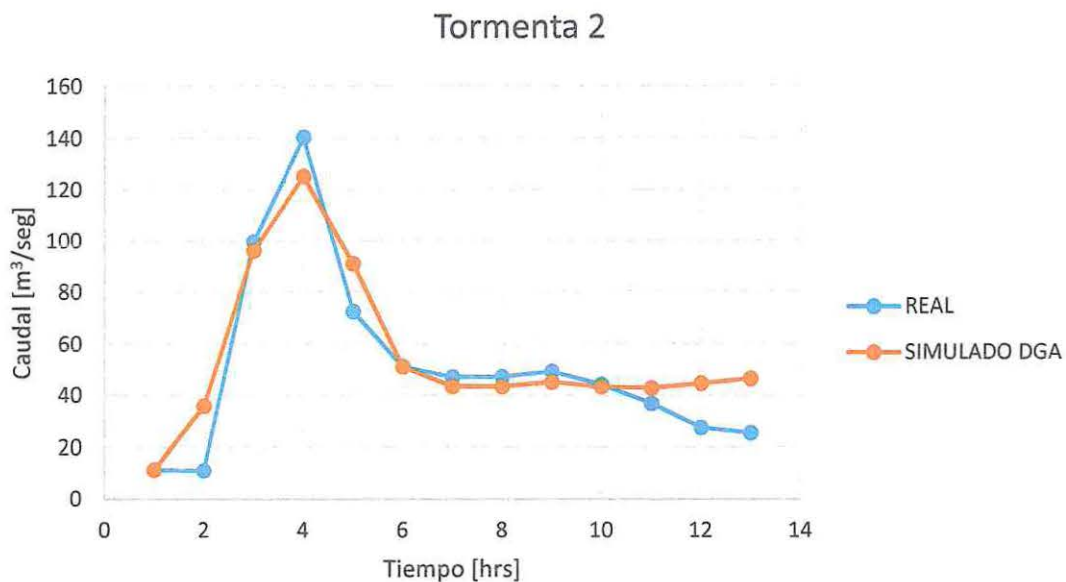
**6.3.3. Gráficos para calibración, caudales reales y caudales simulados DGA**

A continuación se grafican los caudales reales, versus los caudales simulados reales para la calibración de los parámetros hidrológicos, este modelo resultantes es simulado en HEC-HMS.

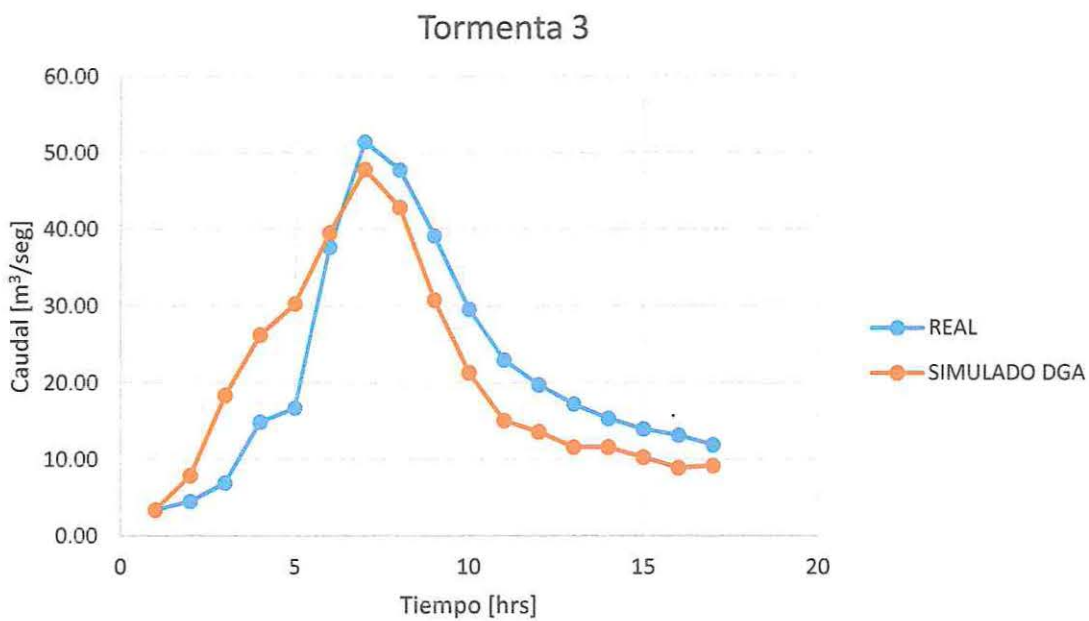


**Figura 6.9:** Gráfico de calibración HEC-HMS tormenta 1.

**CAPÍTULO 6: Modelación de crecidas del Estero Upeo.**



**Figura 6.10:** Gráfico de calibración HEC-HMS tormenta 2.



**Figura 6.11:** Gráfico de calibración HEC-HMS tormenta 3.

## CAPÍTULO 6: Modelación de crecidas del Estero Upeo.

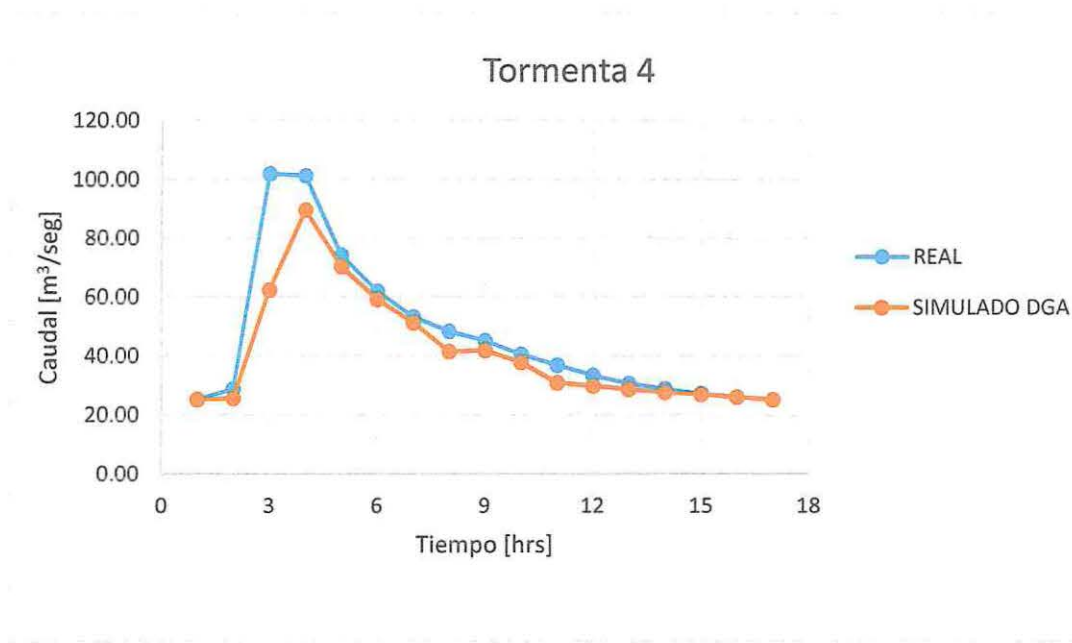


Figura 6.12: Gráfico de calibración HEC-HMS tormenta 4.

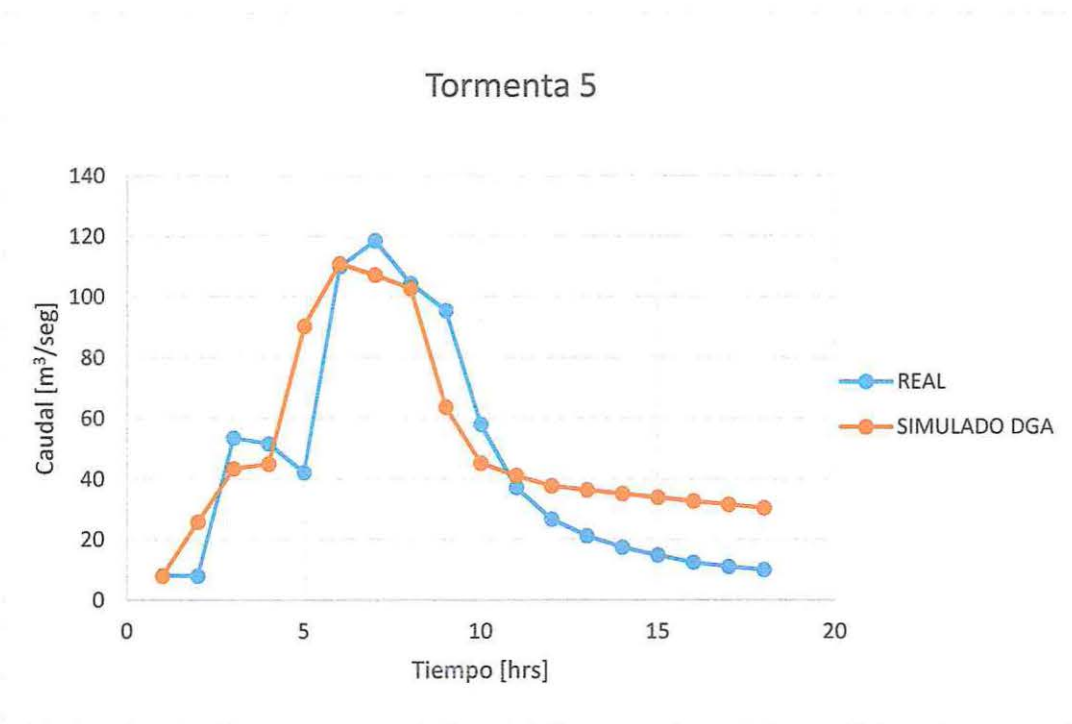


Figura 6.13: Gráfico de calibración HEC-HMS tormenta 5.

## CAPÍTULO 6: Modelación de crecidas del Estero Upeo.

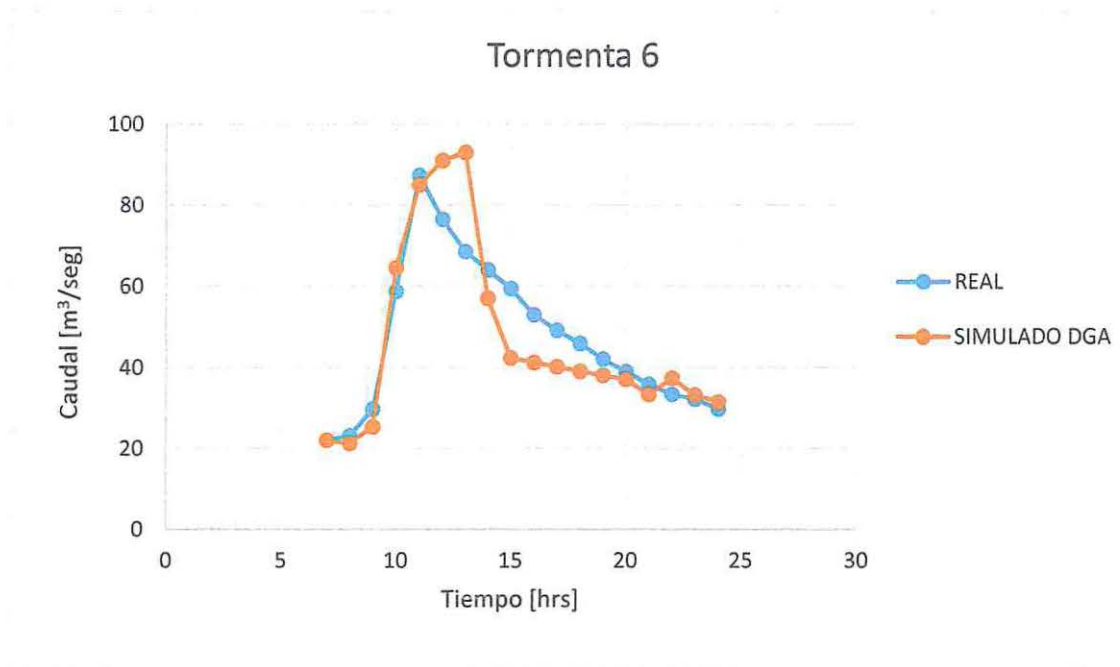


Figura 6.14: Gráfico de calibración HEC-HMS tormenta 6.

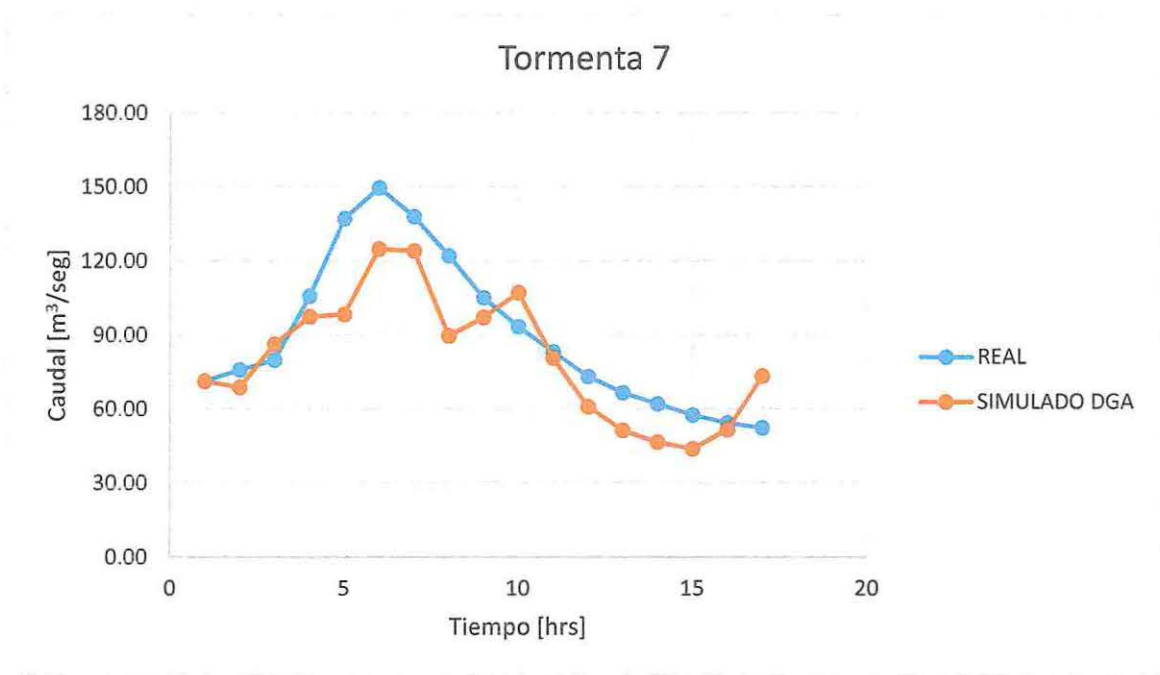


Figura 6.15: Gráfico de calibración HEC-HMS tormenta 7.

## CAPÍTULO 6: Modelación de crecidas del Estero Upeo.

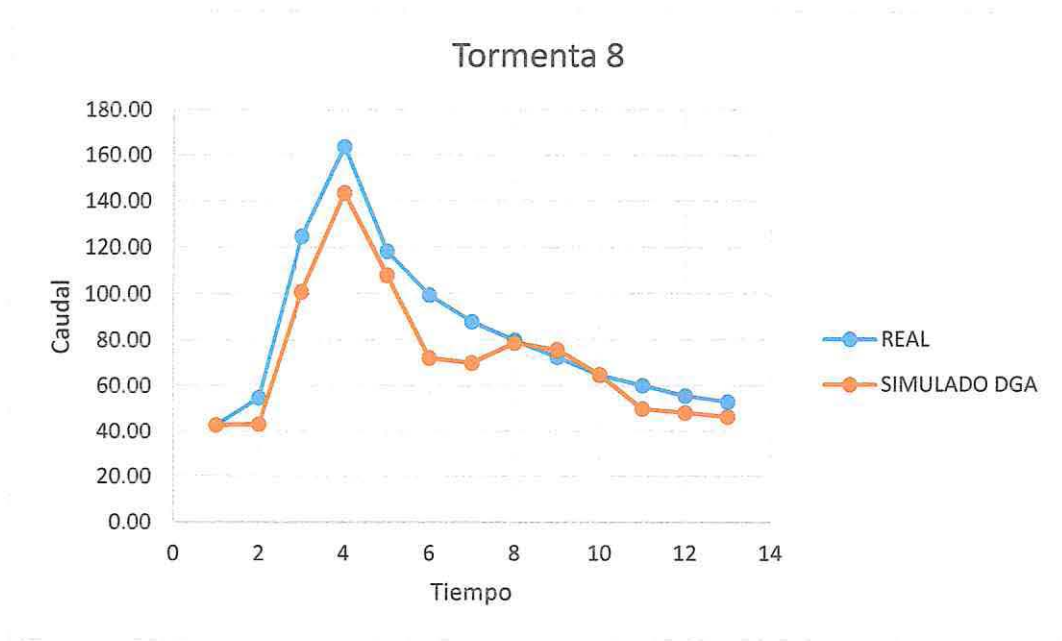


Figura 6.16: Gráfico de calibración HEC-HMS tormenta 8.

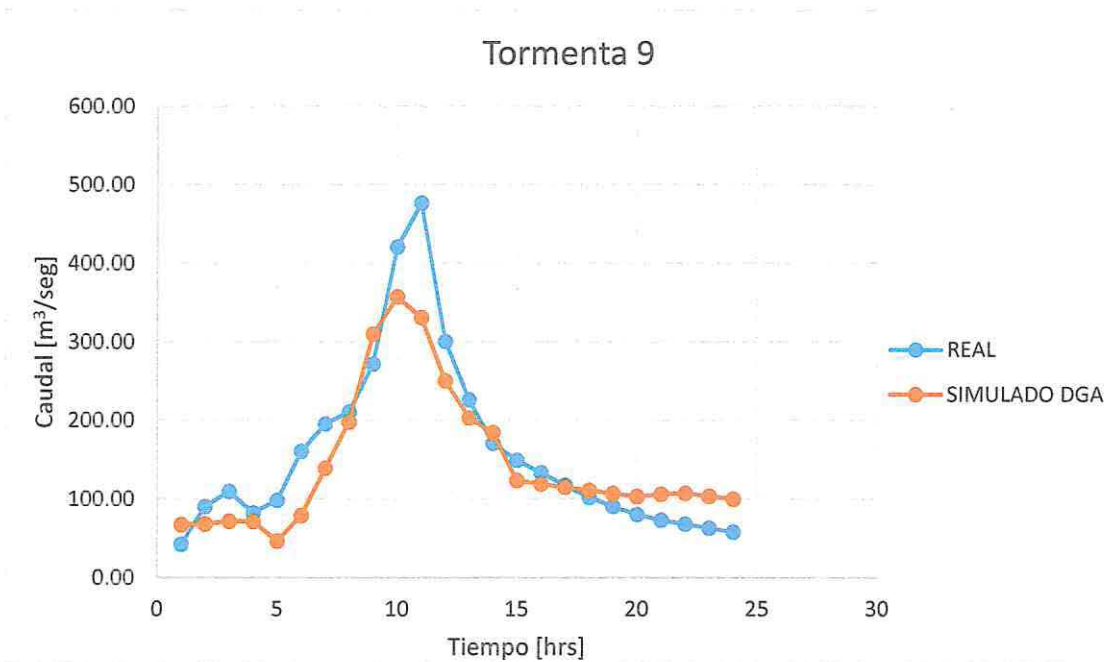
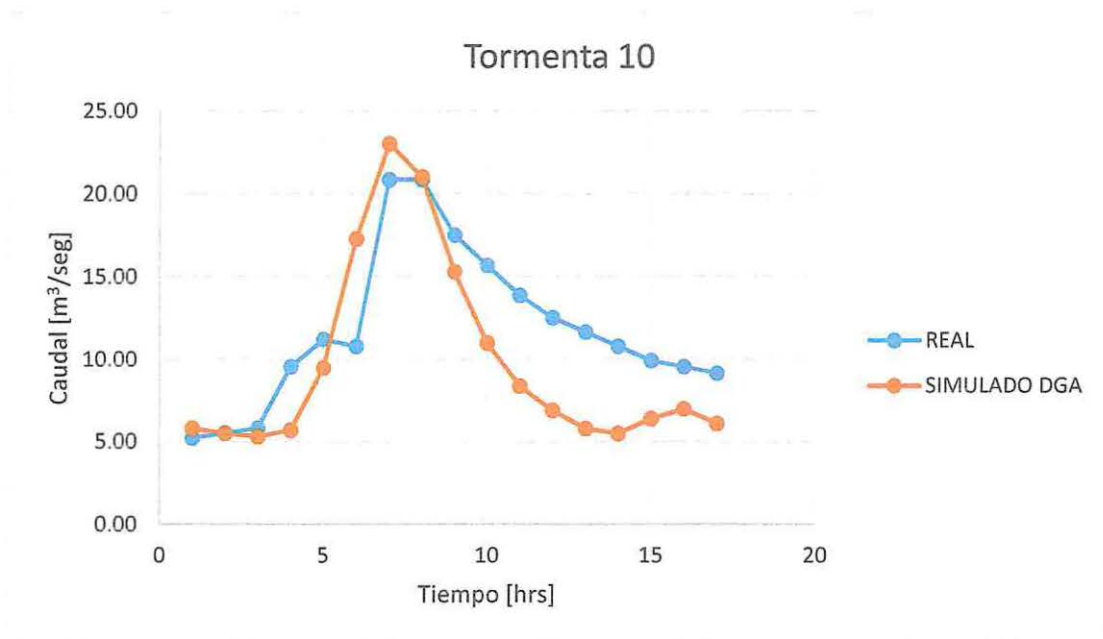


Figura 6.17: Gráfico de calibración HEC-HMS tormenta 9.

## CAPÍTULO 6: Modelación de crecidas del Estero Upeo.



**Figura 6.18:** Gráfico de calibración HEC-HMS tormenta 10.

## CAPÍTULO 6: Modelación de crecidas del Estero Upeo.

### 6.3.4. Gráficos para validación, caudales reales y caudales simulados reales

A continuación se grafican los caudales reales, versus los caudales simulados reales para la validación de los parámetros hidrológicos, este modelo resultantes es simulado en HEC-HMS.

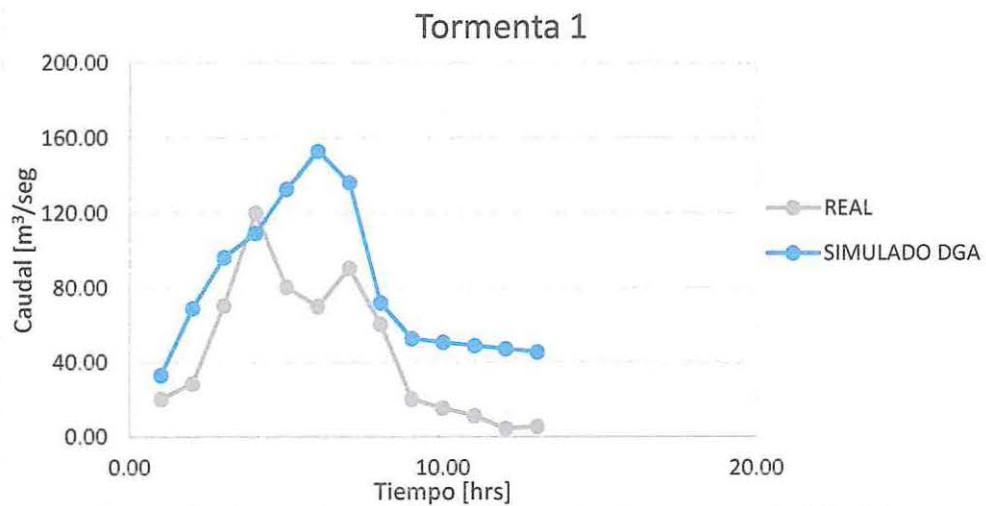


Figura 6.19: Gráfico de validación HEC-HMS tormenta 1.

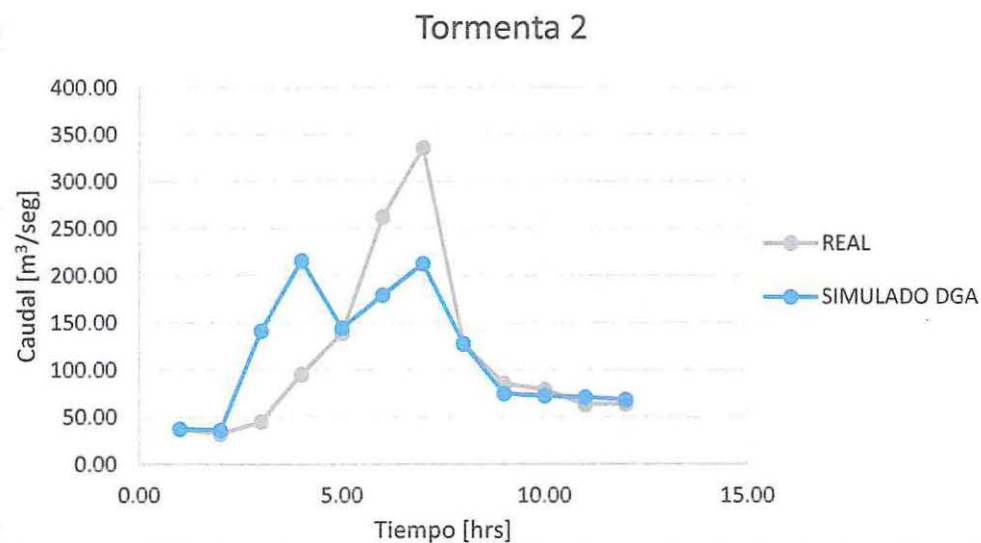


Figura 6.20: Gráfico de validación HEC-HMS tormenta 2.

## CAPÍTULO 6: Modelación de crecidas del Estero Upeo.

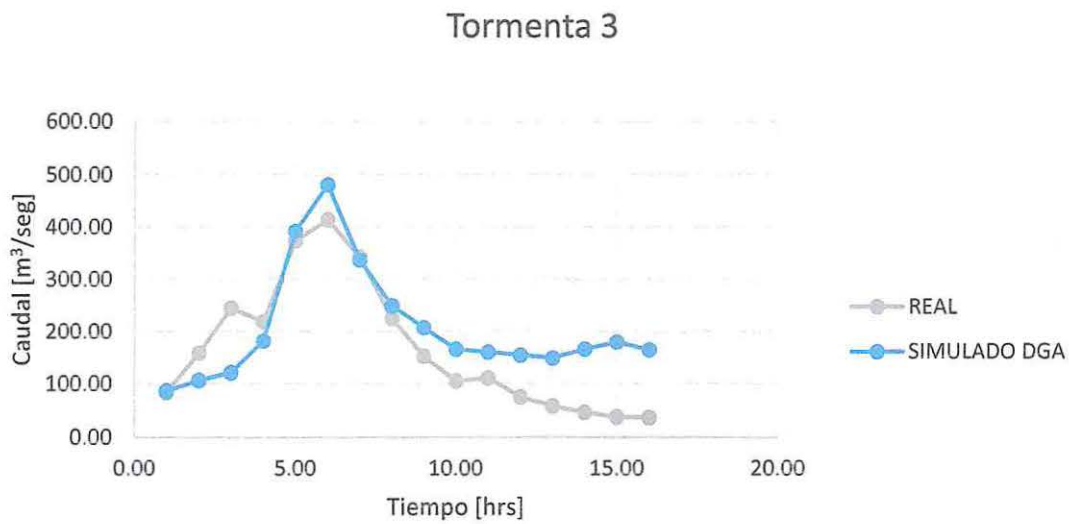


Figura 6.21: Gráfico de validación HEC-HMS tormenta 3

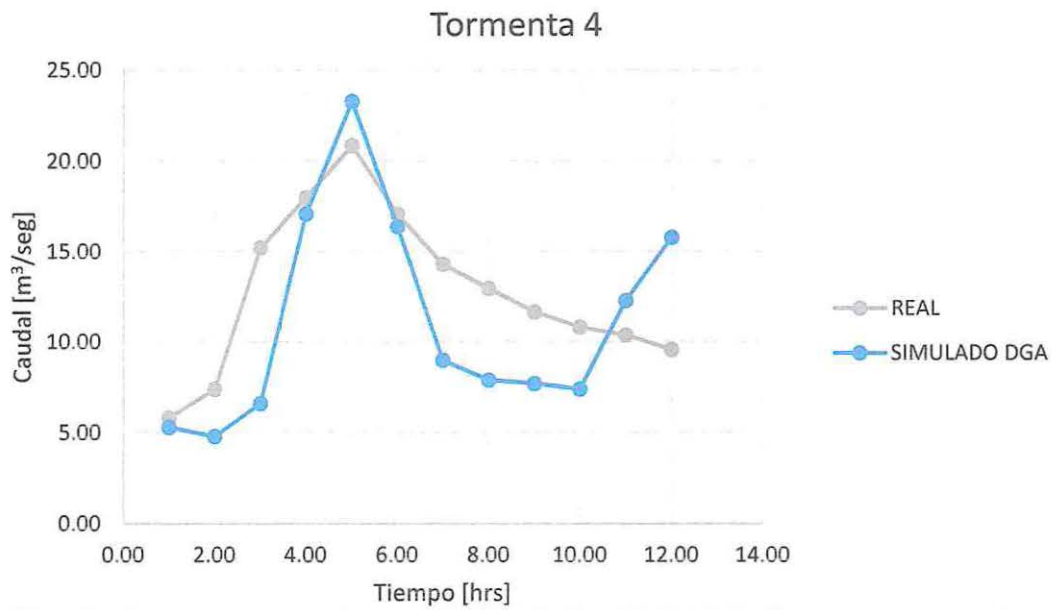


Figura 6.22: Gráfico de validación HEC-HMS tormenta 4

## CAPÍTULO 6: Modelación de crecidas del Estero Upeo.

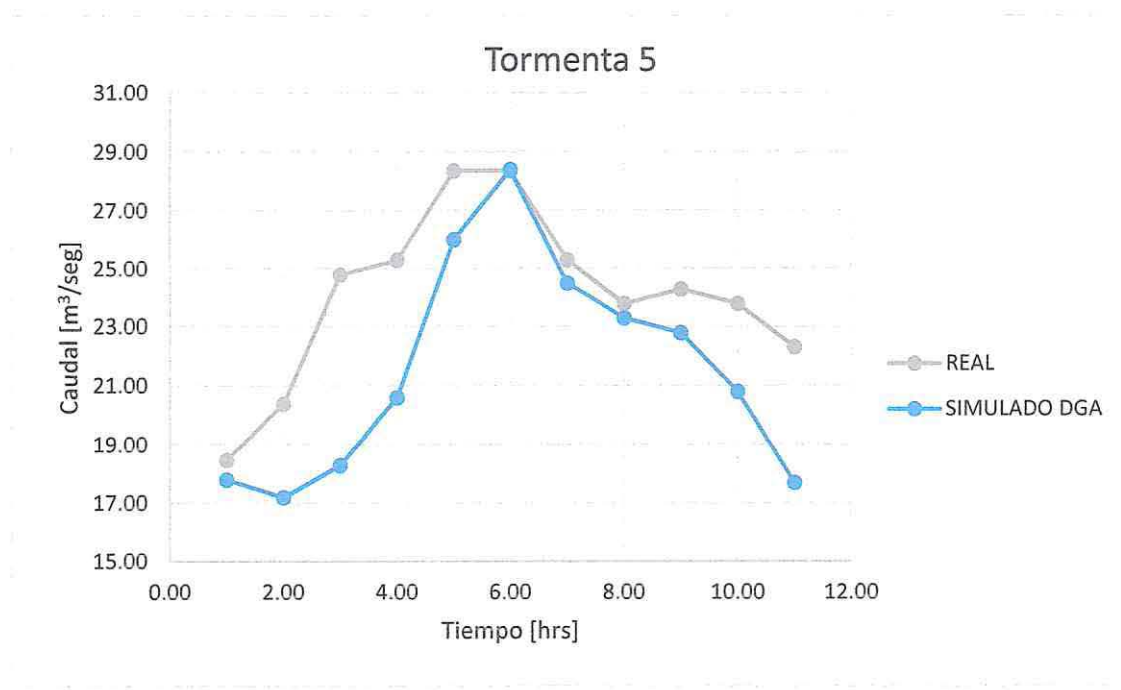


Figura 6.23: Gráfico de validación HEC-HMS tormenta 5

### 6.3.5. Gráficos validados, caudales reales y caudales simulados satelital

A continuación se grafican los caudales reales, versus los caudales simulados satelital validados, este modelo resultantes es simulado en HEC-HMS. Son 15 tormentas, las 10 tormentas de la calibración y el resto de la validación.

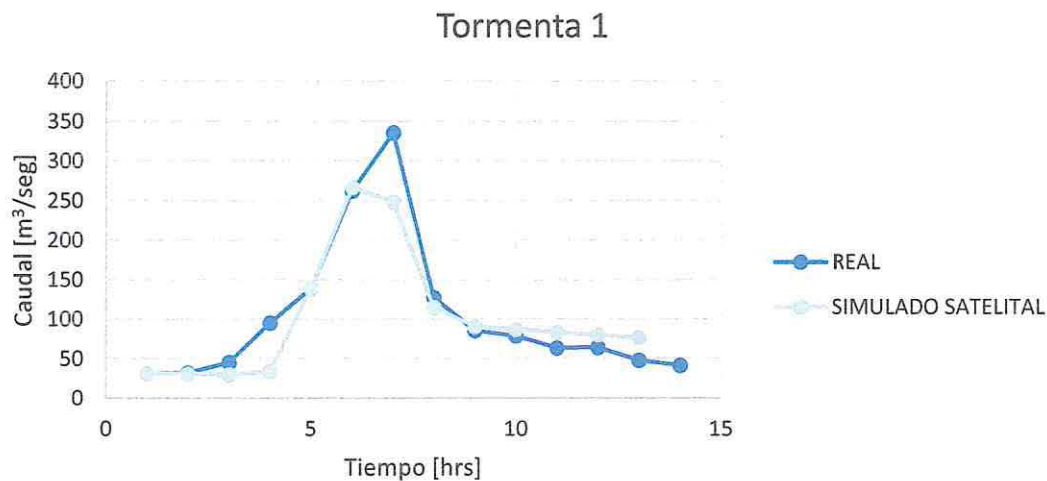


Figura 6.24: Gráfico validado por simulación en HEC-HMS tormenta 1.

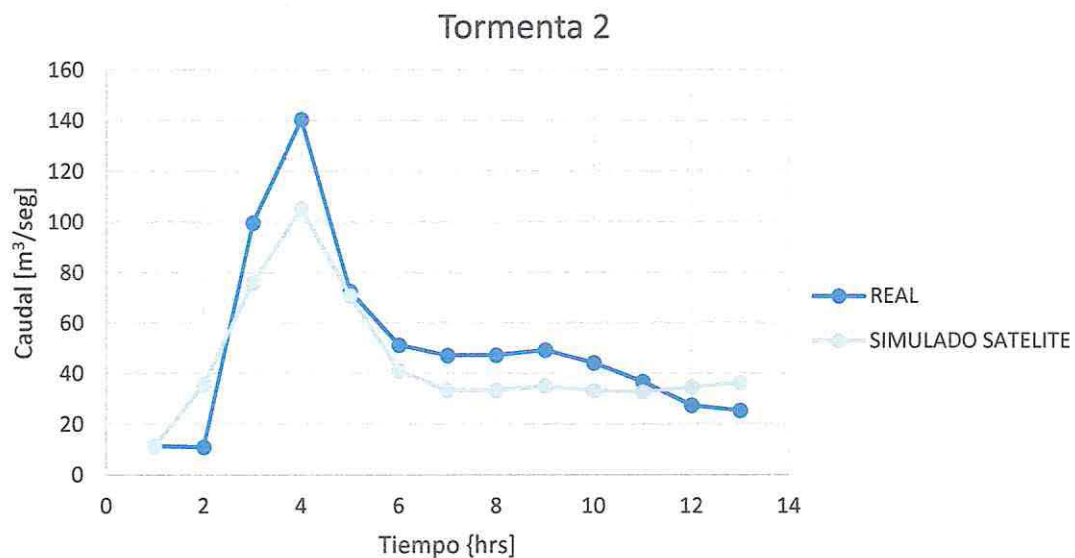


Figura 6.25: Gráfico validado por simulación en HEC-HMS tormenta 2.

## CAPÍTULO 6: Modelación de crecidas del Estero Upeo.

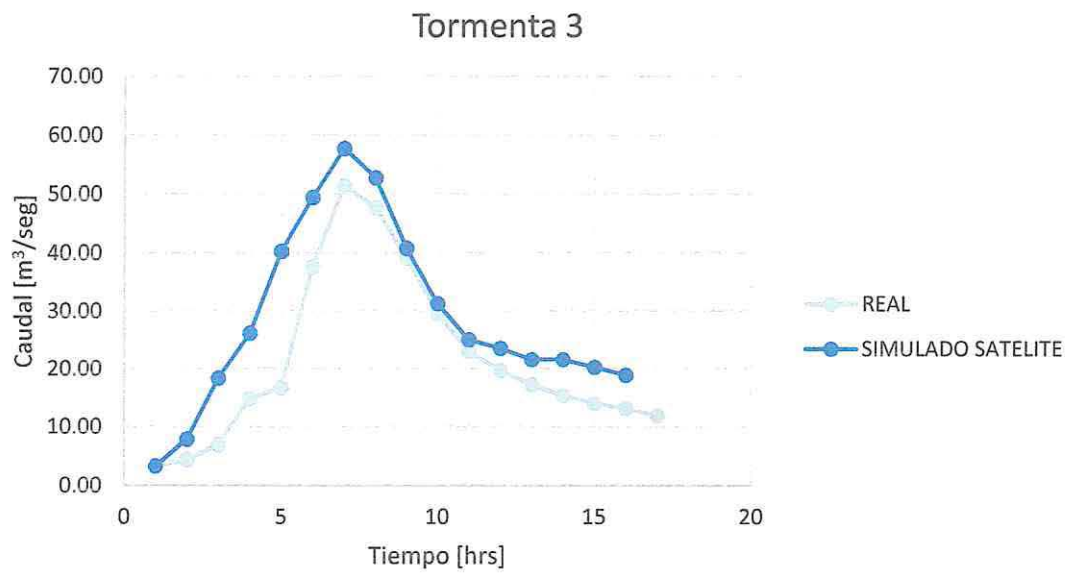


Figura 6.26: Gráfico validado por simulación en HEC-HMS tormenta 3.

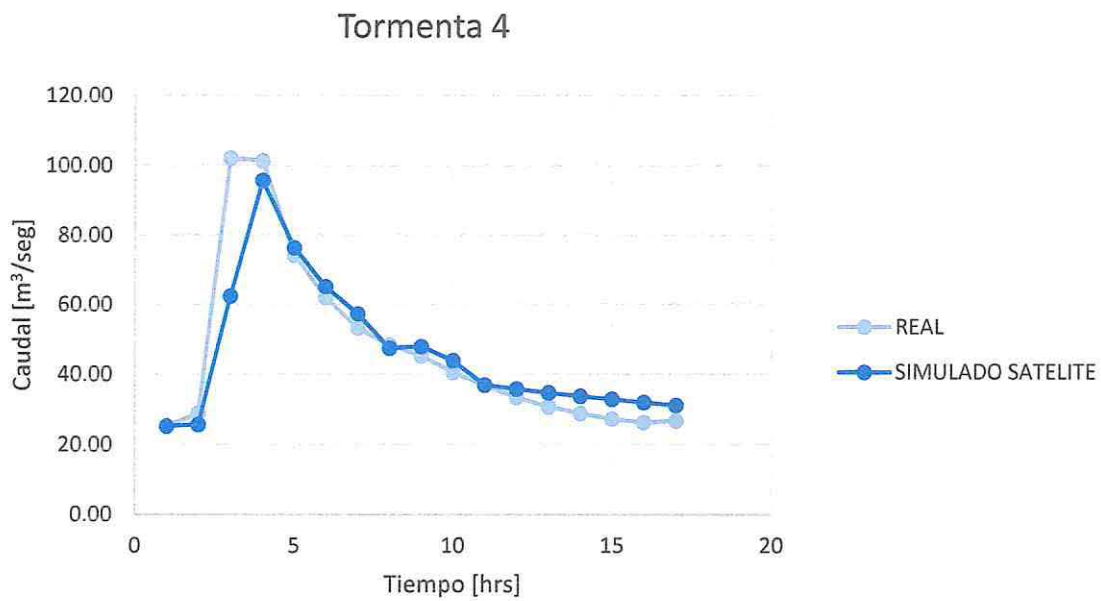


Figura 6.27: Gráfico validado por simulación en HEC-HMS tormenta 4.

## CAPÍTULO 6: Modelación de crecidas del Estero Upeo.

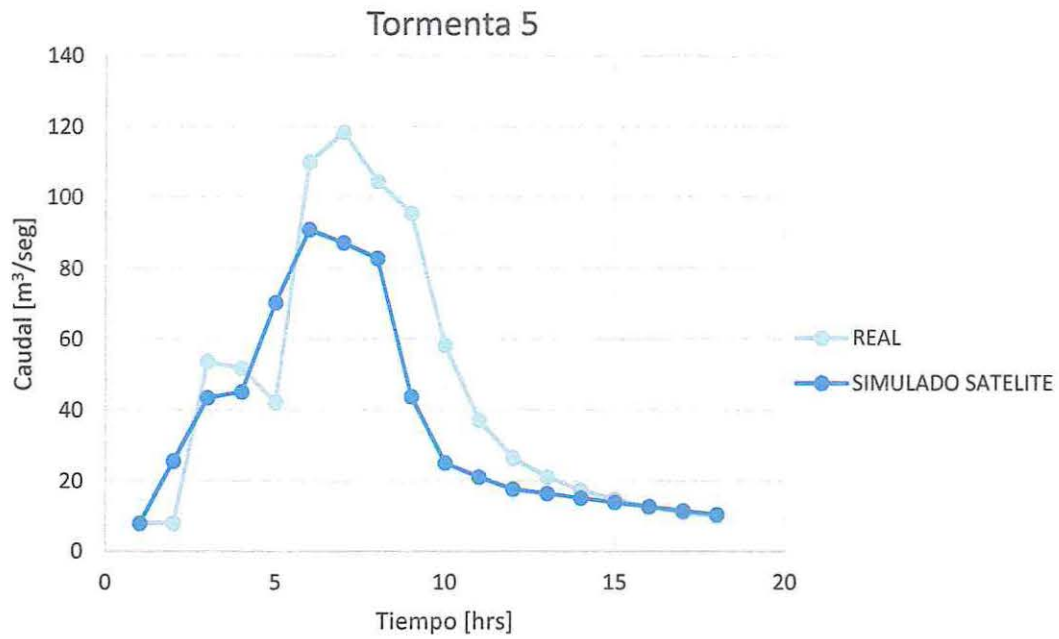


Figura 6.28: Gráfico validado por simulación en HEC-HMS tormenta 5.

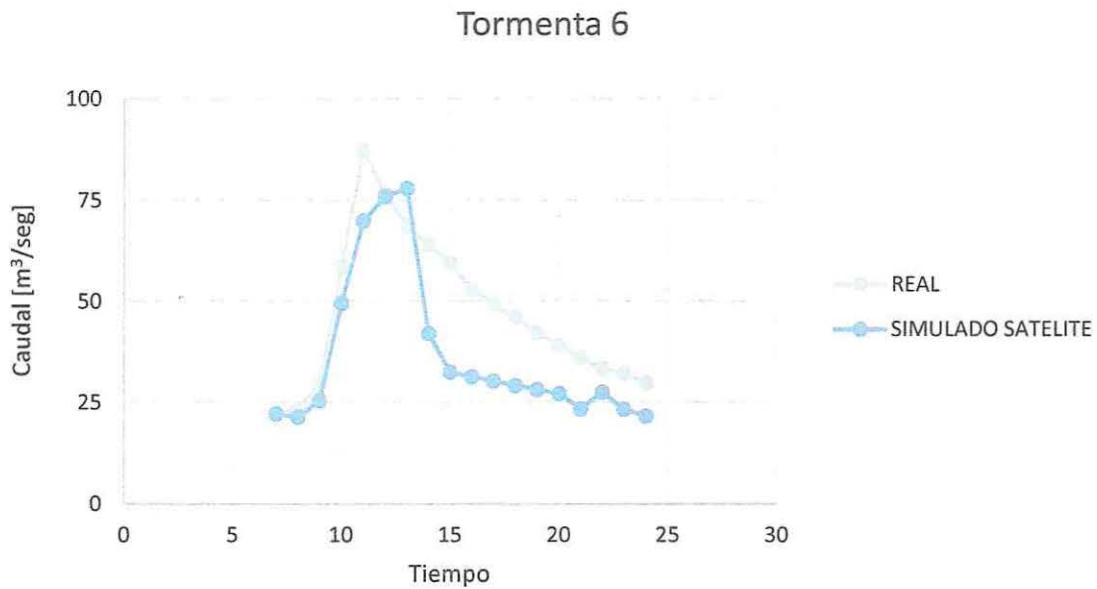


Figura 6.29: Gráfico validado por simulación en HEC-HMS tormenta 6.

## CAPÍTULO 6: Modelación de crecidas del Estero Upeo.

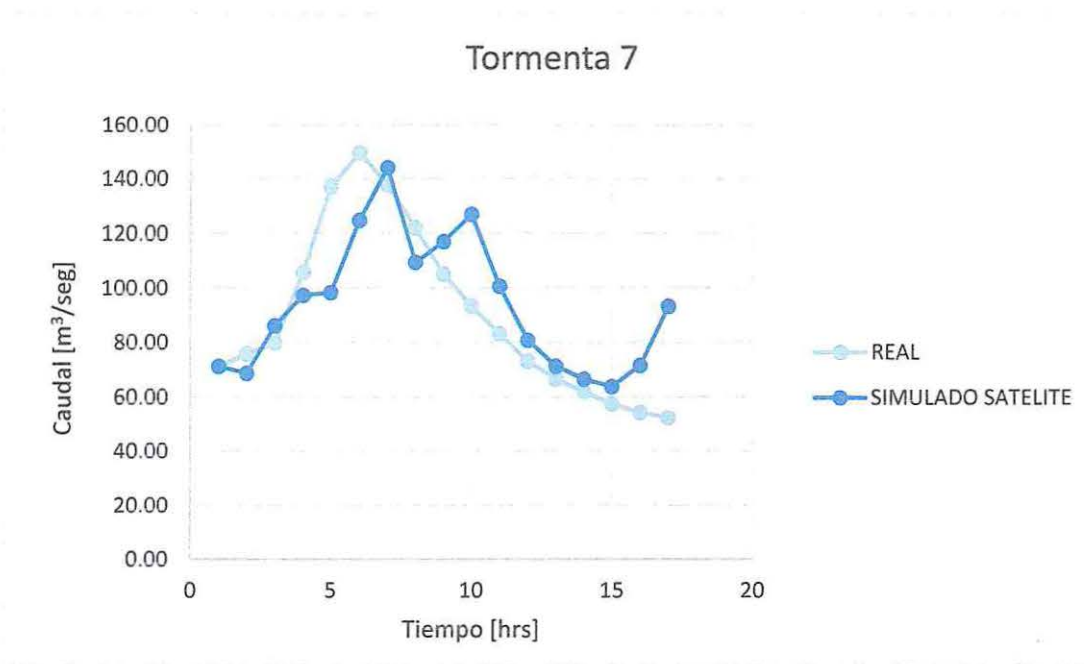


Figura 6.30: Gráfico validado por simulación en HEC-HMS tormenta 7.

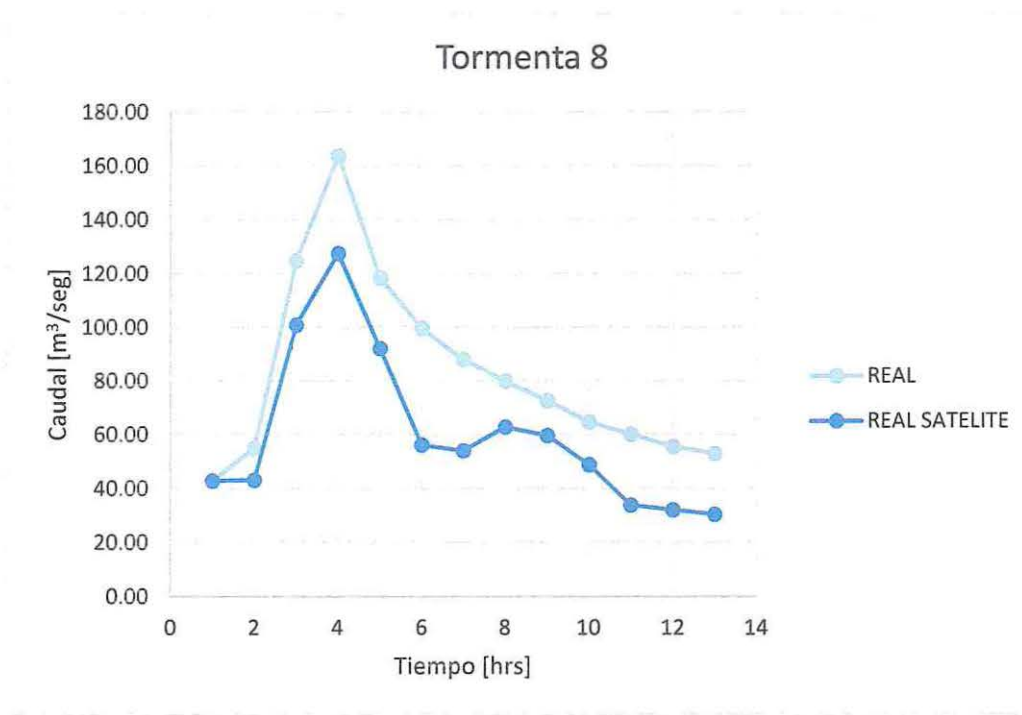


Figura 6.31: Gráfico validado por simulación en HEC-HMS tormenta 8.

## CAPÍTULO 6: Modelación de crecidas del Estero Upeo.

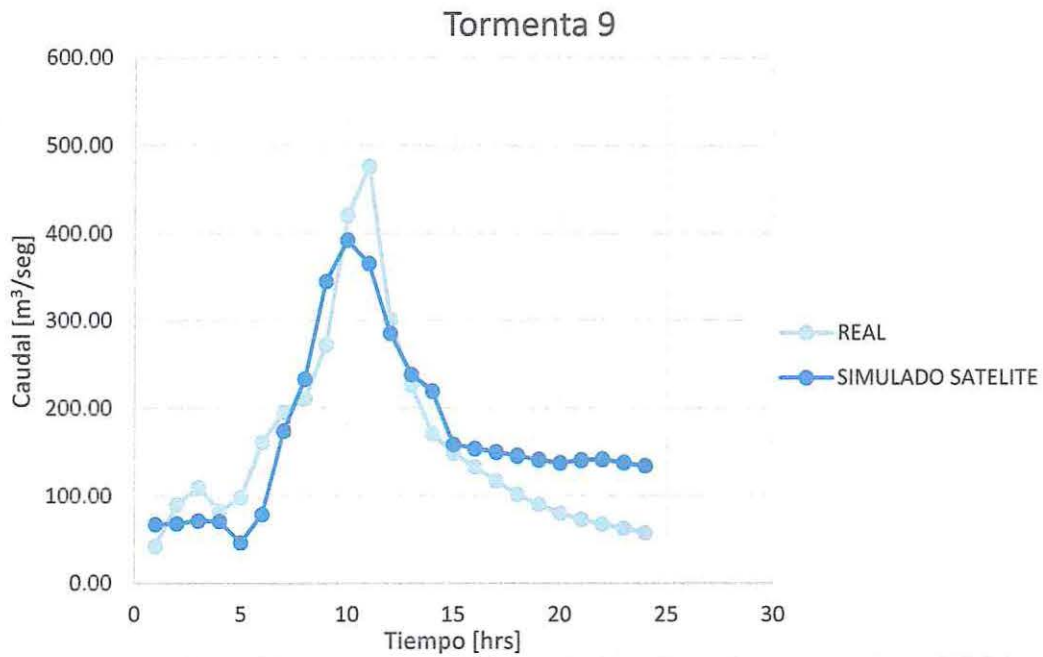


Figura 6.32: Gráfico validado por simulación en HEC-HMS tormenta 9.

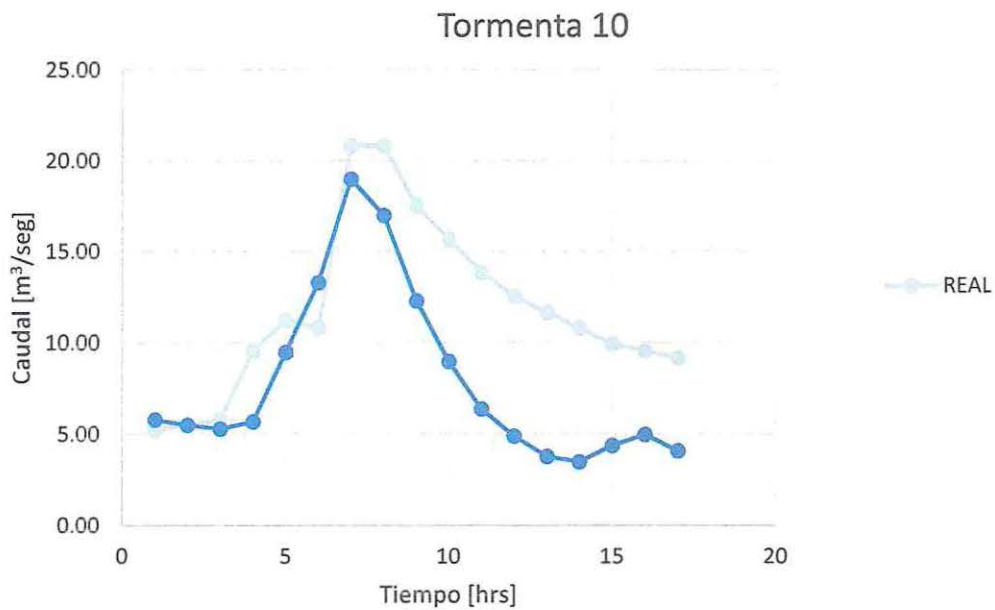


Figura 6.33: Gráfico validado por simulación en HEC-HMS tormenta 10.

## CAPÍTULO 6: Modelación de crecidas del Estero Upeo.

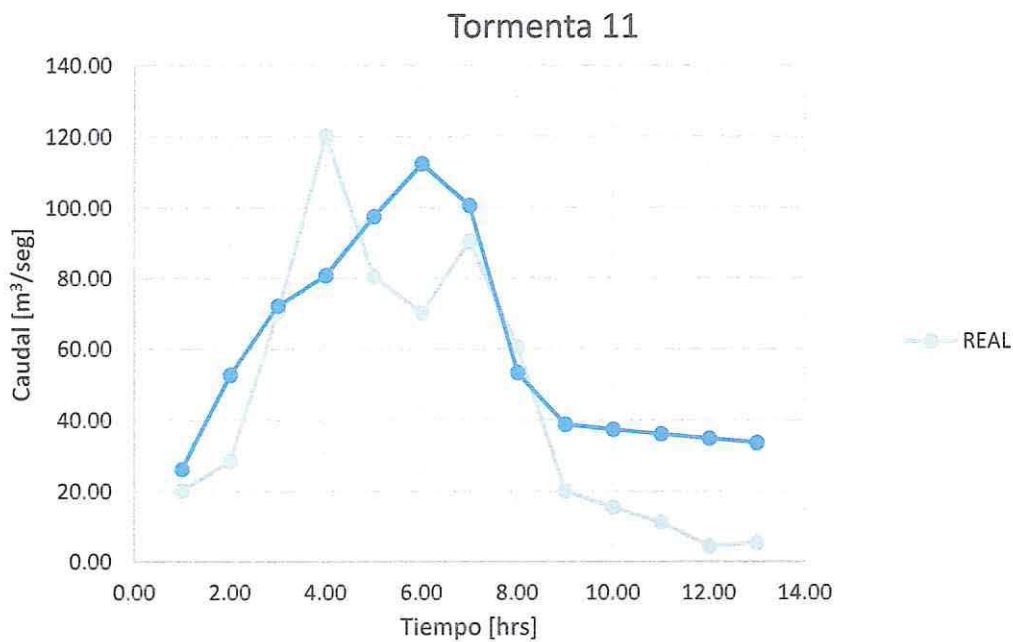


Figura 6.34: Gráfico validado por simulación en HEC-HMS tormenta 11.

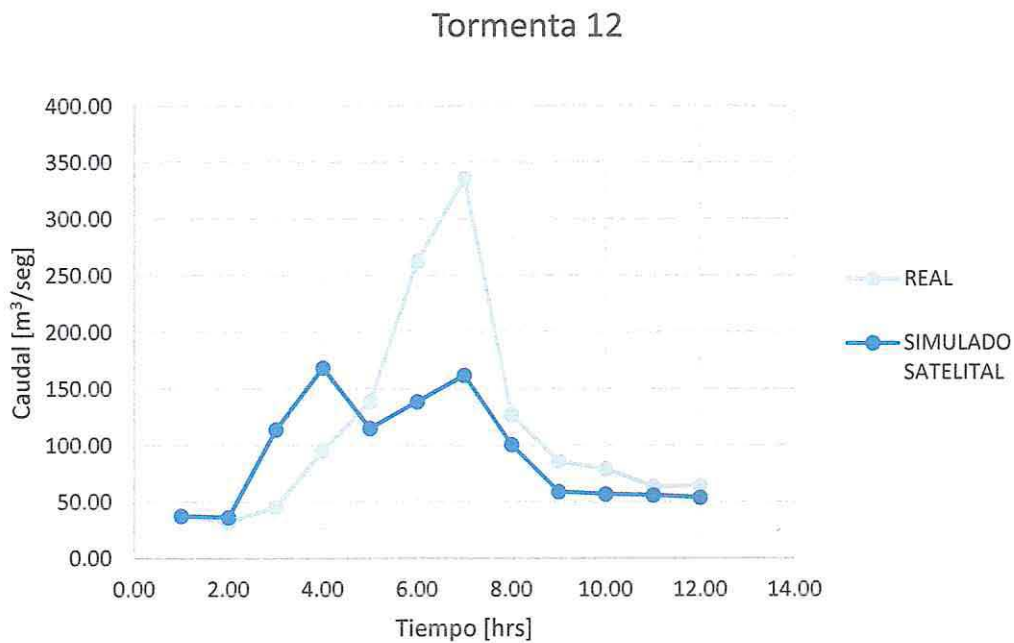
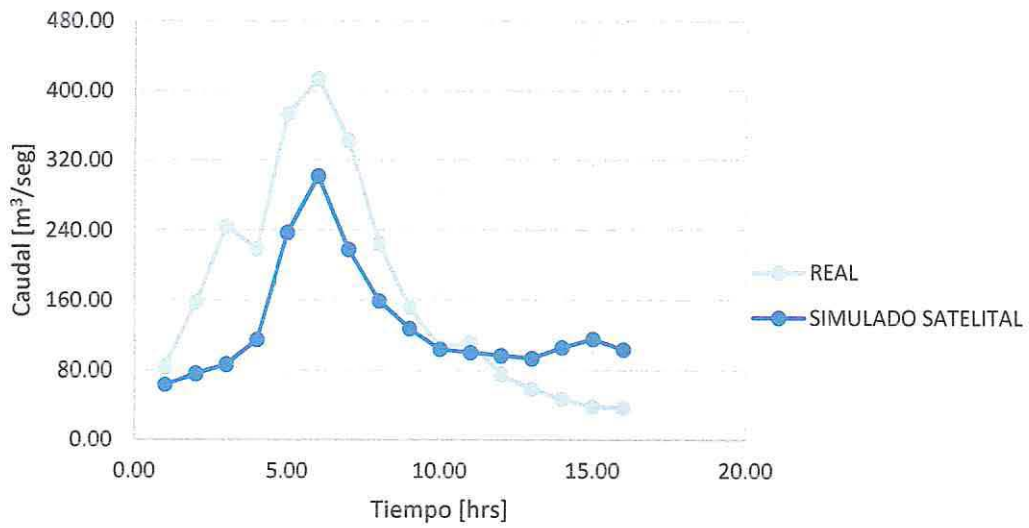


Figura 6.35: Gráfico validado por simulación en HEC-HMS tormenta 12.

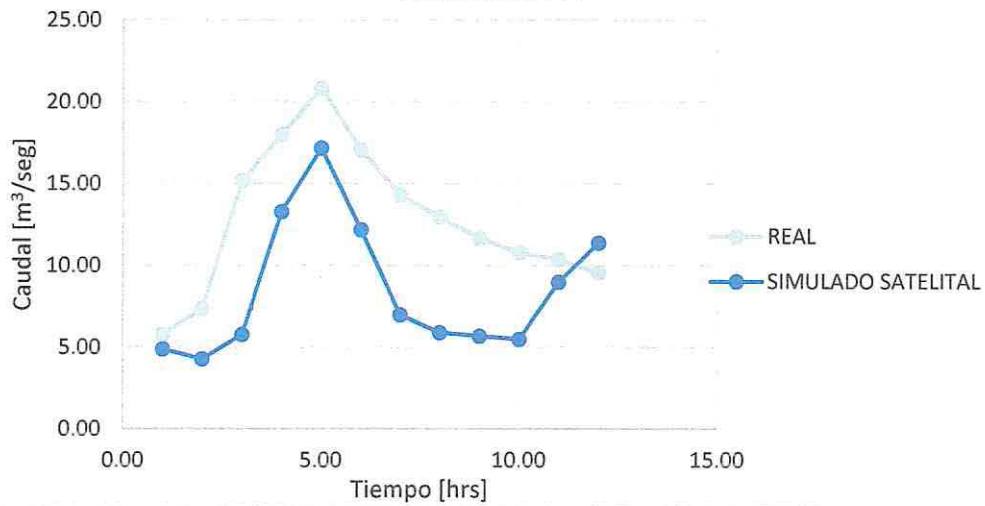
## CAPÍTULO 6: Modelación de crecidas del Estero Upeo.

### Tormenta 13



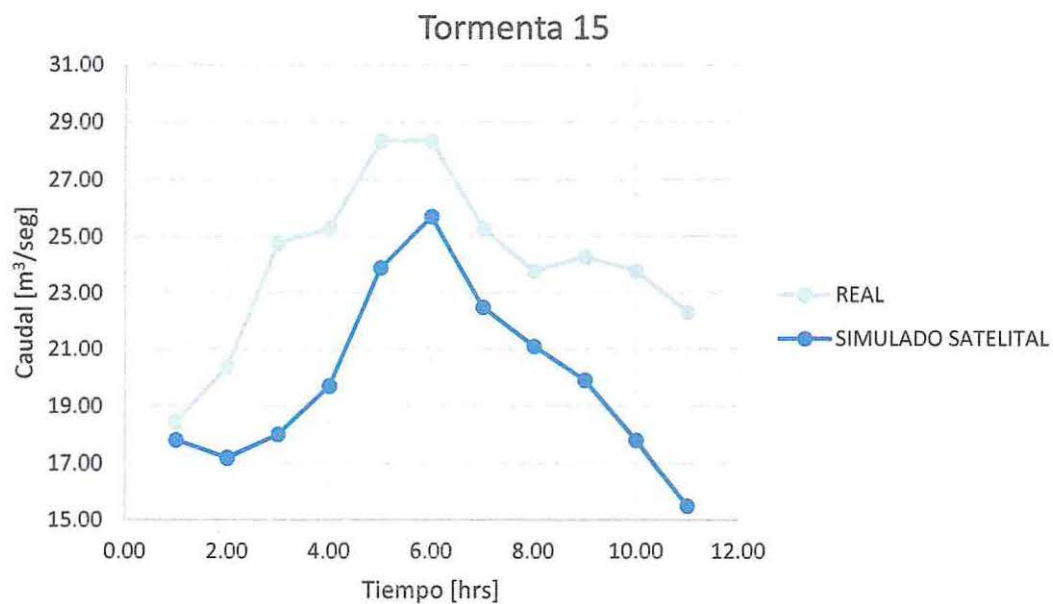
**Figura 6.36:** Gráfico validado por simulación en HEC-HMS tormenta 13.

### Tormenta 14



**Figura 6.37:** Gráfico validado por simulación en HEC-HMS tormenta 14.

## CAPÍTULO 6: Modelación de crecidas del Estero Upeo.



**Figura 6.38:** Gráfico validado por simulación en HEC-HMS tormenta 13.

## CAPÍTULO 7: Resultados

La etapa de calibración de los valores de Precipitación Media Observada (P.M.O.) y Precipitación Media Satelital (P.M.S.), arrojó resultados aceptables con magnitud de correlación  $R^2=0,8385$  por medio del análisis de regresión lineal realizado a las 32 tormentas. Para comprobar si las P.M.O. y P.M.S. tienen alguna relación representativa, se realizó la validación a las 12 tormentas seleccionadas. Obteniendo como resultado una correlación de  $R^2=0,855$  y siendo la unidad, una relación perfecta entre los datos pares (P.M.O. y P.M.S.).

Con la validación de las P.M.S se procede al desarrollo del objetivo principal de estudio, la simulación del cauce natural del Estero Upeo en Upeo. Teniendo en cuenta que las imágenes satelitales son representativas, se procede a la calibración del modelo con los valores reales de las estaciones meteorológicas, donde sirven como parámetros de entrada para la ejecución del programa HEC-HMS. Con este modelo simulado computacional se realiza un proceso de calibración a las variables físicas e hidrológicas de la cuenca. Estos parámetros están relacionados con el método de cálculos de pérdidas de escorrentía (Curva Número), donde en vez de tomar sólo un valor de CN representativo en la cuenca, se subdivide la cuenca obteniendo dos valores de CN, siendo estos últimos los más representativos. Para el ajuste del comportamiento del hidrograma, específicamente en la curva de descenso y agotamiento, se optó por utilizar un valor menor (0,75) al calculado (0,89) en la constante de recesión K. Los resultados de la calibración para los caudales reales simulados (tabla 6.8) arrojan, que el 80% de las 10 tormentas seleccionadas da un valor de Nash  $\geq 0,70$ , mientras que el 20% restante se encuentran en el límite de aceptación con Nash  $\geq 0,6$ , donde Nash = 1 es la simulación perfecta del modelo.

Con la calibración de los caudales simulados satelitales, se obtiene que el 70% de las tormentas analizadas tienen un valor de Nash  $\geq 0,6$ , lo cual se encuentra aceptable, en la tormenta 5 (ver tabla 6.13) da como resultado un valor bajo de Nash = 0,51, sin embargo los valores de los volúmenes de las curvas de la tormenta 5 son muy similares entre  $V_{real}= 792,98 \text{ m}^3$  y  $V_{sim}$  satelital =  $637,50 \text{ m}^3$ .

Con los valores aceptados en el proceso de calibración se procede a la validación del modelo de simulación, donde se debe considerar, que para la ejecución del programa los parámetros calculados en la etapa anterior se deben mantener fijos (no modificables). Como resultado de la validación de los caudales simulados (ver tabla 6.9) se obtuvieron valores aceptables con Nash  $\geq 0,67$  en un 80% de las 5 tormentas analizadas; en cambio, el 20% restante arrojó una relación baja de Nash = 0,52, probablemente este último valor fue influenciado o se vio afectado debido a factores externos desconocidos.

En la validación de los caudales simulados satelitales, se obtuvo como resultado un 40% de las tormentas sobre el valor de Nash  $\geq 0,76$  y el resto de las tormentas bordeando un valor de Nash  $\geq 0,6$  las cuales se encuentran al límite de la aceptación.

Los volúmenes analizados en el proceso de calibración y validación dan en la mayoría muy buenos resultados, a excepción de dos valores en el proceso de validación dando como resultado en uno de ellos casi el doble del real (ver tabla 6.12)

## CAPITULO 8: Conclusión

Las precipitaciones son almacenadas en un lugar común formándose así los esteros y ríos. Con el origen de estos afluentes comenzaron los cuestionamientos hidrológicos para ver el comportamiento del agua en la superficie terrestre, ya que el conocimiento de cómo se comporta este elemento vital, es fundamental como base para un estudio ingenieril.

La interpolación de los Polígonos de Thiessen aplicados en el cálculo de las precipitaciones medias diarias por pixel, generó un valor aceptable de calibración, en los parámetros de correlación. Se consideró válido el agregar la altura media del pixel como variable en la relación, pero existen grandes diferencias cuando se comparan valores extremos de precipitación, entonces, se recomienda restringir el uso en la validación de datos cuando el valor del pixel presente alturas sobre 701 m.s.n.m., ya que éste pixel obtuvo resultados menos representativos<sup>[22]</sup>.

El comportamiento de las imágenes satelitales fue el patrón principal para distribuir la precipitación real, como valor de entrada para el programa, por lo tanto información satelital y lluvia real, están directamente relacionadas, entonces los resultados obtenidos en los procesos de calibración y validación la mayoría son muy similares a excepción de 1 caso por cada uno.

Según los rangos estadísticos, el proceso de calibración de datos satelitales dio valores favorables dentro del rango óptimo, por lo tanto se concluye, que para la estimación de precipitaciones en la región de estudio, es factible el uso de datos proporcionados por el satélite TRMM 3B42 v7. Las magnitudes de las precipitaciones no arrojaron valores exactos con respecto a la información proporcionada por la DGA, pero estos datos en cuestión, no tienden a diferenciarse en demasía.

La modelación de datos hidrológicos en programas de simulación tiene cierta complejidad donde la cantidad de datos requeridos es alta, sin embargo, mientras mayor es la cantidad de valores de entrada para la ejecución del programa HEC-HMS, más detallados serán los resultados<sup>[28]</sup> Al subdividir la cuenca en 2 las variables aumentaron, por lo tanto, más cercana a la realidad será la simulación, estas variables físicas en especial las del método de la Curva Número y del Hidrograma Unitario fueron calibradas con un resultado satisfactorio.

Los valores de los caudales simulados (gráficos capítulos 6.3.7) se consideran aceptables ya que al observar las curvas, éstos valores se encuentran cercanos a la realidad ( $E=0,714$ )<sup>[29]</sup>. Hay diferencias de caudales punta de 50 m<sup>3</sup>/s, a excepción de un caso, en donde el valor del caudal real sobrepasa al valor simulado satelital. Es probable que la medición de datos satelitales no haya sido correcta a causa de factores externos. Asimismo los valores de las estaciones meteorológicas, también pudieron verse afectados por factores climatológicos, como puede ser que durante una tormenta, ésta trajo vientos fuertes provocando la alteración de las medidas. Son muchos los factores que pueden afectar una medición de nuestras dos fuentes informáticas.

La comparación de los volúmenes calculados en los eventos de simulación tanto en calibración como validación, dependiendo de la perspectiva que se utilice, arrojarán buenos o malos resultados, ya que en este caso y en otros proyectos de ingeniería el objetivo de una simulación de caudal, es calcular la magnitud del caudal punta antes que el volumen.

La cuenca del estero Upeo resultó muy compleja de analizar, debido a la escasez de datos físicos e hidrológicos disponibles. Las magnitudes de los datos reales muestran un gran caudal bordeando el rango de valores máximos (hasta 500 m<sup>3</sup>/s), esto debe tener algún tipo de relación con las intensidades de las precipitaciones vinculadas al sistema climático presentado en la zona de estudio<sup>[5]</sup>.

## CAPITULO 8: Conclusión

Los grandes cambios en el ciclo hidrológico, van directamente relacionados a la disminución de precipitación en zonas secas y al aumento de lluvias en zonas lluviosas, esto debido a que la temperatura ambiental del planeta sigue en aumento, por lo tanto tendrá más influencia en el ciclo y será más difícil de estudiar el comportamiento hidrológico del agua.

Hay que tener en consideración que la misión principal del satélite es vigilar el calentamiento global, estudiar su comportamiento para realizar predicciones sobre los niveles futuros de dióxido de carbono y su impacto e influencia en la alteración de la climatología del planeta.

La información proporcionada por el satélite artificial, brinda herramientas no consideradas (Imágenes Térmicas e Imágenes Infrarrojas) por muchos. Por esta razón sería bueno masificar esta fuente de datos como información alternativa, para poder así, complementar problemas comunes de escasez de datos hidrológicos. Es probable que en un futuro no muy distante existan fuentes de datos con tecnología más exacta para la captación de datos hidrológicos, donde los instrumentos de medición no necesiten una mantención rutinaria y sean más independientes en su manejo

Luego de calibrar y validar la modelación de los datos de caudales simulados satelitales, y compararlos con los datos de caudales reales, comprobándolos finalmente mediante sus volúmenes y el Método de Nash, se concluye que la metodología planteada en este estudio, es factible y aceptada. Pudiendo utilizarse satisfactoriamente en estudios de cálculos de caudales puntas provocados por tormentas, con el fin de facilitar la disponibilidad de información para realizar estudios ingenieriles.

## Bibliografía

1. Ciclo del Agua USGS (online), <http://water.usgs.gov/edu/watercyclespanish.html#evaporatio>
2. F. J Sanchez. *Evapotranspiración*. Universidad de Salamanca, España (USAL); 2010.
3. S. Solomon, D. Qin, M. Manning. *IPPC Fourth Assessment Report: Climate Change*, Cambridge, United Kingdom y New York, USA; 2007.
4. E. Sartori, *A mathematical model for predicting heat and mass transfer from a free water surface*. ISES Solar World Congress; 1987.
5. The National Center for Scientific Research (online) <http://www.cnrs.fr/>
6. A. Benitez. *Evolución de la hidrología en el Mundo y Chile*. Universidad de Chile; (online) <http://anales.uchile.cl/index.php/ANUC/article/viewFile/22944/24275>
7. V.Te Chow, D.R. Maidment y L.W. Mays, "*Hidrología Aplicada*", 1994.
8. J.C.I Dooge. *Linear theory of hydrological systems*. USDA, ARS, Tech. Bull; 1973
9. J. L. Ayuso. *Estimación del Hidrograma Unitario. Estudio comparativo de cuatro métodos lineales*. Universidad de Córdoba.
10. E. Arteaga, A. Benítez. *Método para la determinación de Hidrogramas Unitarios Sintéticos en Chile*. Tesis, Universidad de Chile, Santiago; 1985
11. Pizarro, R., & Novoa, P. *Elementos técnicos de hidrología*. La Serena, Chile: Universidad de Chile; 1986
12. R. Pizarro Tapia. F. Balocchi Contreras, F. Andrade Vilaro, C. Sangüesa Pool, *Análisis comparativo de tres hidrogramas unitarios sintéticos en dos cuencas mediterráneas de Chile, región del Maule, Universidad de Talca; 2013*
13. Agencia Servicio de información y Noticias Científicas (online), <http://www.agenciasinc.es/Multimedia/Infografias/Una-base-de-datos-sobre-los-satelites-que-orbitan-alrededor-de-la-Tierra>
14. *TRMM Mission Overview* (online) <http://pmm.nasa.gov/TRMM/mission-overview>

15. Cambio Climático Sodepaz, (online) <http://sodepaz.org/component/content/article/9-articulos/1361-cambio-climatico-y-crisis-del-agua.html>
16. F. Magaña Hernández, K. M. Bá,, V. H. Guerra Cobián. *Estimación del hidrograma de crecientes con modelación determinística y precipitaciones derivada de radar (Online)* [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-31952013000800001&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-31952013000800001&script=sci_arttext)
17. TRMM Online Visualization and Analysis System (TOVAS) 3-hourly TRMM and Other Rainfall Estimate, (online) [http://gdata1.sci.gsfc.nasa.gov/daac-bin/G3/gui.cgi?instance\\_id=TRMM\\_3-Hourly](http://gdata1.sci.gsfc.nasa.gov/daac-bin/G3/gui.cgi?instance_id=TRMM_3-Hourly)
18. A. Felicísimo, *Simulación de procesos de cuencas hidrológicas* (online) [http://www6.uniovi.es/~feli/CursoMDT/Tema\\_5.pdf](http://www6.uniovi.es/~feli/CursoMDT/Tema_5.pdf)
19. Documento Guía Programa HEC\_HMS, *Manual Hydrologic Modeling System*, 2000
20. P. Bedient, W. Huber. *Hydrology and floodplain analysis Prentice Hall*, 2002
21. Quantum Gis página oficial, (online) <http://www.qgis.org/es/site/about/index.htm>
22. Y. Morales, X. Vargas. *Estimación de la Precipitación en una tormenta usando Información Satelital. Aplicación en la zona central de Chile*; 2014
23. Dirección General de Agua, página principal (online), [snia.dga.cl/BNAConsultas/reportes](http://snia.dga.cl/BNAConsultas/reportes)
24. R. Almansa, M. Alonso, F. Baratech. *Restauración Hidrológico Forestal de Cuencas y Control de la Erosión*, 1994.
25. *Catastro de aguas de los ríos Lontue y Mataquito*, Dirección General de Aguas; 1985
26. H. A. Kofman. *Modelos y Simulaciones Computacionales en la Enseñanza de la*. Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina.
27. R. Pizarro, M. Hormazábal, L. León, C. Morales. Determinación empírica de los parámetros que modelan el tránsito de avenidas por el método Muskingum, en zonas de clima mediterráneo de Chile central.
28. Infraestructura de Datos Espaciales, IDE Servicio de Mapas del Ministerio del Medio Ambiente (online) [ide.mma.gob.cl](http://ide.mma.gob.cl)
29. S.M Ross. *Introducción a la estadística*; 2007