



UNIVERSIDAD DE VALPARAÍSO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

EVALUACIÓN DEL USO DE INFORMACIÓN
SATELITAL DE PRECIPITACIONES PARA
DIFERENTES MÉTODOS DE INFILTRACIÓN EN LA
CUENCA DEL RÍO DIGUILLÍN EN SAN LORENZO,
REGIÓN DEL BIOBÍO, CHILE.

Por

Ian Stefano Stemberga Alberti

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

Profesora Guía: Yerel Alejandra Morales Pino

Enero, 2017

Agradecimientos

Agradezco profundamente a cada integrante de mi familia, mamá, papá y hermanos, por el gran sacrificio y cariño brindado durante este proceso, y por la motivación y apoyo incondicional que me han otorgado en cada meta propuesta durante mi vida.

Gracias a mi profesora guía por confiar en mí, por la orientación, constancia y supervisión continua del desarrollo de mi trabajo, y por su inmenso apoyo y especial paciencia a lo largo de estos meses.

Índice

Glosario	6
Lista de abreviaturas y siglas	7
Lista de tablas	8
Lista de figuras	10
Capítulo 1	12
1. Introducción	12
1.1. Planteamiento del problema	12
1.2. Objetivos	14
1.2.1. Objetivo general	14
1.2.2. Objetivos específicos	14
1.3. Alcances del trabajo	15
1.4. Organización del documento	16
Capítulo 2	17
2.1.1. El ciclo hidrológico	17
2.1.2. Clasificación y descripción de los modelos hidrológicos	19
2.1.3. Índices de modelación hidrológica	21
2.1.4. Métodos para la modelación hidrológica	23
2.1.4.1. Método de estimación de pérdidas por infiltración del suelo	23
2.1.4.1.1. Método Soil Conservation Service (SCS)	24
2.1.4.1.2. Método Soil Moisture Accounting (SMA)	26
2.1.4.2. Hidrograma unitario	28
2.1.4.2.1. Hidrograma unitario sintético	29
2.1.4.2.2. Hidrograma unitario sintético de Snyder	29
2.1.4.2.3. Hidrograma unitario sintético con modificación de Benítez y Arteaga	30
2.1.4.3. Flujo base y recesión exponencial	31
2.1.4.3.1. Método de la curva de recesión exponencial	32
2.1.4.4. Tránsito de hidrogramas	33
2.1.4.4.1. Método de propagación de Muskingum	33
2.2. Sistema de modelación hidrológica	35
2.2.1. Hydrologic Engineering Center – Hydrology Modeling System	35
2.3. Percepción remota	36
2.3.1. Medición satelital de precipitaciones	36
2.3.1.1. Satélite "Tropical Rainfall Measuring Mission" (TRMM)	36
Capítulo 3	38
3. Estimación del uso de información satelital de precipitaciones	38
3.1. Generalidades	38
3.2. Identificación de la zona de estudio	38
3.3. Metodología	40
3.4. Calibración	40
3.4.1. Precipitación media observada por pixel	42
3.4.2. Precipitación media satelital por pixel	44
3.4.3. Resultados calibración	45
3.5. Validación	49
3.5.1. Precipitación media observada por pixel	50

3.5.2. Precipitación media satelital por píxel	50
3.5.3. Precipitación media satelital corregida	50
3.5.4. Resultados validación	51
Capítulo 4	54
4. Descripción de la cuenca de estudio	54
4.1. Identificación de la zona de estudio	54
4.2. Área de estudio	55
4.3. Geografía	55
4.3.1. Clima	55
4.3.2. Hidrogeología y volcanismo	56
4.3.3. Uso de suelo	57
4.3.4. Red hidrográfica	59
4.4. Información disponible	60
4.4.1. Pluviometría	60
4.4.1.1. Identificación de las estaciones meteorológicas	60
4.4.1.2. Registro de precipitaciones de las estaciones meteorológicas	61
4.4.1.3. Registro de precipitaciones de las imágenes satelitales	62
4.4.2. Fluviometría	64
Capítulo 5	66
5. Modelación hidrológica de la cuenca del río Diguillín en San Lorenzo	66
5.1. Construcción del modelo hidrológico	66
5.2. Modelo de cuenca	67
5.2.1. Delimitación de subcuencas	67
5.2.2. Clasificación del uso de suelo de las subcuencas	70
5.2.3. Representación esquemática del modelo de la cuenca	72
5.3. Estimación de parámetros para el modelo hidrológico	73
5.3.1. Elemento Subcuenca	73
5.3.1.1. Pérdidas por infiltración del suelo	73
5.3.1.1.1. Método Soil Conservation Service (SCS)	73
5.3.1.1.2. Método del Soil Moisture Accounting (SMA)	75
5.3.1.2. Transformación precipitación-escorrentía	79
5.3.1.2.1. Hidrograma unitario sintético de Snyder	79
5.3.1.3. Flujo base y recesión exponencial	81
5.3.2. Elemento Río	82
5.3.2.1. Tránsito de Hidrogramas – Método de propagación de Muskingum	82
5.3.3. Elemento Unión/Salida	83
5.4. Modelo meteorológico	83
5.5. Especificaciones de control	84
5.6. Simulación del modelo hidrológico	84
5.6.1. Simulación por método SCS	84
5.6.1.1. Calibración del modelo	84
5.6.1.1.1. Tormentas de calibración	85
5.6.1.1.2. Resultados indicadores de modelación hidrológica	86
5.6.1.1.3. Gráficos tormentas de calibración	86
5.6.1.2. Validación del modelo con datos de precipitación observada	89
5.6.1.2.1. Tormentas de validación	89
5.6.1.2.2. Resultados indicadores de modelación hidrológica	89
5.6.1.2.3. Gráficos tormentas de validación	89
5.6.1.3. Validación del modelo con datos de precipitación satelital	92

5.6.1.3.1. Tormentas de validación.....	92
5.6.1.3.2. Resultados indicadores de modelación hidrológica.....	93
5.6.1.3.3. Gráficos tormentas de validación.....	93
5.6.2. Simulación por método SMA.....	96
5.6.2.1. Calibración del modelo.....	96
5.6.2.1.1. Tormentas de calibración.....	96
5.6.2.1.2. Resultados indicadores de modelación hidrológica.....	97
5.6.2.1.3. Gráficos tormentas de calibración.....	97
5.6.2.2. Validación del modelo con datos de precipitación observada.....	100
5.6.2.2.1. Tormentas de validación.....	100
5.6.2.2.2. Resultados indicadores de modelación hidrológica.....	100
5.6.2.2.3. Gráficos tormentas de validación.....	100
5.6.2.3. Validación del modelo con datos de precipitación satelital.....	103
5.6.2.3.1. Tormentas de validación.....	103
5.6.2.3.2. Resultados indicadores de modelación hidrológica.....	103
5.6.2.3.3. Gráficos tormentas de validación.....	103
Capítulo 6.....	106
6. Análisis de resultados.....	106
6.1. Uso de registros satelitales de precipitaciones.....	106
6.2. Modelo hidrológico de la cuenca del río Diguillín en San Lorenzo.....	107
6.2.1. Modelo hidrológico con método SCS.....	107
6.2.2. Modelo hidrológico con método SMA.....	108
6.2.3. Análisis de contraste entre el método SCS y SMA.....	110
6.2.3.1. Contraste indicadores y volúmenes con uso de datos de precipitación observada.....	110
6.2.3.2. Contraste indicadores y volúmenes con uso de datos de precipitación satelital.....	111
6.2.3.3. Contraste datos observados y satelitales mediante indicadores y volúmenes para ambos métodos de infiltración.....	112
6.2.4. Análisis gráfico.....	113
6.2.4.1. Análisis gráfico del modelo con método SCS.....	113
6.2.4.2. Análisis gráfico del modelo con método SMA.....	114
6.2.4.3. Contraste gráfico entre método SCS y SMA.....	116
Capítulo 7.....	118
7. Conclusiones.....	118
Referencias.....	120
Anexos.....	124
Anexo A : Gráficos tormentas de calibración por método SCS.....	124
Anexo B : Gráficos tormentas de validación con datos observados por método SCS.....	133
Anexo C : Gráficos tormentas de validación con datos satelitales por método SCS.....	139
Anexo D : Gráficos tormentas de calibración por método SMA.....	145
Anexo E : Gráficos tormentas de validación con datos observados por método SMA.....	154
Anexo F : Gráficos tormentas de validación con datos satelitales por método SMA.....	160
Anexo G : Gráficos comparativos de tormentas de validación con datos observados y satelitales por ambos métodos de infiltración.....	166

Glosario

Geographic Information System (GIS): corresponde a un sistema de información capaz de integrar, almacenar, editar, compartir y mostrar la información geográficamente referenciada.

Digital Elevation Model (DEM): es un modelo que realiza representaciones digitales de información cartográfica en un formato Raster, representa la superficie de la tierra mediante elevaciones del terreno.

Raster: es una matriz de celdas (o píxeles) organizadas en filas y columnas en la que cada celda representa una región geográfica y el valor en ese pixel se considera representativo para toda la superficie abarcada por él mismo.

Pixel: es la abreviatura del inglés, "*picture element*", corresponde a la menor unidad homogénea en color que forma parte de una imagen digital.

Lista de abreviaturas y siglas

DEM	Digital Elevation Model
GIS	Geographic Information System
HEC-HMS	Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System
NASA	National Aeronautics and Space Administration
JAXA	Japan Aerospace Exploration Agency
TRMM	Tropical Rain Measuring Mission
QGIS	Quantum GIS
UTM	Universal Transverse Mercator
DGA	Dirección General de Aguas
MMA	Ministerio del Medio Ambiente
SCS	Soil Conservation Service
SMA	Soil Moisture Accounting
CN	Curva Número
P.M.O.	Precipitación media observada
P.M.S.	Precipitación media satelital
P.M.Sc.	Precipitación media satelital corregida
NSE	Nash-Sutcliffe Efficiency
PBIAS	Percent BIAS
Q.S.P.O.	Caudal simulado con datos de precipitación observada
Q.S.P.S.	Caudal simulado con datos de precipitación satelital
V.A.O.	Volumen acumulado observado
V.A.S.P.O.	Volumen acumulado simulado con datos de precipitación observada
V.A.S.P.S.	Volumen acumulado simulado con datos de precipitación satelital

Lista de tablas

Tabla 2.1 - Interpretación de la eficiencia de Nash-Sutcliffe.	21
Tabla 2.2 - Valores referenciales para la interpretación del Porcentaje BIAS	22
Tabla 2.3 - Valores de la Curva Número (CN) para los distintos grupos hidrológicos del suelo	25
Tabla 2.4 - Valores modificados del hidrograma unitario sintético por Benítez y Arteaga	30
Tabla 2.5 - Características principales del satélite TRMM.....	37
Tabla 3.1 - Cobertura estaciones meteorológicas en la zona de estudio.	39
Tabla 3.2 - Descripción de las estaciones meteorológicas.....	40
Tabla 3.3 - Descripción de eventos seleccionados para etapa de calibración.	41
Tabla 3.4 - Precipitación media observada (P.M.O) pixeles de calibración	43
Tabla 3.5 - Precipitación media satelital (P.M.S) pixeles de calibración.....	45
Tabla 3.6 - Relación lineal, altura media e intercepto de cada pixel de calibración.	48
Tabla 3.7 - Pendiente de la regresión lineal.....	49
Tabla 3.8 - Descripción de eventos seleccionados para etapa de validación.	49
Tabla 3.9 - Precipitación media observada (P.M.O) y media satelital (P.M.S.) pixeles validación ..	50
Tabla 3.10 - Altura media e intercepto para cada pixel de validación.....	50
Tabla 3.11 - Precipitación media satelital corregida (P.M.Sc) pixeles de validación.....	51
Tabla 4.1 - Descripción de la estación meteorológica "Diguillín".	56
Tabla 4.2 - Usos de suelo y tipo de cubierta para la cuenca del río Diguillín en San Lorenzo.	58
Tabla 4.3 - Descripción de la red de drenaje de la cuenca del río Diguillín en San Lorenzo.	59
Tabla 4.4 - Descripción de las estaciones meteorológicas de la cuenca del río Diguillín en San Lorenzo.....	60
Tabla 4.5 - Área porcentual de la precipitación observada sobre la cuenca.	61
Tabla 4.6 - Área porcentual de precipitación satelital sobre la cuenca.....	63
Tabla 4.7 - Descripción de la estación fluviométrica "Río Diguillín en San Lorenzo".	64
Tabla 4.8 - Registro de caudales medios mensuales a 30 años.	65
Tabla 5.1 - Áreas de las Subcuencas 1 y 2.....	69
Tabla 5.2 - Clasificación usos de suelo Subcuenca 1.	70
Tabla 5.3 - Clasificación usos de suelo Subcuenca 2.	71
Tabla 5.4 - Determinación Número de Curva (CN) para los suelos de la Subcuenca 1.	73
Tabla 5.5 - Determinación Número de Curva (CN) para los suelos de la Subcuenca 2.	74
Tabla 5.6 - Número de Curva ponderado, Retención potencial y Abstracción inicial máxima para Subcuencas 1 y 2.	74
Tabla 5.7 - Parámetros del suelo en la estación fluviométrica "Río Diguillín en San Lorenzo (Atacalco)".	75
Tabla 5.8 - Descripción de las principales características de las series de suelos de las Subcuencas 1 y 2.	76
Tabla 5.9 - Clasificación hidrológica de los suelos.	76
Tabla 5.10 - Ponderación de superficies impermeables de los suelos de las Subcuencas 1 y 2.	77
Tabla 5.11 - Capacidad de almacenamiento de los diferentes tipos de suelo.....	77
Tabla 5.12 - Capacidad de infiltración de agua, según tipo de suelo.....	77
Tabla 5.13 - Capacidad de almacenamiento de agua en la "Tension Zone" según tipo de suelo.	78
Tabla 5.14 - Parámetros iniciales del método SMA para HEC-HMS.	78
Tabla 5.15 - Determinación de la pendiente media de las Subcuencas 1 y 2, según Mockornita.	79
Tabla 5.16 - Determinación de las variables para el cálculo del hidrograma unitario sintético de Snyder para las Subcuencas 1 y 2.	79
Tabla 5.17 - Parámetros del hidrograma unitario sintético según Benítez y Arteaga para las Subcuencas 1 y 2.	80
Tabla 5.18 - Eventos de tormenta para la determinación del coeficiente de decaimiento.	81
Tabla 5.19 - Determinación del coeficiente de decaimiento (K) para cada evento de tormenta.....	82

Tabla 5.20 - Determinación del factor de proporcionalidad (K) para el método de Muskingum.....	83
Tabla 5.21 - Resumen parámetros iniciales del método de Muskingum.....	83
Tabla 5.22 - Parámetros iniciales y finales para calibración del modelo por el método SCS.	85
Tabla 5.23 - Eventos de tormenta para la calibración del modelo.....	85
Tabla 5.24 - Resultados calibración del modelo por método SCS.	86
Tabla 5.25 - Eventos de tormenta para la validación del modelo.	89
Tabla 5.26 - Resultados validación modelo con datos precipitación observada por método SCS. .	89
Tabla 5.27 - Altura media e intercepto de los pixeles para corrección de imágenes satelitales.	92
Tabla 5.28 - Resumen comparativo entre precipitaciones satelitales y observadas por evento.	92
Tabla 5.29 - Resultados validación modelo con datos precipitación satelital por método SCS.	93
Tabla 5.30 - Parámetros iniciales y finales para calibración del modelo por el método SMA.	96
Tabla 5.31 - Resultados calibración del modelo por método SMA.....	97
Tabla 5.32 - Resultados validación modelo con datos precipitación observada por método SMA. 100	
Tabla 5.33 - Resultados validación modelo con datos precipitación satelital por método SMA.....	103
Tabla 6.1 - Análisis comparativo de indicadores y volúmenes simulados para la validación del modelo mediante datos de precipitación observada y satelital por método SCS.	108
Tabla 6.2 - Análisis comparativo de indicadores y volúmenes simulados para la validación del modelo mediante datos de precipitación observada y satelital por método SMA.	109
Tabla 6.3 - Comparación indicadores y volúmenes mediante método SCS y SMA para datos de precipitación observada.	110
Tabla 6.4 – Comparación entre volúmenes observados y simulados mediante método SCS y SMA para datos de precipitación observada.	110
Tabla 6.5 - Comparación indicadores y volúmenes mediante el método SCS y SMA para datos de precipitación satelital.	111
Tabla 6.6 - Comparación entre volúmenes observados y simulados mediante método SCS y SMA para datos de precipitación satelital.	112
Tabla 6.7 - Resumen comparativo de indicadores según datos de precipitación observada y satelital.	112
Tabla 6.8 - Análisis caudales punta utilizando método SCS.	113
Tabla 6.9 - Análisis curva de agotamiento con método SCS.....	114
Tabla 6.10 - Análisis caudales punta utilizando método SMA.....	114
Tabla 6.11 - Análisis curva de agotamiento con método SMA.	115
Tabla 6.12 - Resumen diferencias medias porcentuales de los caudales punta entre métodos de infiltración.	117
Tabla 6.13 - Resumen diferencias medias porcentuales de los caudales de agotamiento entre métodos de infiltración.	117

Lista de figuras

Figura 2.1 - El ciclo hidrológico.....	17
Figura 2.2 - Clasificación de modelos hidrológicos	20
Figura 2.3 - Diagrama infiltración de la precipitación en el suelo	23
Figura 2.4 - Representación esquemática de los niveles de infiltración que considera el método SMA.....	26
Figura 2.5 - Representación esquemática de los parámetros que considera el método SMA	27
Figura 2.6 - Partes del Hidrograma.....	29
Figura 2.7 - Hidrograma aislado para modelo de recesión exponencial.....	32
Figura 2.8 - Almacenamiento en prisma y en cuña en un tramo de cauce según Muskingum	33
Figura 2.9 - Instrumentos y sensores componentes del satélite TRMM.....	37
Figura 3.1 - Identificación de la zona de estudio, estaciones meteorológicas y pixeles utilizados. .	39
Figura 3.2 - Pixeles a utilizar para calibración y validación.	41
Figura 3.3 - Interpolación mediante polígonos de Thiessen.	42
Figura 3.4 - Ejemplo determinación de la Precipitación Media Observada para el pixel 4.....	43
Figura 3.5 - Ejemplo imagen satelital de precipitaciones e intensidades asociadas.	44
Figura 3.6 - Comparación precipitación media satelital y observada para Pixel 3.	45
Figura 3.7 - Comparación precipitación media satelital y observada para Pixel 4.	46
Figura 3.8 - Comparación precipitación media satelital y observada para Pixel 5.	46
Figura 3.9 - Comparación precipitación media satelital y observada para Pixel 7.	46
Figura 3.10 - Comparación precipitación media satelital y observada para Pixel 10.	47
Figura 3.11 - Comparación precipitación media satelital y observada para Pixel 14.	47
Figura 3.12 - Relación lineal para calibración.....	48
Figura 3.13 - Comparación precipitación media satelital corregida y observada para Pixel 1.	51
Figura 3.14 - Comparación precipitación media satelital corregida y observada para Pixel 2.	52
Figura 3.15 - Comparación precipitación media satelital corregida y observada para Pixel 6.	52
Figura 3.16 - Comparación precipitación media satelital corregida y observada para Pixel 9.	52
Figura 3.17 - Comparación precipitación media total obtenida a base de datos satelitales corregidos (P.M.Sc) y observados (P.M.O) para pixeles de validación.....	53
Figura 4.1 - Descripción de la zona de estudio.	55
Figura 4.2 - Climograma de la cuenca en estación meteorológica Diguillín.	56
Figura 4.3 - Composición mayoritaria de los suelos en la cuenca del río Diguillín en San Lorenzo. 57	
Figura 4.4 - Distribución general de usos de suelo de la cuenca del río Diguillín en San Lorenzo. . 57	
Figura 4.5 - Usos de suelo de la cuenca del río Diguillín en San Lorenzo.	59
Figura 4.6 - Red de drenaje de la cuenca del río Diguillín en San Lorenzo.	60
Figura 4.7 - Red de estaciones meteorológicas de la cuenca del río Diguillín en San Lorenzo..... 61	
Figura 4.8 - Área porcentual de la precipitación sobre la cuenca.	62
Figura 4.9 - Pixeles con registros de precipitación satelital en la zona de estudio.....	63
Figura 4.10 - Área porcentual de precipitación satelital sobre la cuenca.	64
Figura 4.11 - Estación fluviométrica de salida de la cuenca del río Diguillín en San Lorenzo..... 65	
Figura 4.12 - Curva de variación estacional con registro a 30 años.	65
Figura 5.1 - Modelo digital de elevaciones (DEM) para cuenca río Diguillín en San Lorenzo.	67
Figura 5.2 - División de la cuenca del río Diguillín en San Lorenzo según tipos de usos de suelo. 68	
Figura 5.3 - Identificación Subcuenca 1 y Subcuenca 2.	69
Figura 5.4 - Uso de suelo Subcuenca 1.	70
Figura 5.5 - Uso de suelo Subcuenca 2.....	71
Figura 5.6 - Interfaz gráfica modelo de la cuenca del río Diguillín en San Lorenzo en HEC-HMS. . 72	
Figura 5.7 - Hidrograma unitario sintético según Benítez y Arteaga para Subcuenca 2.	80
Figura 5.8 - Hidrograma unitario sintético según Benítez y Arteaga para Subcuenca 1.....	80
Figura 5.9 - Ejemplo separación del hidrograma y determinación del inicio de la curva recesiva. ...	81

Figura 5.10 - Tormenta de calibración N° 1 por método SCS.....	87
Figura 5.11 - Tormenta de calibración N° 2 por método SCS.....	88
Figura 5.12 - Tormenta de validación N° 1 con datos observados por método SCS	90
Figura 5.13 - Tormenta de validación N° 2 con datos observados por método SCS.....	91
Figura 5.14 - Tormenta de validación N° 1 con datos satelitales por método SCS.	94
Figura 5.15 - Tormenta de validación N° 2 con datos satelitales por método SCS.	95
Figura 5.16 - Tormenta de calibración N° 1 por método SMA.	98
Figura 5.17 - Tormenta de calibración N° 2 por método SMA.....	99
Figura 5.18 - Tormenta de validación N° 1 con datos observados por método SMA.	101
Figura 5.19 - Tormenta de validación N° 2 con datos observados por método SMA.	102
Figura 5.20 - Tormenta de validación N° 1 con datos satelitales por método SMA.	104
Figura 5.21 - Tormenta de validación N°2 con datos satelitales por método SMA.	105
Figura 6.1 - Resultados de la validación de pixeles.	107
Figura 6.2 - Tormenta de validación N° 4	116
Figura 6.3 - Tormenta de validación N° 7.	116

Capítulo 1

1. Introducción

1.1. Planteamiento del problema

El ciclo hidrológico describe la circulación general del agua en la Tierra, la que se presenta como una sucesión de etapas por las que atraviesa el agua al pasar de la atmósfera a la Tierra y volver a la atmósfera, como son: la evaporación desde el suelo, mar o aguas continentales; condensación de nubes; precipitación; acumulación de masas de agua en el suelo y re-evaporación. Estos ciclos se representan mediante diversos modelos, y en el caso del proceso de escorrentía, se simula a través de un modelo hidrológico precipitación – escorrentía.

Un modelo de cuenca es un grupo de abstracciones matemáticas que describen fases relevantes del ciclo hidrológico, con el objetivo de simular la conversión de la precipitación en escurrimiento. Para ello, cada cuenca hidrográfica posee un hidrograma unitario único, el cual representa de forma gráfica la relación entre caudal y precipitación en un determinado intervalo de tiempo, en donde la geografía y condición meteorológica son factores relevantes para su determinación.

Para simular la crecida de un cauce, es necesario la obtención de los registros de las precipitaciones y caudales punta que dan paso a la realización de un estudio de ingeniería civil, donde es imprescindible el conocimiento de estos factores para poder realizar un adecuado dimensionamiento de la infraestructura necesaria.

En la actualidad los registros oficiales son obtenidos mediante la Dirección General de Aguas (DGA) [1], entidad que posee a lo largo de Chile una red de estaciones meteorológicas y fluviométricas con datos de libre acceso. Pero es aquí donde surge la problemática, ya que estas estaciones registran datos en zonas puntuales de la geografía, tienen un radio limitado de cobertura, existen demoras en la publicación de información o están en mantención por largos períodos de tiempo, provocando que algún área se encuentre descubierta o simplemente no existan equipos para la medición.

En virtud de lo anterior, en el año 2014 y como búsqueda de nuevas fuentes de información, es que se realizó un estudio sobre la estimación de la precipitación en una tormenta usando información satelital proporcionada por el satélite "*Tropical Rain Measuring Mission (TRMM)*", aplicado a la zona central de Chile [2]. Adicionalmente, en el año 2015, se evaluó el uso de imágenes satelitales provenientes de TRMM para la obtención de datos de precipitación en la cuenca del Estero Upeo, Región del Maule [3] y en el 2016, en la cuenca del Río Purén, Región de la Araucanía [4].

En otros países, el uso de imágenes satelitales como alternativa para la obtención de datos de lluvia ya ha sido probada: se destaca el caso de Australia [5], el de Estados Unidos [6] y de Perú [7], lugares en donde se comparó la utilización de datos de pluviómetros terrestres con los del satélite TRMM, arrojando buenas correlaciones entre ambas variables.

El uso de esta alternativa no ha sido estudiado en otra zona del territorio nacional, por lo que surge la necesidad de evaluar su factibilidad en una cuenca y región diferente, ya que son recursos que se pueden obtener libremente a través de la página web de la NASA [8], y proporcionar información de manera más rápida en comparación con la que entregan las estaciones de la DGA. Es por ello, que se requiere encontrar una relación entre ambas fuentes con el propósito de dar cobertura a zonas donde no existan estaciones meteorológicas, o no se tengan registros por algún tipo de mantenimiento.

Una forma de poder evaluar el comportamiento de ambas fuentes de precipitación, es a través de una modelación hidrológica, en la cual se caracterizan cada uno de los procesos involucrados en el sistema hidrológico mediante la elección de diferentes métodos que representan de manera simplificada las condiciones reales de una cuenca, dentro de los cuales, se destaca la estimación de pérdidas por infiltración de agua en los suelos. Para ello, se contempla utilizar un método que caracteriza la cuenca en función del uso de suelo superficial y otro, en que se representen más detalladamente las capas subsuperficiales y subterráneas.

El primer método corresponde al *Soil Conservation Service* (SCS) [9], el cual es comúnmente usado en Chile y permite caracterizar una zona mediante una variable denominada Curva Número (CN), cuyo valor se puede determinar mediante tablas que están asociadas a distintas cubiertas de suelo en función de su permeabilidad, usos y contenido de agua, convirtiéndolo en una fórmula bastante razonable. Adicionalmente, se considera utilizar el método *Soil Moisture Accounting* (SMA) [10], el cual permite caracterizar el suelo según sus contenidos de humedad, mediante la incorporación de información respecto a las propiedades físicas de sus capas inferiores.

La utilización de imágenes satelitales de precipitación para la simulación de la crecida de un cauce, puede ser una herramienta útil para dar cobertura a zonas geográficas que no cuenten con registros pluviométricos de la DGA, o ser un complemento a éstos cuando existen registros incompletos de información. No obstante, es importante verificar si su uso se extiende al considerar los métodos de estimación de pérdidas por infiltración del suelo SCS y SMA, y determinar si es que existen diferencias entre ellos, y a su vez contrastarlos con la incorporación de registros observados.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Evaluar el empleo de información satelital de precipitaciones en contraste con el uso de registros fluviométricos y meteorológicos, mediante un modelo hidrológico en la cuenca del Río Diguillín en San Lorenzo, Región del Biobío, Chile, para diferentes alternativas de estimación de pérdidas por infiltración.

1.2.2. Objetivos específicos

- Establecer la calibración de las imágenes satelitales, mediante un análisis estadístico de éstas, junto con los registros de precipitación proporcionados por la DGA.
- Validar la existencia de relación de los datos proporcionados por las estaciones meteorológicas y la información satelital.
- Desarrollar el modelo hidrológico de la cuenca del río Diguillín en San Lorenzo.
- Evaluar la factibilidad del empleo de información satelital de precipitaciones, en contraste con los registros observados, para los métodos de infiltración del suelo: *Soil Conservation Service (SCS)* y *Soil Moisture Accounting (SMA)*.

1.3. Alcances del trabajo

- El estudio se llevará a cabo en la cuenca del Río Diguillín en San Lorenzo, la cual es subcuenca de la cuenca del Río Itata, ubicada en la Provincia de Ñuble, Región del Biobío, Chile.
- El estudio se enfocará en evaluar el uso de la información satelital de precipitaciones como herramienta alternativa o complementaria a las estaciones meteorológicas de la DGA. El uso de las imágenes se definirá mediante un análisis lineal que incorpore una variable física de la zona (altura media del pixel), la cual es usada en la ecuación que ajusta las imágenes a los valores observados.
- Los datos de precipitaciones observadas serán aquellas provenientes de las estaciones meteorológicas de la DGA, y la información se obtendrá del registro hidrológico en línea en la página web del organismo.
- La información satelital a analizar, será la captada por la misión satelital TRMM, que corresponde a la unión entre la NASA y la JAXA. Se ocuparán los datos proporcionados por el satélite TRMM 3B42 V7 (vigente desde el año 1997). Las imágenes satelitales se obtendrán de la página web de la NASA, las cuales vienen en formato NETCDF (lectura Raster).
- La información se analizará mediante el programa Quantum GIS (QGIS) 2.14.3 – Essen, sistema computacional que permite almacenar, manejar, analizar y representar todo tipo de información digital geográfica.
- Se utilizarán datos de precipitación enfocados en eventos de tormenta medidos entre el año 2000 y 2014. Los eventos a considerar tendrán una duración de entre 3 a 9 días.
- Se simularán las crecidas del cauce natural con el modelo hidrológico HEC-HMS 4.1. Las crecidas serán provocadas por datos de precipitación basados en los registros de las estaciones meteorológicas (mediante la interpolación por polígonos de Thiessen) y las imágenes satelitales. Ambos registros, se complementarán con los datos fisiométricos e hidrológicos que posea la hoya hidrográfica.
- Para la caracterización de la cuenca, se utilizarán los siguientes parámetros de entrada en el modelo hidrológico de HEC-HMS: los métodos de estimación de pérdidas por infiltración del suelo: SCS y SMA, el hidrograma unitario sintético de Snyder con modificación de Benítez y Arteaga, el método de separación del flujo base por la constante de recesión y el método de Muskingum, para el tránsito de hidrogramas.
- El desarrollo del modelo considerará dos procesos, uno de calibración, en el cual se busca ajustar el modelo mediante parámetros modificables utilizando criterios tomados por el modelador, para encontrar la mejor representación de los fenómenos observados, y el otro, de validación, en el que se da validez a los parámetros antes utilizados mediante una comparación entre caudales observados y simulados.
- La comparación de ambos modelos se realizará mediante indicadores de bondad, tales como: Eficiencia de Nash, Porcentaje BIAS y Correlación R^2 , y gráficamente, mediante el análisis al caudal punta, tiempo a la punta y a la curva de agotamiento del hidrograma. El contraste será mediante datos de precipitación de la DGA y datos aportados por las imágenes satelitales.

1.4. Organización del documento

Además del presente, el trabajo se compone de otros 6 capítulos, los que se describen a continuación:

En el capítulo 2, se realiza una revisión bibliográfica y de antecedentes generales que se utilizan para el desarrollo del trabajo, se describe el ciclo hidrológico mediante modelos, los indicadores que permiten determinar la eficiencia de éstos, así como la metodología a seguir para el desarrollo de la simulación de una cuenca hidrográfica, con el fin de determinar sus parámetros de entrada para la estimación de pérdidas, el cálculo del hidrograma, separación del flujo base y su tránsito a través del cauce. Posteriormente se muestran los fundamentos y bases teóricas que utiliza el modelo HEC-HMS, para la simulación de los diversos procesos hidrológicos involucrados en este estudio. Finalmente se introduce el concepto de percepción remota y su aplicación en la medición satelital de precipitaciones.

En el capítulo 3, se presenta la primera parte del desarrollo de este Trabajo de Título con la estimación del uso de la medición satelital de precipitaciones, donde se identifica la zona de estudio, se obtienen las precipitaciones satelitales y las precipitaciones observadas en terreno para un grupo de tormentas, con las que luego se calibra y valida su uso ante la obtención de una relación entre ellas.

En el capítulo 4, se procede a describir las características más relevantes de la cuenca seleccionada para el estudio. Además, se identifica la estación fluviométrica de salida y las estaciones meteorológicas que en ella inciden.

En el capítulo 5, se realiza la modelación hidrológica de la cuenca, se calculan los parámetros de entrada que éste requiere y se definen las simulaciones para la calibración y validación que serán llevadas a cabo. Acá se presentan los resultados obtenidos de las simulaciones mediante el uso de datos observados y de datos satelitales, así como también de los resultados obtenidos a través de los métodos de estimación de pérdidas por infiltración del suelo según el SCS y SMA.

En el capítulo 6, se presenta el análisis de resultados, donde se comparan los hidrogramas de crecida obtenidos mediante el uso de datos de precipitación observados y satelitales, junto con el respectivo análisis a los indicadores de modelación hidrológica logrados. Finalmente, los resultados obtenidos para el modelo son comparados con los dos métodos de estimación de pérdidas por infiltración del suelo, SCS y SMA, de manera de analizar el comportamiento de éste y la importancia relativa que cada uno de los parámetros puede tener sobre el resultado final.

Finalmente, en el capítulo 7 se presentan las conclusiones y la discusión de los resultados obtenidos.

Capítulo 2

2. Antecedentes Generales

2.1. Modelación hidrológica

2.1.1. El ciclo hidrológico

El agua está presente en la Tierra en sus tres estados físicos: líquida, sólida y gaseosa. Este recurso se encuentra en la atmósfera, los mares y océanos, y las masas terrestres. El agua puede desplazarse de un medio a otro y cambiar de estado en respuesta a su entorno, lo que constituye un medio físico dinámico, tanto en el espacio como en el tiempo. El vínculo entre sus interrelaciones y la manifestación de sus propiedades, son los que constituyen el denominado ciclo hidrológico.

El ciclo hidrológico es un proceso complejo que depende tanto del clima, meteorología, pedología y morfología de la Tierra [11]. Este ciclo corresponde a un modelo o idealización del movimiento de circulación del agua en la Tierra, e incluye, el movimiento y distribución del agua dentro de la litosfera (continentes), hidrosfera (océanos y mares) y atmósfera, al igual que los procesos de transferencia del agua entre estos elementos a través de los mecanismos de evaporación, precipitación y escorrentía [12].

En virtud de lo anterior, en la Figura 2.1, se describen en forma gráfica los elementos que constituyen el ciclo hidrológico [13].



Figura 2.1 - El ciclo hidrológico [13]

De la Figura 2.1, se observa que el ciclo hidrológico no posee principio ni fin y sus procesos ocurren en forma continua: el agua se evapora desde los océanos y de la superficie terrestre para volver a la atmósfera; el vapor de agua se transporta y se eleva hasta que condensa y precipita sobre la superficie terrestre o los océanos; el agua precipitada puede ser interceptada por la vegetación, convertirse en flujo superficial sobre el suelo, infiltrarse en él, escurrir por el suelo como flujo subsuperficial y descargar en ríos como escorrentía superficial; el agua infiltrada puede percolar profundamente para recargar el agua subterránea de donde emerge en manantiales o se desliza hacia ríos para formar la escorrentía superficial y finalmente fluye hacia el mar o se evapora, de manera que el ciclo continúe.

Uno de las principales componentes del ciclo hidrológico es el ciclo de escorrentía, el cual comprende desde la caída de la precipitación sobre la superficie de la Tierra hasta su manifestación como escorrentía (flujo sobre o bajo la superficie) a través de la sección de salida de una cuenca [14]. Esta última corresponde a la unidad física territorial que queda definida al seleccionar un punto o sección de salida de un cauce, por todo el territorio adyacente cuyas aguas fluyen o drenan hacia dicho punto [12].

Cabe señalar que, durante una tormenta no toda la precipitación produce escorrentía, ya que es posible que ésta se pierda a causa de fenómenos naturales tales como: la transpiración de las plantas, la evaporación a partir de la humedad del suelo, lagos, y embalses, entre otros. Asimismo, otra parte puede infiltrarse dependiendo de la permeabilidad del suelo y provocar el incremento de la napa subterránea, la que posteriormente se re incorpora al río en diferentes puntos de manera retardada [15].

Por lo tanto, el agua proveniente de la precipitación que llega hasta la superficie terrestre, una vez que parte de ella ha sido interceptada y evaporada, sigue diferentes caminos hasta la salida de la cuenca, de acuerdo a [16], pueden dividirse en:

- Escorrentía superficial: corresponde al agua de las precipitaciones que no es evaporada ni infiltrada, la cual escurre por la superficie de la cuenca.
- Escorrentía subsuperficial: es parte de la precipitación que se infiltra, la cual circula por la parte superior del terreno sin llegar a la zona saturada y reaparece en la superficie, incorporándose a la escorrentía superficial.
- Escorrentía subterránea: corresponde a parte del agua infiltrada, la cual recarga la zona saturada y circula por los acuíferos.

Adicionalmente, es importante señalar que existen dos conceptos que influyen en el comportamiento del proceso de escorrentía, uno referido a las características físicas de la cuenca y el otro, a la intensidad de las precipitaciones (tiempo). Estos parámetros, determinan la forma de la gráfica que representa a los volúmenes de agua generados por una precipitación en una determinada cuenca [17].

Por lo tanto, queda de manifiesto la importancia de las precipitaciones en la generación de caudales, donde su duración, intensidad y distribución espacial son la causa de la fluctuación de los volúmenes de flujo generados en un evento o tormenta. Además, la variabilidad en el espacio y tiempo de estas precipitaciones, son debidas a la circulación atmosférica y a factores locales [14].

En virtud de lo señalado en los párrafos anteriores y asociado a la cuantificación de los conceptos de ciclo hidrológico y ciclo de escorrentía, surge el concepto del balance hídrico, conservación de la masa o ecuación de continuidad. Lo cual se define según la Ecuación 2.1 como:

$$I - Q = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad 2.1$$

Donde:

- I y Q son los caudales de entrada y salida a un determinado volumen de control, respectivamente.
- V: es el almacenamiento al interior de dicho volumen.

Para un determinado intervalo de tiempo Δt , el balance de masas en una cuenca se representa por la Ecuación 2.2 como:

$$P - ET - Qc = \Delta V_{sup} + \Delta V_{sub} + \Delta V_h + \Delta H \quad 2.2$$

Donde:

- P: es la precipitación total ocurrida en un periodo de tiempo Δt sobre la cuenca.
- ET: es la evapotranspiración, la cual agrupa a la evaporación, retención y transpiración vegetal.
- Qc: es la escorrentía total efluente en la sección de salida de la cuenca.
- ΔV_{sup} , ΔV_{sub} , ΔV_h y ΔH : corresponden a la variación del volumen de agua almacenado en la cuenca en depresiones superficiales, lagos y embalses, en forma de agua subterránea, en forma de hielos, glaciares o nieve, y en forma de humedad contenida en los suelos, respectivamente.

2.1.2. Clasificación y descripción de los modelos hidrológicos

Para el análisis, gestión y planificación de los recursos hídricos, se han elaborado modelos hidrológicos que permiten reproducir el ciclo hidrológico de una cuenca considerando, por un lado, las variables meteorológicas como la precipitación y la temperatura del aire como datos de entrada, y por otro, las características físicas de la cuenca. De esta manera se estiman otras variables del ciclo, principalmente el escurrimiento superficial, el flujo subterráneo y la humedad del suelo [18].

Un modelo intenta reproducir, bajo diferentes formas y procesos, un fenómeno físico que ocurre sobre un territorio. Por lo tanto, en hidrología, un modelo busca representar un territorio delimitado por una divisoria de aguas (cuenca), y los fenómenos de transferencia de lluvia a caudal y de agua en el interior de ésta [19].

La simulación mediante modelos permite la representación de un sistema natural, el cual requiere de una serie de datos de entrada para lograr una buena aproximación. Es por ello que no se puede perder de vista que los modelos solo son buenos en la medida que los datos de entrada también lo sean.

Dentro de los diferentes tipos de modelos, se tienen los determinísticos y estocásticos. Los modelos determinísticos son aquellos en que las variables existentes en el algoritmo matemático están determinadas por leyes físicas, ya sea empíricas, conceptuales o teóricas y por lo tanto, su variabilidad está físicamente justificada. En cambio, los modelos estocásticos rigen una parte o la totalidad de sus variables por leyes del azar [20].

Además, estos modelos se pueden diferenciar según la representación espacial (agregados, semidistribuidos o distribuidos), según la forma de representar los procesos hidrológicos (métricos, conceptuales o físicamente basados) y según la extensión temporal en la que se puede aplicar el modelo (modelos de episodios o continuos) [19].

A continuación, se describen las principales características de cada uno de estos tipos de modelos.

a) Según su distribución espacial.

- **Modelos agregados:** Presentan distribución espacial uniforme en la cuenca, utiliza como variable la precipitación media y asume que los parámetros de los diferentes submodelos de los procesos hidrológicos son uniformes para toda la cuenca y permanecen constantes.
- **Modelos semidistribuidos:** Poseen una variabilidad espacial de la lluvia y de los parámetros de los submodelos que lo componen, mediante la división de la cuenca en varias subcuencas con lluvia y parámetros constantes en cada uno de ellos.

- **Modelos distribuidos:** Permiten la variabilidad espacial de la lluvia y de los parámetros, mediante la división de la cuenca en celdas o píxeles, en las que se simulan los diferentes procesos hidrológicos.
- b) Según su forma de representar los procesos hidrológicos.
- **Modelos métricos:** Presentan gran dependencia respecto de los datos observados, la relación entre lluvia y caudal es simulada mediante una variable de pérdida volumétrica, que engloba los procesos de pérdida por evaporación, almacenamiento de humedad en el suelo y recarga de aguas subterráneas, y una distribución temporal, que simula los diferentes modos dinámicos de respuesta de la cuenca.
 - **Modelos conceptuales:** Reproducen los procesos hidrológicos mediante una base de conocimiento inicial y la representación se realiza mediante relaciones simplificadas con parámetros que no se pueden medir físicamente en la realidad.
 - **Modelos físicamente basados:** Incluyen el comportamiento físico de los procesos hidrológicos, realizando la simulación de una cuenca mediante el uso de las ecuaciones de continuidad clásicas, resolviendo ecuaciones diferenciales de forma numérica mediante la aplicación de métodos de diferencias finitas o elementos finitos. Son de tipo distribuido.
- c) Según la extensión temporal en la cual se puede aplicar el modelo.
- **Modelos de episodio:** Se desarrollan para simulaciones de cortos intervalos de tiempo, normalmente para un único episodio de lluvia. Se centran en la simulación de los procesos de infiltración y escorrentía superficial, ya que su principal objetivo es la evaluación de la escorrentía directa para cálculo de avenidas.
 - **Modelos continuos:** Permiten la simulación de caudales diarios, mensuales y estacionales, es decir, permiten la simulación entre episodios de lluvia. Consideran la escorrentía directa mediante el flujo de superficie y subterráneo. Se centran en la simulación de la evapotranspiración y de los procesos que influyen a largo plazo en la recuperación de la humedad durante los periodos en los que no hay ocurrencia de precipitación. El objetivo principal es la simulación del balance de humedad total de la cuenca durante periodos largos de tiempo.

Finalmente, en la Figura 2.2, se resumen las clasificaciones de los modelos según distribución espacial y temporal. La zona superior representa los modelos agregados, la inferior los modelos distribuidos, el lado izquierdo los modelos hidrológicos independientes del tiempo y el derecho, los modelos de simulación continua, dependientes del tiempo [18]. Se destaca además que si se unen ambos criterios de clasificación se logran modelos más específicos, tal como, los modelos agregados e independientes del tiempo, en donde el caudal de salida de la cuenca luego de una tormenta determinada, puede ser representado como la relación entre variables meteorológicas (M) y características de la cuenca (C).

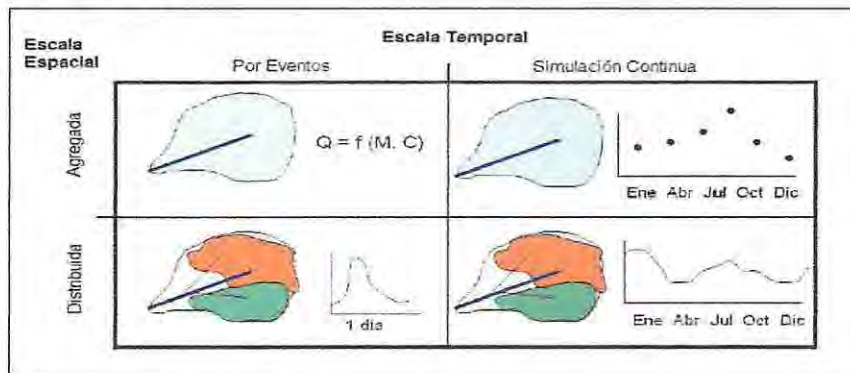


Figura 2.2 - Clasificación de modelos hidrológicos [18]

2.1.3. Índices de modelación hidrológica

Para evaluar la eficiencia de los modelos hidrológicos que simulan fenómenos naturales, existe una amplia gama de indicadores que dan cuenta de la similitud de las modelaciones con las observaciones [21]. A continuación, se describen los más utilizados.

a) Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE):

Este coeficiente establece la relación entre el comportamiento real y el simulado. El dominio matemático es de $-\infty$ a 1, donde la unidad representa la simulación perfecta. Un ajuste perfecto, quiere decir que la varianza de los errores es cero; vale cero cuando 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 desempeño deficiente del modelo [21]. Su formulación se indica en la Ecuación 2.3.

$$NSE = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs_i} - Q_{sim_i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs_i} - \overline{Q_{obs}})^2} \right) \quad 2.3$$

Donde:

- Q_{obs_i} : corresponde al valor i-ésimo del caudal observado [m^3/s].
- Q_{sim_i} : es el valor i-ésimo del caudal simulado [m^3/s].
- $\overline{Q_{obs}}$: promedio de los caudales observados durante el período de duración de un evento [m^3/s].

Algunos valores sugeridos para la interpretación de la Eficiencia de Nash-Sutcliffe, son los establecidos por Molnar [22] y se resumen en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 - Interpretación de la eficiencia de Nash-Sutcliffe.

NSE	Ajuste
< 0,2	Insuficiente
0,2 - 0,4	Satisfactorio
0,4 - 0,6	Bueno
0,6 - 0,8	Muy bueno
> 0,8	Excelente

b) Eficiencia de Nash-Sutcliffe con valores logarítmicos (Log NSE):

Para obtener este indicador, se utiliza la Ecuación 2.3 pero con los logaritmos de los caudales. Con este criterio, se consigue disminuir el problema de las cuencas con alto dinamismo de caudales, lo que se traduce en dejar los caudales altos a un nivel comparables con los bajos y así mejora el valor del indicador [21].

$$\text{Log NSE} = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n (\text{Log} Q_{obs_i} - \text{Log} Q_{sim_i})^2}{\sum_{i=1}^n (\text{Log} Q_{obs_i} - \text{Log} \overline{Q_{obs}})^2} \right) \quad 2.4$$

Donde:

- $\text{Log} Q_{obs_i}$: corresponde al valor i-ésimo del logaritmo del caudal observado [m^3/s].
- $\text{Log} Q_{sim_i}$: es el valor i-ésimo del logaritmo del caudal simulado [m^3/s].
- $\text{Log} \overline{Q_{obs}}$: es el logaritmo del promedio de los caudales observados durante el período de duración de un evento [m^3/s].

c) Coefficiente de determinación (R²):

Mide el grado de relación entre dos variables, en este caso las observadas y las simuladas, aplicándose normalmente cuando la relación que puede existir es lineal. Comprende un intervalo entre [-1, 1], donde los valores extremos presentan una buena correlación, mientras que si r =0 significa que no existe relación entre las variables. Sin embargo, este coeficiente sólo refleja la dispersión de los valores y no da cuenta de los desajustes sistemáticos que puedan existir, como sobreestimaciones o subestimaciones mantenidas en el tiempo [21]. Su valor se determina mediante la Ecuación 2.5.

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (Qobs_i - \overline{Qobs}) (Qsim_i - \overline{Qsim})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Qobs_i - \overline{Qobs})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Qsim_i - \overline{Qsim})^2}} \right)^2 \quad 2.5$$

Donde:

- Qobs_i: corresponde al valor i-ésimo del caudal observado [m³/s].
- Qsim_i: es el valor i-ésimo del caudal simulado [m³/s].
- \overline{Qobs} : es el promedio de los caudales observados durante el período de duración de un evento [m³/s].
- \overline{Qsim} : es el promedio de los caudales simulados durante el período de duración de un evento [m³/s].

d) Porcentaje BIAS (PBIAS):

Este indicador se utiliza para evaluar si los valores simulados fueron mayores o menores que los valores medidos. El valor óptimo es el 0, y un valor positivo indica que el modelo está subestimando los valores medidos, mientras que un valor negativo indica que el modelo sobreestima lo medido [23]. La relación para su determinación se indica en la Ecuación 2.6.

$$PBIAS = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (Qobs_i - Qsim_i)}{\sum_{i=1}^n Qobs_i} \right) \times 100 \quad 2.6$$

Donde:

- Qobs_i: corresponde al valor i-ésimo del caudal observado [m³/s].
- Qsim_i: es el valor i-ésimo del caudal simulado [m³/s].

En la Tabla 2.2, se indican los criterios recomendados por Moriasi [23] para la interpretación del indicador.

Tabla 2.2 - Valores referenciales para la interpretación del Porcentaje BIAS

PBIAS	Interpretación Modelo
PBIAS < ±10	Muy bueno
±10 ≤ PBIAS < ±15	Bueno
±15 ≤ PBIAS < ±25	Satisfactorio
PBIAS ≥ ±25	Insatisfactorio

2.1.4. Métodos para la modelación hidrológica

2.1.4.1. Método de estimación de pérdidas por infiltración del suelo

Cuando se produce una precipitación sobre alguna zona de la superficie terrestre, parte de ella puede infiltrar hacia las primeras capas más cercanas a la superficie del suelo, que luego puede volver a un curso de agua; y otra parte de agua puede infiltrarse hacia mayores profundidades, recargando acuíferos subterráneos. Vale decir, el agua puede viajar grandes distancias, permanecer por largos periodos como agua subterránea antes de retornar a la superficie, o infiltrarse hacia otros cuerpos de agua, como ríos u océanos.

La infiltración se refiere a la entrada de agua dentro del perfil de suelo desde la superficie. Al persistir la precipitación el suelo va aumentando su humedad, causando que la tasa de infiltración decrezca con el tiempo hasta que alcanza un valor estable. La tasa inicial de infiltración depende del contenido de humedad del suelo previo a la incorporación de agua desde la superficie. La tasa final de infiltración es equivalente a la conductividad hidráulica saturada del suelo [24].

En la Figura 2.3, se indica un diagrama que muestra cómo el agua proveniente de la precipitación se filtra en el suelo saturando la napa.

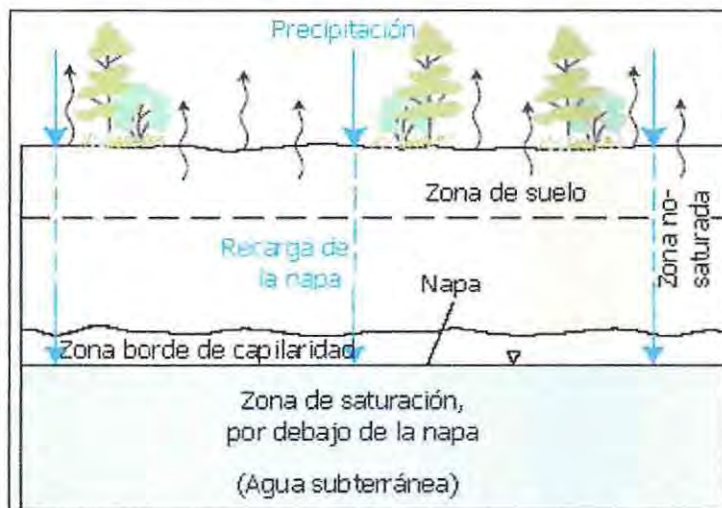


Figura 2.3 - Diagrama infiltración de la precipitación en el suelo [18]

La zona de suelo representa los espacios creados por las raíces de las plantas y permite que la precipitación se infiltre dentro del suelo. Luego, en el suelo subsuperficial se distingue una zona no-saturada y otra saturada. En la zona no saturada, los poros pueden encontrarse con agua, pero no completamente llenos, mientras que por debajo de esta se encuentra la zona saturada, donde el agua ocupa por completo los espacios que se encuentran entre las partículas del suelo y las rocas [25].

2.1.4.1.1. Método Soil Conservation Service (SCS)

Este método fue desarrollado por el Servicio de Conservación de Recursos Naturales de los Estados Unidos (*Natural Resources Conservation Service–NRCS*), o conocido también como Servicio de Conservación de Suelos (*Soil Conservation Service–SCS*), para calcular la precipitación efectiva como una función de la lluvia acumulada, la cobertura de suelo, el uso de suelo y las condiciones de humedad [26]. Esta metodología es la más empleada para transformar la precipitación total en precipitación efectiva, surgió de la observación del fenómeno hidrológico en distintos tipos de suelos y para distintas condiciones de humedad antecedente.

A partir de la representación gráfica de la profundidad de precipitación y la profundidad de exceso de precipitación o escorrentía directa, se obtuvo una familia de curvas que fueron estandarizadas a partir de un número adimensional, que se conoce como Curva Número (CN), la que varía entre 1 (toda la lluvia se infiltra) y 100 (toda la lluvia escurre), dependiendo del grado escurrimiento directo [27].

El método establece que la precipitación efectiva es siempre menor o igual a la precipitación, de manera similar, después de que la escorrentía se inicia, la profundidad adicional del agua retenida en la cuenca es menor o igual a alguna retención potencial máxima (S).

Existe una cierta cantidad de precipitación (I_a) para la cual no ocurrirá escorrentía, luego, la escorrentía potencial es la diferencia entre P e I_a . Sólo se producirá escorrentía cuando $P > I_a$

Las variables para la determinación de la Curva Número son:

- La precipitación, representada para un periodo de tiempo seleccionado.
- El complejo suelo – hidrológico que considera la interrelación suelo – vegetación.
- La condición de humedad antecedente.

La Ecuación 2.7, describe el método según la propuesta realizada por el SCS en 1972 [27]:

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad 2.7$$

Donde:

- Q: es la escorrentía directa o precipitación efectiva, en [mm].
- P: es la altura de precipitación, en [mm].
- I_a es la abstracción inicial (incluye almacenamiento en la superficie, intercepción e infiltración previo a la escorrentía), en [mm].
- S: es el parámetro de retención potencial máxima, en [mm].

El parámetro de retención potencial varía espacialmente debido a las características, usos y manejos de los suelos y de la pendiente. Además, para un mismo lugar, varía en el tiempo debido a cambios en el contenido de agua del suelo. Este parámetro se define según la Ecuación 2.8, donde CN es el valor de la curva número para el día.

$$S = 25,4 \times \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad 2.8$$

El resultado de estudios de cuencas pequeñas experimentales del método SCS, indica que la abstracción inicial (I_a) comúnmente se aproxima a $0,2S$, por lo que la Ecuación 2.8 se reformula y queda expresada según se indica en la Ecuación 2.9 de la siguiente forma.

$$Q_{surf} = \frac{(P - 0,2S)^2}{P + 0,8S} \quad 2.9$$

El SCS posee tablas que entregan valores de la Curva Número obtenidos para diferentes usos y tipos de suelos en los Estados Unidos, los cuales se resumen en la Tabla 2.3.

La estimación del coeficiente CN depende de dos factores principales. Uno referida al tipo de suelo, al cual se le fijan las condiciones de infiltración subsuperficial y la segunda, relacionada con la cobertura vegetativa, en la cual las plantas afectan la escorrentía directa y la absorción de agua en periodos húmedos [27].

En el método se pueden distinguir cuatro tipos de suelos: A, B, C y D. Donde el tipo A, tiene una alta capacidad de infiltración y el tipo D, es el que tiene menor capacidad de infiltración. El NRCS [9] [28] define estos grupos como:

- **Grupo A:** Suelos con elevada capacidad de infiltración y bajo potencial de escurrimiento, aun cuando están húmedos. Se trata principalmente de suelos profundos y con texturas gruesas (arenosa o areno – limosa).
- **Grupo B:** Suelos con moderada capacidad de infiltración cuando están saturados. Consisten principalmente en suelos de mediana a alta profundidad, con buen drenaje. La textura de éstos va de moderadamente finas a moderadamente gruesas (franco, franco – arenosa o arenosa).
- **Grupo C:** Suelos con escasa capacidad de infiltración una vez saturados. La textura de éstos va de moderadamente fina a fina (franco – arcillosa o arcillosa).
- **Grupo D:** Suelos muy arcillosos con muy baja capacidad de infiltración y elevado potencial de escurrimiento cuando están saturados.

Para una cuenca con varios tipos de suelo, la CN se calcula como el promedio ponderado por el área, tal como se indica en la Ecuación 2.10.

$$CN = \frac{\sum_{i=1}^n (A_i \times CNI_i)}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad 2.10$$

Donde:

- CNI: Es el valor del número de curva asociado a cada subdivisión de uso de suelo (Tabla 2.3).
- A_i: Es el área de cada cubierta vegetal aportantes en la cuenca [km²].

Tabla 2.3 - Valores de la Curva Número (CN) para los distintos grupos hidrológicos del suelo [16]

Descripción del uso de la tierra		Grupo hidrológico del suelo			
		A	B	C	D
Tierra cultivada	Sin tratamientos de conservación	72	81	88	91
	Con tratamientos de conservación	62	71	78	81
Pastizales	Condiciones pobres	68	79	86	89
	Condiciones óptimas	39	61	74	80
Vegas de ríos	Condiciones óptimas	30	58	71	78
Bosques	Troncos delgados, cubierta pobre, sin hierbas	45	66	77	83
	Cubierta buena	25	55	70	77
Áreas abiertas, césped, parques, campos de golf	Óptimas condiciones: cubierta pasto en el 75% o más	39	61	74	80
	Condiciones aceptables: cubierta pasto en el 50 al 75%	49	69	79	84
Áreas comerciales de negocios	85% impermeables	89	92	94	95
Distritos industriales	72% impermeables	81	88	91	93
Residencial: Tamaño promedio lote	1/8 acre o menos	77	85	90	92
	1/4 acre	61	75	83	87
	1/3 acre	57	72	81	86
	1/2 acre	54	70	80	85
	1 acre	51	68	79	84
Parqueaderos	pavimentados, techos, accesos, etc.	98	98	98	98
Calles y carreteras	Pavimentados con cunetas y alcantarillados	98	98	98	98
	Grava	76	85	89	91
	Tierra	72	82	87	89

2.1.4.1.2. Método Soil Moisture Accounting (SMA)

Este método representa la cuenca hidrográfica con una serie de estratos de almacenamiento. Además, toma en cuenta el contenido de humedad del suelo y simula el movimiento de agua en capas superficiales y el almacenamiento de ésta en la vegetación, en la superficie del suelo y en estratos de aguas subterráneas. Dada la precipitación y la evapotranspiración potencial, el método calcula la escorrentía de la superficie de la cuenca, el flujo de agua subterránea, las pérdidas debido a la evapotranspiración potencial y, la percolación profunda sobre toda la cuenca [29].

En la Figura 2.4, se representan de manera esquemática los procesos en una cuenca mediante un conjunto de capas o depósitos en la que se pueden ver las conexiones o flujos de agua existentes entre los mismos. Las tasas de flujo de entrada, flujos de salida y las capacidades de los estratos, controlan el volumen de agua ganada o perdida en cada uno de estos componentes de almacenamiento. El contenido actual de almacenamiento se calcula durante la simulación y varía continuamente durante y entre tormentas.

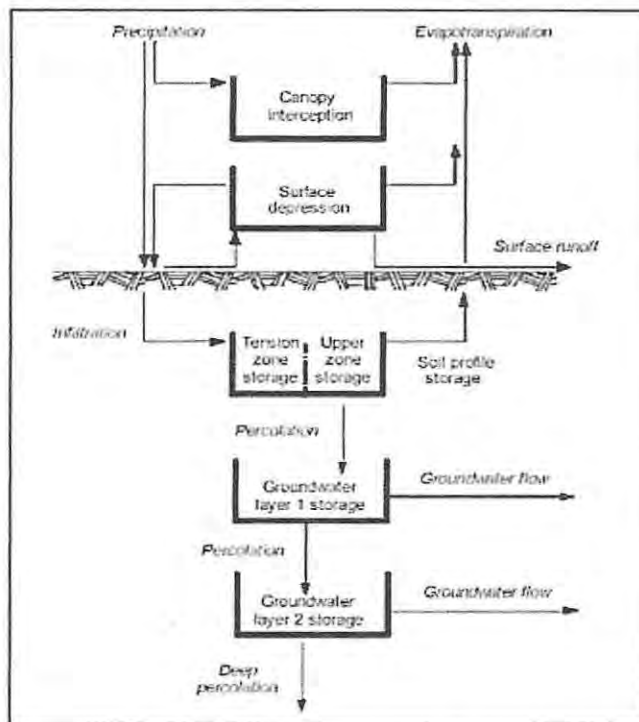


Figura 2.4 - Representación esquemática de los niveles de infiltración que considera el método SMA [29]

Tal como se ilustra en la Figura 2.4, este procedimiento considera cinco niveles de retención y almacenamiento de agua [10], los que se describen a continuación:

- a) **Intercepción en la cubierta vegetal (*Interception Canopy*):** Representa la parte de la precipitación que no alcanza el suelo porque es retenida en las plantas. La única entrada son las precipitaciones y la única salida es la evapotranspiración.
- b) **Almacenamiento en depresiones superficiales (*Surface depression storage*):** Es el volumen de agua retenido en las irregularidades de la superficie del terreno. La entrada son las precipitaciones que no han sido interceptadas por la vegetación y que exceden la capacidad de infiltración. Las salidas son inicialmente la infiltración y la evapotranspiración. Posteriormente, si el volumen almacenado supera el máximo establecido, esta agua pasa a la escorrentía superficial.

- c) **Almacenamiento en el suelo (Soil profile storage):** La entrada es la infiltración desde la superficie (*Surface - interception storage*). Las salidas son la evapotranspiración y la percolación hacia el acuífero subyacente. Se distinguen dos zonas dentro del suelo:
- Zona superior (*Upper zone*): Parte del suelo que puede perder agua por evapotranspiración o por percolación. Corresponde al agua retenida o que ocupa los poros del suelo y es susceptible de ser atrapada por las raíces de las plantas o de ser arrastrada hacia abajo por la gravedad.
 - Zona de tensión (*Tension zone*): Parte del agua contenida en el suelo que se pierde solamente por evapotranspiración. Corresponde al agua adherida a las partículas del suelo. La evapotranspiración primero toma agua de la *Upper zone*, y posteriormente de la *Tension zone*.
- d) **Almacenamiento en los acuíferos (Groundwater storage):** Se distinguen dos niveles: un acuífero más superficial, "*Groundwater 1*", que recibe directamente la percolación del agua que no ha sido atrapada por la evapotranspiración y que ha excedido la capacidad de almacenamiento del suelo. Desde este acuífero más superficial, el agua puede incorporarse a la escorrentía subterránea (que puede alimentar el caudal base de los ríos) o bien percolar hacia un acuífero más profundo, "*Groundwater 2*". Análogamente, desde este acuífero el agua puede incorporarse a la escorrentía subterránea o percolar aún más profundamente; en este caso el modelo considera esta agua perdida, sale del sistema y no es considerada.

Cada nivel de retención del método SMA tiene asociados una serie de parámetros [29], los cuales se representan de manera esquemática en la Figura 2.5.

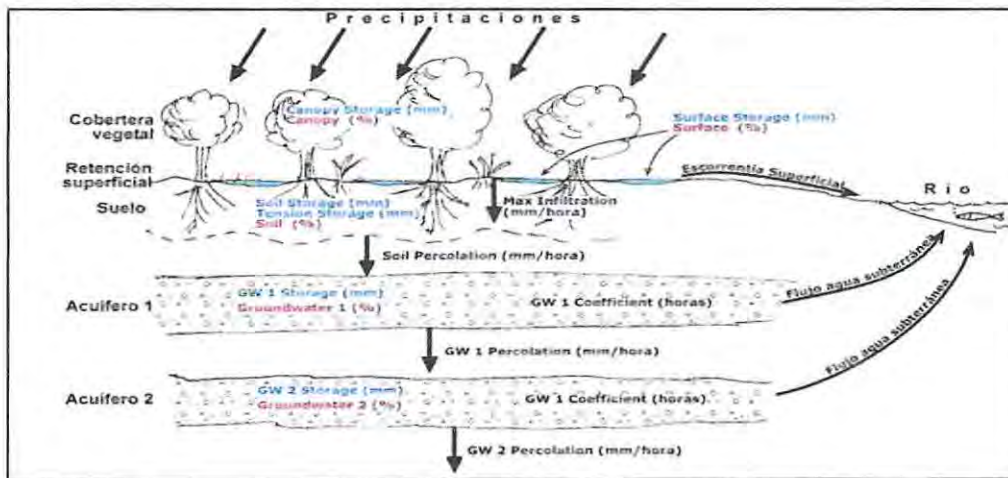


Figura 2.5 - Representación esquemática de los parámetros que considera el método SMA [29]

Los parámetros del método SMA que se indican en la Figura 2.5, son los siguientes:

- **Saturación del suelo (Soil) [%] y Saturación en acuífero 1 y 2 (Groundwater 1 & 2) [%]:** Representan las condiciones iniciales de cada una de las tres capas. Se refiere al porcentaje del almacenamiento total de la capa que se encuentra llena de agua al inicio de la simulación.
- **Almacenamiento del suelo (Soil Storage) [mm]:** Representa la capacidad de almacenamiento disponible en la capa de suelo.
- **Infiltración máxima (Max Infiltration) [mm/h]:** Indica el límite de infiltración del almacenamiento superficial hacia la capa de suelo.
- **Almacenamiento en tensión (Tension Storage) [mm]:** Especifica la cantidad de agua almacenada en el suelo que no drena bajo los efectos de la gravedad. Es la máxima capacidad de almacenamiento de agua dentro del estrato de suelo en la zona de tensión.

- **Percolación del suelo (Soil Percolation)** [mm/h]: indica el límite de percolación desde el almacenamiento de suelo hacia el agua subterránea superficial.
- **Almacenamiento en acuífero 1 y 2 (GW 1 & GW 2 Storage)** [mm]: Representan el almacenamiento total en la capa superior e inferior de agua subterránea, respectivamente.
- **Percolación del acuífero 1 y 2 (GW 1 & GW 2 Percolation)** [mm/h]: La percolación GW 1 indica la tasa de percolación desde la capa superior de agua subterránea hacia la inferior, mientras que la percolación GW 2 es la tasa de percolación profunda hacia fuera del sistema.
- **Coefficiente de almacenamiento de acuíferos 1 y 2 (GW 1 & GW 2 Coefficient)** [h]: Son el tiempo de retardo (*time lag*) que debe transcurrir para que el agua almacenada en cada uno de los niveles acuíferos salga 'lateralmente' y alimente al cauce como caudal base.
- **Impermeabilidad (Impervious)** [%]: Indica que, en esa parte de la subcuenca, toda el agua caída se considerará precipitación neta y pasará a la escorrentía superficial.

El desarrollo de proceso que sigue este método, se inicia al comenzar la precipitación, donde primero se completa la capacidad de retención de la vegetación (en *Canopy*, hasta alcanzar lo especificado en *Max Storage*).

Posteriormente, el agua que no es retenida por la vegetación pasa a la superficie del terreno. Desde esta retención superficial comienza la infiltración sin que se pueda superar la capacidad de infiltración (*Max Infiltration*). La evapotranspiración toma agua de esta retención superficial si no la encuentra en el nivel anterior (*Canopy*). Si a pesar de la infiltración y de la evapotranspiración, se excede el máximo almacenamiento que se haya indicado en *Surface Storage*, el agua sobrante pasa a la escorrentía superficial.

Luego, cuando el agua almacenada en el suelo supere el máximo que se haya especificado en *Tension Storage*, comenzará la percolación hacia el acuífero superficial; es decir, no es necesario que se exceda el valor máximo asignado al suelo en *Soil Storage*, sino que en cuanto exista agua, puede comenzar a percolar, sin superar el valor máximo posible indicado en *Soil Percolation*.

El agua percolada desde el suelo, alimenta el acuífero superficial (*Groundwater 1*) hasta su capacidad máxima establecida en *GW 1 Storage*, y desde ese acuífero el agua pasa al acuífero inferior (*Groundwater 2*) sin que el flujo pueda sobrepasar el máximo indicado en *GW 1 Percolation*, y análogamente, desde el acuífero profundo se pierde agua por percolación sin superar el límite indicado en *GW 2 Percolation*. Desde ambos niveles acuíferos puede salir un flujo lateral que alimentará el caudal base del hidrograma final resultante [10].

2.1.4.2. Hidrograma unitario

Un hidrograma es la representación gráfica de la aportación de una cuenca, el cual muestra la evolución del caudal de un río a lo largo del tiempo para una sección dada del mismo [30]. Asimismo, es un elemento primordial para definir el comportamiento hidrológico, en el cual se reflejan las aguas provenientes de la escorrentía superficial y subterránea [31].

En virtud de lo anterior, se destaca el concepto de hidrograma unitario, el cual fue introducido por L. Sherman en 1932 y se define como un hidrograma de escurrimiento directo, producido por una lluvia efectiva de lámina unitaria, de duración específica y repartida uniformemente en la cuenca [14].

Existen una serie de términos y supuestos con respecto a éstos hidrogramas:

- Se define como precipitación efectiva unitaria, a la precipitación efectiva caída sobre la totalidad de la cuenca en un tiempo unitario (t_u) y cuya magnitud como escorrentía sea también unitaria (1 [mm]).
- El termino duración de la lluvia unitaria está referido a la duración de la lluvia que produce escorrentía, es decir, es la precipitación efectiva equivalente a 1 [mm].
- El tiempo base del hidrograma unitario de precipitación efectiva de duración del tiempo unitario debe ser constante.

- Se aplica el principio de proporcionalidad, el cual establece que en una cuenca dada, las lluvias de intensidad uniforme e idéntica duración, pero con volúmenes de precipitación distintos, producen caudales proporcionales a dichos volúmenes.
- Se aplica el principio de invariabilidad en el tiempo, el cual refiere que, para una cuenca dada, la duración de la escorrentía superficial correspondiente a lluvias de la misma duración es constante e independiente del volumen de la precipitación.
- Se aplica el principio de superposición, el que establece que en una cuenca dada, la escorrentía superficial producida por una lluvia es independiente de la escorrentía concurrente de otros períodos.

2.1.4.2.1. Hidrograma unitario sintético

El hidrograma unitario sintético es un hidrograma que fue creado como consecuencia de la escasez de datos meteorológicos y de aforos con los que generalmente se enfrenta un estudio hidrológico. Razón por la cual, se han obtenido relaciones entre características fácilmente medibles en las cuencas y ciertos coeficientes, de manera tal que permitan su estimación [32].

A esta clase de hidrogramas se les denomina sintéticos, ya que no provienen de datos observados, sino que de formulaciones obtenidas utilizando datos de otras cuencas y su generación se realiza de manera indirecta mediante el uso de datos de las características generales y físicas de una cuenca [33]. Los factores más significativos para su obtención son: el tamaño de la cuenca (área y perímetro), longitud del cauce principal, distancia desde la salida de la cuenca hasta el centroide de ésta y la pendiente media del cauce principal [32].

2.1.4.2.2. Hidrograma unitario sintético de Snyder

Dentro de las propuestas de hidrogramas sintéticos, se destaca el 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 [32].

En la Figura 2.6 se muestra un ejemplo de un hidrograma producto de una cuenca cualquiera, en él se describen sus partes componentes como son: la curva de concentración, de descenso (o de recesión) y de agotamiento, junto con señalar sus parámetros característicos.

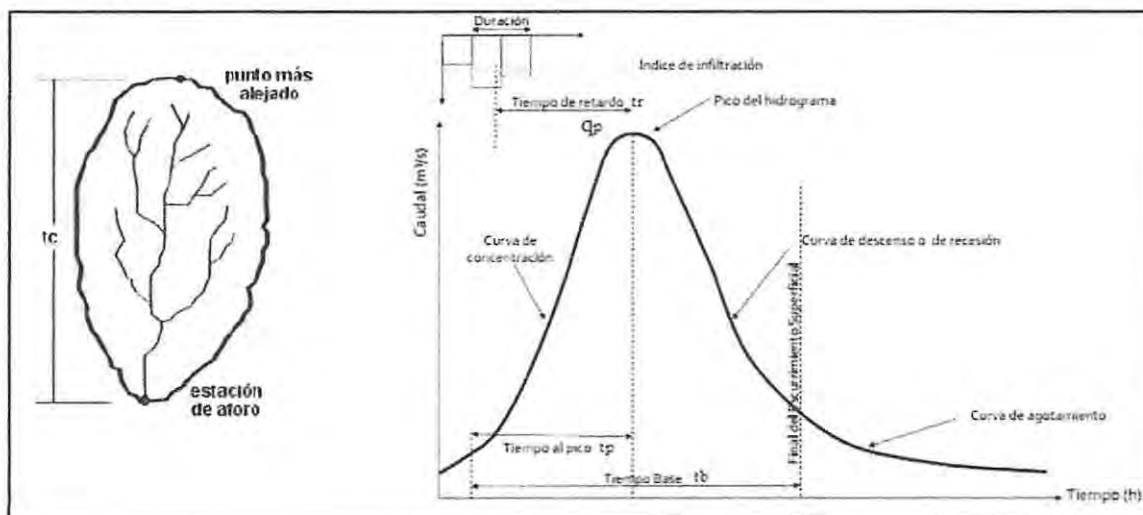


Figura 2.6 - Partes del Hidrograma [32]

De la figura anterior, se destacan los siguientes parámetros componentes del hidrograma de Snyder, cuyas formulaciones se indican en la sección 2.1.4.2.3.

- **Tiempo de concentración (T_c):** es el tiempo necesario para que una gota de agua que cae en el punto "hidrológicamente" más alejado de la cuenca, llegue a la salida de la misma.
- **Tiempo de punta o peak (T_p):** es el tiempo que transcurre desde que se inicia el escurrimiento directo hasta la punta del hidrograma.
- **Tiempo base (T_b):** es el intervalo de tiempo comprendido entre el comienzo y fin del escurrimiento directo.
- **Tiempo de retardo (T_r):** es el intervalo de tiempo comprendido entre los instantes que corresponden al centro de gravedad del hidrograma de la tormenta y al centro de gravedad del hidrograma.

2.1.4.2.3. Hidrograma unitario sintético con modificación de Benítez y Arteaga

El hidrograma unitario sintético se utilizó en Chile durante muchos años, hasta que en 1974 Benítez y Rodríguez [34], ajustaron los coeficientes C_t y C_p del hidrograma unitario sintético de Snyder, a partir de las características edafoclimáticas chilenas de cuencas del centro sur del país [35].

Posteriormente, en el año 1985, aparece nuevamente otro estudio con el objetivo de verificar la veracidad de la propuesta anteriormente señalada, y, asimismo, introducir modificaciones. Es por ello que Benítez y Arteaga [36], luego de una recopilación de información pluviométrica, pluviométrica y fisiográfica de 34 cuencas controladas entre el valle de Aconcagua (Región de Valparaíso) y el río Chamiza (Región de los Lagos), determinaron tres hidrogramas unitarios, sirviendo de base el procedimiento de Snyder modificado para Chile.

Dado lo anterior, la metodología se basa según las propiedades físicas de la cuenca, donde el hidrograma unitario sintético se desarrolla ajustando los parámetros del hidrograma unitario observado de la precipitación y los datos de descarga.

Los valores considerados de Benítez y Arteaga [36] para éste ajuste son los que se indican en la Tabla 2.4, los cuales están contenidos dentro de las formulaciones para el tiempo al caudal punta (T_p) y la constante del caudal punta del hidrograma unitario (C_{peak}), que corresponden a la longitud de tiempo entre el centroide del peso de la precipitación y el caudal punta del hidrograma y al valor del flujo del hidrograma que resulta en una unidad de precipitación, respectivamente.

Tabla 2.4 - Valores modificados del hidrograma unitario sintético por Benítez y Arteaga [36]

	Zona 1	Zona 2	Zona 3
C_t	0,32	0,58	1,35
n_t	0,42	0,33	0,24
C_p	140,01	522,51	172,78
n_p	-0,78	-1,51	-0,84
C_b	5,04	1,82	5,43
n_b	0,84	1,41	0,72

Donde:

- Zona 1: Regiones III a VI.
- Zona 2: Región VII.
- Zona 3: Regiones VIII a X.

Finalmente, las Ecuaciones 2.11 a 2.14 indican las formulaciones para la determinación del hidrograma unitario sintético de Snyder con la modificación de Benítez y Arteaga [36].

Tiempo a la Punta:

$$T_p = C_t \times \left(\frac{L \times L_g}{\sqrt{S}} \right)^{n_t} [h] \quad 2.11$$

Caudal Máximo:

$$q_p = C_p \times T_p^{n_p} \left[\frac{l}{s \times km^2} \right] \quad 2.12$$

Tiempo base:

$$T_b = C_b \times T_p^{n_b} [h] \quad 2.13$$

Constante del caudal punta:

$$C_{peak} = \frac{q_p \times T_p}{C \times A} [\%] \quad 2.14$$

Donde:

- C_{peak} : Constante de caudal punta del hidrograma unitario sintético, adimensional [%].
- T_p : Tiempo de retardo de la cuenca o tiempo al *peak*, en [h].
- q_p : Caudal punta del hidrograma unitario, en [l/s/km²].
- L : Longitud del cauce principal, en [km].
- L_g : Distancia desde el centro de gravedad de la cuenca hasta la sección de salida, en [km].
- S : Pendiente media de la cuenca, según Mockornita (Ecuación 2.15), en [m/m].
- A : Área de la cuenca, en [km²].
- C : constante de conversión (con valor igual a 2,75 según el Sistema Internacional).
- C_t , C_p , C_b , n_t , n_p y n_b : Coeficientes del hidrograma unitario establecidas por Benítez y Arteaga, adimensional [%].

La pendiente media de una cuenca según Mockornita, corresponde al cociente entre la diferencia de cotas entre curvas de nivel del terreno y la sumatoria en longitud de todas las curvas de nivel, respecto a la superficie de una cuenca. Su formulación se indica en la Ecuación 2.15.

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n L_i \times \Delta H}{A} [m/m] \quad 2.15$$

Donde:

- S : Pendiente media de Mockornita, en [m/m].
- n : Número de curvas de nivel de la cuenca.
- L_i : Longitud de la curva i -ésima, en [m].
- ΔH : Diferencia entre curvas de nivel, en [m].
- A : Área de la subcuenca, en [m²].

2.1.4.3. Flujo base y recesión exponencial

El flujo base corresponde al caudal que está presente de manera permanente en un cauce, es producto del escurrimiento permanente y del escurrimiento subterráneo, el cual considera el agua subterránea que ingresa a la corriente proveniente de lluvias anteriores y/o al aporte proveniente de la infiltración a través de los acuíferos.

Tiene su origen en la precipitación registrada sobre la cuenca en períodos precedentes, que se ha almacenado temporalmente en capas más o menos profundas, e incluye también el flujo subsuperficial asociado al período actual.

Para la determinación del flujo base se debe realizar un análisis de hidrogramas fundamentalmente para encontrar la relación con la tormenta que lo produce. Lo anterior implica aislar el hidrograma, es decir, separar la escorrentía directa de la subterránea (Figura 2.7), donde ésta última se calcula mediante algún método de flujo base, tal como: el caudal constante, la curva de recesión exponencial, los depósitos lineales sucesivos, entre otros.

2.1.4.3.1. Método de la curva de recesión exponencial

Uno de los métodos para la determinación del flujo base de una tormenta corresponde al de la curva de recesión exponencial. Para conocer este flujo se requiere realizar una identificación de los puntos de inicio y término de la escorrentía directa. Para ello es primordial reconocer cada parte componente del hidrograma, tal como se indica en la Figura 2.7, donde se señala una curva de crecida o de concentración, una punta, una curva de descenso (o de recesión) y una curva de agotamiento.

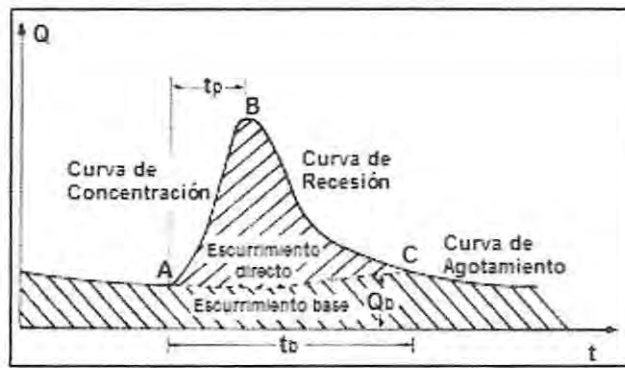


Figura 2.7 - Hidrograma aislado para modelo de recesión exponencial

De la figura anterior, el punto de inicio de la escorrentía directa es fácil de reconocer, pues este se destaca al momento en que comienza la curva de crecida (Punto A), en cambio la posición del punto de término (Punto C), no es perfectamente conocida a priori y representa el instante a partir del cual toda el agua aforada corresponde a flujo base. Es importante resaltar que la curva de agotamiento comienza con un caudal mayor que el correspondiente al punto A, en que se encontraba el agotamiento antes de iniciarse la crecida, lo cual es debido a que parte de la precipitación infiltrada alimenta posteriormente al cauce.

El modelo de recesión es usado comúnmente para explicar el drenaje de un almacenamiento natural en una cuenca [37] y se define según la Ecuación 2.16 como:

$$Q_t = Q_0 k^t \tag{2.16}$$

Donde:

- Q_0 : Flujo base inicial en $t = 0$ en $[m^3/s]$.
- k : Coeficiente de decaimiento.

Al aplicar este modelo, K , es definido como la razón entre el flujo base en el tiempo t y el flujo base un día antes. El valor del flujo base de partida, Q_0 , es una condición inicial del modelo.

Después del *peak* de la escorrentía directa, un umbral especificado por el usuario (Punto C, Figura 2.7)), determina el tiempo en que el modelo de recesión define el flujo total establecido en la Ecuación 2.16. Este umbral se puede especificar como una velocidad de flujo o como una razón al flujo máximo calculado. Por ejemplo, si se especifica el umbral como una razón al *peak* de 0,10 y el *peak* calculado es de 1000 $[m^3/s]$, el umbral es de 100 $[m^3/s]$.

Inmediatamente después de que se produce el umbral (Punto C, Figura 2.7), la ordenada del caudal en el hidrograma se define solo por el modelo de recesión. Esta recesión es logarítmica y se aproxima al caudal cero en una forma asintótica. Por consiguiente, una vez finalizada la curva de descenso, el caudal queda reducido a los aportes recibidos de la escorrentía subterránea. Además, la curva de agotamiento representa el decrecimiento de las aguas subterráneas, más el residuo del flujo hipodérmico (precipitación que no se infiltra ni circula por la superficie y circula bajo el suelo a poca profundidad) [37].

Por lo tanto, para determinar el punto donde se producen estos aportes subterráneos (Punto C, Figura 2.7), se debe graficar el logaritmo del caudal versus el tiempo de la curva de bajada del hidrograma. Así, el punto de quiebre de la curva recesiva señala el comienzo de la afluencia de los caudales subterráneos. Esto se debe a que, al someter los datos en el gráfico al logaritmo, estos adquieren una distribución gráfica lineal posibilitando la determinación del punto de quiebre y sus coordenadas.

2.1.4.4. Tránsito de hidrogramas

El tránsito de hidrogramas corresponde a la simulación de la variación de un hidrograma al recorrer un cauce [38]. Para su evaluación existen dos tipos de métodos: hidráulicos e hidrológicos. Los primeros se basan en la solución de las ecuaciones de conservación de masa y cantidad de movimiento, para escurrimiento no permanente. Mientras que los segundos utilizan simplificaciones de las ecuaciones de conservación de masa y conservación de cantidad de movimiento, para llegar a soluciones más simples, pero menos aproximadas que las que se logran con los métodos hidráulicos [39]. Para estos últimos, los métodos más utilizados son: el modelo Lag, de Puls modificado, de Muskingum, de Muskingum-Cunge y el de onda cinemática.

2.1.4.4.1. Método de propagación de Muskingum

En particular, el método Muskingum pertenece a la categoría de modelos hidrológicos y es uno de los más utilizados para cálculos manuales dada su sencillez, éste fue desarrollado por G. T. Mc Carthy en 1934, y se basa en el principio que una onda de crecida desplazándose en un río, se amortigua a causa de la fricción del fondo, así como también por los almacenamientos naturales en el lecho de inundación. Utiliza la ecuación de continuidad del flujo (Ecuación 2.1) y una relación algebraica entre el almacenamiento en el tramo y las entradas y salidas [17].

Con este método se plantea el almacenamiento de un tramo de río dividido en dos partes (Figura 2.8), una correspondiente al almacenamiento en prisma, que depende solamente de las salidas, y la otra a un almacenamiento en cuña, debido al efecto de la pendiente de la superficie libre del agua en el gasto. Dicha pendiente depende tanto de las entradas como de las salidas, y se considera como una función lineal de la diferencia de ambas.

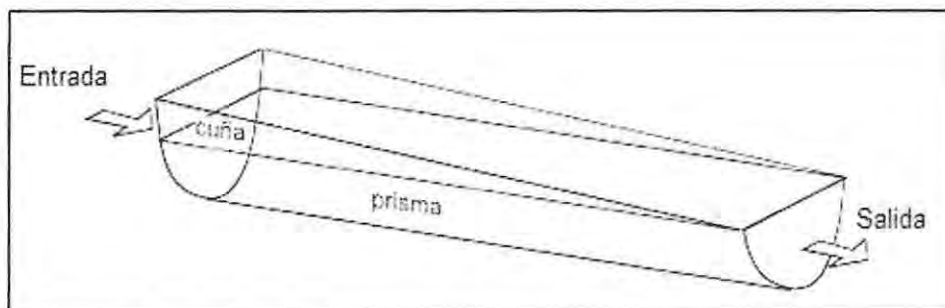


Figura 2.8 - Almacenamiento en prisma y en cuña en un tramo de cauce según Muskingum [17]

Durante la fase de crecida, el caudal de entrada en una sección aguas arriba es superior al de salida en una sección aguas abajo, lo que produce un almacenamiento en forma de un prisma con la base aguas arriba. Durante la fase de recesión, la situación es inversa y el prisma de almacenamiento tiene su base en la sección aguas abajo [17].

Dado lo anterior, si se supone que el área de la sección transversal del flujo de creciente es directamente proporcional al caudal en la sección, el volumen de almacenamiento en prisma y el volumen de almacenamiento por cuña toman la forma indicada en Ecuaciones 2.17 y 2.18, respectivamente. Por consiguiente, el almacenamiento total corresponde a la suma de ambos componentes (Ecuación 2.19).

$$V_{prisma} = KQ \quad 2.17$$

$$V_{cuña} = KX(I - Q) \quad 2.18$$

$$V_{total} = V_{prisma} + V_{cuña} = KQ + KX(I - Q) \quad 2.19$$

Donde:

- K: Factor de proporcionalidad, es el tiempo de tránsito de la onda creciente a lo largo del tramo del canal.
- X: Factor de ponderación, está comprendido dentro del rango $0 < X < 0,5$.

El valor de X depende de la forma de almacenamiento en cuña, de manera que cuando X es 0, representa un almacenamiento tipo embalse, no existe cuña y por consiguiente no existe curva de remanso. En cambio, cuando X es 0,5, corresponde a una cuña completamente desarrollada. Finalmente, los valores de K y X se suponen constantes para todo el rango de flujo [14].

El factor de proporcionalidad, K, puede ser estimado mediante la relación que se establece en la Ecuación 2.20 [40].

$$K = 0,18 \times \left(\frac{\Delta x}{i^{0,25}} \right)^{0,76} \quad 2.20$$

Donde:

- Δx : es la longitud del cauce, en [km].
- i: es la pendiente máxima de la subcuenca, en [m/m].

De la ecuación anterior, se debe cumplir la condición especificada en la Ecuación 2.21.

$$\Delta t > 2KX \quad 2.21$$

Donde:

- Δt : es el incremento de tiempo que se utiliza para representar los resultados, en [h].

Si no se cumple con la condición enunciada en la Ecuación 2.21, se debe obtener el Número de Reach (n). Este último corresponde al número de pasos, de manera tal, que el tiempo de viaje a través de la distancia sea aproximadamente igual al paso del tiempo Δt [40].

Strelkoff (1980) [37], establece que el Número de Reach se obtiene según la siguiente expresión (Ecuación 2.22).

$$\Delta t > \frac{2KX}{n} ; \quad n > \frac{2KX}{\Delta t} \quad 2.22$$

En virtud a lo anterior, se debe tener en consideración que el número de pasos afecta la atenuación del hidrograma calculado. Es decir, cuando el número de pasos aumenta, la atenuación disminuye. Siendo la atenuación máxima, la correspondiente a un paso ($n = 1$) [37].

2.2. Sistema de modelación hidrológica

2.2.1. *Hydrologic Engineering Center – Hydrology Modeling System*

El sistema de modelación hidrológica o *Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System* (HEC–HMS), es un programa de uso libre creado por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos [41], el cual está diseñado para simular el proceso de precipitación – escorrentía en sistemas de cuencas.

El programa es capaz de representar cuencas diferentes. De esta manera, un modelo de cuenca, es construido separando el ciclo hidrológico en áreas manejables y creando condiciones de borde dentro de la cuenca de interés. Donde, además, cualquier masa o flujo de energía en el ciclo, es representado con un modelo matemático. Existiendo para ello, una amplia gama de modelos o métodos para representar cada flujo.

Mediante el programa, es posible calcular el hidrograma producido por una cuenca, a partir de los datos físicos y de las precipitaciones que en ésta ocurran. Para ello, el proceso se puede dividir en las siguientes 4 fases [10]:

- a) Separación de la lluvia neta: calcular que parte de la precipitación caída va a generar escorrentía directa.
- b) Calcular la escorrentía directa producida por esta precipitación neta.
- c) Sumar a la escorrentía directa la escorrentía básica, si existía previamente. Calcular la evolución de la escorrentía básica a lo largo del tiempo.
- d) Calcular cómo evoluciona un hidrograma a medida que discurre a lo largo de un cauce mediante el “tránsito de hidrogramas”.

Para simular la respuesta hidrológica de una cuenca, el programa utiliza los siguientes componentes [10]:

1. **Modelo de cuenca:** representa la cuenca físicamente, en esta etapa se desarrolla el modelo incluyendo y conectando elementos hidrológicos (Subcuenca, ríos, unión, entre otros.), los cuales a su vez usan modelos matemáticos para describir los procesos físicos que se producen en la cuenca. Los métodos de cálculo que se utilizan en el elemento Subcuenca son: el de pérdidas por infiltración del suelo, transformación lluvia-escorrentía y flujo base. En el caso del elemento Río, se utilizan los métodos de ruteo o propagación de caudales.
2. **Modelo meteorológico:** calcula la entrada de precipitación que requiere un elemento de subcuenca. Además, es capaz de modelar la precipitación y la evapotranspiración. Los métodos disponibles para calcular la precipitación media en la cuenca son: pluviómetros con pesos, precipitaciones por celda, inversa a la distancia, hidrograma especificado, entre otros.
3. **Especificaciones de control:** se refieren al tiempo de duración de la simulación, incluyendo la fecha y hora de comienzo y fin del proyecto e intervalo de cálculo.
4. **Datos de entrada:** se requieren como condiciones de contorno o parámetros en los modelos de la cuenca y meteorológicos. Se distinguen los siguientes: datos de series temporales, pares de datos y datos por celdas.

Por lo tanto, una simulación calcula la transformación de lluvia a caudal en el modelo de la cuenca, dada la entrada del modelo meteorológico. Las especificaciones de control definen el periodo de tiempo durante el cual se realizará la simulación y el intervalo de tiempo a utilizar. Los componentes de los datos de entrada, tales como las series temporales, tablas y datos por celdas son requeridos como parámetros o condiciones de contorno tanto en el modelo de la cuenca como en el meteorológico.

2.3. Percepción remota

El concepto de percepción remota, viene dado por la agrupación de conocimientos que tienen como base fundamental el hecho de trabajar con información descriptiva de fenómenos y objetos presentes en el universo físico, que ha sido recolectada sin entrar en contacto directo con ellos [42].

En relación a lo anterior, es posible definir percepción remota como la unión de disciplinas que tiene como objeto la captura y procesamiento de señales obtenidas con instrumentos físicamente alejados del objeto a ser medido. Estos instrumentos pueden ser portátiles o bien, estar alejados a grandes distancias como aquellos montados sobre una plataforma aérea o un satélite

Esta tecnología utiliza un flujo de radiación electromagnética que al propagarse por el espacio puede intercalarse con superficies u objetos, siendo reflejado, absorbido o emitido por dichas superficies u objetos. De todas las formas posibles de energía, la más importante para la percepción remota es la energía radiante o energía electromagnética, ya que es la única que no necesita de un medio material para propagarse. Siendo el ejemplo más conocido el de la energía solar, que se propaga por el espacio vacío desde el Sol hasta la Tierra [43].

2.3.1. Medición satelital de precipitaciones

La medición satelital de precipitaciones es una de las aplicaciones de la percepción remota que busca la obtención de más datos y una mejor comprensión del sistema climático actual, impulsado por la compleja interacción de vapor de agua, nubes, la lluvia y la liberación de energía después de que llueve. Mediante esta aplicación, se estudian las tormentas con el fin de hacer mediciones más precisas de las precipitaciones sobre el océano, donde los instrumentos basados en tierra convencionales no pueden ver [44].

Según esto último, los estudios se realizan principalmente en las zonas tropicales, donde existe una gran formación de enormes cúmulos de nubes ecuatoriales y huracanes que implican una gran cantidad de tormentas convectivas violentas, las cuales son fiel evidencia de la liberación de calor latente. Para ello, uno de los principales medios por los cuales es posible obtener mediciones satelitales de estos eventos son los provenientes del satélite TRMM, GPM Core Observatory, entre otros [44].

2.3.1.1. Satélite “Tropical Rainfall Measuring Mission” (TRMM)

El “*Tropical Rainfall Measuring Mission*” o su sigla TRMM, es un satélite de investigación que corresponde a una misión conjunta entre la NASA y la Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón (*Japan Aerospace Exploration Agency – JAXA*), para monitorear y estudiar las lluvias tropicales y subtropicales del planeta. La JAXA lanzó el satélite desde el Centro Espacial de Tanegashima el 27 de noviembre de 1997, brindando información de alta cobertura espacial y alta resolución temporal [44].

Esta misión fue concebida con el fin de contribuir a una mejor comprensión de dónde y cuánto soplan los vientos, dónde se forman las nubes y la lluvia, dónde se producirán inundaciones y sequías, y cómo los vientos llegan a conducir las corrientes oceánicas. De manera tal, de proporcionar los datos de lluvia y la información sobre el calor liberado en la atmósfera como parte del proceso que conduce a la lluvia. En la tabla 2.5, se resumen sus principales características.

Tabla 2.5 - Características principales del satélite TRMM

Versión	TRMM 3B42RT V7
Altitud	350 [km] (27/11/97 al 08/07/01) y 403 [km] (desde 24/08/01)
Inclinación	35° con respecto al Ecuador
Tipo de órbita	Circular, no sincronizada con el Sol
Duración de la órbita	92,5 [min]
Órbitas al día	16
Resolución espacial	0,25° Latitud x 0,25° Longitud
Cobertura geográfica	50°S-50°N Latitud y 180°W-180°E Longitud

A continuación, se describen los instrumentos que posee el satélite para detectar las precipitaciones [8], los que además se ilustran en la Figura 2.9:

- El **radar de precipitación (PR)**, es un radar de escaneo electrónico que mide la distribución de las precipitaciones en 3D sobre la tierra y el mar. Define la profundidad de la capa de la precipitación y aporta información de la precipitación que alcanza la superficie.
- El **Radiómetro de Microondas Multicanal, TRMM Microwave Imager (TMI)**, mide la energía de microondas que emite la Tierra y su atmósfera para cuantificar el vapor de agua, el agua de las nubes, la intensidad y distribución de la lluvia en la atmósfera, y los tipos de precipitaciones (por ejemplo, estratiformes o convectivas).
- El **Escáner Infrarrojo Visible (VIRS)**, proporciona información de alta resolución sobre la distribución de la cobertura y tipo de nubes.
- El **Sensor de Imágenes de Relámpagos (LIS)**, es un sensor óptico calibrado, que está optimizado para detectar la ubicación de un rayo sobre la tierra, marcar el tiempo de ocurrencia y medir la energía radiante.
- El **Sistema de Energía Radiante de la Tierra y de las Nubes (CERES)**, es un sensor visible e infrarrojo diseñado para medir los niveles de energía emitida y reflejada por radiación desde la superficie de la Tierra y la atmósfera y sus constituyentes (por ejemplo, nubes, aerosoles).

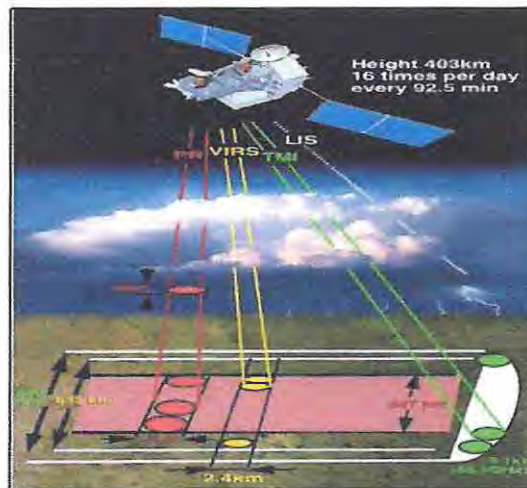


Figura 2.9 - Instrumentos y sensores componentes del satélite TRMM [8]

Las imágenes satelitales se pueden obtener directamente desde la página web de la NASA. Los registros están en formato NETCDF (lectura Raster) y se presentan de forma diaria o en intervalos de tiempo de cada 3 horas [45].

Capítulo 3

3. Estimación del uso de información satelital de precipitaciones

3.1. Generalidades

En un estudio hidrológico, es primordial realizar la estimación de la precipitación media de una zona determinada. Para ello se deben tener en consideración que pueden existir bajas coberturas de estaciones meteorológicas, algunos registros incompletos o demoras en la publicación de datos (puede llegar a 6 meses de desfase).

Actualmente, el acceso a la información estadística de los registros de las estaciones meteorológicas administradas por la DGA es gratuito y de dominio público, pero las falencias en los registros antes mencionadas, pueden provocar un retraso en el proceso de manejo y análisis de la información al realizar una modelación hidrológica en tiempo real.

Dado lo anterior, una alternativa para complementar la información de las estaciones meteorológicas es la medición satelital de precipitaciones, la cual proviene de imágenes captadas por el satélite TRMM 3B42 V7 con una resolución de 0.25° Latitud x 0.25° Longitud, registra datos cada 3 horas (considera 8 mediciones diarias, empezando a las 00:00 [h] y terminando a las 21:00 [h]) y cuenta con una estadística vigente desde el año 1997 [46]. El acceso a sus registros es gratuito. El desfase en la publicación de datos en línea se reduce a los dos meses y los vacíos de información disminuyen considerablemente. Adicionalmente, se tiene un registro de los periodos en los que el satélite no registró datos o presenta errores, el cual se puede revisar antes de descargar la información [2]. Sus registros corresponden a una combinación de estimaciones de la precipitación captada por TRMM, a la cual se le realiza un ajuste mediante información basada en medición de radiación infrarroja de satélites geoestacionarios.

En el presente trabajo se analiza el uso de estos registros de información con el fin de estimar la precipitación media de la zona que se va a modelar. Para ello, se propone un método para obtener la relación que determina la precipitación media por eventos de una zona determinada, a través de información satelital registrada por TRMM 3B42 V7 para generar la información de entrada a la modelación hidrológica.

3.2. Identificación de la zona de estudio

La zona de estudio corresponde a un polígono compuesto por 16 pixeles de 0.25° Latitud x 0.25° Longitud cada uno (4 pixeles de ancho y 4 pixeles de largo). La ubicación geográfica es entre las latitudes $36^\circ 49' 99''$ y $37^\circ 50' 00''$, longitudes $72^\circ 25'$ y $71^\circ 25'$, posee una altura mínima de 114 [m.s.n.m] y máxima de 1841 [m.s.n.m], cubriendo una superficie total de aproximadamente 12392 [km²] insertos en la Región del Biobío, Chile (Figura 3.1).

La DGA en su balance general al año 2013, informa que a lo largo del país existen 511 estaciones meteorológicas en funcionamiento que registran precipitación para un área continental e insular de 756096 [Km²] [2]. En el caso de la zona en estudio, se cuenta con 23 estaciones en una superficie de 37069 [Km²] y cuya distribución espacial se puede apreciar en la Figura 3.1.

En la Tabla 3.1, se resume la superficie por estación y el porcentaje de cobertura a nivel país.

Tabla 3.1 - Cobertura estaciones meteorológicas en la zona de estudio.

Región	Superficie [Km ²]	Superficie (Región/País) [%]	N° Estaciones Meteorológicas	Cobertura (Región/País) [%]	Cobertura [Km ² /estación]
Biobío	37069	4,90	23	4,50	1611,70

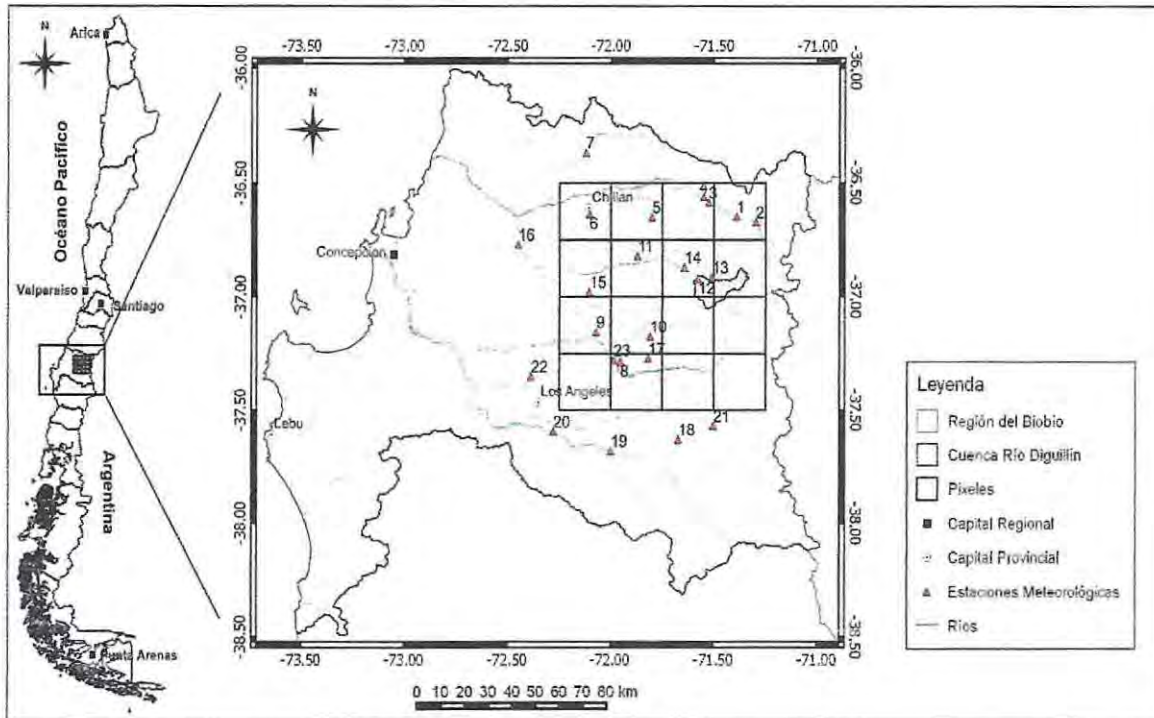


Figura 3.1 - Identificación de la zona de estudio, estaciones meteorológicas y píxeles utilizados.

De la Figura 3.1, se aprecia que la distribución espacial de las estaciones meteorológicas presenta mayor cobertura hacia el Oeste (zona de la depresión intermedia) que con respecto al Este (zona de la Cordillera de Los Andes y precordillera) y además con una mayor concentración hacia el Norte.

Por consiguiente, queda una zona de píxeles en los que la información pluviométrica se puede considerar escasa o nula. Adicionalmente, la zona de análisis cubre una gran cantidad de subcuencas asociadas a cauces que alimentan importantes ríos de la región, como son el río Itata y el río Laja.

La información y ubicación de las estaciones meteorológicas involucradas en el área de estudio y que se indican en la Figura 3.1, se resumen en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 - Descripción de las estaciones meteorológicas.

Nº	Nombre Estación	Código BNA	Latitud	Longitud	Altitud [m]
1	Caracol	08105004-K	36° 39' 04"	71° 23' 42"	710
2	Camán	08105005-8	36° 40' 23"	71° 17' 56"	670
3	Río Ñuble en San Fabián N°2	08106002-9	36° 35' 08"	71° 31' 32"	450
4	San Fabián	08106003-7	36° 35' 01"	71° 31' 29"	465
5	Coihueco Embalse	08113001-9	36° 38' 27"	71° 47' 56"	314
6	Chillán Viejo	08117002-9	36° 37' 55"	72° 07' 36"	125
7	Millaquén	08118003-2	36° 19' 06"	72° 02' 24"	152
8	Tucapel	08122003-4	37° 17' 37"	71° 57' 07"	342
9	Cholguán	08123004-8	37° 09' 10"	72° 04' 01"	230
10	Las Cruces	08124004-3	37° 06' 41"	71° 45' 54"	467
11	Mayulermo	08124005-1	36° 49' 08"	71° 53' 40"	371
12	Fundo Atacalco	08130003-8	36° 55' 03"	71° 34' 53"	740
13	Las Trancas	08130004-6	36° 54' 39"	71° 28' 45"	1242
14	Diguillín	08130006-2	36° 52' 07"	71° 38' 33"	670
15	Pemuco	08132002-0	36° 58' 35"	72° 06' 03"	200
16	Chillancito	08133003-4	36° 45' 44"	72° 25' 26"	56
17	Trupán	08122002-6	37° 16' 50"	71° 49' 22"	474
18	Quillaileo	08316001-2	37° 39' 04"	71° 42' 49"	464
19	Quilaco	08318002-1	37° 41' 06"	72° 00' 21"	231
20	San Carlos de Purén	08319002-7	37° 35' 43"	72° 16' 37"	155
21	San Lorenzo Biobío	08320001-4	37° 30' 29"	71° 45' 56"	480
22	Las Achiras	08364001-4	37° 22' 50"	72° 21' 58"	144
23	Río Laja en Tucapel	08380001-1	37° 17' 01"	71° 59' 01"	295

3.3. Metodología

La metodología que se emplea para la obtención de la precipitación media en la zona durante un evento de precipitación, consiste en obtener la precipitación diaria del satélite TRMM 3B42 V7 para los días en que ocurren cada uno de los eventos seleccionados. Además, se calcula la precipitación media de cada pixel con los datos de las estaciones meteorológicas mediante el método de interpolación de los polígonos de Thiessen. Luego, se relacionan los valores de precipitación media obtenidos tanto con datos satelitales como observados y finalmente se obtiene una relación general para todos los pixeles de la zona analizada.

Por lo tanto, el proceso se desarrolla partiendo con una etapa de calibración, la cual consiste en relacionar linealmente los registros de precipitaciones observadas y satelitales provenientes de eventos de tormenta. Para esto, se toma como referencia el área de un pixel. Luego, una etapa de procesamiento de resultados para establecer una formulación que permita relacionar ambos parámetros, para finalmente someterlos a un proceso de validación con nuevos eventos.

3.4. Calibración

El proceso de calibración se inicia con la definición de un conjunto de seis pixeles que cuentan con estaciones meteorológicas dentro de cada uno. En la Figura 3.2, se ilustran los pixeles de calibración en forma punteada, mientras que los pixeles achurados son aquellos utilizados para la etapa de validación que se desarrolla en el ítem 3.5.

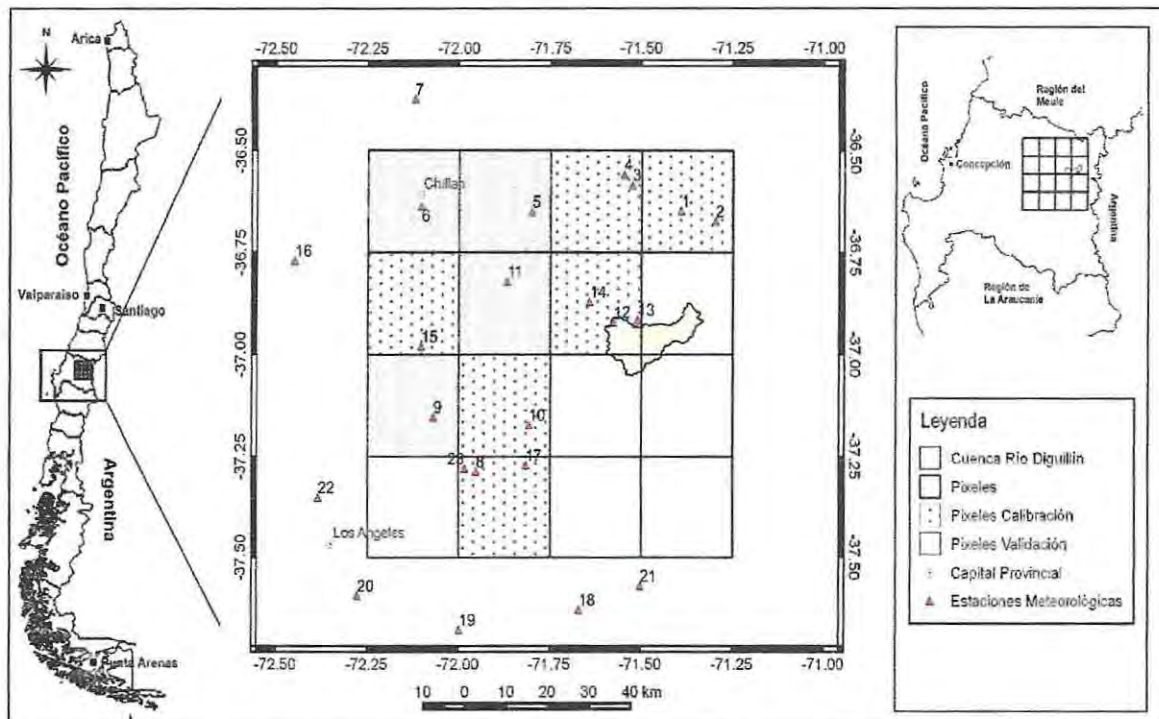


Figura 3.2 - Píxeles a utilizar para calibración (punteado) y validación (achurados).

Posteriormente, se definió un grupo de 30 tormentas donde se seleccionaron registros de lluvias al azar con precipitaciones continuas que formaran hidrogramas aislados de una sola crecida. Los eventos poseen una duración entre 2 a 8 días y se resumen en la Tabla 3.3.

Es importante tener en cuenta que normalmente hay lapsos de tiempo en que las estaciones meteorológicas de la DGA no poseen registro, por lo que se recomienda evitar estos periodos en la fase de selección de eventos, así como también, el verificar que no existan datos nulos entre cada tormenta, sin embargo, se permiten días sin precipitación al principio o fin del evento.

Tabla 3.3 - Descripción de eventos seleccionados para etapa de calibración.

Tormenta N°	Fecha de Inicio	Fecha de Término	Tormenta N°	Fecha de Inicio	Fecha de Término
1	26-Nov-98	27-Nov-98	16	02-May-07	04-May-07
2	25-May-99	28-May-99	17	26-Abr-08	27-Abr-08
3	06-Jul-99	12-Jul-99	18	16-May-08	23-May-08
4	04-Ago-00	06-Ago-00	19	08-May-09	13-May-09
5	10-Jun-01	14-Jun-01	20	04-Sept-09	07-Sept-09
6	05-Oct-01	06-Oct-01	21	09-Mar-11	11-Mar-11
7	25-Feb-02	28-Feb-02	22	11-Abr-11	13-Abr-11
8	03-Jun-03	05-Jun-03	23	28-Jun-11	30-Jun-11
9	06-Jul-03	08-Jul-03	24	25-May-12	29-May-12
10	06-Oct-03	08-Oct-03	25	03-Sept-12	04-Sept-12
11	31-Jul-04	05-Ago-04	26	09-May-13	11-May-13
12	03-Sept-04	07-Sept-04	27	24-Jun-13	30-Jun-13
13	13-Oct-04	17-Oct-04	28	19-Oct-13	21-Oct-13
14	12-Jul-05	13-Jul-05	29	04-Feb-14	05-Feb-14
15	22-May-06	26-May-06	30	22-Ago-14	25-Ago-14

Una vez seleccionados los eventos, se descargaron las precipitaciones diarias por estación, abarcando entre la fecha de inicio y término de cada tormenta.

Luego, para determinar la precipitación en cada pixel se utiliza el método de interpolación de los polígonos de Thiessen (Figura 3.3). De esta manera, mediante el programa QGIS, se generaron los polígonos con la red completa de estaciones meteorológicas de la DGA y luego se obtuvieron las áreas poligonales que se interceptan con cada uno de los pixeles, obteniendo una magnitud que depende del área de influencia de cada estación.

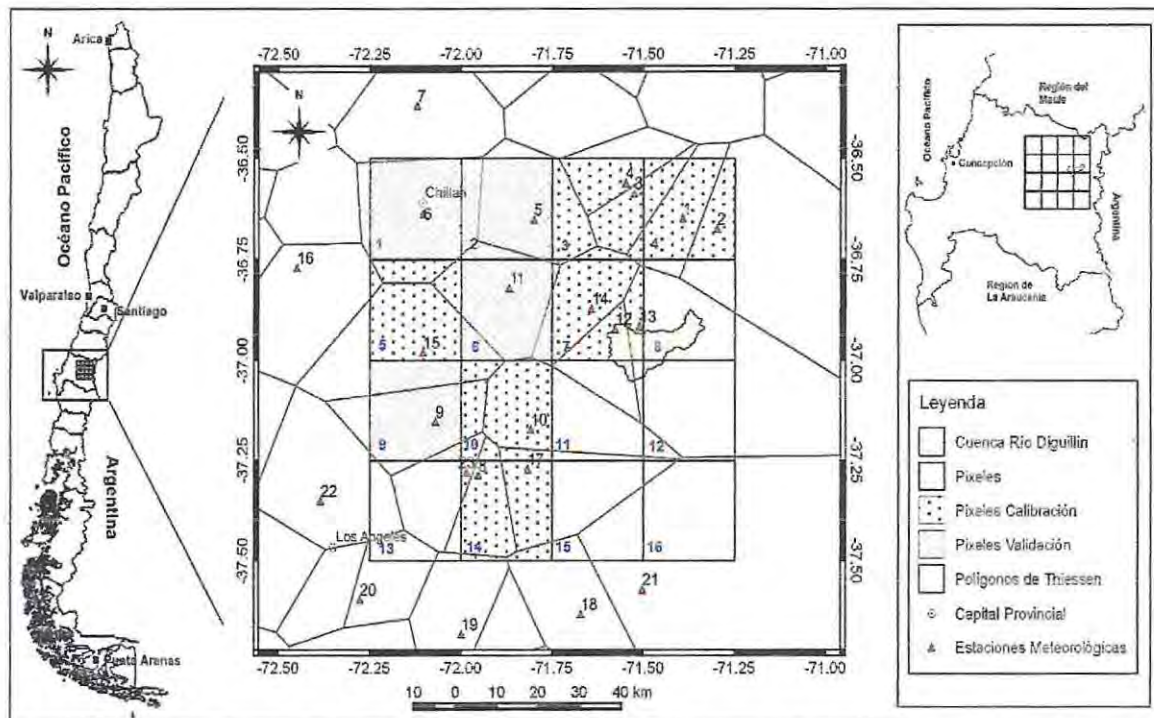


Figura 3.3 - Interpolación mediante polígonos de Thiessen.

3.4.1. Precipitación media observada por pixel

La precipitación media del pixel según datos observados o precipitación media observada (P.M.O) se expresa según la Ecuación 3.1 como:

$$P_{ppixel} = \sum_{i=1}^n A_i \times P_i \quad 3.1$$

Donde:

- A_i : Peso asignado a estación i en el pixel (área polígono de Thiessen / área pixel).
- P_i : Precipitación observada DGA en estación i , en [mm].
- n : Número de estaciones consideradas por pixel.

En la Figura 3.4, se indica un ejemplo para la obtención de la precipitación media observada por pixel según la Ecuación 3.1. En la imagen se muestra un extracto de la zona analizada correspondiente al pixel 4, en la cual se describe la intercepción de los polígonos de Thiessen correspondientes a las estaciones meteorológicas 1, 2, 3 y 4 sobre éste.

Por lo tanto, para obtener la Pppixel se multiplica el área ponderada de cada polígono (A1, A2, A3 y A4) por la precipitación de la estación correspondiente (P1, P2, P3 y P4), tal como se señala en la Ecuación 3.2.

$$P_{ppixel}(4) = A1 \times P1 + A2 \times P2 + A3 \times P3 + A4 \times P4$$

3.2

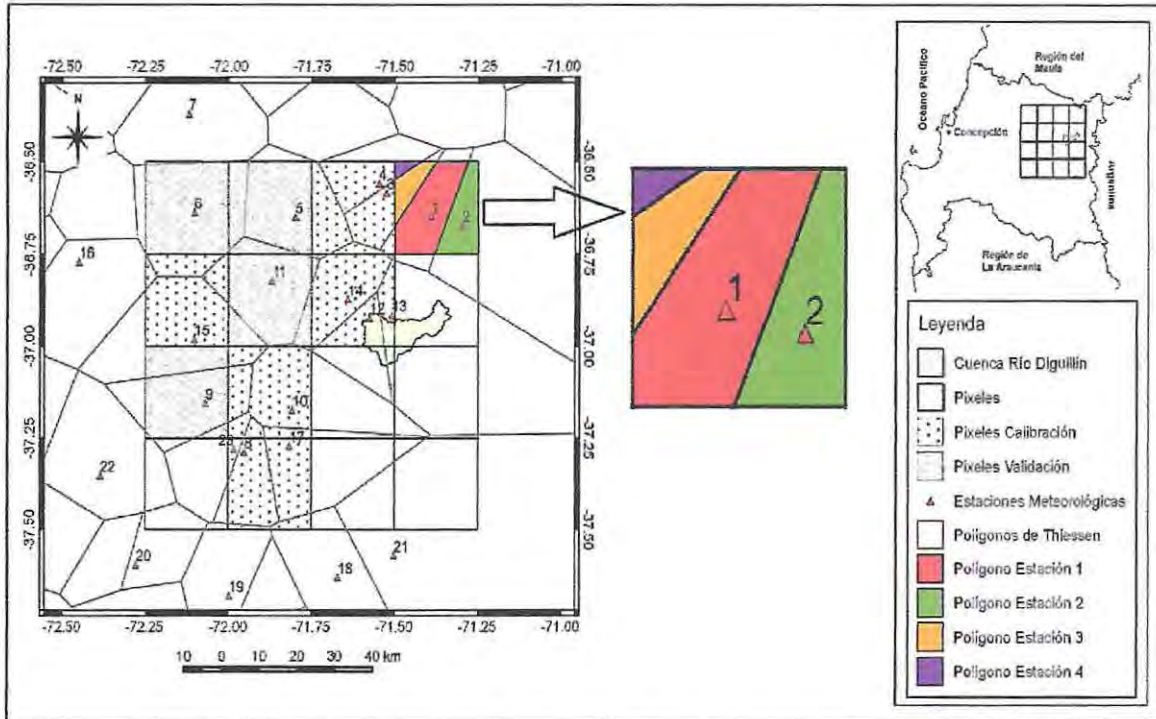


Figura 3.4 - Ejemplo determinación de la Precipitación Media Observada para el pixel 4.

Aplicando la metodología que se expresa en los párrafos precedentes, se obtuvo un valor único de precipitación media observada por pixel para cada uno de los 30 eventos, tal como se indica en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4 - Precipitación media observada (P.M.O) píxeles de calibración en [mm].

Tormenta N°	P.M.O Pixel 3	P.M.O Pixel 4	P.M.O Pixel 5	P.M.O Pixel 7	P.M.O Pixel 10	P.M.O Pixel 14	Tormenta N°	P.M.O Pixel 3	P.M.O Pixel 4	P.M.O Pixel 5	P.M.O Pixel 7	P.M.O Pixel 10	P.M.O Pixel 14
1	20,66	26,29	22,38	31,07	31,86	33,24	16	29,76	29,32	35,43	42,19	21,65	38,61
2	73,54	103,40	52,78	86,32	68,16	61,08	17	20,52	28,16	13,84	20,99	14,94	23,60
3	35,70	46,31	35,07	40,99	50,93	48,99	18	469,75	668,27	343,14	599,48	403,78	346,88
4	78,82	167,87	91,91	118,64	102,17	74,11	19	189,98	272,08	126,81	251,94	186,62	160,71
5	104,25	188,76	81,92	139,66	108,46	117,38	20	84,86	142,44	67,11	105,89	77,64	55,09
6	27,98	25,47	17,69	31,02	26,05	24,67	21	47,45	53,72	44,91	60,72	56,21	49,26
7	250,75	201,73	149,84	281,83	199,66	157,79	22	67,50	94,92	28,51	111,44	90,61	76,74
8	46,47	75,56	39,27	70,45	43,59	50,47	23	100,28	130,90	31,70	114,16	74,01	61,54
9	68,00	113,26	46,98	113,70	65,01	52,94	24	162,61	280,84	95,83	180,05	122,41	85,85
10	62,50	88,88	44,89	100,60	63,26	48,08	25	4,52	9,30	7,74	10,20	5,16	7,11
11	88,27	145,98	55,21	81,60	57,73	41,03	26	22,69	22,44	23,99	35,10	32,13	27,52
12	101,78	165,90	44,09	126,80	113,70	82,62	27	63,88	84,19	46,27	77,28	74,04	67,75
13	38,43	44,38	28,28	40,31	48,34	36,41	28	21,02	17,40	10,66	23,79	28,07	33,54
14	44,17	64,48	26,88	75,27	55,01	42,32	29	59,85	93,04	59,49	85,41	87,15	79,39
15	126,27	192,37	56,74	171,47	66,51	54,49	30	41,16	50,39	43,36	39,58	28,90	26,49

3.4.2. Precipitación media satelital por pixel

La precipitación media satelital por pixel (P.M.S.), se determina mediante las imágenes satelitales que se descargan de forma diaria desde la página web de la NASA [45] y luego se analizan en el programa QGIS, herramienta que permite acumular la precipitación de cada imagen diaria de manera de abarcar la totalidad del evento y obtener un valor único por pixel.

En la Figura 3.5, se indica un ejemplo de la aplicación de una imagen satelital de precipitaciones para la zona de los pixeles en estudio. En esta imagen se aprecia la variación de las precipitaciones, donde los tonos azul oscuro representan las mayores intensidades de lluvia en el pixel y los tonos más claros indican los menores montos.

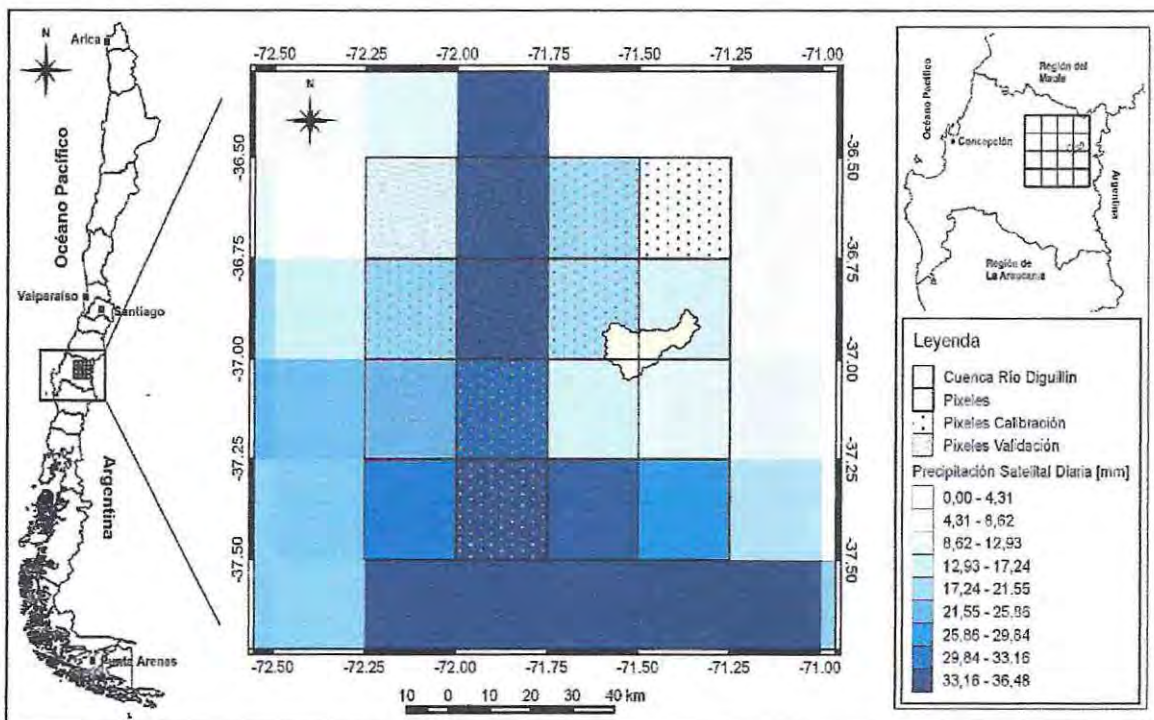


Figura 3.5 - Ejemplo imagen satelital de precipitaciones e intensidades asociadas.

Finalmente, en la Tabla 3.5 se indican los resultados de la precipitación media satelital (P.M.S) para cada pixel de calibración.

Tabla 3.5 - Precipitación media satelital (P.M.S) pixeles de calibración en [mm].

Tormenta N°	P.M.S Pixel 3	P.M.S Pixel 4	P.M.S Pixel 5	P.M.S Pixel 7	P.M.S Pixel 10	P.M.S Pixel 14	Tormenta N°	P.M.S Pixel 3	P.M.S Pixel 4	P.M.S Pixel 5	P.M.S Pixel 7	P.M.S Pixel 10	P.M.S Pixel 14
1	6,12	6,40	5,62	4,89	7,58	7,18	16	51,59	48,14	71,54	35,34	75,93	99,21
2	52,29	21,61	49,67	47,38	32,58	36,41	17	53,80	40,08	49,84	70,63	34,50	36,95
3	58,41	61,20	46,23	42,30	21,96	20,97	18	340,69	367,22	290,54	330,37	308,00	316,86
4	46,35	63,00	62,92	46,21	23,40	57,51	19	161,48	172,32	64,26	149,36	129,15	102,42
5	50,40	48,96	52,47	63,00	42,45	49,64	20	45,68	37,80	46,42	46,78	55,75	62,57
6	1,68	0,61	0,20	8,68	1,35	2,20	21	17,99	18,22	35,20	30,42	27,20	31,66
7	152,77	148,51	121,06	148,93	118,74	109,23	22	38,34	38,49	14,85	56,10	19,64	42,88
8	86,56	70,45	60,06	56,81	63,53	40,68	23	98,14	105,85	63,13	118,88	82,38	64,38
9	76,19	55,31	54,40	73,93	45,48	33,71	24	152,25	154,62	131,42	145,63	128,64	118,98
10	22,85	18,71	17,27	27,84	38,70	41,41	25	0,18	0,00	3,10	16,06	1,71	12,42
11	60,49	30,42	59,63	57,72	55,49	37,26	26	9,13	13,12	6,25	9,52	20,70	2,01
12	40,26	64,97	47,13	54,35	52,23	66,11	27	0,00	4,50	25,74	2,79	19,18	16,77
13	23,23	20,71	49,42	22,97	34,64	10,54	28	4,05	0,00	6,64	1,67	6,05	5,68
14	33,21	9,14	34,27	43,30	26,86	28,61	29	13,56	15,29	31,30	24,49	11,68	9,55
15	71,73	72,42	83,58	69,24	82,35	71,71	30	4,50	3,78	21,06	3,15	0,00	9,09

3.4.3. Resultados calibración

Una vez tabuladas ambas precipitaciones por pixel (Tablas 3.4 y 3.5), se realizó una relación lineal entre la precipitación media observada en el evento obtenida de las estaciones meteorológicas DGA (P.M.O) y la precipitación media en el evento obtenida vía imagen satelital (P.M.S) para cada uno de los pixeles analizados, cuyas gráficas se indican en las Figuras 3.6 a 3.11.

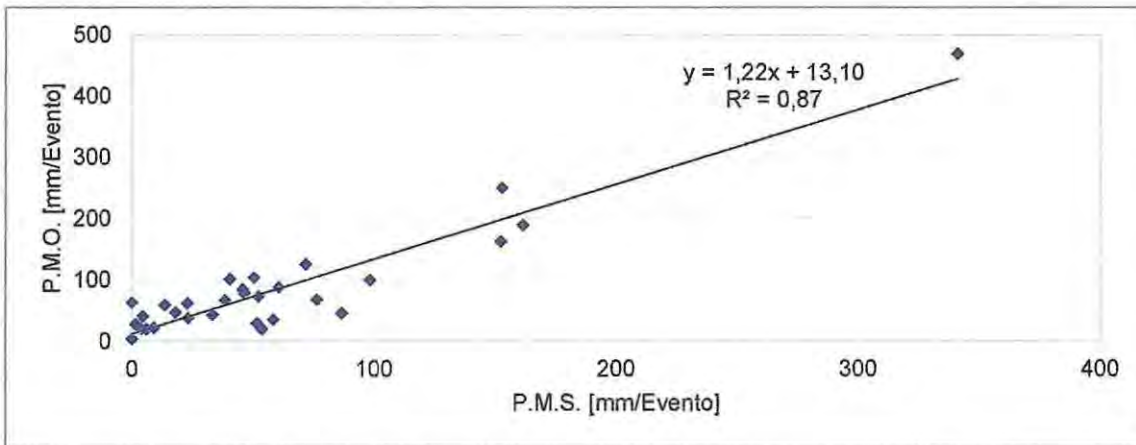


Figura 3.6 - Comparación precipitación media satelital y observada para Pixel 3.

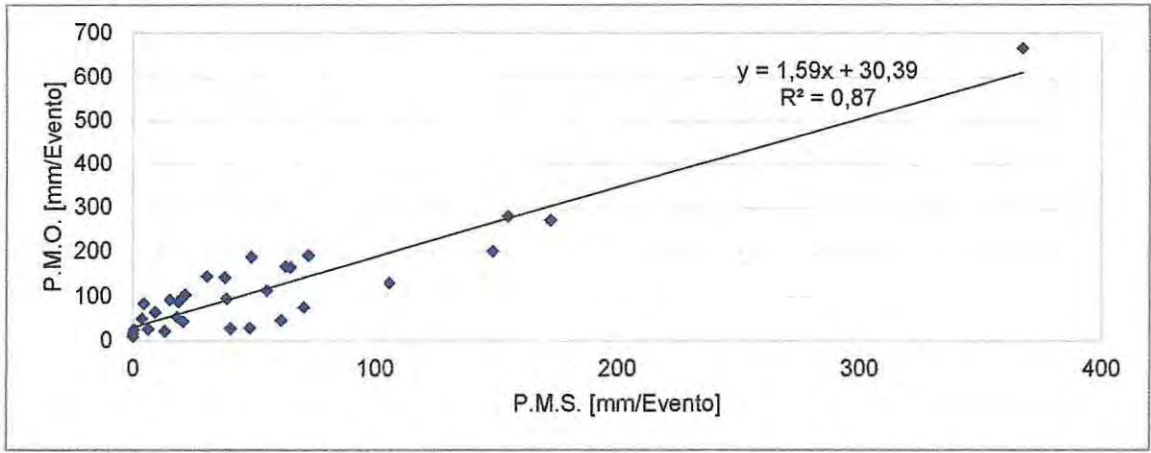


Figura 3.7 - Comparación precipitación media satelital y observada para Pixel 4.

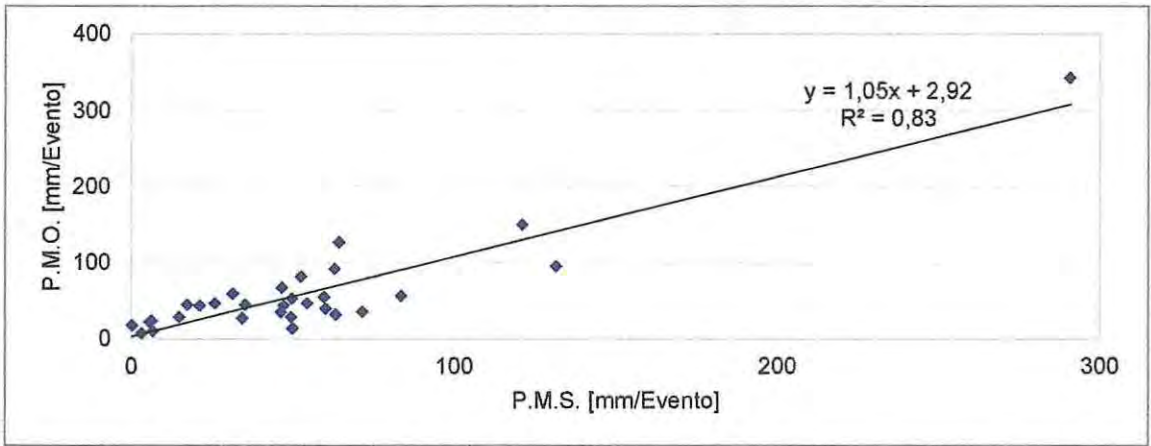


Figura 3.8 - Comparación precipitación media satelital y observada para Pixel 5.

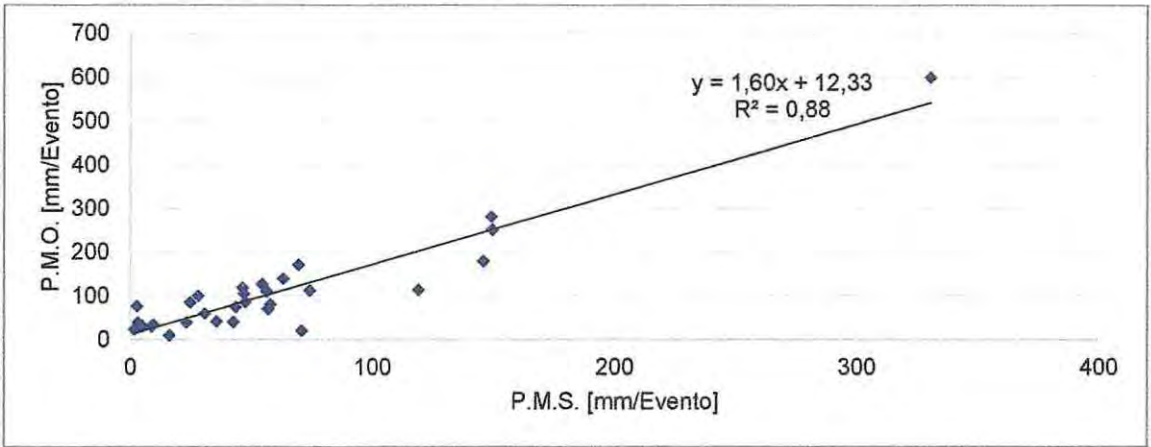


Figura 3.9 - Comparación precipitación media satelital y observada para Pixel 7.

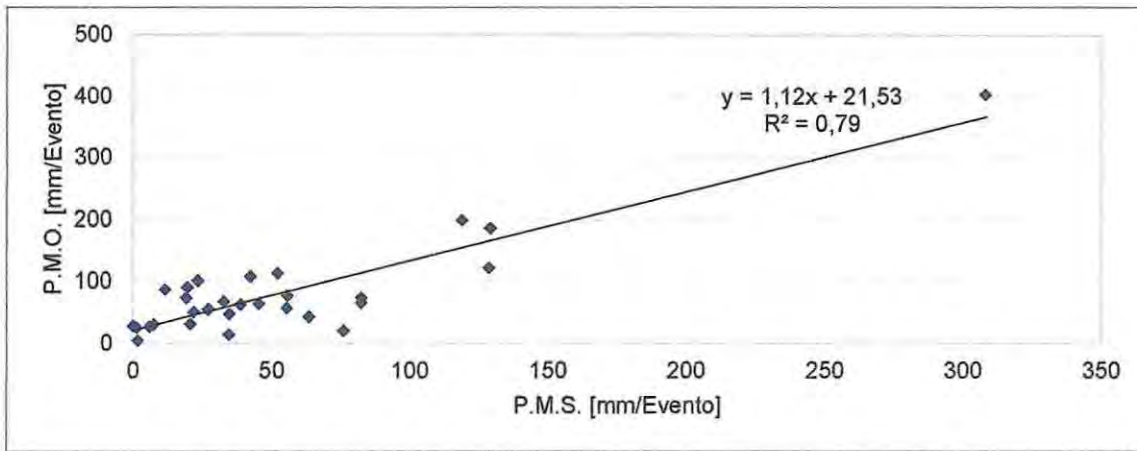


Figura 3.10 - Comparación precipitación media satelital y observada para Pixel 10.

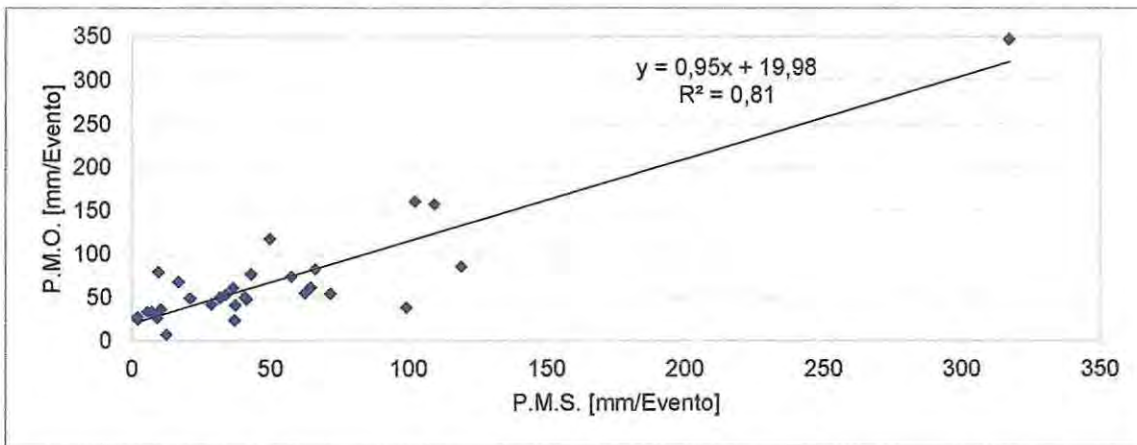


Figura 3.11 - Comparación precipitación media satelital y observada para Pixel 14.

Se obtuvieron 6 relaciones independientes, a las que se les efectúa un ajuste lineal mediante la incorporación de un modelo que permite relacionar de forma lineal los registros observados de las estaciones meteorológicas con alguna característica de la zona (variable física) y aplicarla a las imágenes satelitales con la finalidad de encontrar una ecuación única que represente al sistema.

Dado lo anterior, se realiza un análisis a las pendientes de las ecuaciones de calibración (Tabla 3.7), las que en términos generales no presentan una gran variabilidad, por tanto, se determina su valor promedio y se incorpora en el desarrollo de la expresión que se requiere formar. En cuanto a la variabilidad de los interceptos para el conjunto de ecuaciones, en estos se observan las mayores dispersiones.

En la literatura existen estudios que han corroborado la variación de las precipitaciones con la altura geográfica [47]. Por consiguiente, una forma de incorporar esta variación es a través de una relación entre los interceptos (B_{pixel}) y la altura media ($\overline{H_{\text{pixel}}}$) de cada uno de los pixeles a calibrar, tal como se indica en la Tabla 3.6 y se resume en la Ecuación 3.3.

El valor de la altura media de cada pixel ($\overline{H_{\text{pixel}}}$) se obtuvo mediante el uso de un Sistema de Información Geográfico (SIG), denominado "ASTER GDEM", herramienta que proporciona mapas digitales de elevación geográfica (*Digital Elevation Map, DEM*) mediante pixeles de información en formato Raster [48], los que luego son procesados y analizados en el programa QGIS.

Tabla 3.6 - Relación lineal, altura media e intercepto de cada pixel de calibración.

Pixel	Relación Pixel	Altura Media $\overline{H_{\text{pixel}}}$ [m]	Intercepto B_{pixel}
3	$y = 1,22x + 13,10$	707,89	13,10
4	$y = 1,59x + 30,39$	1280,01	30,39
5	$y = 1,05x + 2,92$	172,18	2,92
7	$y = 1,60x + 12,33$	1059,13	12,33
10	$y = 1,12x + 21,53$	481,79	21,53
14	$y = 0,95x + 19,98$	467,99	19,98

Para ajustar la calibración se debió prescindir de los pixeles 10 y 14, ya que éstos se alejaban de la tendencia general y proporcionaban una correlación igual a 0,36, lo cual no era representativo para calibrar el modelo e impedía el correcto ajuste de las precipitaciones. La correlación fue inferior al resto de los pixeles, registrando valores de 0,79 (Pixel 10) y 0,81 (Pixel 14) y se observó variabilidad entre las alturas medias e interceptos.

En ambos pixeles se tiene una altura media del orden de 470 [m] e interceptos de aproximadamente 20,00, mientras que en el pixel 6 con una altura media similar, se obtiene un intercepto de 6,49 (Tabla 3.10). Lo anterior se explica debido a que la zona de los pixeles 10 y 14 registra más precipitación, probablemente a causa de la dirección en que avanzan los frentes (desde el Sur-Oeste), lo que provoca una mayor diferencia entre la imagen satelital y los registros observados. Por su parte, en los sectores altos por sobre los 1000 [m] (pixeles 4,7,8,11 y 12), se obtienen interceptos cercanos o superiores a 20,00 (tal como los registrados en los pixeles 10 y 14), lo que se condice con los mayores registros de precipitación en la zona por efectos de la altura y la poca disponibilidad de estaciones en el área.

Por lo tanto, se descarta del análisis la última línea de la grilla (pixel 14) porque no se ajusta al modelo que se está planteando, es decir, no sigue la misma tendencia o comportamiento con respecto a la zona superior, y se prescinde del pixel 10 en esta parte del estudio, pero se trata de extender la relación en la zona analizando el pixel 9 en la etapa de validación, ya que una pequeña porción de la cuenca a modelar (capítulo 5) se encuentra inserta en la penúltima línea.

En conformidad con lo anterior, en la Figura 3.12 se observa que de la relación lineal realizada con los pixeles 3, 4, 5 y 7, se logra una correlación igual a 0,76, lo cual es aceptable para continuar con la estimación.

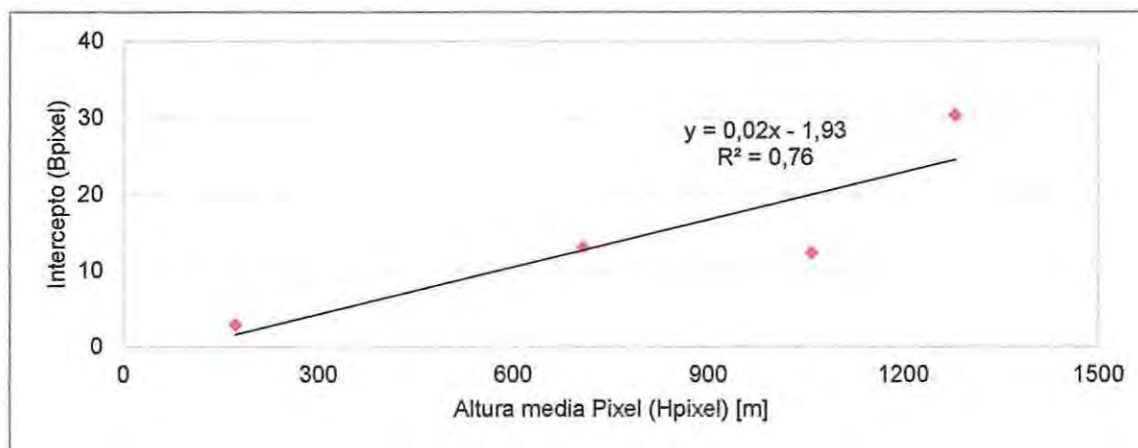


Figura 3.12 - Relación lineal para calibración.

La expresión obtenida para la relación entre la altura media del pixel y el intercepto se resume en la Ecuación 3.3. Esta ecuación permite determinar el intercepto de cualquier pixel, conocida la magnitud de su altura media.

$$B_{\text{pixel}} = 0,02 \times \overline{H_{\text{pixel}}} - 1,93$$

3.3

Tal como se menciona anteriormente, para determinar la pendiente de la regresión lineal se utilizó el valor promedio de las relaciones encontradas para cada pixel, lo que se resume en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7 - Pendiente de la regresión lineal.

Pixel	Relación Pixel	Altura Media $\overline{H_{\text{pixel}}}$ [m]	Intercepto B_{pixel}	Pendiente
3	$y = 1,22x + 13,10$	707,89	13,10	1,10
4	$y = 1,59x + 30,39$	1280,01	30,39	1,35
5	$y = 1,05x + 2,92$	172,18	2,92	1,01
7	$y = 1,60x + 12,33$	1059,13	12,33	1,36
			Promedio	1,20

Finalmente, se obtiene una relación que depende de la precipitación media satelital y de la nueva variable incorporada, tal como se indica en la Ecuación 3.4. Esta relación presenta una correlación de 0,76 (Figura 3.12).

$$P.M.Sc = 1,2 \times P.M.S + B_{\text{pixel}}$$

3.4

Donde:

- P.M.Sc.: es la precipitación media satelital corregida por pixel, en [mm].
- P.M.S.: es la precipitación media satelital por pixel, en [mm].
- B_{pixel} : es el intercepto del pixel obtenido a partir de la Ecuación 3.3.

Con la expresión anterior se ajustan las precipitaciones satelitales en función de la altura de cada pixel involucrado, lo que permite particularizar los registros a una zona determinada y hacerlos más representativos ante la incorporación de una variable física del territorio.

Estos resultados son sometidos a un proceso de validación para poder confirmar el uso de este modelo en la estimación de la precipitación en una tormenta mediante el registro satelital.

3.5. Validación

La validación es un proceso previo a la estimación de la precipitación media en la zona de interés (Figura 3.1) que consiste en verificar la aplicación de la relación obtenida en la calibración (Ecuación 3.4) en pixeles no considerados en dicha etapa. Por consiguiente, se seleccionaron cuatro pixeles con al menos una estación meteorológica dentro de cada uno (Figura 3.2) y un conjunto de 15 tormentas, las cuales se describen en la Tabla 3.8.

Tabla 3.8 - Descripción de eventos seleccionados para etapa de validación.

Tormenta N°	Fecha de Inicio	Fecha de Término	Tormenta N°	Fecha de Inicio	Fecha de Término
1	13-may-00	15-may-00	9	17-sept-04	18-sept-04
2	22-may-00	25-may-00	10	22-nov-05	24-nov-05
3	25-oct-01	27-oct-01	11	19-sept-07	21-sept-07
4	25-jun-02	28-jun-02	12	21-oct-09	23-oct-09
5	17-jul-03	20-jul-03	13	06-nov-10	08-nov-10
6	15-nov-03	17-nov-03	14	21-abr-11	23-abr-11
7	09-abr-04	14-abr-04	15	24-jun-13	30-jun-13
8	19-abr-04	21-abr-04			

3.5.1. Precipitación media observada por pixel

En la Tabla 3.9, se indican los resultados de la Precipitación Media Observada (P.M.O) por pixel, obtenidos mediante el empleo de la Ecuación 3.1.

3.5.2. Precipitación media satelital por pixel

De manera similar al proceso de calibración, se obtuvo la Precipitación Media Satelital (P.M.S) por pixel, cuyos valores se resumen en la Tabla 3.9.

Tabla 3.9 - Precipitación media observada (P.M.O) y media satelital (P.M.S.) pixeles de validación en [mm].

Precipitación media observada					Precipitación media satelital				
Tormenta N°	P.M.O Pixel 1	P.M.O Pixel 2	P.M.O Pixel 6	P.M.O Pixel 9	Tormenta N°	P.M.S Pixel 1	P.M.S Pixel 2	P.M.S Pixel 6	P.M.S Pixel 9
1	5,54	6,58	5,60	9,20	1	8,14	13,90	15,09	14,30
2	37,20	45,05	65,70	37,71	2	51,40	31,73	28,28	33,22
3	16,91	15,61	29,43	13,49	3	6,02	8,67	10,20	7,91
4	48,74	56,59	55,77	26,52	4	76,88	71,16	27,81	21,04
5	7,26	23,37	47,64	25,43	5	15,22	31,88	45,90	20,96
6	54,99	63,44	62,75	69,88	6	47,12	34,90	46,19	52,18
7	101,94	174,85	176,87	128,56	7	78,46	119,28	145,27	110,10
8	35,63	59,89	63,08	53,84	8	55,88	61,92	46,73	37,11
9	21,94	44,87	49,78	35,27	9	5,57	13,70	29,32	14,60
10	14,69	31,61	44,99	37,67	10	20,55	10,26	12,51	41,50
11	10,49	17,31	30,49	10,31	11	9,80	16,39	22,31	24,42
12	34,82	36,36	46,82	43,82	12	17,15	28,44	29,83	41,09
13	14,05	25,02	28,88	9,09	13	4,04	9,90	6,80	9,52
14	25,28	40,79	51,81	54,15	14	1,08	17,36	7,26	57,36
15	136,01	145,69	172,91	145,96	15	136,24	153,64	126,68	130,72

Luego, mediante la Ecuación 3.3, se determina el intercepto de cada pixel de validación, cuyos resultados se indican en Tabla 3.10.

Tabla 3.10 - Altura media e intercepto para cada pixel de validación.

Pixel	Altura Media $\overline{H_{\text{pixel}}}$ [m]	Intercepto B_{pixel}
1	114,34	0,42
2	247,88	3,17
6	408,75	6,49
9	204,77	2,29

3.5.3. Precipitación media satelital corregida

Con los valores de los interceptos, se corrige la precipitación satelital mediante la aplicación de la Ecuación 3.4 y se obtiene la Precipitación Media Satelital corregida para cada pixel de validación (P.M.Sc), cuyos resultados se presentan en la Tabla 3.11.

Tabla 3.11 - Precipitación media satelital corregida (P.M.Sc) pixeles de validación en [mm].

Tormenta N°	P.M.Sc Pixel 1	P.M.Sc Pixel 2	P.M.Sc Pixel 6	P.M.Sc Pixel 9
1	10,19	19,86	24,59	19,45
2	62,10	41,25	40,43	42,15
3	7,65	13,57	18,73	11,78
4	92,68	88,56	39,86	27,53
5	18,68	41,43	61,57	27,43
6	56,97	45,06	61,92	64,90
7	94,57	146,31	180,82	134,40
8	67,48	77,48	62,57	46,82
9	7,10	19,62	41,67	19,80
10	25,09	15,49	21,50	52,09
11	12,18	22,84	33,26	31,59
12	21,00	37,30	42,29	51,60
13	5,28	15,06	14,65	13,71
14	1,72	24,00	15,20	71,12
15	163,91	187,54	158,50	159,15

3.5.4. Resultados validación

En las Figuras 3.13 a 3.16, se indican las correlaciones y gráficas comparativas entre la Precipitación Media Observada y la Precipitación Media Satelital corregida para cada pixel de validación.

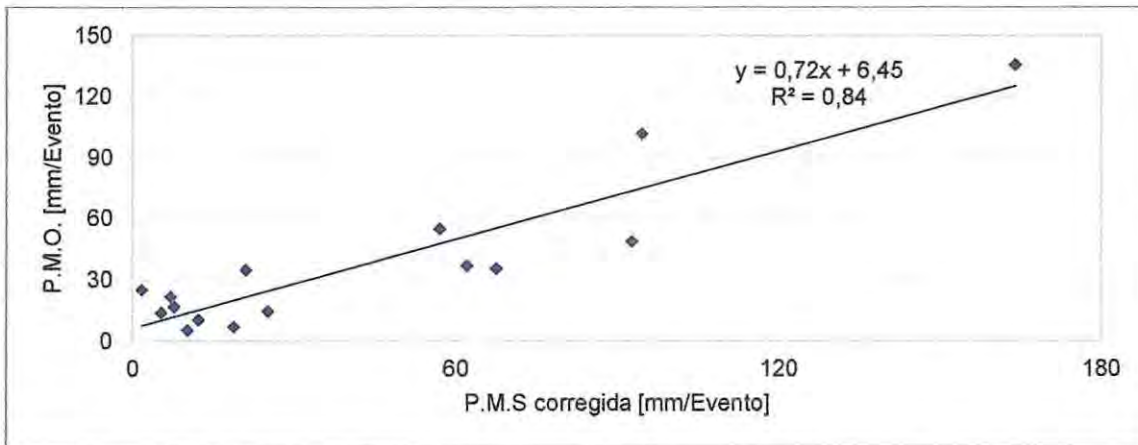


Figura 3.13 - Comparación precipitación media satelital corregida y observada para Pixel 1.

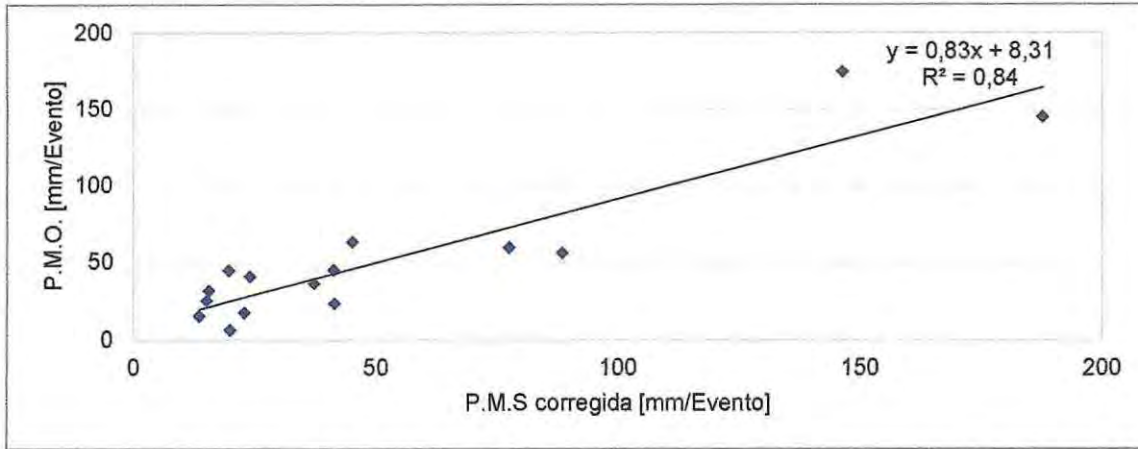


Figura 3.14 - Comparación precipitación media satelital corregida y observada para Pixel 2.

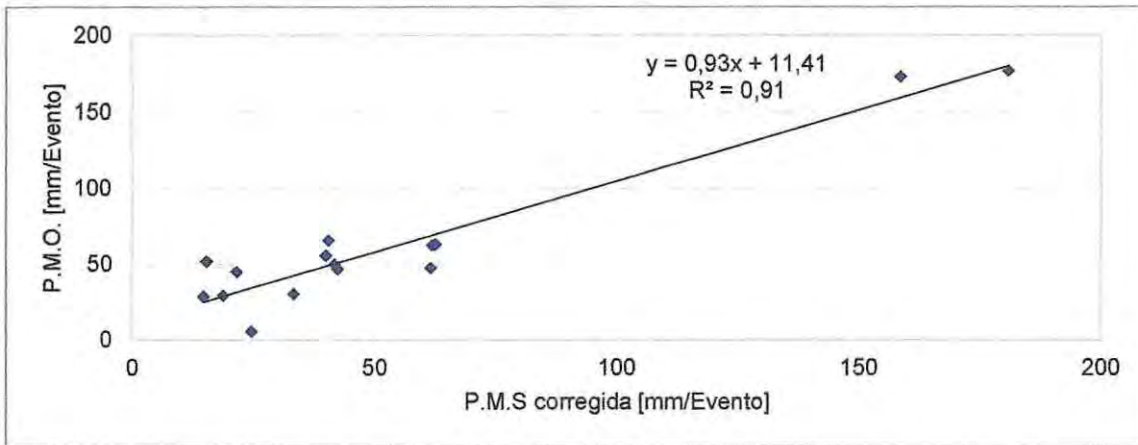


Figura 3.15 - Comparación precipitación media satelital corregida y observada para Pixel 6.

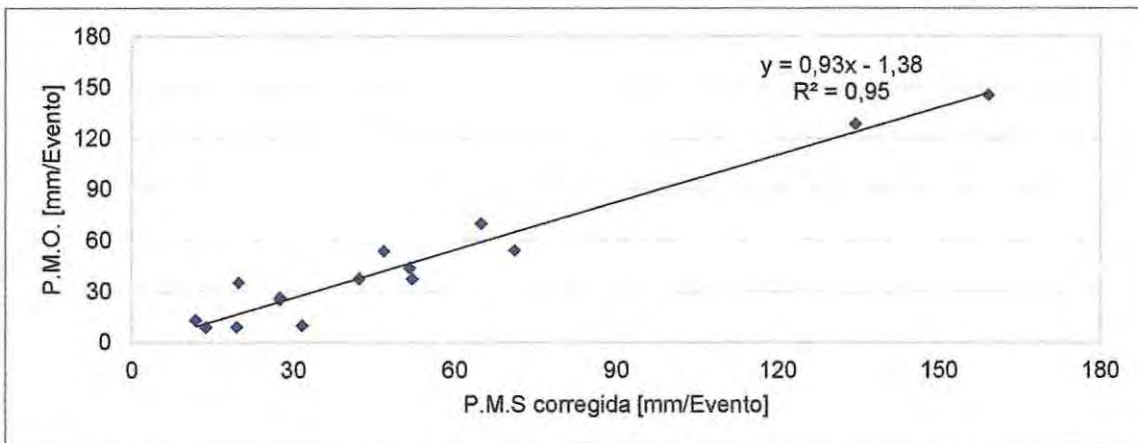


Figura 3.16 - Comparación precipitación media satelital corregida y observada para Pixel 9.

De las figuras anteriores, se observa que los pixeles analizados en la etapa de validación arrojaron en general buenos resultados, con coeficientes de determinación R^2 superiores a 0,80, lo cual es bastante satisfactorio para el modelo.

Además, se corrobora que el pixel 9 presenta una buena correlación, por lo que se considera aceptable aplicar la relación a esta línea de píxeles.

Si se representan todos los píxeles de validación en una sola gráfica general, tal como se ilustra en la Figura 3.17, se obtiene como resultado que el coeficiente de determinación toma un valor de:

$$R^2 = 0,86$$

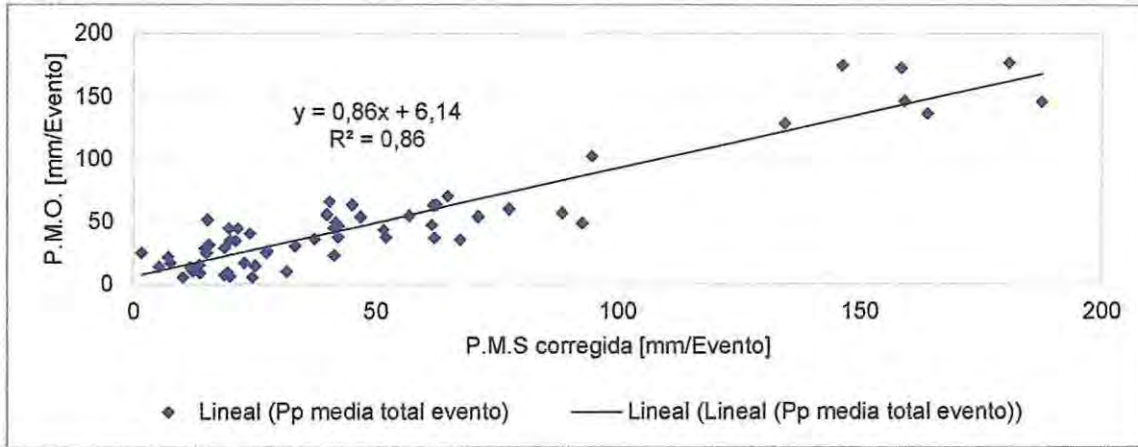


Figura 3.17 - Comparación precipitación media total obtenida a base de datos satelitales corregidos (P.M.Sc) y observados (P.M.O) para píxeles de validación.

Lo que comprueba que la expresión determinada en la calibración (Ecuación 3.4), arroja resultados aceptables al comparar los valores resultantes con los obtenidos en base a datos observados y deja de manifiesto la alta correlación que se logra al incluir la altura de pixel como variable independiente al determinar la precipitación media de un evento sobre éste.

En virtud de los resultados anteriormente expuestos, se considera que las imágenes satelitales proporcionadas por el satélite TRMM 3B42 V7 se encuentran calibradas y validadas, y, por lo tanto, es factible su uso para la estimación de precipitaciones en la zona de estudio.

Capítulo 4

4. Descripción de la cuenca de estudio

4.1. Identificación de la zona de estudio

El estudio se realiza en la Región del Biobío, Chile, la cual tiene una superficie de 37068,70 [km²], representando el 4,9% del territorio nacional y una población de 1861562 habitantes. Está ubicada entre el paralelo 36°00' y 38°30' de Latitud Sur, limita al norte con la Región del Maule, al sur con la Región de la Araucanía, al oeste con el Océano Pacífico y al este con la República Argentina. La región está dividida administrativamente en 4 provincias y 54 comunas. Sus provincias son: Ñuble, Biobío, Arauco y Concepción, siendo ésta última la capital regional (Figura 4.1).

En lo que respecta a la geomorfología, la Región del Biobío cuenta con cinco unidades morfológicas mayores que de Oeste a Este son las siguientes: Planicies litorales, Cordillera de la Costa, Depresión Central, La Montaña (o Precordillera) y la Cordillera Andina.

La precordillera se destaca por estar profundamente disectada por los ríos que la atraviesan (Ñuble, Chillán, Diguillín, Laja, Biobío, entre otros). La Cordillera de los Andes está representada por cordones montañosos con algunas cimas que corresponden a conos volcánicos, tales como: Chillán (3.212 m), Antuco (2.985 m), Copahue (2.965 m) y Callaqué (3.164 m), y está disectada por ríos mayores y cauces tributarios, entre ellos, los ríos Longaví, Perquillauquén, Ñuble (que desemboca en el río Itata), Chillán, Renegado y Diguillín. Los valles presentan una gran anchura en el área norte (Chillán), se encuentran erosionados por la acción glacial y fluvial y se distribuyen radiales en torno a los distintos complejos volcánicos [49].

Respecto a las condiciones climáticas, esta zona se define como de transición entre un clima templado mediterráneo cálido y un clima templado húmedo o lluvioso. En la franja costera presenta precipitaciones con montos anuales de 1200 [mm], mientras que hacia la zona cordillerana se registran montos superiores a los 2000 [mm] al año [50].

La red hidrográfica de la región guarda estrecha relación con las características y evolución del relieve regional. Esta densa red se organiza en dos grandes cuencas u hoyas hidrográficas: la hoya del río Biobío y la hoya del río Itata. Ambas cuencas corren de Este a Oeste, cortando a lo ancho la región [51]. Sus principales características son las siguientes:

- **La hoya del río Biobío:** es la tercera más grande del país, el 72% de su cuenca hidrográfica está ubicada dentro de la Región del Biobío. Drena una superficie de 24029 [km²], nace de las lagunas Icalma y Galletué, en la Cordillera de los Andes (Región de la Araucanía). Después de recorrer 380 [km], desemboca en el Golfo de Arauco. Presenta dos crecidas a lo largo del año: una correspondiente a los meses de invierno, por los aportes de las precipitaciones, y otra en primavera, provocada por los deshielos.
- **La hoya del río Itata:** su cuenca hidrográfica se ubica entre los paralelos 36°12' y 37°16' de Latitud Sur, y entre los meridianos 71°00' y 73°10' de Longitud Oeste. Drena una superficie de 11294 [km²], la que desemboca en el Océano Pacífico. Su origen se encuentra cerca de la estación Cholguán del Ferrocarril Longitudinal Sur, e incluye tres subcuencas: del río Itata, del Ñuble y del Diguillín. El principal cauce de la cuenca es el río Itata, y su mayor tributario, el río Ñuble. El río Itata se origina de la confluencia los ríos Cholguán y Huépil y antes de su junta con el río Ñuble, recibe los tributarios Dañicalqui, Diguillín y Larqui, cuyas cabeceras se encuentran en la zona de montaña. Este río tiene una longitud de 230 [km] y un caudal medio anual de 361 [m³/s]. Se encuentra bajo la influencia de un bioclima mediterráneo y presenta al menos dos meses consecutivos del período estival con déficit hídrico. Su cuenca presenta un régimen pluvial, con muy poca influencia nival, con la excepción de la parte alta del río Ñuble, que muestra un carácter mixto [52].

4.2. Área de estudio

El presente trabajo se desarrolló en la cuenca del río Diguillín en San Lorenzo, subcuenca del río Diguillín, ubicada entre las latitudes 36°48'S, 37°03'S y longitudes 71°19'W, 72°22'W. Esta cuenca posee un área total de 208,48 [km²]. Su cauce principal es el río Diguillín, el cual nace en la falda Suroeste del complejo volcánico "Nevados de Chillán" y recorre una longitud de 35,04 [km], dando origen al valle Nevados de Chillán [53].

El río Diguillín se encuentra inserto en la Provincia de Ñuble, Región del Biobío, tiene un recorrido total de 102 [km] hasta su confluencia con el río Itata y forma una de las tres subcuencas de la hoya hidrográfica de este último [54].

En la Figura 4.1, se describe en forma general la Región del Biobío, en ésta se señalan sus provincias y capitales respectivas. Además, en color verde, se indica la ubicación de la cuenca del río Diguillín en San Lorenzo.

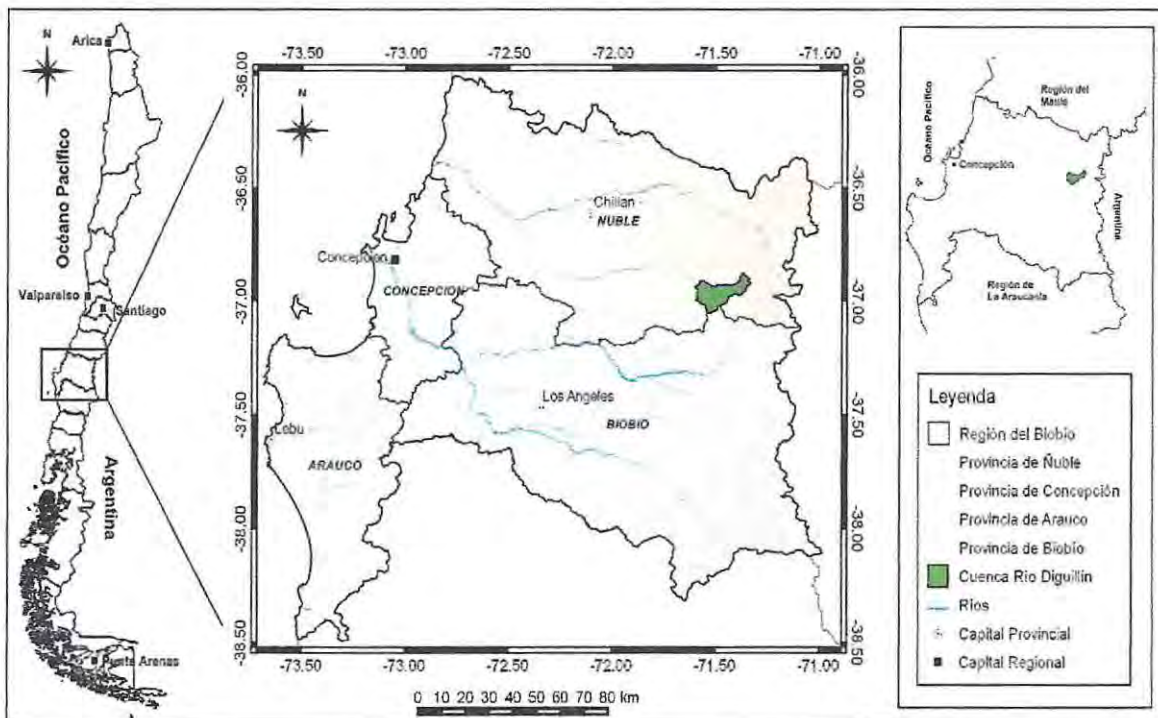


Figura 4.1 - Descripción de la zona de estudio.

4.3. Geografía

4.3.1. Clima

La cuenca del río Diguillín presenta una precipitación media anual de 1875 [mm] durante el invierno. En lo que respecta a las temperaturas, tiene una media mensual de 12,4 °C, con un rango entre 6 °C en invierno y 20 °C en verano [55].

Con el objetivo de representar el clima de la cuenca, se elaboró un climograma (Figura 4.2), mediante el cual se graficó la evolución de la temperatura con la pluviometría en base a un registro a 30 años (1984 a 2014) proporcionado por la estación meteorológica "Diguillín" de la DGA. Los datos y ubicación de ésta se indican en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 - Descripción de la estación meteorológica "Diguillín".

Nombre	Código BNA	Latitud	Longitud	Altitud [m]	Fecha de Inicio
Diguillín	08130006-2	36° 52' 07"	71° 38' 33"	670	01-May-59

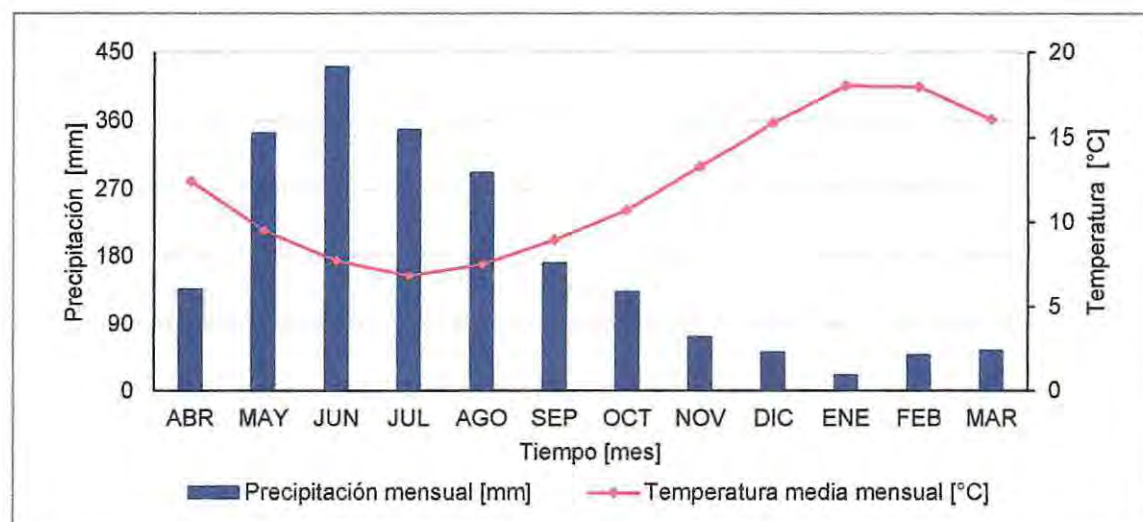


Figura 4.2 - Climograma de la cuenca en estación meteorológica Diguillín.

Del climograma, se observa claramente la concentración de precipitaciones en los meses de invierno, con una fuerte disminución hacia la época de verano, caso contrario al de la temperatura, la cual presenta sus menores registros en el periodo invernal.

4.3.2. Hidrogeología y volcanismo

Los procesos que controlan el régimen hidrológico de la cuenca en lo que respecta a los caudales, son las lluvias provenientes del Océano Pacífico, un pequeño aporte del derretimiento de nieves y la liberación de aguas subterráneas. En el periodo de verano, las descargas de agua subterránea al río Diguillín tienen gran relevancia, ya que mantienen el caudal de estiaje en periodo estival, debido a la presencia de fracturas en las rocas ígneas y volcánicas que presenta la zona [55].

Por su ubicación en la montaña, la cuenca presenta alta variabilidad temporal con respecto a las características hidro-meteorológicas, donde el efecto orográfico produce un incremento en los montos de las precipitaciones y una conexión a nivel de cuenca y subcuenca de tipo interacción agua superficial-subterránea [53].

En relación a lo anterior, se destaca que la geología de la cuenca está controlada por procesos volcánicos asociados al complejo volcánico "Nevados de Chillán", los cuales han formado distintas unidades geológicas que se vinculan a rocas fracturadas. La presencia de rocas volcánicas, explican el comportamiento de las aguas subterráneas y la formación de una zona de recarga. Además, la presencia de depósitos fluvioglaciares y rocas sedimentarias, denota zonas bastante permeables que favorecen la formación de acuíferos [55].

El suelo de la cuenca está representado en su mayoría por rocas de la clase de secuencias Volcano-Sedimentarias, que tal como se aprecia en el gráfico circular de la Figura 4.3, representan el 62% de su superficie, además se distinguen rocas que proceden de secuencias volcánicas (17%) y de rocas intrusivas (15%) [56].

Las principales formaciones rocosas existentes [52] son:

- **Rocas Q1**, del tipo sedimentarias. Depósitos aluviales coluviales y de remoción en masa; en menor proporción fluvio-glaciales y deltaicos.
- **Rocas OM2c**, del tipo volcanosedimentario. Secuencia volcanosedimentaria; lavas basálticas a dacíticas, rocas epiclásticas y piroclásticas.
- **Rocas Mg**, del tipo intrusiva. Granodioritas, dioritas, tonalitas.
- **Rocas PPI3**, del tipo volcánicas. Secuencias volcánicas parcialmente erodados, lavas basálticas con intercalaciones de tobas y conglomerados.
- **Rocas Q3i**, del tipo volcánico. Estrato volcanes y complejos volcánicos; lavas basálticas a riolíticas, domos y depósitos piroclásticos andesíticos-basálticos a dacíticos.
- **Ming**, del tipo Intrusivos. Sienogranitos, monzogranitos, granodioritas tonalitas, dioritas y monzodioritas cuarcíferas.

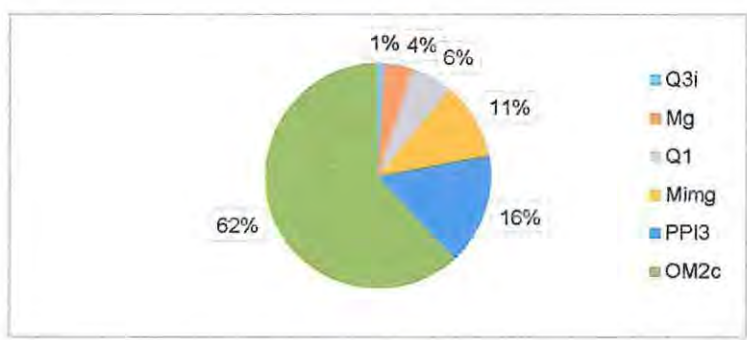


Figura 4.3 - Composición mayoritaria de los suelos en la cuenca del río Diguillín en San Lorenzo.

4.3.3. Uso de suelo

La cuenca se caracteriza por estar ubicada a los pies de la Cordillera de Los Andes, posee una parte importante de bosques en torno al 59% y una pequeña porción de terrenos agrícolas [56]. En el gráfico circular de la Figura 4.4, se describe la distribución principal de los usos de suelo de la cuenca.

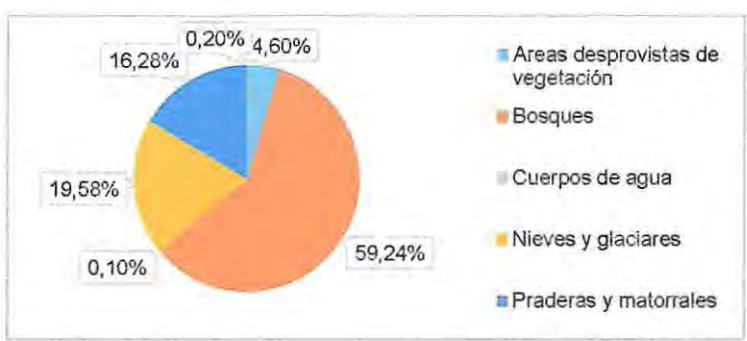


Figura 4.4 - Distribución general de los usos de suelo de la cuenca del río Diguillín en San Lorenzo.

Cada uso de suelo que se indica en la Figura 4.4 posee diversos tipos de cubierta asociados, los cuales están registrados por el Ministerio del Medio Ambiente de Chile (MMA). Esta información es de acceso público, gratuito y se obtiene directamente desde la página web del organismo [57].

Dado lo anterior, se descargó la información contenida para la cuenca y se analizó mediante el programa QGIS. Los resultados se resumen en la Tabla 4.2, donde se desglosan los tipos de cubierta para cada uso de suelo y la superficie que éstos comprenden dentro de la cuenca.

Tabla 4.2 - Usos de suelo y tipo de cubierta para la cuenca del río Diguillín en San Lorenzo.

Uso de Suelo	Tipo Cubierta	A [km ²]	%
Terrenos Agrícolas	Rotación Cultivo-Pradera	0,56	0,27
Praderas Matorrales	Estepa Andina Central	2,11	1,02
	Matorral Pradera Abierto	5,07	2,43
	Matorral Semidenso	3,60	1,73
	Matorral Abierto	21,65	10,39
	Matorral Arborescente Abierto	0,50	0,24
Bosques	Renoval Denso	31,61	15,17
	Renoval Semidenso	30,51	14,65
	Renoval Abierto	51,86	24,89
	Nativo Adulto-Renoval Semidenso	0,73	0,35
	Nativo Achaparrado Semidenso	0,85	0,41
	Nativo Achaparrado Abierto	8,76	4,20
Áreas sin Vegetación	Afloramientos Rocosos	8,17	3,92
	Corrida de Lava y Escoriales	1,91	0,92
Nieves y Glaciares	Nieves	40,19	19,29
Cuerpos de Agua	Ríos	0,24	0,12

Tal como se aprecia en la Tabla 4.2 y Figura 4.4, el uso de suelo predominante son los bosques, los cuales forman una gran diversidad de comunidades vegetacionales nativas, entre ellas: el Bosque Caducifolio de La Montaña, Bosque Caducifolio Andino del Biobío y Bosque Caducifolio de la Frontera. Estas formaciones están dominadas por comunidades de Roble, Raulí y Coigüe, con presencia importante de elementos valdivianos como Laurel y Olivillo [52].

Finalmente, en la Figura 4.5 se representan los distintos tipos de cubierta de suelo asociada al uso que éstos tienen y su distribución en la cuenca.

De la Figura 4.5 se observa que las superficies comprendidas por las distintas cubiertas de suelo se presentan en forma ordenada y bien definidas, encontrándose una pequeña concentración de nieves en la parte superior hacia el Este (Cordillera de Los Andes), una gran proporción de bosques en la parte central a medida que la cuenca desciende hacia el Oeste y una zona de matorrales y praderas concentradas en la parte sur.

Es importante señalar que esta cuenca no presenta cambios significativos con respecto al uso de sus suelos a lo largo del tiempo, ya que en la parte sur se emplaza la Reserva Nacional Ñuble y en la parte norte, se ubica el valle de Aguas Calientes que es una zona de difícil acceso [58].

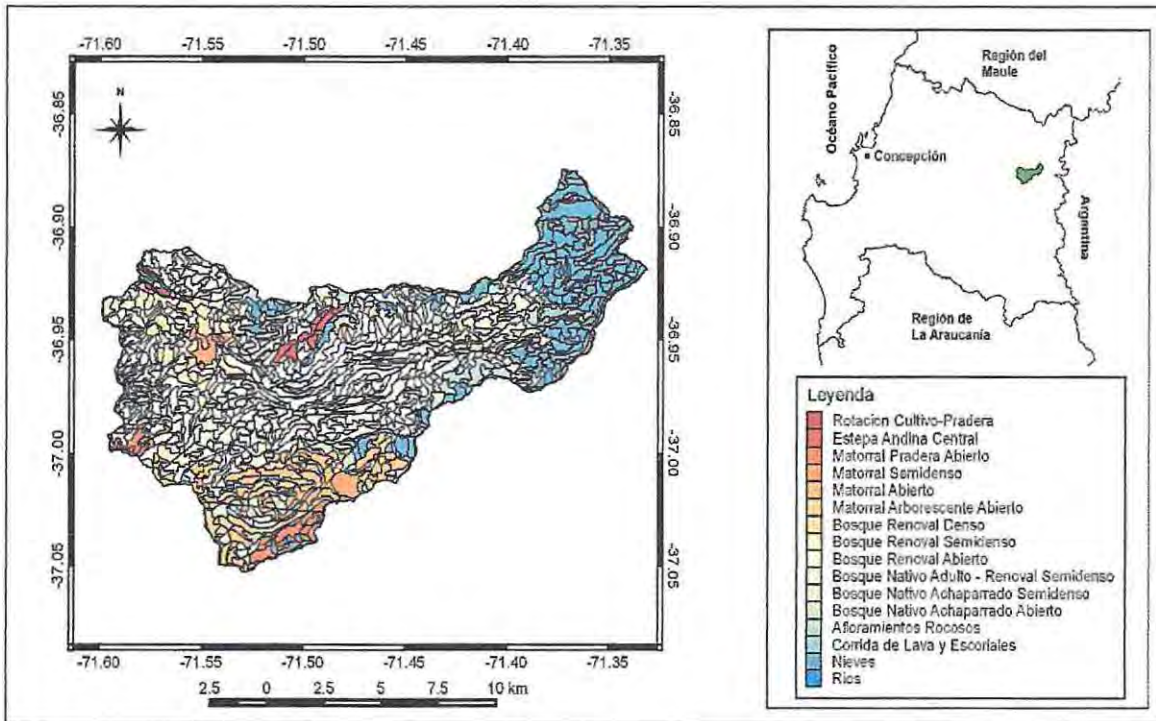


Figura 4.5 - Usos de suelo de la cuenca del río Diguillín en San Lorenzo.

4.3.4. Red hidrográfica

En base a la información proporcionada por la DGA, la red hidrográfica de la cuenca del río Diguillín en San Lorenzo está compuesta por diferentes elementos que alimentan al cauce principal, tales como: ríos, esteros y quebradas, los cuales se describen en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3 - Descripción de la red de drenaje de la cuenca del río Diguillín en San Lorenzo.

Tipo de dren	Nombre	Longitud [Km]
Estero	Estero Los Capados	6,31
Quebrada	Quebrada Honda	6,20
	Quebrada Laguna Seca	2,35
Río	Río Diguillín	35,04
	Río Relbún	8,16
Lago	Sin Nombre	-

Cada uno de éstos elementos constituyen la red de drenaje superficial de la cuenca, siendo el eje principal el curso del río Diguillín, cuyo cauce escurre a lo largo de 35,04 [km] en sentido Este-Oeste, desde los faldeos cordilleranos más elevados. En el trayecto, sus aguas son alimentadas por el río Relbún y las quebradas Honda y Laguna Seca.

Lo anterior se resume en la Figura 4.6, la cual describe la distribución de la red de drenaje superficial de la cuenca. Además, se indica la altimetría de la zona en [m], donde el color verde oscuro denota las zonas más elevadas, mientras que los tonos más claros representan las zonas bajas.

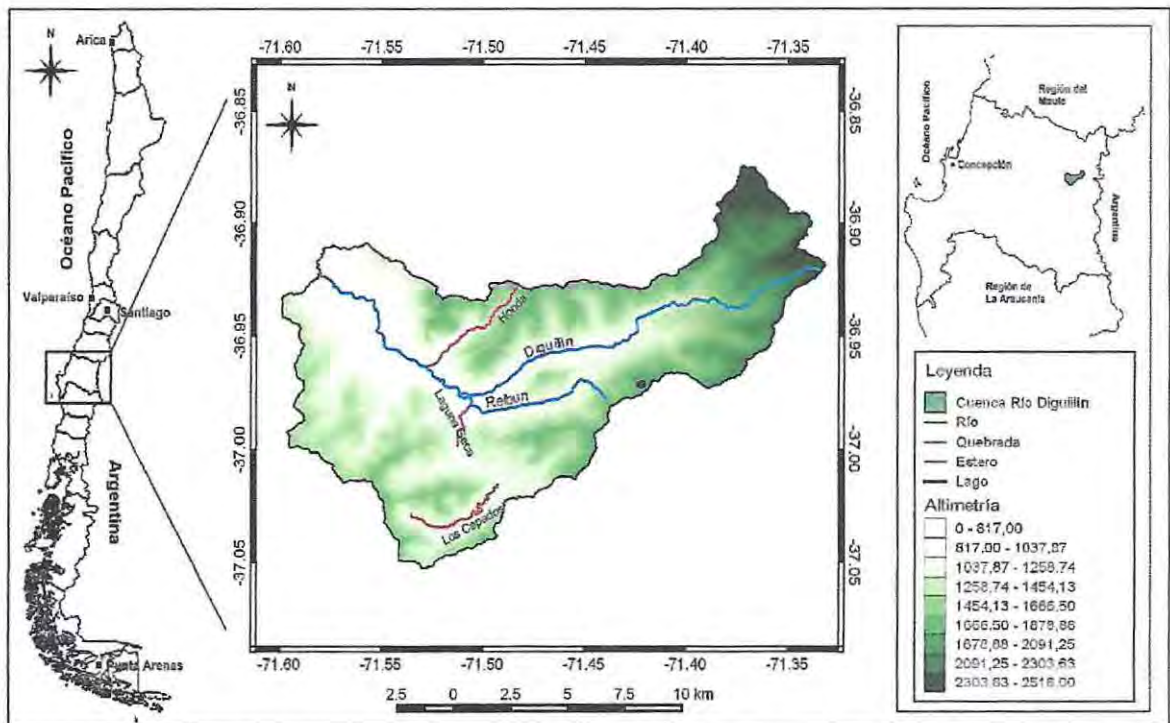


Figura 4.6 - Red de drenaje de la cuenca del río Diguillín en San Lorenzo.

4.4. Información disponible

4.4.1. Pluviometría

La pluviometría de la cuenca es obtenida de la información que proporcionan las estaciones meteorológicas de la DGA y de las imágenes satelitales provenientes del TRMM 3B42 V7. A continuación, se detalla el procedimiento para obtener los registros de precipitación en la cuenca.

4.4.1.1. Identificación de las estaciones meteorológicas

Para determinar las estaciones meteorológicas que ejercen influencia sobre la cuenca, se utilizó el programa QGIS y se realizó una interpolación mediante la generación de polígonos de Thiessen con la red completa de estaciones meteorológicas de la DGA.

En virtud de lo anterior, en la Figura 4.7 se señalan las estaciones representativas resultantes de la interpolación y en la Tabla 4.4, se describen sus ubicaciones y características.

Tabla 4.4 - Descripción de las estaciones meteorológicas de la cuenca del río Diguillín en San Lorenzo.

N°	Nombre Estación	Código BNA	Latitud	Longitud	Altitud [m]
1	Fundo Atacalco	08130003-8	36° 55' 03"	71° 34' 53"	730
2	Las Trancas	08130004-6	36° 54' 39"	71° 28' 45"	1200

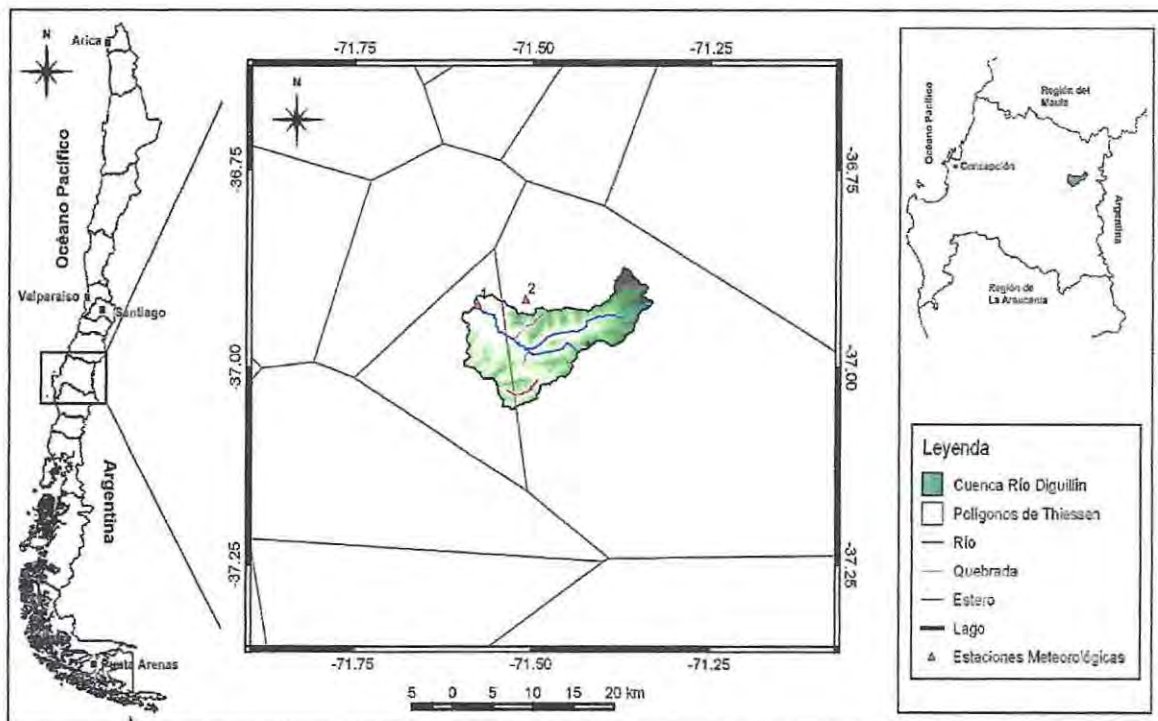


Figura 4.7 - Red de estaciones meteorológicas de la cuenca del río Diguillín en San Lorenzo.

4.4.1.2. Registro de precipitaciones de las estaciones meteorológicas

El registro de precipitaciones observadas sobre la cuenca se obtiene según la sección 4.4.1.1, mediante la información proveniente de las estaciones meteorológicas "Fundo Atacalco" y "Las Trancas" de la DGA, las cuales poseen distintos niveles de influencia dependiendo de la superficie abarcada.

Para esto último, se interceptaron los polígonos con la cuenca y se determinaron sus áreas correspondientes, tal como se ilustra en la Figura 4.8. El Área 1 (de color verde) representa la superficie afecta por la estación "Fundo Atacalco" y el Área 2 (de color naranja), señala la superficie cubierta por la estación "Las Trancas".

En la Tabla 4.5 se indican las áreas señaladas en la Figura 4.8 y la ponderación correspondiente con respecto a la superficie total de la cuenca.

Tabla 4.5 - Área porcentual de la precipitación observada sobre la cuenca.

N°	Nombre Estación	Área [km ²]	Ponderación
1	Fundo Atacalco	148,67	0,71
2	Las Trancas	59,82	0,29

Finalmente, la precipitación observada sobre la cuenca se determina según la Ecuación 4.1, como:

$$P_{observada} = P1 \times A1 + P2 \times A2 \quad 4.1$$

Donde:

- P1, P2: Precipitación registrada por la estación "Fundo Atacalco" y "Las Trancas" en [mm].
- A1, A2: Área ponderada de la estación "Fundo Atacalco" y "Las Trancas".

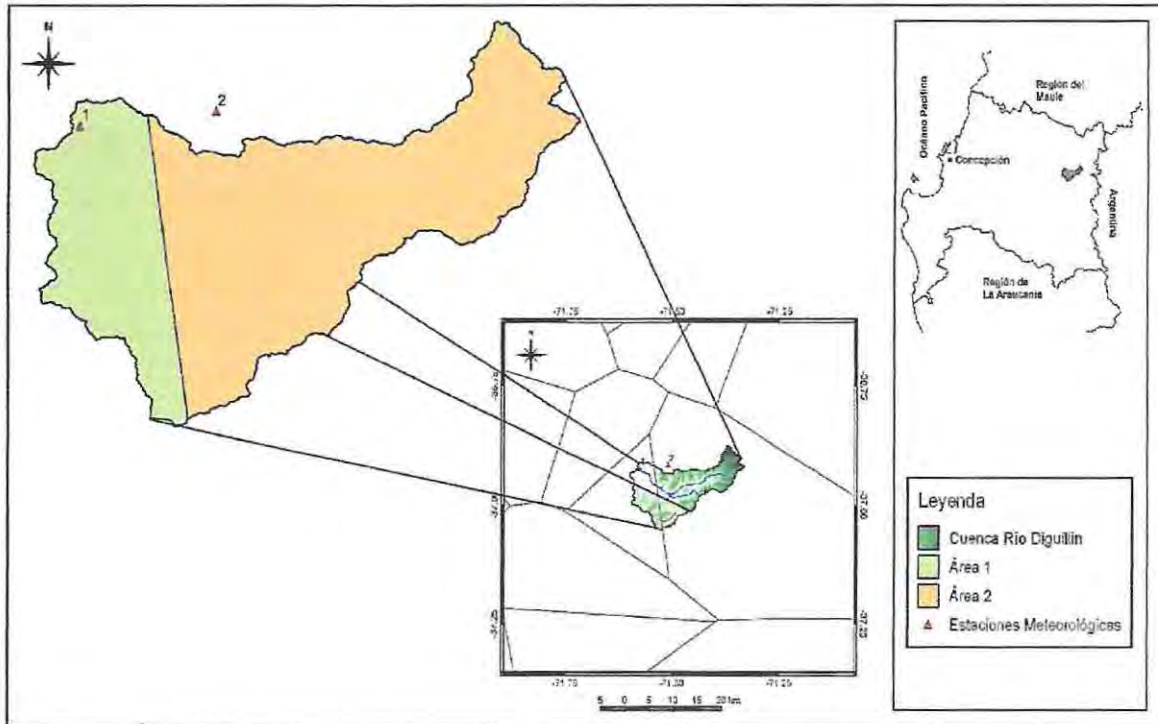


Figura 4.8 - Área porcentual de la precipitación sobre la cuenca.

4.4.1.3. Registro de precipitaciones de las imágenes satelitales

El registro de precipitaciones satelitales sobre la cuenca se obtiene de las imágenes provistas por el satélite TRMM 3B42 V7, que se describe en la sección 2.3.1.1 y se descarga en forma diaria y/o cada 3 horas [46]. Cada imagen está dividida en pixeles de medidas $0,25^\circ$ Latitud x $0,25^\circ$ Longitud y son analizadas en el programa QGIS.

En la Figura 4.9, se indica un ejemplo de la distribución de pixeles con información pluviométrica satelital, registrada el día 21 de Junio del año 2003. Es importante destacar que cada pixel posee una medición de lluvia distinta, razón por la cual estos aparecen con distintas tonalidades, siendo los pixeles de color azul oscuro los que presentan mayores montos de precipitación y los tonos más claros indican los registros menores, en [mm].

Por lo tanto, para poder determinar el registro de precipitación sobre la cuenca, es necesario ponderar los montos de lluvia de cada pixel involucrado por el área porcentual de terreno que estos cubren. Para tal efecto, se dividió la superficie de la cuenca, tal como se señala en la Figura 4.10, en donde cada una de las cuatro áreas corresponde a un porcentaje del área total del pixel que abarca la zona analizada.

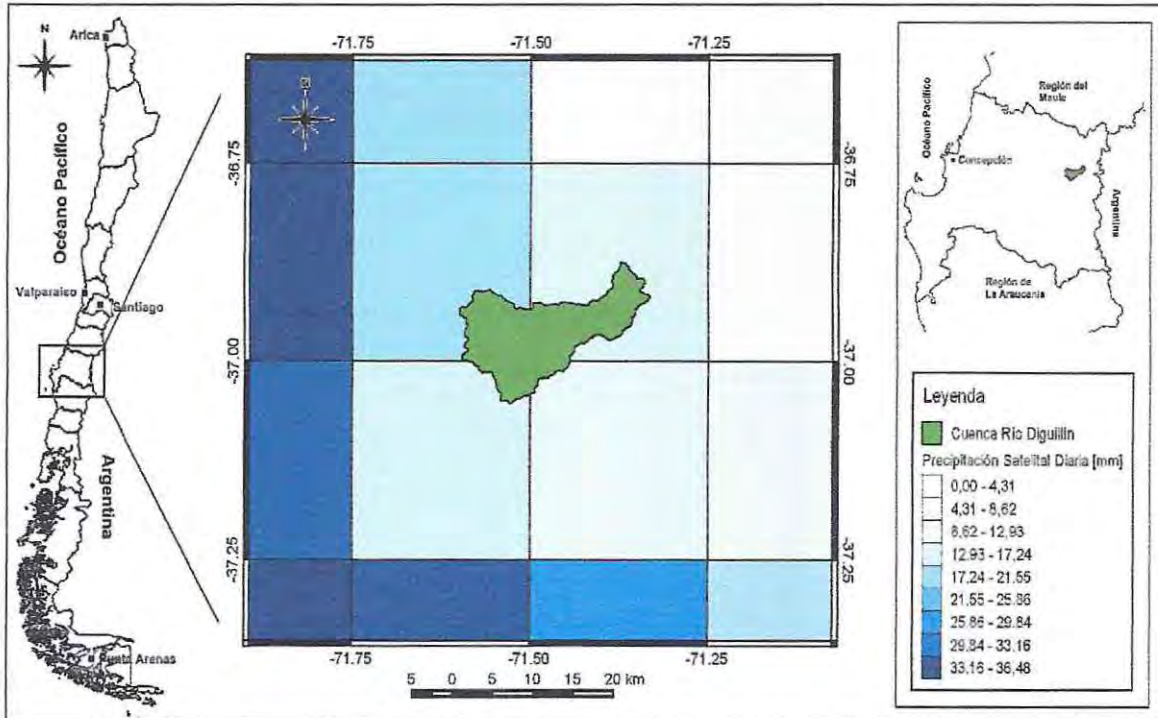


Figura 4.9 - Píxeles con registros de precipitación satelital en la zona de estudio.

En la Tabla 4.6 se indican las magnitudes de las áreas señaladas en la Figura 4.10 y la ponderación correspondiente con respecto a la superficie total de la cuenca.

Tabla 4.6 - Área porcentual de precipitación satelital sobre la cuenca.

Área N°	Área [Km ²]	Ponderación
1	72,17	0,35
2	100,47	0,48
3	25,88	0,12
4	9,99	0,05

Finalmente, la precipitación satelital sobre la cuenca se determina según la Ecuación 4.2, como:

$$P_{satelital} = P1 \times A1 + P2 \times A2 + P3 \times A3 + P4 \times A4 \quad 4.2$$

Donde:

- P1, P2, P3 y P4: Precipitación satelital registrada por los Píxeles 1, 2, 3 y 4, respectivamente. En [mm].
- A1, A2, A3 y A4: Área ponderada de los píxeles 1, 2, 3 y 4, respectivamente.

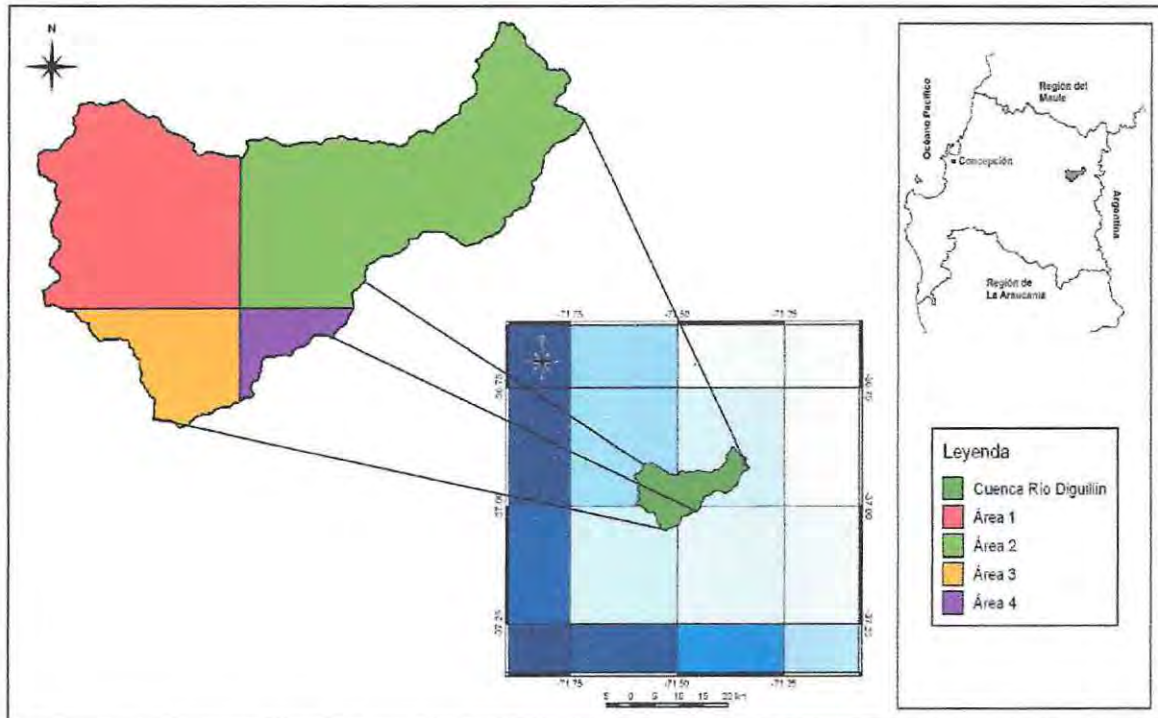


Figura 4.10 - Área porcentual de precipitación satelital sobre la cuenca.

4.4.2. Fluviometría

Los registros de caudal se obtienen directamente desde la estación fluviométrica "Río Diguillín en San Lorenzo (Atacalco)", perteneciente a la DGA y que se encuentra ubicada en la salida de la cuenca. Estos registros se descargaron en formato de caudales medios mensuales, caudales medios diarios y caudales instantáneos.

Dado lo anterior, en la Tabla 4.7 se indican las principales características de la estación y en la Figura 4.11 se ilustra su ubicación.

Tabla 4.7 - Descripción de la estación fluviométrica "Río Diguillín en San Lorenzo".

Nombre Estación	Código BNA	Latitud	Longitud	Altitud [m]	Fecha de inicio
Río Diguillín en San Lorenzo (Atacalco)	08130002-K	36° 55' 28"	71° 34' 32"	727	01-May-65

La DGA señala que el río Diguillín presenta un régimen esencialmente de carácter pluvial, cuyo caudal decrece fuertemente hacia fines de la temporada de riego [53].

Se realiza una curva de variación estacional asociada a la cuenca para un período de 30 años, comprendidos entre los años 1984 y 2014.

En la Tabla 4.8, se indica el promedio del caudal medio mensual que se obtiene para este período. Luego, en la Figura 4.12 se grafican estos registros siguiendo el orden del año hidrológico (Abril a Marzo), obteniendo finalmente la curva de variación estacional correspondiente.

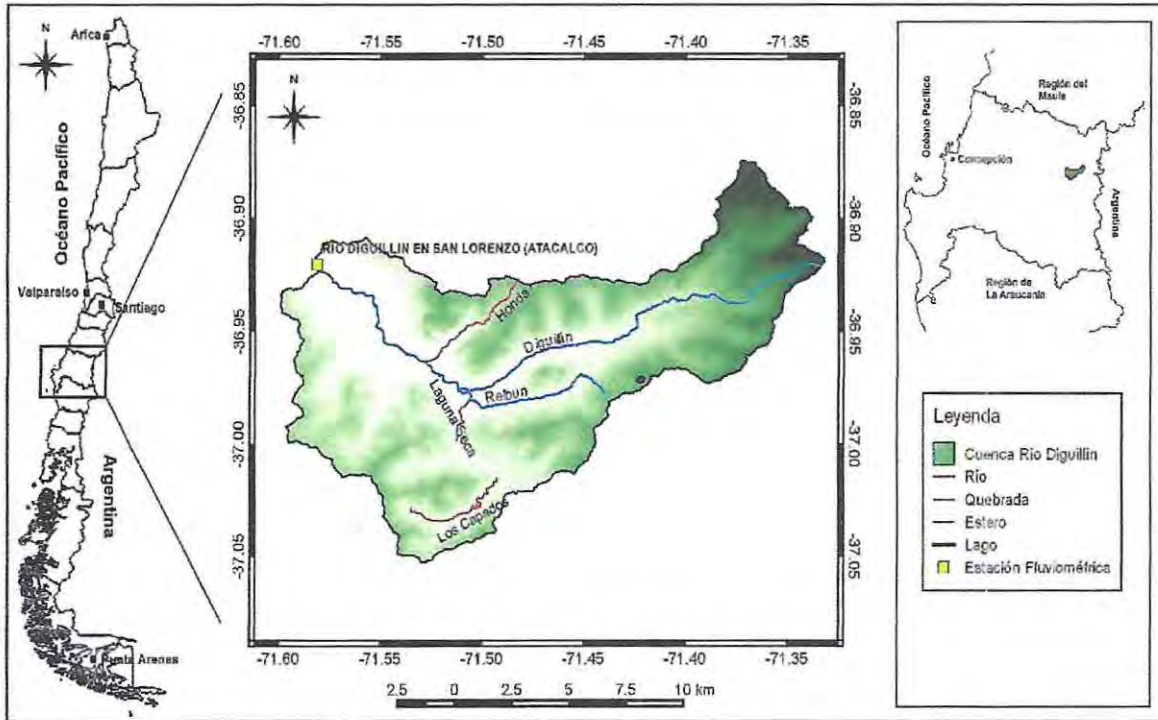


Figura 4.11 - Estación fluviométrica de salida de la cuenca del río Diguillín en San Lorenzo.

Tabla 4.8 - Registro de caudales medios mensuales a 30 años.

Mes	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR
Caudal Q [m³/s]	5,31	19,98	33,52	28,58	24,39	21,33	17,28	12,84	8,54	5,10	3,91	3,49



Figura 4.12 - Curva de variación estacional con registro a 30 años.

De la figura anterior se observa claramente la tendencia a la concentración de los mayores caudales del río en los meses de invierno, manteniéndose en menor grado durante la primavera, debido a que en dicho periodo la cuenca sigue registrando eventos de precipitación, tal como se indica en el climograma de la Figura 4.2.

Capítulo 5

5. Modelación hidrológica de la cuenca del río Diguillín en San Lorenzo

A continuación, se presenta el desarrollo de la modelación hidrológica de la cuenca del río Diguillín en San Lorenzo mediante el programa HEC-HMS, en el cual se simulará el cauce de su curso principal mediante procesos de precipitación-escorrentía. La modelación en el programa será de dos tipos -según el método de estimación de pérdidas por infiltración del suelo- una modelación correspondiente al método SCS, y la otra según el método SMA.

En ambos casos, se calculan los parámetros de entrada para el modelo y luego éstos se someten a distintas simulaciones, donde la respuesta de la cuenca es comparada con la estadística de fluviometría y ajustada a través de un proceso de calibración a los parámetros introducidos al modelo meteorológico, al modelo de pérdidas y al modelo de transformación precipitación-escorrentía. El objetivo es minimizar el error entre el hidrograma calculado y el observado. El proceso final, consiste en evaluar los parámetros ingresados a través de un proceso de validación y compararlos con series de tiempo distintos a los utilizados en el proceso de calibración.

5.1. Construcción del modelo hidrológico

El modelo que se utilizó en el presente trabajo corresponde a un modelo del tipo semidistribuido, que tal como se mencionó en el ítem 2.1.2, permite que sus parámetros varíen espacialmente en la cuenca al trabajar con un alto nivel de detalle en las simulaciones. Por consiguiente, para llevar los datos resultantes del modelo semidistribuido a los resultados óptimos que se buscaban, la calidad y cantidad de datos disponibles, debieron ser correspondientes al incremento en el nivel de detalles de la cuenca.

Para el análisis de las variables hidrológicas de la cuenca, el software realiza la modelación solicitando la entrada de series de datos de precipitación y fluviometría, entregando el hidrograma de salida de la cuenca. Para ello, en esta parte del estudio se recopilaron los antecedentes más relevantes de la simulación hidrológica y de las características morfológicas e hidrológicas que ayudan a satisfacer las necesidades de cálculo, calibración y validación del programa, considerando como datos de entrada, las precipitaciones producidas en el área (observadas y satelitales), junto con los parámetros fisiométricos e hidrológicos de la hoya: las pérdidas por infiltración (según los métodos SCS y SMA), la modelación del hidrograma unitario sintético, el flujo base del cauce y su enrutamiento.

Tal como se describe en el ítem 2.2.1, para la construcción del modelo hidrológico en el programa HEC-HMS, se deben tomar en consideración los cuatro esquemas principales en los cuales está dividido: modelo de la cuenca, modelo meteorológico, especificaciones de control y datos de entrada, los cuales se desarrollan en los apartados siguientes.

Este estudio consideró un análisis de corto plazo, relacionado a eventos aislados de duración variable entre 3 y 9 días, por ende, no se incluyeron datos de temperatura ni de evapotranspiración para la cuenca.

Por último, es importante señalar que la cuenca del río Diguillín en San Lorenzo corresponde a un cauce libre y natural, el cual no se encuentra alterado por obras realizadas por terceros. Y a modo de simplificar la metodología, se considera que la cuenca hidrológica se encuentra completamente saturada.

5.2. Modelo de cuenca

El primer paso para la construcción del modelo semidistribuido en HEC-HMS, es la conformación del modelo de la cuenca, donde ésta es representada físicamente.

En relación a lo anterior, en este estudio fue necesario definir la cuenca del río Diguillín en San Lorenzo de una manera más detallada, de ésta forma se aprecian marcadas diferencias en cuanto a cambios de pendientes y en los usos de suelo, lo que resultó un factor preponderante para definir una separación de la zona en dos áreas manejables, tal como se detalla en la siguiente sección.

5.2.1. Delimitación de subcuencas

El procedimiento para realizar la división de la cuenca, se inicia con el análisis de las pendientes, para ello se obtiene la zona de estudio a través de un modelo digital de elevaciones o DEM (*Digital Elevation Model*), el cual representa la elevación del terreno y permite describir la topografía del área. Este archivo se descarga en formato "Raster" [48] y posteriormente, es procesado en el programa QGIS, donde se proyecta a la cuenca en estudio, permitiendo modelar el terreno y conocer sus elevaciones.

En virtud de lo anterior, en la Figura 5.1, se describe la altimetría de la cuenca generada mediante el DEM y cuyas elevaciones varían entre los 817 y 2516 [m.s.n.m].

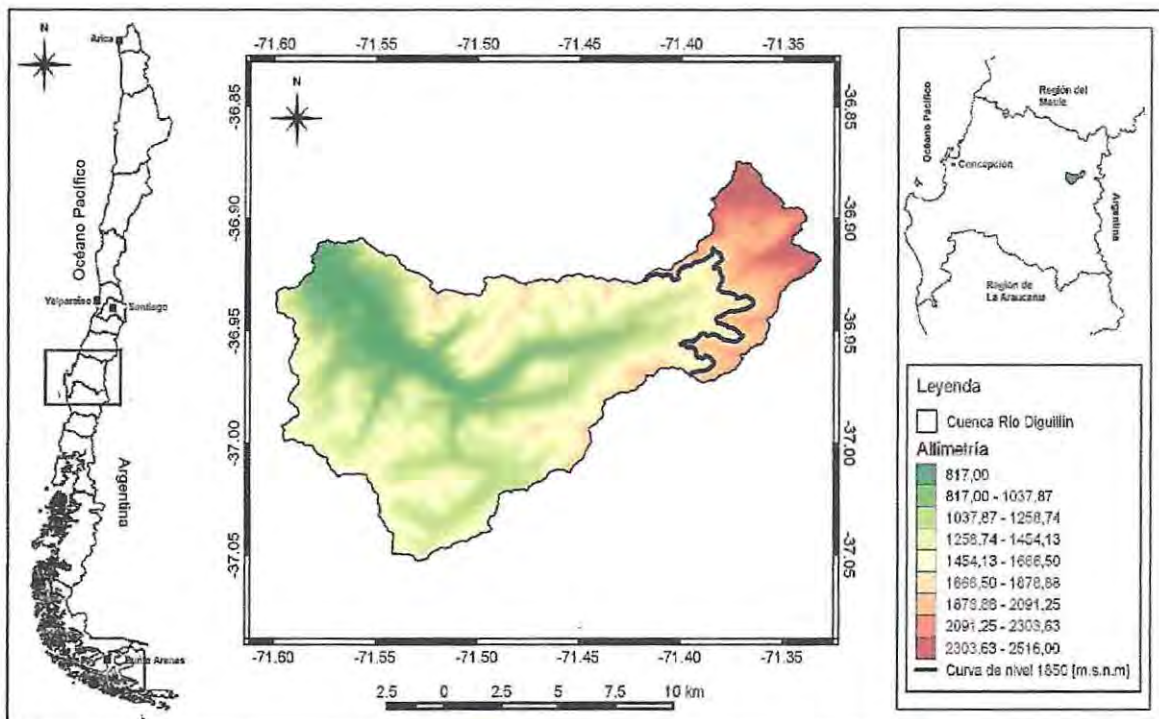


Figura 5.1 - Modelo digital de elevaciones (DEM) para cuenca río Diguillín en San Lorenzo.

De la Figura 5.1, se aprecia claramente una pequeña superficie con la concentración de las mayores elevaciones de la cuenca en el extremo oriente (en tonalidades rojas), en contraste con el resto del área que presenta una vasta extensión con altitudes intermedias que van disminuyendo de oriente a poniente. Estas variaciones de altura influyen directamente en la pendiente de la cuenca, ante tal situación, es recomendable separarla en dos subcuencas.

Posteriormente, se realiza un análisis referente a la diferencia en el uso de suelo de la cuenca, el cual está directamente relacionado con los procesos de infiltración del terreno y cuya variación puede ser considerable en la evaluación de los parámetros de los métodos SCS y SMA. Para distinguir los tipos de suelo, se utiliza el mapa descrito en el ítem 4.3.3, a partir del cual se distingue un sector con un predominio de rocas y nieve para las zonas más altas, y una gran extensión de terreno en el que predominan bosques y matorrales en las zonas intermedias y bajas.

A partir de ambos análisis, se observa una marcada disimilitud entre la zona más alta y la media/baja. Por consiguiente, para establecer el punto de división de estos sectores, se generaron las curvas de nivel de la hoya cada 50 [m] y se determinó, de manera aproximada, la separación de la cuenca en la cota 1850 [m.s.n.m], formando dos subcuencas, tal como se indica en la Figura 5.1 (línea continua en color negro).

En la Figura 5.2, se señala la delimitación de las subcuencas basada en la capa de usos de suelo de la hoya, sobre la cual se generaron las curvas de nivel y se identificó la cota de división correspondiente a los 1850 [m.s.n.m]. A partir de esta figura, se verifica la marcada diferencia entre los tipos de suelo aguas arriba con respecto al de aguas abajo de la cota límite, dando origen a dos subcuencas con características propias, las que se describen en la sección 5.2.2.

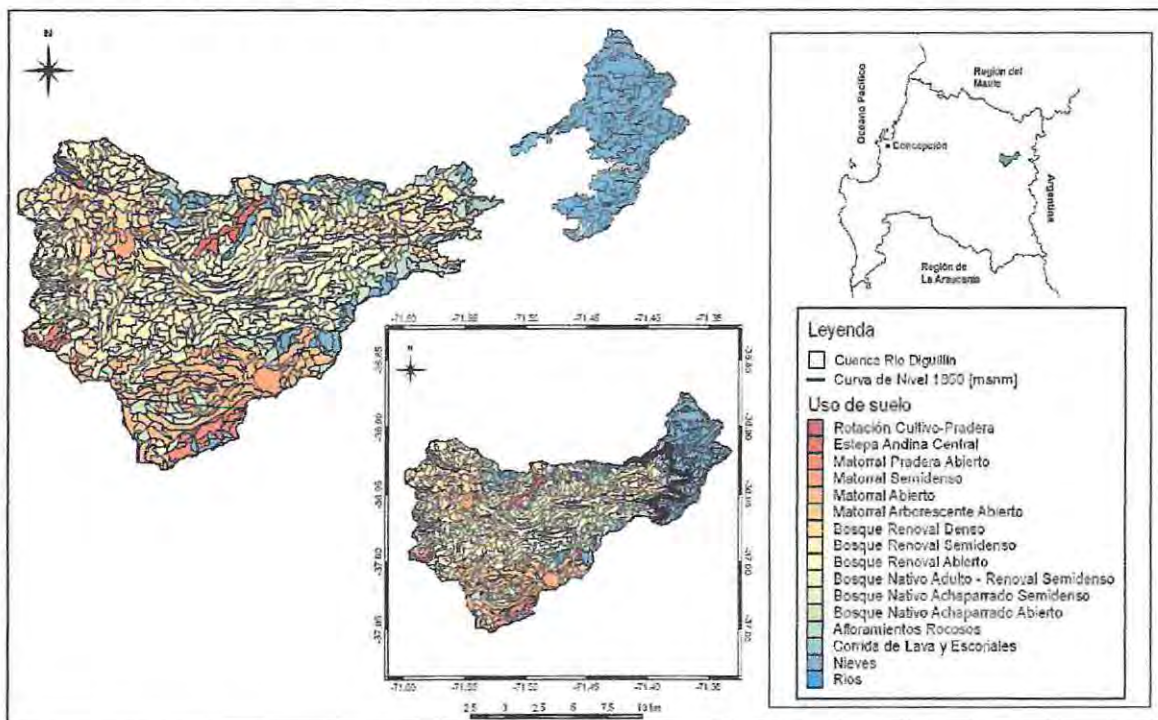


Figura 5.2 - División de la cuenca del río Diguillín en San Lorenzo según tipos de usos de suelo.

Finalmente, para este trabajo se denomina como "Subcuenca 1" a la zona alta de la cuenca ubicada aguas arriba de la cota 1850 [m.s.n.m] y por "Subcuenca 2", a la zona ubicada aguas abajo de dicha cota, tal como se indica en la Figura 5.3.

En la Tabla 5.1, se indica la superficie en [km²] de cada subcuenca y su ponderación con respecto al área total.

Tabla 5.1 - Áreas de las Subcuencas 1 y 2.

Subcuenca	Área [km ²]	
1	31,92	15,30 %
2	176,56	84,70 %

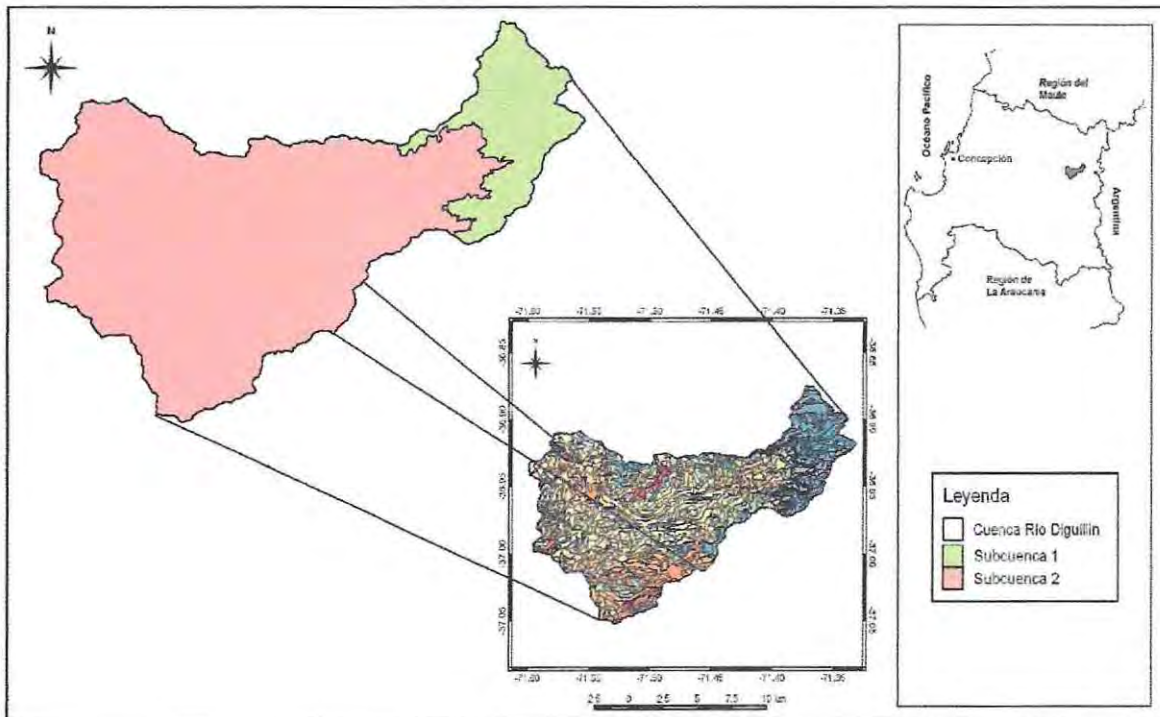


Figura 5.3 - Identificación Subcuenca 1 y Subcuenca 2.

5.2.2. Clasificación del uso de suelo de las subcuencas

Cada subcuenca posee características diferentes con respecto a sus usos de suelo, por lo que se determinó el tipo de cubiertas y superficies implicadas en cada una de ellas en forma particular. Para esto se utilizó la información que se indica en el ítem 4.3.3, la cual es provista por el MMA [57], y cuyos datos fueron procesados en el programa QGIS.

En el caso de la subcuenca 1 (Figura 5.4), el uso de suelo predominante corresponde al de tipo Nieves (96%), tal como se describe en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2 - Clasificación usos de suelo Subcuenca 1.

Uso de Suelo	Tipo de Cubierta	A [km ²]	%
Bosques	Renoval Denso	0,01	0,05
Áreas sin Vegetación	Afloramientos Rocosos	0,30	0,96
	Corrida de Lava y Escoriales	1,06	3,33
Nieves y Glaciares	Nieves	30,38	95,67

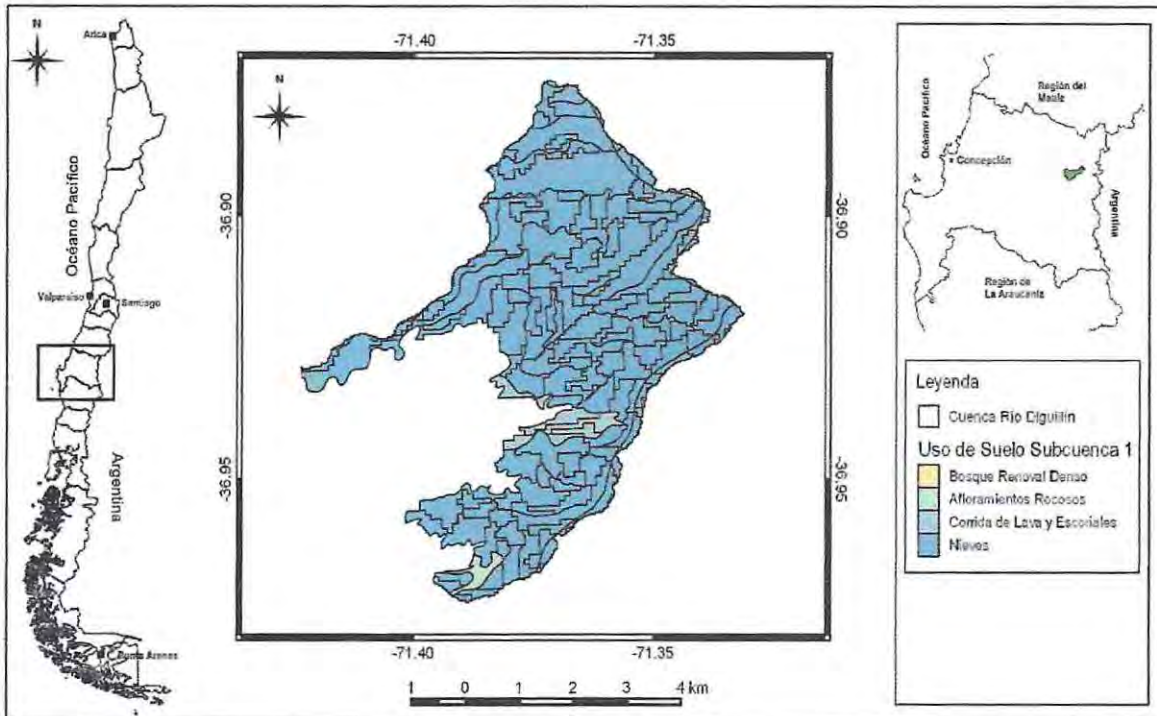


Figura 5.4 - Uso de suelo Subcuenca 1.

En el caso de la subcuenca 2 (Figura 5.5), el uso de suelo predominante corresponde al de tipo Bosques de Renoval Abierto (52%), tal como se describe en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3 - Clasificación usos de suelo Subcuenca 2.

Uso de Suelo	Tipo Cubierta	A [km ²]	%
Terrenos Agrícolas	Rotación Cultivo-Pradera	0,56	0,32
Praderas Matorrales	Estepa Andina Central	2,11	1,20
	Matorral Pradera Abierto	5,07	2,87
	Matorral Semidenso	3,60	2,04
	Matorral Abierto	21,65	12,26
	Matorral Arborescente Abierto	0,50	0,29
	Bosques	Renoval Denso	31,59
Renoval Semidenso		30,51	17,28
Renoval Abierto		51,86	29,37
Nativo Adulto-Renoval Semidenso		0,73	0,42
Nativo Achaparrado Semidenso		0,85	0,48
Nativo Achaparrado Abierto		8,76	4,96
Áreas sin Vegetación	Afloramientos Rocosos	7,87	4,46
	Corrida de Lava y Escoriales	0,86	0,49
Nieves y Glaciares	Nieves	9,81	5,56
Cuerpos de Agua	Ríos	0,24	0,14

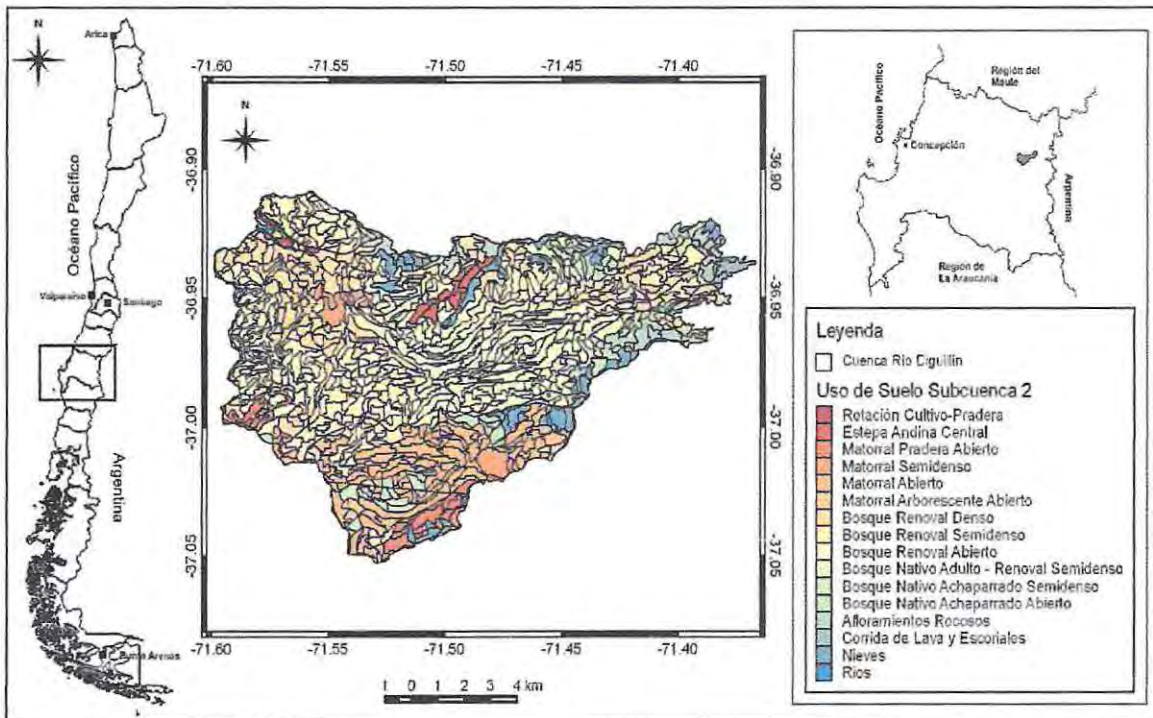


Figura 5.5 - Uso de suelo Subcuenca 2.

5.2.3. Representación esquemática del modelo de la cuenca

La representación esquemática del modelo de la cuenca en HEC-HMS, tiene por objeto el representar adecuadamente el comportamiento hidrológico de ésta, de manera tal, de reflejar lo mejor posible su morfología y las características de su red de drenaje. En dicha representación se utilizan generalmente diversos tipos de elementos, dentro de los cuales se desarrollan los diferentes procesos hidrológicos.

En virtud de lo anterior, en la Figura 5.6, se representa la interfaz gráfica del programa HEC-HMS 4.1 para el modelo de la cuenca del río Diguillín en San Lorenzo, en él se carga el mapa de fondo resultante de la división de las subcuencas realizada en QGIS, con el fin de ubicar espacialmente los elementos hidrológicos dentro del área de estudio.

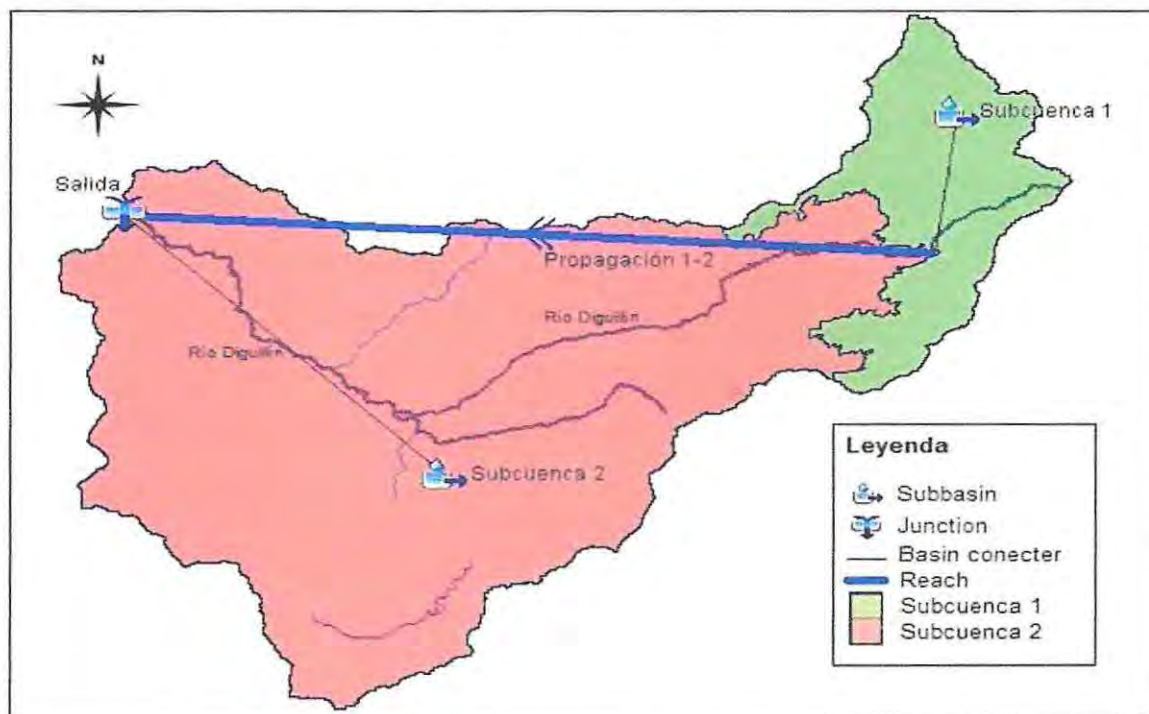


Figura 5.6 - Interfaz gráfica del modelo de la cuenca del río Diguillín en San Lorenzo en HEC-HMS.

De la Figura 5.6, se observan los elementos característicos que utiliza el programa para representar el modelo de la cuenca, se destaca el elemento Subcuenca (*Subbasin*) 1 y 2, los cuales se caracterizan por no recibir ningún flujo entrante y dar lugar a un único flujo saliente, que es el que se genera en las subcuencas a partir de los datos meteorológicos, una vez descontadas las pérdidas de agua, transformado el exceso de precipitación en escorrentía superficial y añadido el flujo base. Por otra parte, se encuentra el elemento Río (*Reach*), el cual es usado para transmitir el caudal proveniente de la Subcuenca 1 hacia aguas abajo. Finalmente, se indica el elemento Unión (*Junction*), el cual representa la salida de la cuenca y es usado para recibir los flujos de las subcuencas 1 y 2, siendo el caudal de salida de este elemento la suma de ambos aportes.

Los elementos hidrológicos que se describen en el párrafo precedente, son utilizados para separar la cuenca en áreas manejables, las cuales se conectan a través de una red dentrítica representando el sistema de corriente.

5.3. Estimación de parámetros para el modelo hidrológico

En esta sección se describe la metodología de cálculo y los parámetros utilizados en la modelación de cada uno de los elementos hidrológicos que utiliza HEC-HMS (Subcuenca, Río y Unión/Salida).

5.3.1. Elemento Subcuenca

El modelo de cuenca requiere del ingreso de tres métodos de cálculo para cada elemento de Subcuenca (Subcuenca 1 y 2): de pérdidas, de transformación precipitación-escorrentía y de flujo base. A continuación, se describen cada uno de los métodos utilizados en la presente modelación.

5.3.1.1. Pérdidas por infiltración del suelo

Este estudio consideró dos métodos de infiltración del suelo, el método SCS y el método SMA, los cuales son usados de manera independiente en el proceso de simulación, dando origen a dos modelos hidrológicos distintos.

5.3.1.1.1. Método Soil Conservation Service (SCS)

Tal como se indicó en el ítem 2.1.4.1.1, este método establece una clasificación para la asociación suelo-vegetación, mediante la asignación de una respuesta frente a la precipitación. Para esto se utiliza como único parámetro la "Curva Número" (CN), en el cual se expresan todas las características de cada subcuenca.

El método estima el excedente de precipitación en función de la subdivisión de tipos de suelos y sus usos, donde los suelos del tipo impermeable permiten escorrentía directa inmediata, mientras que los suelos permeables son causantes de pérdidas de aguas.

Para determinar el número de curva asociado a cada subcuenca, se caracterizaron sus suelos según se indica en ítem 2.1.4.1.1, asignándole el grupo hidrológico correspondiente.

En virtud de lo anterior, para el caso de la subcuenca 1, en la cual se presenta una condición de terreno en el que predominan las rocas y la acumulación de nieve, se determinó que la capacidad de infiltración de sus suelos corresponde a los de un Grupo C, esto tomando en consideración que el lugar presenta las mayores alturas de la cuenca, donde se encuentran los faldeos cordilleranos del complejo volcánico "Nevados de Chillán" y en los que se presentan suelos característicos de la actividad eruptiva, con presencia de diversos tipos de rocas (fracturadas, sedimentarias) y corridas de lava. En la zona se advierte además la presencia de pendientes fuertes.

Por lo tanto, con el grupo hidrológico del suelo seleccionado y mediante el uso de la Tabla 2.3, se determinó el número de curva asociado a cada tipo de cubierta, lo cual se resume en Tabla 5.4.

Tabla 5.4 - Determinación Número de Curva (CN) para los suelos de la Subcuenca 1.

Uso de Suelo	Tipo de Cubierta	N° de Curva (Suelo tipo C)
Bosques	Renoval Denso	70
Áreas sin Vegetación	Afloramientos Rocosos	78
	Corrida de Lava y Escoriales	76
Nieves y Glaciares	Nieves	74

Luego, para el caso de la Subcuenca 2, se le asigna un grupo de suelo tipo B, esto en virtud de que los suelos están predominantemente cubiertos por bosques, que si bien poseen alta interceptación, también presentan muchos sectores intermedios provistos con matorrales de diversa índole que favorecen la infiltración. Además, el sector presenta pendientes menos pronunciadas que en el caso de la subcuenca 1 y a medida que avanza hacia el poniente, se van generando valles con terrenos planos y suelos de texturas medianamente gruesas que poseen mayor capacidad de infiltración que en el caso anterior.

Por consiguiente, utilizando la Tabla 2.3 y considerando un grupo hidrológico tipo B, se determinó el número de curva asociado a cada tipo de cubierta, lo que se resume en la Tabla 5.5.

Tabla 5.5 - Determinación Número de Curva (CN) para los suelos de la Subcuenca 2.

Uso de Suelo	Tipo Cubierta	Nº de Curva (Suelo tipo B)
Terrenos Agrícolas	Rotación Cultivo-Pradera	71
Praderas Matorrales	Estepa Andina Central	61
	Matorral Pradera Abierto	61
	Matorral Semidenso	79
	Matorral Abierto	61
	Matorral Arborescente Abierto	61
Bosques	Renoval Denso	66
	Renoval Semidenso	66
	Renoval Abierto	55
	Nativo Adulto-Renoval Semidenso	66
	Nativo Achaparrado Semidenso	66
	Nativo Achaparrado Abierto	55
Áreas sin Vegetación	Afloramientos Rocosos	72
	Corrida de Lava y Escoriales	70
Nieves y Glaciares	Nieves	68
Cuerpos de Agua	Ríos	80

Como ambas subcuencas poseen diversos tipos de cubierta y por ende distintos números de curva asociados, mediante la utilización de la Ecuación 2.10, se determinaron los números de curva ponderados de cada subcuenca, tal como se resume en la Tabla 5.6. Además, se determina la retención potencial máxima (S) y la abstracción inicial máxima (Ia), mediante el empleo de la Ecuación 2.8.

Tabla 5.6 - Número de Curva ponderado, Retención potencial y Abstracción inicial máxima para Subcuencas 1 y 2.

Subcuenca	Nº de Curva Ponderado	Retención Potencial S	Abstracción inicial máxima Ia
1	74,10	88,77	17,75
2	62,09	155,08	31,02

5.3.1.1.2. Método del Soil Moisture Accounting (SMA)

Mediante este método de infiltración, se busca representar cada subcuenca hidrográfica con una serie de estratos de almacenamiento. El método considera el contenido de humedad del suelo y simula el movimiento de agua en capas superficiales y el almacenamiento en la vegetación, en la superficie del suelo y en estratos de aguas subterráneas.

Tal como se menciona en el ítem 2.1.2.1.2, el método SMA representa a cada subcuenca mediante un conjunto de depósitos, entre los cuales existen una serie de conexiones o flujos de agua. Por consiguiente, para evaluar cada proceso hidrológico desarrollado en las subcuencas, fue necesario establecer los valores de 14 parámetros que requiere el modelo como datos de entrada.

A diferencia del método SCS, para utilizar el SMA se requiere un alto nivel de detalle en relación a las características físicas del lugar, vale decir, se debe contar con una serie de datos con respecto a los tipos de suelo, su composición, grados de humedad, capacidad de infiltración, profundidades, tipos de estratos, entre otros.

En virtud de lo anterior, se recopilaron antecedentes con respecto a las características de los suelos de la zona de estudio, donde se destaca el informe realizado por la DGA en el año 2010 [59], en el cual se determinaron los valores de la conductividad hidráulica (K_{hid}), porosidad efectiva ($PorEf$), altura capilar (H_{cap}), capacidad de campo (Sc_c) y profundidad del suelo (H_{suelo}), de la cuenca controlada por la estación fluviométrica "Río Diguillín en San Lorenzo (Atacalco)". Los valores de éstos parámetros se resumen en la Tabla 5.7.

Tabla 5.7 - Parámetros del suelo en la estación fluviométrica "Río Diguillín en San Lorenzo (Atacalco)".

	K_{hid} [mm/h]	$PorEf$ [%]	H_{cap} [mm]	Sc_c [%]	H_{suelo} [mm]
Río Diguillín en San Lorenzo (Atacalco)	19,21	0,4	80	0,55	333,33

Es importante agregar otras observaciones publicadas por la Universidad de Concepción, con respecto a la "Serie Diguillín" [60], donde se señala que la fase del suelo fluctúa de moderadamente profunda a profunda, es decir, con una profundidad que varía entre 70 y 150 [cm], y descansa sobre un substrato constituido por toba volcánica. Se indica además, que presenta una topografía plana a ondulada y el drenaje es bueno pero puede variar a moderado.

Posteriormente, se recopilaron antecedentes relativos a las características de la serie de los suelos de las subcuencas 1 y 2, en base a un estudio realizado por la Escuela de Agronomía de la Universidad de Chile [61], en sectores próximos a ellas, los cuales se indican en la Tabla 5.8.

De la Tabla 5.8 se entiende por "drenaje imperfecto" a que el agua es removida del suelo lentamente, suficiente para mantenerlo húmedo por periodos. Los suelos presentan horizontes lentamente permeables y/o napa freática alta suplementaria con escurrimiento superficial. Por "drenaje moderado" a que el agua es removida algo lenta, en tal forma que el pedón está húmedo en una parte significativa de él y en cierto tiempo. Los suelos comúnmente tienen estratos poco permeables, un nivel freático relativamente alto, al que se suma el agua de escurrimiento. Y por "drenaje bueno" a que el agua es removida del suelo fácilmente, pero no rápidamente. Los suelos generalmente tienen texturas intermedias.

Tabla 5.8 - Descripción de las principales características de las series de suelos de las Subcuencas 1 y 2.

Característica	Subcuenca 1	Subcuenca 2
Origen/Formación del suelo	Volcano-Sedimentario	Volcano-Sedimentario
Substrato	Fluvioglacial parcialmente meteorizado, en posición de terrazas remanentes	No relacionado, constituido por materiales fluviales o fluvioglaciales
Topografía	Suavemente ondulada a ondulada	Casi plana. Presenta disecciones profundas producto de los cursos de aguas que lo cortan. Caídas de agua fuertemente onduladas (15 a 20%)
Profundidad	Poco profundo	Profundo
Textura	Franco Arcillosa, con gravas finas	Franco Limosa, muy poroso y libre de gravas
Permeabilidad	Moderadamente lenta	Moderada
Drenaje	Moderado a imperfecto	Bueno

Para determinar el tipo de suelo según la clase hidrológica, se utiliza la clasificación del NRCS [9], detallada en el ítem 2.1.4.1.1, y que se resume en la Tabla 5.9.

Tabla 5.9 - Clasificación hidrológica de los suelos.

Características	Grupos			
	A	B	C	D
Velocidad de infiltración	Alta	Moderada	Baja	Muy baja
Transmisibilidad	Alta	Moderada	Baja	Muy baja
Profundidad	Muy profundos	Profundos	Moderada	Muy moderada
Textura	Arenas y gravas	Medio arenosa	Medio arcillosa	Arcillas pesadas

Según la tabla anterior y tal como se indica en el ítem 5.2.1.1.1, se considera que las subcuencas 1 y 2 poseen una clasificación hidrológica referida a los grupos C y B, respectivamente.

Para la determinación de los parámetros del método SMA, se tuvieron en consideración las dificultades que implica la evaluación de cada uno de éstos debido a la poca información existente para la cuenca en estudio. Ante esta situación, la literatura ofrece algunas recomendaciones y tablas que se pueden considerar para obtener valores iniciales al evaluar el modelo, las que se presentan a continuación:

- **Saturación del suelo (Soil) [%]:** La saturación inicial del suelo es un parámetro difícil de cuantificar, puesto que la respuesta del modelo es muy sensible a esta condición. Para su evaluación, se considera el área impermeable de diferentes superficies de usos de suelo. Por lo tanto, se toma como referencia de las Tablas 5.2 y 5.3, entre ellas: los afloramientos rocosos, corridas de lava, ríos, bosques densos, bosques semidensos y nieves, en el caso de éste último se considera el 60% de su valor. En la Tabla 5.10, se describen las superficies impermeables a considerar en cada subcuenca y su ponderación final.
- **Saturación en el primer acuífero (Groundwater 1) [%]:** Para determinar el porcentaje de saturación inicial en el primer acuífero, se le consideró como el 70% de la saturación del suelo descrita en la Tabla 5.10.

Tabla 5.10 - Ponderación de las superficies impermeables de los suelos de las Subcuencas 1 y 2.

Uso de Suelo	Tipo Cubierta	Subcuenca 1	Subcuenca 2
		%	%
Bosques	Renoval Denso	0,05	17,89
	Renoval Semidenso	-	17,28
	Nativo Adulto-Renoval Semidenso	-	0,41
	Nativo Achaparrado Semidenso	-	0,48
Áreas sin Vegetación	Afloramientos Rocosos	0,96	4,46
	Corrida de Lava y Escoriales	3,33	0,48
Nieves y Glaciares	Nieves	57,40	3,33
Cuerpos de Agua	Ríos	-	0,14
TOTAL		61,73	44,48

- **Almacenamiento del suelo (*Soil Profile Storage*)** [mm]: Para su estimación se requiere conocer el espesor del suelo y su porosidad. Por consiguiente, se consideraron los valores estimados en un estudio realizado por la Comunidad Autónoma de Cantabria [62], la que establece distintos espesores de suelo y porosidades [63], según la clasificación hidrológica a la que pertenecen (Tabla 5.9). Estos se indican en la Tabla 5.11, donde finalmente se determina el almacenamiento del suelo (AS) como el producto de ambos parámetros.

Tabla 5.11 - Capacidad de almacenamiento de los diferentes tipos de suelo.

Tipo de suelo	Espesor [mm]	Porosidad [%]	AS [mm]
A	500	30	150
B	250	34	85
C	200	35	70
D	125	40	50

- **Infiltración máxima (*Max Infiltration*)** [mm/h]: Para su determinación se consideraron los valores establecidos en un estudio realizado por la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Talca, en la cual se establecen los rangos de infiltración según diferentes texturas de suelo [64], las cuales se presentan en la Tabla 5.12.

Tabla 5.12 - Capacidad de infiltración de agua, según tipo de suelo.

Tipo de Suelo	Infiltración [mm/h]
Arenoso Grueso	25 a 60
Arenoso Fino	18 a 25
Franco Arenoso	14 a 18
Franco Limoso	10 a 14
Franco Arcilloso	7 a 10
Arcillo Limoso	4 a 7
Arcilloso Compacto	2 a 5

- **Almacenamiento en tensión (*Tension Storage*)** [mm]: Para su determinación se utiliza la información establecida por Rawls [65], donde se relacionan: la textura del suelo, el tipo del mismo (desde el punto de vista hidrológico) y la capacidad efectiva de almacenamiento de agua. Luego, en base a estas relaciones, se establecen porcentajes medios para determinar, en cada tipo de suelo, la parte de agua almacenada en la zona de tensión.

Dado lo anterior, en la Tabla 5.13 se indica como TAS [%], a la proporción de agua almacenada en la zona de tensión y como TAS [mm], a los valores correspondientes a la capacidad de almacenamiento de agua en dicha zona, los cuales se obtienen como el producto entre TAS [%] y el almacenamiento del suelo AS [mm] (Tabla 5.11).

Tabla 5.13 - Capacidad de almacenamiento de agua en la "Tension Zone" según tipo de suelo.

Tipo de suelo	TAS [%]	TAS [mm]
A	70	105
B	80	68
C	85	59,5
D	90	45

- Percolación del suelo (Soil Percolation) [mm/h]:** La determinación de este parámetro se realiza de acuerdo al informe de "Modelación de cuencas pluviales, Hoya hidrográfica del río Maule" [66], en el cual se establece que la percolación puede ser considerada como un porcentaje de la infiltración. Es importante destacar que los valores de percolación real varían según la estructura del suelo y su estabilidad estructural.
En el presente estudio se consideró que la percolación corresponde al 70% de la infiltración del suelo.
- Almacenamiento del primer acuífero (GW1 Storage) [mm]:** Para evaluar este parámetro, se adoptan los valores iniciales que se entregan en el estudio realizado por la Comunidad Autónoma de Cantabria [62], es decir, un almacenamiento igual a 20 [mm].
- Percolación del primer acuífero (GW1 Percolation) [mm/h]:** Para su determinación se puede utilizar la conductividad hidráulica del suelo (como valor de percolación de las capas subterráneas), así como también el considerarlo como un porcentaje de la percolación del suelo [62].
En este estudio se consideró que la percolación del primer acuífero corresponde al 80% de la percolación del suelo.
- Coefficiente de almacenamiento del primer acuífero (GW1 Coefficient) [h]:** Su determinación se realiza de acuerdo con el estudio realizado por la Comunidad Autónoma de Cantabria [62], donde se establece que su valor es directamente proporcional a la superficie de la cuenca vertiente. Se sugieren valores cercanos a las 80 – 100 [h], para cuencas de superficie menor o igual a 100 [km²] y de alrededor de 300 [h], para cuencas con superficie mayores a 450 [km²].

Finalmente, de acuerdo con las consideraciones que se indican en los párrafos precedentes, se obtuvieron los parámetros que se resumen en la Tabla 5.14, los cuales son considerados como valores iniciales para comenzar con el proceso de calibración.

Es importante señalar que este estudio no considera la utilización del segundo acuífero en el modelo, razón por la cual, los valores relacionados con dicha capa se registran como nulos en la Tabla 5.14.

Tabla 5.14 - Parámetros iniciales del método SMA para HEC-HMS.

Parámetro	Subcuenca		Parámetro	Subcuenca	
	1	2		1	2
Soil [%]	61,73	44,48	Soil Percolation [mm/h]	4,97	7,14
Groundwater 1 [%]	43,21	31,14	GW 1 Storage [mm]	20,00	20,00
Groundwater 2 [%]	0	0	GW 1 Percolation [mm/h]	3,98	5,71
Max Infiltration [mm/h]	7,10	10,20	GW 1 Coefficient [h]	37,21	128,13
Impervious [%]	15,00	10,00	GW 2 Storage [mm]	0	0
Soil Storage [mm]	70,00	85,00	GW 2 Percolation [mm/h]	0	0
Tension Storage [mm]	59,50	68,00	GW 2 Coefficient [h]	0	0

5.3.1.2. Transformación precipitación-escorrentía

Los modelos de transformación precipitación-escorrentía permiten estimar el caudal generado a partir de los datos de lluvias. Para determinar esta transformación, se recurre a modelos hidrológicos que aproximan el hidrograma de una cuenca a partir de la precipitación en la zona y de datos físicos de ella.

Este estudio considera el hidrograma unitario sintético de Snyder, con la posterior adaptación mediante los coeficientes establecidos por Benítez y Arteaga para la zona.

5.3.1.2.1. Hidrograma unitario sintético de Snyder

La determinación del hidrograma unitario sintético de cada subcuenca, se lleva a cabo a partir de la metodología descrita en el ítem 2.1.4.2.3. Los parámetros de entrada se obtuvieron desde la cartografía digital que fue procesada en el programa QGIS, en base a las rutinas que el programa presenta para la medición de objetos.

En primer lugar, se determina la pendiente media mediante la ecuación de Mockornita (Ecuación 2.15). El relieve posee una incidencia bastante fuerte sobre la escorrentía de la cuenca, dado que, a un mayor grado de pendiente, corresponderá un menor tiempo de concentración de las aguas en la red de drenaje y afluentes del curso principal.

En la Tabla 5.15, se describen los parámetros requeridos para el desarrollo de la Ecuación 2.15, y finalmente, se señala el resultado de la pendiente media para ambas subcuencas.

Tabla 5.15 - Determinación de la pendiente media de las Subcuencas 1 y 2, según Mockornita.

	Subcuenca 1	Subcuenca 2
Superficie A [km ²]	31,92	176,56
Sumatoria de la longitud de las curvas de nivel ($\sum L_i$) [km]	146,41	863,32
Diferencia de altura entre cotas (ΔH) [m]	50,00	50,00
Pendiente media (S) [%]	0,23	0,24

Posteriormente, se determinaron las características de cada subcuenca para calcular los valores del tiempo punta y caudal punta del hidrograma unitario sintético de Snyder. En la Tabla 5.16, se resumen los resultados de este proceso.

Tabla 5.16 - Determinación de las variables para el cálculo del hidrograma unitario sintético de Snyder para las Subcuencas 1 y 2.

	Subcuenca 1	Subcuenca 2
Longitud del cauce principal (L) [km]	4,73	30,31
Distancia entre el centro de gravedad y la sección de salida (L_g) [km]	1,56	10,41

A partir de los resultados de la Tabla 5.16, y en conjunto con los coeficientes de ajuste de Benítez y Arteaga extraídos de la Tabla 2.4, se determinaron los parámetros del hidrograma unitario sintético de Snyder mediante el uso de las Ecuaciones 2.11 a 2.14, cuyos resultados se resumen en la Tabla 5.17.

Tabla 5.17 - Parámetros del hidrograma unitario sintético según Benítez y Arteaga para las Subcuencas 1 y 2.

	Subcuenca 1	Subcuenca 2
Tiempo de retardo (t_p) [h]	2,58	6,24
Caudal punta (q_p) [lt/(S*Km ²)]	78,24	37,44
Tiempo base (t_b) [h]	10,72	20,18
Constante del caudal punta del hidrograma unitario (C_{peak})	8,29	1,73

Finalmente, en las Figuras 5.7 y 5.8 se indican los hidrogramas unitarios sintéticos de Snyder con modificación de Benítez y Arteaga obtenidos para las subcuencas 1 y 2, respectivamente.

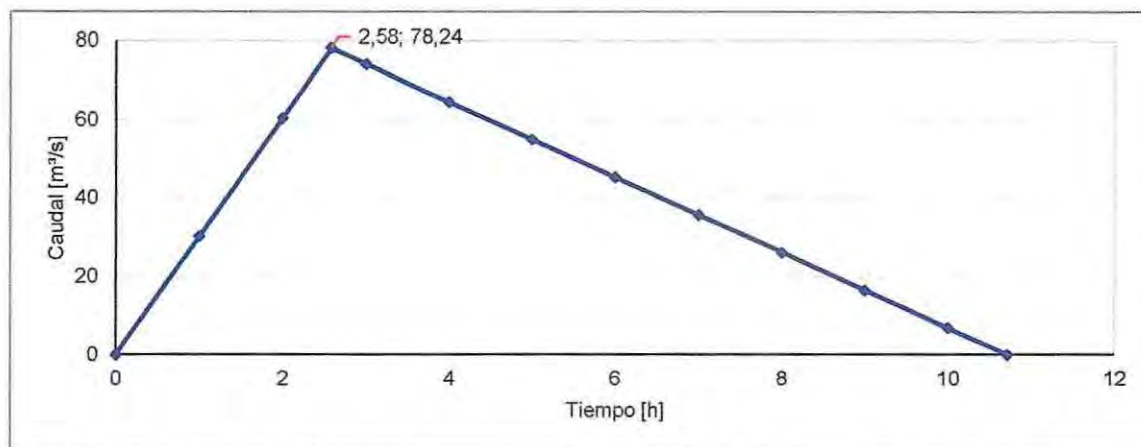


Figura 5.8 - Hidrograma unitario sintético según Benítez y Arteaga para Subcuenca 1.

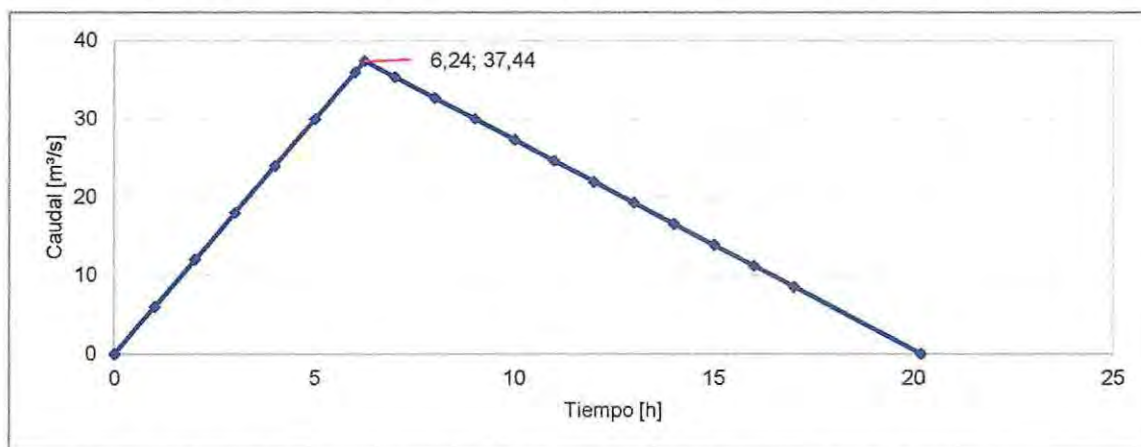


Figura 5.7 - Hidrograma unitario sintético según Benítez y Arteaga para Subcuenca 2.

El programa HEC-HMS toma algunas limitaciones en cuanto a la constante del caudal punta del hidrograma unitario (C_{peak}), parámetro para el cual considera valores comprendidos entre 0,1 y 1, cuando no se cumple dicha condición, se debe considerar el valor mínimo o máximo según corresponda [37].

En virtud de lo anterior, como el valor de C_{peak} en ambas subcuencas es superior al límite máximo permitido, este parámetro se consideró igual a la unidad.

5.3.1.3. Flujo base y recesión exponencial

El programa HEC-HMS posee varios métodos para la separación del hidrograma en escorrentía superficial directa y en escorrentía base. Este estudio considera el método del flujo base recesivo.

Según el ítem 2.1.4.3.1, el modelo de recesión exponencial requiere la determinación del coeficiente de decaimiento (k). Por consiguiente, se realizó un estudio a la curva de descenso y de agotamiento a una serie de hidrogramas de la cuenca generados por diversos eventos de tormenta.

La curva de descenso se debe al aporte conjunto de la escorrentía superficial, subsuperficial y subterránea, pero pasado un cierto tiempo se anula primero la escorrentía superficial y luego la subsuperficial, quedando el caudal reducido a los aportes recibidos por la escorrentía subterránea, lo que da origen a la curva de agotamiento, que representa la disminución del agua almacenada en los acuíferos y sigue una ley exponencial.

En base a estos antecedentes y siguiendo la metodología expuesta en el apartado 2.1.4.3.1, primero se definió un conjunto de 10 tormentas que formaran hidrogramas aislados de una sola crecida y de los cuales se extrajeron los caudales instantáneos, es decir, aquellos con registros cada una hora, medidos en la estación fluviométrica "Río Diguillín en San Lorenzo (Atacalco)". En la Tabla 5.18, se presentan los eventos seleccionados para este proceso.

Cada una de las tormentas indicadas en la Tabla 5.18, se representa en una gráfica de caudal versus tiempo, dando forma al hidrograma correspondiente. A cada hidrograma se le identificaron sus puntas y se separaron las curvas de descenso y de agotamiento, tomando como referencia, de manera aproximada por el usuario, el punto de inflexión que se produce entre ambas.

Tabla 5.18 - Eventos de tormenta para la determinación del coeficiente de decaimiento.

Tormenta N°	Fecha de inicio	Fecha de término	Tormenta N°	Fecha de inicio	Fecha de término
1	06-jul-03	08-jul-03	6	26-ago-10	02-sep-10
2	14-ago-08	25-ago-08	7	02-jul-13	09-jul-13
3	01-sep-08	05-sep-08	8	10-ago-13	18-ago-13
4	12-may-09	16-may-09	9	14-jun-14	19-jun-14
5	07-jul-10	11-jul-10	10	27-sep-14	30-sep-14

En virtud de lo anterior, en la Figura 5.9 se indica un ejemplo de la Tormenta N° 6. En la parte (a) se ilustran las curvas componentes del hidrograma de la tormenta, y en la parte (b), se describe la gráfica resultante al aplicar el logaritmo al caudal en las curvas de recesión y agotamiento.

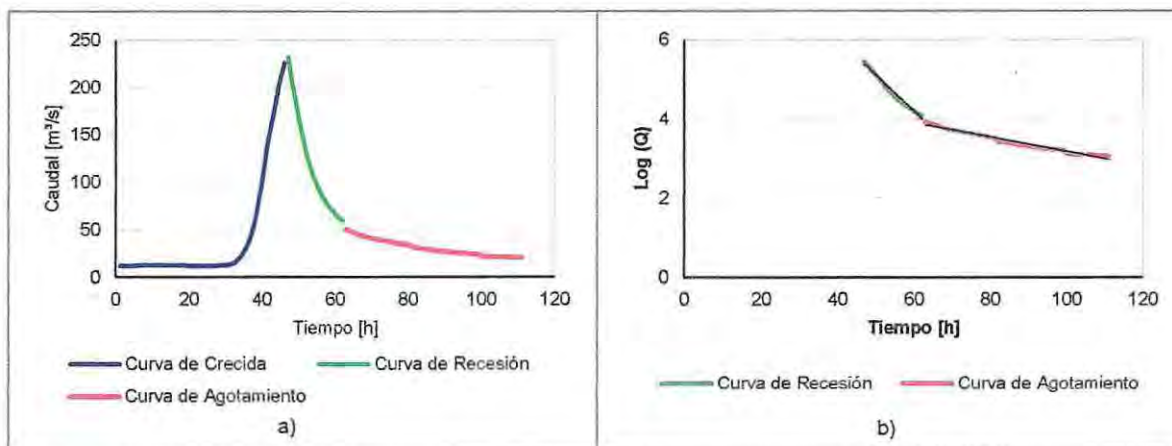


Figura 5.9 - (a) Ejemplo de la separación del hidrograma y (b) Determinación del inicio de la curva recesiva.

El punto de inflexión de la curva de descenso (aquel ubicado entre la línea verde y roja), además de indicar el inicio de la curva recesiva, marca el inicio de la generación de caudales recesivos que provienen de aguas subterráneas. Su valor en la abscisa, se considera como el valor del parámetro Q_0 del modelo exponencial (Ecuación 2.16). Por lo tanto, su magnitud fue determinada de manera gráfica a partir del logaritmo de caudal en la curva de bajada respecto al tiempo.

Luego de realizar este proceso de manera similar a lo indicado en la Figura 5.9 para cada uno de los 10 eventos, se procede con la determinación del parámetro k . Para ello, se realiza un análisis exponencial a la curva de descenso y de agotamiento, en donde se establece una tendencia lineal entre ambas.

En la Tabla 5.19, se resumen los valores del coeficiente de decaimiento (k) para cada tormenta.

Tabla 5.19 - Determinación del coeficiente de decaimiento (K) para cada evento de tormenta.

Tormenta N°	K	Tormenta N°	k
1	0,32	6	0,32
2	0,24	7	0,34
3	0,31	8	0,33
4	0,23	9	0,26
5	0,40	10	0,39

Finalmente, se calcula el promedio de los coeficientes de decaimiento determinados en la Tabla 5.19, obteniéndose como resultado una magnitud de 0,31, la cual se considera como valor de entrada para ambas subcuencas.

El flujo base es uno de los dos grandes componentes para medir el exceso de precipitación junto con la escorrentía directa. Este flujo, es el caudal que se mantiene de forma permanente en un cauce. Debido a que en el presente trabajo se realiza una modelación por eventos aislados, es que se resuelve como criterio para su determinación, el considerarlo como el caudal registrado inmediatamente antes del inicio de la crecida de cada tormenta, esto con el fin de obtener resultados más representativos en cada simulación.

5.3.2. Elemento Río

Un río es un elemento con una o varias entradas, y sólo una salida. En el caso de existir más de una entrada, se suman todos los ingresos antes de calcular el flujo de salida. El caudal de salida se determina seleccionando uno de los métodos de cálculo disponibles en el programa HEC-HMS. En este estudio se considera el método de propagación de Muskingum.

5.3.2.1. Tránsito de Hidrogramas – Método de propagación de Muskingum

Tal como se indica en el ítem 2.1.4.4, el tránsito de hidrogramas corresponde a la simulación de la variación de un hidrograma al recorrer un cauce. La evaluación se realiza con el método de Muskingum, donde se considera el tramo “Propagación 1 – 2” que se indica en la Figura 5.6, correspondiente al tránsito del flujo de la Subcuenca 1, desplazándose por la Subcuenca 2 hasta llegar a la sección de salida de la cuenca.

En primer lugar, se determina el parámetro K , el cual representa el tiempo de recorrido de una onda de crecida a lo largo de un tramo del cauce. Para ello, se emplea la Ecuación 2.20, cuyos resultados se indican en la Tabla 5.20.

Tabla 5.20 - Determinación del factor de proporcionalidad (K) para el método de Muskingum.

Parámetro	Subcuenca 2
Longitud máxima del cauce (Δx) [km]	30,31
Pendiente máxima de la subcuenca (i) [m/m]	0,74
Factor de proporcionalidad (K)	2,54

En segundo lugar, se estima el parámetro X, el cual constituye un coeficiente de ponderación entre los caudales entrantes y salientes del tramo 1 – 2 al momento de cuantificar el almacenamiento de agua en él. Este valor fue definido a criterio del modelador con una magnitud de 0,20.

Posteriormente, se verifica el valor de K mediante el empleo de la condición de tiempo mínimo, expuesta en la Ecuación 2.21, donde el incremento del tiempo Δt se considera igual a 3 horas, por lo tanto:

$$\begin{aligned}\Delta t &> 2 \times K \times X \\ \Delta t &> 2 \times 2,54 \times 0,2 \\ \Delta t &> 1,016\end{aligned}$$

Dado lo anterior, se cumple la condición de tiempo mínimo y en consecuencia no es necesaria la obtención del número de Reach (n), por lo que se considera como $n = 1$.

Finalmente, en Tabla 5.21 se resumen los parámetros a utilizar en el método de Muskingum.

Tabla 5.21 - Resumen parámetros iniciales del método de Muskingum

Tramo	K	X	n
1 - 2	2,54	0,20	1,00

5.3.3. Elemento Unión/Salida

Para el elemento hidrológico "Salida" del modelo de la cuenca, se consideraron los registros de caudales observados en la estación fluviométrica "Río Diguillín en San Lorenzo (Atacalco)" perteneciente a la DGA, la cual se describe en el ítem 4.4.2.

5.4. Modelo meteorológico

El modelo meteorológico en HEC-HMS es uno de los principales componentes del proyecto de simulación hidrológica y tiene como finalidad preparar las condiciones meteorológicas del límite para las subcuencas. En este estudio se consideraron únicamente los procesos de precipitación y se asume que su distribución es homogénea sobre toda la cuenca.

El programa posee diferentes mecanismos para considerar la precipitación, en este caso, se selecciona la opción de especificar el hietograma directamente. Los hietogramas de precipitación que se ingresan al modelo corresponden a los registros de datos observados mediante las estaciones meteorológicas de la DGA, según se indica en el ítem 4.4.1.2 y a los registros de datos de percepción remota provenientes de las imágenes satelitales captadas por el satélite TRMM 3B42 V7, tal como se indica en el ítem 4.4.1.3.

5.5. Especificaciones de control

El programa requiere de ciertas especificaciones de control, referidas al tiempo de duración de la simulación (Fecha, hora de inicio y fin del proyecto) y a un intervalo de cálculo. Este modelo consideró una simulación por eventos, cuyos registros fueron determinados en intervalos de tiempo de tres horas, debido a que dicha dimensión es la mínima que poseen los datos satelitales provenientes de las imágenes captadas por el satélite TRMM 3B42 V7.

5.6. Simulación del modelo hidrológico

La simulación hidrológica para un modelo de cuenca, determina la transformación de precipitación en escorrentía dada la entrada de un modelo meteorológico. En esta sección se desarrolla el proceso de simulación a través de HEC-HMS 4.1, del modelo hidrológico de la cuenca del río Diguillín en San Lorenzo, para los métodos de estimación de pérdidas por infiltración del suelo según el SCS y el SMA, que fueron descritos en los ítems 2.1.4.1.1 y 2.1.4.1.2, respectivamente. En ambos casos, se describen las fases de simulación referidas a la calibración y validación de cada modelo y se entregan los resultados correspondientes.

5.6.1. Simulación por método SCS

5.6.1.1. Calibración del modelo

En esta etapa se revisaron las consideraciones y suposiciones realizadas en el proceso de estimación de los valores iniciales determinados en la sección 5.3, para los cuales fue necesario, en algunos casos, ajustarlos y/o determinar nuevos parámetros que eran requeridos por el programa.

Estos ajustes a los parámetros tienen por finalidad lograr que la simulación del hidrograma se asemeje al observado, en base a procesos físicos e hidrológicos y dentro de un rango de valores previamente establecido, que determinan los límites a través de los cuales se representa el comportamiento real de la cuenca. Este estudio considera que los parámetros que admiten ajuste en sus valores son: el coeficiente de decaimiento (k), la razón a la punta, las constantes K y X de Muskingum, la curva número y el porcentaje de impermeabilidad de las subcuencas. Cada uno de estos parámetros se ajustó en la calibración dentro de un rango de aproximadamente $\pm 5 - 10 \%$ con respecto al valor inicial. La evaluación de la calibración se realizó con los índices de modelación hidrológicos descritos en el ítem 2.1.3.

En virtud de lo anterior, en la Tabla 5.22, se resumen los parámetros iniciales y finales para el proceso de calibración del modelo. Además, se indican los valores de la impermeabilidad del suelo y la razón a la punta, parámetros que se determinaron exclusivamente durante esta fase, hasta lograr el mejor ajuste en la simulación.

Tabla 5.22 - Parámetros iniciales y finales para proceso de calibración del modelo por el método SCS.

Parámetro	Valor Inicial		Valor Final	
	Subcuenca 1	Subcuenca 2	Subcuenca 1	Subcuenca 2
Área [km ²]	31,93	176,56	31,93	176,56
Curva Número	74,10	62,09	72,02	61,66
Impermeabilidad [%]	15,00	10,00	15,00	10,00
Tiempo de retardo (t _p) [h]	2,58	6,24	2,58	6,24
Constante del caudal punta (C _{peak})	1,00	1,00	1,00	1,00
Coefficiente de decaimiento (k)	0,31	0,31	0,32	0,32
Razón a la punta	0,62	0,55	0,70	0,60
Factor de proporcionalidad (K)	2,54		4,16	
Factor de ponderación (X)	0,20		0,20	
Número de Reach (n)	1,00		1,00	

5.6.1.1.1. Tormentas de calibración

El modelo se calibra mediante la especificación de un hietograma de precipitaciones observadas, provenientes de las estaciones pluviométricas de la DGA. Por consiguiente, se considera un conjunto de 10 eventos de diversa duración que tienen lugar entre los años 2000 y 2012, tal como se describe en la Tabla 5.23.

Tabla 5.23 - Eventos de tormenta para la calibración del modelo.

Tormenta N°	Fecha de Inicio	Fecha de Término	Tormenta N°	Fecha de Inicio	Fecha de Término
1	10-jun-00	16-jun-00	6	28-jul-05	05-ago-05
2	11-jul-01	15-jul-01	7	03-jun-06	10-jun-06
3	28-jul-01	03-ago-01	8	20-may-09	23-may-09
4	24-may-02	28-may-02	9	04-sept-09	08-sept-09
5	17-jun-05	23-jun-05	10	25-may-12	30-may-12

A través del procedimiento que se indica en el ítem 4.4.1.1. y de la Ecuación 4.1, se obtuvieron los registros de precipitación diaria observada sobre la cuenca, para cada evento señalado en la Tabla 5.23.

Posteriormente, estos registros se distribuyen cada tres horas mediante el empleo de las imágenes satelitales. El procedimiento consiste en obtener los registros satelitales, tal como se señala en el ítem 4.4.1.3, y mediante la Ecuación 4.2 se determina la precipitación satelital sobre la cuenca cada tres horas. Éstos últimos se suman en forma diaria y se ponderan para conocer la distribución de la lluvia a lo largo del día. Finalmente, el producto de cada ponderación con el registro diario de precipitación observada sobre la cuenca, determina el registro de precipitación observada cada tres horas.

Es importante señalar que la DGA cuenta con registros de precipitación a escala horaria, pero éstos no se encuentran disponibles en su sitio en internet de forma inmediata. Se deben solicitar a esta entidad y existe un plazo máximo de 20 días hábiles para su entrega. Por ende, se optó por distribuir los registros diarios de forma manual mediante las imágenes satelitales, tal como se explica en el párrafo anterior.

5.6.1.1.2. Resultados indicadores de modelación hidrológica.

En la Tabla 5.24, se presentan los resultados de los indicadores de modelación y de los volúmenes para la etapa de calibración por el método SCS.

Tabla 5.24 - Resultados calibración del modelo por método SCS.

Tormenta N°	Eficiencia de Nash		Porcentaje BIAS	Correlación	Volumen [MMm³]	
	NSE	NSE Log	PBIAS [%]	R²	Observado	V.S.P.O
1	0,91	0,74	-6,56	0,93	42,59	45,39
2	0,93	0,89	4,67	0,94	23,84	22,72
3	0,95	0,83	7,51	0,96	37,87	35,03
4	0,92	0,91	-5,52	0,94	22,15	23,37
5	0,95	0,93	4,07	0,95	18,72	17,95
6	0,94	0,92	2,15	0,94	51,03	49,93
7	0,94	0,90	3,09	0,94	70,34	68,17
8	0,94	0,85	1,82	0,94	24,20	23,76
9	0,94	0,90	9,69	0,96	26,08	23,55
10	0,91	0,89	-2,97	0,91	38,77	39,92

5.6.1.1.3. Gráficos tormentas de calibración

En las Figuras 5.10 y 5.11, se presentan los gráficos resultantes del proceso de calibración del modelo por el método SCS para las tormentas de calibración N° 1 y N° 2, respectivamente.

La primera grafica corresponde al hidrograma de la tormenta, el cual señala el caudal observado que se obtiene de los registros medidos en la estación fluviométrica (en color azul) y el caudal simulado mediante datos de precipitación observada (Q.S.P.O) (en color verde). El segundo gráfico, representa los volúmenes acumulados en millones de metros cúbicos, donde se señala el volumen acumulado observado (V.A.O) (en color azul) y el volumen acumulado simulado mediante datos de precipitación observada (V.A.S.P.O) (en color verde). Finalmente, se indica la correlación entre los caudales observados y simulados.

Los gráficos de las tormentas de calibración N° 3 a N° 10 por el método SCS, se presentan en el Anexo A.

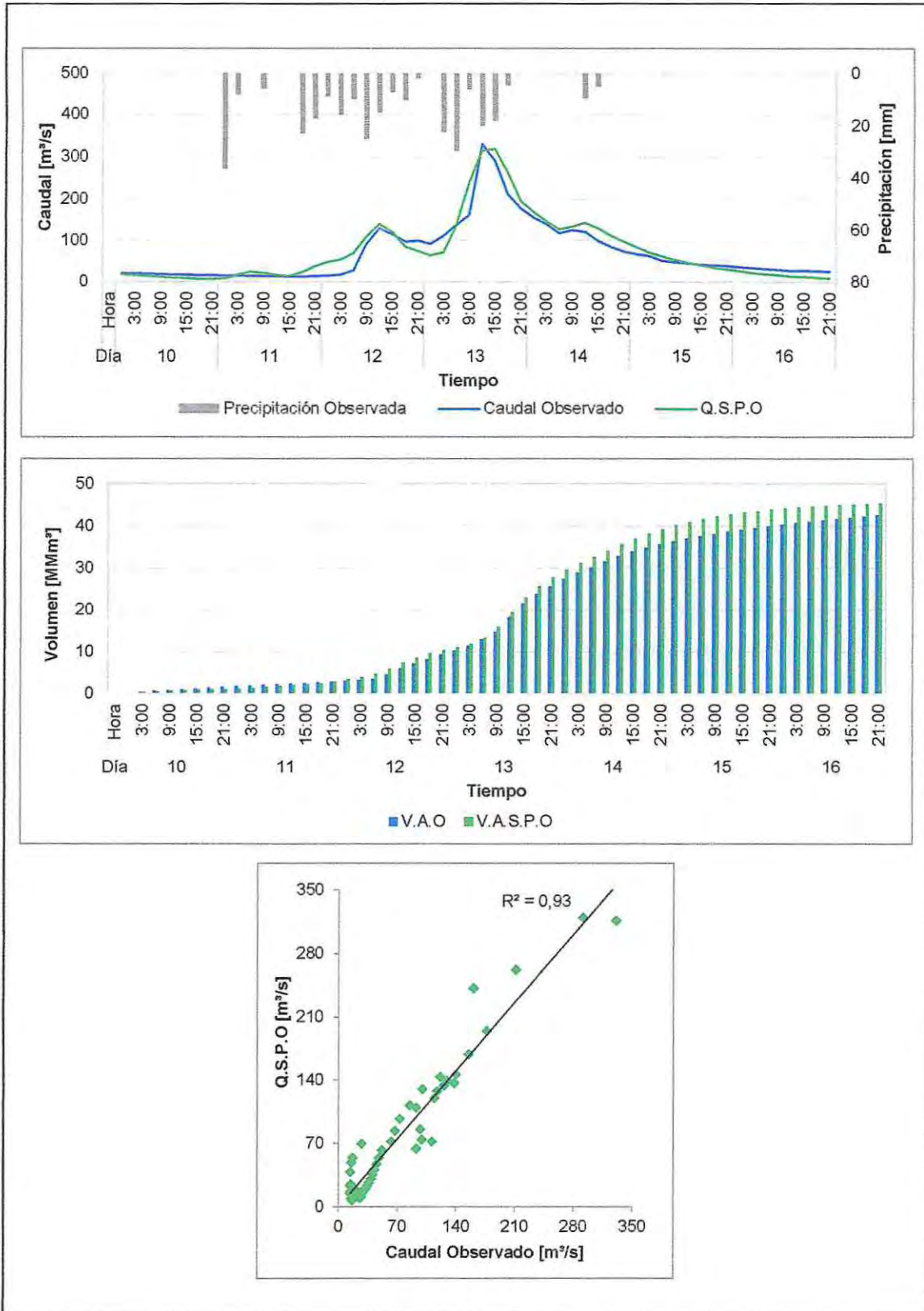


Figura 5.10 - Tormenta de calibración N° 1 por método SCS.

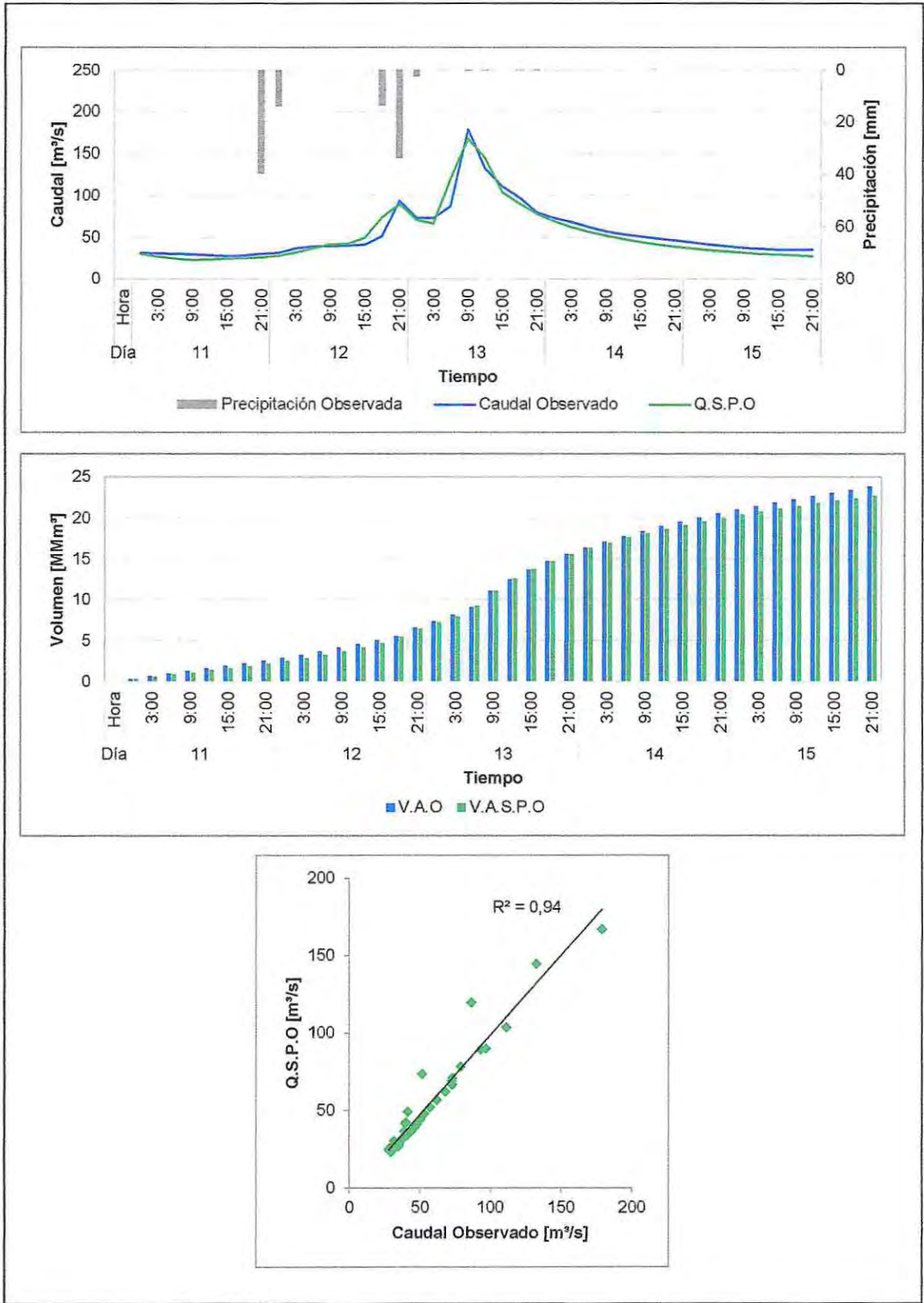


Figura 5.11 - Tormenta de calibración N° 2 por método SCS.

5.6.1.2. Validación del modelo con datos de precipitación observada

La etapa de validación comprende el proceso en el cual la simulación se realiza directamente con los parámetros ya calibrados (Tabla 5.22) y no se modifican sus valores. Los resultados son evaluados con los índices de modelación hidrológicos de manera similar al proceso de calibración.

5.6.1.2.1. Tormentas de validación

El modelo se valida mediante la especificación de un hietograma de precipitaciones observadas, provenientes de las estaciones pluviométricas de la DGA. Por consiguiente, se considera un conjunto de 7 eventos de diversa duración que tienen lugar entre los años 2000 y 2013, tal como se describe en Tabla 5.25.

De forma similar a la metodología que se expone en el proceso de calibración, se determina el registro de precipitaciones diarias ponderadas para la cuenca y posteriormente, este registro se distribuye cada tres horas según los datos de precipitación de las imágenes satelitales.

Tabla 5.25 - Eventos de tormenta para la validación del modelo.

Tormenta N°	Fecha de Inicio	Fecha de Término	Tormenta N°	Fecha de Inicio	Fecha de Término
1	05-jul-00	08-jul-00	5	09-jul-06	14-jul-06
2	18-jul-02	22-jul-02	6	14-ago-08	17-ago-08
3	18-jun-03	24-jun-03	7	30-may-13	03-jun-13
4	06-jun-05	08-jun-05			

5.6.1.2.2. Resultados indicadores de modelación hidrológica

En la Tabla 5.26, se presentan los resultados de los indicadores de modelación y de los volúmenes para la etapa de validación con datos de precipitación observada por el método SCS.

Tabla 5.26 - Resultados validación del modelo con datos de precipitación observada por método SCS.

Tormenta N°	Eficiencia de Nash		Porcentaje BIAS	Correlación	Volumen [MMm³]	
	NSE	NSE Log	PBIAS [%]	R²	Observado	V.S.P.O
1	0,95	0,76	9,76	0,97	25,29	22,82
2	0,93	0,83	2,87	0,95	22,27	21,63
3	0,92	0,83	7,12	0,93	102,53	95,23
4	0,95	0,91	4,67	0,96	11,99	11,43
5	0,95	0,71	4,49	0,95	90,10	86,05
6	0,94	0,86	2,40	0,94	18,34	17,90
7	0,94	0,73	7,53	0,95	25,18	23,28

5.6.1.2.3. Gráficos tormentas de validación

En las Figuras 5.12 y 5.13, se presentan los gráficos resultantes del proceso de validación del modelo con datos de precipitación observada por el método SCS para las tormentas de validación N° 1 y N° 2, respectivamente.

Los gráficos de las tormentas de validación N° 3 a N° 7 con datos de precipitación observada por el método SCS, se presentan en el Anexo B.

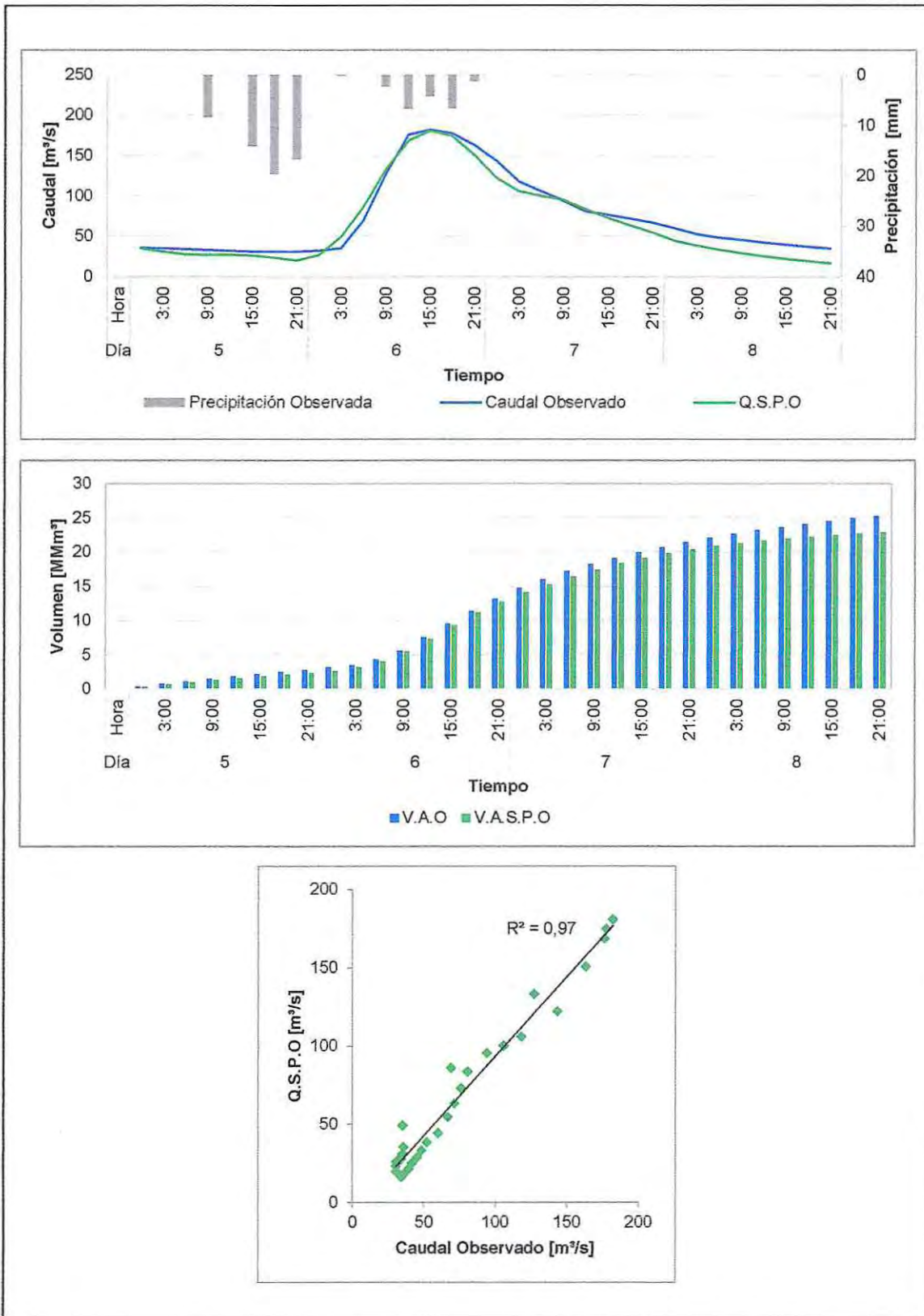


Figura 5.12 - Tormenta de validación N° 1 con datos observados por método SCS

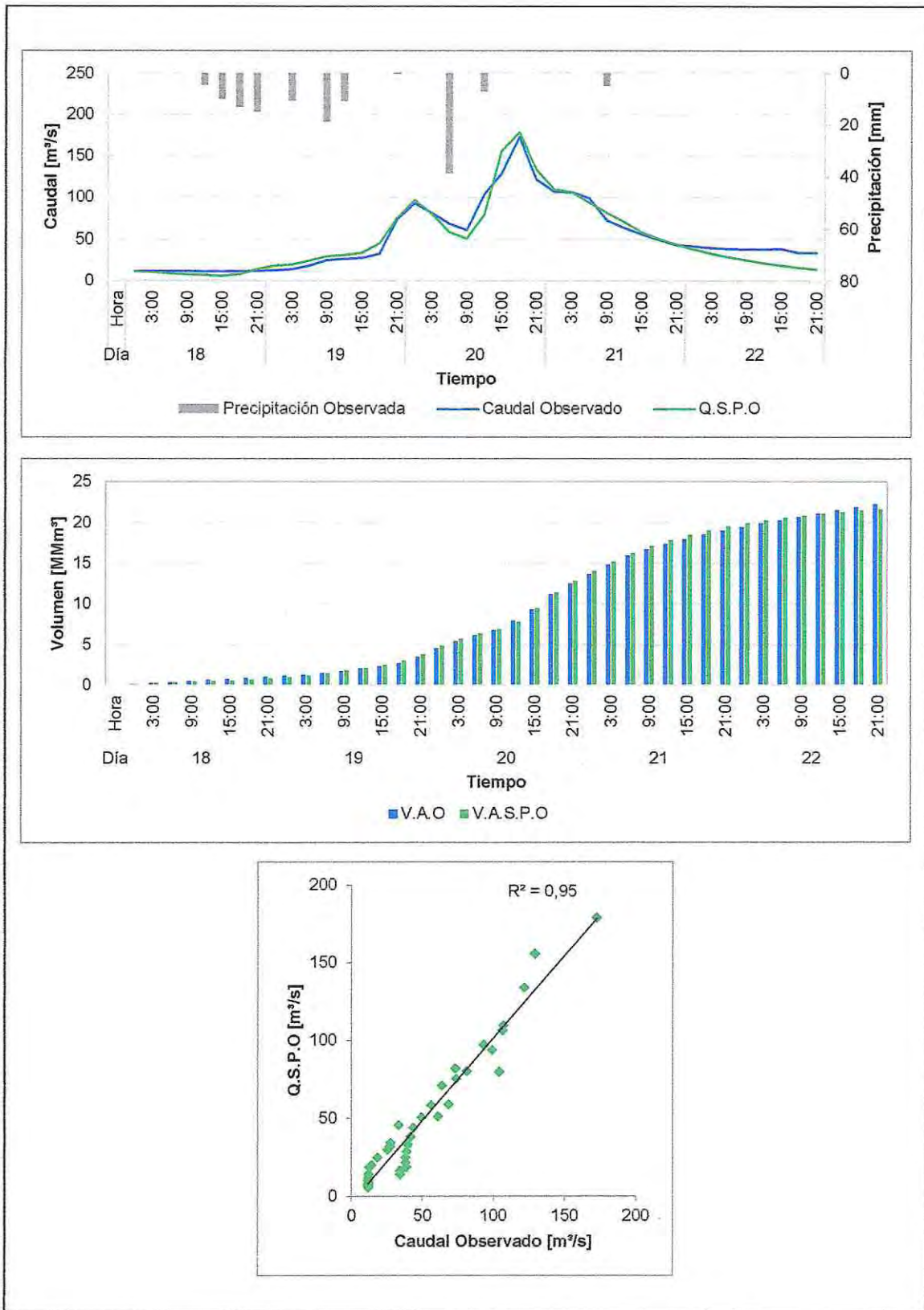


Figura 5.13 - Tormenta de validación N° 2 con datos observados por método SCS.

5.6.1.3. Validación del modelo con datos de precipitación satelital

Una vez validado el modelo con los datos de precipitaciones observadas, se verifica mediante un registro de precipitaciones satelitales como datos de entrada.

5.6.1.3.1. Tormentas de validación

El modelo se valida mediante la especificación de un hietograma de precipitaciones satelitales, provenientes de las imágenes captadas por el satélite TRMM 3B42 V7. Se considera el mismo conjunto de eventos utilizado en la validación con datos observados (Tabla 5.25).

Para poder utilizar las imágenes satelitales y lograr que éstas sean representativas para la zona, se deben realizar dos procesos: El primero consiste en adecuar el registro de precipitaciones satelitales de cada evento con el área porcentual de cada pixel que afecta a la cuenca (ítem 4.4.1.3), mediante el empleo de la Ecuación 4.2. El segundo, radica en ajustar este registro aplicando la expresión de corrección determinada en la Ecuación 3.4. Para esto último, en la Tabla 5.27, se indican los valores de la altura y el intercepto de los pixeles involucrados en la zona de estudio.

Tabla 5.27 - Altura media e intercepto de los pixeles para corrección de imágenes satelitales.

Pixel	Altura Media $\overline{H_{\text{pixel}}}$ [m]	Intercepto B_{pixel}
7	1059,13	19,88
8	1841,08	35,99
11	1254,55	23,91
12	1573,42	30,48

Finalmente, la corrección de las imágenes satelitales es realizada por evento. En la Tabla 5.28, se describe un resumen comparativo entre las precipitaciones observadas y satelitales. En primer lugar, se indica la precipitación satelital sin corregir por pixel y, en segundo lugar, la precipitación por evento, la cual se divide en tres partes. La primera columna corresponde a la precipitación satelital resultante de la lluvia registrada en cada pixel por su correspondiente área ponderada (Ecuación 4.2), en la columna central se indica la precipitación satelital corregida (Ecuación 3.4) y en la tercera columna se indica la precipitación observada (ponderada por el área respectiva, según la Ecuación 4.1).

Tabla 5.28 - Resumen comparativo entre precipitaciones satelitales y observadas por evento.

Tormenta N°	Precipitación satelital por pixel [mm]				Precipitación evento [mm]		
	Pixel 7	Pixel 8	Pixel 11	Pixel 12	Satelital sin corregir y ponderada	Satelital corregida	Observada
1	35,43	64,71	13,74	19,92	46,10	83,98	80,32
2	91,49	92,45	23,01	19,72	80,01	124,67	134,48
3	217,41	238,59	131,10	110,88	211,80	282,82	272,76
4	35,98	44,09	16,86	18,79	36,69	72,68	63,02
5	225,36	204,51	160,14	134,97	202,89	272,12	281,26
6	37,50	40,26	26,31	20,31	36,62	72,59	60,21
7	54,46	36,21	35,67	22,32	41,79	78,81	67,48

5.6.1.3.2. Resultados indicadores de modelación hidrológica

En la Tabla 5.29, se presentan los resultados de los indicadores de modelación y de los volúmenes para la etapa de validación con datos de precipitación satelital por el método SCS.

Tabla 5.29 - Resultados validación del modelo con datos de precipitación satelital por método SCS.

Tormenta N°	Eficiencia de Nash		Porcentaje BIAS	Correlación	Volumen [MMm³]	
	NSE	NSE Log	PBIAS [%]	R²	Observado	V.S.P.S
1	0,95	0,78	6,95	0,97	25,29	23,54
2	0,91	0,80	13,86	0,95	22,27	19,19
3	0,93	0,84	4,09	0,93	102,53	98,34
4	0,91	0,88	-13,44	0,95	11,99	13,60
5	0,94	0,70	7,12	0,95	90,10	83,69
6	0,90	0,83	-14,28	0,95	18,34	20,95
7	0,92	0,78	-3,16	0,95	25,18	25,98

5.6.1.3.3. Gráficos tormentas de validación

En las Figuras 5.14 y 5.15, se presentan los gráficos resultantes del proceso de validación del modelo con datos de precipitación satelital por el método SCS para las tormentas de validación N° 1 y N° 2, respectivamente.

La primera grafica corresponde al hidrograma de la tormenta, el cual señala el caudal observado que se obtiene de los registros medidos en la estación fluviométrica (en color azul) y el caudal simulado mediante datos de precipitación satelital (Q.S.P.S) (en color rojo). El segundo gráfico, representa los volúmenes acumulados en millones de metros cúbicos, donde se señala el volumen acumulado observado (V.A.O) (en color azul) y el volumen acumulado simulado mediante datos de precipitación satelital (V.A.S.P.S) (en color rojo). Finalmente, se indica la correlación entre los caudales observados y simulados.

Los gráficos de las tormentas de validación N° 3 a N° 7 con datos de precipitación satelital por el método SCS, se presentan en el Anexo C.

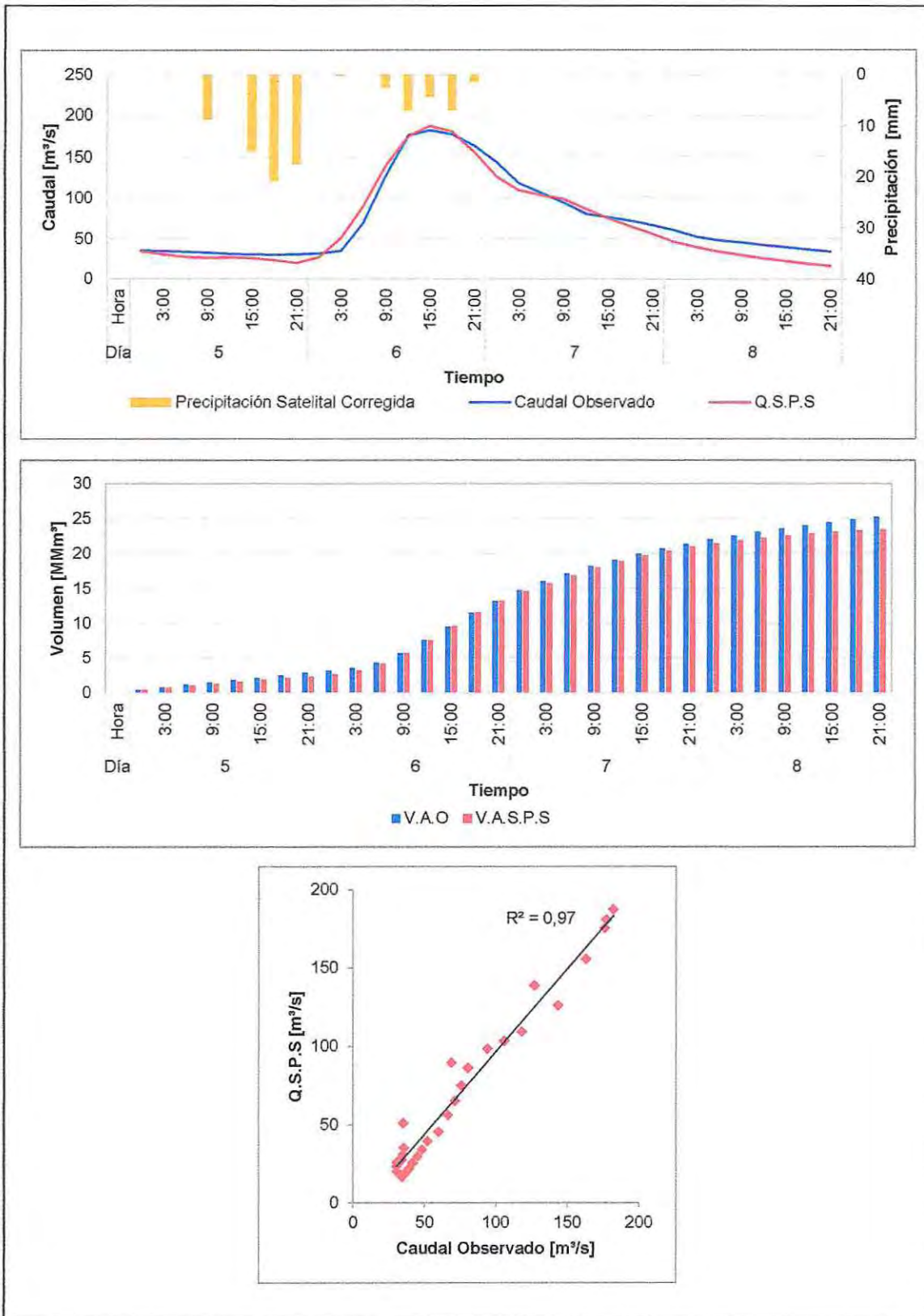


Figura 5.14 - Tormenta de validación N° 1 con datos satelitales por método SCS.

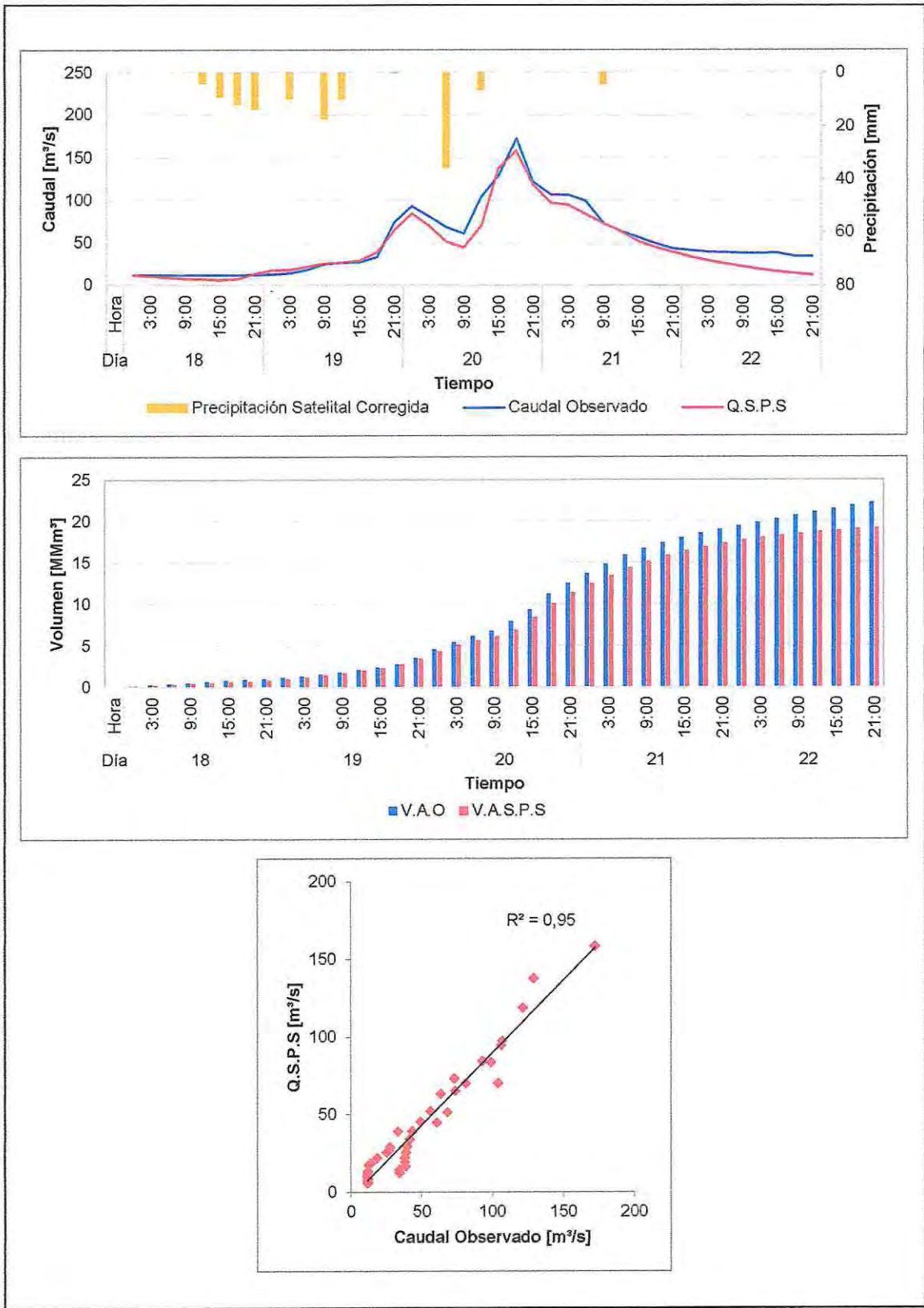


Figura 5.15 - Tormenta de validación N° 2 con datos satelitales por método SCS.

5.6.2. Simulación por método SMA

5.6.2.1. Calibración del modelo

En esta etapa se mantuvieron fijos los parámetros del hidrograma unitario, flujo base y Muskingum, y se consideró que sólo los parámetros relacionados con la infiltración del suelo admiten un ajuste, con la finalidad de obtener una mejor comparación entre los comportamientos de ambos modelos hidrológicos.

En virtud de lo anterior, en la Tabla 5.30, se resumen los parámetros iniciales y finales del modelo hidrológico. Las modificaciones de los parámetros durante este proceso, se realizan dentro de un rango que varía en torno a los valores iniciales, lo que permite ajustar el modelo al comportamiento observado en la cuenca.

Tabla 5.30 - Parámetros iniciales y finales para proceso de calibración del modelo por el método SMA.

Parámetro	Valor Inicial		Valor Final	
	Subcuenca 1	Subcuenca 2	Subcuenca 1	Subcuenca 2
Área [km ²]	31,93	176,56	31,93	176,56
Soil [%]	61,73	44,48	76,73	60,48
Groundwater 1 [%]	43,21	31,14	53,71	42,34
Groundwater 2 [%]	0	0	0	0
Max Infiltration [mm/h]	7,10	10,20	9,20	13,10
Impervious [%]	15,00	10,00	15,00	10,00
Soil Storage [mm]	70,00	85,00	105,00	300,00
Tension Storage [mm]	59,50	68,00	84,00	250,00
Soil Percolation [mm/h]	4,97	7,14	6,44	9,17
GW 1 Storage [mm]	20,00	20,00	420,00	1200,00
GW 1 Percolation [mm/h]	3,98	5,71	5,15	7,34
GW 1 Coefficient [h]	37,21	128,13	37,21	128,13
GW 2 Storage [mm]	0	0	0	0
GW 2 Percolation [mm/h]	0	0	0	0
GW 2 Coefficient [h]	0	0	0	0
Tiempo de retardo (t_p) [h]	2,58	6,24	2,58	6,24
Constante del caudal punta (C_{peak})	1,00	1,00	1,00	1,00
Coefficiente de decaimiento (k)	0,31	0,31	0,32	0,32
Razón a la punta	0,62	0,55	0,70	0,60
Factor de proporcionalidad (K)	2,54		4,16	
Factor de ponderación (X)	0,20		0,20	
Número de Reach (n)	1,00		1,00	

5.6.2.1.1. Tormentas de calibración

Se utilizan las mismas tormentas que en la etapa de calibración con el método SCS (Tabla 5.23) y los hietogramas que se ingresan al modelo se construyen siguiendo el procedimiento señalado en el ítem 5.6.1.1.1.

5.6.2.1.2. Resultados indicadores de modelación hidrológica.

En la Tabla 5.31, se presentan los resultados de los indicadores de modelación y de los volúmenes para la etapa de calibración por el método SMA.

Tabla 5.31 - Resultados calibración del modelo por método SMA.

Tormenta N°	Eficiencia de Nash		Porcentaje BIAS	Correlación	Volumen [MMm ³]	
	NSE	NSE Log	PBIAS [%]	R ²	Observado	V.S.P.O
1	0,92	0,62	3,50	0,93	42,59	41,10
2	0,85	0,68	2,93	0,90	23,84	23,14
3	0,93	0,81	9,41	0,94	37,87	34,31
4	0,90	0,85	7,80	0,91	22,15	20,42
5	0,88	0,86	13,03	0,93	18,72	16,28
6	0,90	0,84	5,19	0,91	51,03	48,38
7	0,91	0,85	13,98	0,94	70,34	60,51
8	0,95	0,86	0,92	0,95	24,20	23,98
9	0,90	0,71	17,86	0,95	26,08	21,43
10	0,89	0,90	-10,55	0,90	38,77	42,86

5.6.2.1.3. Gráficos tormentas de calibración

En las Figuras 5.16 y 5.17, se presentan los gráficos resultantes del proceso de calibración del modelo por el método SMA para las tormentas de calibración N° 1 y N° 2, respectivamente.

Los gráficos de las tormentas de calibración N° 3 a N° 10 por el método SMA, se presentan en el Anexo D.

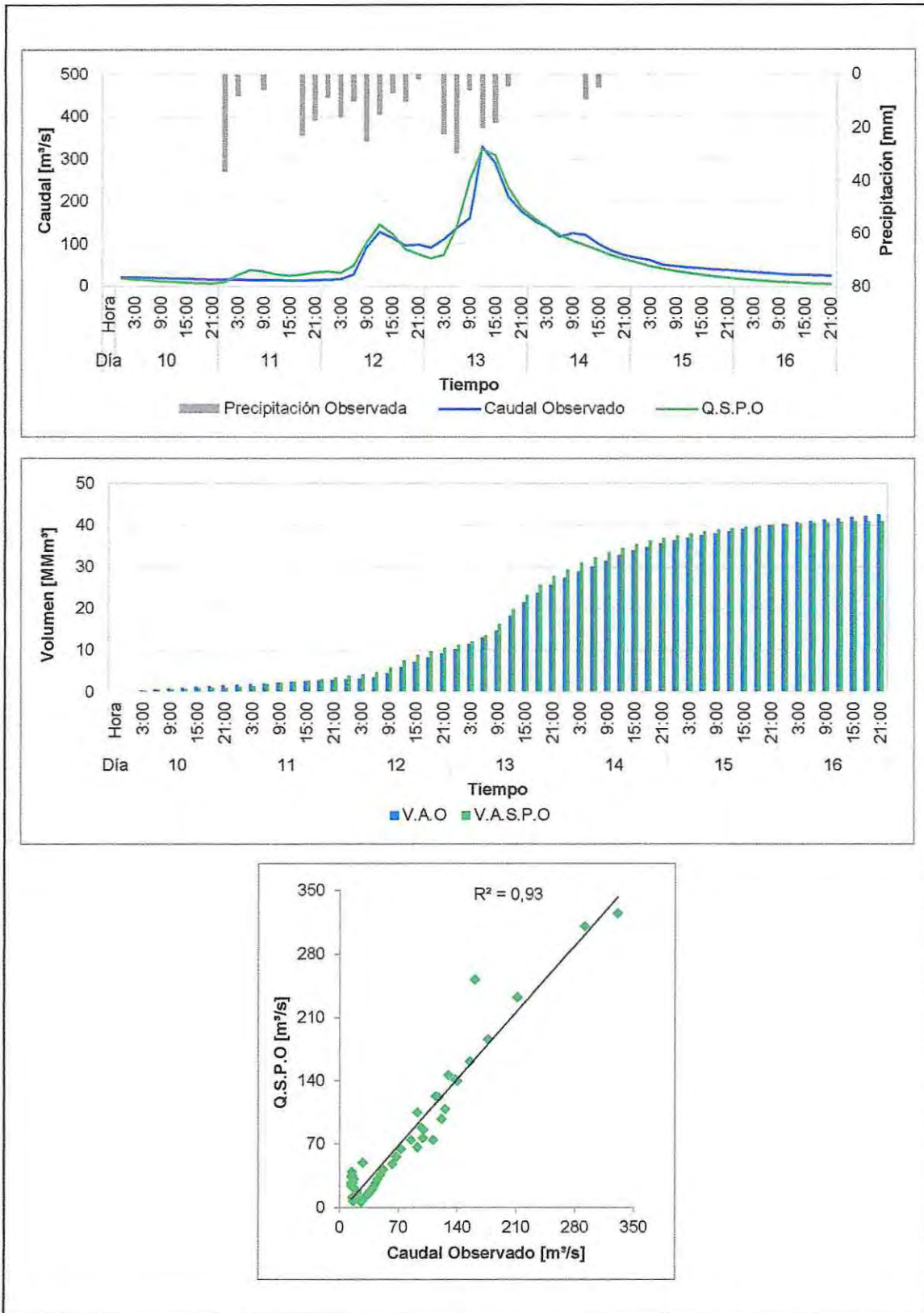


Figura 5.16 - Tormenta de calibración N° 1 por método SMA.

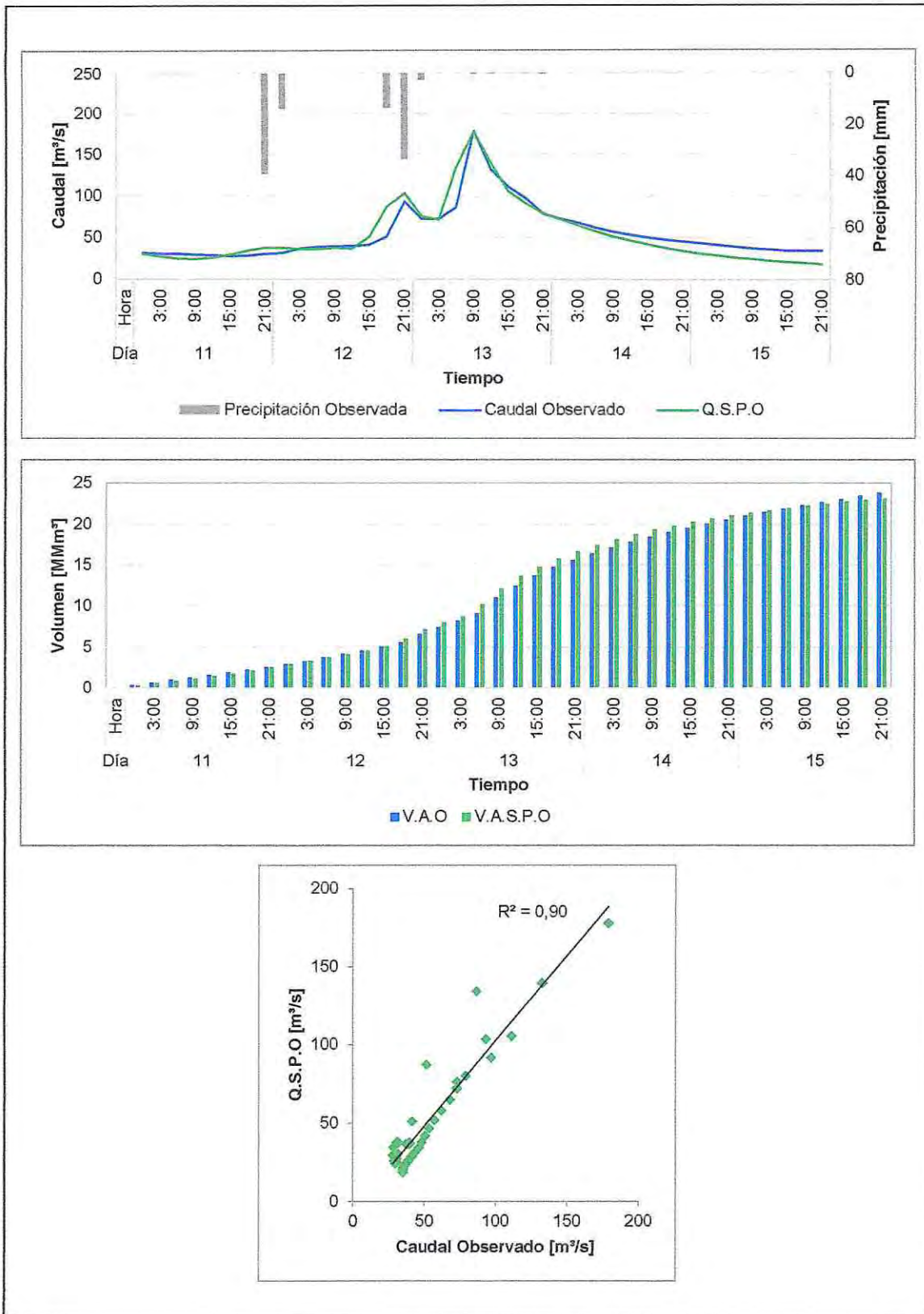


Figura 5.17 - Tormenta de calibración N° 2 por método SMA.

5.6.2.2. Validación del modelo con datos de precipitación observada

La etapa de validación comprende el proceso en el cual la simulación se realiza directamente con los parámetros ya calibrados (Tabla 5.30) y no se modifican sus valores. Los resultados son evaluados con los índices de modelación hidrológicos de manera similar al proceso de calibración.

5.6.2.2.1. Tormentas de validación

El modelo se valida mediante la especificación de un hietograma de precipitaciones observadas utilizando el mismo conjunto de 7 tormentas considerado en la etapa de validación con SCS (Tabla 5.25). La determinación de este hietograma se realiza de manera similar a la metodología expuesta en el ítem 5.6.1.2.1.

5.6.2.2.2. Resultados indicadores de modelación hidrológica

En la Tabla 5.32, se presentan los resultados de los indicadores de modelación y de los volúmenes para la etapa de validación con datos de precipitación observada por el método SMA.

Tabla 5.32 - Resultados validación del modelo con datos de precipitación observada por método SMA.

Tormenta N°	Eficiencia de Nash		Porcentaje BIAS	Correlación	Volumen [MMm³]	
	NSE	NSE Log	PBIAS [%]	R²	Observado	V.S.P.O
1	0,91	0,71	5,82	0,98	25,29	23,82
2	0,91	0,78	6,46	0,93	22,27	20,83
3	0,91	0,83	-4,34	0,92	102,53	106,98
4	0,96	0,86	2,12	0,96	11,99	11,73
5	0,94	0,72	1,54	0,94	90,10	88,71
6	0,92	0,82	-4,05	0,93	18,34	19,08
7	0,92	0,74	3,48	0,93	25,18	24,30

5.6.2.2.3. Gráficos tormentas de validación

En las Figuras 5.18 y 5.19, se presentan los gráficos resultantes del proceso de validación del modelo con datos de precipitación observada por el método SMA para las tormentas de validación N° 1 y N° 2, respectivamente.

Los gráficos de las tormentas de validación N° 3 a N° 7 con datos de precipitación observada por el método SMA, se presentan en el Anexo E.

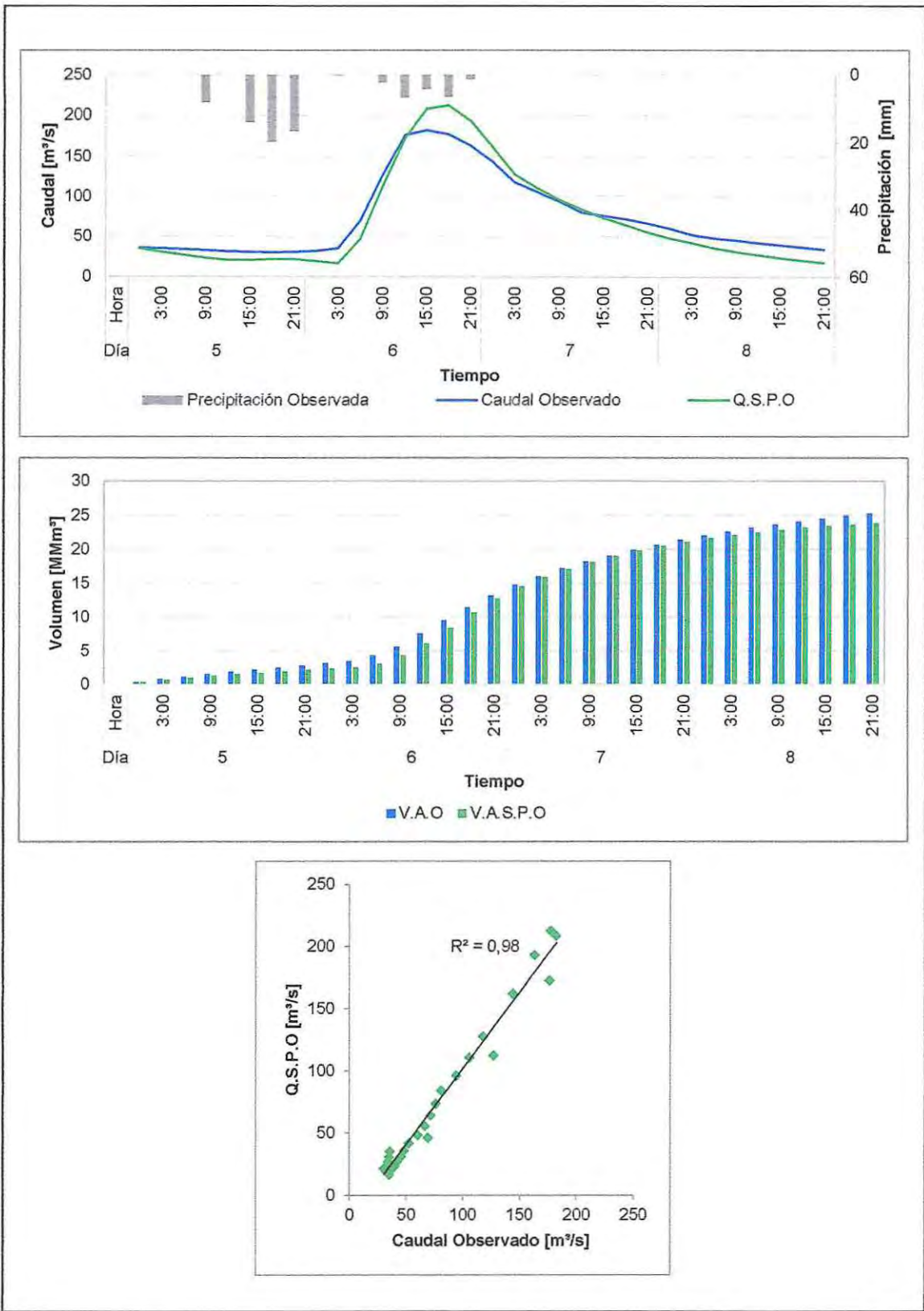


Figura 5.18 - Tormenta de validación N° 1 con datos observados por método SMA.

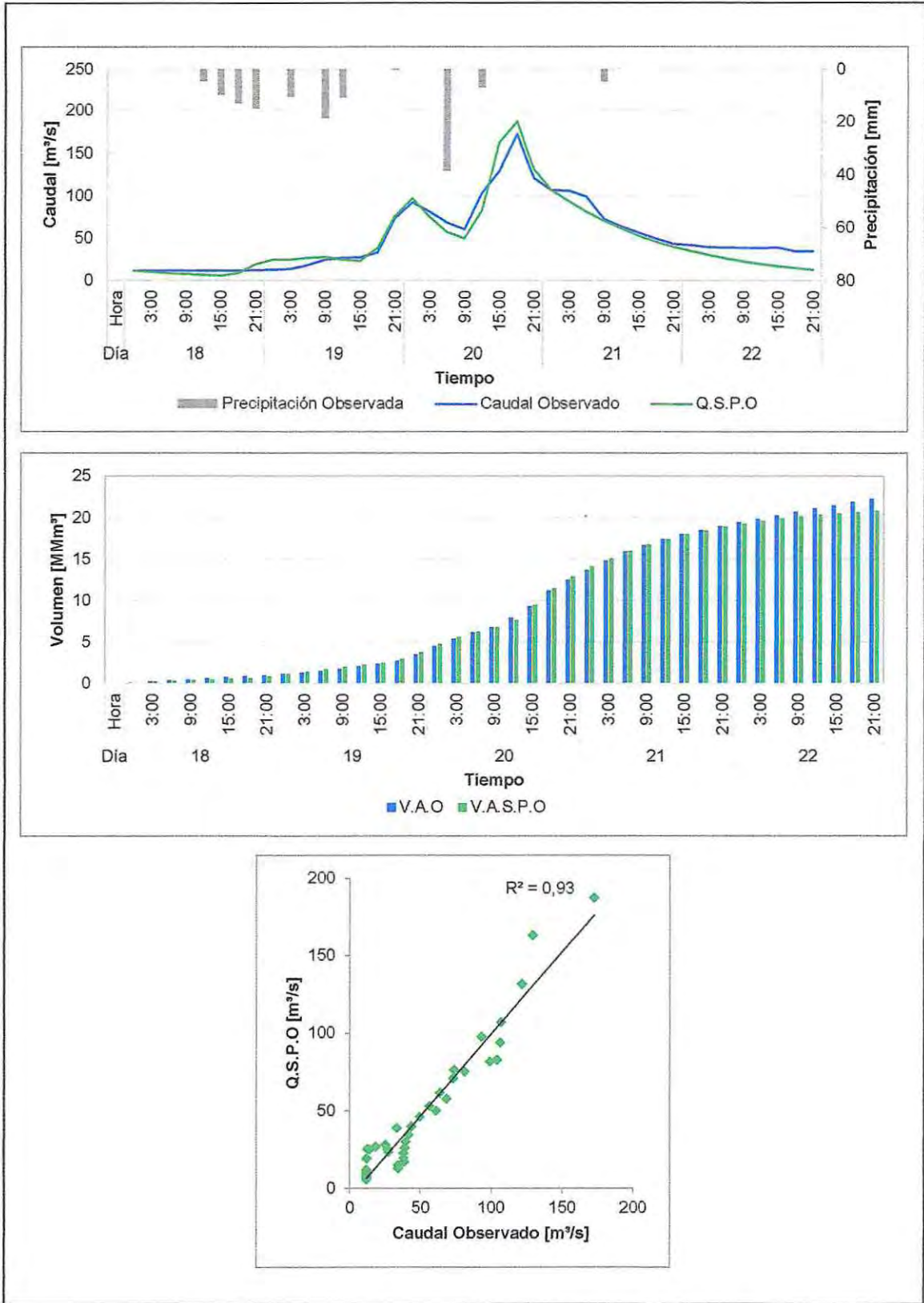


Figura 5.19 - Tormenta de validación N° 2 con datos observados por método SMA.

5.6.2.3. Validación del modelo con datos de precipitación satelital

Una vez validado el modelo con los datos de precipitación observada, se verifica mediante un registro de precipitación satelital.

5.6.2.3.1. Tormentas de validación

El modelo se valida mediante la especificación de un hietograma de precipitaciones satelitales. Se considera el mismo conjunto de eventos utilizado en la validación con datos observados del método SCS (Tabla 5.25) y el ajuste de las imágenes satelitales se realiza de manera similar a lo señalado en el ítem 5.6.1.3.1.

5.6.2.3.2. Resultados indicadores de modelación hidrológica

En la Tabla 5.33, se presentan los resultados de los indicadores de modelación y de los volúmenes para la etapa de validación con datos de precipitación satelital por el método SMA.

Tabla 5.33 - Resultados validación del modelo con datos de precipitación satelital por método SMA.

Tormenta N°	Eficiencia de Nash		Porcentaje BIAS	Correlación	Volumen [MMm ³]	
	NSE	NSE Log	PBIAS [%]	R ²	Observado	V.S.P.S
1	0,89	0,73	2,64	0,98	25,29	24,62
2	0,86	0,71	19,08	0,93	22,27	18,02
3	0,89	0,84	-7,50	0,92	102,53	110,21
4	0,82	0,78	-24,01	0,96	11,99	14,86
5	0,93	0,72	4,29	0,94	90,10	86,23
6	0,81	0,79	-20,57	0,93	18,34	22,11
7	0,87	0,77	-8,48	0,93	25,18	27,31

5.6.2.3.3. Gráficos tormentas de validación

En las Figuras 5.20 y 5.21, se presentan los gráficos resultantes del proceso de validación del modelo con datos de precipitación satelital por el método SMA para las tormentas de validación N° 1 y N° 2, respectivamente.

Los gráficos de las tormentas de validación N° 3 a N° 7 con datos de precipitación satelital por el método SMA, se presentan en el Anexo F.

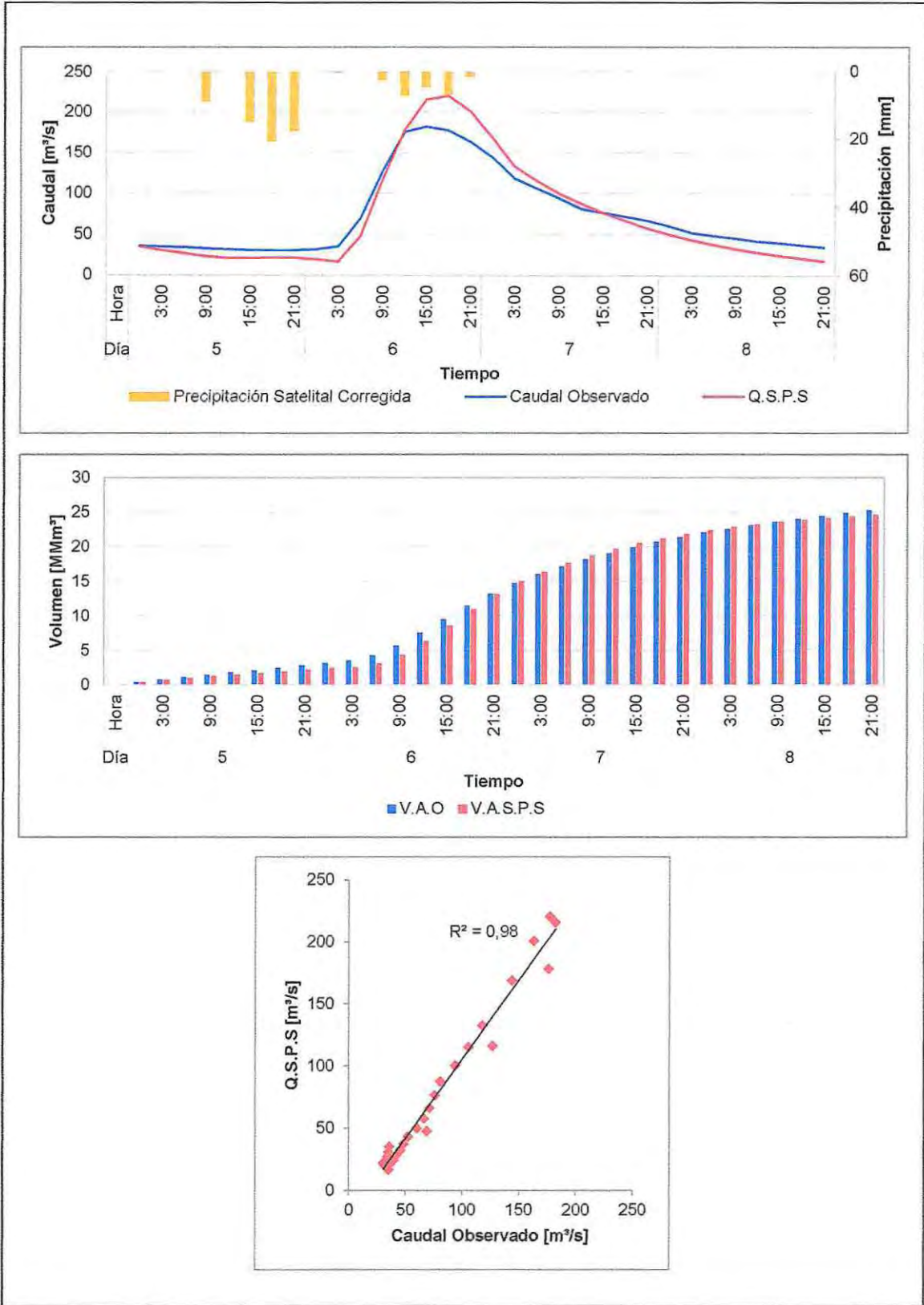


Figura 5.20 - Tormenta de validación N° 1 con datos satelitales por método SMA.

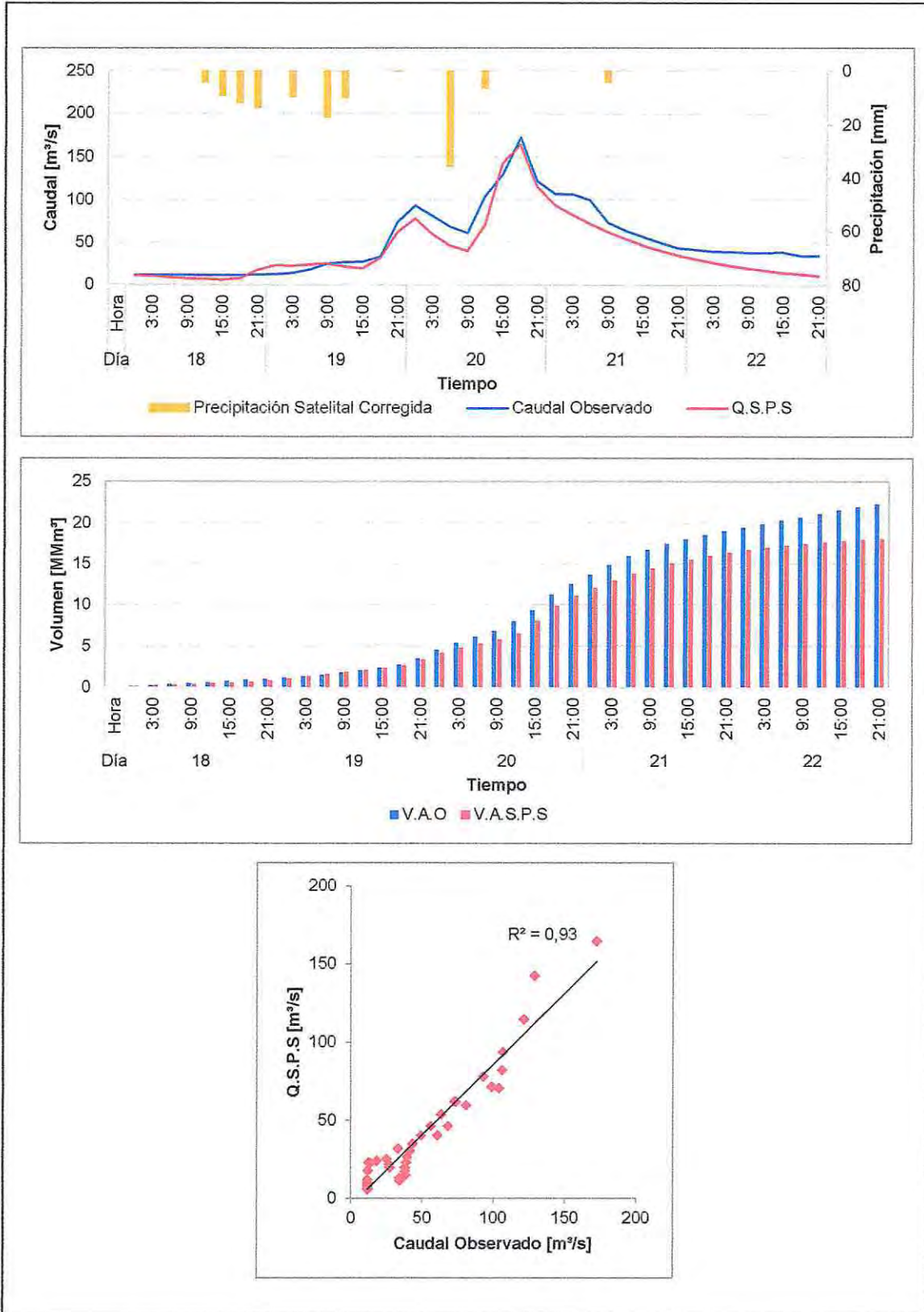


Figura 5.21 - Tormenta de validación N°2 con datos satelitales por método SMA.

Capítulo 6

6. Análisis de resultados

6.1. Uso de registros satelitales de precipitaciones

En la etapa de estimación del uso de información satelital de precipitaciones realizada en la zona indicada en la Figura 3.1, la fase de calibración de los valores de precipitación media observada (P.M.O) y precipitación media satelital (P.M.S) obtenidos con el modelo de regresión lineal realizado a una grupo de 30 eventos para el conjunto de pixeles analizados (pixeles 3, 4, 5, 7, 10 y 14), arrojó resultados poco satisfactorios con magnitud de correlación igual a 0,36, lo cual no era representativo para la correcta calibración del modelo y en consecuencia, impedía el correcto ajuste que se buscaba obtener para dar pie al uso de registros de precipitaciones satelitales.

Para lograr una mejoría en los ajustes del proceso de calibración, fue necesario prescindir de los pixeles 10 y 14, esto debido a la baja correlación obtenida en cada uno de ellos y a la variabilidad entre la altura media e interceptos con respecto a los otros pixeles de la zona. En consecuencia, se descartó del análisis la última línea de la grilla, en conjunto con el Pixel 10, por no ajustarse al modelo planteado y no seguir la misma tendencia o comportamiento con respecto a la zona superior. Bajo esta premisa, con la calibración del modelo de regresión lineal realizado para los pixeles 3, 4, 5 y 7, se lograron resultados aceptables con una correlación de 0,76.

Posteriormente, para corroborar los resultados de la calibración y verificar si las precipitaciones medias observadas y satelitales tienen alguna relación representativa, se realizó un proceso de validación con un nuevo grupo de 10 eventos y un nuevo conjunto de pixeles, lo que arrojó resultados satisfactorios con una magnitud de correlación igual a 0,86. Esto comprueba que la expresión que se determinó en la calibración (Ecuación 3.4), arroja resultados aceptables al momento de comparar los valores resultantes con los obtenidos en base a datos observados y deja de manifiesto la alta correlación que se logró al incluir la altura de pixel como variable independiente al determinar la precipitación media de un evento sobre éste, donde el valor de R^2 varió de valores cercanos a 0,70, a lograr estimaciones con cifras cercanas a 0,80 - 0,90.

En la Figura 6.1, se representa la gráfica resultante de la fase de validación de los pixeles para el grupo de tormentas seleccionadas en este proceso. Del análisis realizado, se traza una recta segmentada en 45° (color rojo), lo cual permite apreciar que en la parte más baja, es decir, para eventos de precipitaciones menores con un rango comprendido entre aproximadamente los 0 y 40 [mm/Evento], el modelo tiende levemente a la sobreestimación de los valores observados. Posteriormente, se produce una intersección en la parte central, donde para eventos de precipitación media de aproximadamente 40 a 70 [mm/Evento], existe una similitud entre ambos tipos de registros de lluvia. Finalmente, en la parte superior, es decir, para eventos de precipitación mayores con valores por sobre los 70 [mm/Evento], la tendencia del modelo es que los registros de precipitación satelital subestiman levemente los eventos.

Sumando al análisis anterior la correlación obtenida durante el proceso, es posible afirmar que existe una relación directa entre los datos de las P.M.O y P.M.Sc y hace factible el uso de la información satelital de precipitaciones en la zona de estudio.

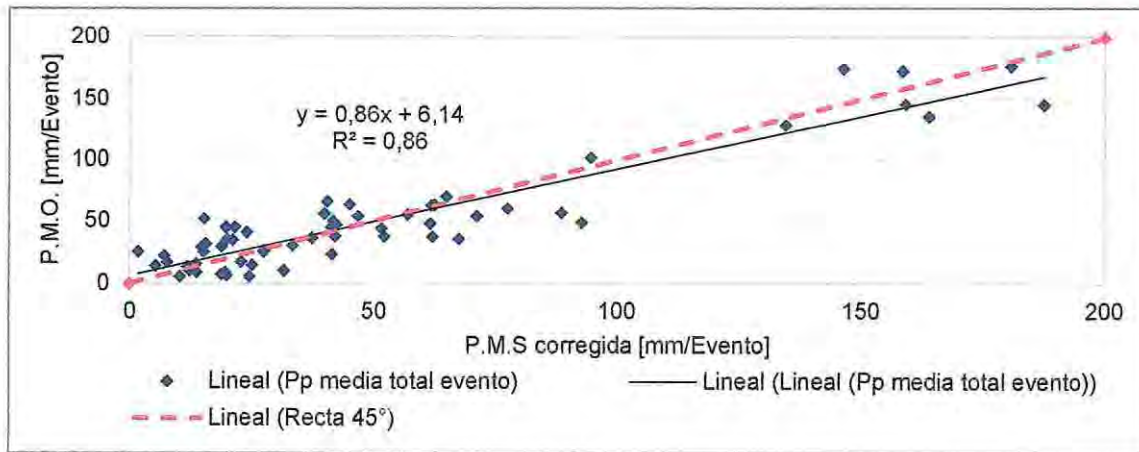


Figura 6.1 - Resultados de la validación de pixeles.

6.2. Modelo hidrológico de la cuenca del río Diguillín en San Lorenzo

Una vez validadas las precipitaciones medias satelitales corregidas (P.M.Sc) y considerando que el uso de imágenes satelitales es representativo, se desarrollan los modelos hidrológicos, los cuales son sometidos a una calibración y validación. Primero se expone el análisis de resultados diferenciados entre el método SCS y SMA, para luego realizar un análisis de contraste entre los mismos.

6.2.1. Modelo hidrológico con método SCS

El modelo se calibra con valores de precipitación observada de las estaciones meteorológicas de la DGA, para un grupo de 10 tormentas. Los resultados obtenidos en este proceso (Tabla 5.24), demuestran que todos los eventos poseen una Eficiencia de Nash con ajuste "excelente" (Tabla 2.1). Con respecto al Porcentaje BIAS, solo una tormenta es la más alejada del óptimo, la cual posee un valor de +9,69%, a pesar de ello, todas presentan una respuesta "muy buena" (Tabla 2.2).

Tomando en cuenta que los valores obtenidos en la calibración son aptos para la simulación, se valida el modelo con valores de precipitación observada para un grupo de 7 tormentas, los parámetros obtenidos en la calibración se mantienen fijos y no se modifican. Los resultados de este proceso (Tabla 5.26), indican que los 7 eventos simulados presentan una Eficiencia de Nash con ajuste "excelente". En cuanto al indicador de Eficiencia de Nash con valores logarítmicos, se obtienen 4 eventos con ajuste "excelente" y 3 tormentas de ajuste "muy bueno". Con respecto al Porcentaje BIAS, las 7 tormentas presentan respuesta "muy buena". Con los resultados obtenidos, se puede afirmar que el modelo hidrológico con el método SCS se encuentra validado con los datos observados.

Luego, se verifica si la información satelital puede ser utilizada en lugar de los registros observados, para ello, se realiza la validación del modelo con datos de precipitación satelital. Del análisis efectuado a los resultados obtenidos en este proceso (Tabla 5.29), se desprende que los 7 eventos presentan una Eficiencia de Nash con ajuste "excelente". En cuanto a la Eficiencia de Nash con valores logarítmicos, 4 tormentas presentan ajuste "excelente" y 3 tormentas alcanzan un ajuste "muy bueno". Con respecto al Porcentaje BIAS, 4 tormentas tienen respuesta "muy buena", mientras que 3 eventos poseen respuesta "buena". Bajo estas condiciones, se puede afirmar que el modelo hidrológico con el método SCS se encuentra validado con los datos de imágenes satelitales.

En la Tabla 6.1, se indica la comparación entre indicadores de modelación hidrológica y los volúmenes simulados para las validaciones, utilizando datos de precipitación observada y satelital.

Tabla 6.1 - Análisis comparativo de indicadores y volúmenes simulados para la validación del modelo mediante datos de precipitación observada y satelital por método SCS.

Tormenta N°	Eficiencia de Nash				Porcentaje BIAS [%]		Correlación		Volumen [MMm³]	
	NSE Obs.	NSE Satelital	NSE Log Obs.	NSE Log Satelital	PBIAS Obs.	PBIAS Satelital	R² Obs.	R² Satelital	V.S.P.O	V.S.P.S
1	0,95	0,95	0,76	0,78	9,76	6,95	0,97	0,97	22,82	23,54
2	0,93	0,91	0,83	0,80	2,87	13,86	0,95	0,95	21,63	19,19
3	0,92	0,93	0,83	0,84	7,12	4,09	0,93	0,93	95,23	98,34
4	0,95	0,91	0,91	0,88	4,67	-13,44	0,96	0,95	11,43	13,60
5	0,95	0,94	0,71	0,70	4,49	7,12	0,95	0,95	86,05	83,69
6	0,94	0,90	0,86	0,83	2,40	-14,28	0,94	0,95	17,90	20,95
7	0,94	0,92	0,73	0,78	7,53	-3,16	0,95	0,95	23,28	25,98

De las comparaciones que se observan en la Tabla 6.1, se desprende que las correlaciones son semejantes y que, si bien los Nash son similares entre ambos tipos de registro de lluvia, los Porcentajes BIAS son mucho más altos en la modelación con precipitación satelital y sus resultados son más dispersos.

En virtud de lo anterior, se observa que en 5 eventos se produce una mayor Eficiencia de Nash con datos observados de precipitación que con respecto a los satelitales. El menor ajuste obtenido con observados es 0,92 y con satelitales es 0,90. El promedio porcentual de las diferencias entre el NSE observado y satelital es 1,90%. Por su parte, con los Nash logarítmicos el menor ajuste logrado con datos observados 0,71 y con satelitales es 0,70. La diferencia media porcentual entre ambos tipos de registros es 3,12%.

En cuanto al Porcentaje BIAS, en 4 eventos se presentan mejores resultados con las mediciones observadas que con respecto a las satelitales. Además, todas las simulaciones con datos observados tienden a subestimar los valores medidos, mientras que las simulaciones satelitales presentan una leve tendencia a la sobrestimación de los eventos. La respuesta más alejada del óptimo con datos observados es +9,76% y con satelitales es -14,28%. La diferencia porcentual promedio entre ambos modelos es 9,28%.

Esto último es consistente en términos de cómo se estimó la precipitación satelital, puesto que justamente los eventos en que el modelo sobrestimó los valores corresponden a tormentas pequeñas, es decir, a eventos con menores volúmenes (tal como se señala en ítem 6.1). Además, en general la precipitación satelital es mayor que la observada, lo que se traduce en que la diferencia de volúmenes es mayor a cero y, en consecuencia, implica que el modelo con registros satelitales tiende a concentrar una mayor cantidad de agua (sobrestimar).

6.2.2. Modelo hidrológico con método SMA

Al igual que en el caso anterior (ítem 6.2.1), se calibra el modelo con valores de precipitación observada para el mismo grupo de eventos. Los resultados obtenidos en este proceso (Tabla 5.31), demuestran que las 10 tormentas poseen una Eficiencia de Nash con ajuste "excelente". Con respecto al Porcentaje BIAS, 6 tormentas presentan respuesta "muy buena", 3 tormentas cuentan con un resultado "bueno" y el evento más alejado del óptimo tiene un valor de +17,86%, cuyo resultado se considera "satisfactorio".

Tomando en cuenta que los valores obtenidos en la calibración son aptos para la simulación, se valida el modelo con valores de precipitación observada utilizando el mismo grupo de tormentas de la validación con SCS. Los resultados de este proceso (Tabla 5.32), indican que los 7 eventos simulados presentan una Eficiencia de Nash con ajuste "excelente". En cuanto a la Eficiencia de Nash con valores logarítmicos, se obtienen 3 tormentas con ajuste "excelente" y 4 eventos con ajuste "muy bueno". Con respecto al Porcentaje BIAS, las 7 tormentas presentan respuesta "muy buena". Con los resultados obtenidos, se puede afirmar que el modelo hidrológico con el método SMA se encuentra validado con los datos observados.

Los resultados de la validación del modelo con datos satelitales (Tabla 5.33), demuestran que los 7 eventos presentan una Eficiencia de Nash con ajuste "excelente". En cuanto a la Eficiencia de Nash con valores logarítmicos, se obtiene 1 evento con ajuste "excelente" y 6 eventos con ajuste "muy bueno". Con respecto al Porcentaje BIAS, se observan 4 tormentas con respuesta "muy buena" y 3 tormentas con resultados "satisfactorios". Bajo estas condiciones, se puede afirmar que el modelo hidrológico con el método SMA se encuentra validado con los datos de imágenes satelitales.

En la Tabla 6.2, se indica la comparación entre indicadores de modelación hidrológica y los volúmenes simulados para las validaciones, utilizando datos de precipitación observada y satelital.

Tabla 6.2 - Análisis comparativo de indicadores y volúmenes simulados para la validación del modelo mediante datos de precipitación observada y satelital por método SMA.

Tormenta N°	Eficiencia de Nash				Porcentaje BIAS [%]		Correlación		Volumen [MMm ³]	
	NSE Obs.	NSE Satelital	NSE Log Obs.	NSE Log Satelital	PBIAS Obs.	PBIAS Satelital	R ² Obs.	R ² Satelital	V.S.P.O	V.S.P.S
1	0,91	0,89	0,71	0,73	5,82	2,64	0,98	0,98	23,82	24,62
2	0,91	0,86	0,78	0,71	6,46	19,08	0,93	0,93	20,83	18,02
3	0,91	0,89	0,83	0,84	-4,34	-7,50	0,92	0,92	106,98	110,21
4	0,96	0,82	0,86	0,78	2,12	-24,01	0,96	0,96	11,73	14,86
5	0,94	0,93	0,72	0,72	1,54	4,29	0,94	0,94	88,71	86,23
6	0,92	0,81	0,82	0,79	-4,05	-20,57	0,93	0,93	19,08	22,11
7	0,92	0,87	0,74	0,77	3,48	-8,48	0,93	0,93	24,30	27,31

De las comparaciones que se observan en la Tabla 6.2, se desprende que las correlaciones son similares, los Nash son superiores con los registros observados, el Porcentaje BIAS es mayor en la modelación con precipitación satelital y sus resultados son más dispersos.

En virtud de lo anterior, se observa que en todos los eventos se produce una mayor Eficiencia de Nash con datos observados que con respecto a los satelitales. El menor ajuste obtenido con observados es 0,91, mientras que con satelitales es 0,81. La diferencia porcentual promedio entre ambos tipos de registros es 6,07%. Por su parte, con los Nash logarítmicos el menor ajuste logrado es 0,71 y la diferencia porcentual promedio es 4,17%.

En cuanto al Porcentaje BIAS, en 6 tormentas se presentan mejores resultados con las mediciones observadas que con respecto a las satelitales. Además, con las simulaciones observadas se tiende a subestimar los valores medidos, mientras que las simulaciones satelitales presentan una leve tendencia a la sobrestimación de los eventos. La respuesta más alejada del óptimo con datos observados es +6,46% y con satelitales -24,01%. La diferencia porcentual promedio entre ambos modelos es 10,90%.

Esto último es consistente en términos de cómo se estimó la precipitación satelital, puesto que en general este tipo de precipitación resulta mayor que la observada, lo que se traduce en que la diferencia de volúmenes es mayor a cero y, en consecuencia, implica que el modelo con registros satelitales tiende a concentrar una mayor cantidad de agua (sobrestimar). Además, se observa que en la mayoría de los casos en que el modelo sobrestimó los valores, corresponden a eventos pequeños en cuanto a volumen (tal como se señala en ítem 6.1), a excepción de la Tormenta N° 3, lo que no es extraño, ya que según la Figura 6.1, existen eventos que no siguen dicha tendencia.

6.2.3. Análisis de contraste entre el método SCS y SMA.

6.2.3.1. Contraste de indicadores y volúmenes con el uso de datos de precipitación observada

En la Tabla 6.3, se representa la comparación entre los resultados obtenidos en la validación con datos de precipitación observada para ambos modelos.

Tabla 6.3 - Comparación indicadores y volúmenes mediante método SCS y SMA para datos de precipitación observada.

Tormenta N°	Eficiencia de Nash				Porcentaje BIAS [%]		Correlación		Volumen [MMm ³]	
	NSE		NSE Log		PBIAS		R ²		V.S.P.O	
	SCS	SMA	SCS	SMA	SCS	SMA	SCS	SMA	SCS	SMA
1	0,95	0,91	0,76	0,71	9,76	5,82	0,97	0,98	22,82	23,82
2	0,93	0,91	0,83	0,78	2,87	6,46	0,95	0,93	21,63	20,83
3	0,92	0,91	0,83	0,83	7,12	-4,34	0,93	0,92	95,23	106,98
4	0,95	0,96	0,91	0,86	4,67	2,12	0,96	0,96	11,43	11,73
5	0,95	0,94	0,71	0,72	4,49	1,54	0,95	0,94	86,05	88,71
6	0,94	0,92	0,86	0,82	2,40	-4,05	0,94	0,93	17,90	19,08
7	0,94	0,92	0,73	0,74	7,53	3,48	0,95	0,93	23,28	24,30

De la tabla anterior se desprende que las correlaciones y los indicadores de Nash entre ambos modelos son similares, el Porcentaje BIAS se encuentra por debajo del 10% en los dos modelos y exhibe una pequeña diferencia en el método SMA, donde aparecen algunas sobrestimaciones.

En virtud de lo anterior, se observa que en 6 tormentas se produce una mayor Eficiencia de Nash con el método SCS que con respecto al SMA. El menor ajuste logrado con SCS es 0,92 y con SMA es 0,91. La diferencia porcentual promedio entre las simulaciones de ambos métodos de infiltración es 2,01%. Por su parte, con la Eficiencia de Nash con valores logarítmicos el menor ajuste obtenido es 0,71 y la diferencia porcentual promedio es 3,85%.

Del análisis al Porcentaje BIAS, se observa que el modelo responde en todas las tormentas con la máxima categoría ("muy bueno") para ambos métodos de infiltración. La respuesta más alejada del óptimo con SCS es +9,76% y con SMA es +6,46%. La diferencia porcentual promedio entre ambos métodos corresponde al 5,00%.

Posteriormente, en la Tabla 6.4, se realiza un análisis entre el volumen observado y los volúmenes simulados con datos de precipitación observada por el método SCS y SMA.

Tabla 6.4 – Comparación entre volúmenes observados y simulados mediante método SCS y SMA para datos de precipitación observada.

Tormenta N°	Volumen [MMm ³]			Diferencia porcentual [%]		
	V. Observado	V.S.P.O SCS	V.S.P.O SMA	V. Observado – V.S.P.O SCS	V. Observado – V.S.P.O SMA	V.S.P.O SCS – V.S.P.O SMA
1	25,29	22,82	23,82	9,76	5,82	4,18
2	22,27	21,63	20,83	2,87	6,46	3,84
3	102,53	95,23	106,98	7,12	4,34	10,98
4	11,99	11,43	11,73	4,67	2,12	2,61
5	90,10	86,05	88,71	4,49	1,54	3,00
6	18,34	17,90	19,08	2,40	4,05	6,20
7	25,18	23,28	24,30	7,53	3,48	4,19
	Diferencia media porcentual [%]			5,55	3,97	5,00

De la Tabla 6.4, se desprende que los volúmenes simulados utilizando el método SMA poseen una menor diferencia porcentual con respecto al volumen observado, resultando una media de 3,97%. Por su parte, los volúmenes simulados con el método SCS presentan una diferencia porcentual con respecto al volumen observado levemente superior al caso anterior, registrando una media de 5,55%. Por consiguiente, la diferencia media porcentual entre volúmenes simulados corresponde al 5,00%.

Del análisis precedente, se demuestra que los indicadores y volúmenes presentan en general resultados satisfactorios para la simulación de la cuenca mediante ambos modelos, y es posible inferir hasta esta instancia, de que no existe una diferencia sustantiva al analizar estos modelos a partir de datos de precipitación observada mediante los métodos SCS y SMA.

6.2.3.2. Contraste de indicadores y volúmenes con el uso de datos de precipitación satelital

En la Tabla 6.5, se representa la comparación entre los indicadores obtenidos en la validación con datos de precipitación satelital para ambos modelos.

Tabla 6.5 - Comparación indicadores y volúmenes mediante el método SCS y SMA para datos de precipitación satelital.

Tormenta N°	Eficiencia de Nash				Porcentaje BIAS [%]		Correlación		Volumen [MMm³]	
	NSE		NSE Log		PBIAS		R²		V.S.P.S	
	SCS	SMA	SCS	SMA	SCS	SMA	SCS	SMA	SCS	SMA
1	0,95	0,89	0,78	0,73	6,95	2,64	0,97	0,98	23,54	24,62
2	0,91	0,86	0,80	0,71	13,86	19,08	0,95	0,93	19,19	18,02
3	0,93	0,89	0,84	0,84	4,09	-7,50	0,93	0,92	98,34	110,21
4	0,91	0,82	0,88	0,78	-13,44	-24,01	0,95	0,96	13,60	14,86
5	0,94	0,93	0,70	0,72	7,12	4,29	0,95	0,94	83,69	86,23
6	0,90	0,81	0,83	0,79	-14,28	-20,57	0,95	0,93	20,95	22,11
7	0,92	0,87	0,78	0,77	-3,16	-8,48	0,95	0,93	25,98	27,31

De la tabla anterior se desprende que las correlaciones son similares entre ambos modelos, los indicadores de Nash presentan mayores ajustes con el método SCS, el Porcentaje BIAS presenta respuestas más altas en el método SMA y exhibe una mayor dispersión.

En virtud de lo anterior, se observa que en todos los eventos se produce un mayor Eficiencia de Nash con el método SCS que con respecto al SMA. El menor ajuste logrado con SCS es 0,90 y con SMA es 0,81. La diferencia porcentual promedio entre las simulaciones de ambos métodos de infiltración es 6,24%. Por su parte, con la Eficiencia de Nash con valores logarítmicos el menor ajuste obtenido con SCS es 0,70 y con SMA es 0,71. La diferencia porcentual promedio es 5,52%.

En cuanto al análisis del Porcentaje BIAS, el modelo responde en 4 tormentas con la máxima categoría ("muy bueno") para ambos métodos de infiltración. La respuesta más alejada del óptimo con SCS es +13,86% y con SMA es -24,01%. La diferencia porcentual promedio entre ambos métodos de infiltración corresponde al 6,60%.

De manera similar al caso con datos de precipitación observada (ítem 6.2.3.1), en la Tabla 6.6, se realiza un análisis entre el volumen observado y simulado con datos de precipitación satelital por el método SCS y SMA.

Tabla 6.6 - Comparación entre volúmenes observados y simulados mediante método SCS y SMA para datos de precipitación satelital.

Tormenta N°	Volumen [MMm ²]			Diferencia porcentual [%]		
	V. Observado	V.S.P.S SCS	V.S.P.S SMA	V. Observado – V.S.P.S SCS	V. Observado – V.S.P.S SMA	V.S.P.S SCS – V.S.P.S SMA
1	25,29	23,54	24,62	6,95	2,64	4,63
2	22,27	19,19	18,02	13,86	19,08	6,46
3	102,53	98,34	110,21	4,09	7,50	12,08
4	11,99	13,60	14,86	13,44	24,01	9,32
5	90,10	83,69	86,23	7,12	4,29	3,04
6	18,34	20,95	22,11	14,28	20,57	5,50
7	25,18	25,98	27,31	3,16	8,48	5,15
Diferencia media porcentual [%]				8,98	12,37	6,60

De la Tabla 6.4, se desprende que los volúmenes simulados utilizando el método SCS poseen una menor diferencia porcentual con respecto al volumen observado, resultando una media de 8,98%. Por su parte, los volúmenes simulados con el método SMA presentan una diferencia porcentual con respecto al volumen observado levemente superior al caso anterior, registrando una media de 12,37%. Por consiguiente, la diferencia media porcentual entre volúmenes simulados corresponde al 6,60%.

Del análisis precedente, se demuestra que los indicadores y volúmenes presentan en general resultados satisfactorios para la simulación de la cuenca mediante ambos modelos, y es posible inferir hasta esta instancia, de que no existe una diferencia sustantiva al analizar ambos modelos a partir de datos satelitales mediante los métodos SCS y SMA. Aunque, si se denota una mayor diferencia con respecto al análisis de la simulación con información observada de precipitaciones.

6.2.3.3. Contraste de datos observados y satelitales mediante indicadores y volúmenes para ambos métodos de infiltración

En la Tabla 6.7, se indica un análisis comparativo de las diferencias porcentuales medias entre los métodos de infiltración SCS y SMA, tanto para los indicadores de modelación como para los volúmenes, los cuales se obtuvieron en las simulaciones de ambos modelos mediante el uso de información observada y satelital de precipitaciones.

Tabla 6.7 - Resumen comparativo de indicadores según datos de precipitación observada y satelital.

Indicador / Volumen	Diferencia media porcentual [%]		Diferencia datos Observados – Satelitales [%]
	Datos Observados	Datos Satelitales	
Eficiencia de Nash (SCS – SMA)	2,01	6,24	4,23
Eficiencia de Nash Log (SCS – SMA)	3,85	5,52	1,68
Porcentaje BIAS (SCS – SMA)	5,00	6,60	1,60
Volumen (SCS – SMA)	5,00	6,60	1,60

En base a los resultados que se exponen en la tabla anterior, se observan menores diferencias porcentuales entre ambos métodos de infiltración en la totalidad de los indicadores utilizando datos de precipitación observada. Sin embargo, los resultados no se alejan demasiado al compararlos con el uso de imágenes satelitales, siendo la mayor diferencia porcentual promedio entre ambos tipos de registros, la que se obtiene con la Eficiencia de Nash, con un 4,23%. En ambos métodos, el modelo tiende a subestimar los valores observados al utilizar los datos de precipitación observada, mientras que, con los registros de precipitación satelital dicha tendencia se revierte al presentarse una mayor cantidad de casos en que el modelo sobrestima los eventos.

6.2.4. Análisis gráfico

En esta sección se realiza un análisis gráfico y de caudales punta a los hidrogramas de ambos métodos de manera separada, es decir, primero se analiza el modelo mediante el método SCS y se contrasta el uso de datos de precipitación observada y satelital, luego se realiza el mismo proceso para el método SMA y finalmente se comparan ambos modelos.

6.2.4.1. Análisis gráfico del modelo con método SCS

De manera general, todos los hidrogramas de simulación del modelo de la cuenca mediante el método SCS, tanto para simulaciones con datos de precipitación observada y satelital, se ajustaron satisfactoriamente a los caudales observados. Esto se debe principalmente al buen ajuste de las variables involucradas durante el proceso de calibración y a la capacidad del modelo para realizar simulaciones más detalladas.

Los caudales punta observados y los simulados con datos de precipitación observada y satelital, se produjeron en el mismo instante de tiempo para todos los eventos. No obstante, se aprecian diferencias con respecto a la magnitud de estos mismos. Para ejemplificarlo, en la Tabla 6.8 se indican los caudales punta obtenidos para cada evento y a continuación, se señalan las diferencias porcentuales entre el caudal observado y el simulado.

Tabla 6.8 - Análisis caudales punta utilizando método SCS.

Tormenta N°	Caudal punta [m³/s]			Diferencia porcentual [%]	
	Observado	Q.S.P.O	Q.S.P.S	Observado – Q.S.P.O	Observado – Q.S.P.S
1	182,20	180,80	187,40	0,77	2,85
2	172,67	178,90	158,50	3,61	8,21
3	576,52	486,20	501,70	15,67	12,98
4	166,51	149,70	181,80	10,09	9,18
5	698,52	608,30	592,40	12,92	15,19
6	204,22	179,30	212,00	12,20	3,81
7	189,85	199,10	222,20	4,87	17,04
Diferencia media porcentual [%]				8,59	9,89

De la Tabla 6.8, se observa en general que las mayores diferencias porcentuales ocurren para eventos que registran las crecidas más elevadas del conjunto. La diferencia media porcentual entre los caudales observados y las simulaciones con precipitación observada corresponde al 8,59%, y la mayor diferencia es 15,67%. Por su parte, la diferencia media porcentual entre los caudales observados y las simulaciones con precipitación satelital alcanza el 9,89%, destacándose que la mayor diferencia corresponde al 17,04%. Lo anterior da como resultado una diferencia promedio de 1,31 puntos porcentuales entre ambas simulaciones.

Adicionalmente, se observa que los caudales punta simulados con datos de precipitación observada tienden a subestimar los valores observados, a excepción de un evento. Por el contrario, los caudales punta simulados con datos satelitales presentan una tendencia a sobreestimar los valores observados, salvo en 3 eventos.

Por otro lado, se tiene que el promedio de las correlaciones para el conjunto de eventos simulados con datos de precipitación observada respecto a los caudales observados presenta una magnitud de 0,9494 y en el caso de las simulaciones con datos satelitales, el promedio de las correlaciones alcanza el 0,9493. Luego, la diferencia porcentual promedio entre ambas correlaciones se estima en 0,31 %.

En referencia al análisis de las curvas de descenso de los hidrogramas, en general se aprecia que ambas simulaciones replican de manera similar su forma. Sin embargo, el agotamiento es pronunciado en la mayoría de los eventos, por lo que se realiza un análisis a los caudales observados y simulados correspondientes al último día de cada evento. Para ello, se calcula el caudal promedio y luego se determina la diferencia porcentual entre ellos, tal como se resume en la Tabla 6,9 que se indica a continuación.

Tabla 6.9 - Análisis curva de agotamiento con método SCS.

Tormenta N°	Promedio caudal en el último día [m³/s]			Diferencia porcentual [%]		
	Observado	Q.S.P.O	Q.S.P.S	Observado – Q.S.P.O	Observado – Q.S.P.S	Q.S.P.O – Q.S.P.S
1	44,82	28,38	29,25	36,70	34,75	2,99
2	37,88	24,48	21,80	35,38	42,44	10,93
3	40,96	22,50	23,16	45,06	43,45	2,86
4	36,61	33,79	40,88	7,72	10,43	17,34
5	46,31	25,26	24,63	45,45	46,83	2,52
6	35,26	26,80	31,41	24,00	10,92	14,68
7	27,99	14,34	15,99	48,77	42,87	10,32
Diferencia media porcentual [%]				34,73	33,10	8,81

De la Tabla 6.9, se observan altas diferencias porcentuales en la mayoría de los eventos y los resultados son similares entre las simulaciones con precipitación observada y satelital. Se obtiene que la diferencia porcentual promedio al analizar los caudales observados con los simulados por precipitación observada es mayor en un 1,63% que con respecto a los satelitales. Siendo la diferencia porcentual promedio entre ambos registros de precipitación de 8,81%. La mayor diferencia porcentual entre caudales observados y simulados con datos observados es 48,77%, mientras que en el caso de los satelitales la diferencia más significativa alcanza el 46,83%.

6.2.4.2. Análisis gráfico del modelo con método SMA

De manera similar al método SCS (ítem 6.2.4.1), todos los gráficos de simulación del modelo de la cuenca del río Diguillín en San Lorenzo mediante el método SMA, tanto para simulaciones con datos de precipitación observada y satelital, se ajustaron satisfactoriamente a los caudales observados.

Al igual que el caso anterior, los caudales punta observados y los simulados con datos de precipitación observada y satelital, se produjeron en el mismo instante de tiempo para todos los eventos. No obstante, se aprecia que su magnitud es diferente. Por lo tanto, estos últimos se analizan en la Tabla 6.10 para obtener las diferencias porcentuales entre los caudales punta observados y los simulados.

Tabla 6.10 - Análisis caudales punta utilizando método SMA.

Tormenta N°	Caudal punta [m³/s]			Diferencia porcentual [%]	
	Observado	Q.S.P.O	Q.S.P.S	Observado – Q.S.P.O	Observado – Q.S.P.S
1	182,20	212,70	220,70	16,74	21,13
2	172,67	187,60	164,70	8,65	4,61
3	576,52	543,90	559,40	5,66	2,97
4	166,51	150,90	194,80	9,37	16,99
5	698,52	575,90	560,70	17,55	19,73
6	204,22	205,80	239,90	0,78	17,47
7	189,85	221,00	245,00	16,41	29,05
Diferencia media porcentual [%]				10,74	15,99

De la Tabla 6.10, se observa que la diferencia media porcentual entre los caudales observados y las simulaciones con precipitación observada corresponde al 10,74%, y la mayor diferencia es 17,55%. Por su parte, la diferencia media porcentual entre los caudales observados y las simulaciones con precipitación satelital alcanza el 15,99%, destacándose que la mayor diferencia corresponde al 29,05%. Lo anterior da como resultado una diferencia promedio de 5,26 puntos porcentuales entre ambas simulaciones. Esta última magnitud, es superior en un 3,95% al caso con el método SCS.

A diferencia del método SCS, en este caso se observa que los caudales punta simulados, tanto con datos de precipitación observada como satelital, presentan una tendencia a sobreestimar los valores observados, a excepción de 3 eventos. Pero en ambas simulaciones, el método SMA presenta mayores diferencias porcentuales en comparación con el SCS.

Por otro lado, se tiene que el promedio de las correlaciones para el conjunto de eventos simulados con datos de precipitación observada respecto a los caudales observados presenta una magnitud de 0,9412 y en el caso de las simulaciones con datos de precipitación satelital, el promedio de las correlaciones es 0,9414. Luego, la diferencia porcentual promedio entre ambas correlaciones se estima en 0,02 %.

En referencia al análisis de las curvas de descenso de los hidrogramas, en general se aprecia que ambas simulaciones replican de manera similar su forma. Sin embargo, el agotamiento es pronunciado en la mayoría de los eventos, por lo que, de manera similar al procedimiento señalado en el caso anterior, en la Tabla 6.11 se realiza un análisis a los caudales observados y simulados del último día de cada evento.

Tabla 6.11 - Análisis curva de agotamiento con método SMA.

Tormenta N°	Promedio caudal en el último día [m³/s]			Diferencia porcentual [%]		
	Observado	Q.S.P.O	Q.S.P.S	Observado-Q.S.P.O	Observado-Q.S.P.S	Q.S.P.O-Q.S.P.S
1	44,82	30,74	31,83	31,43	29,00	3,42
2	37,88	22,26	19,51	41,22	48,48	12,35
3	40,96	23,34	23,99	43,02	41,43	2,71
4	36,61	39,84	51,54	8,81	28,96	22,70
5	46,31	23,84	23,20	48,53	49,91	2,67
6	35,26	29,59	35,33	16,09	0,18	16,24
7	27,99	15,74	17,41	43,76	37,78	9,62
Diferencia media porcentual [%]				33,27	33,68	9,96

De la Tabla 6.11, se observa que al igual que con el SCS, se producen altas diferencias porcentuales en la mayoría de los eventos y los resultados son similares entre las simulaciones con datos de precipitación observada y satelital. Se obtiene que la diferencia porcentual promedio al analizar los caudales observados con los simulados por precipitación satelital es mayor en un 0,41 % que con respecto a los simulados con precipitación observada. Siendo la diferencia porcentual media entre ambos tipos de registros de precipitación de 9,96 %. La mayor diferencia porcentual entre los caudales observados y simulados con precipitación observada es 48,53%, mientras que en el caso de las simulaciones con precipitación satelital la diferencia más significativa alcanza el 49,91%.

6.2.4.3. Contraste gráfico entre método SCS y SMA

El comportamiento de los hidrogramas simulados entre ambos métodos de infiltración en general respeta la forma original, obtenida a partir de los datos fluviométricos observados en la estación de salida de la cuenca. Esta misma condición se repite tanto para simulaciones con datos de precipitación observada como satelital.

Para ejemplificar lo anterior, en las Figuras N° 6.2 y 6.3, se ilustran los hidrogramas resultantes de la Tormenta N° 4 y Tormenta N° 7, respectivamente. En dichas figuras se señala con línea continua el hidrograma observado (color negro), el simulado por datos de precipitación observada (color verde) y el simulado por datos de precipitación satelital con el método SCS (color rojo). Por su parte, las líneas segmentadas indican el hidrograma simulado por datos de precipitación observada (color verde) y simulado por datos de precipitación satelital con el método SMA (color rojo).

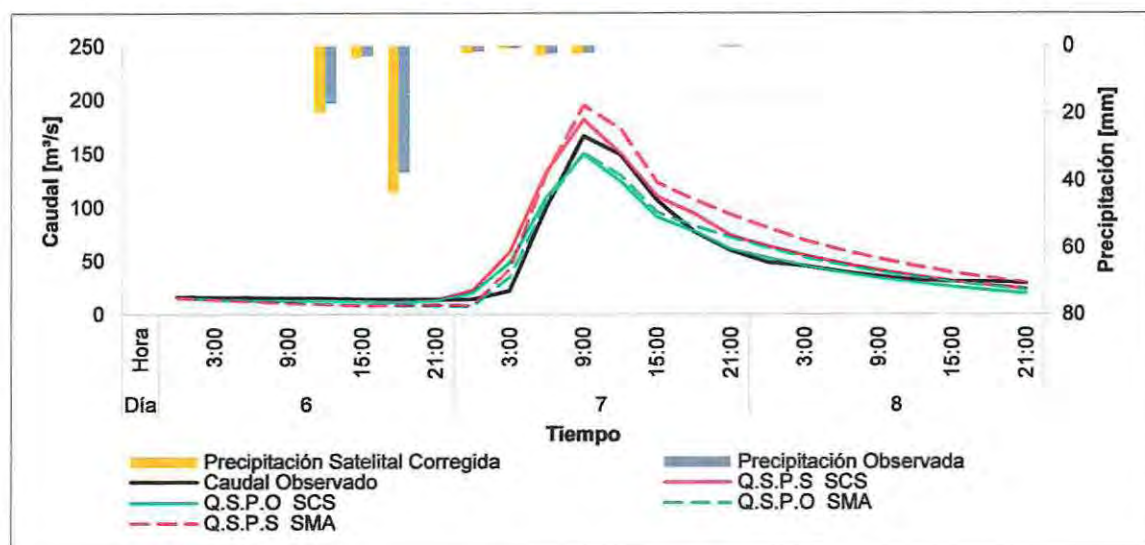


Figura 6.2 - Tormenta de validación N° 4

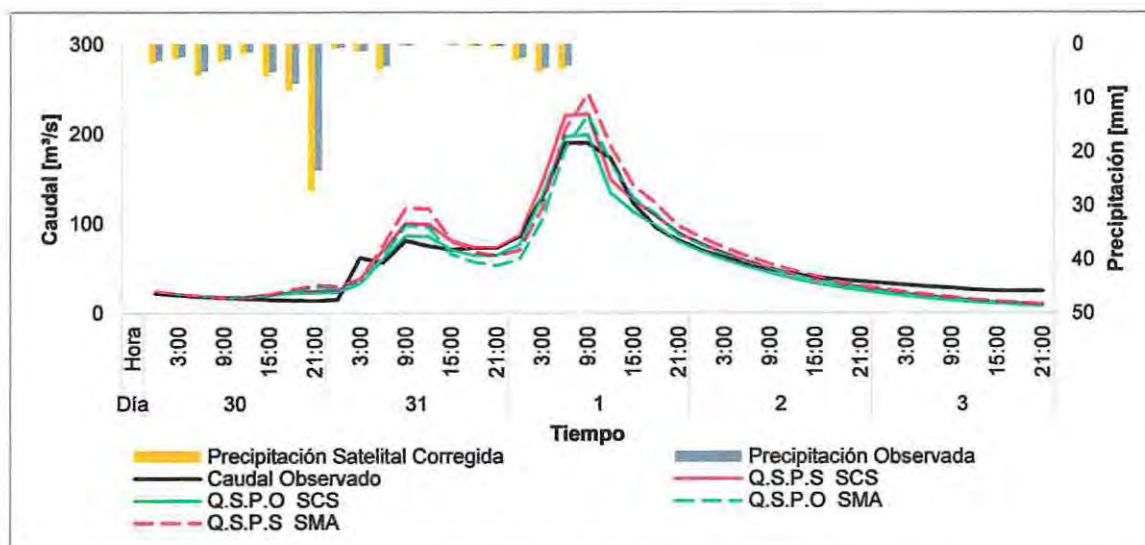


Figura 6.3 - Tormenta de validación N° 7.

De las figuras anteriores, se observa que los caudales punta de los hidrogramas simulados con ambos métodos de infiltración, tanto para registros observados como satelitales, se producen en el mismo instante de tiempo que con respecto al hidrograma observado. No obstante, estos varían en magnitud con respecto al original, lo que provoca un aumento o disminución de los *peaks*. Esta situación es concurrente para la totalidad de los eventos analizados, los cuales se indican en Anexo G.

En la Tabla 6.12, se resumen las diferencias medias porcentuales de los caudales punta obtenidos para los métodos de infiltración SCS y SMA.

Tabla 6.12 - Resumen diferencias medias porcentuales de los caudales punta entre métodos de infiltración.

Caudal	Diferencia media porcentual [%]		Diferencia entre modelos SCS y SMA
	SCS	SMA	
Observado – Q.S.P.O	8,59	10,74	2,15
Observado – Q.S.P.S	9,89	15,99	6,10

De las comparaciones que se indican en la tabla anterior, se observa que al utilizar los registros de precipitación observada se obtienen menores diferencias entre ambos métodos de infiltración. Sin embargo, esta diferencia no se aleja en gran medida al utilizar datos satelitales, ya que solo se eleva alrededor de un 4,00 %.

En cuanto a las curvas de agotamiento de los hidrogramas entre ambos métodos de infiltración, en la Tabla 6.13 se resumen las diferencias medias porcentuales determinadas a partir de los promedios de los caudales correspondientes a los últimos días de cada evento, los cuales representan la última parte de la curva de agotamiento.

Tabla 6.13 - Resumen diferencias medias porcentuales de los caudales de agotamiento entre métodos de infiltración.

Caudal	Diferencia media porcentual [%]		Diferencia entre modelos SCS y SMA
	SCS	SMA	
Observado – Q.S.P.O	34,73	33,27	1,46
Observado – Q.S.P.S	33,10	33,68	0,58
Q.S.P.O – Q.S.P.S	8,81	9,96	1,15

A partir de los resultados de los caudales de agotamiento de los hidrogramas que se exponen en la tabla anterior, se observa una menor diferencia entre modelos al utilizar registros satelitales de precipitación, obteniéndose una diferencia del 0,58%. No obstante, al considerar las simulaciones con datos observados esta última cifra solo se incrementa en un 0,88%. Tal como era de esperar, puesto que en general, tanto en forma gráfica como en el análisis de indicadores, no se aprecian grandes diferencias entre las simulaciones de ambos modelos.

En referencia a los análisis precedentes, se denota que tanto el método SCS como el SMA presentan un buen desempeño en la simulación de la crecida de la cuenca al incorporarle un modelo meteorológico basado en hietogramas de precipitaciones observadas que se registran en las estaciones cercanas a la zona de estudio, demostrando en ambos casos, buenas correlaciones, eficiencias y estimaciones de caudales punta para las tormentas simuladas. Sin embargo, al evaluar estos métodos incorporándoles un nuevo modelo meteorológico proveniente de un registro satelital de medición de precipitaciones, se aprecia en general una disminución paulatina de las eficiencias y estimaciones de caudales punta de los eventos simulados, incrementándose levemente las diferencias, tanto de manera numérica como gráfica, de los hidrogramas con respecto a la simulación con registros observados.

Capítulo 7

7. Conclusiones

La fase de calibración de los registros de precipitación provenientes de estaciones meteorológicas con los proporcionados por la información satelital para la zona, permitió estimar el uso de datos de percepción remotos mediante métodos estadísticos que incorporaron, en conjunto, la herramienta de los polígonos de Thiessen con la altura de cada pixel como variable física del área, lo que derivó en la determinación de un valor característico de precipitación media diaria por pixel, a partir de los cuales se obtuvieron resultados aceptables para el proceso de calibración y se logró con ello un buen ajuste de correlación con magnitud igual a 0,76.

Tal como se esperaba, en la etapa de validación del uso de los registros satelitales de precipitación se obtuvieron resultados satisfactorios con un ajuste de correlación igual a 0,86, lo que permitió corroborar que la expresión determinada en la calibración es consistente al comparar los valores de precipitación media por pixel con aquellos obtenidos en base a información observada. Si bien la magnitud de las precipitaciones obtenidas con datos satelitales no coinciden plenamente con las observadas, estos resultados no difieren en gran medida con los registros reales, obteniéndose una pequeña tendencia del modelo a la sobreestimación de los valores reales para eventos de precipitación menores (bajo los 40 [mm]) y una tendencia a la subestimación al presentarse eventos de precipitación mayores (sobre los 70 [mm]). Por lo tanto, se infiere que es factible el uso de la información proveniente del satélite TRMM 3B42_V7 para la estimación de precipitaciones y su empleo para realizar los modelos hidrológicos en la cuenca del río Diguillín en San Lorenzo.

Los modelos hidrológicos implementados en la cuenca, correspondientes a los métodos de infiltración del suelo por el SCS y SMA, arrojaron resultados satisfactorios para la totalidad de los indicadores analizados al contrastar la respuesta de la crecida, tanto con la incorporación del hietograma de precipitaciones observadas como satelitales. En general, en ambos métodos se pudo constatar que las simulaciones con datos de precipitación observada representaron de mejor manera el comportamiento de la cuenca. Sin embargo, su diferencia con los resultados satelitales no fue muy marcada, apreciándose bajas diferencias medias porcentuales para los indicadores de Nash, y PBIAS con una tendencia hacia la subestimación de los registros medidos utilizando datos de precipitación observada y una inclinación hacia la sobreestimación de ellos con fuentes satelitales.

Lo anterior, tuvo estrecha relación con la forma en que se determinó la precipitación satelital, ya que en general se presentaron registros de lluvia satelital superiores a los observados, que en consecuencia, determinaron el mayor número de eventos con sobreestimaciones al utilizar las fuentes remotas. Adicionalmente, se aprecia que en ambos modelos la tendencia fue a sobreestimar con simulaciones de precipitación menor y a subestimar con eventos mayores, lo cual se condice con los resultados obtenidos del modelo de uso de precipitación satelital en la zona (Capítulo 3).

Al contrastar ambos métodos utilizando datos de precipitación observada, se obtuvo que los indicadores de Nash presentan mejores ajustes en el modelo SCS que el SMA. Sin perjuicio de lo anterior, la modelación con SMA presentó mejores resultados para el indicador PBIAS, y los volúmenes simulados con SMA registraron menor diferencia porcentual promedio con respecto al volumen observado. Por otra parte, al utilizar datos satelitales de precipitación se pudo apreciar que tanto los indicadores de Nash como PBIAS, presentaron mejores ajustes con el modelo SCS y los volúmenes simulados con SCS presentaron una menor diferencia porcentual promedio con respecto al volumen observado.

Los caudales punta de los hidrogramas simulados entre ambos modelos se produjeron en el mismo instante de tiempo. En términos numéricos, tanto el método SCS como SMA presentan menor diferencia porcentual promedio con los datos de precipitación observada que con los datos satelitales. Sin embargo, dichas diferencias son mayores en el SMA. En general, se aprecia que los picos de los hidrogramas simulados presentan una tendencia a ser más altos respecto a los observados al utilizar el método SMA.

En cuanto al agotamiento de los hidrogramas, se presentaron diferencias entre los simulados y los observados, lo cual fue concurrente a lo largo de la modelación de todos los eventos, tanto con el método SCS como SMA, pero con una mayor diferencia en el SMA. En términos de magnitud, el método SCS presenta una diferencia porcentual promedio al simular con datos de precipitación observada mayor en 1,63% con respecto a los satelitales. Caso contrario ocurrió en el modelo SMA, ya que la diferencia porcentual promedio al analizar los caudales observados con los simulados por precipitación satelital fue mayor en un 0,41% con respecto a los simulados con precipitación observada.

Conforme a lo anterior, es posible afirmar que ambos métodos de infiltración presentan resultados aceptables, tanto para simulaciones con registros observados como satelitales. Con ello, se demuestra que si es posible la utilización de imágenes satelitales como fuente de información para la confección de registros de precipitación en estudios de crecidas en la cuenca, y se infiere que el desempeño de esta tecnología es efectivo como alternativa a las fuentes pluviométricas tradicionales. Sin embargo, no debe perderse de vista, que la diferencia entre un tipo de fuente pluviométrica y otra, trae asociado un cierto margen de incertidumbre, uno propio de los datos observados de las estaciones y al relacionado con el uso de fuentes remotas. Si bien no existe una diferencia sustantiva entre los hidrogramas simulados con ambas fuentes, se debe tomar en consideración que pueden existir variaciones entre un registro y otro acorde a la magnitud del evento que se simula. Además, debe tenerse en cuenta que de acuerdo a los resultados obtenidos en la presente modelación, las simulaciones por el método SMA con imágenes satelitales en general presentan una mayor disparidad, destacándose las sobrestimaciones logradas en las puntas de los hidrogramas.

En términos generales, las simulaciones de la crecida de la cuenca del Río Diguillín en San Lorenzo no presentaron grandes diferencias entre los métodos de infiltración SCS y SMA, a excepción de las estimaciones de los caudales punta con el método SMA utilizando registros de lluvia satelital. Si bien es cierto que los resultados son similares, ambos métodos son muy distintos de abordar. El uso del método SMA implica un mayor esfuerzo por parte del usuario para poder estimar la gran cantidad de parámetros y variables involucradas en su formulación, en comparación con el SCS, en que sólo se requiere de la estimación de la curva número.

Se debe tomar en cuenta que al utilizar el método SMA, se esta agregando una nueva fuente de incertidumbre al modelo, al tener que determinar una gran cantidad de parámetros referidos a la caracterización de las capas de suelo subsuperficiales y subterráneas, de los cuales no se contaba con información debido a la ubicación de la cuenca en una zona precordillerana, lejana de grandes centros poblados y muy poco intervenida por el hombre, lo que imposibilitó obtener información específica sobre profundidades de acuíferos, mediciones del suelo, entre otros, que permitieran establecer con mayor certeza la magnitud de cada variable. En cambio, la aplicación del método SCS se pudo llevar a cabo sin mayores contratiempos, ya que en el país se encuentra disponible un mapa de uso de suelos caracterizado, a partir del cual es posible establecer un rango específico de curva número acotado a un grupo hidrológico de suelo en particular.

Por lo tanto, es importante señalar que si bien los resultados entre ambos métodos no difieren en gran medida, la mayor disparidad entre ellos se relaciona con la inversión de tiempo que le demanda al usuario el evaluar un modelo u otro. En el caso del presente estudio, la escasa información disponible para evaluar el método SMA, trajo consigo que la mayoría de los parámetros se tuviese que estimar en base a estudios cercanos o en cuencas similares, obteniendo grandes rangos de magnitud para cada uno de ellos, lo cual aumentó el riesgo de cometer algún error y elevó el grado de incertidumbre en la modelación, mientras que en el caso de la curva número, la zona contaba con la información necesaria y su evaluación no tuvo mayor complejidad.

Finalmente, el empleo de imágenes satelitales como fuente de información pluviométrica en la cuenca es efectivo y pueden ser utilizadas para describir fenómenos observados, siendo una potencial herramienta para la simulación y análisis de las crecidas y caudales punta en futuras obras de Ingeniería en el lugar.

Referencias

- [1] Dirección General de Aguas, «Nómina de estaciones hidrometeorológicas de Chile,» Departamento de Hidrología, Sección Hidrometeorología, DGA, Santiago, Chile, 2006.
- [2] Y. Morales y X. Vargas, «Estimación de la precipitación en una tormenta usando información satelital. Aplicación en la zona central de Chile,» XXV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Santiago, Chile, 2014.
- [3] N. Olivares, «Evaluación del uso de información satelital de precipitaciones en la modelación hidrológica de la cuenca del Estero Upeo, Séptima región de Chile,» Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Civil. Universidad de Valparaíso, Valparaíso, Chile, 2014.
- [4] E. A. Palomino Rojas, «Estimación de la crecida del caudal en el río Purén, a través de modelaciones hidrológicas con información satelital,» Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Civil. Universidad de Valparaíso, Valparaíso, Chile, 2016.
- [5] K. Fleming y J. Awange, «Evaluating the TRMM 3B43 monthly precipitation product using gridded raingauge data over Australia,» 2011. [En línea]. Available: <http://www.cage.curtin.edu.au/~will/australia-trmm>.
- [6] J. Wang y D. B. Wolff, «Evaluation of TRMM Rain Estimates Using Ground Measurements over Central Florida,» J. Appl. Meteorol. Climatol. 51(5), Florida, USA, 2012.
- [7] C. Lavado, D. Labat, J. Guyot, J. Ronchail y J. Ordoñez, «Validación de lluvia utilizando TRMM en dos cuencas amazónicas peruanas y su aplicación en modelos mensuales de balance hídrico,» RPGA (1), 2009.
- [8] National Aeronautics and Space Administration (NASA), «TRMM, Tropical Rainfall Measuring Mission,» Goddard Space Flight Center, September 2008. [En línea]. Available: http://trmm.gsfc.nasa.gov/overview_dir/background.html.
- [9] N. R. C. S. (NRCS), Hydrology. National Engineering Handbook, vol. Part 630, Washington D.C, 2002.
- [10] C. Marzal Rojo, «Impacto del Cambio Climático Sobre la Disponibilidad del Recurso Hídrico en la Cuenca del Río Elqui,» Departamento de Ingeniería en Obras Civiles, Universidad de La Serena, La Serena, Chile, 2012.
- [11] H. I. Osorio Ugarte, «Síntesis del Sistema Hidrológico del Río Chagres, República de Panamá,» Concepción, 2014.
- [12] L. Stowhas B., «Fundamentos de Hidrología aplicada,» [En línea]. Available: <http://www.ramos.utfsm.cl/doc/1393/sc/Hidrologia-UTFSM-V1.pdf>.
- [13] J. Evans, H. Perlman y USGS, «El ciclo del agua. Programa Hidrológico Internacional de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación y la Cultura (UNESCO) a través del programa Aguas y Educación para las Américas, y el Servicio Geológico de los Estados Unidos,» U.S. Geological Survey, Estados Unidos, 2016.
- [14] V. Chow, D. Maidment y L. Mays, Hidrología Aplicada, Santa Fé de Bogotá, Colombia: McGraw-Hill, 1994, p. 583.
- [15] J. Caro, «Modelación de caudales recesivos para la cuenca del río Purapel, estación Nivirilo,» Talca, Chile, 2001.
- [16] F. Andrade Vilaró, «Análisis Comparativo de tres Hidrogramas Unitarios Sintéticos en dos Cuencas de la Región del Maule,» Talca, Chile, 2009.
- [17] J. Llamas, Hidrología General. Principios y Aplicaciones, Bilbao: Editorial Universitaria del País Vasco, 1993, p. 635.

- [18] D. N. Poblete López, «Modelo Hidrológico Distribuido para la Simulación de Recursos Hídricos,» Santiago, Chile, 2008.
- [19] E. Muñoz Ortiz, «Desarrollo de un Modelo Hidrológico como Herramienta de Apoyo para la Gestión del Agua. Aplicación a la Cuenca del Río Laja, Chile,» Santander, 2010.
- [20] T. Estrela, «Modelos Matemáticos para la Evaluación de los Recursos Hídricos,» Madrid, España, 1992.
- [21] P. Krause, D. Boyle y F. Bäse, «Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment,» European Geosciences Union, 2005.
- [22] P. Molnar, «Calibration, Watershed Modelling, SS 2011,» Institute of Environmental Engineering, Chair of Hydrology and Water Resources Management, ETH Zürich, Switzerland, 2011.
- [23] D. Moriasi, J. Arnold, M. Van Liew, R. Bingner, R. Harmel y T. Veith, «Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations,» American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2007.
- [24] A. P. Stehr Gesche, «Análisis del comportamiento hidrológico y disponibilidad de agua, bajo escenarios de cambio climático, para dos sub-cuencas del río Biobío incorporando el impacto del aporte nival en la zona cordillerana,» Concepción, Chile, 2008.
- [25] U. S. G. S. (USGS), «Programa Hidrológico Internacional (PHI),» Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) a través del programa Agua y Educación para las Américas, y el Servicio Geológico de los Estados Unidos (U.S. Geological Survey), 2016. [En línea]. Available: <http://water.usgs.gov/edu/watercyclespanish.html>.
- [26] J. Mintegui y F. López, «La ordenación agrohidrológica en la planificación,» Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco, Bilbao, España, 1990.
- [27] F. López, «Restauración hidrológica forestal y control de la erosión,» Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, España, 1998.
- [28] A. Martínez de Azagra, J. Mongil y J. del Río, «Pequeña guía de uso del modelo MODIPÉ,» 2003. [En línea]. Available: <http://www.oasification.com/archivos>.
- [29] C. P. Morales Flores y R. A. Rojas Valencia, «Análisis del Manejo Operacional para Escenarios Críticos del Embalse La Paloma,» Departamento de Ingeniería en Obras Civiles, Universidad de La Serena, La Serena, Chile, 2010.
- [30] S. David y R. De Wiest, Hidrogeología, Barcelona, España: Editorial Ariel, 1971.
- [31] R. Pizarro, P. González, M. Wittersheim, J. Saavedra y C. Soto, Elementos Técnicos de Hidrología III, Talca, Chile: Editorial Universidad de Talca, 1993, p. 125.
- [32] R. S. Bustamante Ortega, «Calibración y Validación del Modelo HEC-HMS, en la Cuenca de Huechún, Región Metropolitana,» Universidad de Talca, Talca, Chile, 2008.
- [33] F. Aparicio, Fundamentos de Hidrología de Superficie, Ciudad de Mexico, Mexico: Editorial Limusa, 1997, p. 303.
- [34] A. Benítez y Z. Rodríguez, «Método para la determinación de hidrogramas unitarios sintéticos en Chile,» p. 84, 1974.
- [35] R. Pizarro y P. Novoa, «Elementos Técnicos de Hidrología: Instructivos Técnicos,» Corporación Nacional Forestal, Ministerio de Agricultura, La Serena, Chile, 1986.
- [36] E. Arteaga y A. Benítez, «Método para la determinación de hidrogramas unitarios sintéticos en Chile,» Tesis, Universidad de Chile, Santiago, Chile, 1985.
- [37] U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Modeling System HEC-HMS Technical Reference Manual, CA, USA, 2000.
- [38] J. Solís, «Paquete interactivo para análisis hidrológico,» Escuela de Ingeniería, Universidad de las Américas, Puebla, Mexico, 2003.

- [39] R. Linsley, M. Kohler y J. Paulhus, Hidrología General principios y aplicaciones, Editorial de la Universidad del País Vasco, 1993, p. 635.
- [40] M. Olivares, «Modelación Hidrológica de la Cuenca del Río Petorca,» Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Valparaíso., Valparaíso, Chile, 2015.
- [41] U.S. Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center, [En línea]. Available: <http://www.hec.usace.army.mil/>.
- [42] H. J. Hernández Palma, «Procesamiento Digital de Imágenes,» Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación de la Naturaleza, Universidad de Chile, Santiago, Chile, 2011.
- [43] Universidad de Concepción, «Percepción Remota. Conceptos básicos,» [En línea]. Available: <http://www2.udec.cl/~clausanh/percepcionremota>.
- [44] National Aeronautics and Space Administration (NASA), «Precipitation Measurement Missions (PMM),» Goddard Space Flight Center, [En línea]. Available: <http://pmm.nasa.gov/TRMM>.
- [45] Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), «GIOVANNI, The Bridge Between Data and Science,» [En línea]. Available: http://giovanni.sci.gsfc.nasa.gov/giovanni/?instance_id=TRMM_3B42RT.
- [46] National Aeronautics and Space Administration (NASA), «Goddard Space Flight Center,» Precipitation Measurement Missions, [En línea]. Available: <https://pmm.nasa.gov/data-access/downloads/trmm>.
- [47] P. A. Figueroa Montenegro, «Variabilidad de las precipitaciones (1965-2012) en Chile centro-sur (33,9°S - 41,6°S) mediante índices estadísticos y temporales de la irregularidad,» Tesis de Pregrado, Carrera de Geografía, Universidad de Chile, Santiago, Chile, 2014.
- [48] P. Muñoz Aguayo, «Evaluación Modelo Digital de Elevación Aster GDem,» Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN), Santiago, 2009.
- [49] Aquaterra Ingenieros Limitada, «Estudio Hidrogeológico Cuencas Bío Bío e Itata,» Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas, Santiago, 2011.
- [50] Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (BCN), «Clima y Vegetación Región del Biobío,» BCN Información Territorial, [En línea]. Available: <http://siit2.bcn.cl/nuestropais/region8/clima.htm>.
- [51] Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA), «Ecosistemas Naturales de Chile,» de *Capítulo IV - Principales Ecosistemas Naturales de la VIII Región*, Santiago, 2001, p. 3.
- [52] Dirección General de Aguas, «Diagnostico y Clasificación de los Cursos y Cuerpos de Agua Según Objetivos de Calidad - Cuenca del Río Itata,» Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas, Santiago, 2004.
- [53] R. Zúñiga , E. Muñoz y J. L. Arumí, «Estudio de los Procesos Hidrológicos de la Cuenca del Río Diguillín,» Obras y Proyectos 11, Santiago, 2012.
- [54] E. Figueroa, R. Gómez, F. Sánchez y J. L. Ulloa, «Plan de Manejo Cuenca Río Diguillín,» Departamento de Geografía, Universidad de Concepción, Concepción, 2014.
- [55] C. M. Morales Calderón, «Determinación del comportamiento del flujo base y su relación con variables de estado hidrológicas en la cuenca del río Diguillín, Región del Biobío, Chile,» Facultad de Ingeniería Agrícola - Programa de Magíster en Ingeniería Agrícola mención en Recursos Hídricos, Chillán, 2014.
- [56] Dirección General de Aguas, «Regionalización de parámetros en el cálculo de escorrentía en cuencas pluviales,» División de Estudios y Planificación - Dirección General de Aguas, Santiago, 2011.
- [57] Ministerio del Medio Ambiente de Chile (MMA), [En línea]. Available: <http://www.mma.gob.cl/>.

- [58] J. L. Arumí, D. A. Rivera y M. Billib, «Comparación de la hidrología de las cuencas del Renegado y del Alto Diguillín en el complejo volcánico Nevados del Chillán,» *Publicación de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica - XX Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica*, pp. 1-12, 2011.
- [59] Dirección General de Aguas, «Aplicación de modelación superficial en cuencas pluviales de las Regiones del Maule, Biobío y La Araucanía,» División de Estudios y Planificación, Santiago, Septiembre 2010.
- [60] Publicaciones del Departamento de Suelos y Recursos Naturales, Universidad de Concepción, *Descripciones de los principales suelos de la VIII Región de Chile*, Chillán, 2006.
- [61] R. P. Martínez Tapia, «Mapa de reconocimiento de suelos de la VIII Región del Biobío,» Escuela de Agronomía, Universidad de Chile, Santiago, 2004.
- [62] Universidad de Cantabria, «Estudio de Recursos Hídricos,» Plan de investigación integral para la caracterización y diagnóstico ambiental de los sistemas acuáticos de Cantabria, Anexo 2 "Descripción y Características del programa HEC-HMS, Santander, España, 2004.
- [63] J. Jiménez Salas y J. de Justo Alpañes, *Geotecnia y Cimientos, I: Propiedades de los Suelos y las Rocas*, Madrid: Editorial Rueda, 1971.
- [64] V. Gaete, «Manual de Diseño de Sistemas de Riego Tecnificado,» Universidad de Talca, Chile, 2001.
- [65] W. Rawls, D. Brakensiek y K. Saxton, «Estimation of Soil Water Properties,» *Transactions of the ASAE (Vol. 25, No. 5)*, St. Joseph, Michigan, USA, 1982.
- [66] Dirección General de Aguas, «Modelación hidrológica de cuencas pluviales, Hoya hidrográfica del Río Maule,» División de Estudios y Planificación / Universidad de Chile, Santiago, 2005.

Anexos

Anexo A : Gráficos tormentas de calibración por método SCS

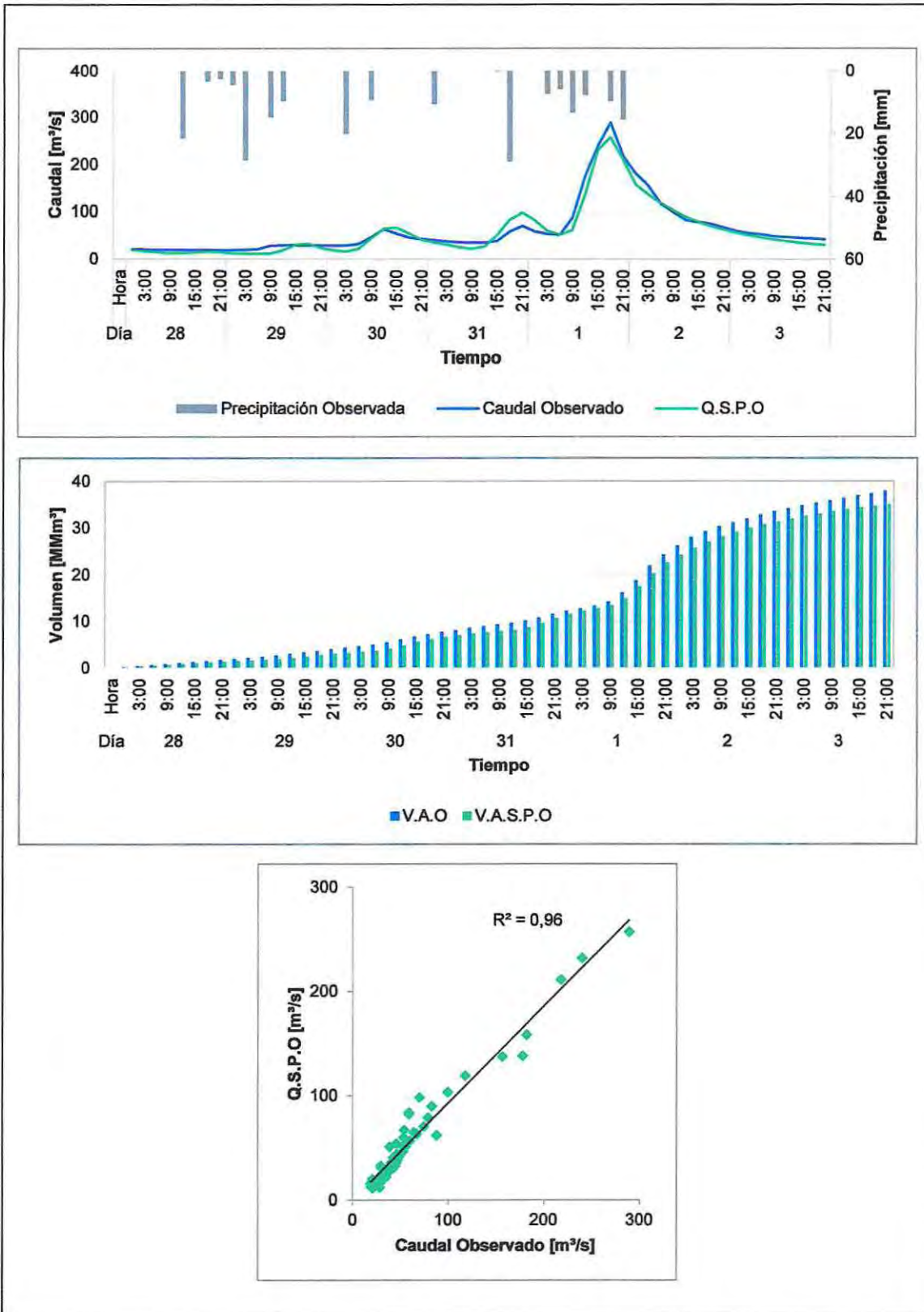


Figura A.1 - Tormenta de calibración N° 3 por método SCS.

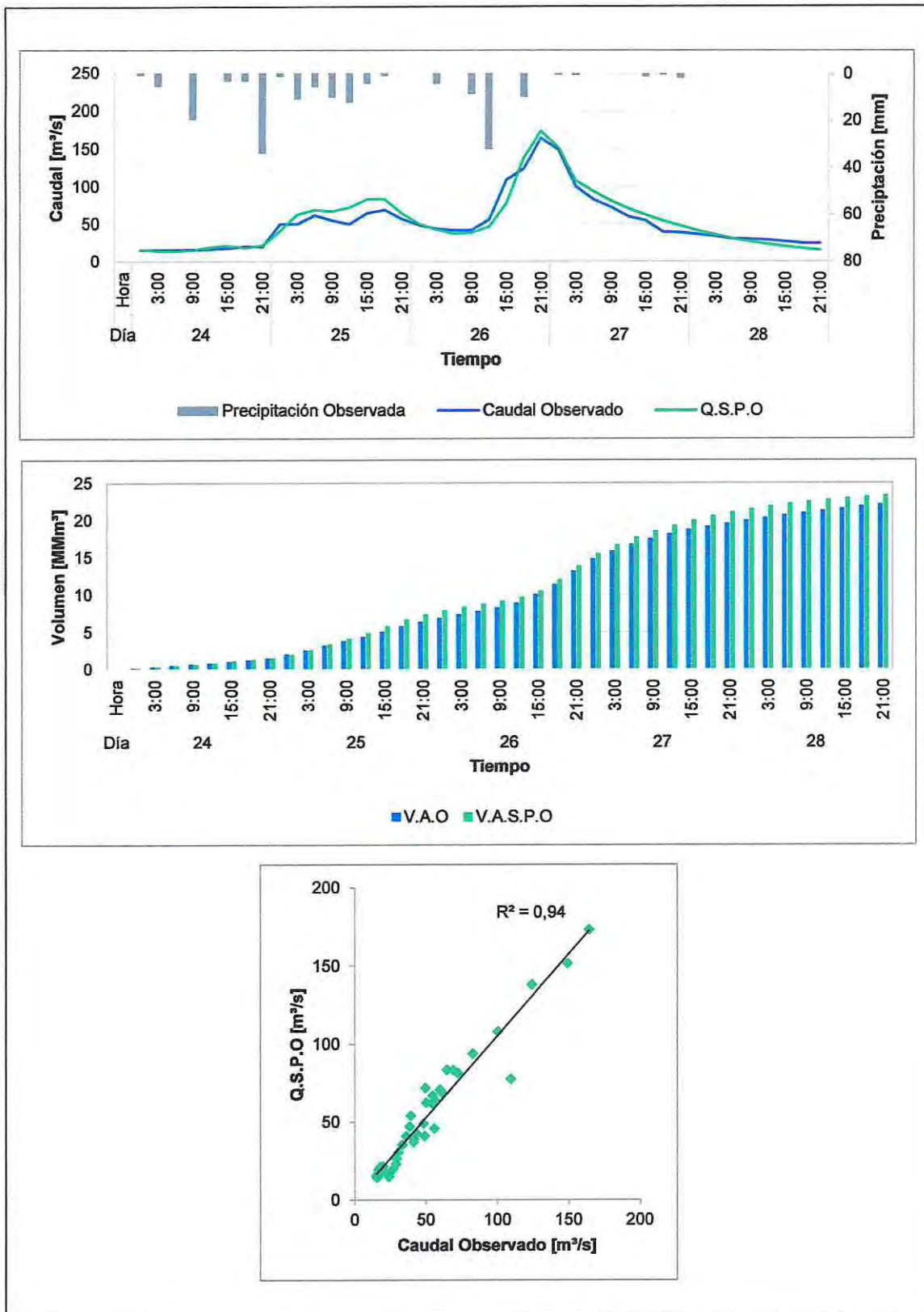


Figura A.2 - Tormenta de calibración N° 4 por método SCS.

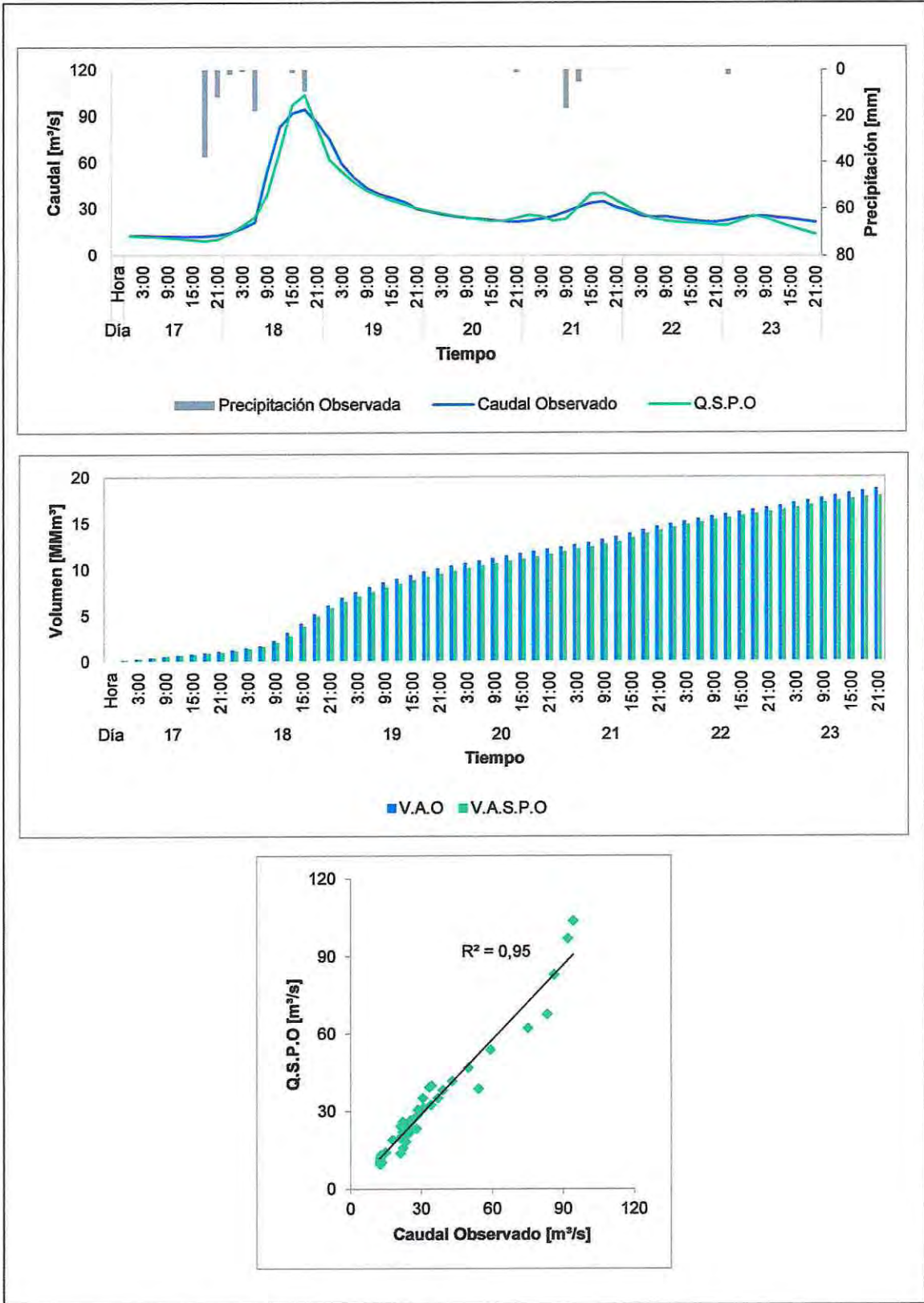


Figura A.3 - Tormenta de calibración N° 5 por método SCS.

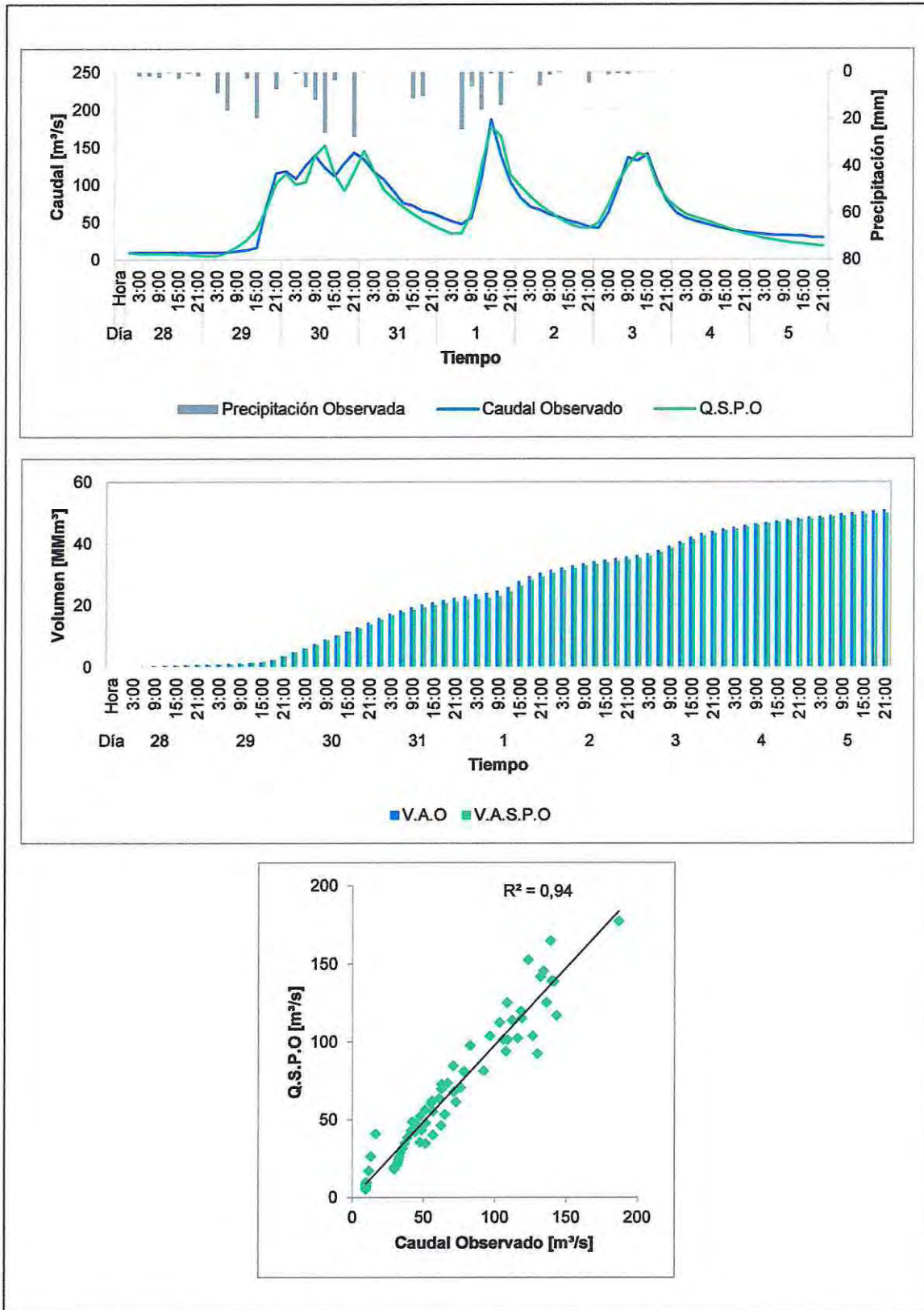


Figura A.4 - Tormenta de calibración N° 6 por método SCS.

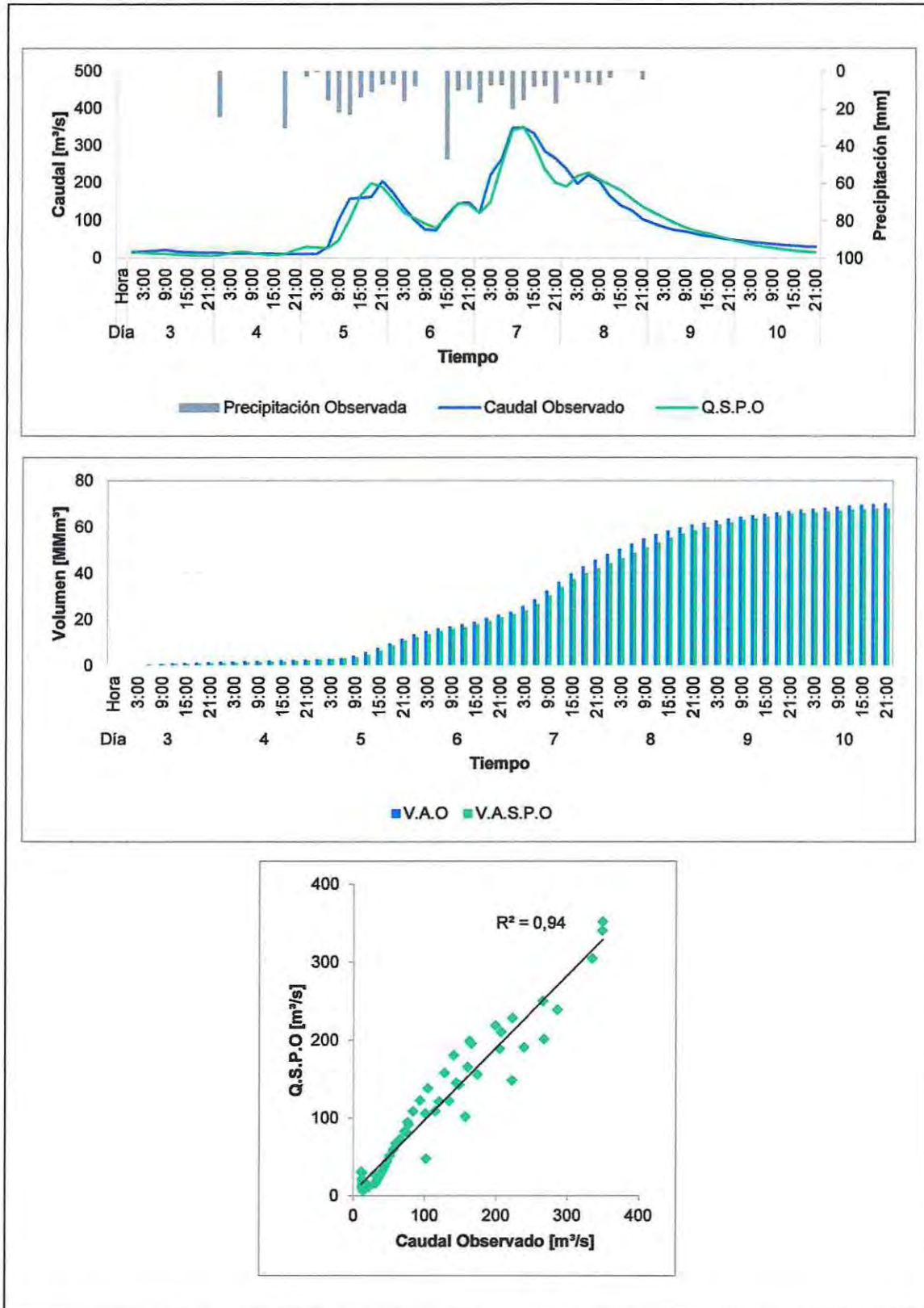


Figura A.5 - Tormenta de calibración N° 7 por método SCS.

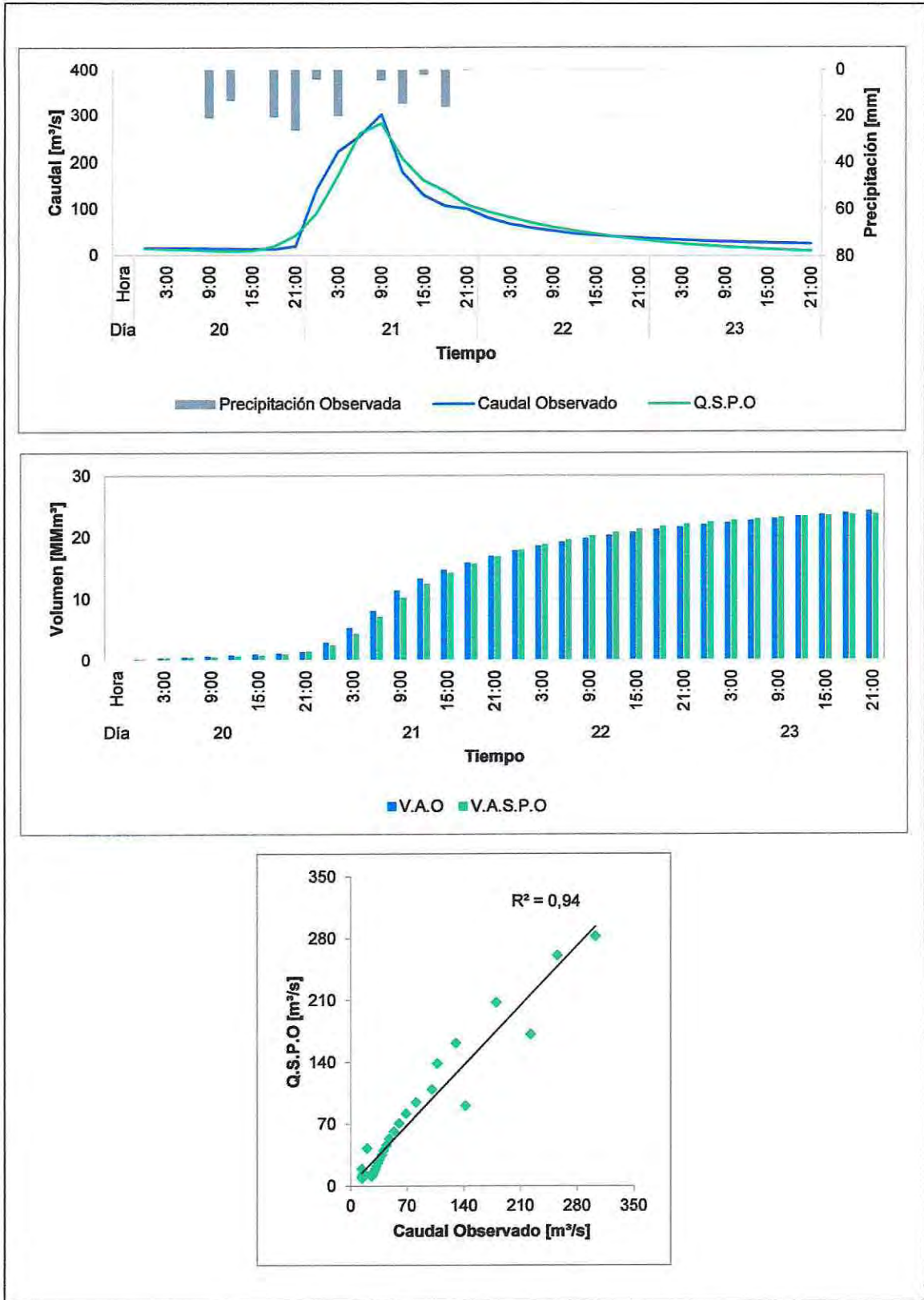


Figura A.6 - Tormenta de calibración N° 8 por método SCS.

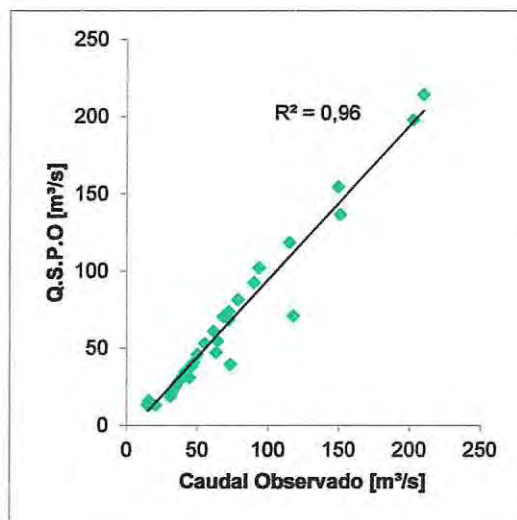
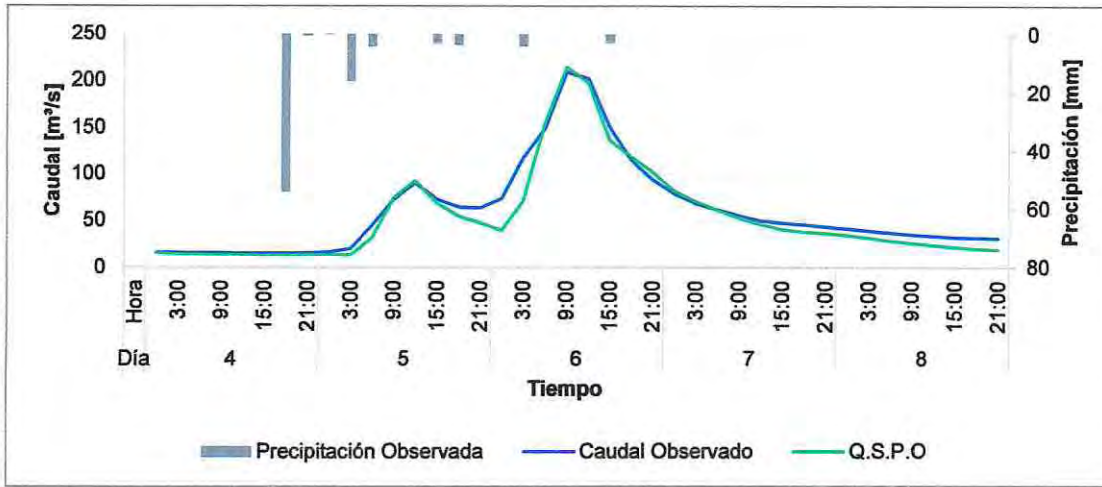


Figura A.7 - Tormenta de calibración N° 9 por método SCS.

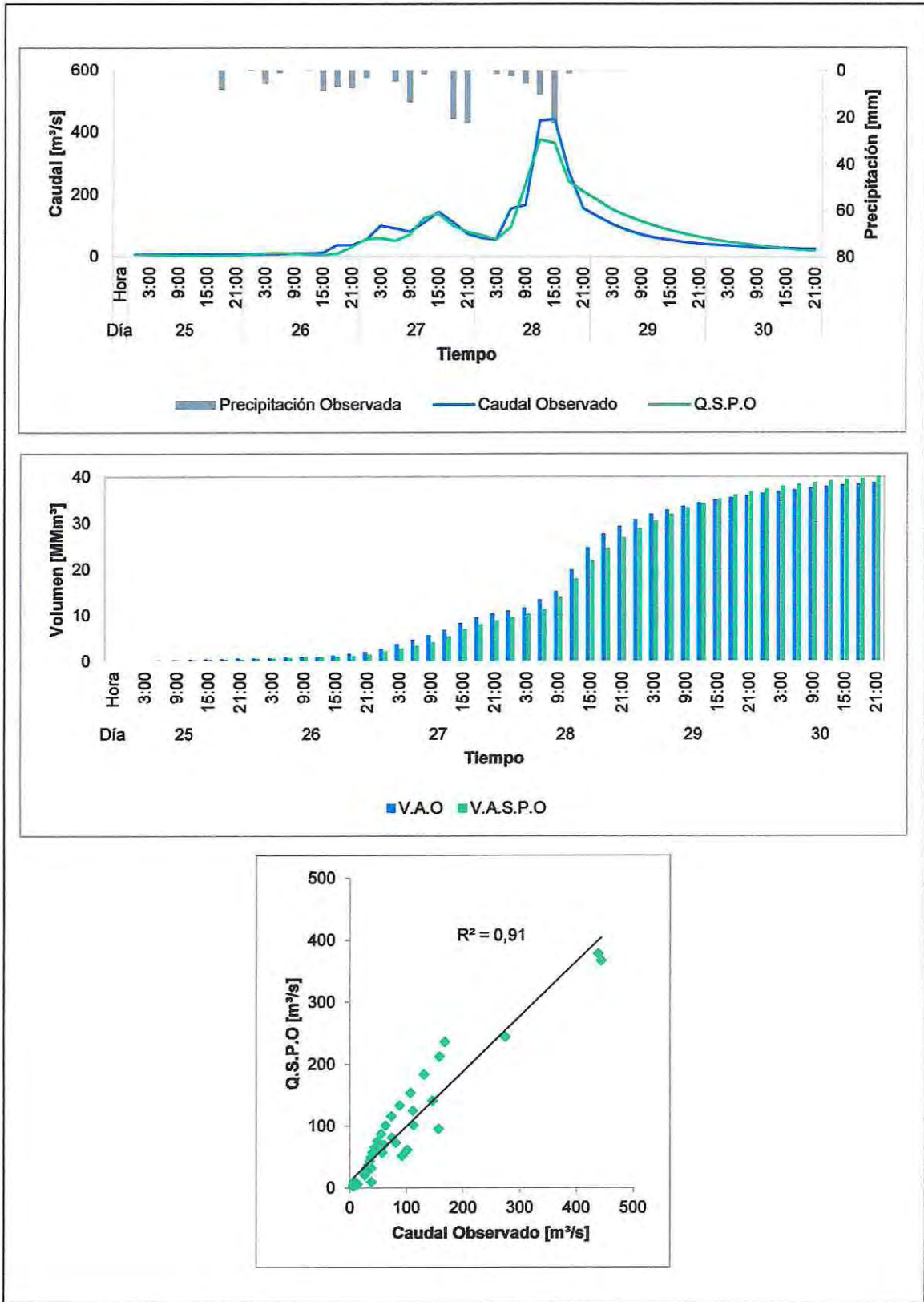


Figura A.8 - Tormenta de calibración N° 10 por método SCS.

Anexo B : Gráficos tormentas de validación con datos observados por método SCS

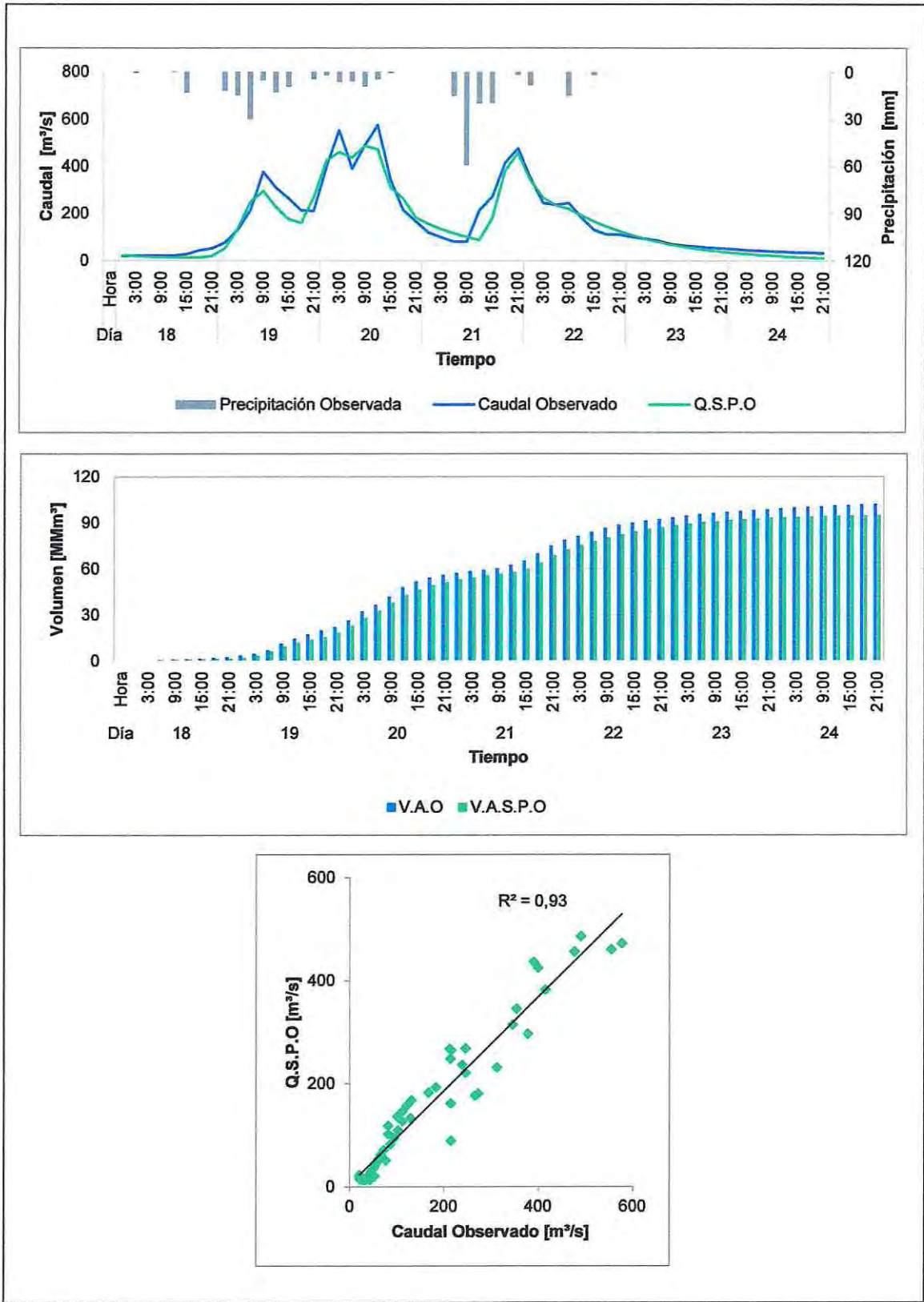


Figura B.1 - Tormenta de validación N° 3 con datos observados por método SCS.

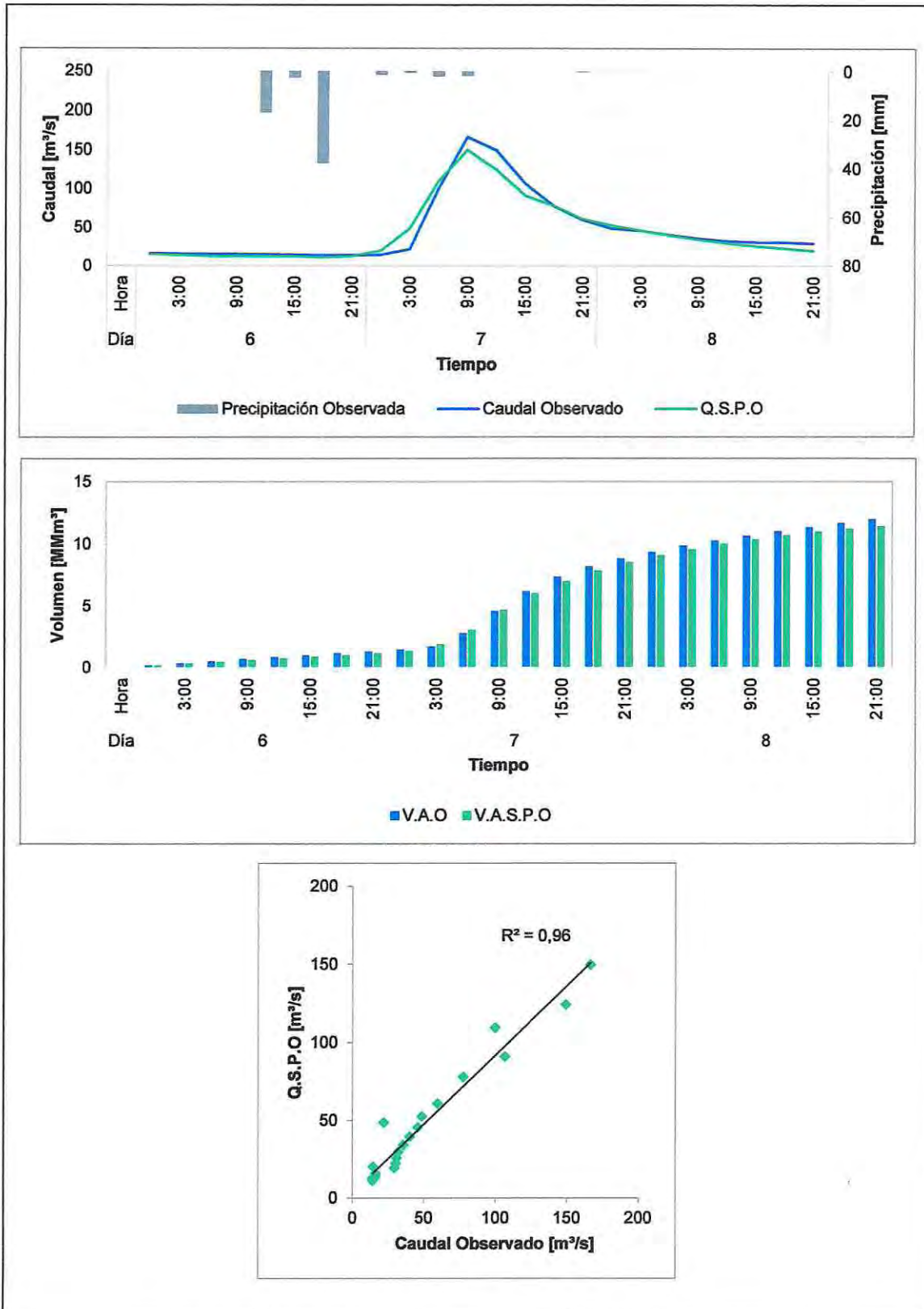


Figura B.2 - Tormenta de validación N° 4 con datos observados por método SCS.

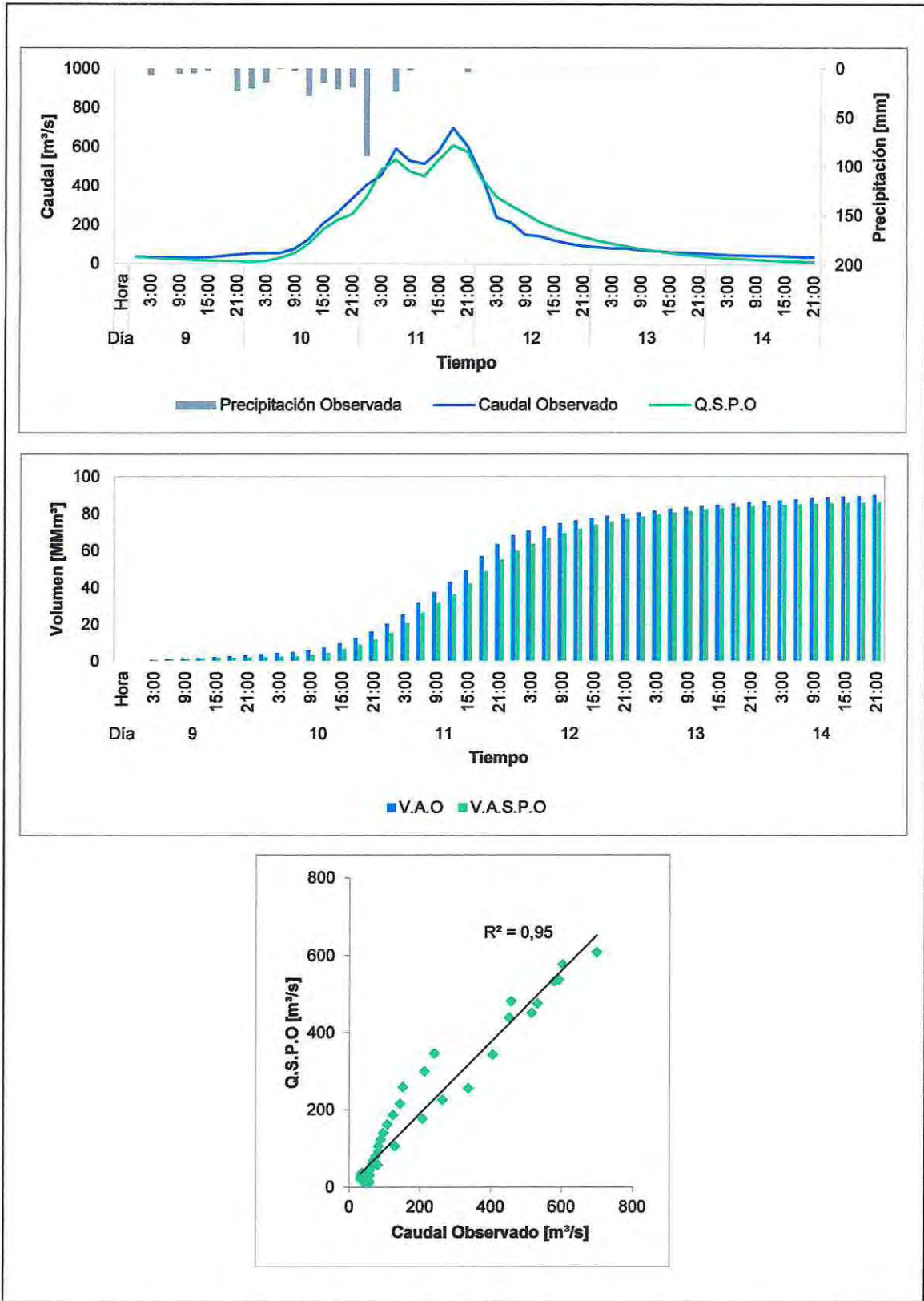


Figura B.3 - Tormenta de validación N° 5 con datos observados por método SCS.

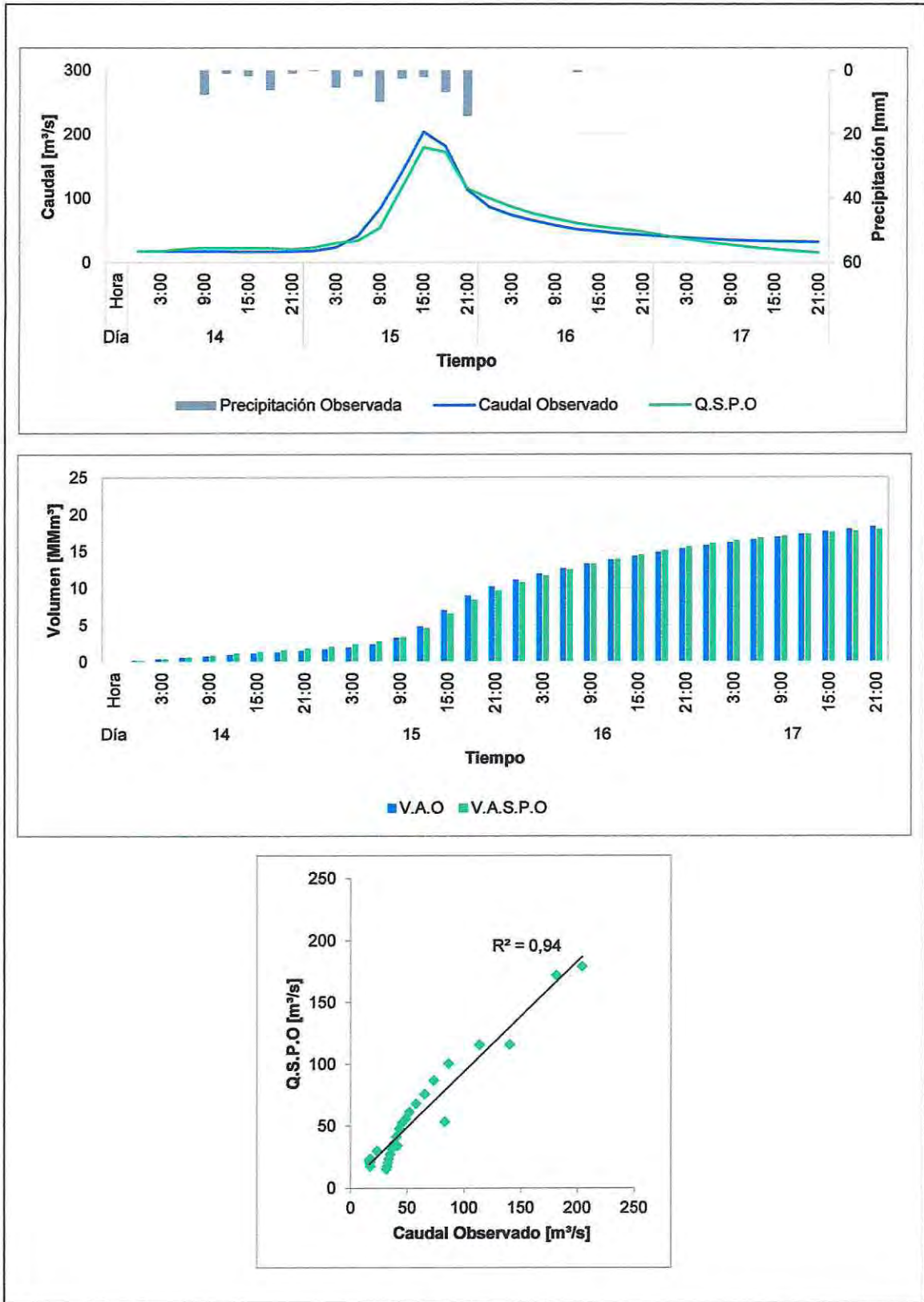


Figura B.4 - Tormenta de validación N° 6 con datos observados por método SCS.

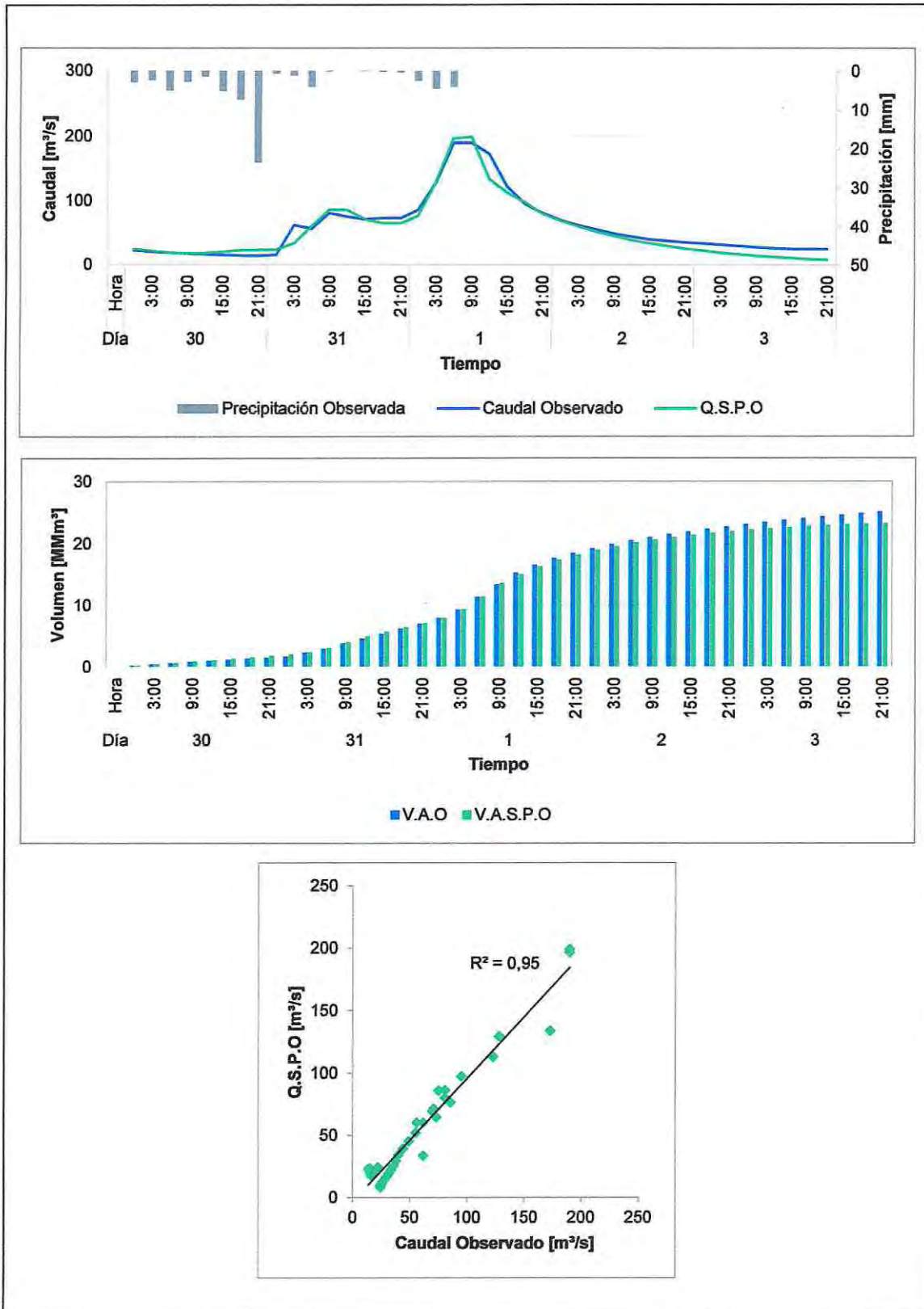


Figura B.5 - Tormenta de validación N° 7 con datos observados por método SCS.

Anexo C : Gráficos tormentas de validación con datos satelitales por método SCS

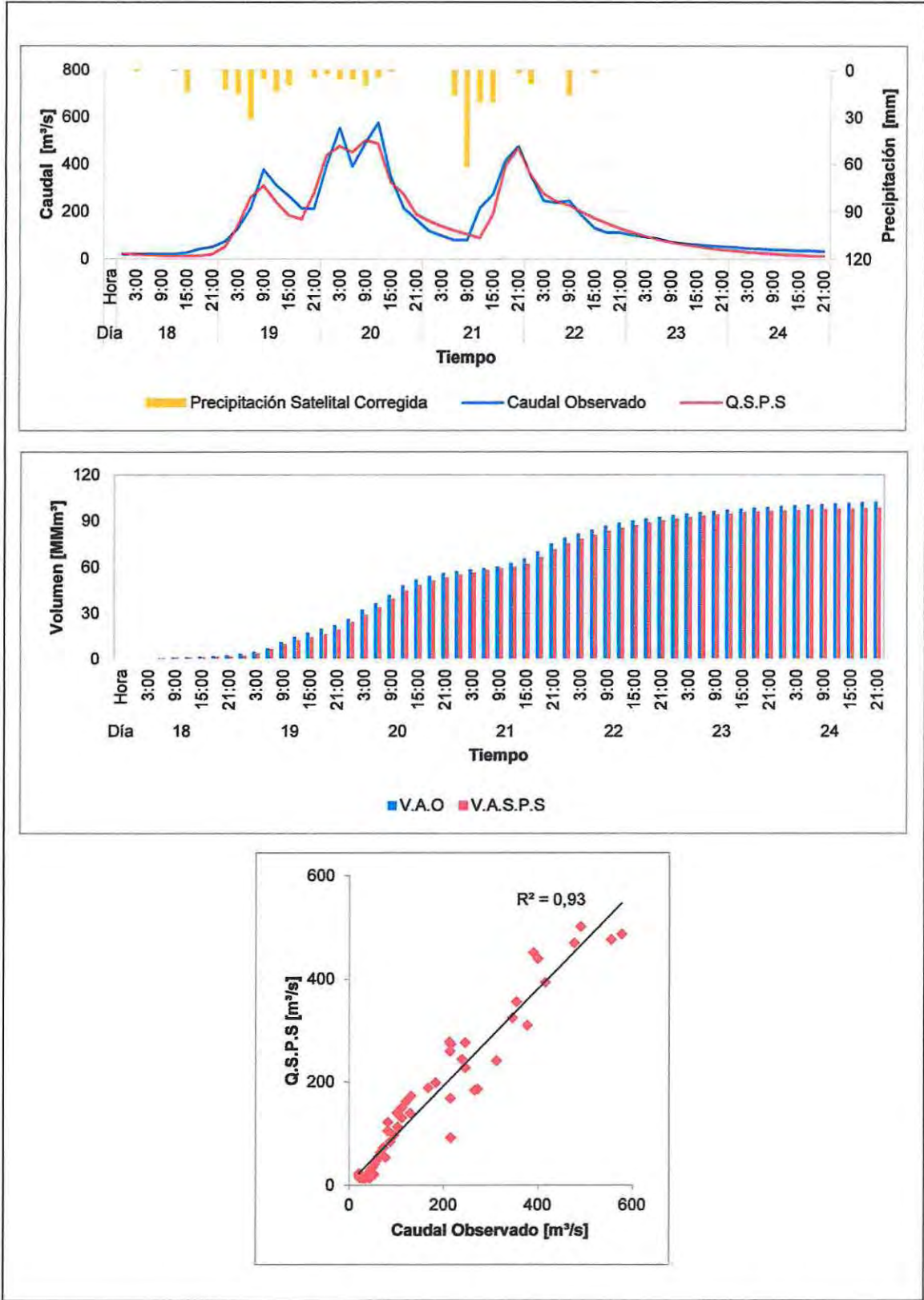


Figura C.1 - Tormenta de validación N° 3 con datos satelitales por método SCS.

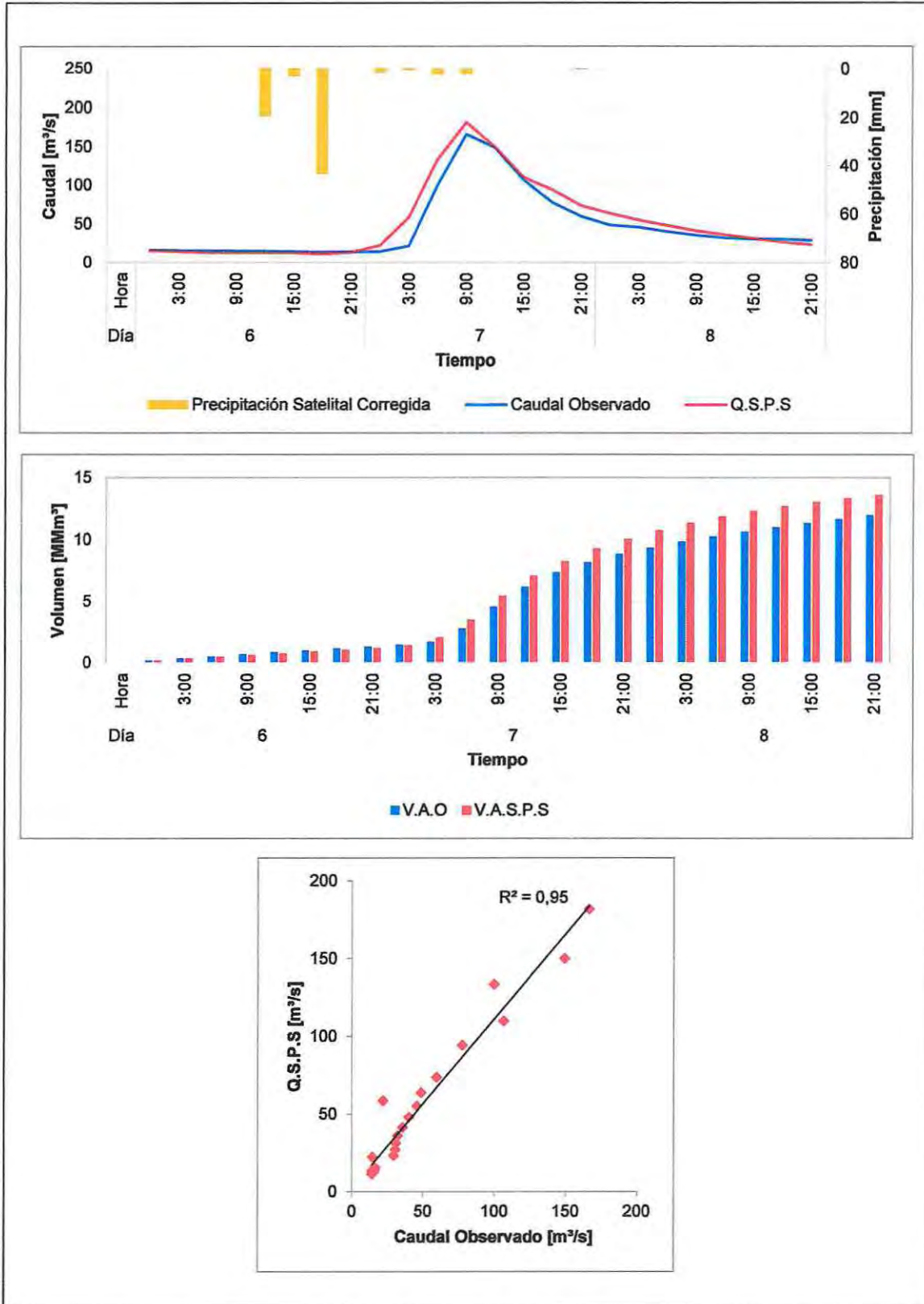


Figura C.2 - Tormenta de validación N° 4 con datos satelitales por método SCS.

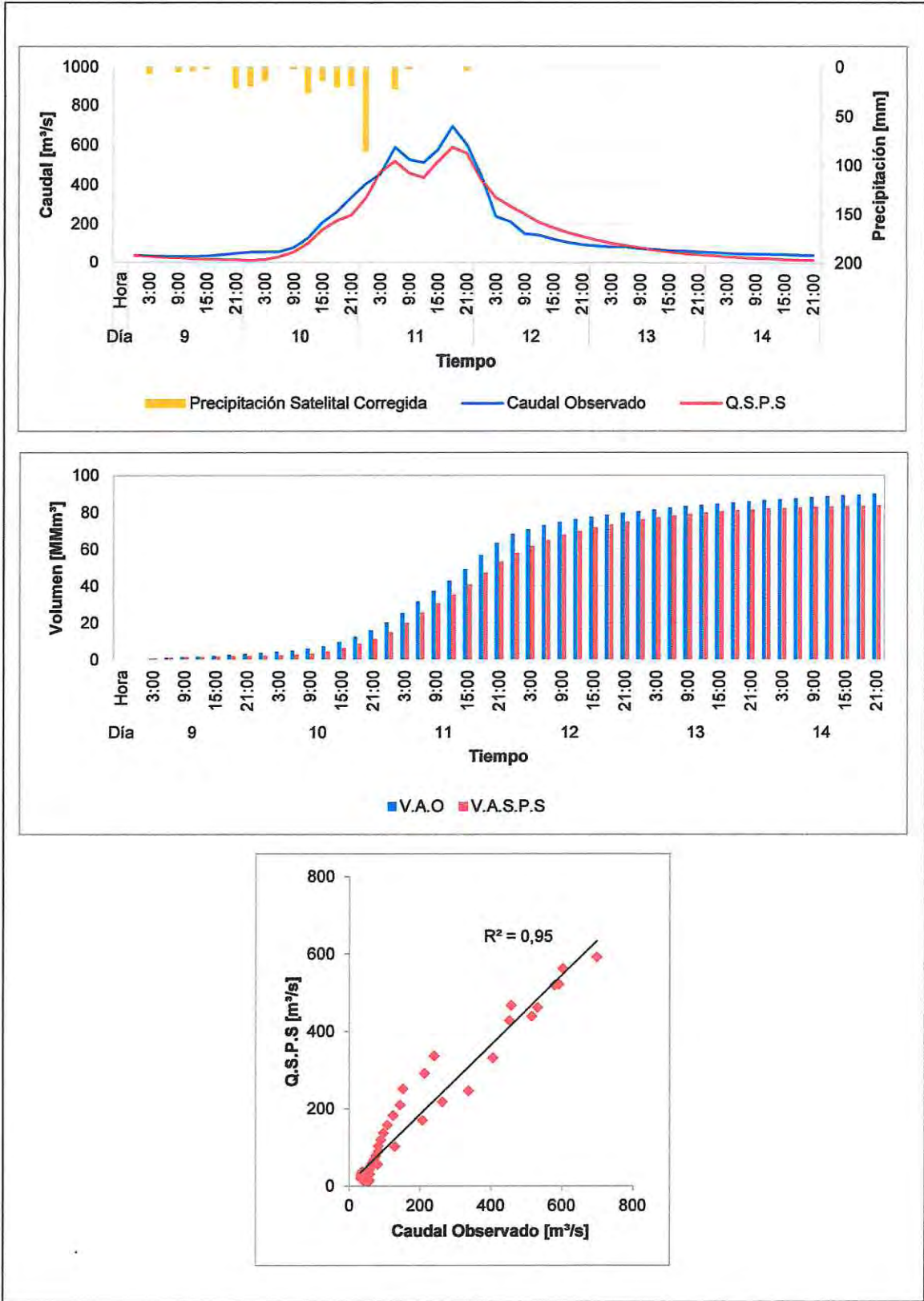


Figura C.3 - Tormenta de validación N° 5 con datos satelitales por método SCS.

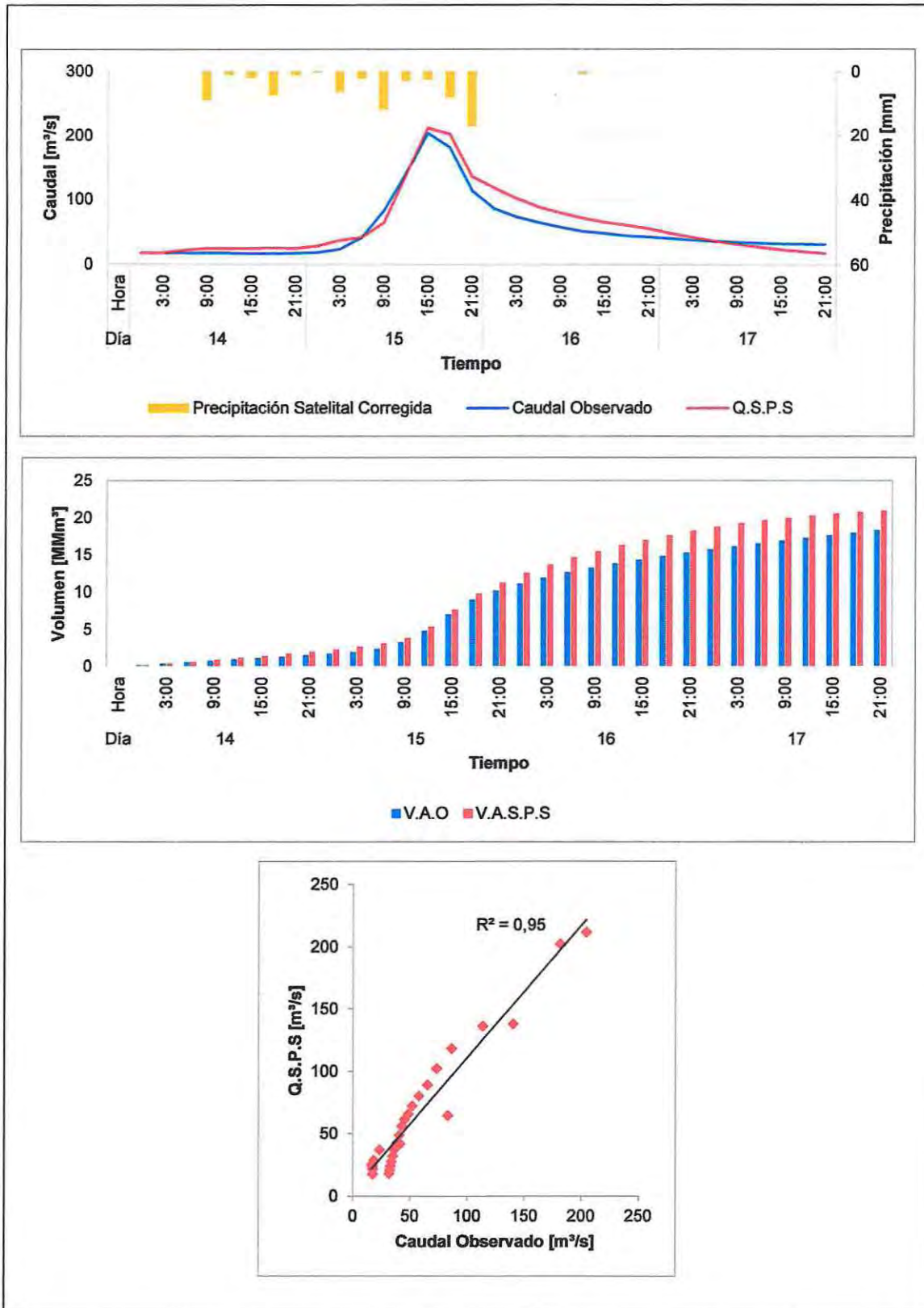


Figura C.4 - Tormenta de validación N° 6 con datos satelitales por método SCS.

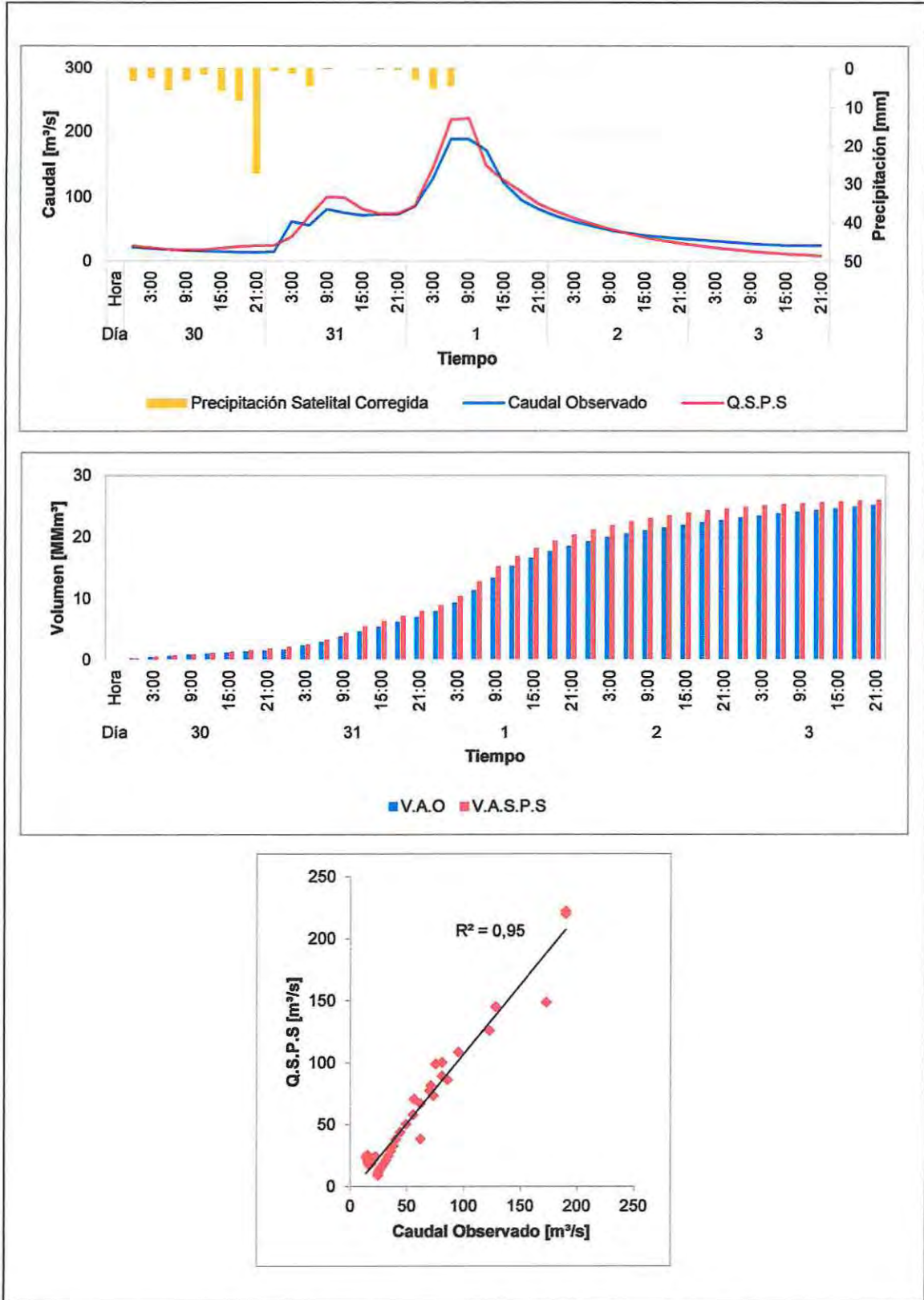


Figura C.5 - Tormenta de validación N° 7 con datos satelitales por método SCS.

Anexo D : Gráficos tormentas de calibración por método SMA

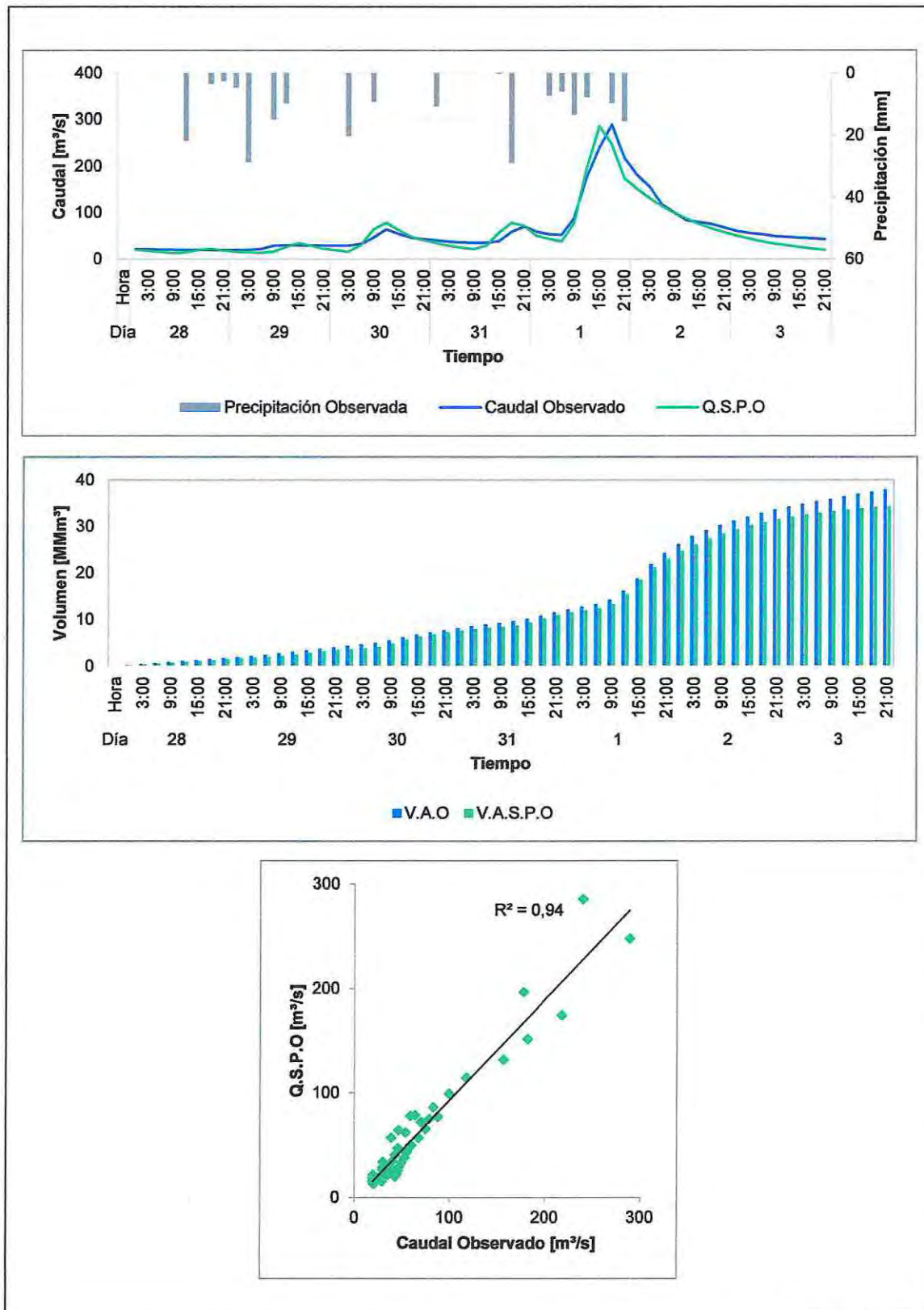


Figura D.1 - Tormenta de calibración N° 3 por método SMA.

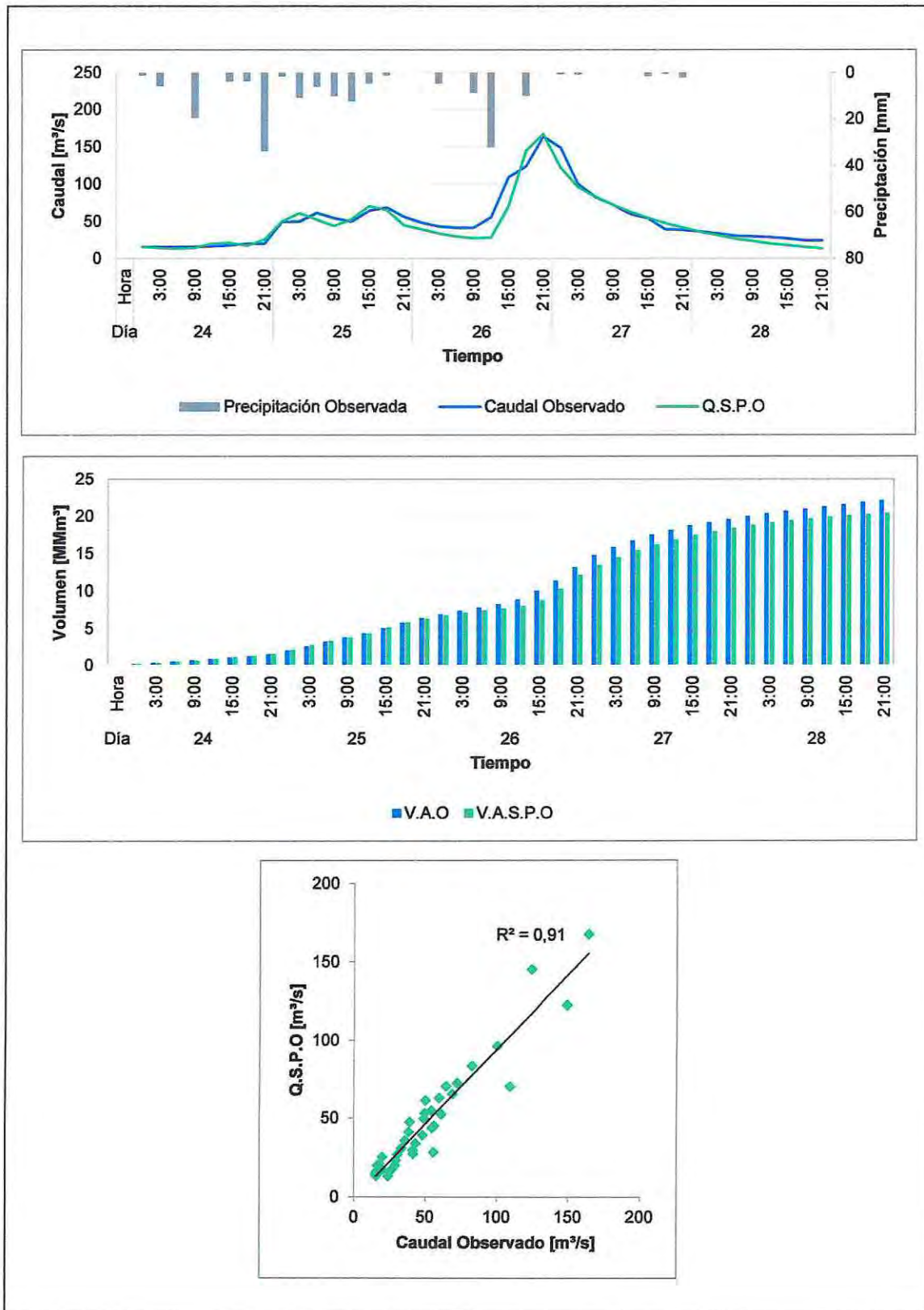


Figura D.2 - Tormenta de calibración N° 4 por método SMA.

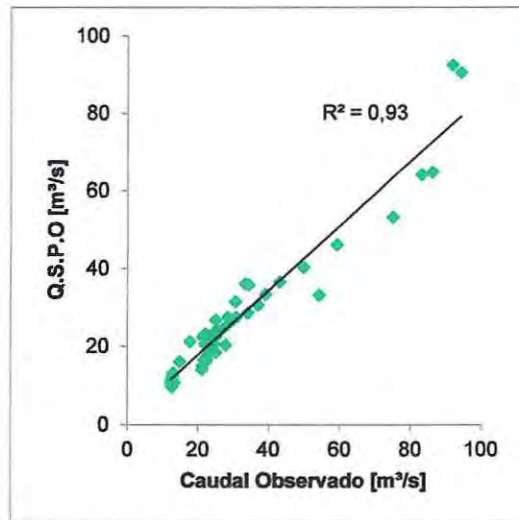
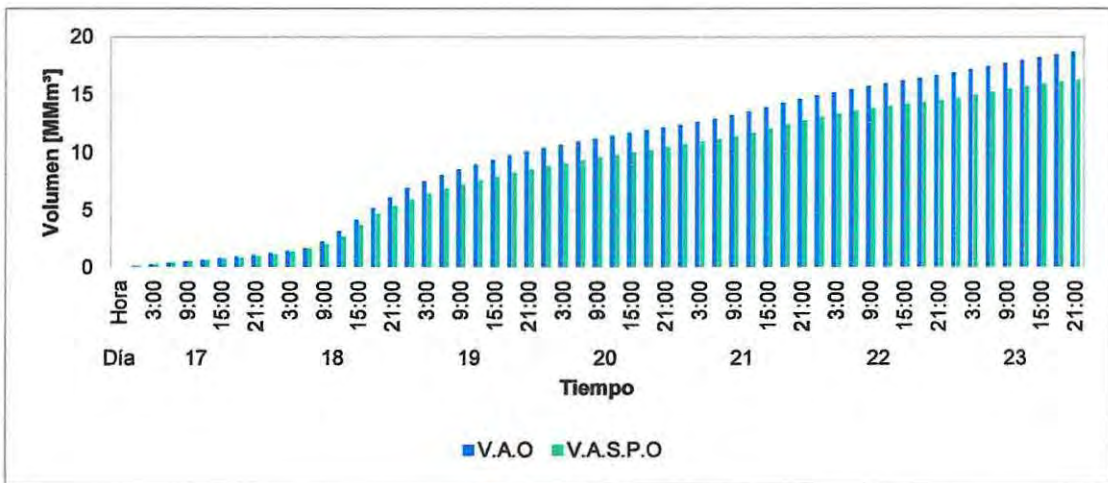
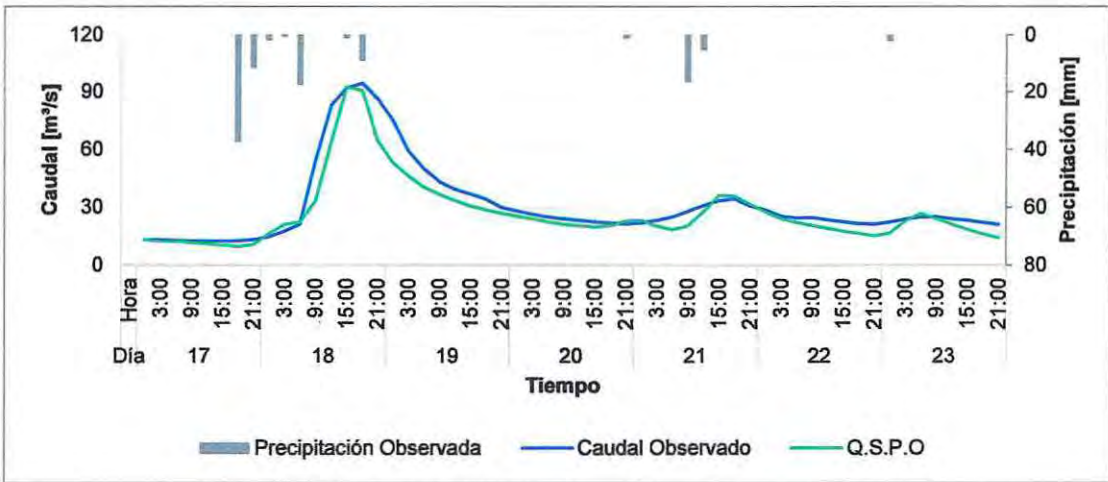


Figura D.3 - Tormenta de calibración N° 5 por método SMA.

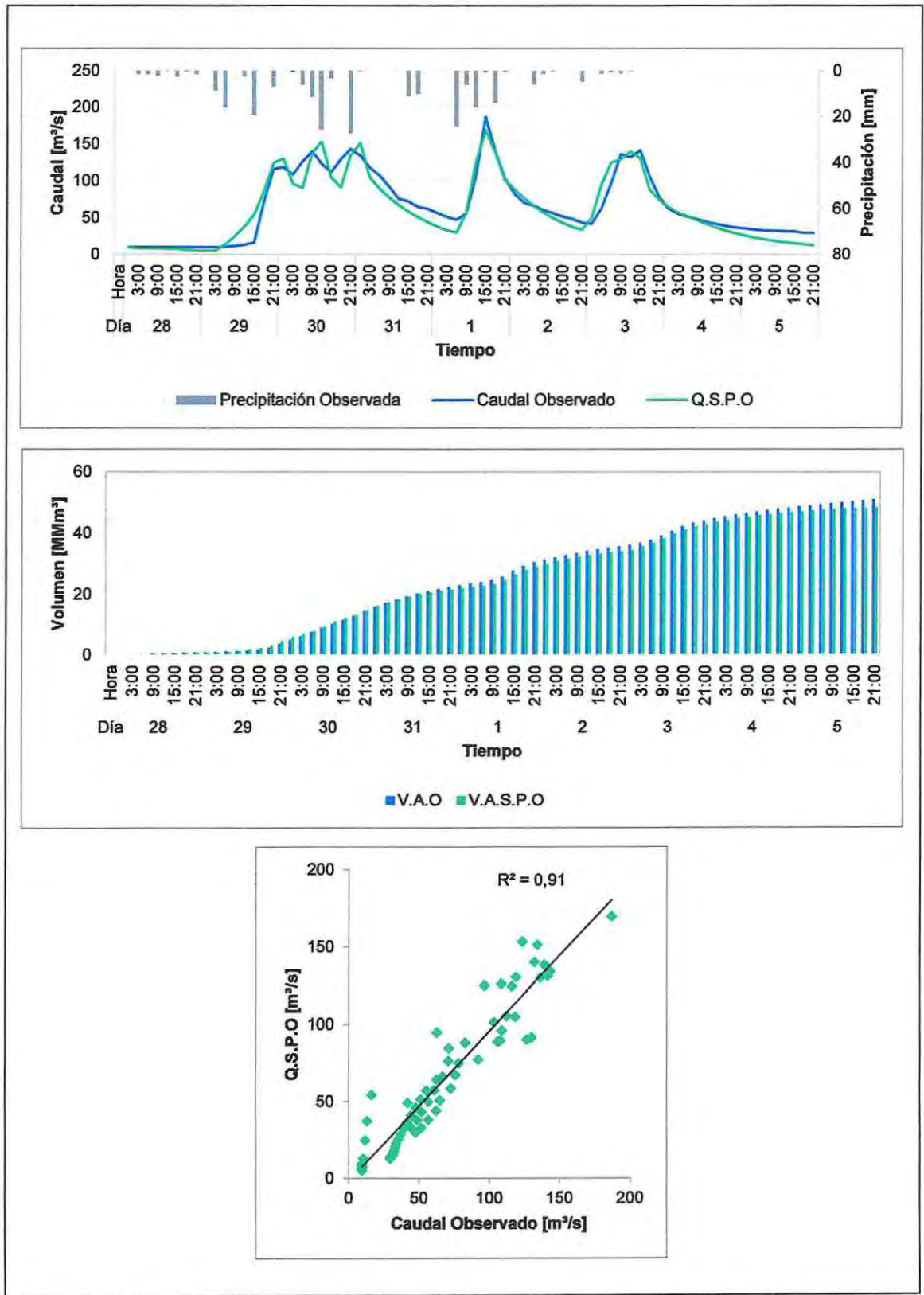


Figura D.4 - Tormenta de calibración N° 6 por método SMA.

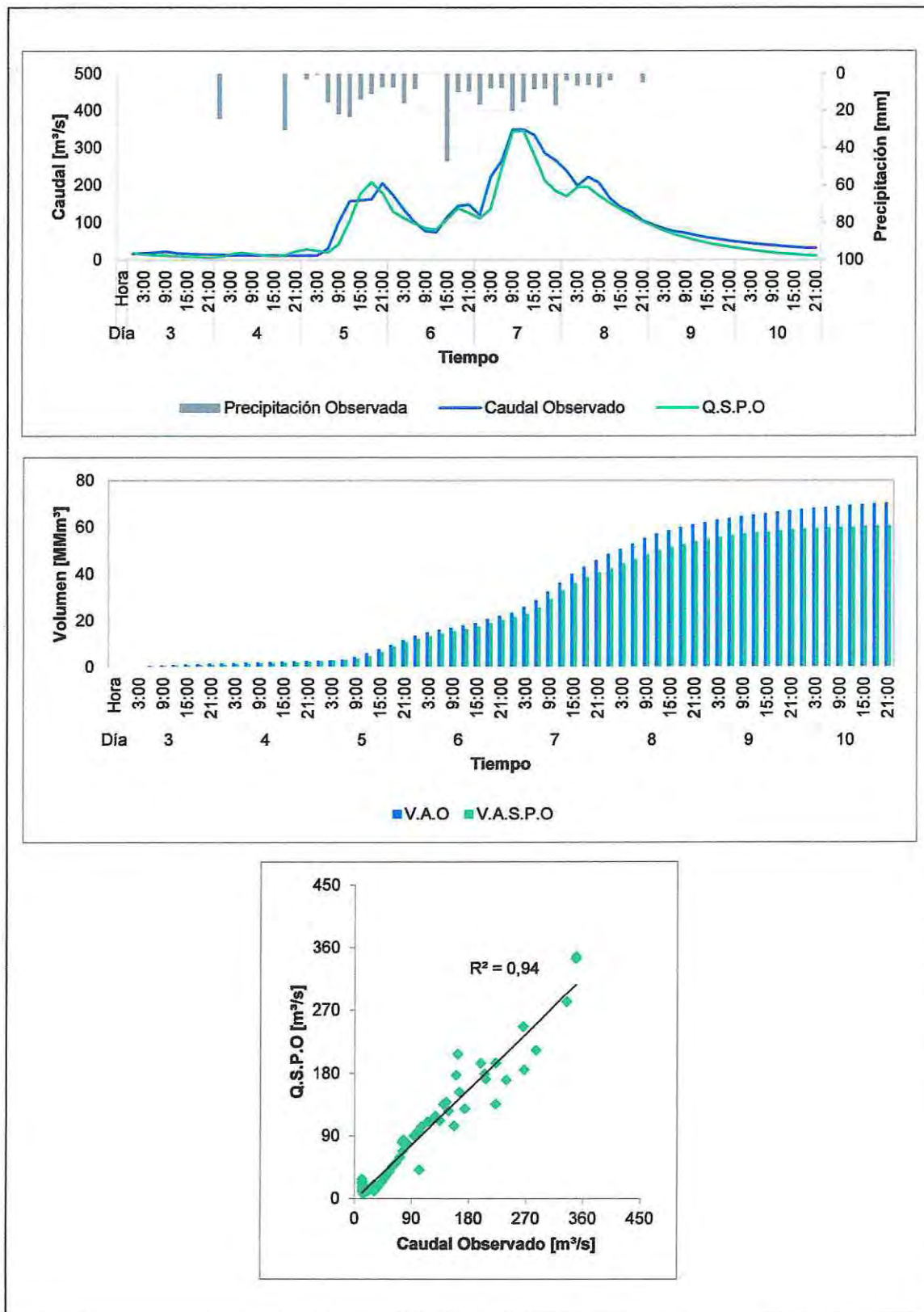


Figura D.5 - Tormenta de calibración N° 7 por método SMA.

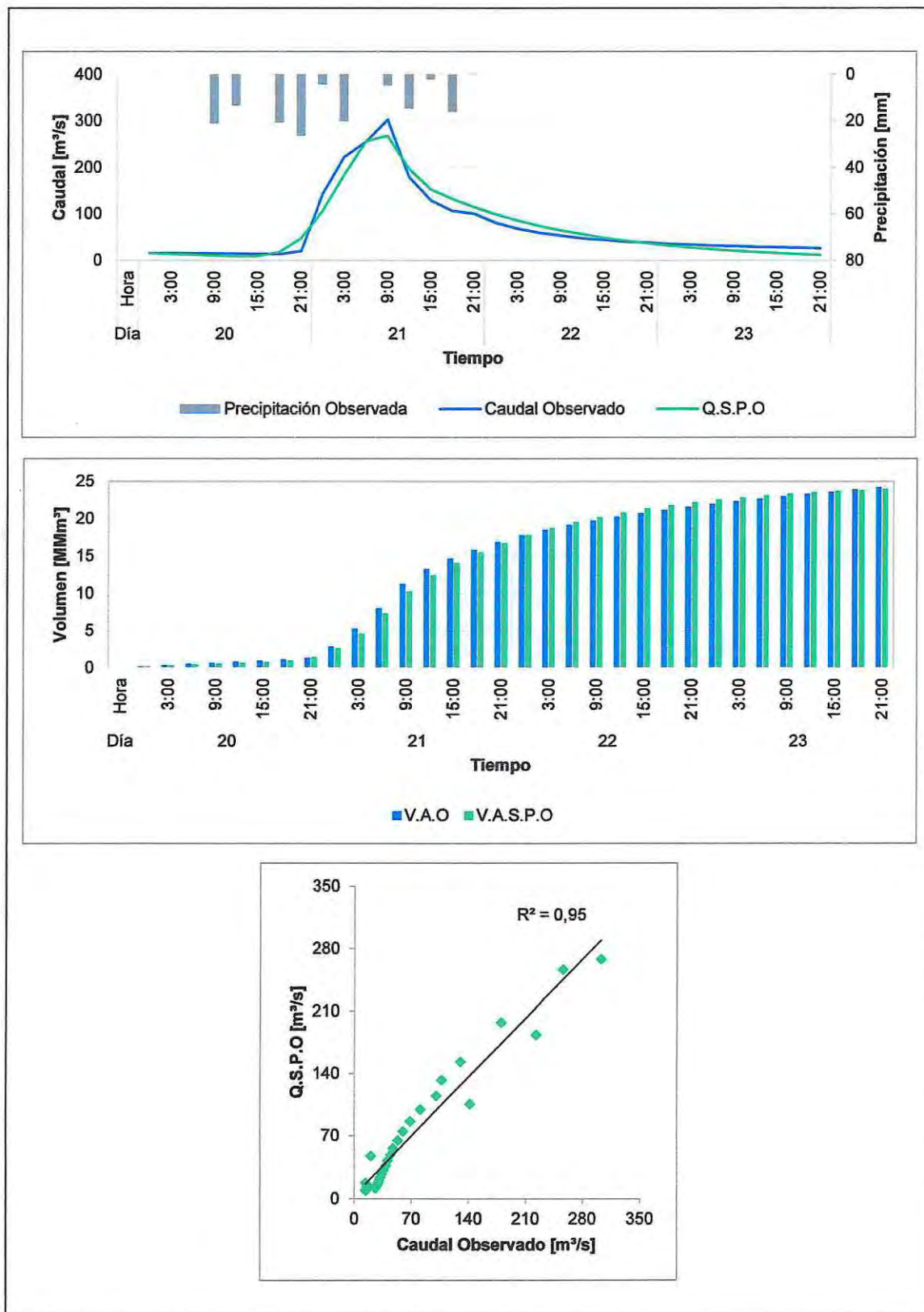


Figura D.6 - Tormenta de calibración N° 8 por método SMA.

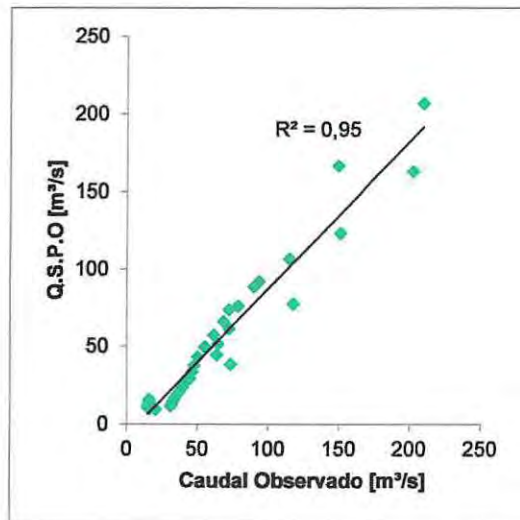
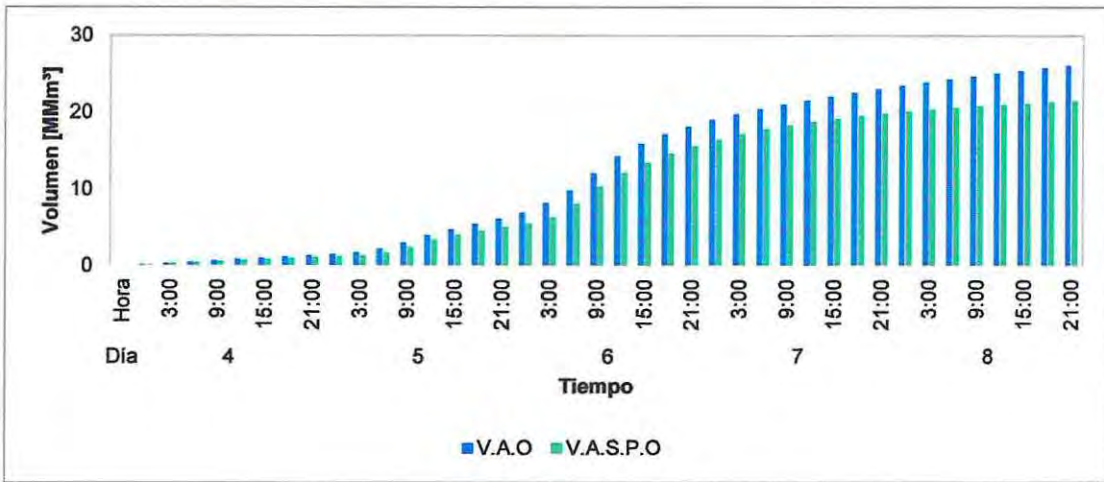
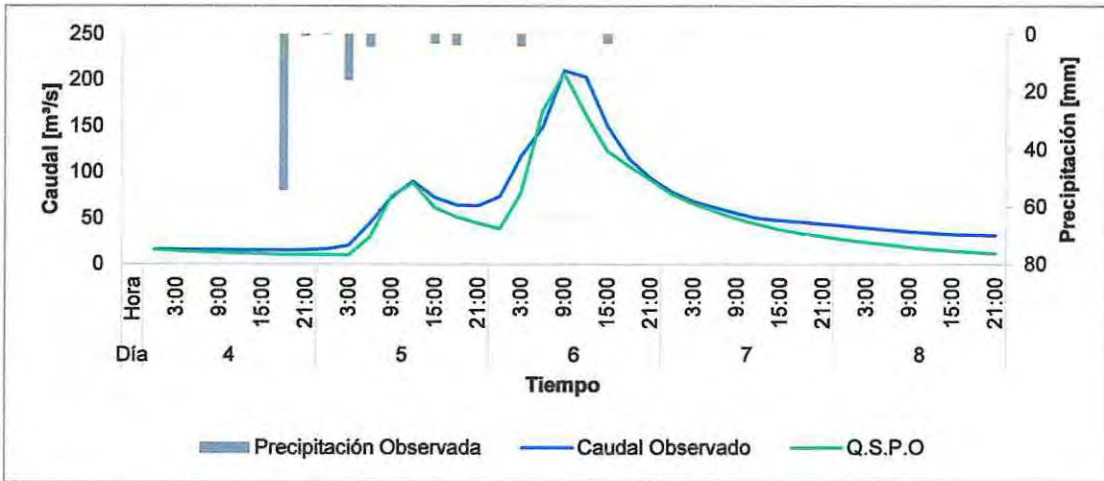


Figura D.7 - Tormenta de calibración N° 9 por método SMA.

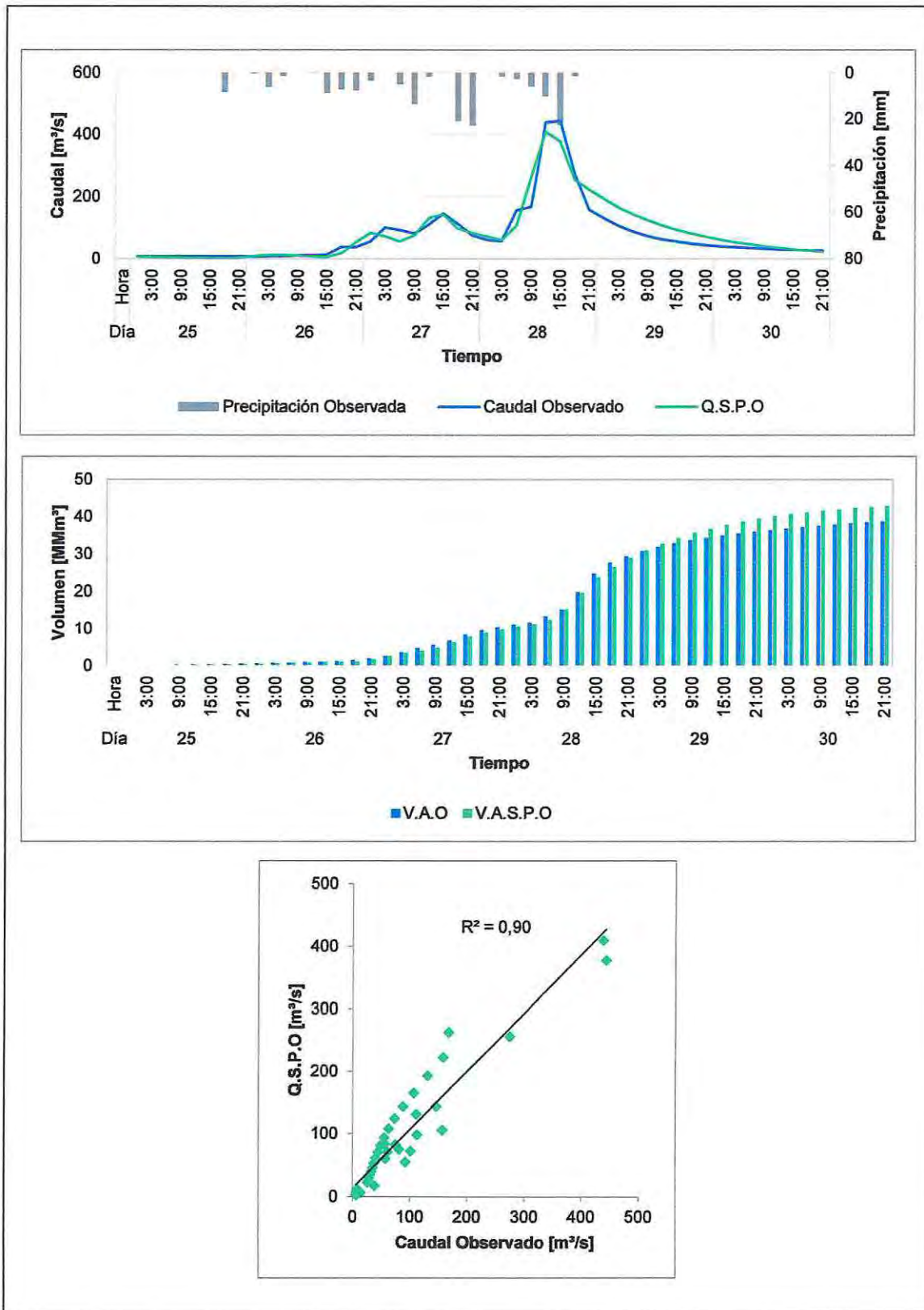


Figura D.8 - Tormenta de calibración N° 10 por método SMA.

Anexo E : Gráficos tormentas de validación con datos observados por método SMA

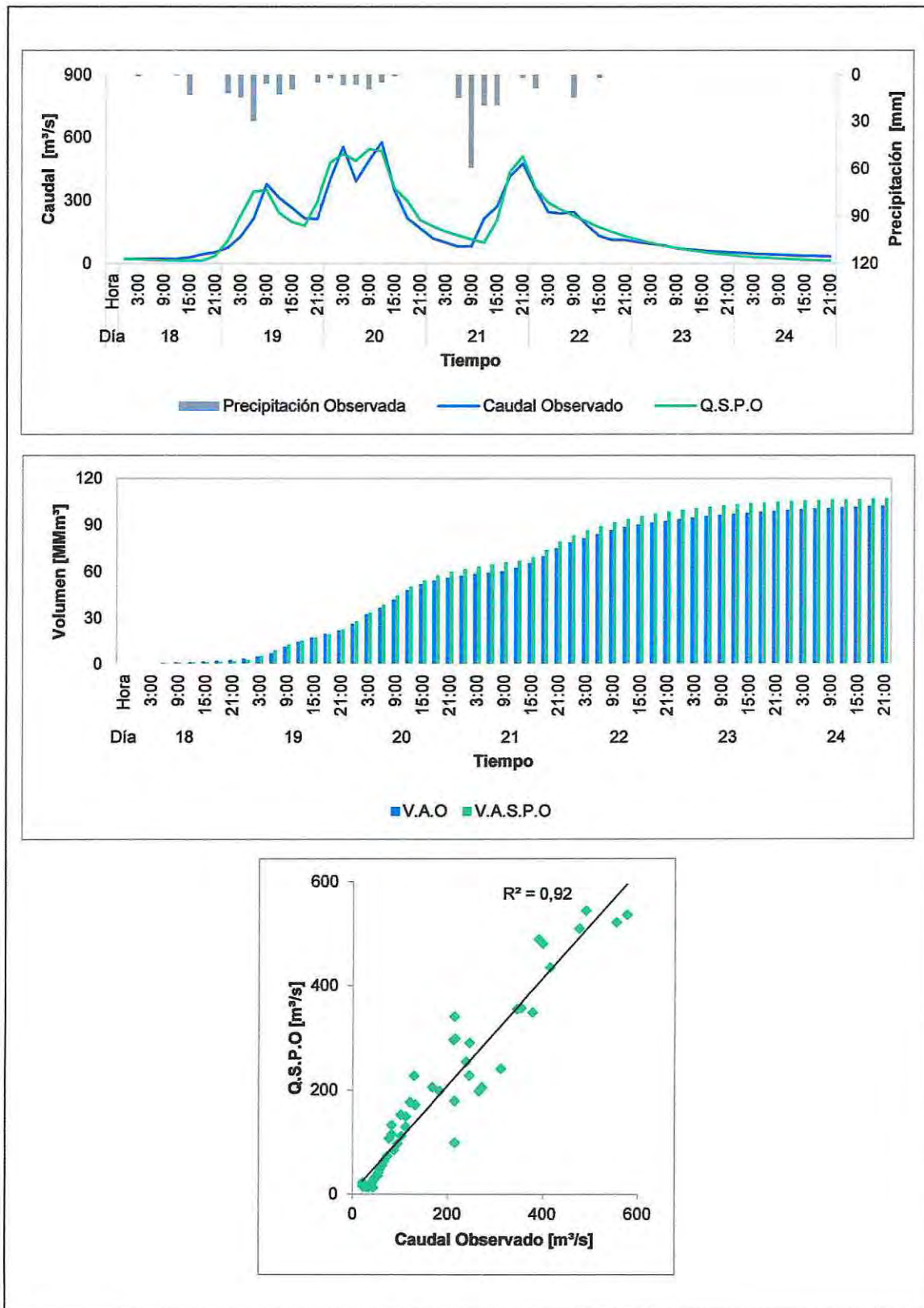


Figura E.1 - Tormenta de validación N° 3 con datos observados por método SMA.

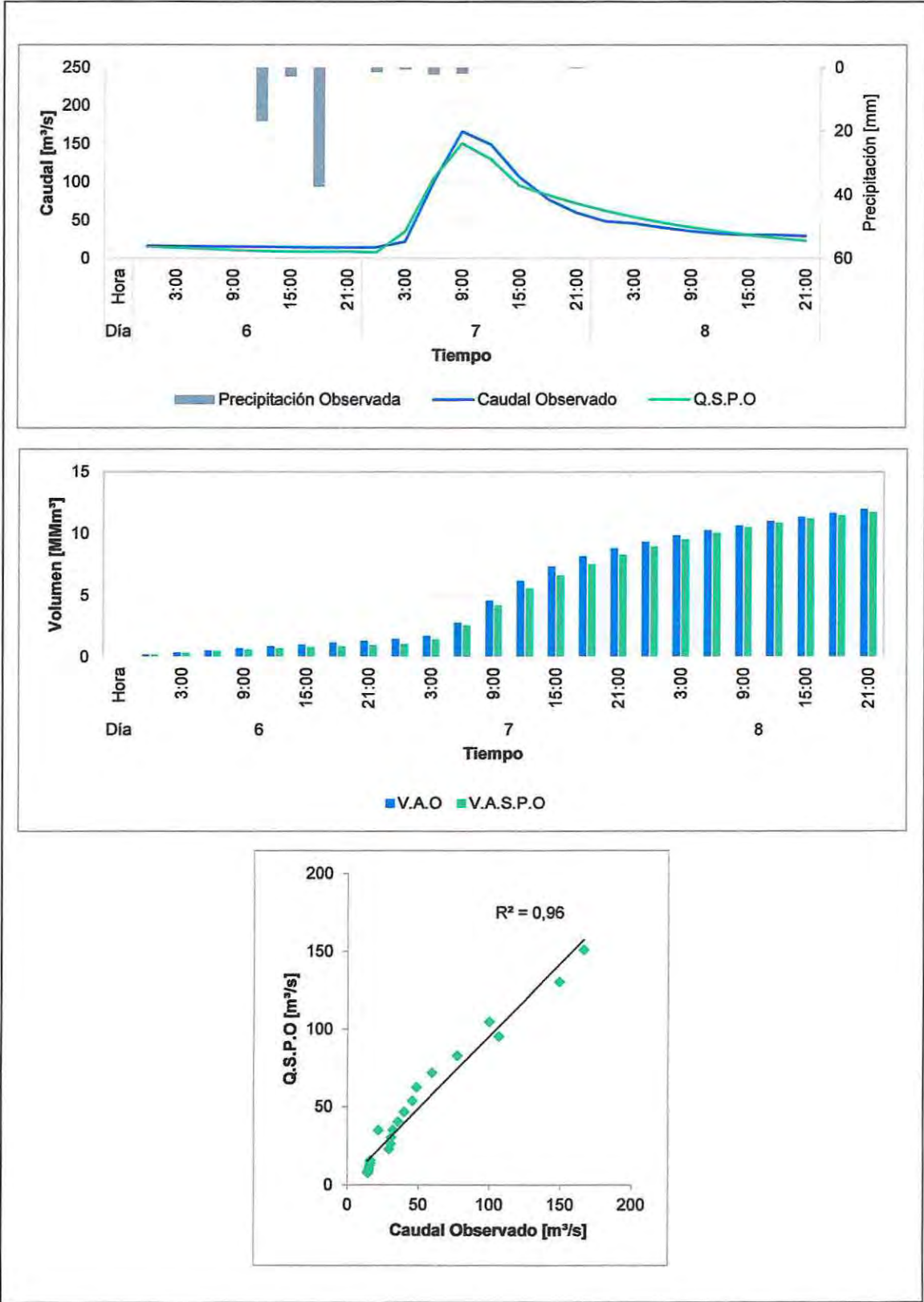


Figura E.2 - Tormenta de validación N° 4 con datos observados por método SMA.

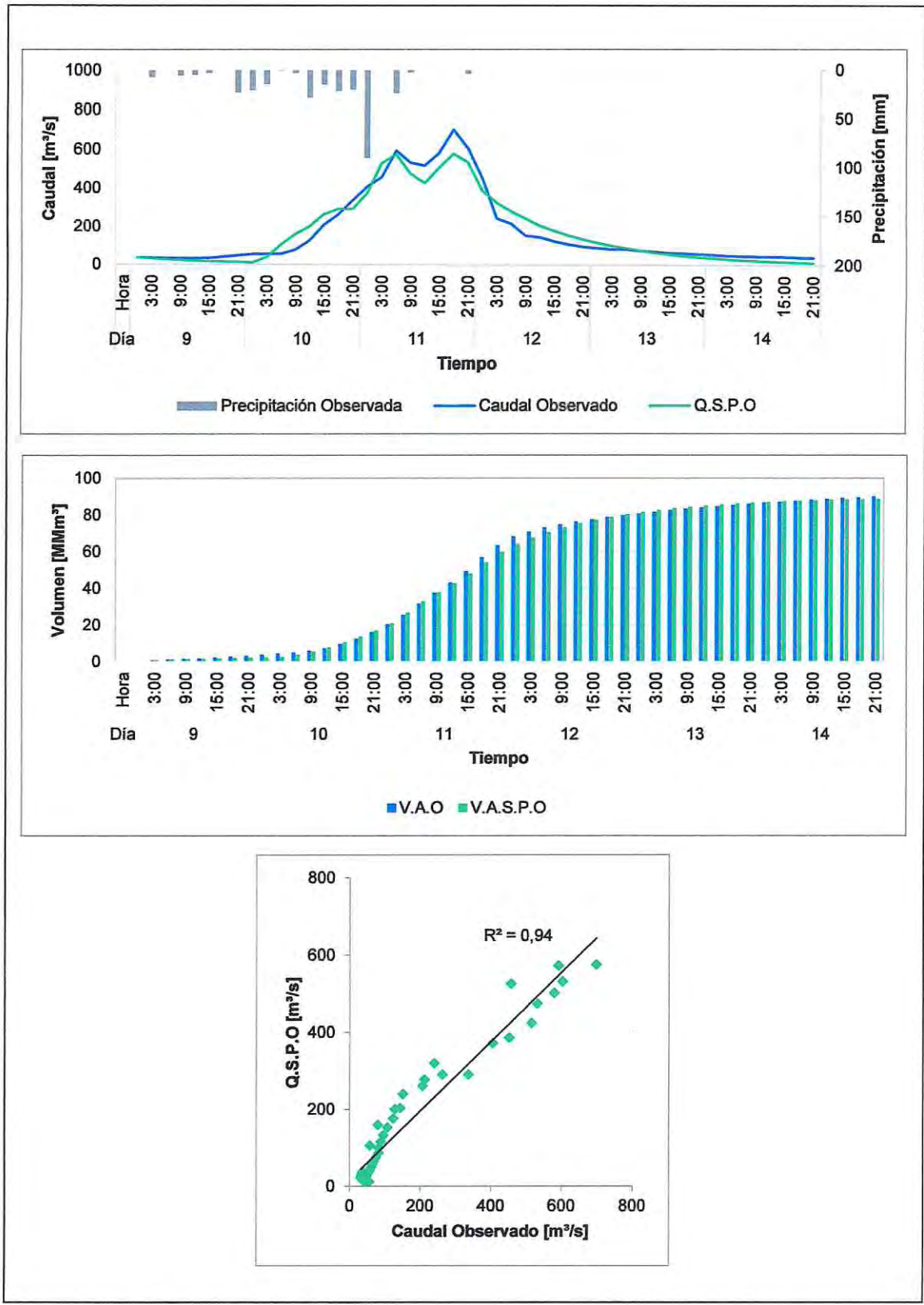


Figura E.3 - Tormenta de validación N° 5 con datos observados por método SMA.

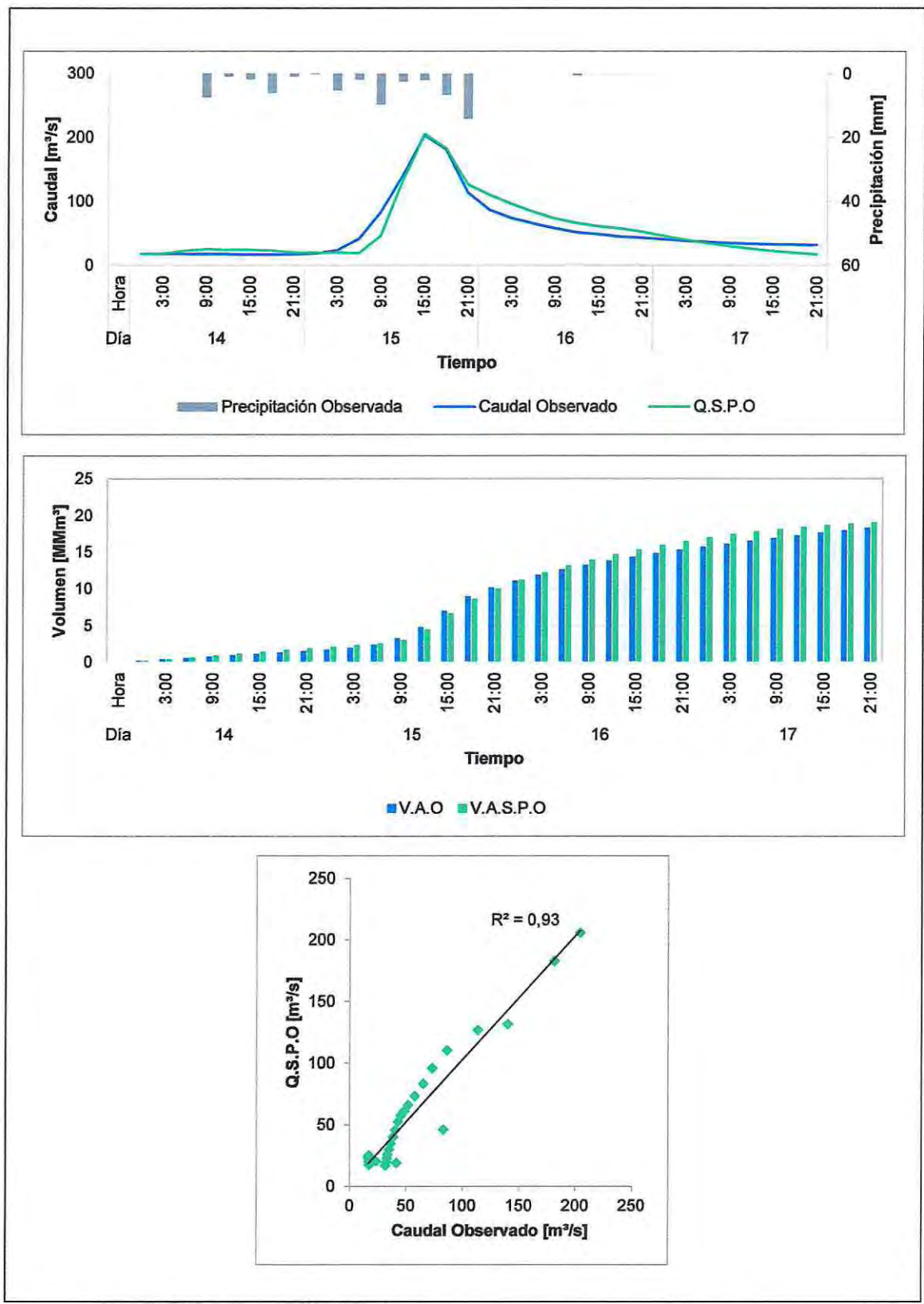


Figura E.4 - Tormenta de validación N° 6 con datos observados por método SMA.

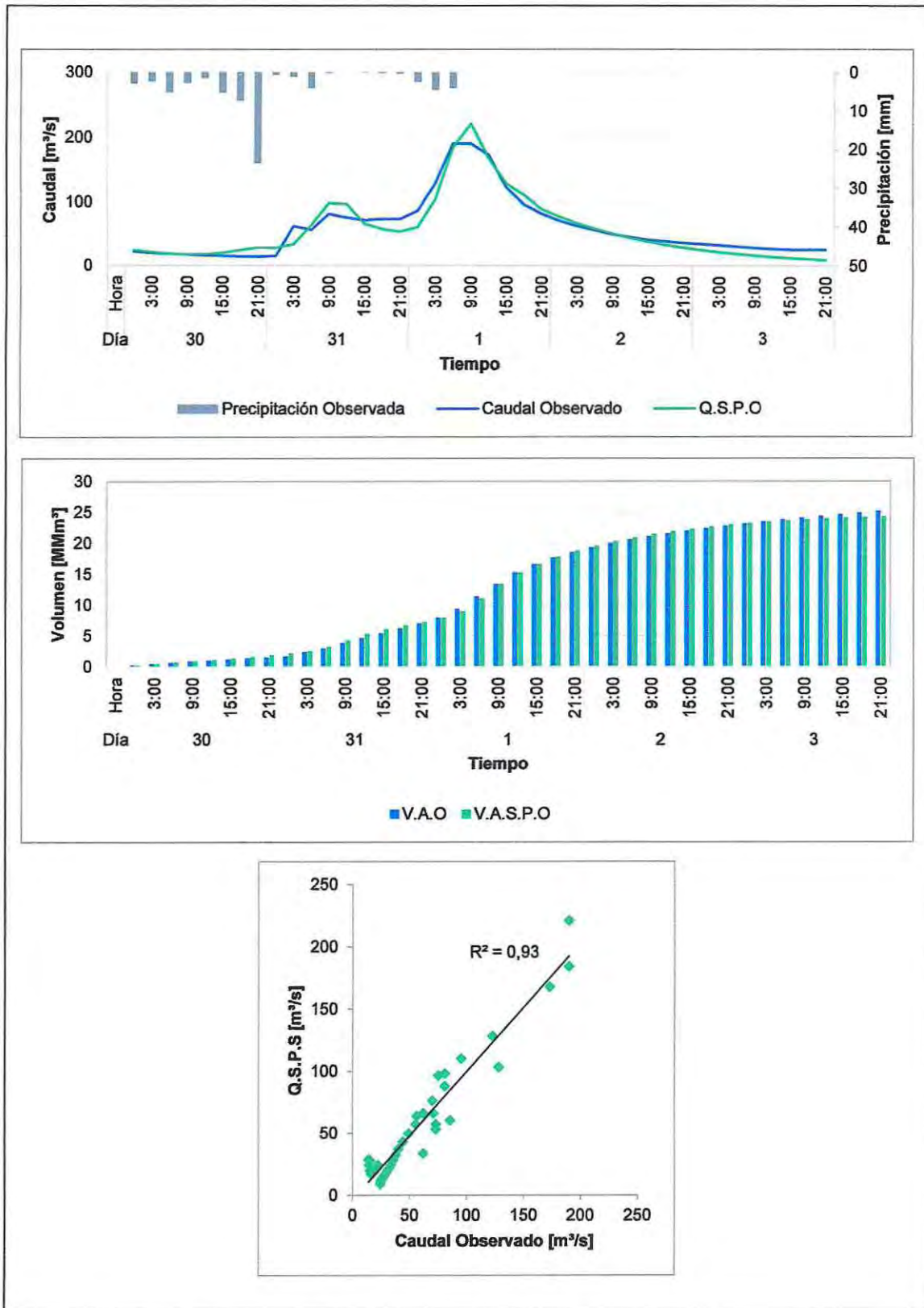


Figura E.5 - Tormenta de validación N° 7 con datos observados por método SMA.

Anexo F : Gráficos tormentas de validación con datos satelitales por método SMA

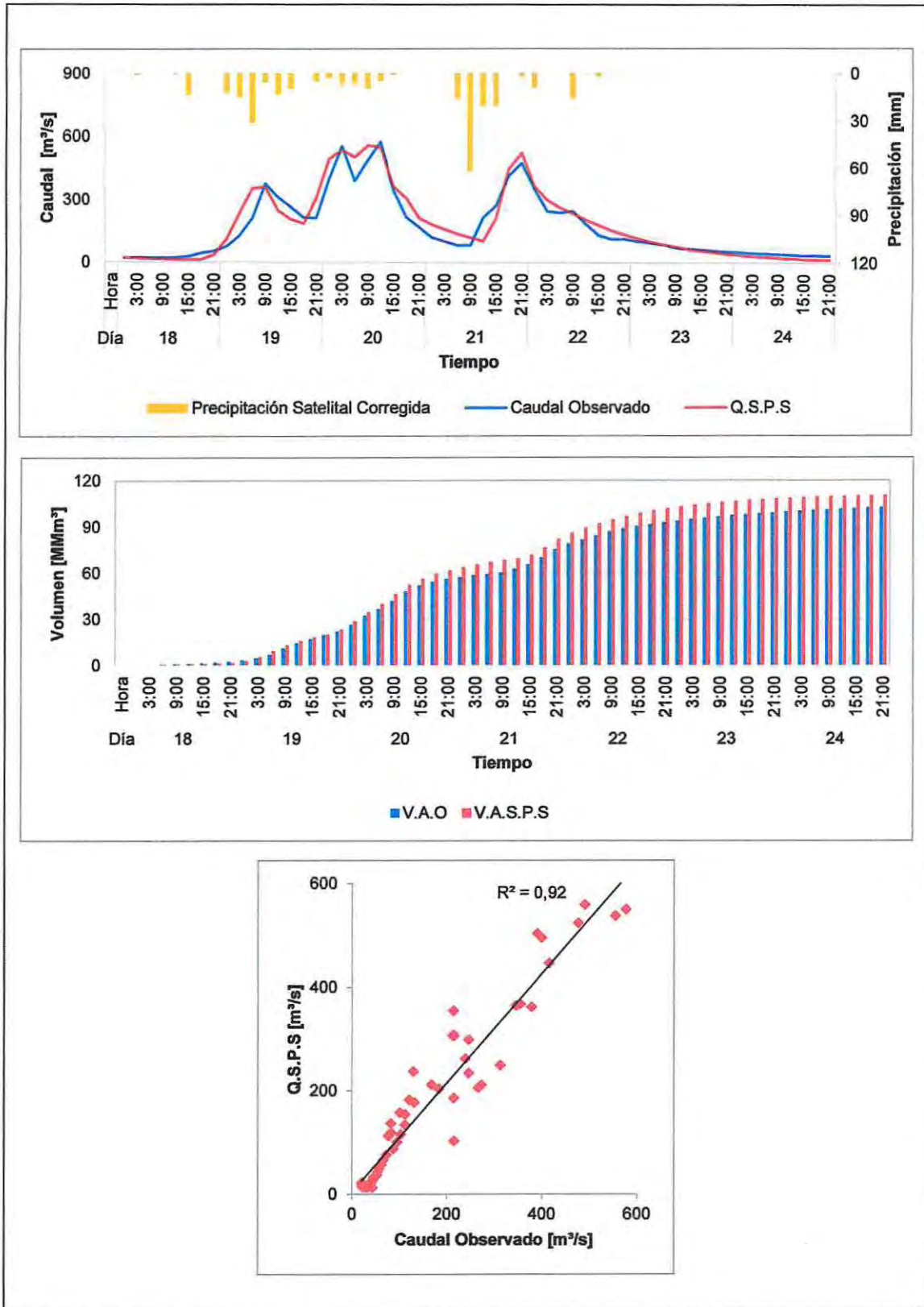


Figura F.1 - Tormenta de validación N° 3 con datos satelitales por método SMA.

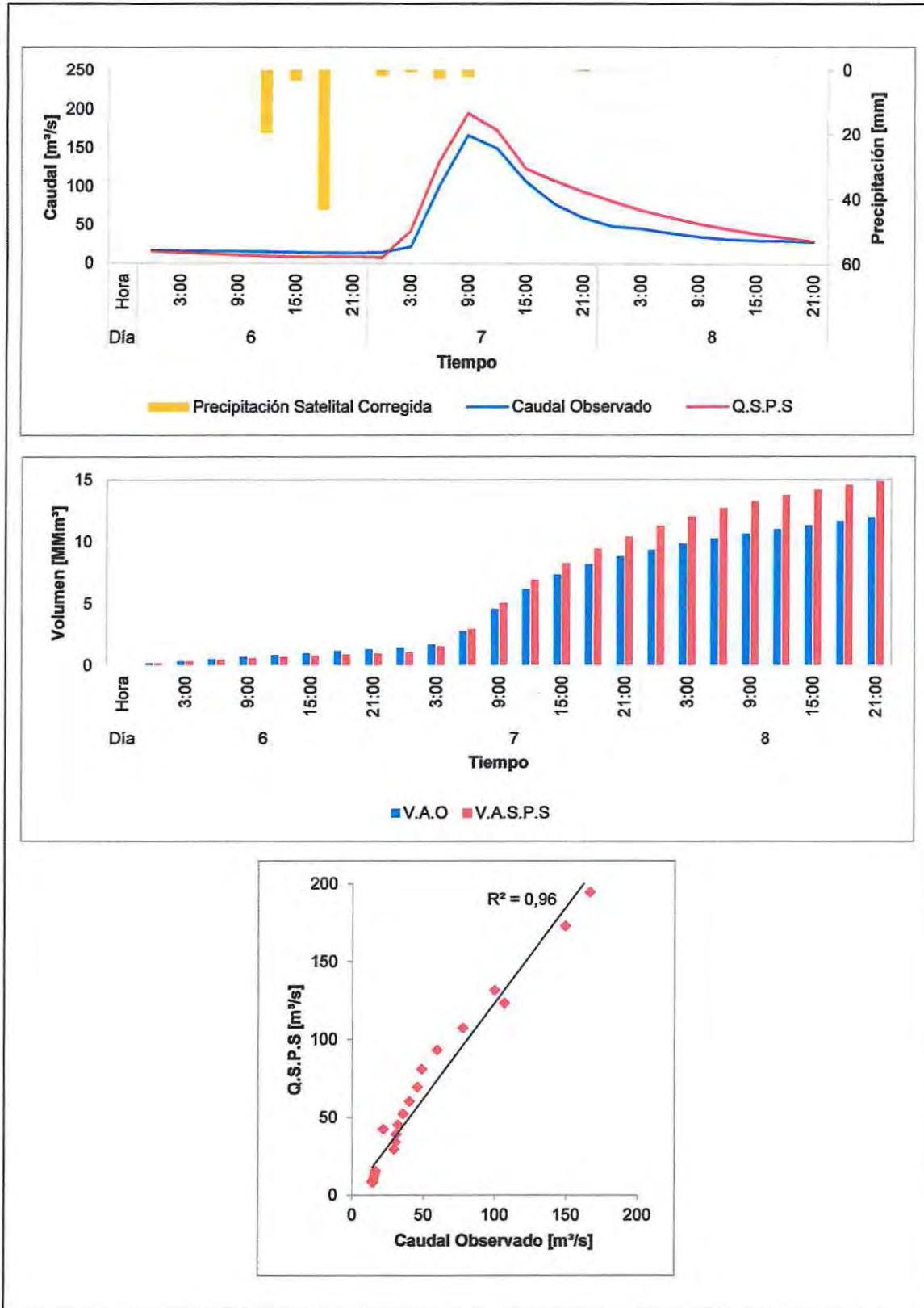


Figura F.2 - Tormenta de validación N° 4 con datos satelitales por método SMA.

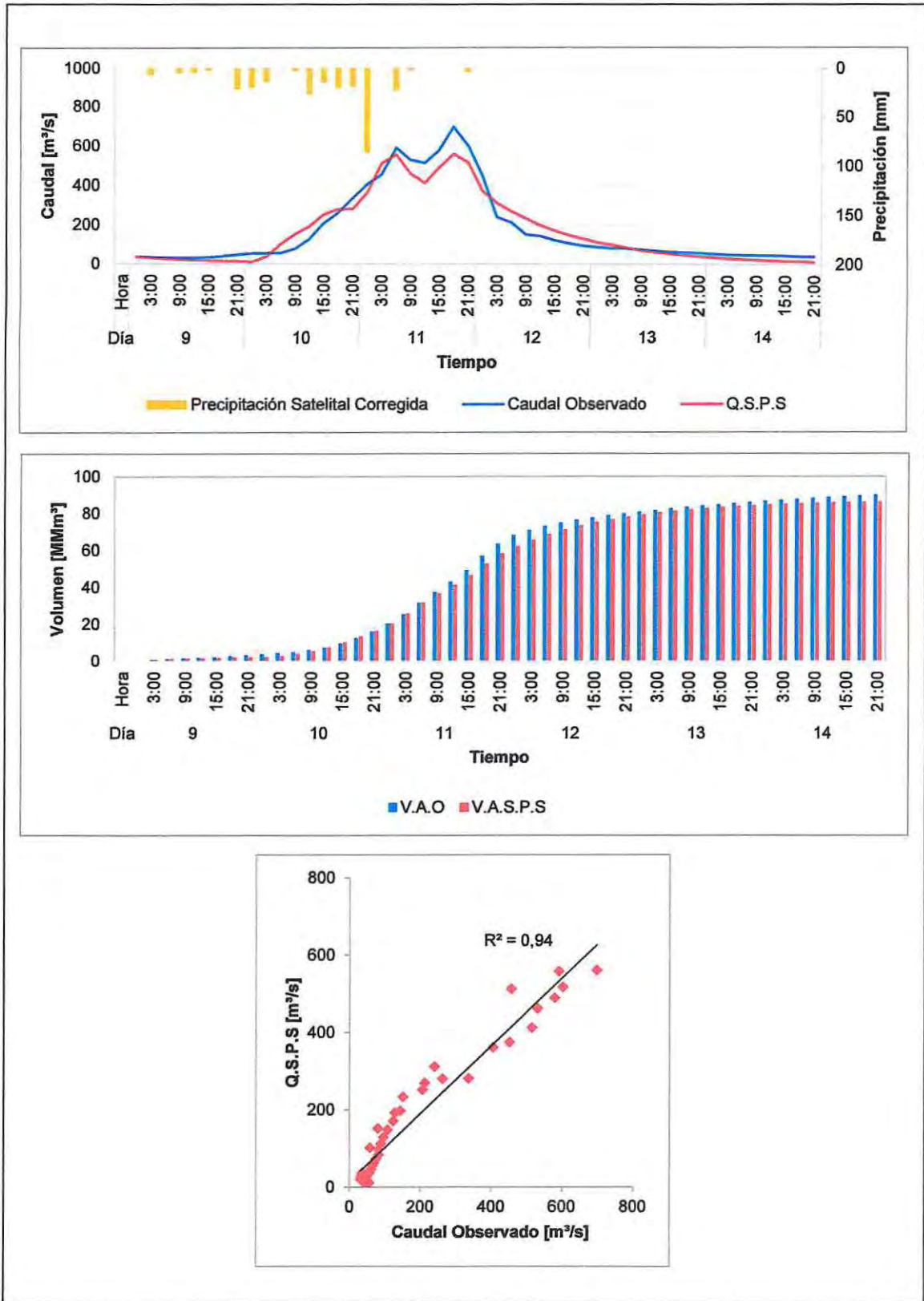


Figura F.3 - Tormenta de validación N° 5 con datos satelitales por método SMA.

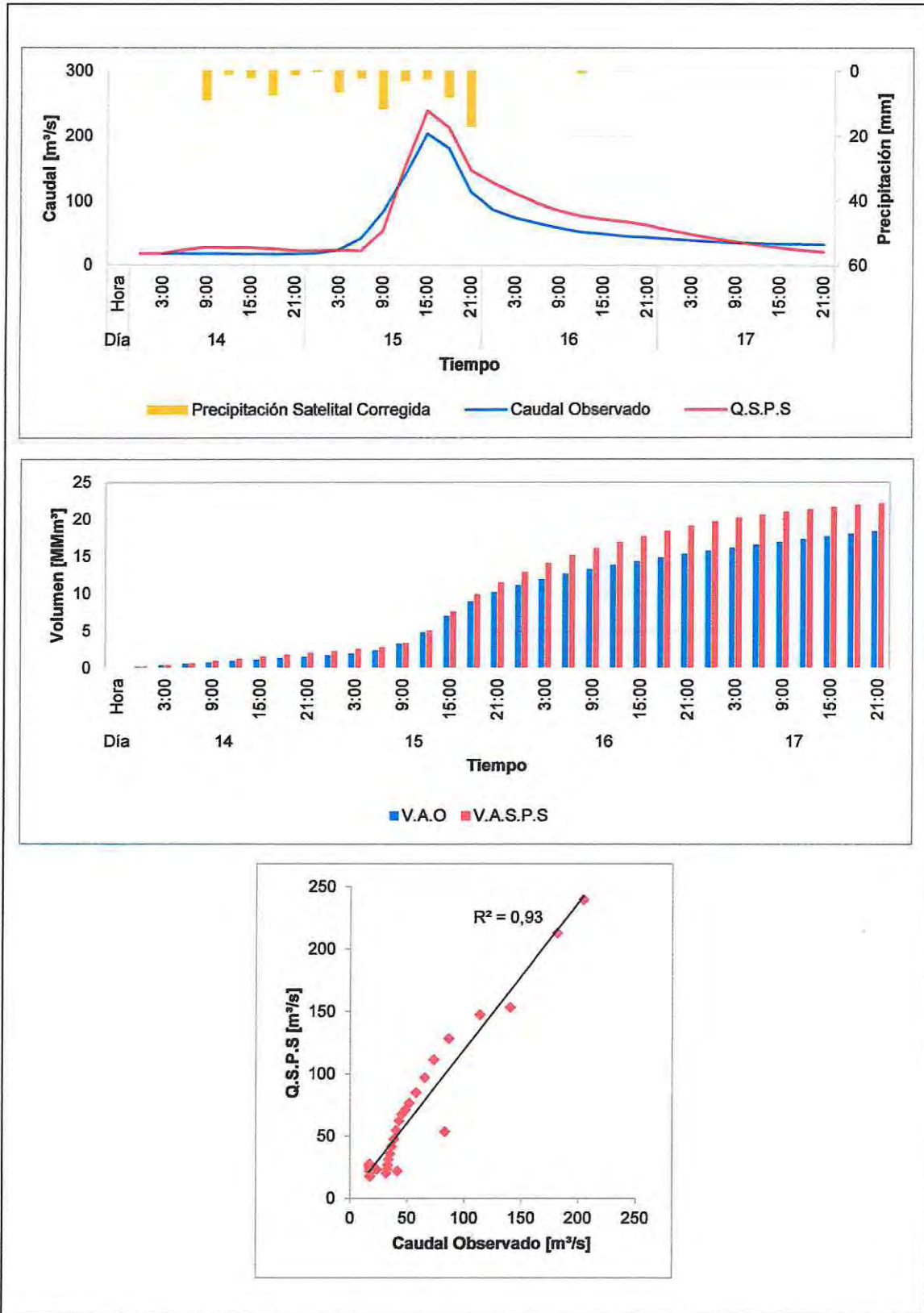


Figura F.4 - Tormenta de validación N° 6 con datos satelitales por método SMA.

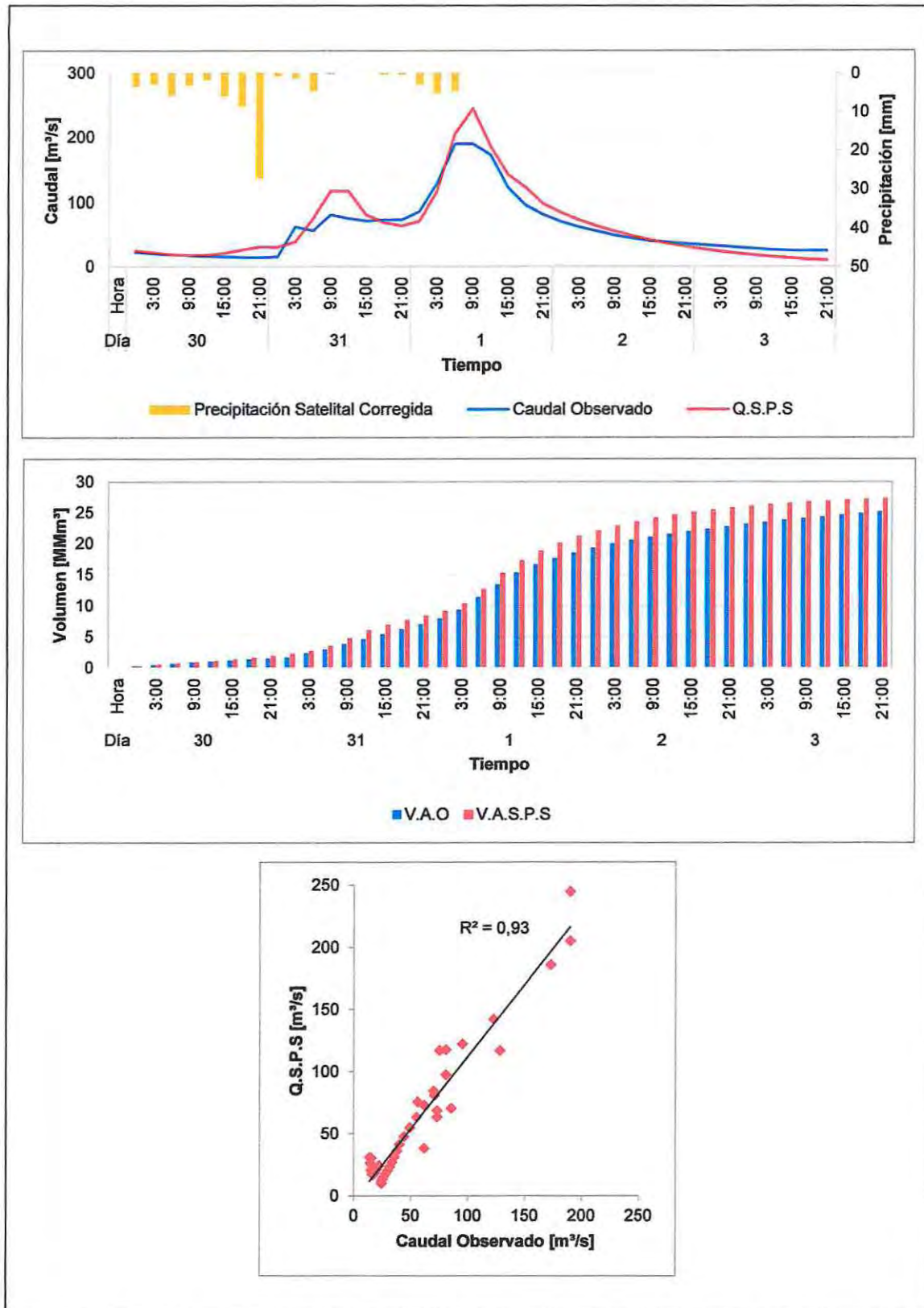


Figura F.5 - Tormenta de validación N° 7 con datos satelitales por método SMA.

Anexo G : Gráficos comparativos de tormentas de validación con datos observados y satelitales por ambos métodos de infiltración

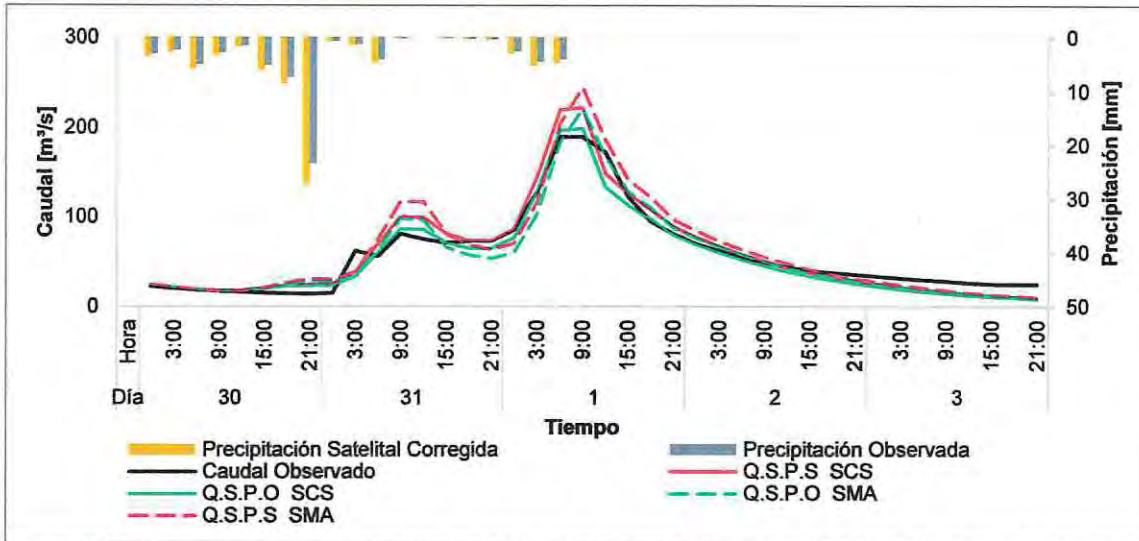


Figura G.1 - Hidrograma comparativo Tormenta N° 1, método de infiltración SCS v/s SMA - Datos observados y satelitales.

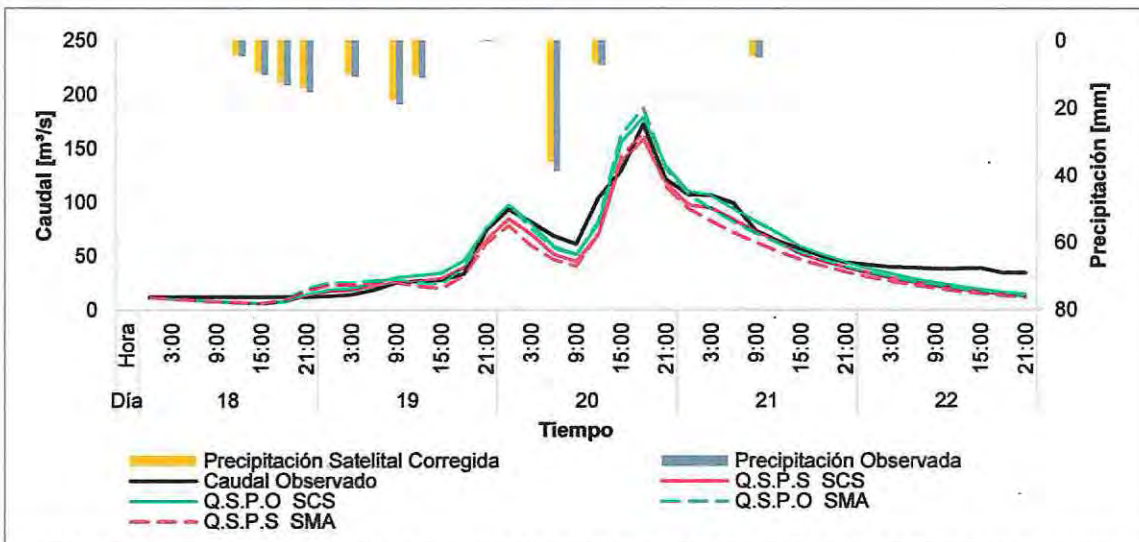


Figura G.2 - Hidrograma comparativo Tormenta N° 2, método de infiltración SCS v/s SMA - Datos observados y satelitales.

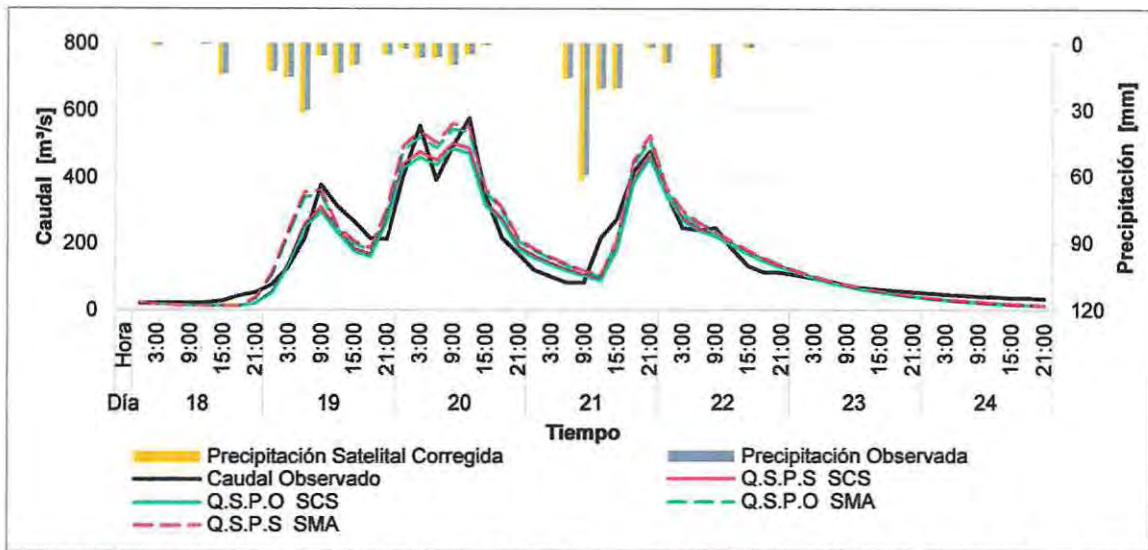


Figura G.3 - Hidrograma comparativo Tormenta N° 3, método de infiltración SCS v/s SMA - Datos observados y satelitales.

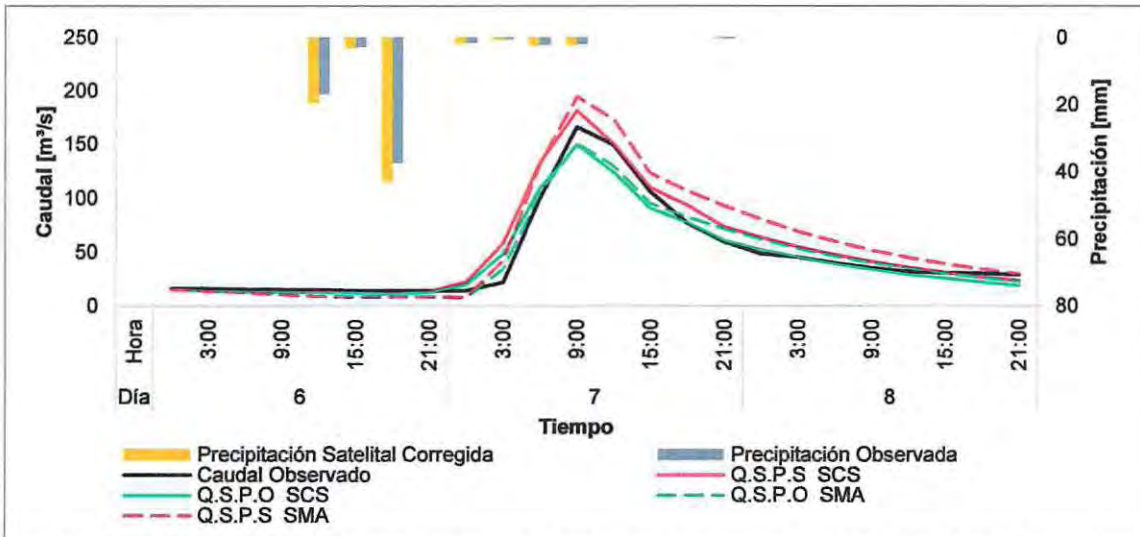


Figura G.4 - Hidrograma comparativo Tormenta N° 4, método de infiltración SCS v/s SMA - Datos observados y satelitales.

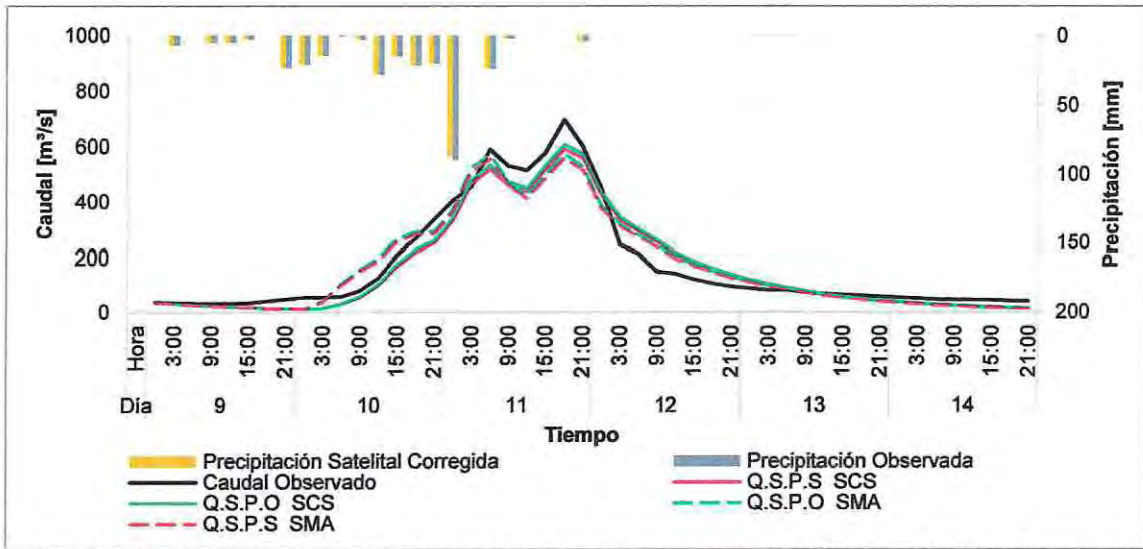


Figura G.5 - Hidrograma comparativo Tormenta N° 5, método de infiltración SCS v/s SMA - Datos observados y satelitales.

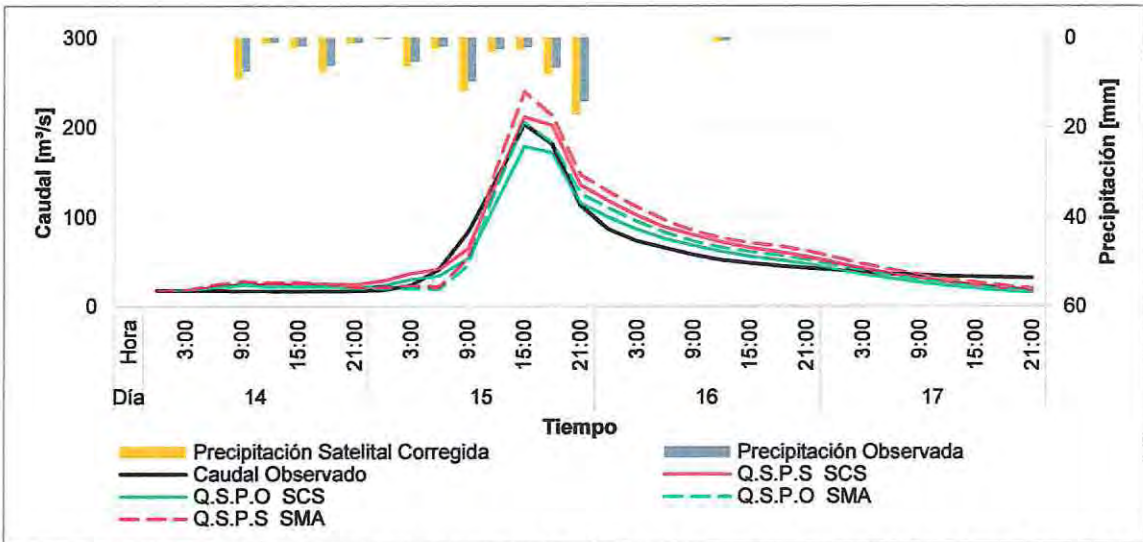


Figura G.6 - Hidrograma comparativo Tormenta N° 6, método de infiltración SCS v/s SMA - Datos observados y satelitales.

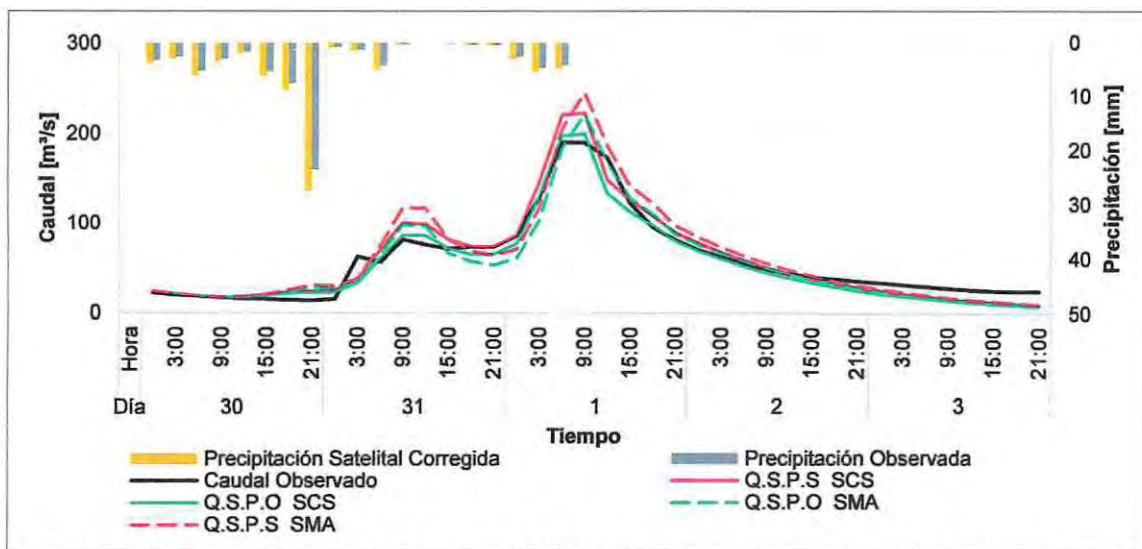


Figura G.7 - Hidrograma comparativo Tormenta N° 7, método de infiltración SCS v/s SMA - Datos observados y satelitales.