

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS

“APLICACIÓN DEL HIDROGRAMA UNITARIO ADIMENSIONAL
USANDO DATOS DE CUENCAS DE CALIFORNIA”

PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO EN
CIENCIAS CON MENCIÓN EN INGENIERÍA HIDRÁULICA

ELABORADO POR
LUIS GUSTAVO ARIZA TRELLES

ASESOR
Dr. JULIO MARTÍN KUROIWA ZEVALLOS

LIMA-PERÚ

2017

“APLICACIÓN DEL HIDROGRAMA UNITARIO ADIMENSIONAL
USANDO DATOS DE CUENCAS DE CALIFORNIA”

Ing. Luis Gustavo Ariza Trelles

Presentado a la Unidad de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Civil en
cumplimiento parcial de los requerimientos para el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS CON MENCIÓN EN INGENIERÍA HIDRÁULICA
DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

2017

Autor : Ing. Luis Gustavo Ariza Trelles

Recomendado : Dr. Ing. Julio Martín Kuroiwa Zevallos
Profesor de Posgrado FIC – UNI
Director Laboratorio Nacional de Hidráulica
Asesor de la Tesis

Aceptado por : Dr. Ing. Victor Sánchez Moya
Director de la Unidad de Posgrado
Facultad de Ingeniería Civil - UNI

Con mucho aprecio para mis padres Mónica y Carlos,
para mis abuelos Silvia y Luis, quienes me brindaron
apoyo y orientación en mi camino.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a Dios y la Virgen María por la darme la oportunidad de haber desarrollado esta tesis que sólo fue posible a través del esfuerzo y perseverancia, ambos complementos para continuar a pesar de las adversidades que pueden presentarse en la vida.

Agradezco también a mis padres Mónica y Carlos, por el apoyo que desde siempre me han brindado y a mi hermano Claudio, a mis abuelos Silvia y Luis, por el aliento incondicional que me brindaron.

Por otra parte, quiero expresar mi más profundo agradecimiento al Dr. Victor Miguel Ponce de la Universidad Estatal de San Diego - California, y al Dr. Julio Martín Kuroiwa Zevallos, por el apoyo incondicional en el asesoramiento, revisión y culminación de la presente investigación. Asimismo, agradezco al Ing. Mitchel Jara García, por los consejos que me han servido de guía y ejemplo.

Finalmente, a los profesores de la sección de postgrado de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería, a mis amigos de la maestría y al personal administrativo por el apoyo brindado.

ABSTRACT

This study validates the general dimensionless unit hydrograph (GDUH) model using California watershed/basin data. A unit hydrograph is the hydrograph produced by a unit depth of runoff uniformly distributed over the entire watershed/basin and lasting a specified unit duration. The general dimensionless unit hydrograph (GDUH) is a dimensionless formulation of the unit hydrograph, effectively associating the convolution technique with the model of cascade of linear reservoirs (CLR).

Ten (10) California watersheds/basins are selected for analysis. The basins encompass a wide range in the values of geomorphological parameters (drainage area, average land surface slope, and stream channel slope). For each basin, a set of maps are produced and related geomorphological parameters are calculated using GIS. For each basin, average measured and predicted unit hydrographs are calculated following the GDUH methodology. Conceptual and statistical analyses are used to develop a strategy for the prediction of unit hydrographs on the basis of local/regional geomorphology.

A predictive methodology for the calculation of unit hydrographs based on geomorphology has been validated and tested. The avowed strength of the methodology is its conceptual basis, being founded on the time-tested theory of the cascade of linear reservoirs. The central focus on the general dimensionless unit hydrograph (GDUH) as an unifying theory enhances the validation exercise.

RESUMEN

Este estudio valida el modelo del hidrograma unitario adimensional general (HUAG) utilizando información de cuencas de California, Estados Unidos. Un hidrograma unitario es el hidrograma producido por una profundidad unitaria de escorrentía distribuida uniformemente en toda una cuenca y con una duración unitaria específica. El hidrograma unitario adimensional general (HUAG) es la formulación adimensional del hidrograma unitario, asociando efectivamente la técnica de convolución y el modelo de cascada de reservorios lineales (CRL).

Diez (10) cuencas de California se utilizaron para el análisis, las mismas que abarcan un amplio rango de parámetros geomorfológicos (área de drenaje, pendiente promedio de la superficie del terreno, y pendiente del canal principal). Para cada cuenca, se elaboró un grupo de mapas hidrológicos y se relacionaron sus parámetros geomorfológicos utilizando la herramienta del Sistema de Información Geográfica (SIG). Además, los hidrogramas promedio observado y predecido fueron calculados siguiendo la metodología del HUAG. Por otro lado, el análisis conceptual y estadístico fueron utilizados para desarrollar una estrategia de predicción de hidrogramas unitarios en base a la geomorfología local/regional de la cuenca.

Una metodología de predicción para el cálculo de hidrogramas unitarios en base a la geomorfología local/regional ha sido desarrollada, probada y validada. El principio de la metodología es su base conceptual, que fue fundamentada sobre la teoría de prueba – tiempo de la cascada de reservorios lineales. El enfoque central es el hidrograma unitario adimensional general (HUAG) como una teoría unificadora que realiza la validación del ejercicio.

TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	4
ABSTRACT	5
RESUMEN.....	6
CAPÍTULO 1. GENERALIDADES	1
1.1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.2. OBJETIVOS	2
1.3. ALCANCES	2
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	3
2.1. HIDROGRAMA UNITARIO	3
2.2. TRÁNSITO DE ALMACENAMIENTO Y RESERVORIOS LINEALES	7
2.3. LA CASCADA DE RESERVORIOS LINEALES	11
2.4. HIDROGRAMA UNITARIO INSTANTÁNEO	15
2.5. HIDROGRAMA UNITARIO INSTANTÁNEO GEOMORFOLÓGICO	15
2.6. CONCEPTO DE DIFUSIÓN DE ESCORRENTÍA.....	17
2.6.1. Difusión de la escorrentía en reservorios.....	17
2.6.2. Difusión de la escorrentía en corrientes principales	18
2.6.3. Difusión de la escorrentía en cuencas	21
2.7. HIDROGRAMA UNITARIO ADIMENSIONAL GENERAL.....	24
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA.....	28
3.1. VISIÓN	28
3.1.1. Tormentas simples	28
3.1.2. Tormentas complejas	29
3.2. CONVOLUCIÓN Y CONVOLUCIÓN INVERSA	31
3.2.1. Convolución.....	32
3.2.2. Convolución inversa	34
3.3. HIDROGRAMA UNITARIO ADIMENSIONAL GENERAL.....	36
3.4. SERIES DE LOS HIDROGRAMAS UNITARIOS	38

3.5.	HUAG, CRL y CONVOLUCIÓN	45
CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE DATOS		50
4.1.	ANTECEDENTES	50
4.2.	RECURSO DE INFORMACIÓN.....	50
4.3.	PARÁMETROS GEOMORFOLÓGICOS	51
4.3.1.	Área de drenaje	51
4.3.2.	Perímetro de drenaje.....	51
4.3.3.	Longitud hidráulica de la cuenca.....	51
4.3.4.	Índice de forma	51
4.3.5.	Índice de compacidad	52
4.3.6.	Elevación máxima y mínima.....	52
4.3.7.	Pendiente promedio de la superficie del terreno.....	52
4.3.8.	Pendiente promedio del canal principal	53
4.3.9.	Longitud total del canal principal	53
4.3.10.	Precipitación media anual	53
4.4.	SELECCIÓN DE LAS CUENCAS	54
4.4.1.	Quebrada Campo en Campo, CA	55
4.4.2.	Río Whitewater en Mecca, CA	61
4.4.3.	Río Mojave en Victorville, CA.....	66
4.4.4.	Río Amargosa en Tecopa, CA	72
4.4.5.	Río Petaluma en Petaluma, CA	77
4.4.6.	Río Russian en Guerneville, CA.....	82
4.4.7.	Quebrada Los Gatos en Coalinga, CA.....	88
4.4.8.	Quebrada Cottonwood en Cottonwood, CA.....	92
4.4.9.	Río Salinas en Spreckels, CA	97
4.4.10.	Río Shasta en Montague, CA.....	102
CAPÍTULO 5. APLICACIÓN DEL MODELO HUAG.....		108
5.1.	ANÁLISIS DE DATOS.....	108

5.1.1.	Quebrada Campo	110
5.1.2.	Río Whitewater	112
5.1.3.	Río Mojave	114
5.1.4.	Río Amargosa.....	116
5.1.5.	Río Petaluma.....	118
5.1.6.	Río Russian	120
5.1.7.	Quebrada Los Gatos	122
5.1.8.	Quebrada Cottonwood	124
5.1.9.	Río Salinas	126
5.1.10.	Río Shasta.....	128
5.2.	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	130
5.3.	ANÁLISIS GEOMORFOLÓGICO	131
5.4.	MODELAMIENTO DE LA DIFUSIÓN DEL HIDROGRAMA UNITARIO	133
5.5.	CASO PRÁCTICO.....	137
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		139
6.1.	RESUMEN.....	139
6.2.	CONCLUSIONES.....	140
6.3.	RECOMENDACIONES	141
BIBLIOGRAFÍA.....		142
ANEXOS.....		144
ANEXO 1. Información de Precipitaciones del NOAA		145
ANEXO 2. Información de Caudales del USGS.....		149

FOTOGRAFÍAS

Fotografía Nro. 4.1. Vista aguas abajo de la quebrada Campo cerca de la cabecera de la subcuenca.	55
Fotografía Nro. 4.2. Vista aguas arriba de la quebrada Campo, California.....	56
Fotografía Nro. 4.3. Estación de precipitación del NOAA NWS en Campo, California.	56

Fotografía Nro. 4.4. Estación de hidrométrica del USGS en la intersección de la quebrada Campo con la ruta estatal Nro. 94.....	57
Fotografía Nro. 4.5. Vista del Cañón del río Whitewater.	61
Fotografía Nro. 4.6. Ingreso del río Whitewater al mar Salton.....	62
Fotografía Nro. 4.7. Cruce del río Mojave en la zona del Cañón Afton, California.....	67
Fotografía Nro. 4.8. Río Mojave en la zona de Helendale, California.....	67
Fotografía Nro. 4.9. Aguas arriba del río Amargosa, California.....	73
Fotografía Nro. 4.10. Río Amargosa en Shoshone, California.	73
Fotografía Nro. 4.11. Quebrada Los Gatos aguas arriba de la comunidad de Coalinga.....	88
Fotografía Nro. 4.12. Río Salinas en la comunidad de San Ardo, California.....	97
Fotografía Nro. 4.13. Río Salinas en la comunidad de Paso Robles, California.	98
Fotografía Nro. 4.14. Río Shasta cerca de Edgewood, California.	103

TABLAS

Tabla Nro 2.1. Coeficientes de tránsito de reservorio lineal.	10
Tabla Nro 2.2. Clasificación de las cuencas con expresión de difusión de la escorrentía.	27
Tabla Nro 3.1. Datos de ejemplo de convolución.	32
Tabla Nro 3.2. Distribución de tiempo del ejemplo de convolución.	32
Tabla Nro 3.3. Hidrograma compuesto por la convolución.	33
Tabla Nro 3.4. Hidrograma unitario adimensional para $C=1$ y $N=3$	36
Tabla Nro 3.5. Hidrograma unitario adimensional para $C=1$ y $1 \leq N \leq 10$	37
Tabla Nro 3.6. Hidrograma unitario adimensional para $2 \leq C \leq 0.1$ y $1 \leq N \leq 10$	38
Tabla Nro 3.7. Hietograma de precipitación efectiva.	45
Tabla Nro 3.8. Hidrograma unitario adimensional para $C = 1$ y $N = 2$	46
Tabla Nro 3.9. Hidrograma unitario e hidrograma unitario adimensional para $C = 1$ y $N = 2$	47
Tabla Nro 3.10. Hidrograma compuesto de inundación por la cascada de reservorios lineales (CRL).	48
Tabla Nro 3.11. Hidrograma compuesto de inundación por convolución.	49
Tabla Nro 4.1. Selección de cuencas para la investigación.	54

Tabla Nro 4.2. Estaciones de la subcuenca de la quebrada Campo.....	59
Tabla Nro 4.3. Parámetros geomorfológicos e hidrológicos de la subcuenca de la quebrada Campo.....	59
Tabla Nro 4.4. Estaciones de la cuenca del río Whitewater.	64
Tabla Nro 4.5. Parámetros geomorfológicos e hidrológicos de la cuenca del río Whitewater. ..	65
Tabla Nro 4.6. Estaciones de la cuenca del río Mojave.....	70
Tabla Nro 4.7. Parámetros geomorfológicos e hidrológicos de la cuenca del río Mojave.....	71
Tabla Nro 4.8. Estaciones de la cuenca del río Amargosa.....	75
Tabla Nro 4.9. Parámetros geomorfológicos e hidrológicos de la cuenca del río Amargosa.....	76
Tabla Nro 4.10. Estaciones de la subcuenca del río Petaluma.....	80
Tabla Nro 4.11. Parámetros geomorfológicos e hidrológicos de la subcuenca del río Petaluma.....	81
Tabla Nro 4.12. Estaciones de la cuenca del río Russian.....	86
Tabla Nro 4.13. Parámetros geomorfológicos e hidrológicos de la cuenca del río Russian.....	86
Tabla Nro 4.14. Estaciones de la subcuenca de la quebrada Los Gatos.....	90
Tabla Nro 4.15. Parámetros geomorfológicos e hidrológicos de la subcuenca de la quebrada Los Gatos.....	91
Tabla Nro 4.16. Estaciones de la cuenca de la quebrada Cottonwood.....	95
Tabla Nro 4.17. Parámetros geomorfológicos e hidrológicos de la cuenca de la quebrada Cottonwood.....	95
Tabla Nro 4.18. Estaciones de la cuenca del río Salinas.....	100
Tabla Nro 4.19. Parámetros geomorfológicos e hidrológicos de la cuenca del río Salinas.....	101
Tabla Nro 4.20. Estaciones de la cuenca del río Shasta.....	105
Tabla Nro 4.21. Parámetros geomorfológicos e hidrológicos de la cuenca del río Shasta.....	106
Tabla Nro 5.1. Ejemplo de la quebrada Campo – datos de precipitación y descarga.....	109
Tabla Nro 5.2. Ejemplo de la quebrada Campo – Hidrograma unitario adimensional (HUA). ..	109
Tabla Nro 5.3. Subcuenca de la quebrada Campo – datos de precipitación y descarga.....	110
Tabla Nro 5.4. Subcuenca de la quebrada Campo – hidrograma unitario adimensional (HUA). ..	111

Tabla Nro 5.5. Cuenca del río Whitewater – datos de precipitación y descarga.	112
Tabla Nro 5.6. Cuenca del río Whitewater – hidrograma unitario adimensional (HUA).	113
Tabla Nro 5.7. Cuenca del río Mojave – datos de precipitación y descarga.	114
Tabla Nro 5.8. Cuenca del río Mojave – hidrograma unitario adimensional (HUA).	115
Tabla Nro 5.9. Cuenca del río Amargosa – datos de precipitación y descarga.	116
Tabla Nro 5.10. Cuenca del río Amargosa – hidrograma unitario adimensional (HUA).	117
Tabla Nro 5.11. Subcuenca del río Petaluma – datos de precipitación y descarga.	118
Tabla Nro 5.12. Subcuenca del río Petaluma – hidrograma unitario adimensional (HUA).	119
Tabla Nro 5.13. Cuenca del río Russian – datos de precipitación y descarga.	120
Tabla Nro 5.14. Cuenca del río Russian – hidrograma unitario adimensional (HUA).	121
Tabla Nro 5.15. Subcuenca de la quebrada Los Gatos – datos de precipitación y descarga. .	122
Tabla Nro 5.16. Subcuenca de la quebrada Los Gatos – hidrograma unitario adimensional (HUA).	123
Tabla Nro 5.17. Cuenca de la quebrada Cottonwood – datos de precipitación y descarga.	124
Tabla Nro 5.18. Cuenca de la quebrada Cottonwood – hidrograma unitario adimensional (HUA).	125
Tabla Nro 5.19. Cuenca del río Salinas – datos de precipitación y descarga.	126
Tabla Nro 5.20. Cuenca del río Salinas – hidrograma unitario adimensional (HUA).	127
Tabla Nro 5.21. Cuenca del río Shasta – datos de precipitación y descarga.	128
Tabla Nro 5.22. Cuenca del río Shasta – hidrograma unitario adimensional (HUA).	129
Tabla Nro 5.23. Resumen de los parámetros geomorfológicos y de la CRL.	131
Tabla Nro 5.24. Resumen de las correlaciones del número de difusión D	136

FIGURAS

Figura Nro 2.1. Concepto de hidrograma unitario.	4
Figura Nro 2.2.a. Propiedad de linealidad.	5
Figura Nro 2.2.b. Retardo del hidrograma unitario.	5
Figura Nro 2.2.c. Propiedad de superposición.	6
Figura Nro 2.3. Flujo de ingreso, flujo de salida y cambio de almacenamiento del reservorio. ...	8

Figura Nro 2.4. Discretización de la ecuación de almacenamiento sobre el plano $x-t$.	9
Figura Nro 2.5. Discretización del espacio-tiempo en el método de cascada de reservorios lineales.	13
Figura Nro 2.6. Difusión de la esorrentía a través de un reservorio.	18
Figura Nro 2.7. Celeridad de propagación de la onda en un canal de flujo superficial.	19
Figura Nro 2.8. Olas ondulantes en canal escalonado, Irrigación Cabana – Mañazo, Puno, Perú.	21
Figura Nro 2.9. Esquemmatización del modelo de libro abierto.	22
Figura Nro 2.10. Hidrogramas adimensionales de esorrentía en la cuenca.	23
Figura Nro 2.11. Hidrogramas adimensionales crecientes en el flujo superficial.	24
Figura Nro 3.1. Convolución y convolución inversa.	31
Figura Nro 3.2 (a) Hidrograma unitario adimensional para $C=2$.	39
Figura Nro 3.2 (b) Hidrograma unitario adimensional para $C=1.5$.	39
Figura Nro 3.2 (c) Hidrograma unitario adimensional para $C=1$.	40
Figura Nro 3.2 (d) Hidrograma unitario adimensional para $C=0.5$.	40
Figura Nro 3.2 (e) Hidrograma unitario adimensional para $C=0.2$.	41
Figura Nro 3.2 (f) Hidrograma unitario adimensional para $C=0.1$.	41
Figura Nro 3.3 (a) Hidrograma unitario adimensional para $N=1$.	42
Figura Nro 3.3 (b) Hidrograma unitario adimensional para $N=2$.	43
Figura Nro 3.3 (c) Hidrograma unitario adimensional para $N=3$.	43
Figura Nro 3.3 (d) Hidrograma unitario adimensional para $N=4$.	44
Figura Nro 3.3 (e) Hidrograma unitario adimensional para $N=5$.	44
Figura Nro 3.3 (f) Hidrograma unitario adimensional para $N=6$.	45
Figura Nro 4.1. Vista aérea de la subcuenca de la quebrada Campo.	58
Figura Nro 4.2. Mapa hidrológico de la subcuenca de la quebrada Campo.	58
Figura Nro 4.3 (a) Hidrograma de inundación de la quebrada Campo Nro. 1 – Año 1983.	60
Figura Nro 4.3 (b) Hidrograma de inundación de la quebrada Campo Nro. 2 – Año 1993.	60
Figura Nro 4.3 (c) Hidrograma de inundación de la quebrada Campo Nro. 3 – Año 1998.	60

Figura Nro 4.4. Vista aérea de la cuenca del río Whitewater.	63
Figura Nro 4.5. Mapa hidrológico de la cuenca del río Whitewater.	63
Figura Nro 4.6. Mapa de precipitación media anual de la cuenca del río Whitewater.....	64
Figura Nro 4.7 (a) Hidrograma de inundación del río Whitewater Nro. 1 – Año 2008.	65
Figura Nro 4.7 (b) Hidrograma de inundación del río Whitewater Nro. 2 – Año 2008.	66
Figura Nro 4.7 (c) Hidrograma de inundación del río Whitewater Nro. 3 – Año 2015.	66
Figura Nro 4.8. Vista aérea de la cuenca del río Mojave.	68
Figura Nro 4.9. Mapa hidrológico de la cuenca del río Mojave.....	69
Figura Nro 4.10. Mapa de precipitación media anual de la cuenca del río Mojave.	69
Figura Nro 4.11 (a) Hidrograma de inundación del río Mojave Nro. 1 – Año 2010.	71
Figura Nro 4.11 (b) Hidrograma de inundación del río Mojave Nro. 2 – Año 2017.	72
Figura Nro 4.11 (c) Hidrograma de inundación del río Mojave Nro. 3 – Año 2017.....	72
Figura Nro 4.12. Vista aérea de la cuenca del río Amargosa.	74
Figura Nro 4.13. Mapa hidrológico de la cuenca del río Amargosa.....	75
Figura Nro 4.14 (a) Hidrograma de inundación del río Amargosa Nro. 1 – Año 2003.....	76
Figura Nro 4.14 (b) Hidrograma de inundación del río Amargosa Nro. 2 – Año 2007.....	77
Figura Nro 4.14 (c) Hidrograma de inundación del río Amargosa Nro. 3 – Año 2010.....	77
Figura Nro 4.15. Río Petaluma en la ciudad de Petaluma, California.	78
Figura Nro 4.16. Estación hidrométrica del USGS en el río Petaluma.	78
Figura Nro 4.17. Vista aérea de la subcuenca del río Petaluma.	79
Figura Nro 4.18. Mapa hidrológico de la subcuenca del río Petaluma.	80
Figura Nro 4.19 (a) Hidrograma de inundación del río Petaluma Nro. 1 – Año 2000.....	81
Figura Nro 4.19 (b) Hidrograma de inundación del río Petaluma Nro. 2 – Año 2002.....	82
Figura Nro 4.19 (c) Hidrograma de inundación del río Petaluma Nro. 3– Año 2010.....	82
Figura Nro 4.20. Río Russian en la comunidad de Gerseyville.	83
Figura Nro 4.21. Río Russian en la comunidad de Guerneville.....	83
Figura Nro 4.22. Vista aérea de la cuenca del río Russian.	84
Figura Nro 4.23. Mapa hidrológico de la cuenca del río Russian.	85

Figura Nro 4.24. Mapa de precipitación media anual de la cuenca del río Russian.....	85
Figura Nro 4.25 (a) Hidrograma de inundación del río Russian Nro. 1 – Año 1994.....	87
Figura Nro 4.25 (b) Hidrograma de inundación del río Russian Nro. 2 – Año 1995.....	87
Figura Nro 4.25 (c) Hidrograma de inundación del río Russian Nro. 3 – Año 1998.....	87
Figura Nro 4.26. Quebrada Los Gatos en la comunidad de Coalinga, California.....	88
Figura Nro 4.27. Vista aérea de la subcuenca de la quebrada Los Gatos.....	89
Figura Nro 4.28. Mapa hidrológico de la subcuenca de la quebrada Los Gatos.....	90
Figura Nro 4.29 (a) Hidrograma de inundación – quebrada Los Gatos Nro. 1 – Año 1977.....	91
Figura Nro 4.29 (b) Hidrograma de inundación – quebrada Los Gatos Nro. 2 – Año 1978.....	92
Figura Nro 4.29 (c) Hidrograma de inundación – quebrada Los Gatos Nro. 3 – Año 1978.....	92
Figura Nro 4.30. Quebrada Cottonwood en la comunidad de Cottonwood, California.....	93
Figura Nro 4.31. Vista aérea de la cuenca de la quebrada Cottonwood.....	94
Figura Nro 4.32. Mapa hidrológico de la cuenca de la quebrada Cottonwood.....	94
Figura Nro 4.33 (a) Hidrograma de inundación – quebrada Cottonwood Nro. 1 – Año 1993.....	96
Figura Nro 4.33 (b) Hidrograma de inundación – quebrada Cottonwood Nro. 2 – Año 1996.....	96
Figura Nro 4.33 (c) Hidrograma de inundación – quebrada Cottonwood Nro. 3 – Año 1998.....	96
Figura Nro 4.34. Vista aérea de la cuenca del río Salinas.....	99
Figura Nro 4.35. Mapa hidrológico de la cuenca del río Salinas.....	99
Figura Nro 4.36. Mapa de precipitación media anual de la cuenca del río Salinas.....	100
Figura Nro 4.37 (a) Hidrograma de inundación del río Salinas Nro. 1 – Año 1980.....	101
Figura Nro 4.37 (b) Hidrograma de inundación del río Salinas Nro. 2 – Año 1983.....	102
Figura Nro 4.37 (c) Hidrograma de inundación del río Salinas Nro. 3 – Año 1995.....	102
Figura Nro 4.38. Río Shasta en la comunidad de Montague, California.....	103
Figura Nro 4.39. Vista aérea de la cuenca del río Shasta.....	104
Figura Nro 4.40. Vista aérea de la cuenca del río Shasta.....	105
Figura Nro 4.41 (a) Hidrograma de inundación del río Shasta Nro. 1 – Año 2002.....	106
Figura Nro 4.41 (b) Hidrograma de inundación del río Shasta Nro. 2 – Año 2005.....	107
Figura Nro 4.41 (c) Hidrograma de inundación del río Shasta Nro. 3 – Año 2015.....	107

Figura Nro 5.1. Subcuenca de la quebrada Campo: Promedio medido vs. Predecido HUA. ..	111
Figura Nro 5.2. Cuenca del río Whitewater: Promedio medido vs. Predecido HUA.	113
Figura Nro 5.3. Cuenca del río Mojave: Promedio medido vs. Predecido HUA.	115
Figura Nro 5.4. Cuenca del río Amargosa: Promedio medido vs. Predecido HUA.	117
Figura Nro 5.5. Subcuenca del río Petaluma: Promedio medido vs. Predecido HUA.	119
Figura Nro 5.6. Cuenca del río Russian: Promedio medido vs. Predecido HUA.	121
Figura Nro 5.7. Subcuenca de la quebrada Los Gatos: Promedio medido vs. Predecido HUA.	123
Figura Nro 5.8. Cuenca de la quebrada Cottonwood: Promedio medido vs. Predecido HUA..	125
Figura Nro 5.9. Cuenca del río Salinas: Promedio medido vs. Predecido HUA.	127
Figura Nro 5.10. Cuenca del río Shasta: Promedio medido vs. Predecido HUA.	129
Figura Nro 5.11. Pares de C/N para las cuencas estudiadas.	132
Figura Nro 5.12. Q_p^* vs. T_p^* para las cuencas estudiadas.	133
Figura Nro 5.13. Número de difusión D vs. Área de drenaje de la cuenca A	134
Figura Nro 5.14. Número de difusión D vs. Pendiente promedio de la superficie del terreno S_0	134
Figura Nro 5.15. Número de difusión D vs. Pendiente del canal principal S_1	135
Figura Nro 5.16. Número de difusión D vs. Pendiente del canal principal S_2	135
Figura Nro 5.17. Número de reservorios lineales N vs. Área de drenaje de la cuenca A	136
Figura Nro 5.18. Número de reservorios lineales N vs. Pendiente del canal principal S_1	137
Figura Nro 5.19. Hidrograma unitario adimensional predecido para ejemplo aplicativo.	138
Figura Nro 5.20. Hidrograma unitario predecido para ejemplo aplicativo.	138



CAPÍTULO 1. GENERALIDADES

1.1. INTRODUCCIÓN

El concepto de hidrograma unitario está bien establecido en la investigación y práctica de la ingeniería hidrológica. El hidrograma unitario se define como el hidrograma producido por una profundidad unitaria de escorrentía uniformemente distribuida sobre toda la cuenca y con una duración unitaria específica. El concepto se ha utilizado desde la década de 1930 para la simulación de flujos de inundación en todo el mundo (Sherman, 1932).

El hidrograma unitario adimensional general (HUAG), fue desarrollado por Ponce (2009a, 2009b), es una formulación adimensional del hidrograma unitario. El HUAG asocia efectivamente la técnica de convolución (del hidrograma unitario) con el modelo de cascada de reservorios lineales (CRL), originalmente debido a Nash (1957). El modelo CRL constituye de componente de tránsito de varios modelos hidrológicos que se han desarrollado desde entonces alrededor de todo el mundo, en particular el modelo SSARR (U.S. Army Engineer North Pacific Division, 1972).

Este estudio intentó validar el modelo HUAG utilizando información de cuencas de California. La información geográfica y los datos de precipitación-escorrentía del Estado de California están disponibles en la web; esto facilitó la recopilación y análisis. Los mapas de elevación digital (DEM) están disponibles en las plataformas virtuales del USGS como Earth Explorer y Alaska Satellite Facility. La información de precipitación está disponible en la plataforma virtual del NOAA como National Centers for Environmental Information. La información de descargas está disponible en la plataforma virtual del USGS como National Water Information System.

Para el estudio se seleccionaron y analizaron diez (10) cuencas de California. Con la finalidad de estudiar la difusión del hidrograma unitario, las cuencas abarcaron un amplio rango de valores de parámetros geomorfológicos (área de drenaje, pendiente promedio superficial del terreno, y pendiente del canal principal). Los análisis conceptuales y estadísticos fueron utilizados para desarrollar una



metodología de predicción de hidrogramas unitarios en base a la geomorfología local/regional de la cuenca. Dada la perspectiva del calentamiento global y su efecto de aumento en los flujos de inundación, la oportunidad de este esfuerzo no puede ser exagerado.

1.2. OBJETIVOS

Los objetivos del estudio son:

General:

Validar el modelo del hidrograma unitario adimensional general (HUAG) utilizando parámetros geomorfológicos adecuados.

Específicos:

1. Seleccionar diez (10) cuencas de California para detallar su análisis conceptual y estadístico.
2. Para cada cuenca:
 - A. Producir un grupo de mapas y calcular los parámetros geomorfológicos relacionados utilizando SIG.
 - B. Calcular los hidrogramas promedio medido y predecido siguiendo la metodología del HUAG descrita en este estudio.
3. Identificar el parámetro de difusión para caracterizar mejor la difusión del hidrograma unitario.
4. Usar correlaciones estadísticas para desarrollar una herramienta predictiva para hidrogramas unitarios locales y regionales.

1.3. ALCANCES

Este estudio abarcó el desarrollo de un modelo predictivo para calcular hidrogramas unitarios en base a la geomorfología local/regional. El esfuerzo enfatizado en esta metodología es conceptual, basada en el tiempo-prueba de la teoría de la cascada de reservorios lineales. El enfoque central del hidrograma unitario adimensional general (HUAG) como teoría unificadora, realza el ejercicio de la validación.



CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1. HIDROGRAMA UNITARIO

Durante el siglo pasado, el hidrograma unitario (HU) se ha utilizado como una metodología para generar flujos de inundación para cuencas de tamaño mediano a grande (Ponce, V. M., 1989), (Ponce, V. M., 2014a). En 1930, el Comité de Inundaciones de la Sociedad de Ingenieros Civiles de Boston, después de un estudio de hidrogramas de inundación en Nueva Inglaterra, concluyó en la siguiente referencia (Hoyt, 1936, p. 123):

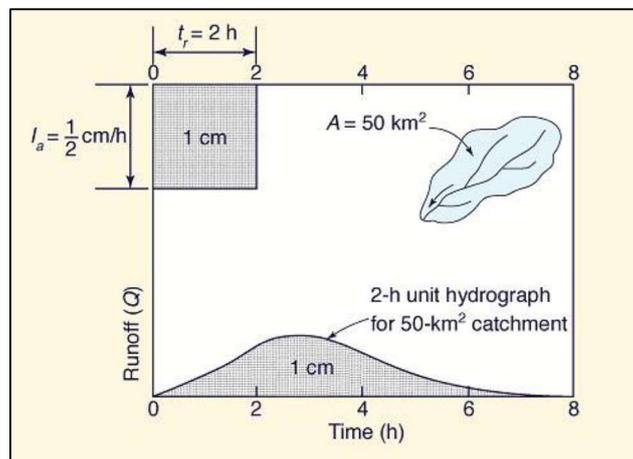
"...que un hidrograma de inundación una vez determinado para un río determinado, incluso para una inundación ordinaria, servirá de base para la estimación de la escorrentía máxima de inundación de una cuenca, debido a que la base característica del hidrograma de inundación (o periodo de tiempo de inundación) parece ser aproximadamente constante para diferentes inundaciones."

Esta declaración puede ser interpretada de la siguiente manera: Para una cuenca de determinada área de drenaje A , dándole un simple evento de precipitación de profundidad efectiva d y duración t_r , que cubra su área entera, el volumen de escorrentía V_r y consecuentemente el pico del flujo Q_p , son proporcionales a la intensidad de precipitación efectiva d/t_r . En otras palabras, la respuesta del hidrograma (Q) es lineal con respecto a la intensidad y, por lo tanto, independiente del tiempo base T_b .

(Sherman, 1932) elaboró sobre este concepto el desarrollo de estudios del hidrograma unitario para inundación en grandes cuencas. Normalmente, se entiende que la palabra unidad se refiere a una profundidad unitaria de lluvia efectiva o escorrentía. Sin embargo, debe observarse que Sherman primero utilizó la palabra para describir una unidad de profundidad de escorrentía (1 cm o 1 in.) durante un incremento de tiempo unitario, es decir, un incremento indivisible. La unidad de incremento de tiempo puede ser 1 h, 3 h, 6 h, 12 h, 24 h, o cualquier otro tipo duración (Ponce, V. M., 2014a).

El hidrograma unitario se define como el hidrograma producido por una unidad de profundidad de escorrentía distribuida uniformemente sobre una cuenca entera y que tiene una duración unitaria de tiempo específico.

Para ilustrar el concepto del hidrograma unitario, supongamos que cierta tormenta produce 1 cm de escorrentía y cubre una cuenca de 50 km² durante un periodo de tiempo de 2 h. El hidrograma medido en la salida de la cuenca debe ser un hidrograma unitario de 2 h para esta cuenca de 50 km² (Fig. 2.1).

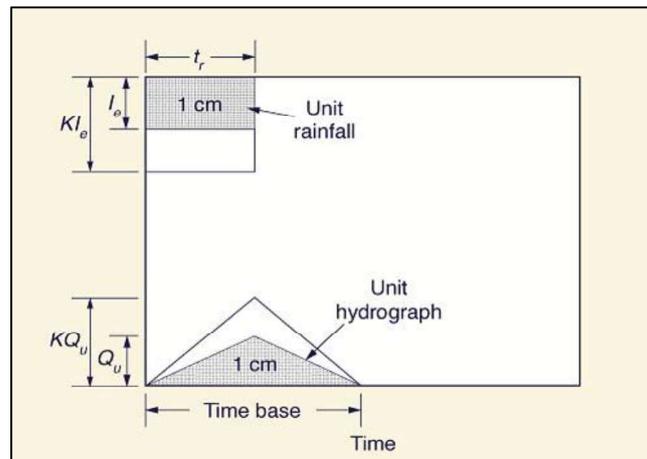


Fuente: Engineering Hydrology, Principles and Practices. Víctor M. Ponce, 2014.

Figura Nro 2.1. Concepto de hidrograma unitario.

Dos asunciones son cruciales para el desarrollo del hidrograma unitario: (1) *Linealidad*, y (2) *Superposición*. Dado un hidrograma unitario, un hidrograma para otra unidad de profundidad de escorrentía puede obtenerse simplemente multiplicando las ordenadas del hidrograma unitario por la profundidad de escorrentía indicada (*linealidad*), como se muestra en la Fig. 2.2 (a).

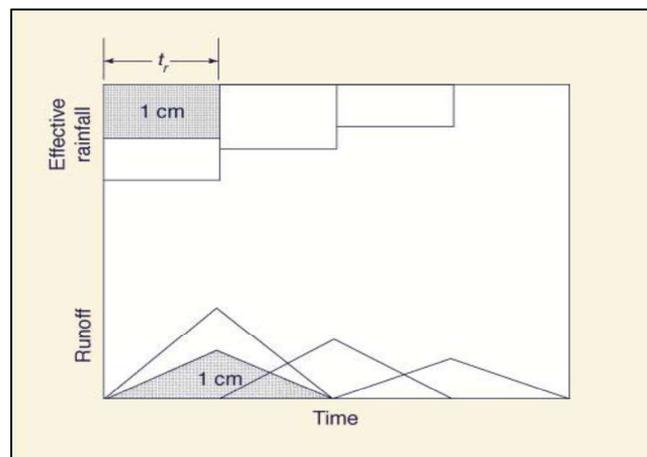
Esto, por supuesto, es posible sólo bajo la asunción donde el tiempo base permanece independientemente constante de la profundidad de escorrentía.



Fuente: Engineering Hydrology, Principles and Practices. Víctor M. Ponce, 2014.

Figura Nro 2.2.a. Propiedad de linealidad.

El tiempo base de todos los hidrogramas obtenidos de esta manera es igual a la del hidrograma unitario. Por lo tanto, el procedimiento puede utilizarse para calcular hidrogramas producidos por una tormenta consistente o una serie de profundidades de escorrentía, cada retardo en tiempo incrementa la duración del hidrograma unitario, como se muestra en Fig. 2.2 (b).

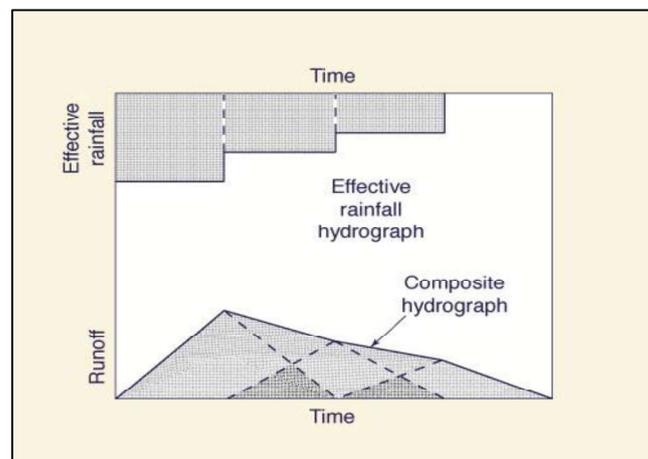


Fuente: Engineering Hydrology, Principles and Practices. Víctor M. Ponce, 2014.

Figura Nro 2.2.b. Retardo del hidrograma unitario.

La sumatoria de las ordenadas correspondientes de los hidrogramas (*superposición*) permite el cálculo del hidrograma compuesto, como se muestra en la Fig. 2.2 (c). El procedimiento mostrado en la Fig. 2.2 es referente a la convolución de un hidrograma unitario con un patrón de tormenta efectiva

(hietograma). En esencia, el procedimiento equivale a decir que las ordenadas del hidrograma compuesto son una combinación lineal de las ordenadas del hidrograma unitario.



Fuente: Engineering Hydrology, Principles and Practices. Víctor M. Ponce, 2014.

Figura Nro 2.2.c. Propiedad de superposición.

La asunción de linealidad ha sido largamente considerada como una de las limitaciones de la teoría del hidrograma unitario. En la naturaleza, es improbable que la respuesta de una cuenca siempre sea una función lineal. Por una parte, la descarga y la velocidad media son funciones no lineales de la profundidad de flujo y almacenamiento. En la práctica, sin embargo, la asunción lineal proporciona un medio conveniente para calcular la respuesta de la escorrentía sin asociar complejidades con el análisis no lineal.

El límite superior de aplicabilidad del hidrograma unitario no está muy bien definido. (Sherman, 1932) lo utilizó en conexión con cuencas que varían de 1300 a 8000 km². (Linsley, Kohler, & y Paulhus, 1962) mencionan un límite superior de 5000 km² para preservar la precisión. Más recientemente, el hidrograma unitario se ha relacionado con el concepto de cuenca media, es decir, mayor a 2.5 km² y menor de 250 km².

Esto ciertamente no impide que la técnica del hidrograma unitario sea aplicable a cuencas mayores de 250 km², aunque es probable que la precisión tienda a disminuir con un incremento en el tamaño de la cuenca (Ponce, V. M., 2014a).



2.2. TRÁNSITO DE ALMACENAMIENTO Y RESERVORIOS LINEALES

Como se muestra en la sección 2.3, los conceptos del hidrograma unitario y la cascada de reservorios lineales están intrínsecamente conectados. La cascada es efectivamente una serie de reservorios lineales, y esta última es una manera de determinar el tránsito de almacenamiento. Por lo tanto, esta sección aborda el tránsito de almacenamiento y reservorios lineales.

Las técnicas para tránsito de almacenamiento son invariablemente basadas en la ecuación diferencial de almacenamiento de agua. Esta ecuación es fundamentada sobre el principio de conservación de masa, que establece que el cambio en el flujo por unidad de longitud en un volumen de control es equilibrado por un cambio de área de flujo por unidad de tiempo. En forma diferencialmente parcial se puede expresar de la siguiente manera:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (2-1)$$

En dónde: Q = rango de caudal, A = área de flujo, x = espacio (longitud), y t = tiempo.

La ecuación diferencial de almacenamiento se obtiene agrupando variaciones espaciales. Para este propósito, la Ec. 2-1 es expresada en incrementos finitos:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta x} + \frac{\Delta A}{\Delta t} = 0 \quad (2-2)$$

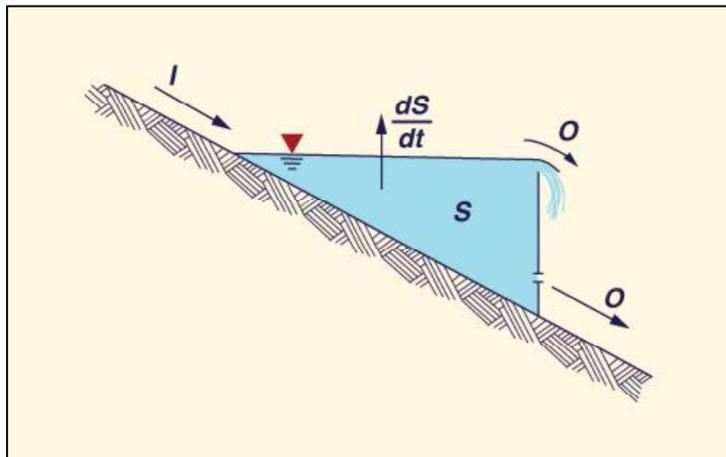
En dónde: $\Delta Q = O - I$, donde O = flujo de salida, e I = flujo de ingreso; y $\Delta S = \Delta A \Delta x$, donde ΔS = cambio del volumen de almacenamiento, la Ec. 2-2 se reduce a:

$$I - O = \frac{\Delta S}{\Delta t} \quad (2-3)$$

En dónde flujo de ingreso, flujo de salida, y rango de cambio de almacenamiento son expresados en unidades de L^3T^{-1} . Además, la Ec. 2-3 puede ser expresado de forma diferencial, originando la ecuación diferencial de almacenamiento.

$$I - O = \frac{dS}{dt} \quad (2-4)$$

La Ec. 2-4 implica que cualquier diferencia entre el flujo de ingreso y el flujo de salida este equilibrado por un cambio de almacenamiento en el tiempo (Fig. 2.3). En una típica aplicación de tránsito de reservorios, el hidrograma de flujo de ingreso (condición de borde aguas arriba), el almacenamiento y flujo de salida inicial (condiciones iniciales), y las características físicas y operacionales del reservorio son conocidas. Por lo tanto, el objetivo es calcular el hidrograma del flujo de salida para la condición inicial, la condición de borde aguas arriba, las características del reservorio, y sus reglas operacionales.



Fuente: Engineering Hydrology, Principles and Practices. Víctor M. Ponce, 2014.

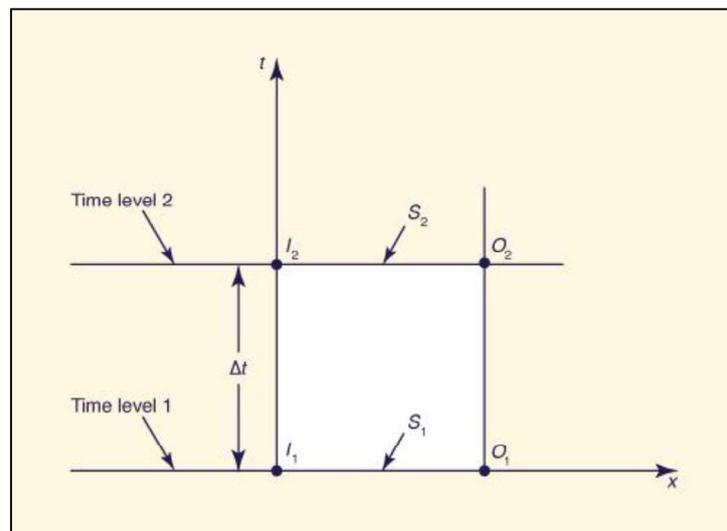
Figura Nro 2.3. Flujo de ingreso, flujo de salida y cambio de almacenamiento del reservorio.

La Ec. 2-4 puede ser solucionada de manera analítica o numérica. El enfoque numérico es usualmente preferido porque puede calcular un hidrograma de flujo de ingreso arbitrario. La solución se obtiene discretizando la Ec. 2-4 sobre el plano $x-t$, mostrando un gráfico de valores de una cierta variable en puntos discretos en tiempo y espacio (Fig. 2.4)

La Fig. 2.4 muestra dos niveles de tiempo consecutivos, 1 y 2, separados por un intervalo Δt , y dos ubicaciones espaciales que representan el flujo de ingreso y flujo de salida, con un reservorio ubicado entre ellos. La discretización de la Ec. 2-4 sobre el plano $x-t$ es:

$$\frac{I_1+I_2}{2} - \frac{O_1+O_2}{2} = \frac{S_2-S_1}{\Delta t} \quad (2-5)$$

En dónde: I_1 = flujo de ingreso en el nivel del tiempo 1; I_2 = flujo de ingreso en el nivel de tiempo 2; O_1 = flujo de salida en el nivel de tiempo 1; O_2 = flujo de salida en el nivel de tiempo 2; S_1 = almacenamiento en el nivel del tiempo 1; S_2 = almacenamiento en el nivel de tiempo 2; y Δt = intervalo de tiempo. La Ec. 2-5 establece que entre dos niveles de tiempo 1 y 2 se encuentra un intervalo de tiempo Δt , y que el promedio del flujo de ingreso menos el promedio del flujo de salida es igual al cambio de almacenamiento (Ponce, V. M., 2014a).



Fuente: Engineering Hydrology, Principles and Practices. Víctor M. Ponce, 2014.

Figura Nro 2.4. Discretización de la ecuación de almacenamiento sobre el plano $x-t$.

Para reservorios lineales, la relación entre el almacenamiento y el flujo de salida es lineal. Por lo tanto:

$$S_1 = KO_1 \quad (2-6a)$$

y,

$$S_2 = KO_2 \quad (2-6b)$$

En dónde: K = constante de almacenamiento en unidades T .

Sustituyendo la Ec. 2-6 dentro de la Ec. 2-5, obtenemos para O_2 :



$$O_2 = C_0 I_2 + C_1 I_1 + C_2 O_1 \quad (2-7)$$

En dónde: C_0 , C_1 y C_2 son coeficientes de tránsito definidos a continuación:

$$C_0 = \frac{\Delta t/K}{2+(\Delta t/K)} \quad (2-8a)$$

$$C_1 = C_0 \quad (2-8b)$$

$$C_2 = \frac{2-(\Delta t/K)}{2+(\Delta t/K)} \quad (2-8c)$$

Como $C_0 + C_1 + C_2 = 1$, los coeficientes de tránsito son interpretados como coeficientes de ponderación. Estos coeficientes de tránsito están en función de $\Delta t/K$, y el ratio del intervalo de tiempo de almacenamiento es constante. Por lo tanto, los valores de los coeficientes de tránsito son una función de $\Delta t/K$, dados en la Tabla 2.1.

Tabla Nro 2.1. Coeficientes de tránsito de reservorio lineal.

(1)	(2)	(3)	(4)
$\Delta t/K$	C_0	C_1	C_2
1/8	1/17	1/17	15/17
1/4	1/9	1/9	7/9
1/2	1/5	1/5	3/5
3/4	3/11	3/11	5/11
1	1/3	1/3	1/3
5/4	5/13	5/13	3/13
3/2	3/7	3/7	1/7
7/4	7/15	7/15	1/15
2	1/2	1/2	0
4	2/3	2/3	-1/3
6	3/4	3/4	-1/2
8	4/5	4/5	-3/5

Fuente: Engineering Hydrology, Principles and Practices. Víctor M. Ponce, 2014.



Un reservorio ejerce una acción difusiva sobre el flujo, con el resultado neto de que el pico del flujo es atenuado y, en consecuencia, incrementa el tiempo base. Para el caso de un reservorio lineal, la cantidad de atenuación está en función de $\Delta t/K$. Cuando menor es la relación, mayor es la cantidad de atenuación ejercida por el reservorio; inversamente, valores grandes de $\Delta t/K$ causan menos atenuación. Nótese que los valores de $\Delta t/K > 2$ producen atenuaciones negativas (observe los valores negativos de C_2 en la Col. 4, Table 2.1). Esto equivale a la amplificación; por lo tanto, los valores de $\Delta t/K > 2$ no son utilizados en tránsito de reservorios (Ponce, V. M., 2014a).

2.3. LA CASCADA DE RESERVIORIOS LINEALES

La cascada de reservorios lineales es un método ampliamente utilizado para tránsito hidrológico de una cuenca. Como su nombre lo indica, el método se basa en la conexión en serie de varios reservorios lineales. Para N reservorios, el flujo de salida del primero debe tomarse como el flujo de ingreso del segundo, el flujo de salida del segundo es el flujo de ingreso del tercero, y así sucesivamente, hasta que el flujo de salida del reservorio $(N - 1)^{th}$, sea tomado como el flujo de ingreso del reservorio N^{th} . El flujo de salida del reservorio N^{th} es tomado como el flujo de salida de la cascada de reservorios lineales.

Cada reservorio de la serie provee de cierta cantidad de difusión y retardo asociado. Para un grupo de parámetros $\Delta t/K$ y N , el flujo de salida del último reservorio está en función del flujo de entrada del primer reservorio. De esta manera, un primer parámetro del método de reservorio lineal ($\Delta t/K$) es extendido para un segundo parámetro del método de tránsito en una cuenca. La adición del segundo parámetro (N) provee de una considerable flexibilidad en simulaciones de rango amplio de difusión y de efectos de retardo asociados. El método ha sido ampliamente utilizado en simulación de cuencas, principalmente en aplicaciones que involucran grandes cuencas hidrográficas. La información de precipitación-escorrentía puede ser utilizada para calibrar el método, es decir, para determinar el grupo de parámetros $\Delta t/K$ y N que producen el mejor ajuste a los datos medidos.



La solución de la cascada de reservorios lineales puede realizarse de dos maneras: (1) analítica, y (2) numérica. La versión analítica se debe a (Nash, 1957), quien originó el concepto del hidrograma unitario instantáneo (HUI) (Sección 2.4). Según Nash, el hidrograma unitario instantáneo se obtiene cuando la duración t_r de un hidrograma unitario se reduce indefinidamente, es decir, $t_r \Rightarrow 0$. Nash asumió que el HUI puede representarse como la cascada de reservorios lineales.

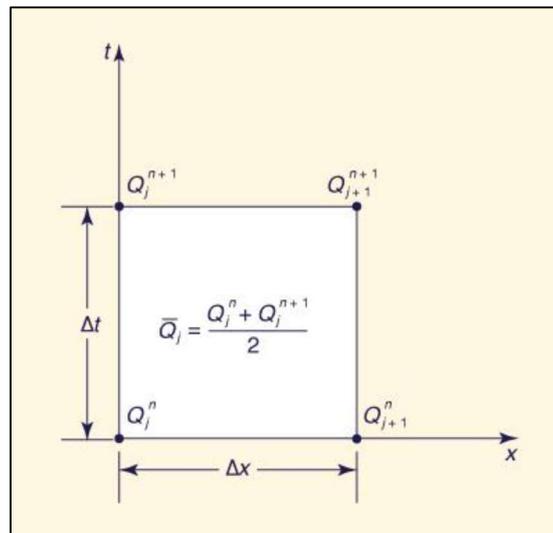
La versión numérica de la cascada de reservorios lineales se presenta en varios modelos de simulación hidrológica desarrollados en los Estados Unidos y otros países. Entre ellos destaca el modelo de Síntesis de Corriente y Regulación de Reservorios – Stream Synthesis and Reservoir Regulation (SSARR), que se utiliza en los módulos de cuenca, tránsito de canal de corriente, y flujo base. El modelo SSARR ha estado en proceso de desarrollo y aplicación desde 1956. El modelo fue desarrollado para satisfacer las necesidades de la División del Pacífico Norte del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos en el área de simulación matemática hidrológica para la planificación, diseño, y operación de trabajos de control del agua (U.S. Army Engineer North Pacific Division, 1972).

El modelo SSARR se aplicó por primera vez para actividades de predicción de caudales de operación y gestión de ríos en el sistema del río Columbia. Posteriormente, fue utilizado por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos, el Servicio Nacional de Meteorología, y la Administración Energética de Bonneville. Numerosos sistemas de ríos en los Estados Unidos y otros países han sido modelados con SSARR.

Para derivar la ecuación de tránsito para el método de cascada de reservorios lineales, la Ec. 2-7 es reproducida en la siguiente forma diferencial:

$$Q_{j+1}^{n+1} = C_0 Q_j^{n+1} + C_1 Q_j^n + C_2 Q_{j+1}^n \quad (2-9)$$

En dónde: Q representa la descarga, ya sea flujo de ingreso o flujo de salida. Mientras que, j y n son indicativos de espacio y tiempo, respectivamente (Fig. 2.5).



Fuente: Engineering Hydrology, Principles and Practices. Víctor M. Ponce, 2014.

Figura Nro 2.5. Discretización del espacio-tiempo en el método de cascada de reservorios lineales.

Como en la Ec. 2-7, los coeficientes de tránsito C_0 , C_1 y C_2 son una función de la relación adimensional $\Delta t/K$. Esta relación es propiamente el número de Courant ($C = \Delta t/K$). En términos del número de Courant, las Ec. 2-8 pueden expresarse a continuación:

$$C_0 = \frac{C}{2+C} \quad (2-$$

10a)

$$C_1 = C_0 \quad (2-$$

10b)

$$C_2 = \frac{2-C}{2+C} \quad (2-10c)$$

Para la aplicación del tránsito de una cuenca, es conveniente definir el promedio del flujo de entrada como se muestra a continuación:

$$Q_j = \frac{Q_j^n + Q_{j+1}^{n+1}}{2} \quad (2-11)$$

Sustituyendo las Ec. 2-10b y 2-11 dentro de la Ec. 2-9 se obtiene lo siguiente:



$$Q_{j+1}^{n+1} = 2C_1 Q_j + C_2 Q_{j+1}^n \quad (2-12)$$

O, alternativamente, a través de una manipulación algebraica:

$$Q_{j+1}^{n+1} = \frac{2C}{2+C} [Q_j - Q_{j+1}^n] + Q_{j+1}^n \quad (2-13)$$

Las Ec. 2-12 y 2-13 son una forma conveniente para el tránsito de cuenca porque el flujo de ingreso es usualmente un hietograma de precipitación, es decir, un valor de promedio constante por intervalo de tiempo. Notando que las Ec. 2-12 y 2-13 son idénticas. La Ec. 2-12 fue presentada por Ponce en su versión de la cascada de reservorios lineales (Ponce, V. M., 2014a). Mientras que, la Ec. 2-13 es la ecuación de tránsito del modelo SSARR (U.S. Army Engineer North Pacific Division, 1972).

Valores pequeños de C conllevan a grandes cantidades de difusión de la escorrentía. Para valores de $C > 2$, el comportamiento de la Ec. 2-12 (o Ec. 2-13) depende en gran medida del tipo de entrada. Por ejemplo, en el caso de un impulso unitario (duración de la precipitación igual al intervalo de tiempo), la Ec. 2-12 (o Ec. 2-13) da como resultado valores negativos de flujo de salida, es decir, inestabilidad numérica. En la práctica, la Ec. 2-12 (o Ec. 2-13) están restringidos a $C \leq 2$.

La cascada de reservorios lineales proporciona un mecanismo conveniente para simular una amplia gama de problemas de tránsito de cuencas. Además, el método puede ser aplicado por separado para cada componente de la escorrentía (escorrentía superficial, escorrentía subsuperficial, y flujo base), y la respuesta de la cuenca puede tomarse como la suma de todas las respuestas de las componentes individuales.

Por ejemplo, supongamos que una cuenca tiene 10 cm de escorrentía, de los cuales 7 cm son de escorrentía superficial, 2 cm son de escorrentía subsuperficial y 1 cm es flujo base. Dado que la escorrentía superficial es el proceso de menor difusión, puede ser simulado con un número de Courant alto, digamos $C = 1$, y un número pequeño de reservorios, digamos $N = 3$. La escorrentía subsuperficial es mucho más difusiva que la escorrentía superficial; por lo tanto, puede ser simulado



con $C = 0.4$ y $N = 5$. El flujo base, que es muy difusivo, puede ser simulado con $C = 0.1$ y $N = 7$ (Ponce, V. M., 2014a).

2.4. HIDROGRAMA UNITARIO INSTANTÁNEO

Nash (1957) definió el hidrograma unitario instantáneo (HUI) como el obtenido cuando la duración t_r de la precipitación efectiva disminuye indefinidamente. Además, Nash representó el HUI como una serie de n reservorios lineales, es decir, una cascada de reservorios lineales.

Según Nash, la ecuación general para el hidrograma unitario instantáneo es:

$$u = -\frac{V}{K\Gamma(n)} e^{-t/K} (t/K)^{n-1} \quad (2-14)$$

En dónde: u = ordenada del hidrograma unitario, y t = tiempo. En la ecuación: V = volumen del hidrograma unitario; K = constante de almacenamiento, en unidades de tiempo; n = número de reservorios en serie; y $\Gamma(n)$ = función gamma.

La Ec. 2-14 es la versión analítica del HUI o de la cascada de reservorios lineales. La versión numérica es representada por el modelo de Ponce (Ec. 2-12) o del modelo SSARR (Ec. 2-13).

2.5. HIDROGRAMA UNITARIO INSTANTÁNEO GEOMORFOLÓGICO

Rodríguez – Iturbe y Valdés (1979) son pioneros en establecer la relación del hidrograma unitario instantáneo con las características geomorfológicas de una cuenca; ver también los trabajos complementarios (Rodríguez-Iturbe, I. y Valdés, J. B., 1979), (Valdés, J. B. et. al., 1979) y (Rodríguez-Iturbe, I. et. al., 1979).

Las características geomorfológicas son expresadas en términos de los siguientes parámetros de la cuenca:

1. Relación de bifurcación (ley de número de corrientes) R_B :

$$R_B = N_W / N_{W+1} \quad (2-15a)$$



En cualquier cuenca, N_W es el número de corrientes de orden W , y N_{W+1} es el número de corrientes de orden $W+1$. En la naturaleza, los valores normales de R_B están entre 3 a 5.

2. Relación de longitud (ley de longitudes de corrientes) R_L :

$$R_L = \bar{L}_W / \bar{L}_{W-1} \quad (2-15b)$$

En cualquier cuenca, \bar{L}_W es la longitud hidráulica promedio de orden W , y \bar{L}_{W-1} es la longitud hidráulica promedio de orden $W+1$. En la naturaleza, los valores normales de R_L están entre 1.5 a 3.5.

3. Relación de área (ley de áreas de corrientes) R_A :

$$R_A = \bar{A}_W / \bar{A}_{W-1} \quad (2-15c)$$

En cualquier cuenca, \bar{A}_W es el área promedio de orden W , y \bar{A}_{W-1} es el área promedio de orden $W+1$. En la naturaleza, los valores normales de R_A están entre 3 a 6.

4. El parámetro de escala interna L_Ω , se define como la longitud hidráulica de la cuenca de orden Ω .
5. El parámetro dinámico v , se define como la velocidad correspondiente a la descarga pico para un evento de precipitación – escorrentía dado en una cuenca.

Según (Rodríguez-Iturbe, I. y Valdés, J. B., 1979), las ecuaciones para calcular el hidrograma unitario instantáneo geomorfológico (HUIG) son:

$$q_p = \theta v \quad (2-16)$$

$$t_p = \kappa / v \quad (2-17)$$

En dónde: q_p = descarga pico, en unidades T^{-1} ; y t_p = tiempo pico, en unidades T .

Los parámetros θ y κ están en función de los parámetros de cuenca R_A , R_B , R_L y L_Ω , como se muestra:

$$\theta = (1.31/L_\Omega) R_L^{0.43} \quad (2-18)$$

$$\kappa = 0.44 L_\Omega R_B^{0.55} / (R_A^{0.55} R_L^{0.38}) \quad (2-19)$$



Los parámetros θ y κ tiene dimensiones de L^{-1} y L , respectivamente.

Las Ec. 2-18 y 2-19 se asumen para una cuenca de orden $\Omega = 3$, y una longitud hidráulica para una subcuenca de primer orden $L_1 = 1000$ m.

2.6. CONCEPTO DE DIFUSIÓN DE ESCORRENTÍA

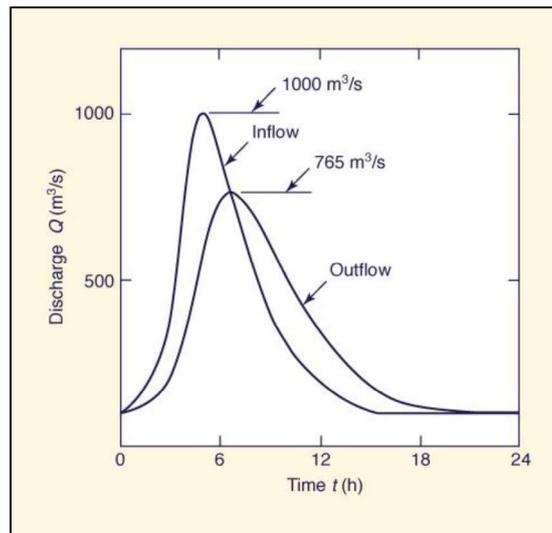
El hidrograma unitario busca calcular la difusión de la escorrentía, es decir, la extensión del hidrograma en el tiempo y el espacio. En la práctica, la cantidad de difusión de escorrentía depende de si el flujo está a través de: (a) un reservorio, (b) un corriente principal, o (c) una cuenca.

El flujo a través de un reservorio siempre produce difusión en la escorrentía. El flujo en una corriente principal puede o no, producir difusión en la escorrentía, dependiendo de la escala relativa de la onda del flujo, siempre que el número de Vedernikov sea menor a 1.

La escala relativa de la onda del flujo está relacionada cuando la onda es: (a) cinemática, (b) difusiva, o (c) mixta cinemática-dinámica. El flujo en cuencas, produce difusión: (1) para todo los tipos de ondas, cuando el tiempo de concentración excede la duración de la precipitación efectiva, o (2) para todas las duraciones de precipitación efectiva, cuando la onda es una onda difusiva (Ponce, V. M., 2014b).

2.6.1. Difusión de la escorrentía en reservorios

Los reservorios naturales o artificiales son características hidráulicas de superficies de agua que proveen difusión en la escorrentía. La difusión en la escorrentía es representada por una considerable atenuación sobre el hidrograma del flujo de ingreso, como se muestra en la Fig. 2.6.



Fuente: Engineering Hydrology, Principles and Practices. Víctor M. Ponce, 2014.

Figura Nro 2.6. Difusión de la escorrentía a través de un reservorio.

2.6.2. Difusión de la escorrentía en corrientes principales

Las corrientes principales, es decir, canales, son características hidráulicas de agua superficial que puede o no, proporcionar difusión de la escorrentía, dependiendo de la escala relativa de la distorsión (onda de flujo). La cantidad de difusión de la onda se caracteriza por el número adimensional de la onda σ , como se muestra en la Fig. 2.7. El número adimensional de la onda se define a continuación:

$$\sigma = \frac{2\pi}{L} L_0 \quad (2-20)$$

En dónde: 2π es por la frecuencia de oscilación de la onda, L = longitud de onda distorsionada, y L_0 = la longitud del canal en donde el flujo equilibrado que precipita en la cabecera es igual a su profundidad (Lighthill, M. J. y Whitham, G. B., 1955).

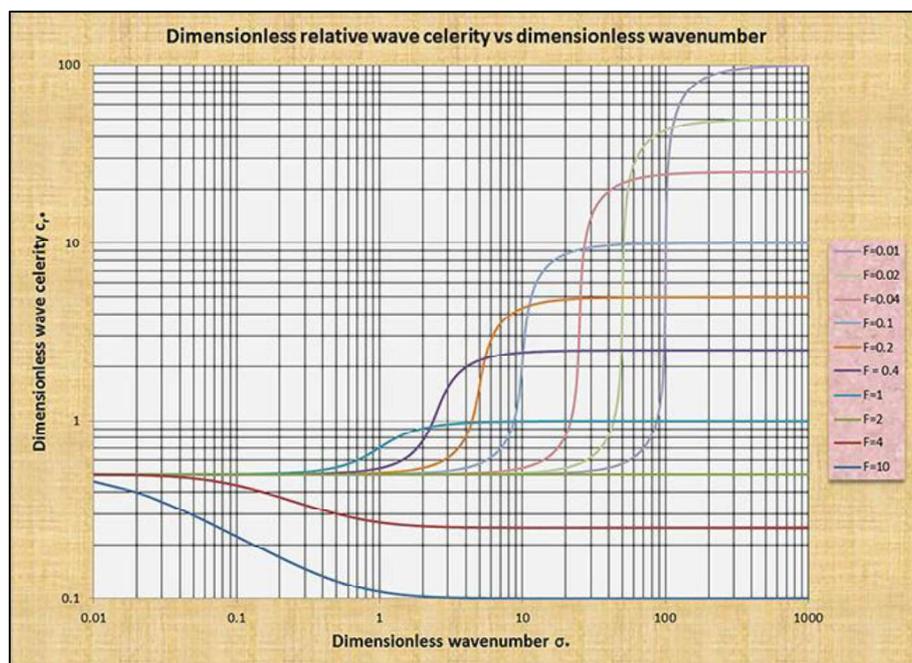
$$L_0 = \frac{d_0}{S_0} \quad (2-21)$$

Cuatro tipos de ondas son identificadas:

1. Onda cinemática,

2. Onda difusiva,
3. Onda mixta cinemática – dinámica, y
4. Onda dinámica.

Las ondas cinemáticas tienden a encontrarse en el lado izquierdo del espectro del número de onda, caracterizado por una constante celeridad de onda relativa adimensional y de cero atenuaciones. Las ondas dinámicas tienden a encontrarse al lado derecho, caracterizado por una constante celeridad de onda relativa adimensional y cero atenuaciones. Las ondas mixtas cinemáticas-dinámicas tienden a estar en el medio del espectro, caracterizado por una celeridad de onda relativa adimensional variable y una atenuación media para alta. Las ondas difusivas son intermedias entre las ondas cinemáticas y las ondas mixtas cinemáticas-dinámicas, caracterizadas por una atenuación leve. En la práctica de la ingeniería hidráulica, las ondas dinámicas son comúnmente referidas como ondas “cortas” de Lagrange, mientras que las ondas mixtas cinemáticas-dinámicas son comúnmente referidas como "ondas dinámicas", alimentando una confusión semántica.



Fuente: Journal of the Hydraulics Division, ASCE (Ponce, V. M. y Simons, D. B., 1977).

Figura Nro 2.7. Celeridad de propagación de la onda en un canal de flujo superficial.



Para cálculos de tránsito de flujo, las ecuaciones que rigen la continuidad y movimiento, comúnmente referidas como las ecuaciones de Saint Venant, pueden ser combinadas y alineadas dentro de una ecuación de convección-difusión considerando la descarga Q como variable dependiente (Hayami, S., 1951), (Dooge, J. C. I., 1973), (Dooge, J. C. et. al., 1982), (Ponce, V. M., 1991a), (Ponce, V. M., 1991b):

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \left(\frac{dQ}{dA}\right) \frac{\partial Q}{\partial X} = \left[\left(\frac{Q_0}{2TS_0}\right) (1 - V^2)\right] \frac{\partial^2 Q}{\partial X^2} \quad (2-22)$$

En dónde: V = número de Vedernikov, definido como la relación entre la celeridad relativa de la onda cinemática y la celeridad relativa de la onda dinámica (Ponce, V. M., 1991b):

$$V = \frac{(\beta-1)V_0}{(gd_0)^{1/2}} \quad (2-23)$$

En dónde: β = exponente de la proporción del área del flujo – descarga de $Q = A^\beta$, V_0 = velocidad media del flujo, d_0 = profundidad media del flujo, y g = aceleración de la gravedad.

En la Ec. 2-22, para $V = 0$, el coeficiente del término de segundo orden reduce la difusividad cinemática hidráulica, originalmente debido a (Hayami, S., 1951). Por otro lado, para $V = 1$, el coeficiente del término de segundo orden se reduce a cero, y el término de difusión se desvanece. Bajo esta última condición de flujo, todas las ondas, independientemente de la escala, viajan con la misma velocidad, fomentando el desarrollo de olas onduladas (Fig. 2.8).



Fuente: Engineering Hydrology, Principles and Practices. Víctor M. Ponce, 2014.

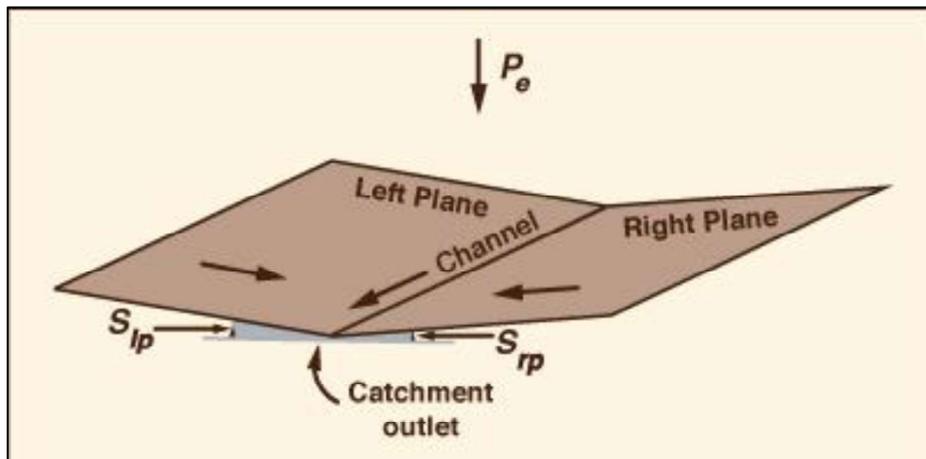
Figura Nro 2.8. Olas ondulantes en canal escalonado, Irrigación Cabana – Mañazo, Puno, Perú.

2.6.3. Difusión de la escorrentía en cuencas

La escorrentía superficial en cuencas puede ser de tres tipos (Ponce, V. M., 1989), (Ponce, V. M., 2014a):

1. Flujo concentrado, cuando la duración de la precipitación efectiva es igual al tiempo de concentración.
2. Flujo superconcentrado, cuando la duración de precipitación efectiva es mayor que el tiempo de concentración.
3. Flujo subconcentrado, cuando la duración de precipitación efectiva es menor que el tiempo de concentración.

La Fig. 2.9 muestra una típica esquematización de un libro abierto para modelar el flujo superficial. La entrada es la precipitación efectiva sobre dos planos adyacentes a un canal. La salida es el hidrograma de descarga de salida de la cuenca.

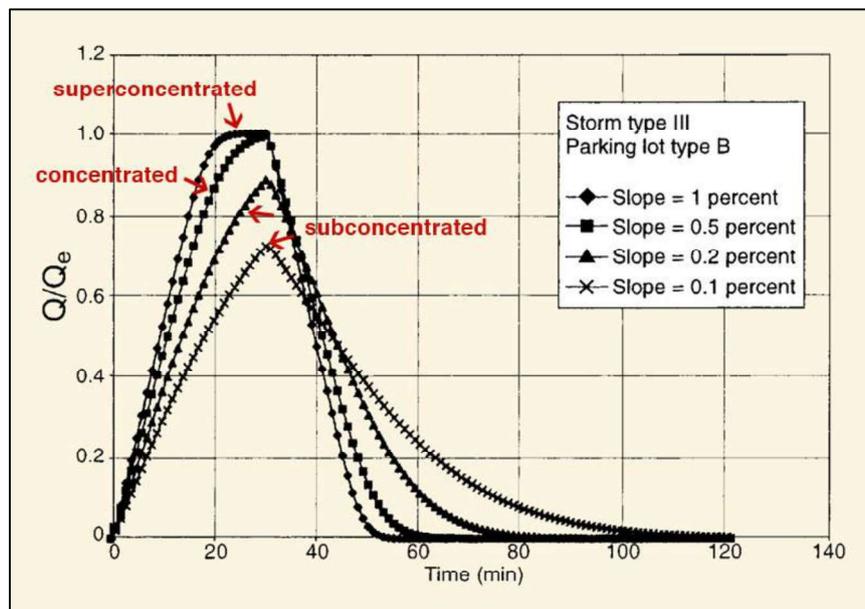


Fuente: Engineering Hydrology, Principles and Practices. Víctor M. Ponce, 2014.

Figura Nro 2.9. Esquemización del modelo de libro abierto.

La Fig. 2.10 muestra los hidrogramas adimensionales del caudal de salida de la cuenca para tres casos descritos previamente (Ponce, V. M. y Klabunde A. C., 1999). El pico máximo posible del flujo de salida es: $Q_p = I_e A$, en donde I_e = intensidad de precipitación efectiva, y A = área de la cuenca. Por definición, el pico máximo posible del caudal de salida es alcanzado para un flujo superconcentrado y concentrado. Sin embargo, en el caso del flujo subconcentrado, el caudal de pico máximo no alcanza su valor máximo posible. Efectivamente, esto equivale a la difusión de la escorrentía, porque el flujo actual se ha propagado en el tiempo (y espacio).

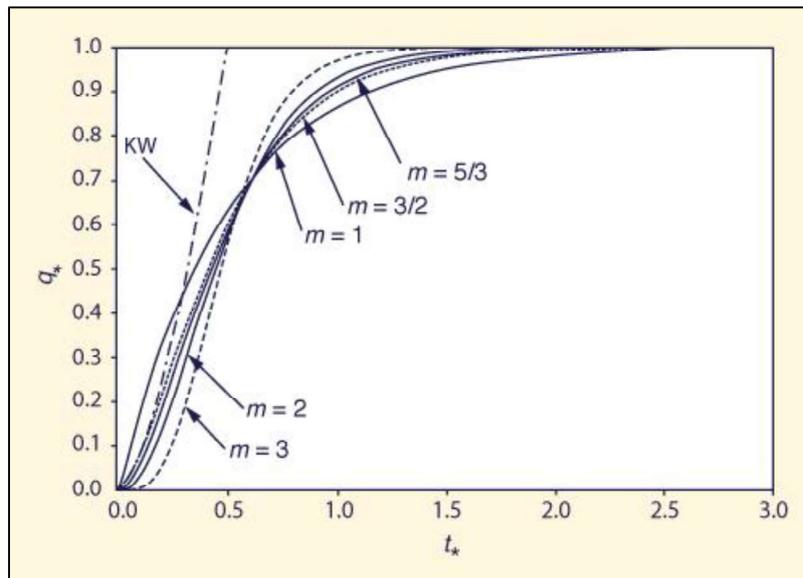
Así, la difusión de la escorrentía es producida por todas las ondas cuando el tiempo de concentración excede la duración de precipitación efectiva. Esto es el caso típico para cuencas medianas y grandes, para cada cuenca la pendiente promedio de la cuenca (a lo largo de su longitud hidráulica) es suficientemente suave (pequeña). El tiempo de concentración está directamente relacionado a la longitud hidráulica de la cuenca, a la fricción de fondo, e inversamente relacionado con la pendiente de fondo y la intensidad de precipitación efectiva (Ponce, V. M., 1989), (Ponce, V. M., 2014a).



Fuente: Hidrogramas de escorrentía adimensional (Ponce, V. M. y Klabunde A. C., 1999).

Figura Nro 2.10. Hidrogramas adimensionales de escorrentía en la cuenca.

La Fig. 2.11, muestra el ascenso de los hidrogramas adimensionales del flujo superficial para un modelo de onda cinemática (denominado KW) y para varios modelos conceptuales de almacenamiento, considerando que el intervalo del exponente de área-descarga m va desde $m = 1$, que corresponde a un reservorio lineal, para $m = 3$, corresponde un flujo laminar (Ponce, V. M. et. al., 1997). El tiempo de equilibrio de la onda cinemática, puede ser similar al tiempo de concentración, esto teóricamente es igual a la mitad del tiempo de concentración de los modelos de almacenamiento-base (Ponce, V. M., 1989), (Ponce, V. M., 2014a). Se observó que los modelos de almacenamiento atenúan el hidrograma y, en consecuencia, producen difusión, mientras que el modelo de onda cinemática carece completamente de la difusión de la escorrentía. El tiempo de equilibrio cinemático es el valor más corto posible del tiempo de concentración, resultando, en la agrupación, en los picos de flujo más grandes. Además, bajo un flujo cinemático puro, la difusión de la escorrentía se desvanece.



Fuente: Engineering Hydrology, Principles and Practices, (Ponce, V. M. et. al., 1997).

Figura Nro 2.11. Hidrogramas adimensionales crecientes en el flujo superficial.

En los cálculos numéricos actuales, un modelo de onda cinemática no puede estar totalmente provisto de difusión, debido a la aparición de la difusión numérica (Ponce, V. M., 1991a). De hecho, los esquemas de primer orden de la ecuación de onda cinemática producen una difusión numérica. Sin embargo, esta difusión no es controlada, no se basa en parámetros físicos y, por lo tanto, no está relacionada con el verdadero problema físico de la difusión.

2.7. HIDROGRAMA UNITARIO ADIMENSIONAL GENERAL

La cascada de reservorios lineales (CRL) (Sección 2.3) y el hidrograma unitario instantáneo (HUI) (Sección 2.4) son esencialmente lo mismo. Un hidrograma unitario adimensional general (HUAG) puede ser generado utilizando el método de la CRL para una cuenca de área de drenaje A y una duración de hidrograma unitario t_r . El hidrograma unitario adimensional resultante muestra que es únicamente una función del número de Courant C y del número de reservorios N , por lo tanto, es independiente del A o t_r . Además, para un conjunto de C y N , existe un único HUAG, de aplicabilidad global (Ponce, V. M., 2009b).

El tiempo adimensional t_* está definido a continuación:



$$t_* = t/t_r \quad (2-24)$$

En dónde: t = tiempo, y t_r = tiempo de duración del hidrograma unitario.

La descarga adimensional Q_* está definido a continuación:

$$Q_* = Q/Q_{m\acute{a}x} \quad (2-25)$$

En dónde: Q = descarga, y $Q_{m\acute{a}x}$ = descarga máxima, es decir, la obtenida en ausencia de la difusión de la escorrentía (Ponce, V. M., 2014a):

$$Q_{m\acute{a}x} = iA \quad (2-26)$$

En dónde: i = intensidad de precipitación efectiva, en unidades LT^{-1} ; y A = área de drenaje de la cuenca, en unidades L^2 .

Por lo tanto:

$$Q_* = Q/(iA) \quad (2-27)$$

En unidades del SI, para la unidad de profundidad de precipitación de 1 cm:

$$i = 0.01(m)/[3600(s/hr) * t_r(hr)] \quad (2-28)$$

Entonces:

$$Q_* = 0.36 Q t_r/A \quad (2-29)$$

En dónde: Q es en unidades m^3/s , t_r está en horas y A está en km^2 .

En la práctica, un grupo de C y N son seleccionados de tal manera que las propiedades de difusión de la escorrentía de una cuenca sean representadas en un HUAG. Las cuencas empinadas requieren de un C alto y de un N pequeño; por lo contrario, las cuencas suaves requieren de un C pequeño y de un N alto. El rango práctico de los parámetros es: $0.1 \leq C \leq 2$; y $1 \leq N \leq 10$.



Dentro del intervalo, el par de $C = 2$ y $N = 1$ proporciona una difusión de cero, mientras que el par de $C = 0.1$ y $N = 10$ proporciona una cantidad muy significativa de difusión. Nótese que, el caso de la difusión de cero es equivalente a la asunción de sólo la concentración de la esorrentía, lo cual es inherente al método racional (Ponce, V. M., 2014a).

Una vez seleccionado el HUAG, las ordenadas del hidrograma unitario pueden ser calculadas de la Ec. 2-29 como se muestra:

$$Q = 2.7778Q_*A/t_r \quad (2-30)$$

Del mismo modo, la abscisa (tiempo) puede ser calculada de la Ec. 2-24 como se muestra:

$$t = t_*t_r \quad (2-31)$$

El hidrograma unitario calculado se puede convolucionar con el hietograma de precipitación efectiva para determinar el hidrograma de flujo compuesto (Ponce, V. M., 2014a).

El HUAG tiene las siguientes ventajas significativas:

1. El HUAG está sólo en función de C y N , y es de aplicabilidad global.
2. A diferencia de otro procedimiento de hidrograma unitario establecido, como el hidrograma unitario del Natural Resources Conservation Service (NRCS), el HUAG es un modelo de dos parámetros; por lo tanto, es capaz de simular una gama más amplia de efectos de difusión de la esorrentía (Ponce, V. M., 2014a).

Los parámetros de la cascada del HUAG (C y N) son estimados en base a las propiedades de difusión de la esorrentía de la cuenca en consideración. Las propiedades de difusión de la esorrentía dependen en gran medida de la topografía y geomorfología del terreno en general. Las cuencas empinadas tienen poca o nula difusión; por el contrario, las cuencas suaves tienen cantidades sustanciales de difusión.



El caso de la difusión de cero es modelado con $C = 2$ y $N = 1$. Por el contrario, para el caso de una gran difusión se puede modelar con $C = 0.1$ y $N = 10$ (Ponce, V. M., 1980).

En la naturaleza, las cuencas se clasifican de acuerdo a la difusión de la escorrentía basada en su pendiente promedio superficial de terreno. Una clasificación preliminar se muestra en la Tabla 2.2 (Ponce, V. M., 2009b). Esta tabla muestra la variedad de clases geomorfológicas y su rango asociado de pendiente promedio superficial terrestre, con los parámetros de cascada estimados y los valores pico correspondientes al HUAG (caudal Q^*p y tiempo t^*p). La tabla 2.2 puede utilizarse como referencia para la evaluación preliminar de C y N para una cuenca específica.

Tabla Nro 2.2. Clasificación de las cuencas con expresión de difusión de la escorrentía.

Clase	Pendiente media de la superficie terrestre (m/m)	Parámetros de cascada		Valores pico del HUAG	
		C	N	Q^*p	t^*p
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Muy empinada	> 0.1	2	1	1	1
Empinada	0.1 – 0.01	1.5	2	0.472	2
Media	0.01 – 0.001	1	4	0.224	4
Baja	0.001 – 0.0001	0.5	6	0.088	11
Muy baja	0.0001 – 0.00001	0.2	8	0.03	36
Extremadamente baja	< 0.00001	0.1	9	0.014	81

Fuente: Cascade and Convolution: One and the same. Víctor M. Ponce, 2014.



CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

3.1. VISIÓN

La metodología para el estudio tiene el objetivo de desarrollar una relación entre los parámetros de cascada del HUAG (C y N) y las respectivas características geomorfológicas de la cuenca. Para este propósito, son seleccionadas adecuadamente varias cuencas en California, que reúnen una amplia gama de características geomorfológicas, en particular la pendiente promedio de la superficie del terreno y la pendiente del canal principal. Para los datos diarios, el intervalo de tiempo de análisis es de 1 día ($t_r = 1$ día).

La metodología seleccionada depende de las características temporales de la tormenta. Las siguientes dos situaciones son consideradas:

1. Tormentas simples, con un impulso de precipitación de un (1) día (un evento de precipitación predominante de un (1) día es utilizado en la práctica).
2. Tormentas complejas, con un evento de precipitación distribuido durante varios días.

3.1.1. Tormentas simples

Para las tormentas simples, los siguientes pasos son requeridos:

1. Recopilación de datos de precipitación – escorrentía: reunir un grupo de datos correspondientes a precipitaciones y escorrentías para cada cuenca, e identificar tres (3) eventos adecuados de característica de hidrograma similar y poco frecuente para el análisis.
2. Determinar el volumen del hidrograma de escorrentía: calcular el volumen de escorrentía para 1 cm de precipitación efectiva.
3. Para cada evento:
 - A. Utilizar la técnica lineal para separar el flujo base y determinar el hidrograma de la tormenta de escorrentía directa.



- B. Calcular el volumen de escorrentía correspondiente al hidrograma de la tormenta de escorrentía directa obtenida en el paso 3(a), y compararlo con el volumen de escorrentía obtenido en el paso 2.
 - C. En base al resultado del paso 3(b), multiplicar las ordenadas del hidrograma de la tormenta de escorrentía directa por un factor apropiado para establecer las ordenadas del hidrograma unitario. Confirmar que este corresponda a una escorrentía de 1 cm. Cuando se justifique, se realizan mínimas correcciones volumétricas.
 - D. Calcular el hidrograma unitario adimensional (HUA) utilizando las Ec. 2-24 y 2-27 para las abscisas y ordenadas, respectivamente.
4. Calcular el hidrograma unitario: Promediando los tres (3) hidrogramas unitarios adimensionales obtenidos en el paso 3(d) se obtiene el hidrograma unitario adimensional de la cuenca. Confirmando que corresponda a 1 cm de escorrentía.
 5. Calcular los parámetros de cascada C y N : se ajusta el caudal pico Q^* y tiempo pico t^* del hidrograma unitario adimensional para sustentar el hidrograma unitario adimensional general (HUAG), caracterizando su grupo de parámetros de cascada C y N .

3.1.2. Tormentas complejas

Para las tormentas complejas, los siguientes pasos son requeridos:

1. Recopilación de datos de precipitación – escorrentía: reunir un grupo de datos correspondientes a precipitaciones y escorrentías para cada cuenca, e identificar tres (3) eventos adecuados de característica de hidrograma similar y poco frecuente para el análisis. Por otro lado, en caso las características del hidrograma no fuesen similares se debe trabajar con diez (10) eventos adecuados.
2. Para cada evento:



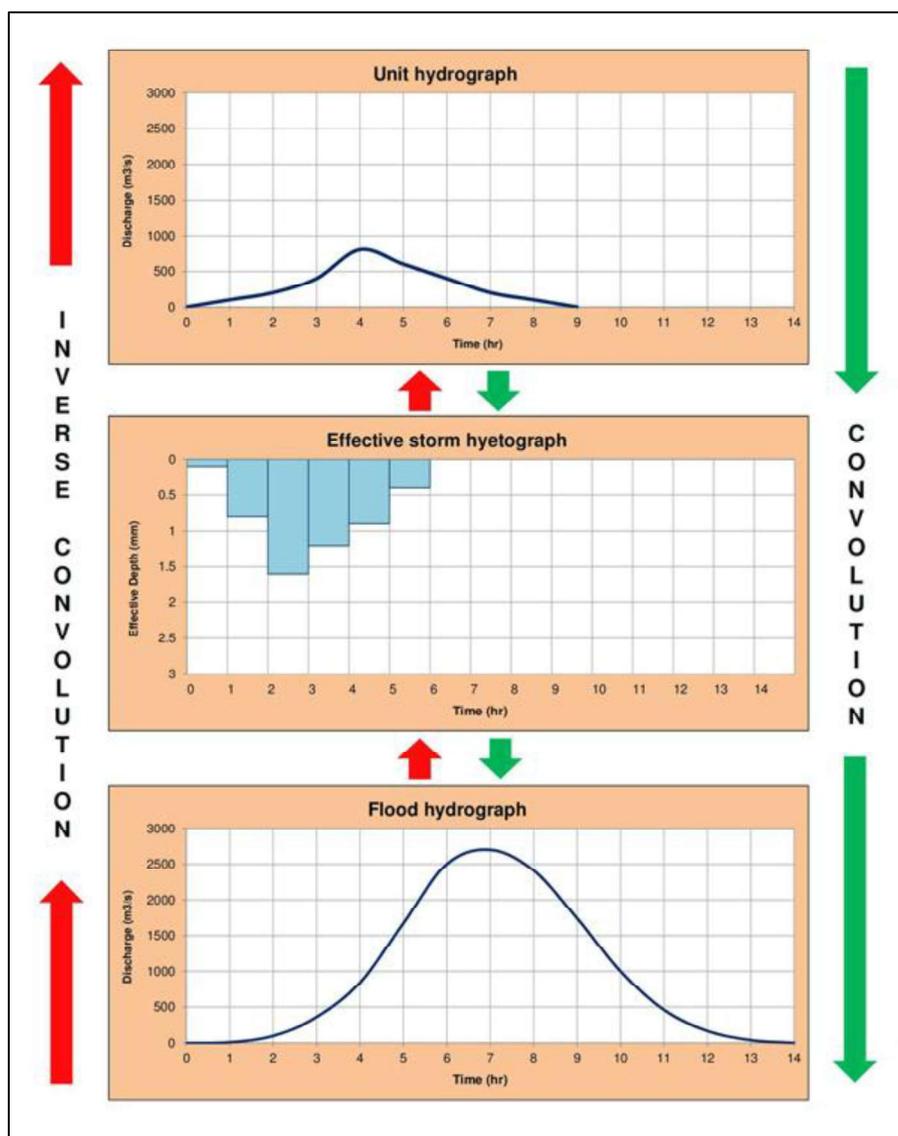
- A. Utilizar la técnica lineal para separar el flujo base y determinar el hidrograma de la tormenta de escorrentía directa.
 - B. Calcular el volumen de escorrentía correspondiente al hidrograma de la tormenta de escorrentía directa.
 - C. Aplicar el procedimiento del índice φ al hietograma de la tormenta total para determinar el hietograma de precipitación efectiva (Ponce, V. M., 2014a).
 - D. Aplicar la técnica de convolución inversa al hidrograma de la tormenta de escorrentía directa obtenido en el paso 2(b) y al hietograma de precipitación efectiva obtenido en el paso 2(c), para calcular el hidrograma unitario (Sección 3.2).
 - E. Calcular el hidrograma unitario adimensional (HUA) utilizando las Ec. 2-24 y 2-27 para las abscisas y ordenadas, respectivamente.
3. Calcular el hidrograma unitario: Promediando los tres (3) hidrogramas unitarios adimensionales obtenidos en el paso 2(e) se obtiene el hidrograma unitario (HU) de la cuenca. Confirmando que corresponda a 1 cm de escorrentía.
 4. Calcular los parámetros de cascada C y N: se ajusta el caudal pico Q^* y tiempo pico t^* del hidrograma unitario adimensional para sustentar el hidrograma unitario adimensional general (HUAG), caracterizando su grupo de parámetros de cascada C y N.

Para cada cuenca analizada, un grupo de pares referente a los parámetros de cascada C y N son relacionados con las características geomorfológicas primarias de la cuenca, como la pendiente del canal principal / superficial.

En una aplicación práctica, una vez que se determina la pendiente promedio del canal principal y la pendiente promedio de la superficie del terreno, los valores apropiados de C y N son utilizados para calcular el hidrograma unitario adimensional (HUA). Este último es utilizado, junto con el área de la cuenca A y la duración del hidrograma unitario t_r (Ec. 2-30 y 2-31, respectivamente), para calcular el hidrograma unitario (HU).

3.2. CONVOLUCIÓN Y CONVOLUCIÓN INVERSA

La convolución es el procedimiento por el cual un cierto hidrograma unitario y un hietograma de precipitación efectiva son utilizados para calcular el hidrograma de inundación. Por el contrario, la convolución inversa es el procedimiento por el cual cierto hidrograma de inundación y una hietograma de precipitación efectiva son utilizados para calcular el hidrograma unitario correspondiente.



Fuente: Elaboración propia.

Figura Nro 3.1. Convolución y convolución inversa.

3.2.1. Convolución

El procedimiento de la convolución está basado en los principios de linealidad y superposición. El volumen bajo el hidrograma compuesto es igual al volumen total de la precipitación efectiva. Dado: T_{bu} = tiempo base del hidrograma unitario de X horas, y una tormenta consistente en n intervalos de X horas, el tiempo base del hidrograma compuesto (inundación) T_{bc} es igual a:

$$T_{bc} = T_{bu} + (n - 1)X \quad (3-1)$$

El procedimiento de la convolución se ilustra mediante el siguiente ejemplo. Suponga que se ha derivado el siguiente hidrograma unitario de 1 h para una cuenca determinada:

Tabla Nro 3.1. Datos de ejemplo de convolución.

Tiempo (h)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Caudal (m³/s)	0	100	200	400	800	600	400	200	100	0

Fuente: Engineering Hydrology, Principles and Practices. Víctor M. Ponce, 2014.

Una tormenta de 6 horas con una precipitación efectiva total de 5 cm que cubre toda una cuenca, tiene una distribución de tiempo como se muestra:

Tabla Nro 3.2. Distribución de tiempo del ejemplo de convolución.

Tiempo (h)	0	1	2	3	4	5	6
Precipitación efectiva (cm)		0.1	0.8	1.6	1.2	0.9	0.4

Fuente: Engineering Hydrology, Principles and Practices. Víctor M. Ponce, 2014.

El hidrograma compuesto (inundación) se calcula usando la técnica de convolución, como se muestra (Tabla 3.3):

1. La columna 1 muestra el tiempo en horas.
2. La columna 2 muestra las ordenadas del hidrograma unitario en m³/s.



3. La columna 3 muestra el producto de la profundidad de precipitación de la primera hora con las ordenadas del hidrograma unitario.
4. La columna 4 muestra el producto de la profundidad de precipitación de la segunda hora con las ordenadas del hidrograma unitario, retardando 1 h con respecto a la Col. 3.
5. El patrón computacional establecido por las Cols. 3 y 4 es la misma para las Cols. 5 a 8.
6. La columna 9, la suma de las Cols. 3 a 8, es el hidrograma compuesto para el patrón de tormenta dado.

Tabla Nro 3.3. Hidrograma compuesto por la convolución.

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
Tiempo (h)	UH (m ³ /s)	0.1*UH	0.8*UH	1.6xUH	1.2*UH	0.9*UH	0.4*UH	Hidrograma Compuesto (m ³ /s)
0	0	0	-	-	-	-	-	0
1	100	10	0	-	-	-	-	10
2	200	20	80	0	-	-	-	100
3	400	40	160	160	0	-	-	360
4	800	80	320	320	120	0	-	840
5	600	60	640	640	240	90	0	1670
6	400	40	480	1280	480	180	40	2500
7	200	20	320	960	960	360	80	2700
8	100	10	160	640	720	720	160	2410
9	0	0	80	320	480	540	320	1740
10	-	-	0	1610	240	360	240	1000
11	-	-	-	0	120	180	160	460
12	-	-	-	-	0	90	80	170
13	-	-	-	-	-	0	40	40
14	-	-	-	-	-	-	0	0
Suma	2800							14000

Fuente: Engineering Hydrology, Principles and Practices. Víctor M. Ponce, 2014.



La suma de la Col. 2 es de 2800 m³/s y equivale a 1 cm de precipitación neta. Se verifica la suma de la Col. 9 que es 14000 m³/s, y, por lo tanto, el equivalente de 5 cm de precipitación efectiva. El tiempo base del hidrograma unitario es $T_{bh} = 9 + (6 - 1) \times 1 = 14$ h.

3.2.2. Convolución inversa

El procedimiento de la convolución inversa permite el cálculo de un hidrograma unitario basado en un hietograma de precipitación efectiva y un hidrograma compuesto (inundación). El procedimiento se denomina método de sustitución directa (Ponce, V. M., 2014a).

El hidrograma unitario puede ser calculado directamente debido a la propiedad con bandas de la matriz de convolución (ver Tabla 3.3). Con m = número de ordenadas no nulas del hidrograma unitario, n = número de intervalos de precipitaciones efectivas, y N = número de ordenadas no nulas del hidrograma de la tormenta, la relación a cumplir es la siguiente:

$$N = m + n - 1 \quad (3-2)$$

Por lo tanto:

$$m = N - n + 1 \quad (3-3)$$

Por eliminación y sustitución posterior, se desarrolló la siguiente fórmula para las ordenadas del hidrograma unitario u_i como una función de las ordenadas del hidrograma de la tormenta q_i y de la profundidad de precipitación efectiva r_k , para i que varía de 1 a m :

$$u_i = \frac{q_i - \sum_{j=i-1,1}^{k=2,n} u_j r_k}{r_1} \quad (3-4)$$

En la sumatoria del término de la Ec. 3-4, j decrece de $j - 1$ a 1, y k incrementa de 2 hasta un máximo de n .



Esta Ec. 3-4 (recursiva) permite el cálculo directo de un hidrograma unitario basado en un hidrograma de tormenta compleja. En la práctica, sin embargo, no siempre es posible llegar a una solución, ya que puede ser difícil obtener una combinación perfecta entre un hidrograma compuesto (inundación) y un hietograma de precipitación efectiva (debido al ruido de los datos). Nótese que el hidrograma de tormenta (medido) tendría que estar separado de la escorrentía directa y flujo base antes de intentar utilizar la Ec. 3-4.

El procedimiento de la convolución inversa está ilustrado por su aplicación en la Ec. 3-4 en el ejemplo de la Tabla 3.3. Usando la Ec. 3-2, con el número no nulo de las ordenadas del hietograma de tormenta $N = 13$, y el número de intervalos de la precipitación efectiva $n = 6$, el número de ordenadas no nulas del hidrograma unitario es: $m = 8$. Por lo tanto:

1. $u_1 = q_1/r_1 = 10/0.1 = 100$
2. $u_2 = (q_2 - u_1r_2)/r_1 = (100 - 100 \times 0.8)/0.1 = 200$
3. $u_3 = [q_3 - (u_2r_2 + u_1r_3)]/r_1 = [360 - (200 \times 0.8 + 100 \times 1.6)]/0.1 = 400$
4. $u_4 = [q_4 - (u_3r_2 + u_2r_3 + u_1r_4)]/r_1$
 $u_4 = [840 - (400 \times 0.8 + 200 \times 1.6 + 100 \times 1.2)]/0.1 = 800$
5. $u_5 = [q_5 - (u_4r_2 + u_3r_3 + u_2r_4 + u_1r_5)]/r_1$
 $u_5 = [1670 - (800 \times 0.8 + 400 \times 1.6 + 200 \times 1.2 + 100 \times 0.9)]/0.1 = 600$
6. $u_6 = [q_6 - (u_5r_2 + u_4r_3 + u_3r_4 + u_2r_5 + u_1r_6)]/r_1$
 $u_6 = [2500 - (600 \times 0.8 + 800 \times 1.6 + 400 \times 1.2 + 200 \times 0.9 + 100 \times 0.4)]/0.1$
 $u_6 = 400$
7. $u_7 = [q_7 - (u_6r_2 + u_5r_3 + u_4r_4 + u_3r_5 + u_2r_6)]/r_1$
 $u_7 = [2700 - (400 \times 0.8 + 600 \times 1.6 + 800 \times 1.2 + 400 \times 0.9 + 200 \times 0.4)]/0.1$
 $u_7 = 200$
8. $u_8 = [q_8 - (u_7r_2 + u_6r_3 + u_5r_4 + u_4r_5 + u_3r_6)]/r_1$
 $u_8 = [2410 - (200 \times 0.8 + 400 \times 1.6 + 600 \times 1.2 + 800 \times 0.9 + 400 \times 0.4)]/0.1$
 $u_8 = 100$

El resultado confirma las ordenadas del hidrograma unitario mostrado en la Col. 2 de la Tabla 3.3.



3.3. HIDROGRAMA UNITARIO ADIMENSIONAL GENERAL

La teoría del hidrograma unitario adimensional general (HUAG) fue desarrollado por Ponce (2009). Un HUAG puede ser generado utilizando (Sección 2.3) el método de cascada de reservorios lineales (CRL) para una cuenca de área de drenaje A y una duración de hidrograma unitario t_r . Los valores resultantes del hidrograma unitario de Q^* vs t^* (Sección 2.7) pueden demostrar que están en función de los parámetros de cascada como número de Courant C y número de reservorios lineales N , y que son independientes de A o t_r . Además, para un grupo de valores de C y N determinados, existe un único HUAG, de aplicabilidad global.

Una versión Web (en línea) del HUAG como una función de C y N está determinado en el enlace (<http://ponce.sdsu.edu/onlinegeneraluhcascade.php>). La Tabla 3.4 muestra un ejemplo de salida para $C = 1$ y $N = 3$. El programa es utilizado en la Sección 5.1 para ajustar los hidrogramas unitarios adimensionales: medido y predecido.

Tabla Nro 3.4. Hidrograma unitario adimensional para $C=1$ y $N=3$.

Tiempo adimensional (t^*)	Caudal adimensional (Q^*)
0	0
1	0.0741
2	0.2222
3	0.2716
4	0.2003
5	0.118
6	0.0613
7	0.0294
8	0.0133
9	0.0058
10	0.0024
11	0.001
12	0.0004
13	0.0002
14	0.0001
15	0

Fuente: <http://ponce.sdsu.edu/onlinegeneraluhcascade.php> (Ponce, V. M., 1989).



Una versión Web (en línea) del HUAG para series de C (se recomienda un rango de $0.1 \leq C \leq 2.0$) y para todos los valores de N en el rango $1 \leq N \leq 10$, están dados en el enlace (<http://ponce.sdsu.edu/onlineseriesuhcascade.php>). La Tabla 3.5 muestra un ejemplo de salida para $C = 1$. Comparamos los valores de las descargas de la Tabla 3.5 para $N = 3$, con los valores de la Tabla 3.4.

Tabla Nro 3.5. Hidrograma unitario adimensional para $C=1$ y $1 \leq N \leq 10$.

Tiempo adimensional t^*	Caudal adimensional Q^* para los valores de reservorios lineales N									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0.667	0.222	0.074	0.025	0.008	0.003	0.001	0	0	0
2	0.222	0.37	0.222	0.107	0.047	0.019	0.008	0.003	0.001	0
3	0.074	0.222	0.272	0.2	0.118	0.061	0.029	0.013	0.006	0.002
4	0.025	0.107	0.2	0.224	0.181	0.12	0.07	0.038	0.019	0.009
5	0.008	0.047	0.118	0.181	0.195	0.165	0.119	0.075	0.044	0.024
6	0.003	0.019	0.061	0.12	0.165	0.175	0.153	0.116	0.078	0.049
7	0.001	0.008	0.029	0.07	0.119	0.153	0.16	0.143	0.112	0.08
8	0	0.003	0.013	0.038	0.075	0.116	0.143	0.149	0.135	0.109
9	0	0.001	0.006	0.019	0.044	0.078	0.112	0.135	0.139	0.128
10	0	0	0.002	0.009	0.024	0.049	0.08	0.109	0.128	0.132
11	0	0	0.001	0.004	0.012	0.028	0.052	0.08	0.106	0.122
12	0	0	0	0.002	0.006	0.016	0.032	0.055	0.08	0.103
13	0	0	0	0.001	0.003	0.008	0.019	0.035	0.057	0.08
14	0	0	0	0	0.001	0.004	0.01	0.021	0.038	0.058
15	0	0	0	0	0.001	0.002	0.006	0.012	0.024	0.04
16	0	0	0	0	0	0.001	0.003	0.007	0.014	0.026
17	0	0	0	0	0		0.001	0.004	0.008	0.016
18	0	0	0	0	0		0.001	0.002	0.005	0.01
19	0	0	0	0	0		0	0.001	0.003	0.006
20	0	0	0	0	0		0	0	0.001	0.003
21	0	0	0	0	0		0	0	0.001	0.002
22	0	0	0	0	0		0	0	0	0.001
23	0	0	0	0	0		0	0	0	0

Fuente: <http://ponce.sdsu.edu/onlineseriesuhcascade.php> (Ponce, V. M., 1989).



Una versión Web (en línea) de las series del HUAG para seis (6) valores de C que se encuentren en el rango recomendado (2.0, 1.5, 1.0, 0.5, 0.2, y 0.1), y para todos los valores de N del rango recomendado de $1 \leq N \leq 10$, se encuentra en el enlace (<http://ponce.sdsu.edu/onlineallseriesuhcascade.php>). La Tabla 3.4 muestra un resumen de la descarga pico adimensional Q_p^* y del tiempo de ocurrencia t_p^* . Comparar el resultado para el número de Courant de $C = 1$ y $N = 3$ en la Tabla 3.6 con el resultado de la Tabla 3.5 ($t^* = 3$; $Q^* = 0.272$).

Tabla Nro 3.6. Hidrograma unitario adimensional para $2 \leq C \leq 0.1$ y $1 \leq N \leq 10$.

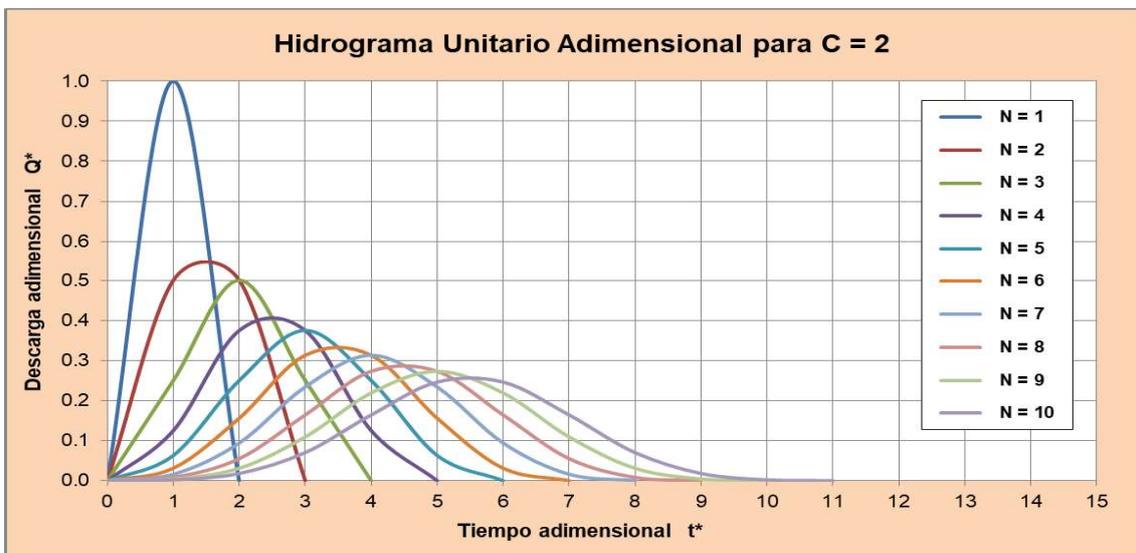
Número de Courant		Número de reservorios lineales									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	Q^*	1	0.5	0.5	0.375	0.375	0.313	0.313	0.273	0.273	0.246
	t^*	1	1	2	2	3	3	4	4	5	5
1.5	Q^*	0.857	0.472	0.382	0.332	0.278	0.259	0.24	0.216	0.207	0.197
	t^*	1	2	2	3	4	4	5	6	6	7
1	Q^*	0.667	0.37	0.272	0.224	0.195	0.175	0.16	0.149	0.139	0.132
	t^*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.5	Q^*	0.4	0.182	0.135	0.112	0.097	0.088	0.08	0.074	0.07	0.066
	t^*	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19
0.2	Q^*	0.182	0.073	0.054	0.045	0.039	0.035	0.032	0.03	0.028	0.026
	t^*	1	6	11	16	21	26	31	36	41	46
0.1	Q^*	0.095	0.037	0.027	0.022	0.02	0.018	0.016	0.015	0.014	0.013
	t^*	1	11	21	31	41	51	61	71	81	91

Fuente: <http://ponce.sdsu.edu/onlineallseriesuhcascade.php> (Ponce, V. M., 1989).

3.4. SERIES DE LOS HIDROGRAMAS UNITARIOS

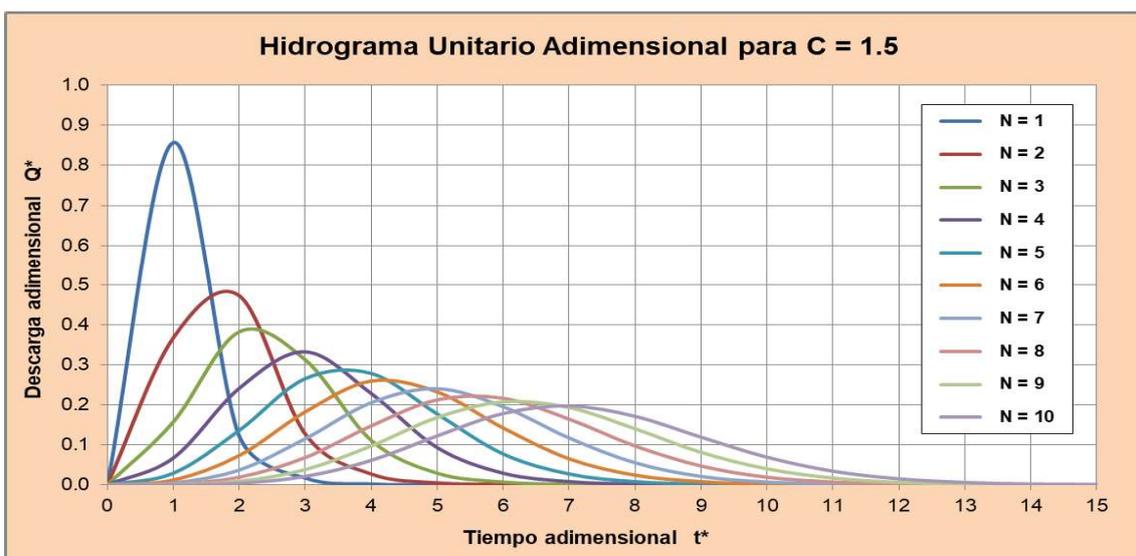
Las Figuras 3.2 (a) hasta la (f), muestran las series de los hidrogramas unitarios adimensionales (HUA) para los parámetros de cascada C con valores de 2, 1.5, 1, 0.5, 0.2 y 0.1; y valores de N que varían entre 1 y 10. La examinación de estas figuras nos permite identificar las siguientes conclusiones:

1. La difusión del hidrograma incrementa con un decrecimiento del número de Courant C .
2. La difusión del hidrograma incrementa cuando incrementa el número de reservorios lineales N de 1 a 10.
3. La asimetría positiva de los hidrogramas incrementa con un decrecimiento del número de Courant C .



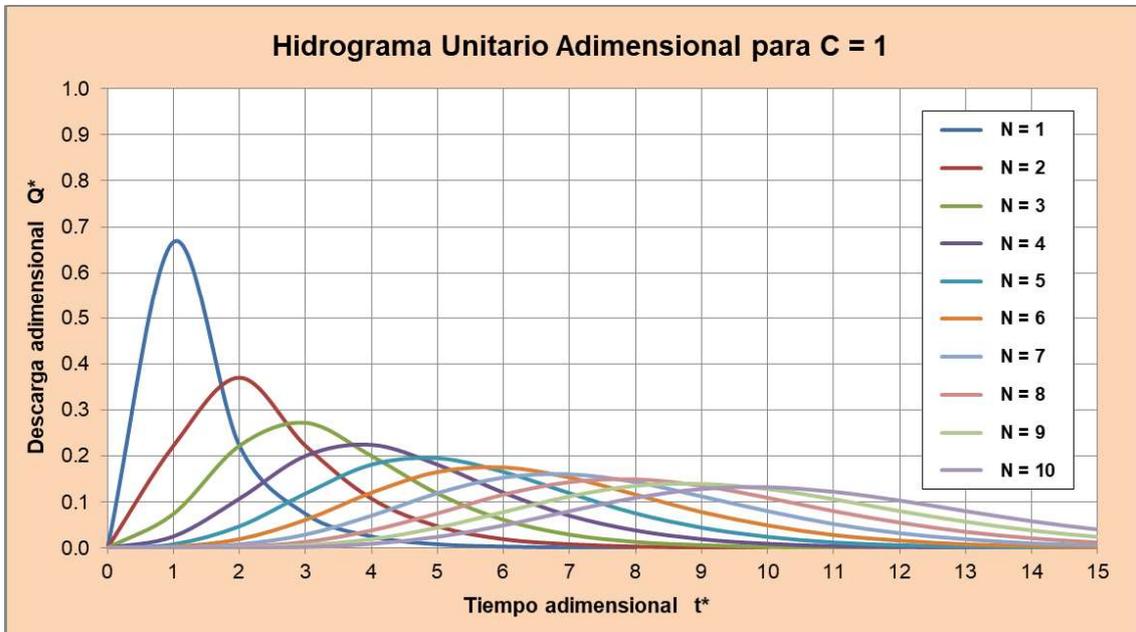
Fuente: Elaboración propia.

Figura Nro 3.2 (a) Hidrograma unitario adimensional para $C=2$.



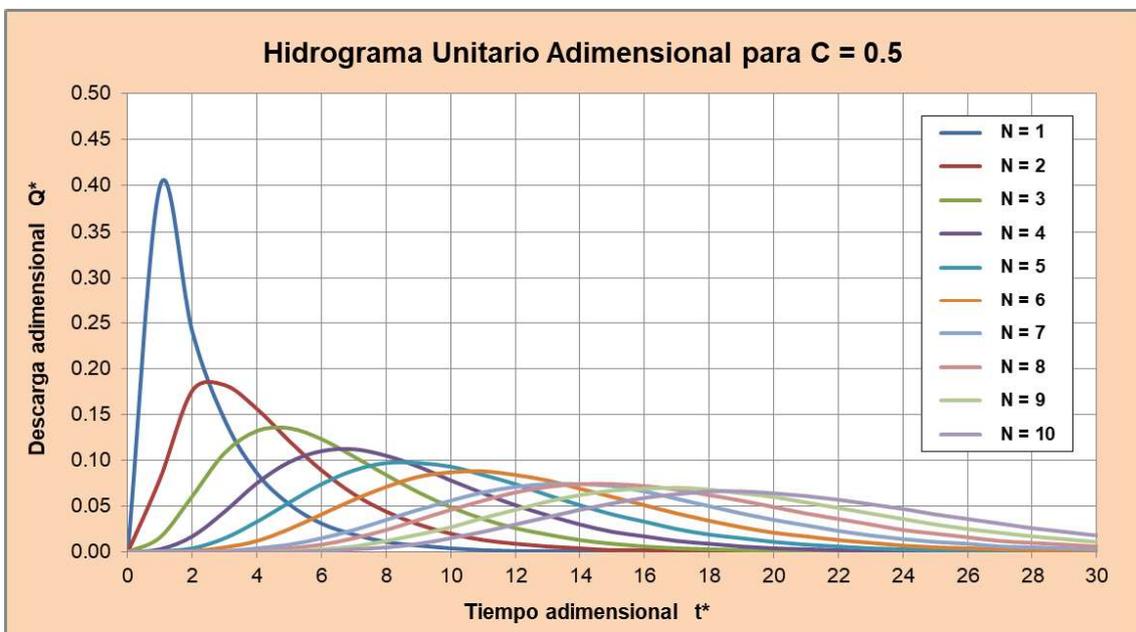
Fuente: Elaboración propia.

Figura Nro 3.2 (b) Hidrograma unitario adimensional para $C=1.5$.



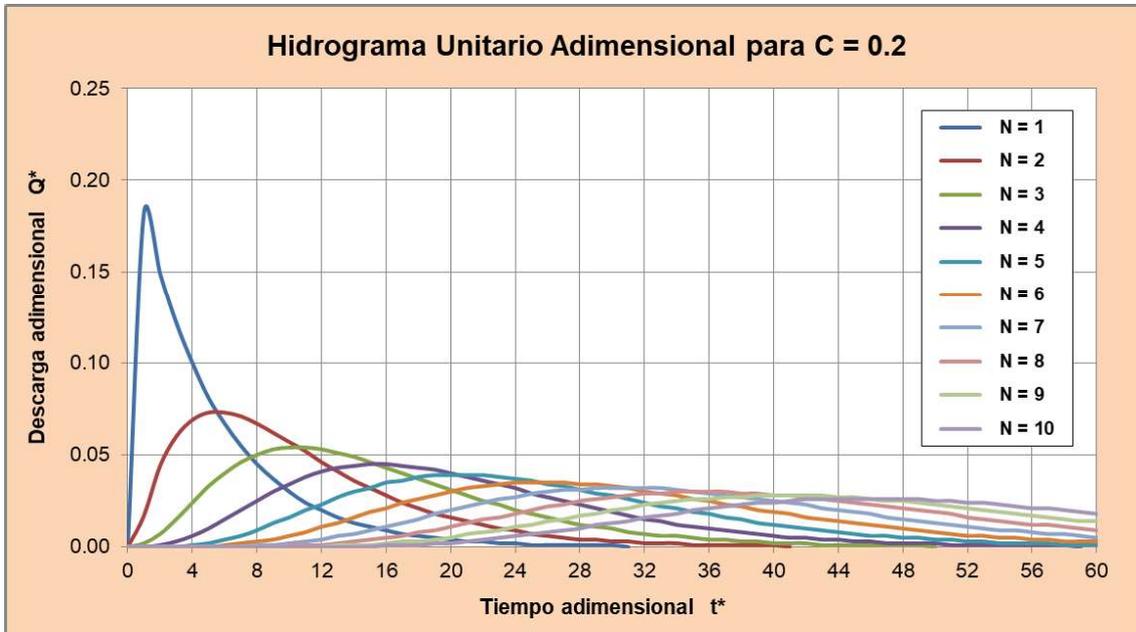
Fuente: Elaboración propia.

Figura Nro 3.2 (c) Hidrograma unitario adimensional para C=1.



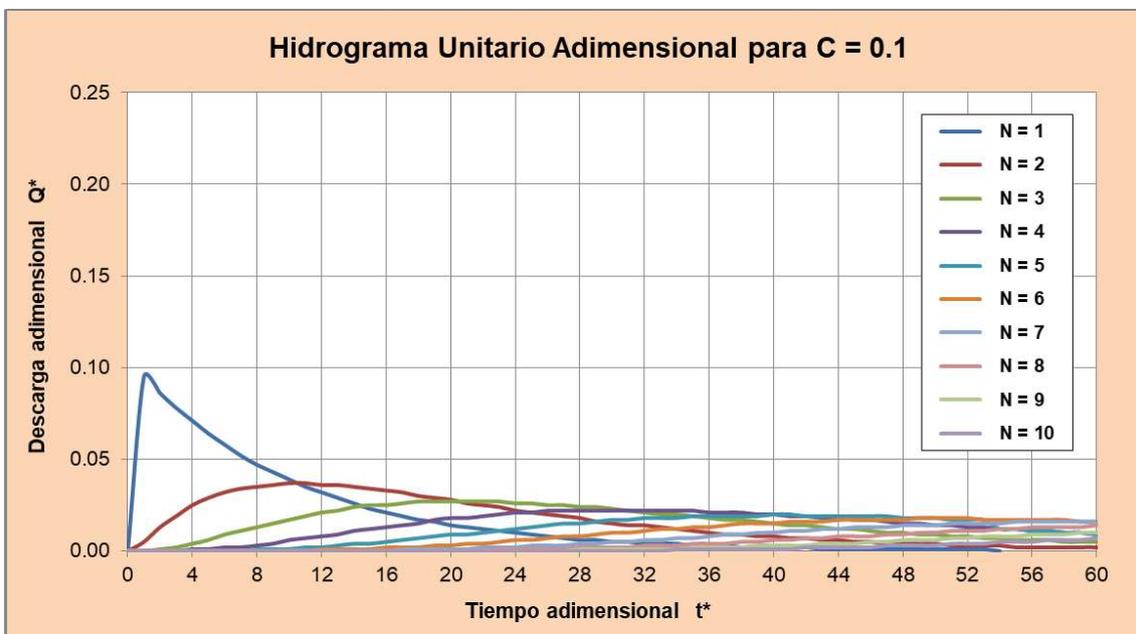
Fuente: Elaboración propia.

Figura Nro 3.2 (d) Hidrograma unitario adimensional para C=0.5.



Fuente: Elaboración propia.

Figura Nro 3.2 (e) Hidrograma unitario adimensional para $C=0.2$.

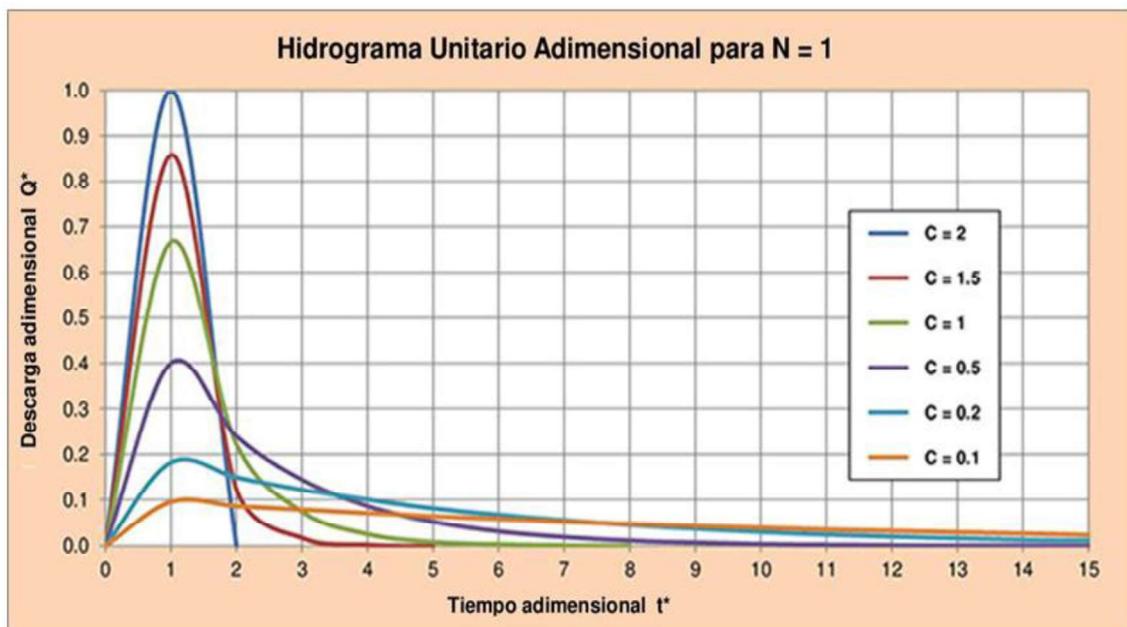


Fuente: Elaboración propia.

Figura Nro 3.2 (f) Hidrograma unitario adimensional para $C=0.1$.

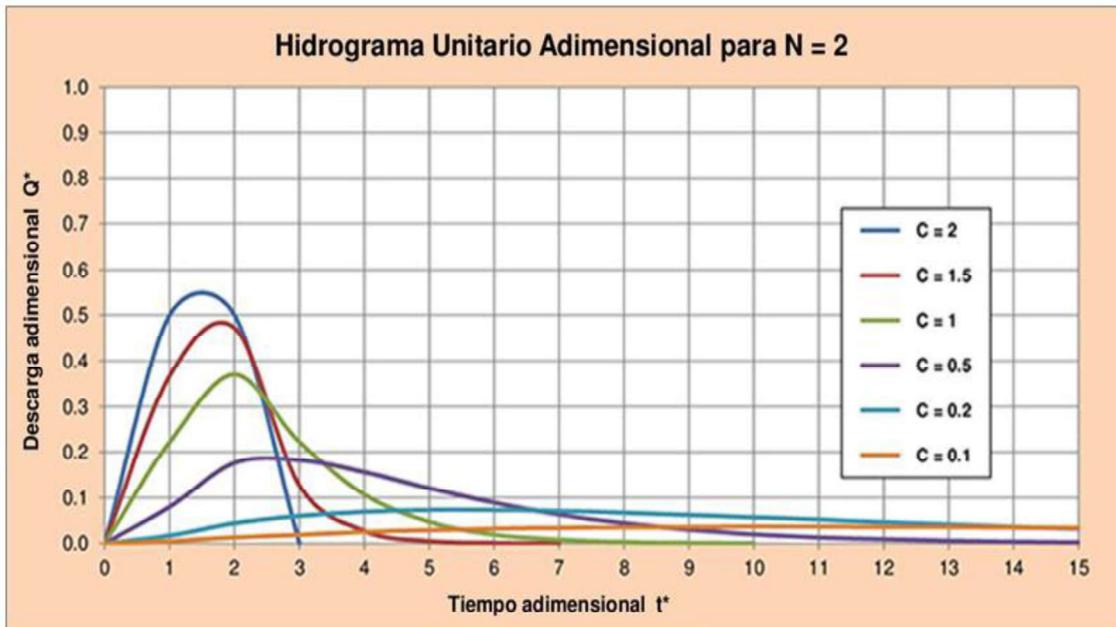
Las Figuras 3.3 (a) hasta (f), muestran las series de hidrogramas unitarios adimensionales (HUA) para los parámetros de cascada N con valores de 1, 2, 3, 4, 5 y 6; y valores de C que varían entre 2 y 0.1. La examinación de estas figuras nos permite identificar las siguientes conclusiones:

1. La difusión del hidrograma incrementa cuando incrementa el número de reservorios lineales N de 1 a 6.
2. La difusión del hidrograma incrementa con un decrecimiento del número de Courant C .
3. La asimetría positiva de los hidrogramas incrementa con un decrecimiento del número de Courant C .



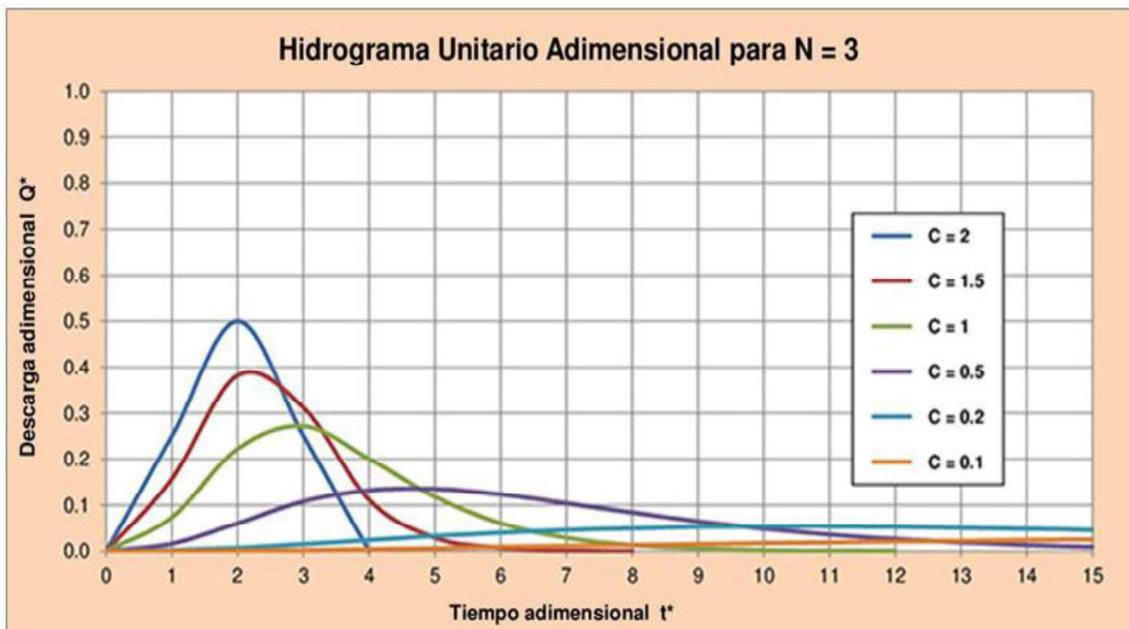
Fuente: Elaboración propia.

Figura Nro 3.3 (a) Hidrograma unitario adimensional para $N=1$.



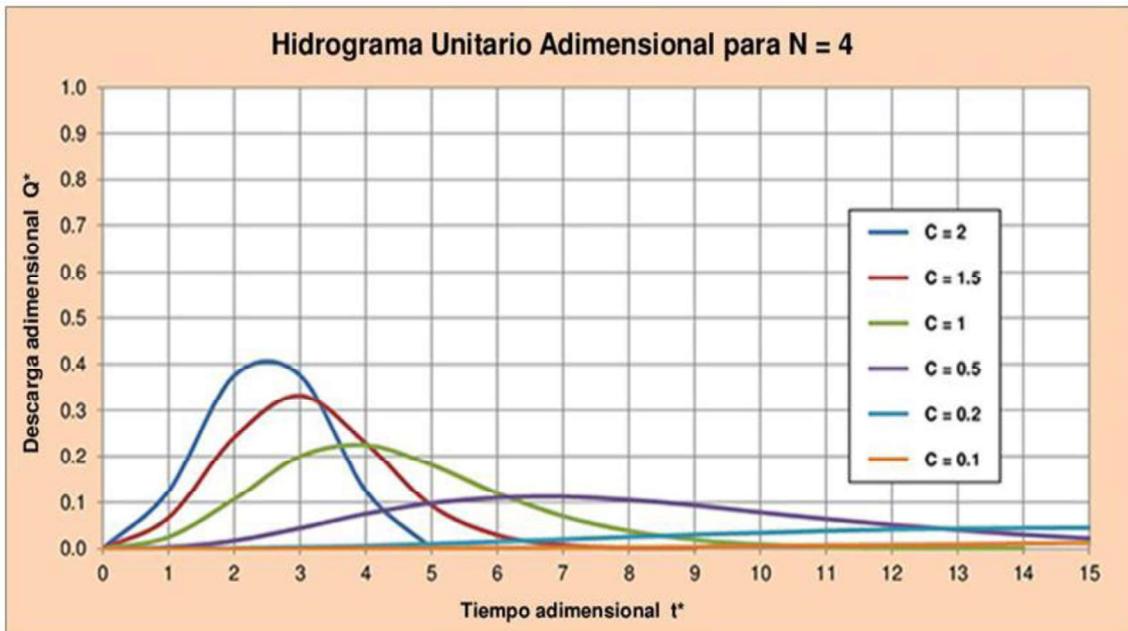
Fuente: Elaboración propia.

Figura Nro 3.3 (b) Hidrograma unitario adimensional para N=2.



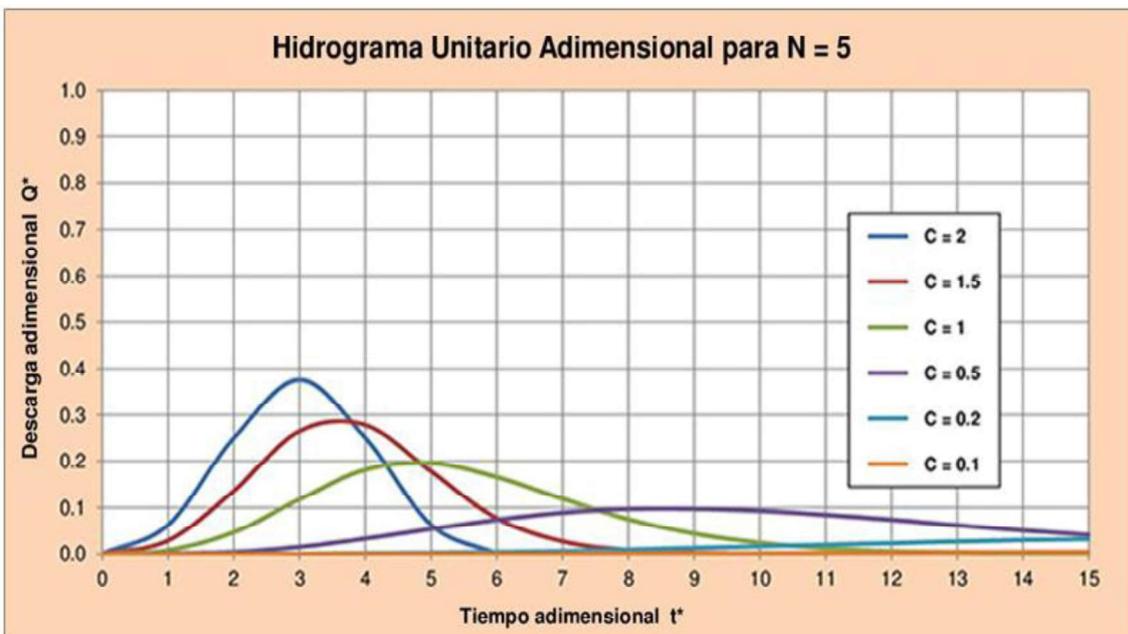
Fuente: Elaboración propia.

Figura Nro 3.3 (c) Hidrograma unitario adimensional para N=3.



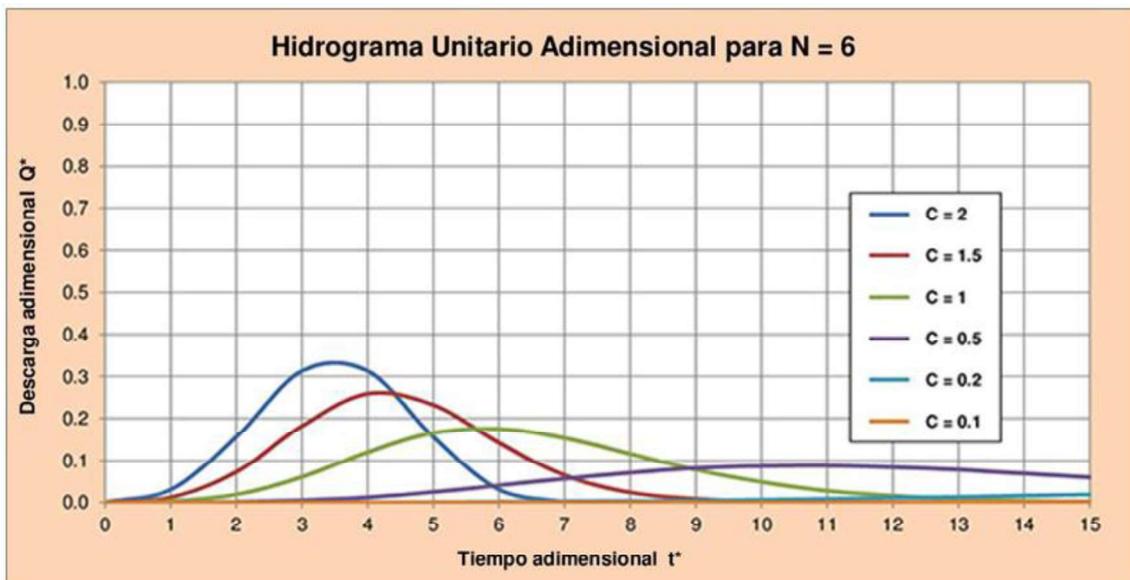
Fuente: Elaboración propia.

Figura Nro 3.3 (d) Hidrograma unitario adimensional para N=4.



Fuente: Elaboración propia.

Figura Nro 3.3 (e) Hidrograma unitario adimensional para N=5.



Fuente: Elaboración propia.

Figura Nro 3.3 (f) Hidrograma unitario adimensional para N=6.

3.5. HUAG, CRL y CONVOLUCIÓN

La cascada de reservorios lineales (CRL) de la Sección 2.3 y la convolución del hidrograma unitario con el hietograma de precipitación efectiva (Sección 3.2.1) conducen al mismo hidrograma compuesto de inundación, provisto de los parámetros de cascada (HUAG) que son utilizados para desarrollar el hidrograma unitario para la convolución. Estas proposiciones son sustentadas con el siguiente ejemplo:

Asumiendo un hietograma de precipitación efectiva de 6 horas mostrado en la Tabla 3.7.

Tabla Nro 3.7. Hietograma de precipitación efectiva.

Tiempo (hora)	1	2	3	4	5	6
Precipitación efectiva (cm)	1	2	4	3	2	1

Fuente: Engineering Hydrology, Principles and Practices. Víctor M. Ponce, 2014.



Asumiendo un área de drenaje: $A = 432 \text{ km}^2$. La duración del hidrograma unitario aplicable t_r es la misma que del intervalo de tiempo del hietograma de precipitación efectiva (Tabla 3.7), es decir, $t_r = \Delta t = 1 \text{ hr}$. Supongamos que la cuenca tiene un relieve relativamente empinado, con parámetros de cascada $C = 1$ y $N = 2$. Una versión Web (en línea) del HUAG en función de C y N se muestra en el enlace (<http://ponce.sdsu.edu/onlinegeneraluhcascade.php>). El HUA correspondiente se muestra en la Tabla 3.8.

Tabla Nro 3.8. Hidrograma unitario adimensional para $C = 1$ y $N = 2$.

Tiempo adimensional t_*	Descarga adimensional Q_*
0	0
1	0.2222
2	0.3704
3	0.2222
4	0.107
5	0.0466
6	0.0192
7	0.0076
8	0.0029
9	0.0011
10	0.0004
11	0.0002
12	0.0001
13	0

Fuente: <http://ponce.sdsu.edu/onlinegeneraluhcascade.php> (Ponce, V. M., 1989).

Dada la constante de almacenamiento del reservorio K :

$$K = \Delta t / C = t_r / C = 1 \tag{3-5}$$

El tiempo:

$$t = t_* t_r \tag{3-6}$$



Y la de descarga:

$$Q = 2.777778 Q_* A / t_r \tag{3-7}$$

El calculador en línea (<http://ponce.sdsu.edu/onlinedimensionlessuhcascade.php>) muestra el hidrograma unitario y el hidrograma unitario adimensional, mostrados en la Tabla 3.9.

Tabla Nro 3.9. Hidrograma unitario e hidrograma unitario adimensional para C = 1 y N = 2.

Intervalo de tiempo	Tiempo t (hr)	Caudal Q (m³/s)	Tiempo adimensional t-	Caudal adimensional Q*
0	0	0	0	0
1	1	266.667	1	0.2222
2	2	444.444	2	0.3704
3	3	266.667	3	0.2222
4	4	128.395	4	0.107
5	5	55.967	5	0.0466
6	6	23.045	6	0.0192
7	7	9.145	7	0.0076
8	8	3.536	8	0.0029
9	9	1.341	9	0.0011
10	10	0.501	10	0.0004
11	11	0.185	11	0.0002
12	12	0.068	12	0.0001
13	13	0.025	13	0
14	14	0.009	14	0
15	15	0.003	15	0
16	16	0.001	16	0
17	17	0	17	0

Fuente: <http://ponce.sdsu.edu/onlinedimensionlessuhcascade.php> (Ponce, V. M., 1989).

Con C = 1 (i.e., K = 1), N = 2, y el hietograma de precipitación efectiva de la Tabla 3.7, el calculador Web (en línea) (<http://ponce.sdsu.edu/onlinerouting08.php>) calcula el hidrograma compuesto de inundación por la cascada de reservorios lineales (Ponce, V. M., 1989). El hidrograma compuesto de inundación se muestra en la Tabla 3.10.



Tabla Nro 3.10. Hidrograma compuesto de inundación por la cascada de reservorios lineales (CRL).

Intervalo de tiempo	Tiempo t (hr)	Caudal (Km ² -cm/hr)	Caudal (m ³ /s)
0	0	0	0
1	1	96	266.667
2	2	352	977.778
3	3	800	2222.222
4	4	1166.222	3239.506
5	5	1168.593	3246.091
6	6	937.481	2604.115
7	7	591.144	1642.067
8	8	289.931	805.365
9	9	127.605	354.458
10	10	52.855	146.82
11	11	21.059	58.496
12	12	8.166	22.684
13	13	3.104	8.623
14	14	1.162	3.228
15	15	0.43	1.194
16	16	0.157	0.437
17	17	0.057	0.159
18	18	0.021	0.057
19	19	0.007	0.021
20	20	0.003	0.007
21	21	0.001	0.003
22	22	0	0.001
23	23	0	0
24	24	0	0
25	25	0	0
26	26	0	0
27	27	0	0

Fuente: <http://ponce.sdsu.edu/onlinerouting08.php> (Ponce, V. M., 1989).

La convolución del hidrograma unitario (Tabla 3.9, Cols. 2 y 3) con el hietograma de precipitación efectiva (Tabla 3.7) se complementan para utilizar el calculador Web (en línea) del enlace (<http://ponce.sdsu.edu/onlineconvolution.php>). Para este ejemplo, es aplicable el hietograma de precipitación efectiva; por lo tanto, el número de curva es: $CN = 100$. El hidrograma compuesto de inundación se



muestra en la Tabla 3.11. Sorprendentemente, se confirma que los resultados de las Tablas 3.10 y 3.11, son esencialmente los mismos.

Tabla Nro 3.11. Hidrograma compuesto de inundación por convolución.

Intervalo de tiempo	Tiempo t (hr)	Hidrograma unitario (m ³ /s)	Hidrograma compuesto (m ³ /s)
0	0	0	0
1	1	266.667	266.667
2	2	444.444	977.778
3	3	266.667	2222.223
4	4	128.395	3239.506
5	5	55.967	3246.091
6	6	23.045	2604.115
7	7	9.145	1642.066
8	8	3.536	805.364
9	9	1.341	354.457
10	10	0.501	146.819
11	11	0.185	58.494
12	12	0.068	22.682
13	13	0.025	8.622
14	14	0.009	3.229
15	15	0.003	1.196
16	16	0.001	0.439
17	17	0	0.159
18	18	0	0.056
19	19	0	0.018
20	20	0	0.005
21	21	0	0.001
22	22	0	0

Fuente: <http://ponce.sdsu.edu/onlineconvolution.php> (Ponce, V. M., 1989).

En resumen, dado un grupo de parámetros de cascada C y N , y un hietograma de precipitación efectiva, el método de cascada de reservorios lineales (CRL) puede utilizarse para calcular el hidrograma compuesto de inundación. Asimismo, la convolución de un hidrograma unitario derivado con el método del HUAG, y utilizando el mismo grupo de parámetros de cascada (C y N), puede utilizarse para calcular el hidrograma compuesto de inundación. Se demuestra que estos dos hidrogramas de inundación son los mismos.



CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE DATOS

4.1. ANTECEDENTES

Se seleccionaron varias cuencas en California, con un rango amplio de características geomorfológicas. Los requerimientos para encontrar las cuencas fueron las siguientes:

1. Un rango amplio de áreas de drenaje, desde aproximadamente 100 hasta 60 000 km².
2. Un rango amplio para la pendiente del canal principal, desde aproximadamente 0.0001 hasta 0.05 m/m.
3. Disponibilidad de datos de precipitación y descarga correspondientes a tres (3) eventos de poca frecuencia y con características de hidrograma similares. Caso contrario, utilizar diez (10) eventos de poca frecuencia.
4. Un mínimo de características de almacenamiento artificial (reservorios).
5. El rango de caudales seleccionados para las cuencas de estudio variaron entre 0.05 a 1650.0 m³/s, para tiempos de hidrogramas que variaron entre 4 a 6 días (96 a 144 horas).
6. Los hidrogramas de inundación seleccionados ocurrieron entre los meses de Noviembre a Marzo. Por lo tanto, son típicos de temporada de lluvia.

4.2. RECURSO DE INFORMACIÓN

La información geomorfológica e hidrometeorológica se recolectó de los siguientes medios:

1. Los mapas de elevación digital (*Digital Elevation Map* – DEM) se obtuvieron de las siguientes plataformas virtuales del *United States Geological Service* - USGS: (a) Earth Explorer (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) y (b) Alaska Satellite Facility (<https://vertex.daac.asf.alaska.edu/>).

Los mapas de elevación utilizados fueron de resolución de 12.5x12.5m, además de tener la ventaja de corrección radiométrica del terreno, lo que mejora su precisión y mantiene margen de error equivalente ± 10 m.



2. Los datos de precipitación se obtuvieron de la plataforma virtual del *National Oceanic and Atmospheric Administration* – NOAA: National Centers for Environmental Information (<https://www.ncdc.noaa.gov/>).
3. Los datos de escorrentía se obtuvieron de la plataforma virtual del *United States Geological Service* – USGS: National Water Information System (<https://maps.waterdata.usgs.gov/mapper/index.html>).

4.3. PARÁMETROS GEOMORFOLÓGICOS

4.3.1. Área de drenaje

El área de drenaje determina el volumen potencial de la escorrentía, provisto por una tormenta que cubre toda la superficie. La división de una cuenca está en los puntos que delimitan dos cuencas adyacentes, es decir, la recolección de puntos altos (picos y depresiones) que separan las cuencas que drenan en diferentes direcciones (salidas). En esta investigación, las áreas de las cuencas se obtuvieron con la ayuda de Sistemas de Información Geográfica (SIG).

4.3.2. Perímetro de drenaje

El perímetro del área de drenaje es la suma de la longitud que delimita la cuenca. Los perímetros de las cuencas se obtuvieron con la ayuda de Sistemas de Información Geográfica (SIG).

4.3.3. Longitud hidráulica de la cuenca

La longitud hidráulica es la longitud medida a lo largo del curso de agua principal de la cuenca. El curso de agua principal (o corriente principal) es el canal natural central y más grande de la cuenca, en el cual se acumula y conduce el flujo hasta el punto de vertido o salida. Las longitudes hidráulicas se obtuvieron con la ayuda de Sistemas de Información Geográfica (SIG).

4.3.4. Índice de forma

El índice de forma de una cuenca está definido con la siguiente ecuación:



$$K_f = \frac{A}{L^2} \quad (4-1)$$

En dónde: K_f = índice de forma, A = área de drenaje en unidades Km^2 , y L = longitud de la cuenca en unidades Km , que corresponde a todo el recorrido del curso de agua más largo.

4.3.5. Índice de compacidad

Es una alternativa de descripción morfológica que se basa en el perímetro de la cuenca más que en el área. Para este propósito, un círculo equivalente es definido como un círculo de área igual al de la cuenca. El índice de compacidad es la relación entre el perímetro de la cuenca y su círculo equivalente. Esto se puede expresar a continuación:

$$K_f = \frac{0.282P}{A^{1/2}} \quad (4-2)$$

En dónde: K_C = índice de compacidad, P = perímetro de la cuenca, y A = área de la cuenca.

4.3.6. Elevación máxima y mínima

La elevación máxima es el punto más alto donde se divide la cuenca, mientras que la elevación mínima es el punto de salida de la cuenca. La diferencia entre estos dos puntos de referencia es relieve de la cuenca. Las elevaciones se obtuvieron con la ayuda de Sistemas de Información Geográfica (SIG).

4.3.7. Pendiente promedio de la superficie del terreno

Los métodos de malla (grilla) se utilizan a menudo para obtener medidas de la pendiente superficial del terreno para evaluaciones de la escorrentía. Por ejemplo, el Natural Resources Conservation Service – NRCS del United States Department of Agriculture – USDA, determinó que la pendiente promedio de la superficie mediante un patrón de malla superpuesto sobre el mapa topográfico de la cuenca.



Donde la pendiente superficial máxima en cada intersección de la malla es evaluada, y el promedio de todos los valores es calculado. Este promedio se toma como un valor representativo de la pendiente superficial del terreno. El procedimiento se realizó con ayuda de Sistemas de Información Geográfica (SIG), además la pendiente promedio de la superficie del terreno se denominó S_0 .

4.3.8. Pendiente promedio del canal principal

El gradiente del canal de curso de agua principal es un indicador conveniente del relieve de una cuenca. Un perfil longitudinal es definido por sus elevaciones máximas (aguas arriba) y mínimas (aguas abajo), y por la distancia horizontal entre ellas. El gradiente del curso de agua obtenido directamente desde las elevaciones aguas arriba y aguas abajo se denomina pendiente S_1 .

Una alternativa para obtener la pendiente del canal principal es calcular la pendiente entre dos puntos del perfil longitudinal, situados al 10% y 85% del punto de vertido o salida, respectivamente. Este procedimiento es recomendado por el *United States Geological Service* – USGS (Ponce, V. M., 2014a). Esta pendiente del canal principal se denominó como S_2 .

4.3.9. Longitud total del canal principal

La longitud total del canal principal es la suma de todos los canales naturales definidos en el interior de la cuenca. Este procedimiento se realizó con ayuda de Sistemas de Información Geográfica (SIG).

4.3.10. Precipitación media anual

La precipitación varía no sólo temporalmente sino también espacialmente, es decir, la misma cantidad de precipitación no cae uniformemente sobre toda la extensión de una cuenca. El método de las isoyetas es utilizado para representar la variación espacial de la precipitación y de otras variables meteorológicas.



Una isoyeta es una línea de contorno que muestra una zona de igual profundidad de precipitación. El análisis de isoyetas se realizó con la ayuda de Sistemas de Información Geográfica (SIG).

4.4. SELECCIÓN DE LAS CUENCAS

Se seleccionaron diez (10) cuencas ubicadas en California para el análisis de la investigación. Las cuencas se enumeran en la Tabla 4.1.

Tabla Nro 4.1. Selección de cuencas para la investigación.

No.	Cuenca / Ubicación	Área (km ²)	Condados
1	Quebrada Campo en Campo, CA	218	San Diego, CA; Baja California, México
2	Río Whitewater en Mecca, CA	3849	Riverside y San Bernardino, CA
3	Río Mojave en Victorville, CA	56583	Los Ángeles, San Bernardino, Kern e Inyo en California; y Pahrump, Amargosa Valley, Beaty, Goldfield y Yucca Flat en Nevada
4	Río Amargosa en Tecopa, CA	8315	Inyo en California; Beaty, Amargosa Valley, Pahrump y Yucca Flat en Nevada
5	Río Petaluma en Petaluma, CA	93	Marín y Sonoma, CA
6	Río Russian en Guerneville, CA	3463	Mendocino y Sonoma, CA
7	Quebrada Los Gatos en Coalinga, CA	247	Fresno, CA
8	Quebrada Cottonwood en Cottonwood, CA	2435	Shasta y Tehama, CA
9	Río Salinas en Spreckels, CA	11777	Monterrey, San Benito, San Luis Obispo y Kern, CA
10	Río Shasta en Montague, CA	1737	Siskiyou, CA

Fuente: Elaboración propia.

4.4.1. Quebrada Campo en Campo, CA

La cabecera de la subcuenca de la quebrada Campo está localizada cerca de la comunidad de Live Oak Springs, en el sureste del condado de San Diego, California (Fotografía 4.1). La corriente fluye en dirección predominante suroeste cruzando la comunidad de Campo (Fotografía 4.2.). La estación meteorológica del *National Weather Service* (NWS) se localiza en Campo (Fotografía 4.3). La estación hidrométrica del *United States Geological Service* (USGS) se localiza en la intersección de la quebrada Campo con la ruta estatal Nro. 94 del estado de California (Fotografía 4.4).



Fotografía Nro. 4.1. Vista aguas abajo de la quebrada Campo cerca de la cabecera de la subcuenca.



Fotografía Nro. 4.2. Vista aguas arriba de la quebrada Campo, California.



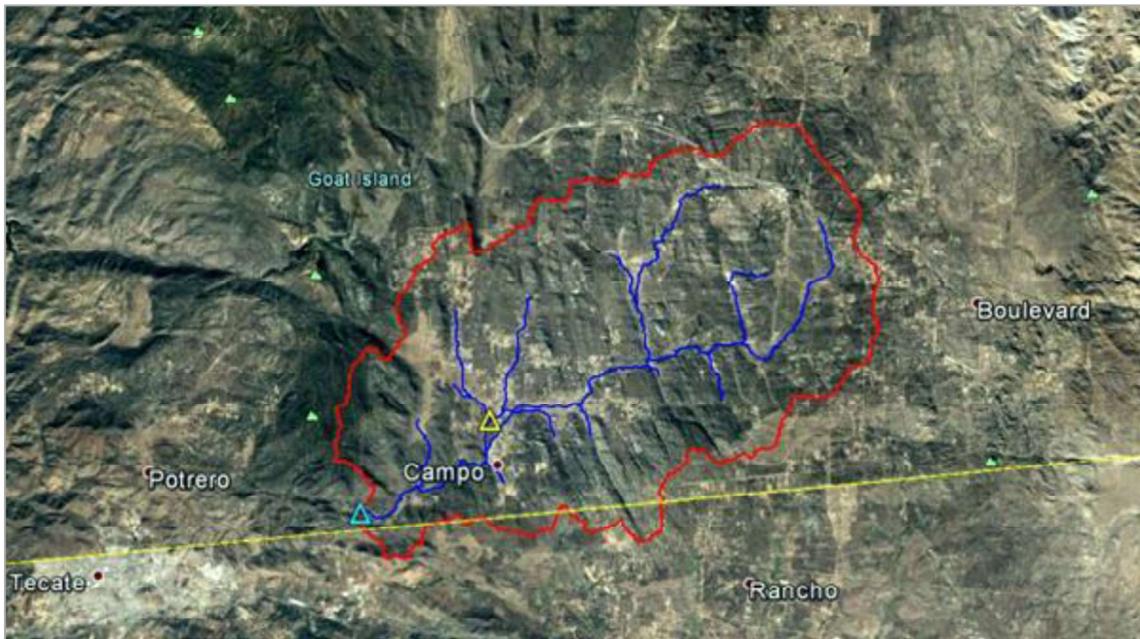
Fotografía Nro. 4.3. Estación de precipitación del NOAA NWS en Campo, California.



Fotografía Nro. 4.4. Estación de hidrométrica del USGS en la intersección de la quebrada Campo con la ruta estatal Nro. 94.

La Fig. 4.1 muestra la delimitación de la subcuenca de la quebrada Campo. La mayor parte de la subcuenca se localiza en el sureste del condado de San Diego. Sin embargo, una fracción muy pequeña se localiza en Baja California, México. El ecosistema principal de la subcuenca es el Chaparral Mediterráneo, que corresponde a un clima de verano cálido Mediterráneo según la clasificación climática de Koppen (Csa). La precipitación media anual es 400 mm (15.78"). La Fig. 4.2 muestra el mapa hidrológico de la subcuenca de la quebrada Campo.

Después de cruzar a México, la quebrada de Campo se renombra como Cañada Joe Bill, que desemboca en la quebrada Tecate en la localidad de Tecate. A su vez, la quebrada Tecate desemboca en el río Tijuana, este último finalmente desemboca en el Océano Pacífico en la playa Imperial, California.



Fuente: Google Earth.

Figura Nro 4.1. Vista aérea de la subcuenca de la quebrada Campo.

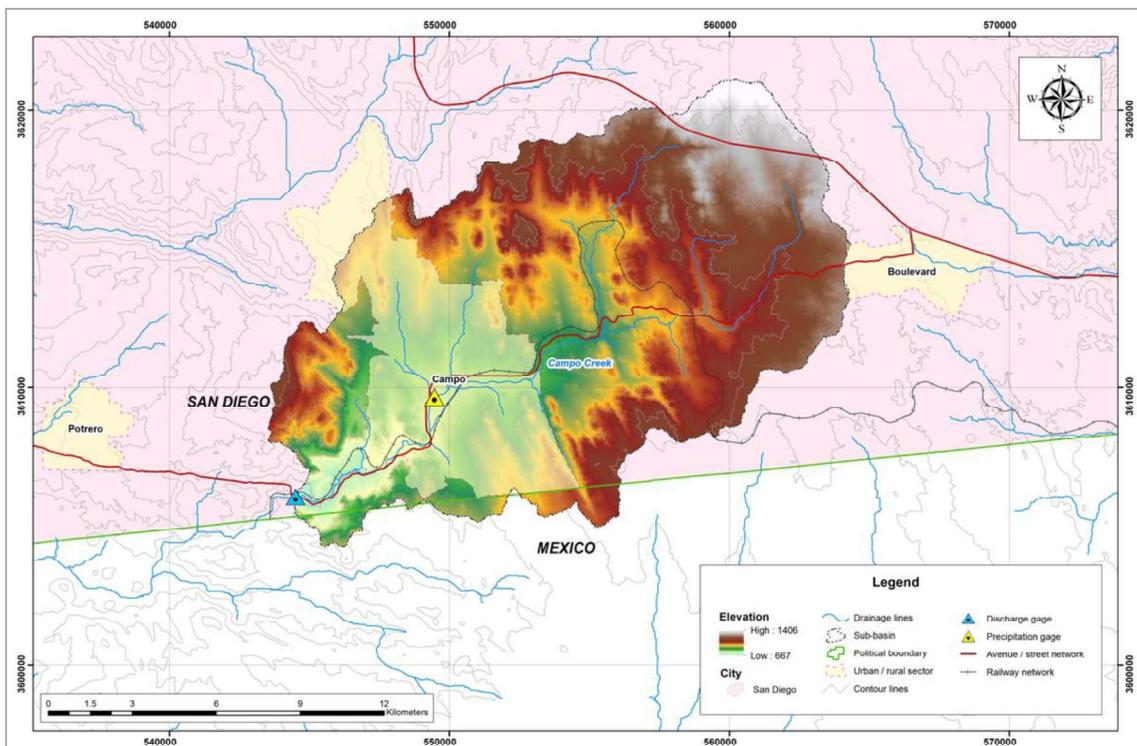


Figura Nro 4.2. Mapa hidrológico de la subcuenca de la quebrada Campo.



La Tabla 4.2 muestra la relación de estaciones de datos de precipitación y descargas para la subcuenca de la quebrada Campo. La Tabla 4.3 muestra los parámetros geomorfológicos e hidrológicos calculados para la subcuenca de la quebrada Campo.

Tabla Nro 4.2. Estaciones de la subcuenca de la quebrada Campo.

Variable	Agencia	Código	Nombre de la estación	Este (m)	Norte (m)	Elevación (msnm)
Precipitación	NWS	41424	Campo	549487	3604111	801.6
Descarga	USGS	11012500	Quebrada Campo, Campo	544602	3606059	667

Fuente: National Weather Service y United States Geological Service.

Tabla Nro 4.3. Parámetros geomorfológicos e hidrológicos de la subcuenca de la quebrada Campo.

No.	Descripción	Símbolo	Unidades	Valor
1	Área de drenaje	A	km ²	218.04
2	Perímetro del área de drenaje	P	km	101.25
3	Longitud hidráulica de la cuenca	L	km	34.83
4	Índice de forma	K_f	-	0.18
5	Índice de compacidad	K_c	-	1.93
6	Elevación máxima	$E_{máx}$	msnm	1406
7	Elevación mínima	$E_{mín}$	msnm	667
8	Pendiente promedio superficial	S_0	m/m	0.171
9	Pendiente del cauce (de 0 hasta 100%)	S_1	m/m	0.021
10	Pendiente del cauce (de 10 hasta 85%)	S_2	m/m	0.018
11	Longitud total del canal principal	$\sum L$	km	72.98
12	Precipitación media anual	P_{ma}	mm	400

Fuente: Elaboración propia.

Las Fig. 4.3 de (a) hasta (c), muestran los tres (3) hidrogramas de inundación seleccionados para el análisis.



Figura Nro 4.3 (a) Hidrograma de inundación de la quebrada Campo Nro. 1 – Año 1983.



Figura Nro 4.3 (b) Hidrograma de inundación de la quebrada Campo Nro. 2 – Año 1993.



Figura Nro 4.3 (c) Hidrograma de inundación de la quebrada Campo Nro. 3 – Año 1998.

4.4.2. Río Whitewater en Mecca, CA

La cabera de la cuenca del río Whitewater está localizada cerca de la montaña San Gorgonio, al sureste de la ciudad de Forest Falls, California. La corriente fluye predominante en dirección sureste cruzando la comunidad de Whitewater (Fotografía 4.5), hasta drenar en el mar Saltón (Fotografía 4.6). Las estaciones meteorológicas del *National Weather Service* (NWS) están localizadas en las ciudades de Palm Springs, Indio y Palm Desert. La estación hidrométrica del *United States Geological Service* (USGS) está localizada cerca de la entrada del mar Saltón.



Fotografía Nro. 4.5. Vista del Cañón del río Whitewater.



Fotografía Nro. 4.6. Ingreso del río Whitewater al mar Saltón.

La Fig. 4.4 muestra la delimitación de la cuenca del río Whitewater. La mayor parte de la cuenca está localizada en el condado de Riverside. Sin embargo, una pequeña fracción está localizada en el condado de San Bernardino. Esta cuenca es considerada una de las más importantes por su gran actividad agrícola desarrollada al sureste de California, cuenta con un clima de verano frío/caliente según la clasificación climática de Koppen. La precipitación media anual es 112 mm (4.41"). La Fig. 4.5 y 4.6 muestran el mapa hidrológico y el mapa de precipitación media anual de la cuenca del río Whitewater.



Fuente: Google Earth.

Figura Nro 4.4. Vista aérea de la cuenca del río Whitewater.

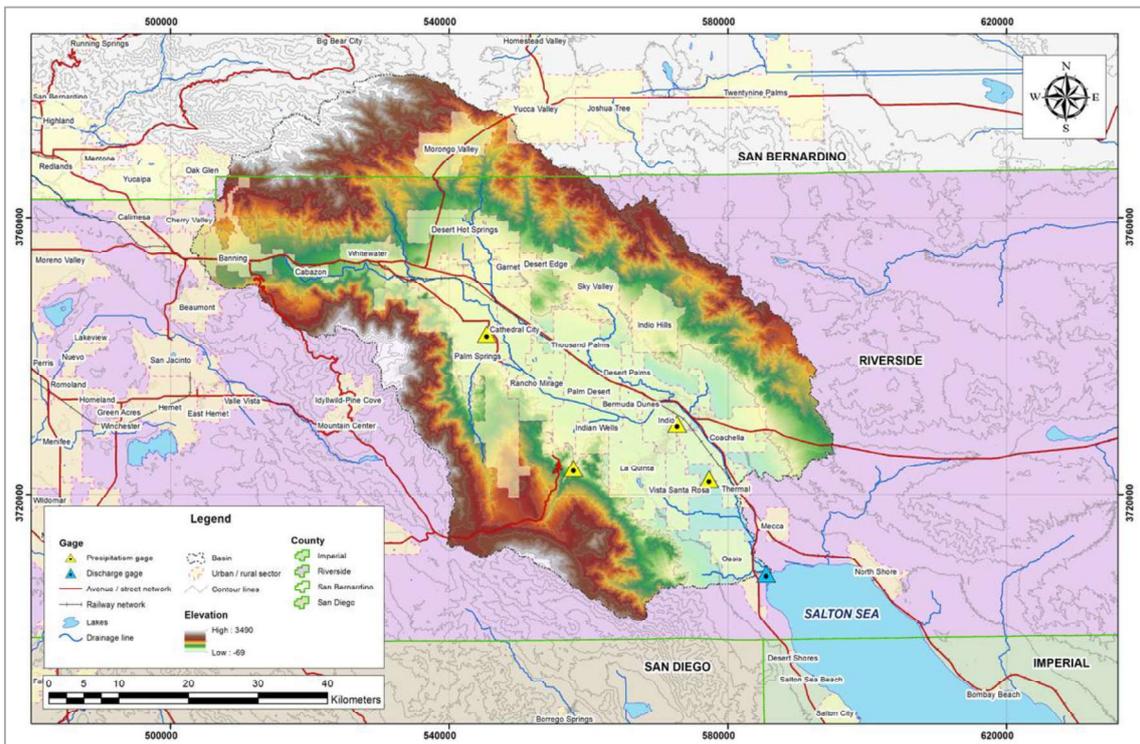


Figura Nro 4.5. Mapa hidrológico de la cuenca del río Whitewater.

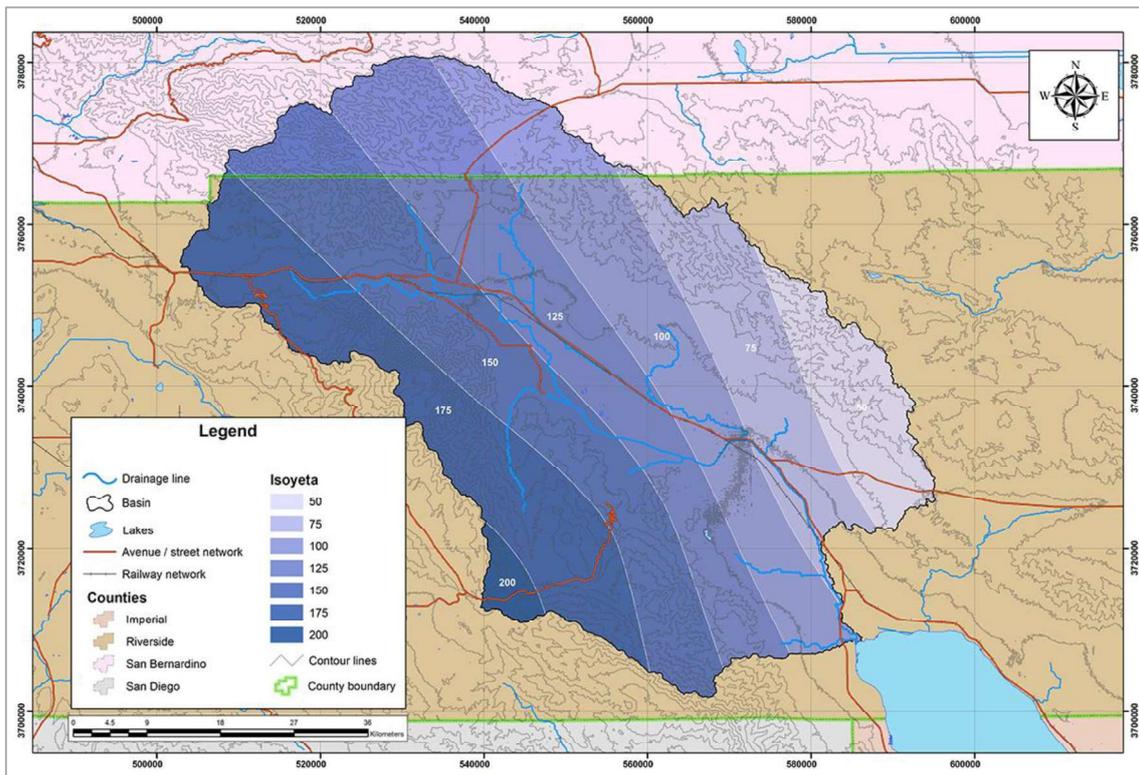


Figura Nro 4.6. Mapa de precipitación media anual de la cuenca del río Whitewater.

La Tabla 4.4 muestra la relación de estaciones de datos de precipitación y descargas para la cuenca del río Whitewater. La Tabla 4.5 muestra los parámetros geomorfológicos e hidrológicos calculados para la cuenca del río Whitewater.

Tabla Nro 4.4. Estaciones de la cuenca del río Whitewater.

Variable	Agencia	Código	Nombre de la estación	Este (m)	Norte (m)	Elevación (msnm)
Precipitación	NWS	048892	Desert Resorts RGNL AP	577284	3722121	-36
Precipitación	NWS	044259	Indio Fire STN	572715	3730124	-6.4
Precipitación	NWS	042327	Deep Canyon LAB	557824	3723678	366
Precipitación	NWS	046635	Palm Springs	545368	3743138	130
Descarga	USGS	10259540	Río Whitewater, Whitewater	585741	3709842	-69

Fuente: National Weather Service y United States Geological Service.

Tabla Nro 4.5. Parámetros geomorfológicos e hidrológicos de la cuenca del río Whitewater.

No.	Descripción	Símbolo	Unidades	Valor
1	Área de drenaje	A	km ²	3849
2	Perímetro del área de drenaje	P	km	461.82
3	Longitud hidráulica de la cuenca	L	km	126.92
4	Índice de forma	K_f	-	0.24
5	Índice de compacidad	K_c	-	2.10
6	Elevación máxima	$E_{máx}$	msnm	3490
7	Elevación mínima	$E_{mín}$	msnm	-69
8	Pendiente promedio superficial	S_0	m/m	0.268
9	Pendiente del cauce (de 0 hasta 100%)	S_1	m/m	0.028
10	Pendiente del cauce (de 10 hasta 85%)	S_2	m/m	0.012
11	Longitud total del canal principal	$\sum L$	km	294.48
12	Precipitación media anual	P_{ma}	mm	112

Fuente: Elaboración propia.

Las Fig. 4.7 de (a) hasta (c), muestran los tres (3) hidrogramas de inundación seleccionados para el análisis.



Figura Nro 4.7 (a) Hidrograma de inundación del río Whitewater Nro. 1 – Año 2008.

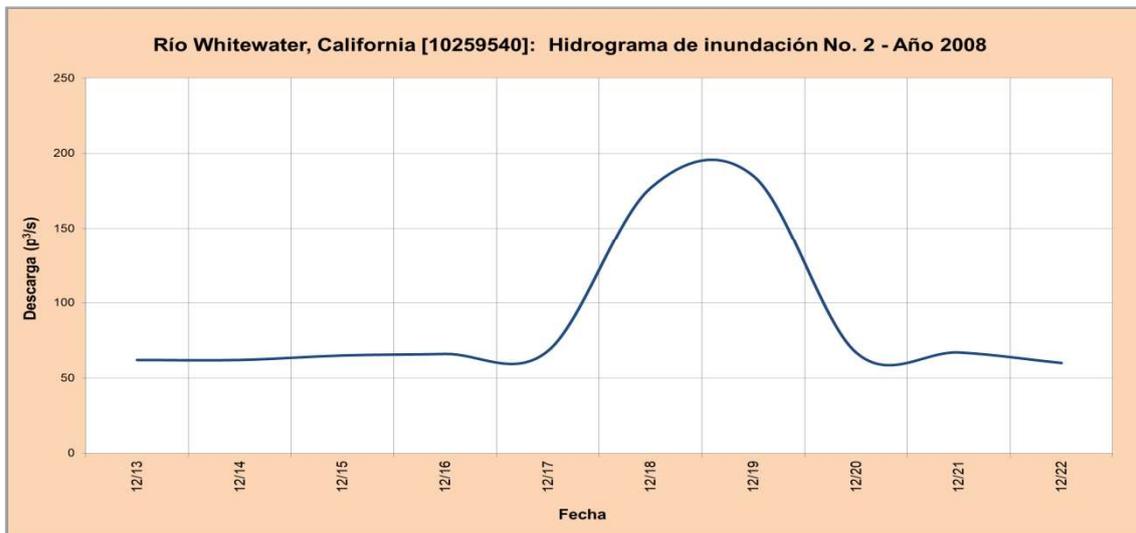


Figura Nro 4.7 (b) Hidrograma de inundación del río Whitewater Nro. 2 – Año 2008.



Figura Nro 4.7 (c) Hidrograma de inundación del río Whitewater Nro. 3 – Año 2015.

4.4.3. Río Mojave en Victorville, CA

La cabecera de la cuenca del río Mojave está localizada en las cercanías de las zonas montañosas de Indian Wells, Cantil, Peasonville, Darwin, Cañon Afton (Fotografía 4.7), Montaña Blanco, Montaña Sylvana, Montaña Gold, Montaña Palmer, Beatty, Valle Amargosa, Montaña Clark y Baker. La corriente fluye predominantemente en dirección sur cruzando la comunidad de Helendale (Fotografía 4.8).

Las estaciones meteorológicas del *National Weather Service* (NWS) están localizadas en Pearblossom, Palmdale, Lancaster, Mojave, Barstow, Randsburg, Lago China NAF, Trona y Stovepipe wells. La estación hidrométrica del *United States Geological Service* (USGS) está localizada en la intersección de la carretera nacional local con la región de Alto Mojave.



Fotografía Nro. 4.7. Cruce del río Mojave en la zona del Cañón Afton, California.



Fotografía Nro. 4.8. Río Mojave en la zona de Helendale, California.

La Fig. 4.8 muestra la delimitación de la cuenca del río Mojave. La cuenca está localizada en los condados de Kern, Los Ángeles, Inyo y San Bernardino en California; y en los condados de Goldfiel, Beatty, Yucca Flat, Valle Amargosa y Pahrump en Nevada. Según la clasificación climática de Koppen su clima es desértico (BWk). La precipitación media anual es de 109 mm (4.29"). Las Fig. 4.9 y 4.10, muestran el mapa hidrológico y el mapa de precipitación media anual de la cuenca del río Mojave.



Fuente: Google Earth.

Figura Nro 4.8. Vista aérea de la cuenca del río Mojave.

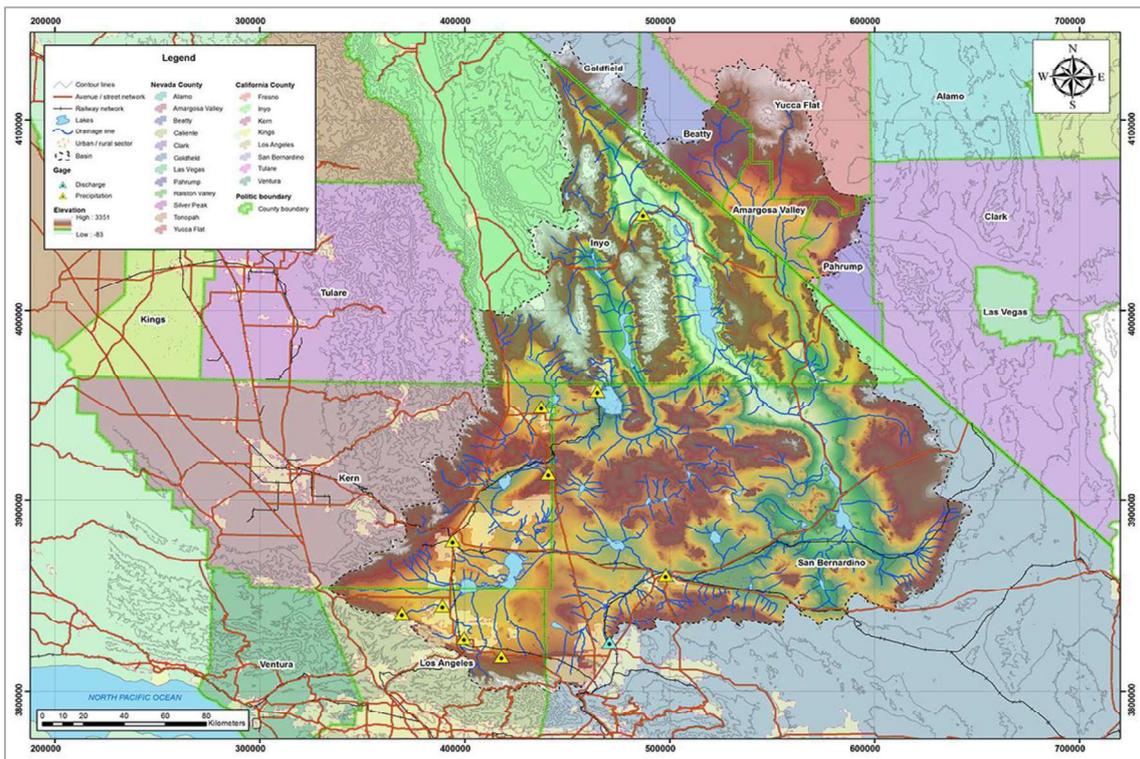


Figura Nro 4.9. Mapa hidrológico de la cuenca del río Mojave.

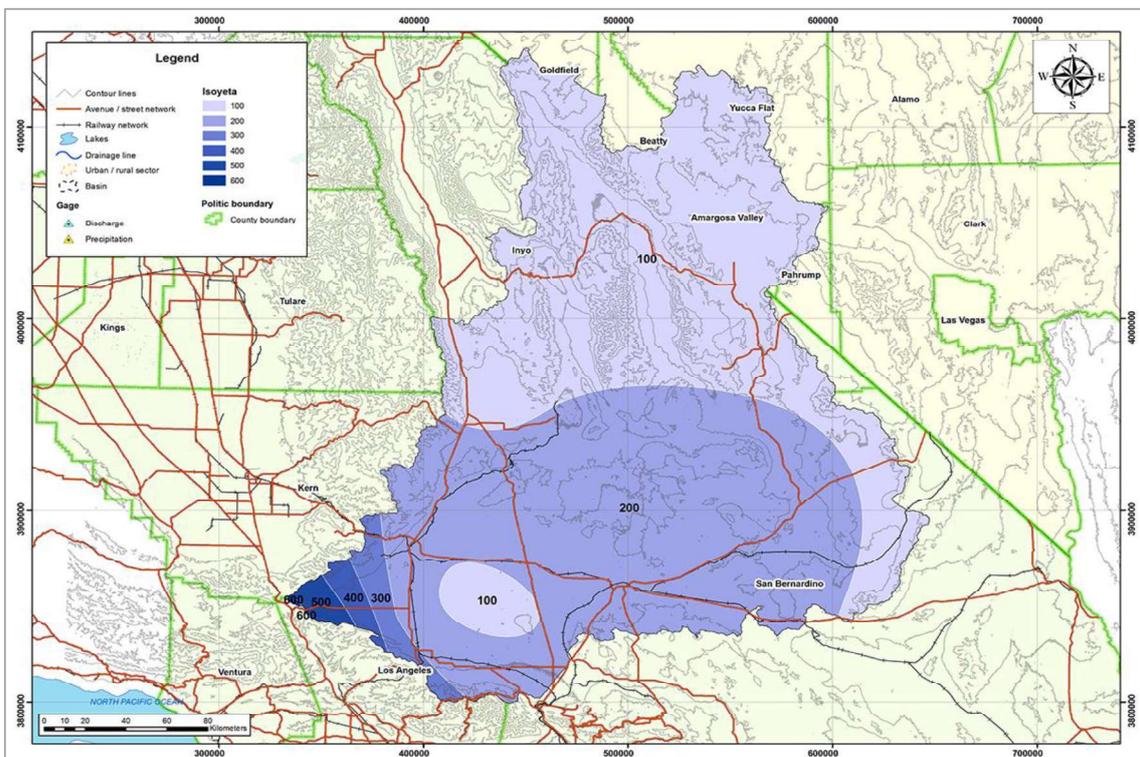


Figura Nro 4.10. Mapa de precipitación media anual de la cuenca del río Mojave.



La Tabla 4.6 muestra la relación de estaciones de datos de precipitación y descargas para la cuenca del río Mojave. La Tabla 4.7 muestra los parámetros geomorfológicos e hidrológicos calculados para la cuenca del río Mojave.

Tabla Nro 4.6. Estaciones de la cuenca del río Mojave.

Variable	Agencia	Código	Nombre de la estación	Este (m)	Norte (m)	Elevación (msnm)
Precipitación	NWS	046624	Palmdale	399681	3827936	796
Precipitación	NWS	042941	Fairmont	369064	3841260	933
Precipitación	NWS	003159	Lancaster	389083	3845002	713
Precipitación	NWS	046773	Pearblossom	417659	3818240	945
Precipitación	NWS	045756	Mojave	394032	3879113	834
Precipitación	NWS	093104	China Lake NAF	437291	3949510	680
Precipitación	NWS	049035	Trona	464670	3957800	517
Precipitación	NWS	040521	Barstow	498020	3972056	677
Precipitación	NWS	053139	Stovepipe Wells 1 SW	487032	4050726	26
Precipitación	NWS	047253	Randsburg	440727	3914179	1088
Descarga	USGS	10261500	Río Mojave, Victorville	470674	3825745	-83

Fuente: National Weather Service y United States Geological Service.

Tabla Nro 4.7. Parámetros geomorfológicos e hidrológicos de la cuenca del río Mojave.

No.	Descripción	Símbolo	Unidades	Valor
1	Área de drenaje	A	km ²	56583
2	Perímetro del área de drenaje	P	km	1787.72
3	Longitud hidráulica de la cuenca	L	km	511.81
4	Índice de forma	K_f	-	0.22
5	Índice de compacidad	K_c	-	2.12
6	Elevación máxima	$E_{máx}$	msnm	3351
7	Elevación mínima	$E_{mín}$	msnm	-83
8	Pendiente promedio superficial	S_0	m/m	0.164
9	Pendiente del cauce (de 0 hasta 100%)	S_1	m/m	0.0038
10	Pendiente del cauce (de 10 hasta 85%)	S_2	m/m	0.00014
11	Longitud total del canal principal	$\sum L$	km	6067.17
12	Precipitación media anual	P_{ma}	mm	109

Fuente: Elaboración propia.

Las Fig. 4.11 de (a) hasta (c), muestran los tres (3) hidrogramas de inundación seleccionados para el análisis.

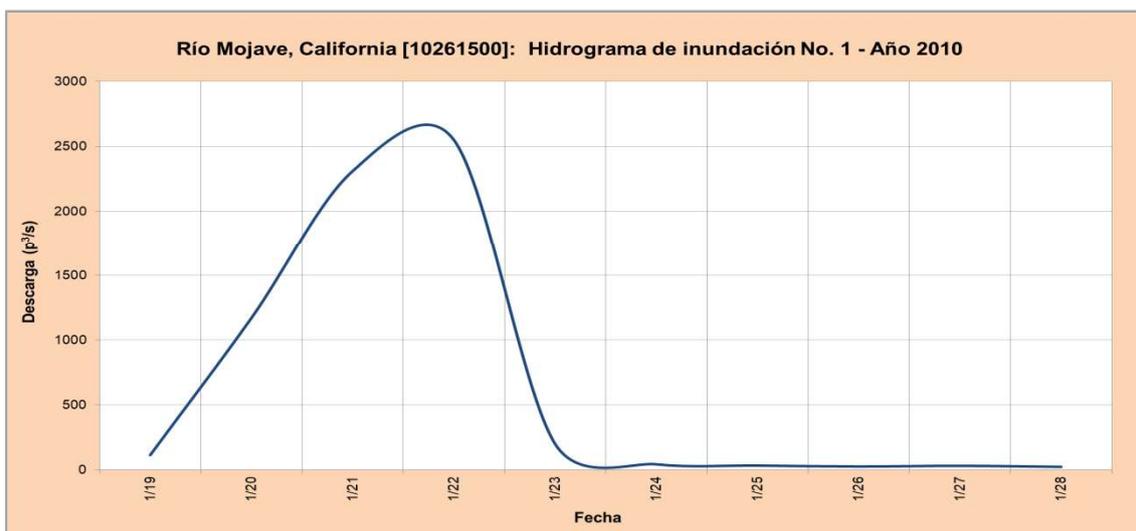


Figura Nro 4.11 (a) Hidrograma de inundación del río Mojave Nro. 1 – Año 2010.



Figura Nro 4.11 (b) Hidrograma de inundación del río Mojave Nro. 2 – Año 2017.

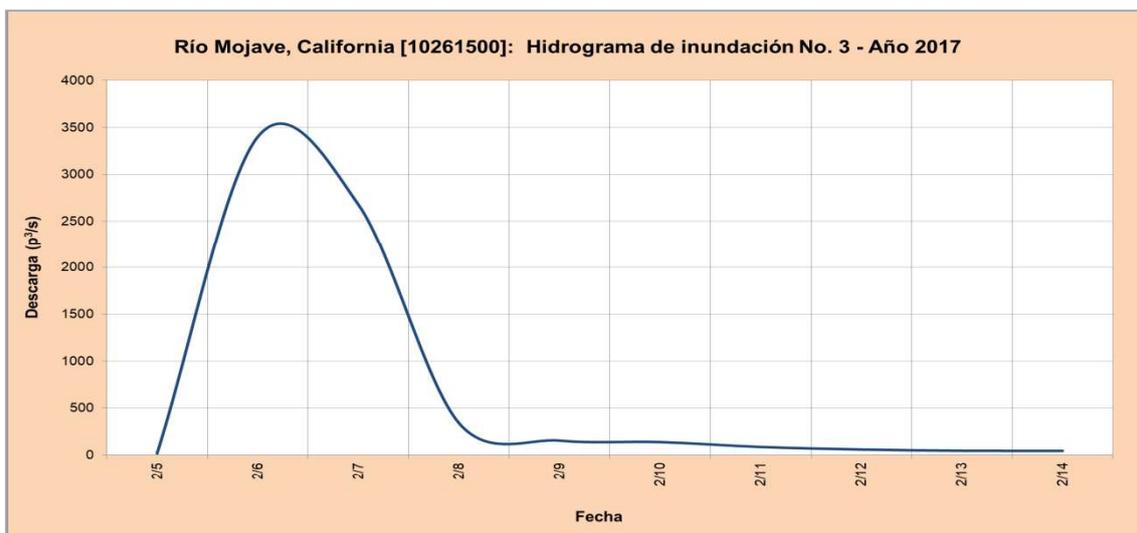


Figura Nro 4.11 (c) Hidrograma de inundación del río Mojave Nro. 3 – Año 2017.

4.4.4. Río Amargosa en Tecopa, CA

La cabecera de cuenca del río Amargosa está localizada en las cercanías de la Montaña Timber, Montaña Negra, la comunidad de Beatty, Shoshone y Valle Amargosa (Fotografía 4.9). La corriente fluye predominantemente en dirección sureste cruzando las comunidades de Beatty, Valle Amargosa, Evelyn, Shoshone y Tecopa (Fotografía 4.10).

La estación meteorológica del *National Weather Service* (NWS) está localizada en Shoshone. La estación hidrométrica del *United States Geological Service* (USGS) está localizada cerca en Tecopa.



Fotografía Nro. 4.9. Aguas arriba del río Amargosa, California.



Fotografía Nro. 4.10. Río Amargosa en Shoshone, California.

La Fig. 4.12 muestra la delimitación de la cuenca del río Amargosa. La cuenca está localizada en el condado de Inyo en California, y en los condados de Beatty, Yucca Flat, Valle Amargosa y Pahrump en Nevada. Según la clasificación climática de Koppen el clima es desértico frío (BWk). La precipitación media anual es 110 mm (4.32"). La Fig. 4.13 muestra el mapa hidrológico de la cuenca del río Amargosa.



Fuente: Google Earth.

Figura Nro 4.12. Vista aérea de la cuenca del río Amargosa.

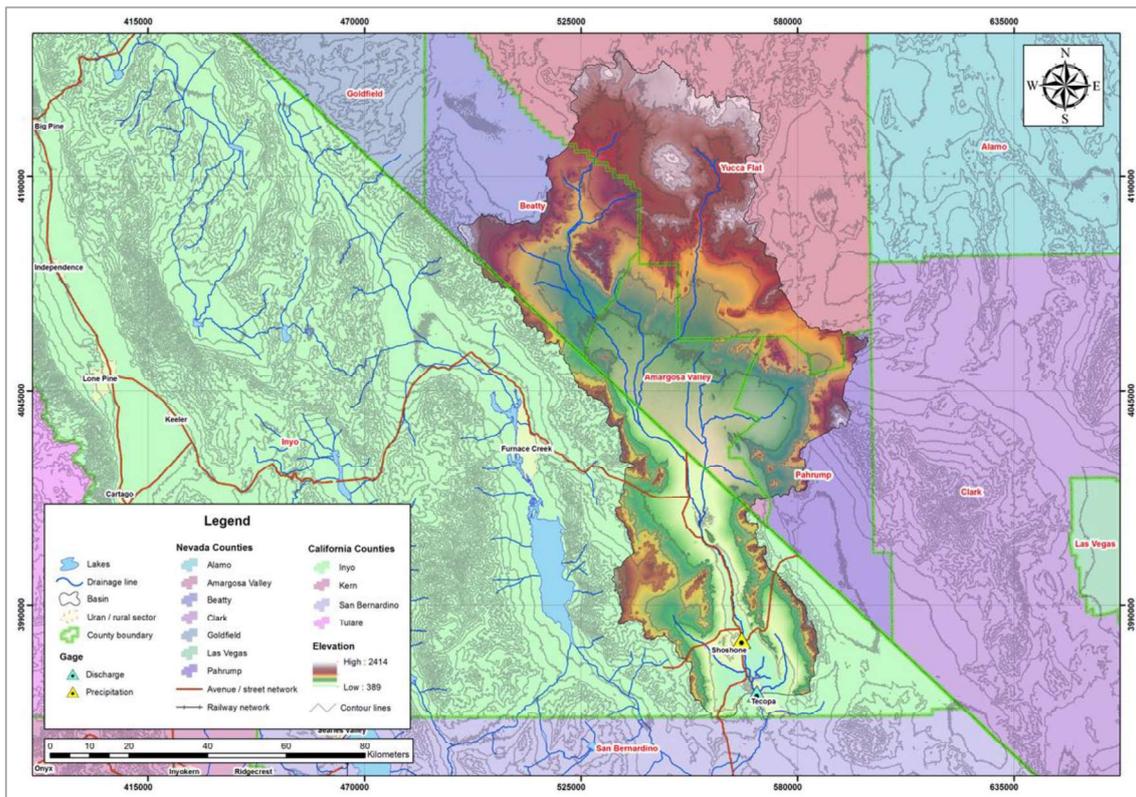


Figura Nro 4.13. Mapa hidrológico de la cuenca del río Amargosa.

La Tabla 4.8 muestra la relación de estaciones de datos de precipitación y descargas para la cuenca del río Mojave. La Tabla 4.9 muestra los parámetros geomorfológicos e hidrológicos calculados para la cuenca del río Mojave.

Tabla Nro 4.8. Estaciones de la cuenca del río Amargosa.

Variable	Agencia	Código	Nombre de la estación	Este (m)	Norte (m)	Elevación (msnm)
Precipitación	NWS	048200	Shoshone	565742	3981052	471
Descarga	USGS	10251300	Río Amargosa, Tecopa	569607	3967432	389

Fuente: National Weather Service y United States Geological Service.

Tabla Nro 4.9. Parámetros geomorfológicos e hidrológicos de la cuenca del río Amargosa.

No.	Descripción	Símbolo	Unidades	Valor
1	Área de drenaje	A	km ²	8315
2	Perímetro del área de drenaje	P	km	657.70
3	Longitud hidráulica de la cuenca	L	km	190.54
4	Índice de forma	K_f	-	0.23
5	Índice de compacidad	K_c	-	2.03
6	Elevación máxima	$E_{máx}$	msnm	2414
7	Elevación mínima	$E_{mín}$	msnm	389
8	Pendiente promedio superficial	S_0	m/m	0.151
9	Pendiente del cauce (de 0 hasta 100%)	S_1	m/m	0.011
10	Pendiente del cauce (de 10 hasta 85%)	S_2	m/m	0.007
11	Longitud total del canal principal	$\sum L$	km	597.63
12	Precipitación media anual	P_{ma}	mm	110

Fuente: Elaboración propia.

Las Fig. 4.14 de (a) hasta (c), muestran los tres (3) hidrogramas de inundación seleccionados para el análisis.



Figura Nro 4.14 (a) Hidrograma de inundación del río Amargosa Nro. 1 – Año 2003.

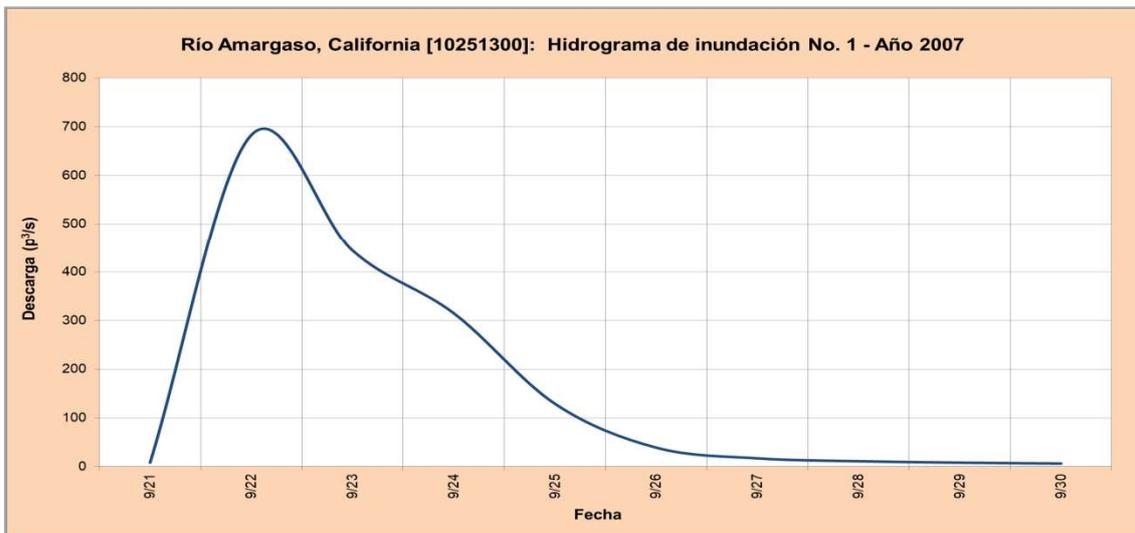


Figura Nro 4.14 (b) Hidrograma de inundación del río Amargosa Nro. 2 – Año 2007.

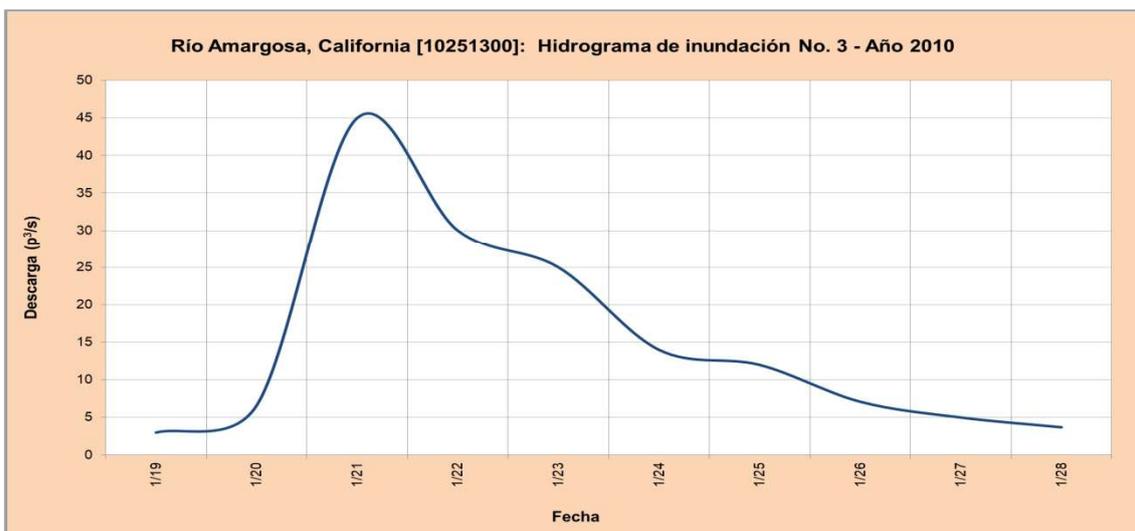


Figura Nro 4.14 (c) Hidrograma de inundación del río Amargosa Nro. 3 – Año 2010.

4.4.5. Río Petaluma en Petaluma, CA

La cabecera de subcuenca del río Petaluma está localizada en las cercanías de la Montaña Sonoma. La corriente fluye predominantemente en dirección suroeste cruzando las comunidades de Penngrove y Petaluma (Fig. 4.15). La estación meteorológica del *National Weather Service* (NWS) está localizada en Petaluma (Fig. 4.16). La estación hidrométrica del *United States Geological Service* (USGS) está localizada en Petaluma.



Fuente: Google Earth.

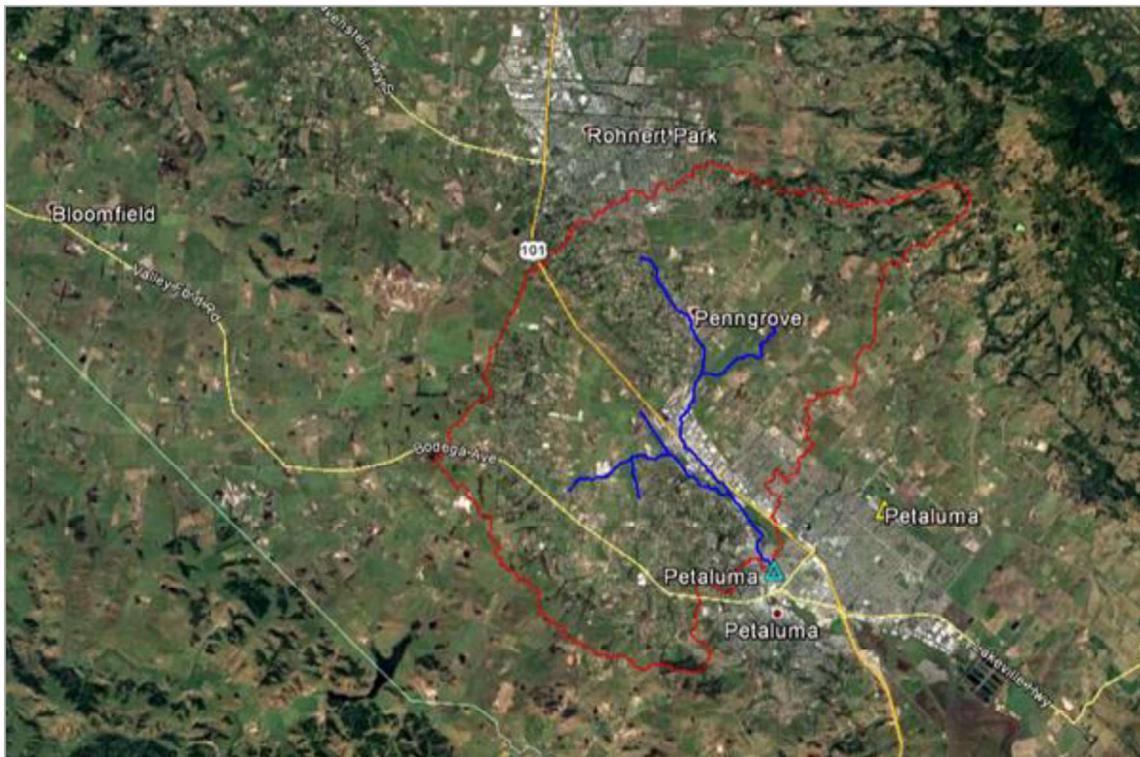
Figura Nro 4.15. Río Petaluma en la ciudad de Petaluma, California.



Fuente: Google Earth.

Figura Nro 4.16. Estación hidrométrica del USGS en el río Petaluma.

La Fig. 4.17 muestra la delimitación de la subcuenca del río Petaluma. La cuenca está localizada en el condado de Sonoma en California. Según la clasificación climática de Koppen el clima es medio mediterráneo. La precipitación media anual es de 624 mm (24.57"). La Fig. 4.18 muestra el mapa hidrológico de la subcuenca del río Petaluma.



Fuente: Google Earth.

Figura Nro 4.17. Vista aérea de la subcuenca del río Petaluma.

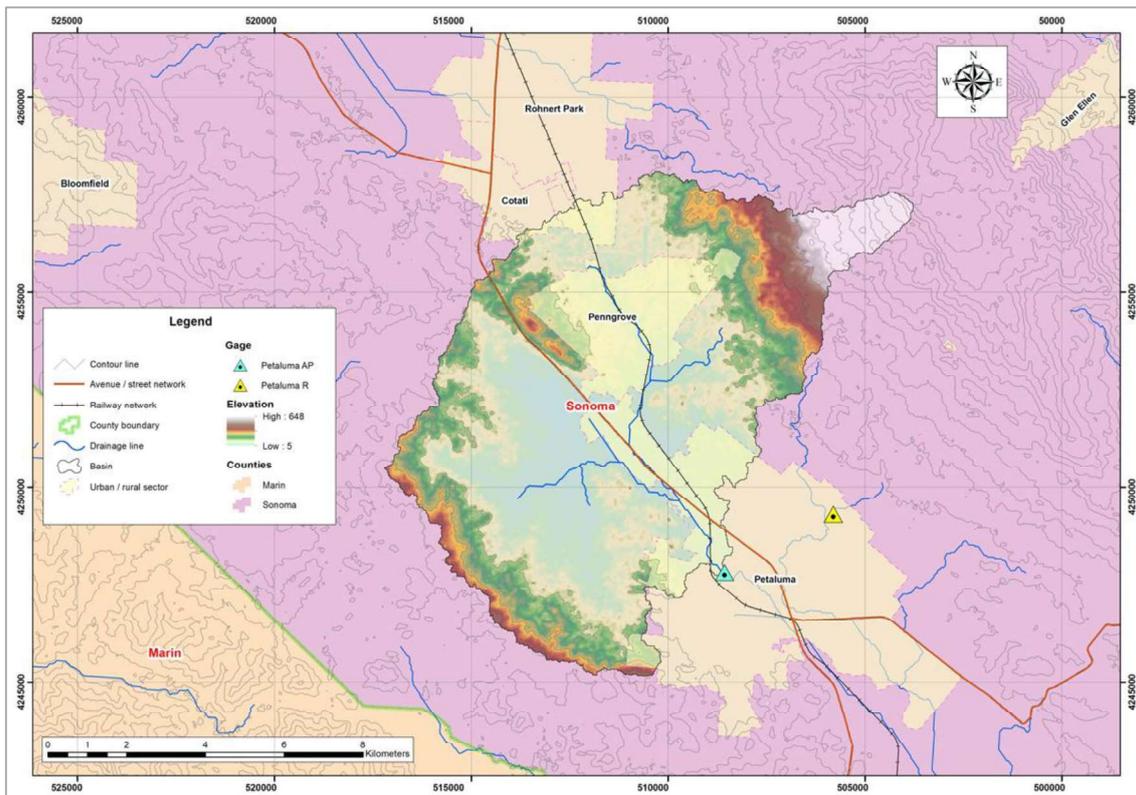


Figura Nro 4.18. Mapa hidrológico de la subcuenca del río Petaluma.

La Tabla 4.10 muestra la relación de estaciones de datos de precipitación y descargas para la subcuenca del río Petaluma. La Tabla 4.11 muestra los parámetros geomorfológicos e hidrológicos calculados para la subcuenca del río Petaluma.

Tabla Nro 4.10. Estaciones de la subcuenca del río Petaluma.

Variable	Agencia	Código	Nombre de la estación	Este (m)	Norte (m)	Elevación (msnm)
Precipitación	NWS	046826	Petaluma airport	534315	4234489	6.10
Descarga	USGS	11459150	Punto bombeo de Copland	531577	4232321	5

Fuente: National Weather Service y United States Geological Service.

Tabla Nro 4.11. Parámetros geomorfológicos e hidrológicos de la subcuenca del río Petaluma.

No.	Descripción	Símbolo	Unidades	Valor
1	Área de drenaje	A	km ²	93
2	Perímetro del área de drenaje	P	km	68.81
3	Longitud hidráulica de la cuenca	L	km	17.64
4	Índice de forma	K_f	-	0.30
5	Índice de compacidad	K_c	-	2.01
6	Elevación máxima	$E_{máx}$	msnm	648
7	Elevación mínima	$E_{mín}$	msnm	5
8	Pendiente promedio superficial	S_0	m/m	0.099
9	Pendiente del cauce (de 0 hasta 100%)	S_1	m/m	0.036
10	Pendiente del cauce (de 10 hasta 85%)	S_2	m/m	0.025
11	Longitud total del canal principal	$\sum L$	km	20.98
12	Precipitación media anual	P_{ma}	mm	624

Fuente: Elaboración propia.

Las Fig. 4.19 de (a) hasta (c), muestran los tres (3) hidrogramas de inundación seleccionados para el análisis.

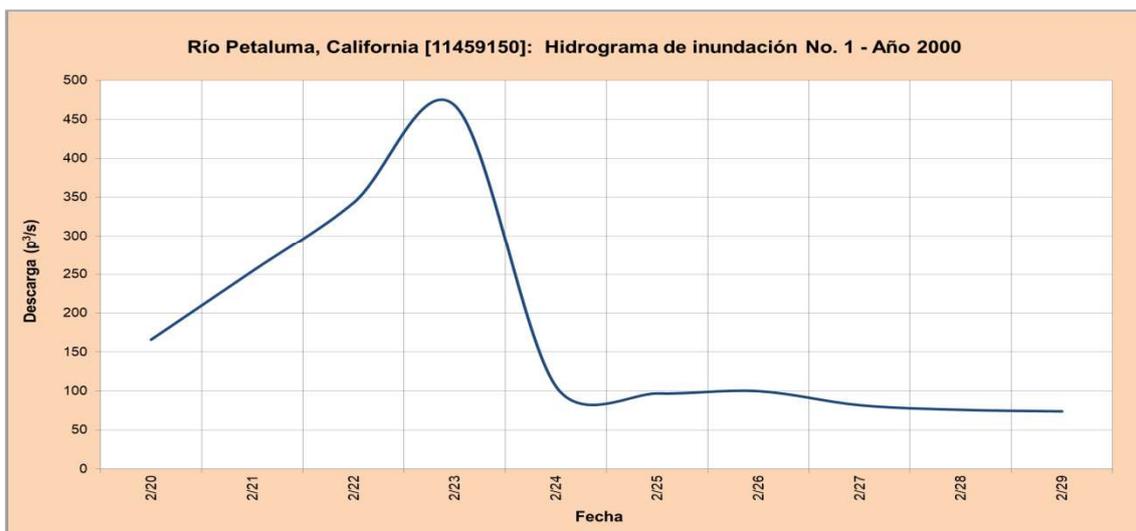


Figura Nro 4.19 (a) Hidrograma de inundación del río Petaluma Nro. 1 – Año 2000.

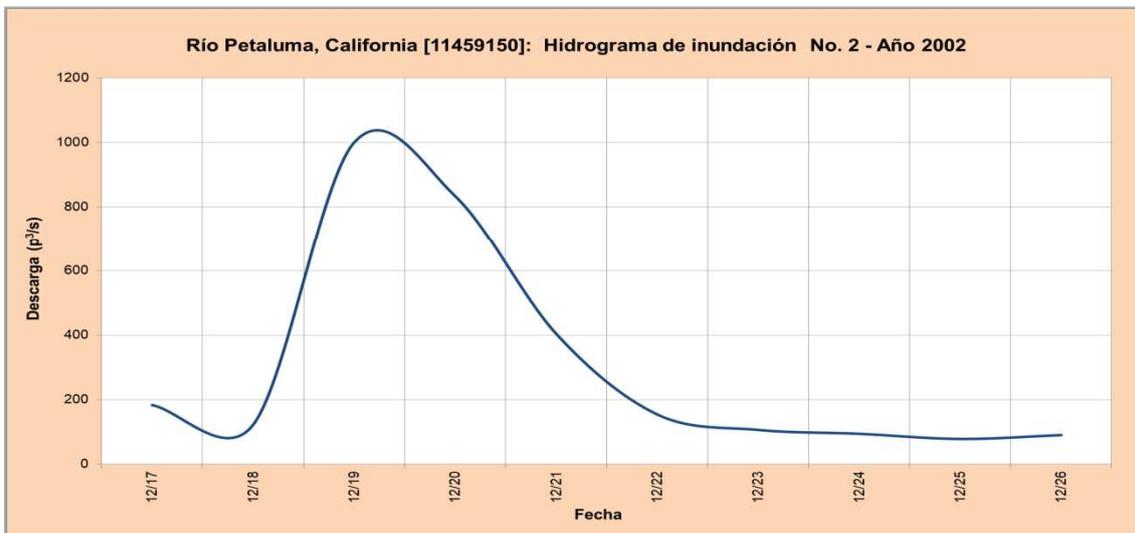


Figura Nro 4.19 (b) Hidrograma de inundación del río Petaluma Nro. 2 – Año 2002.

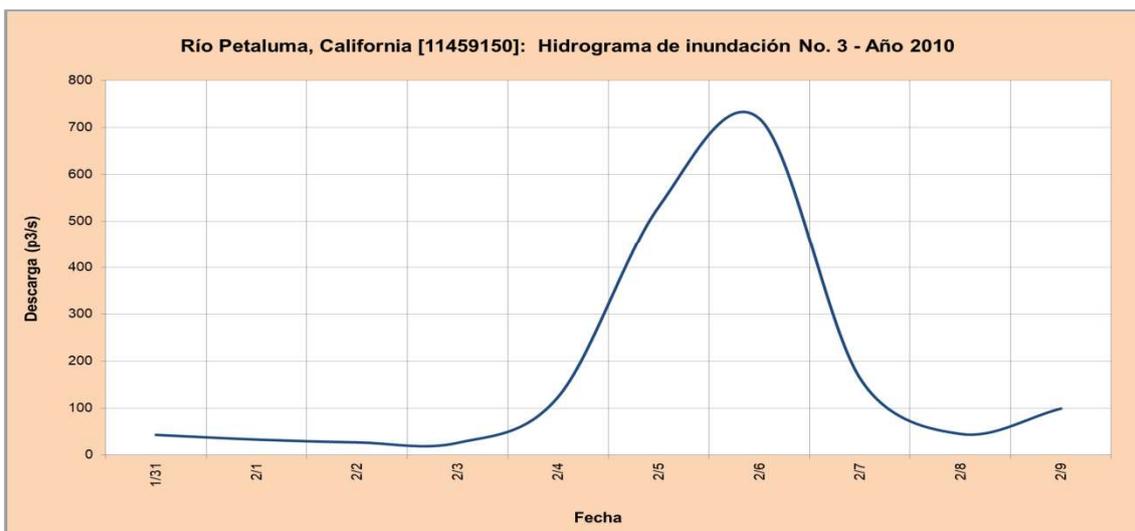


Figura Nro 4.19 (c) Hidrograma de inundación del río Petaluma Nro. 3– Año 2010.

4.4.6. Río Russian en Guerneville, CA

La cabecera de la cuenca del río Russian está localizada en las cercanías de la Montaña Santa Helena, Montaña Roja, parte alta de las comunidades de Valle Potter y Valle Redwood. La corriente fluye predominantemente en dirección sureste cruzando las comunidades de Valle Potter, Valle Redwood, Ukiah, El Roble, Largo, Hopland, Pieta, Preston, Cloverdale, Asti, Geyserville (Fig. 4.20), Healdsburg y Guerneville (Fig. 4.21).

Las estaciones meteorológicas del *National Weather Service* (NWS) están localizadas en Valle Potter, Ukiah y Cloverdale. La estación hidrométrica del *United States Geological Service* (USGS) está localizado en Guerneville.



Fuente: Google Earth.

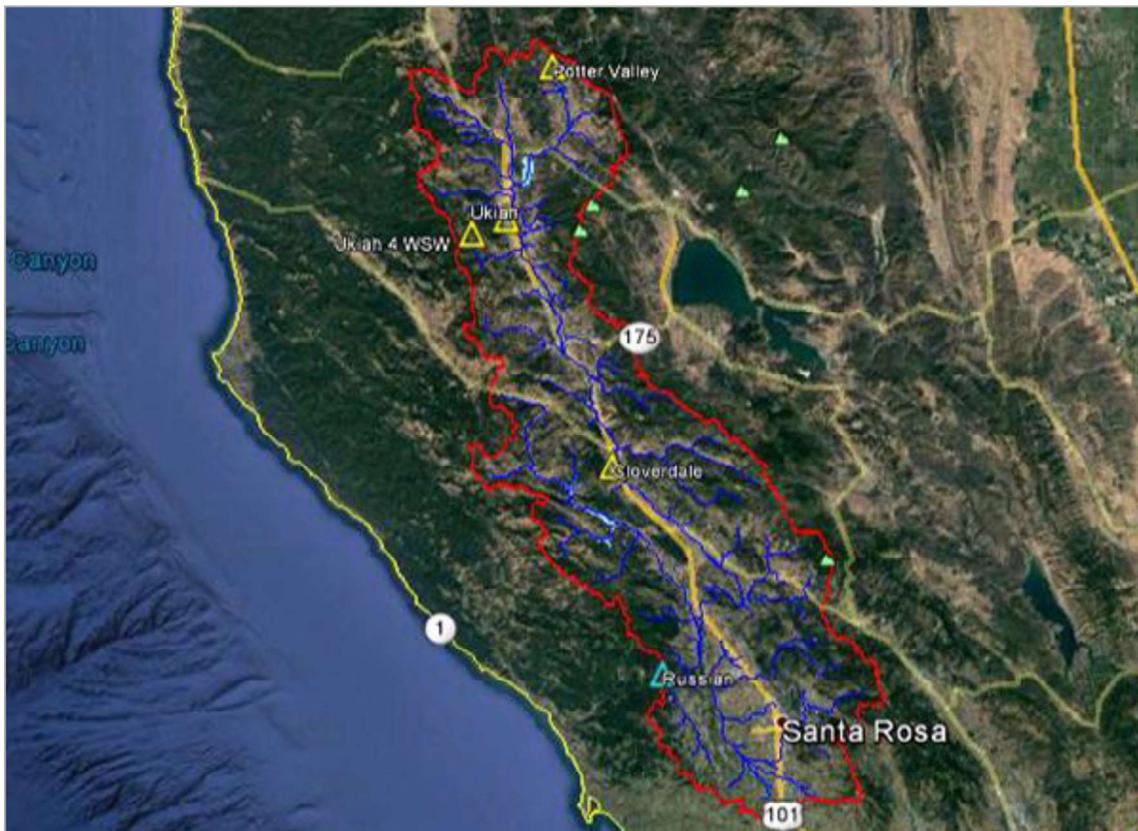
Figura Nro 4.20. Río Russian en la comunidad de Gerseyville.



Fuente: Google Earth.

Figura Nro 4.21. Río Russian en la comunidad de Guerneville.

La Fig. 4.22 muestra la delimitación de la cuenca del río Russian. La cuenca está localizada en los condados de Mendocino y Sonoma en California. Según la clasificación climática de Koppen se tiene un clima de verano cálido mediterráneo (Csa). La precipitación media anual es 1072 mm (42.20"). La Fig. 4.23 y 4.24, muestran el mapa hidrológico y el mapa de precipitación media anual de la cuenca del río Russian.



Fuente: Google Earth.

Figura Nro 4.22. Vista aérea de la cuenca del río Russian.

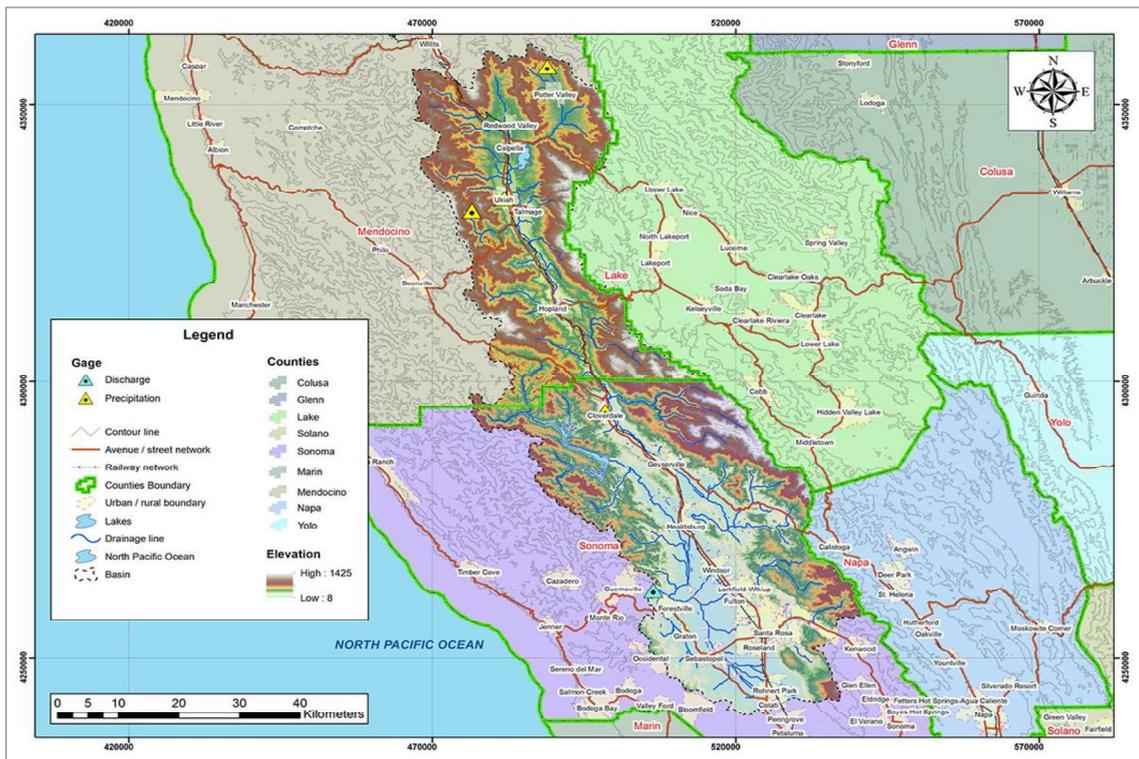


Figura Nro 4.23. Mapa hidrológico de la cuenca del río Russian.

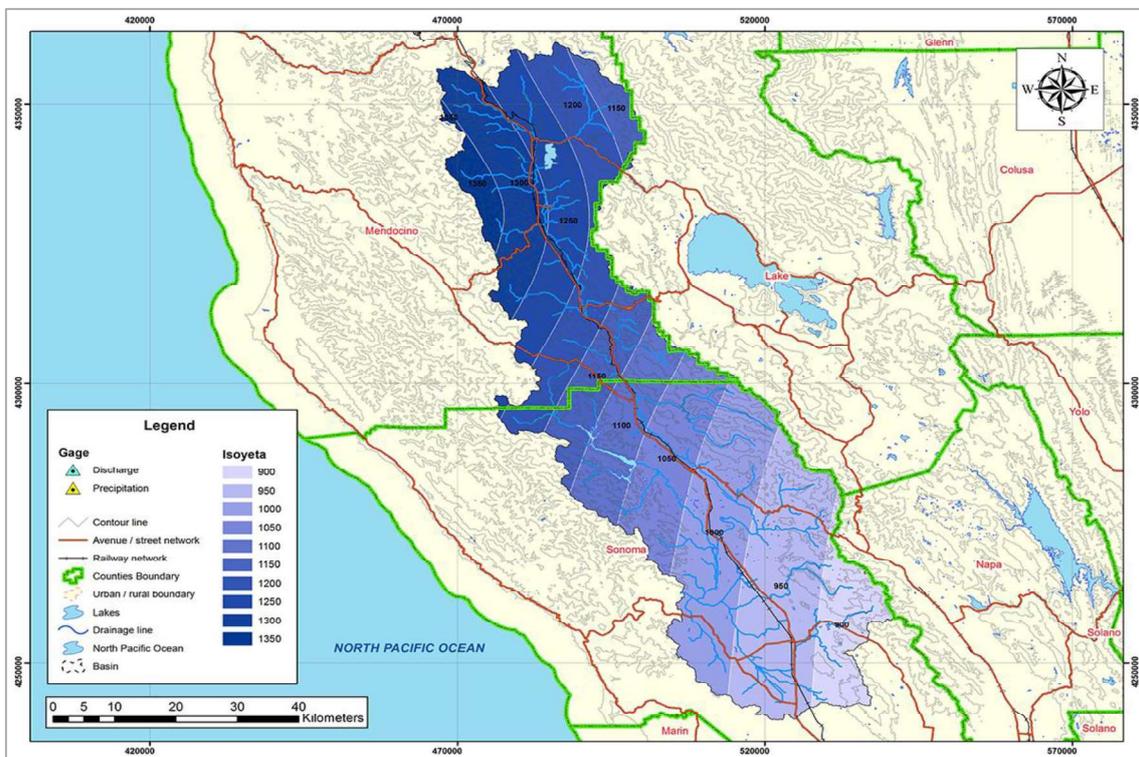


Figura Nro 4.24. Mapa de precipitación media anual de la cuenca del río Russian.

La Tabla 4.12 muestra la relación de estaciones de datos de precipitación y descargas para la cuenca del río Russian. La Tabla 4.13 muestra los parámetros geomorfológicos e hidrológicos calculados para la cuenca del río Russian.

Tabla Nro 4.12. Estaciones de la cuenca del río Russian.

Variable	Agencia	Código	Nombre de la estación	Este (m)	Norte (m)	Elevación (msnm)
Precipitación	NWS	041838	Cloverdale	498480	4294552	100
Precipitación	NWS	049126	Ukiah 4 WSW	476494	4330868	556
Precipitación	NWS	047109	Potter Valley PH	488920	4356951	310
Descarga	USGS	11467000	Río Russian, Guerneville	506394	4262251	6

Fuente: National Weather Service y United States Geological Service.

Tabla Nro 4.13. Parámetros geomorfológicos e hidrológicos de la cuenca del río Russian.

No.	Descripción	Símbolo	Unidades	Valor
1	Área de drenaje	A	km ²	3463
2	Perímetro del área de drenaje	P	km	610.32
3	Longitud hidráulica de la cuenca	L	km	161.20
4	Índice de forma	K_f	-	0.13
5	Índice de compacidad	K_c	-	2.92
6	Elevación máxima	$E_{máx}$	msnm	1425
7	Elevación mínima	$E_{mín}$	msnm	8
8	Pendiente promedio superficial	S_0	m/m	0.242
9	Pendiente del cauce (de 0 hasta 100%)	S_1	m/m	0.005
10	Pendiente del cauce (de 10 hasta 85%)	S_2	m/m	0.002
11	Longitud total del canal principal	$\sum L$	km	911.41
12	Precipitación media anual	P_{ma}	mm	1072

Fuente: Elaboración propia.

Las Fig. 4.25 de (a) hasta (c), muestran los tres (3) hidrogramas de inundación seleccionados para el análisis.

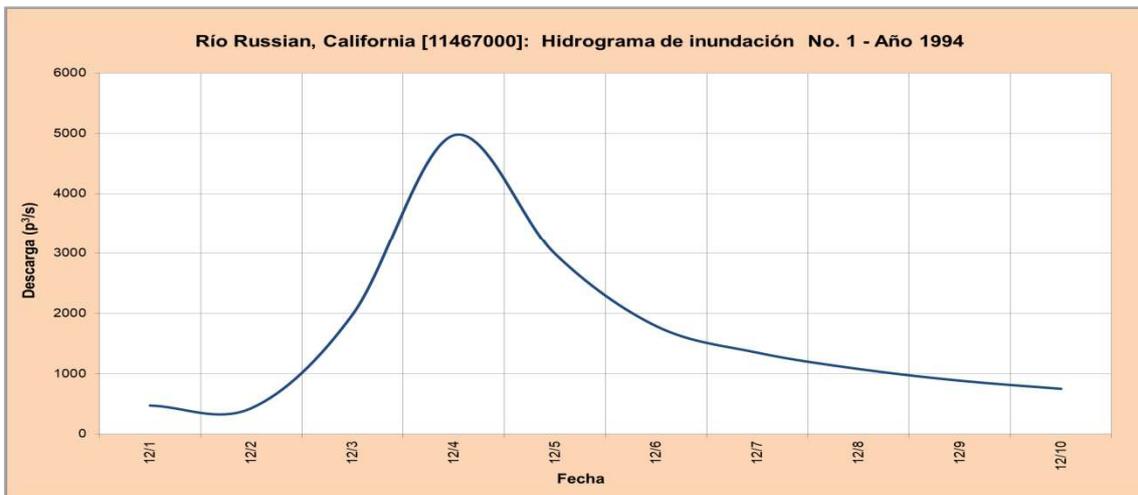


Figura Nro 4.25 (a) Hidrograma de inundación del río Russian Nro. 1 – Año 1994.

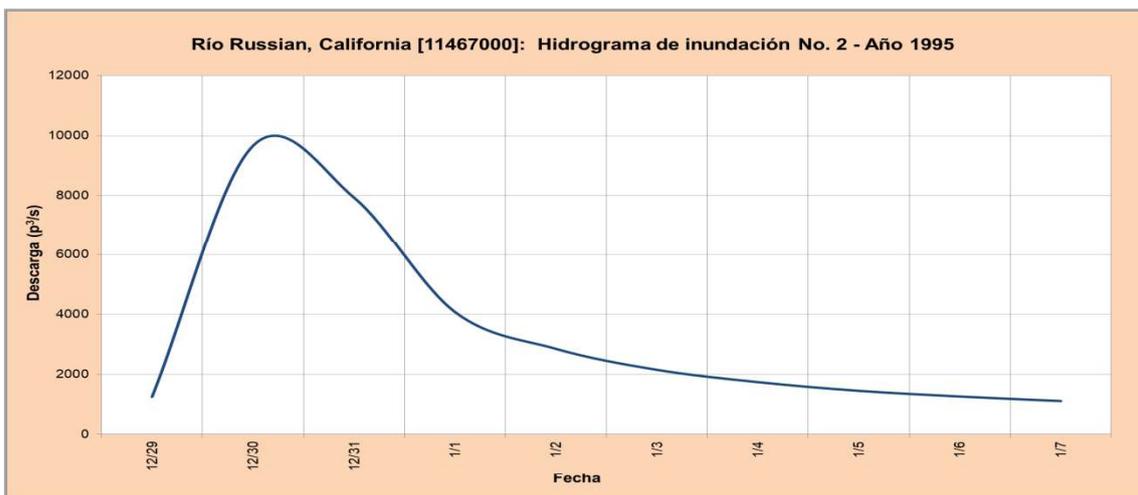


Figura Nro 4.25 (b) Hidrograma de inundación del río Russian Nro. 2 – Año 1995.



Figura Nro 4.25 (c) Hidrograma de inundación del río Russian Nro. 3 – Año 1998.

4.4.7. Quebrada Los Gatos en Coalinga, CA

La cabecera de subcuenca de la quebrada Los Gatos está localizada en las cercanías del Monte Santa Rita y Monte Condore. La corriente fluye predominantemente en dirección sureste cruzando la comunidad de Coalinga (Fig. 4.26). La estación meteorológica del *National Weather Service* (NWS) y la estación hidrométrica del *United States Geological Service* (USGS) están localizadas en la comunidad de Coalinga (Fotografía 4.11).



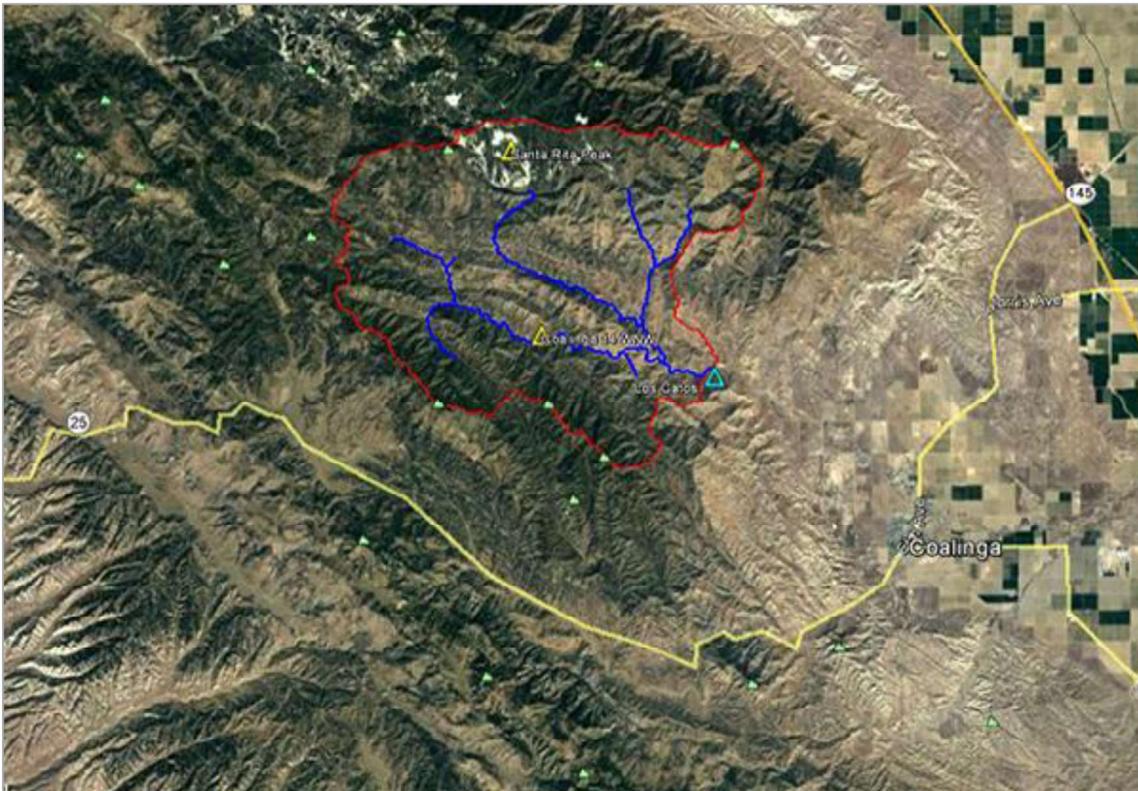
Fuente: Google Earth.

Figura Nro 4.26. Quebrada Los Gatos en la comunidad de Coalinga, California.



Fotografía Nro. 4.11. Quebrada Los Gatos aguas arriba de la comunidad de Coalinga.

La Fig. 4.27 muestra la delimitación de la subcuenca de la quebrada Los Gatos. La subcuenca está localizada en el condado de Fresno en California. Según la clasificación climática de Koppen el clima es un verano frío mediterráneo. La precipitación media anual es 394 mm (15.51"). La Fig. 4.28 muestra el mapa hidrológico de la subcuenca de la quebrada Los Gatos.



Fuente: Google Earth.

Figura Nro 4.27. Vista aérea de la subcuenca de la quebrada Los Gatos.

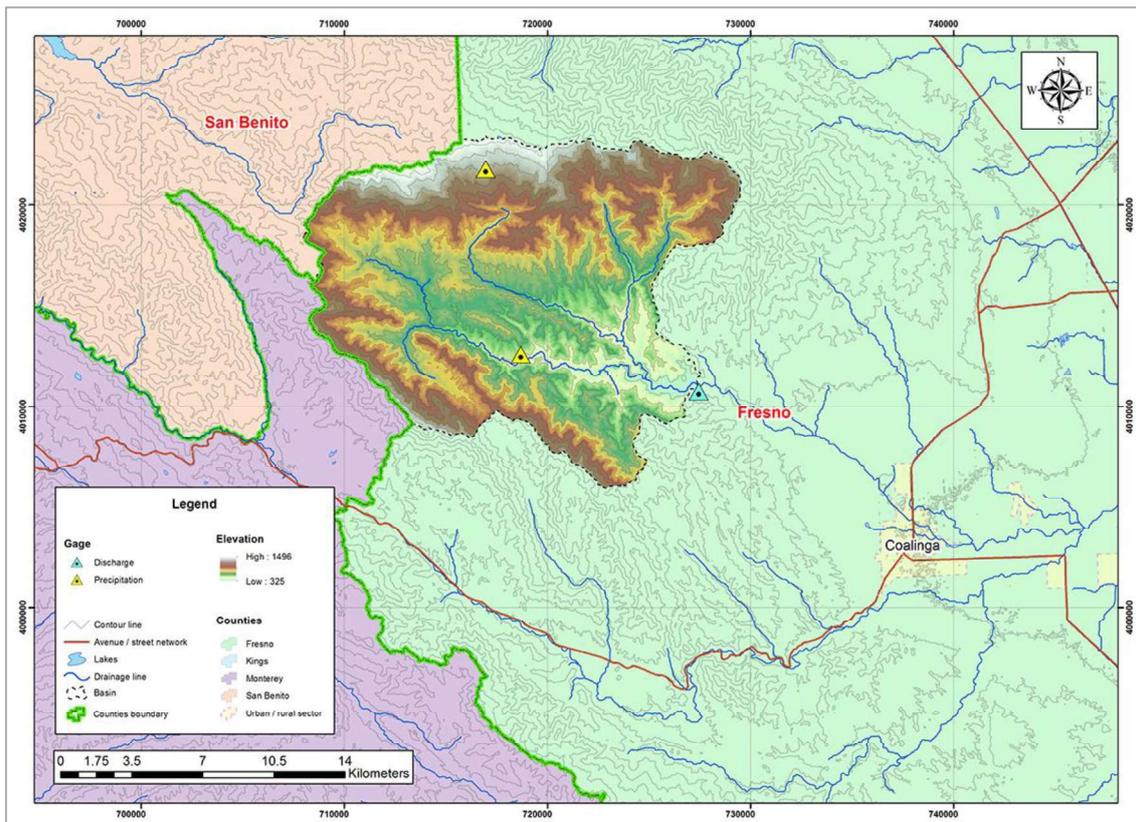


Figura Nro 4.28. Mapa hidrológico de la subcuenca de la quebrada Los Gatos.

La Tabla 4.14 muestra la relación de las estaciones de datos de precipitación y descarga para la subcuenca de la quebrada Los Gatos. La Tabla 4.15 muestra los parámetros geomorfológicos e hidrológicos calculados para la subcuenca de la quebrada Los Gatos.

Tabla Nro 4.14. Estaciones de la subcuenca de la quebrada Los Gatos.

Variable	Agencia	Código	Nombre de la estación	Este (m)	Norte (m)	Elevación (msnm)
Precipitación	NWS	041869	Coalinga 14 WMW	718658	4012543	500
Descarga	USGS	11224500	Quebrada Los Gatos, Coalinga	727451	4010733	325

Fuente: National Weather Service y United States Geological Service.

Tabla Nro 4.15. Parámetros geomorfológicos e hidrológicos de la subcuenca de la quebrada Los Gatos.

No.	Descripción	Símbolo	Unidades	Valor
1	Área de drenaje	A	km ²	247
2	Perímetro del área de drenaje	P	km	103.25
3	Longitud hidráulica de la cuenca	L	km	30.88
4	Índice de forma	K_f	-	0.26
5	Índice de compacidad	K_c	-	1.85
6	Elevación máxima	$E_{máx}$	msnm	1496
7	Elevación mínima	$E_{mín}$	msnm	325
8	Pendiente promedio superficial	S_0	m/m	0.328
9	Pendiente del cauce (de 0 hasta 100%)	S_1	m/m	0.037
10	Pendiente del cauce (de 10 hasta 85%)	S_2	m/m	0.015
11	Longitud total del canal principal	$\sum L$	km	62.25
12	Precipitación media anual	P_{ma}	mm	394

Fuente: Elaboración propia.

Las Fig. 4.29 de (a) hasta (c), muestran los tres (3) hidrogramas de inundación seleccionados para el análisis.

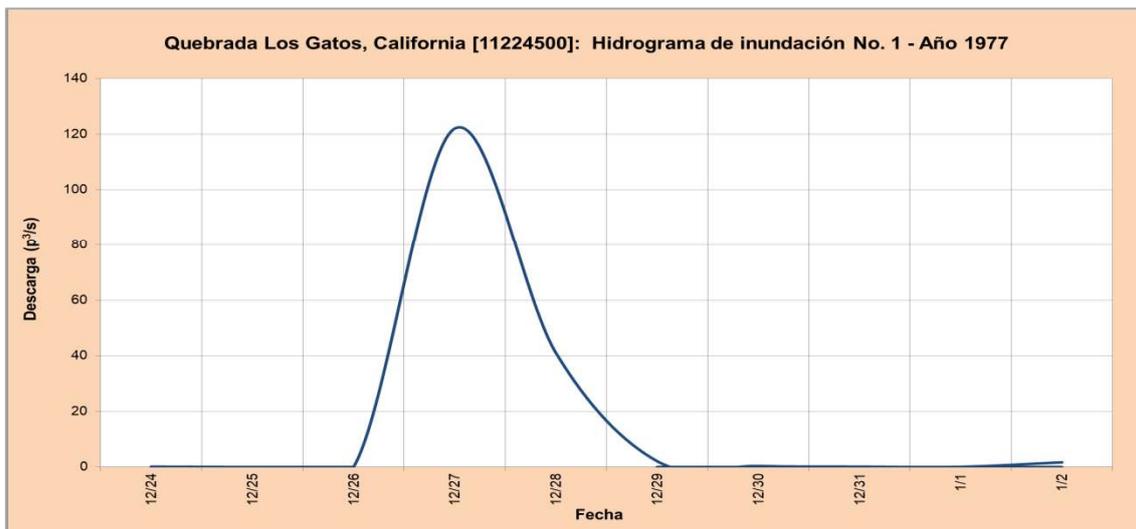


Figura Nro 4.29 (a) Hidrograma de inundación – quebrada Los Gatos Nro. 1 – Año 1977.

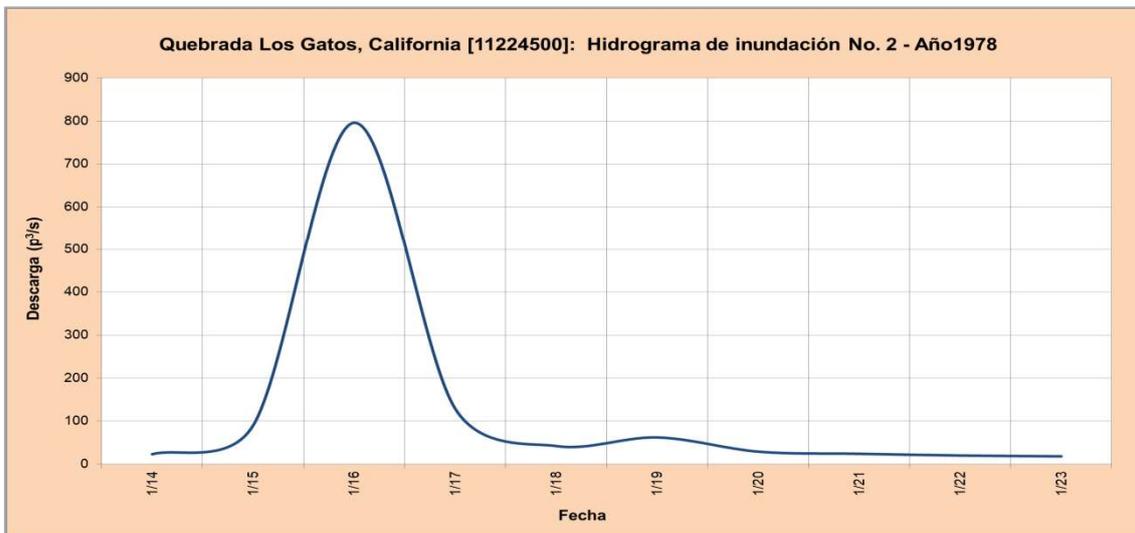


Figura Nro 4.29 (b) Hidrograma de inundación – quebrada Los Gatos Nro. 2 – Año 1978.

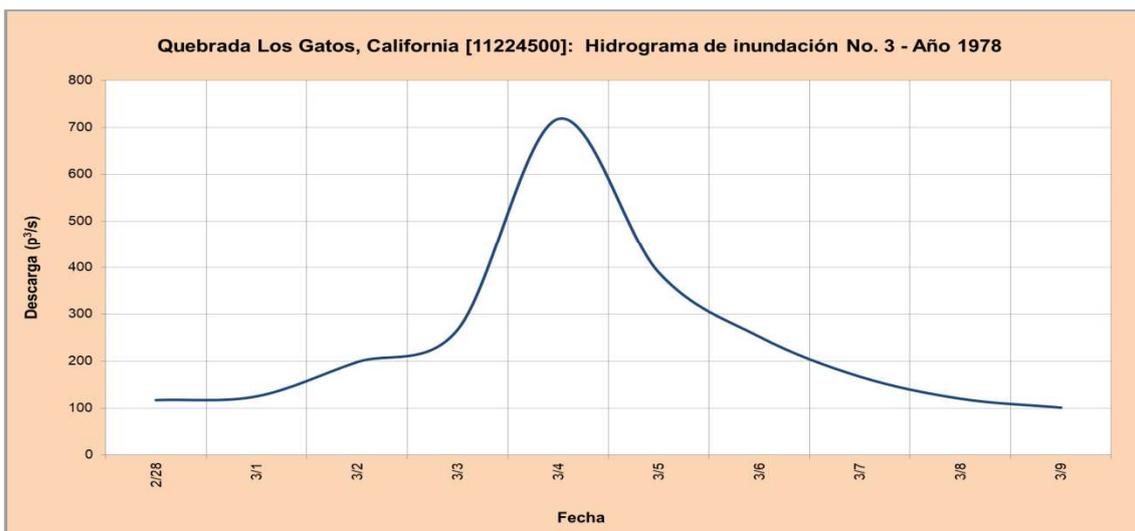


Figura Nro 4.29 (c) Hidrograma de inundación – quebrada Los Gatos Nro. 3 – Año 1978.

4.4.8. Quebrada Cottonwood en Cottonwood, CA

La cabecera de cuenca de la quebrada Cottonwood está localizada en la cercanía de las zonas montañosas de las comunidades de Lazyman Butte, North Yolla Bolly y Platina. La corriente fluye predominantemente en dirección noreste cruzando las comunidades de Platina, Ono y Cottonwood (Fig. 4.30).

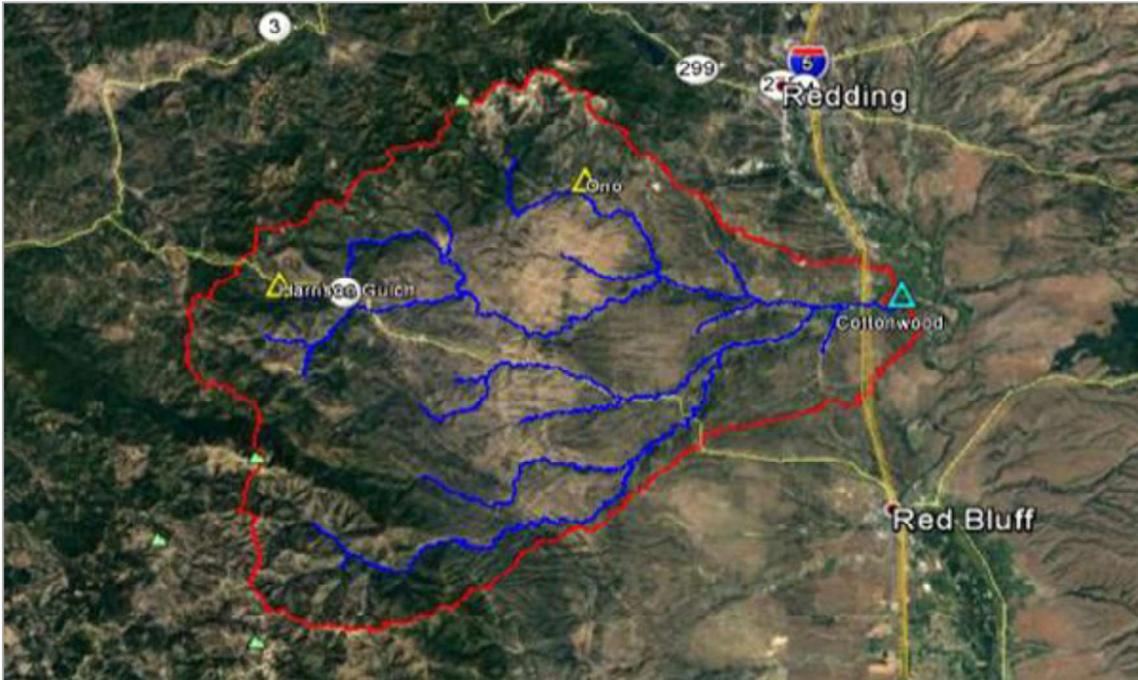
La estación meteorológica del *National Weather Service* (NWS) está localizada en Platina. La estación hidrométrica del *United States Geological Service* (USGS) está localizado en la comunidad de Cottonwood.



Fuente: Google Earth.

Figura Nro 4.30. Quebrada Cottonwood en la comunidad de Cottonwood, California.

La Fig. 4.31 muestra la delimitación de la cuenca de la quebrada Cottonwood. La cuenca está localizada en los condados de Shasta y Tehama en California. Según la clasificación climática de Koppen el clima es un verano templado mediterráneo (Csa). La precipitación media anual es 876 mm (34.49"). La Fig. 4.32 muestra el mapa hidrológico de la cuenca de la quebrada Cottonwood.



Fuente: Google Earth.

Figura Nro 4.31. Vista aérea de la cuenca de la quebrada Cottonwood.

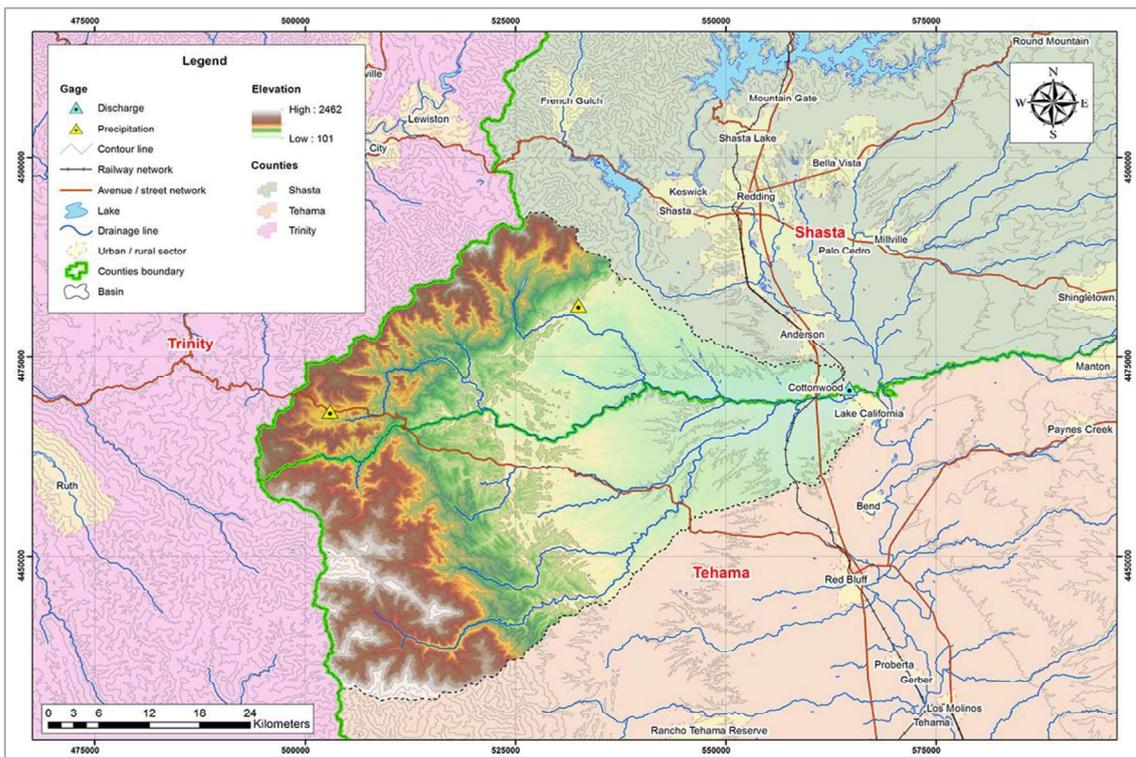


Figura Nro 4.32. Mapa hidrológico de la cuenca de la quebrada Cottonwood.

La Tabla 4.16 muestra la relación de las estaciones de datos de precipitación y descarga para la cuenca de la quebrada Cottonwood. La Tabla 4.17 muestra los parámetros geomorfológicos e hidrológicos calculados para la cuenca de la quebrada Cottonwood.

Tabla Nro 4.16. Estaciones de la cuenca de la quebrada Cottonwood.

Variable	Agencia	Código	Nombre de la estación	Este (m)	Norte (m)	Elevación (msnm)
Precipitación	NWS	043791	Harrison Gulch RS	502972	4468116	838
Descarga	USGS	11376000	Quebrada Cottonwood, Cottonwood	564718	4471016	111

Fuente: National Weather Service y United States Geological Service.

Tabla Nro 4.17. Parámetros geomorfológicos e hidrológicos de la cuenca de la quebrada Cottonwood.

No.	Descripción	Símbolo	Unidades	Valor
1	Área de drenaje	A	km ²	2435
2	Perímetro del área de drenaje	P	km	340.26
3	Longitud hidráulica de la cuenca	L	km	106.02
4	Índice de forma	K_f	-	0.22
5	Índice de compacidad	K_c	-	1.94
6	Elevación máxima	$E_{máx}$	msnm	2462
7	Elevación mínima	$E_{mín}$	msnm	101
8	Pendiente promedio superficial	S_0	m/m	0.255
9	Pendiente del cauce (de 0 hasta 100%)	S_1	m/m	0.017
10	Pendiente del cauce (de 10 hasta 85%)	S_2	m/m	0.010
11	Longitud total del canal principal	$\sum L$	km	370.54
12	Precipitación media anual	P_{ma}	mm	876

Fuente: Elaboración propia.

Las Fig. 4.33 de (a) hasta (c), muestran los tres (3) hidrogramas de inundación seleccionados para el análisis.

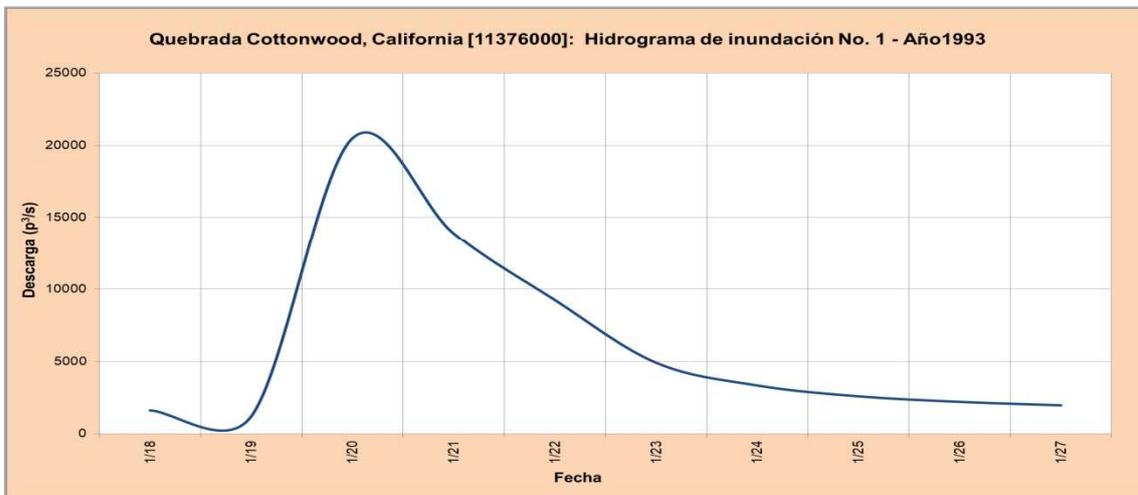


Figura Nro 4.33 (a) Hidrograma de inundación – quebrada Cottonwood Nro. 1 – Año 1993.

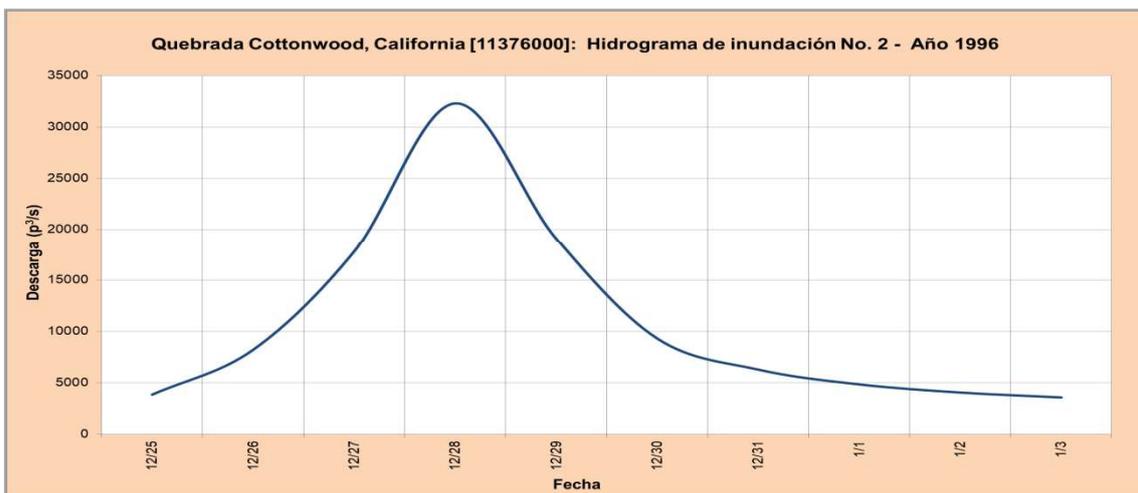


Figura Nro 4.33 (b) Hidrograma de inundación – quebrada Cottonwood Nro. 2 – Año 1996.

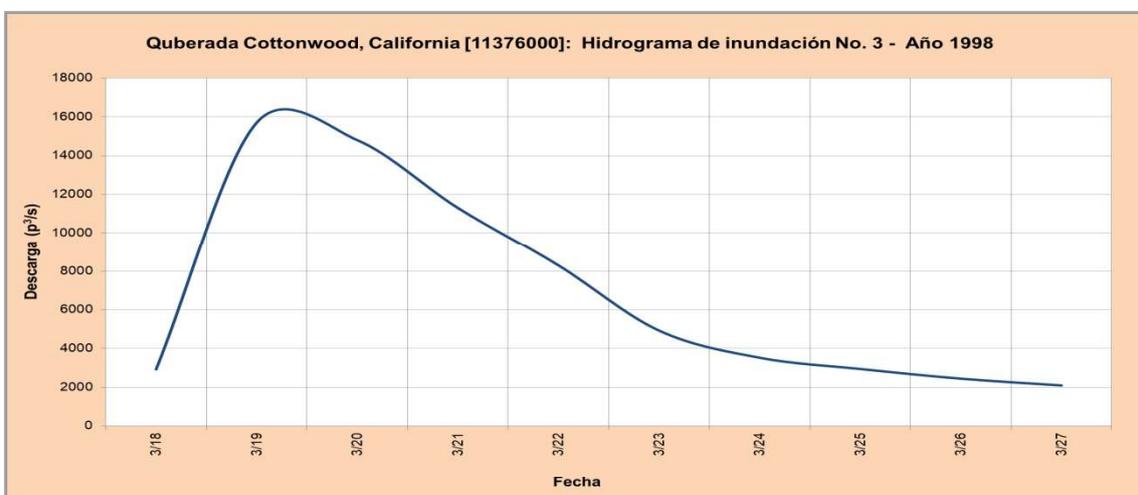


Figura Nro 4.33 (c) Hidrograma de inundación – quebrada Cottonwood Nro. 3 – Año 1998.

4.4.9. Río Salinas en Spreckels, CA

La cabecera de la cuenca del río Salinas está localizada en las cercanías de la Montaña Machesna, el Pico Tassajera, las zonas montañosas de las comunidades de Atascadero, Paso Robles, King City, Greenfield y Salinas.

La corriente fluye predominantemente en dirección noreste cruzando las comunidades de San Ardo (Fotografía 4.12), Shandon, Atascadero, Paso Robles (Fotografía 4.13), San Miguel, Bradley, San Lucas, King City, Greenfield, Soledad, Gonzales, Chualar y Salinas.

Las estaciones meteorológicas del *National Weather Service* (NWS) están localizadas en Santa Margarita, Paso Robles y King City. La estación hidrométrica del *United States Geological Service* (USGS) está localizada en Spreckels.



Fotografía Nro. 4.12. Río Salinas en la comunidad de San Ardo, California.



Fotografía Nro. 4.13. Río Salinas en la comunidad de Paso Robles, California.

La Fig. 4.34 muestra la delimitación de la cuenca del río Salinas. La cuenca está localizada en los condados de San Luis Obispo, Monterrey y San Benito en California. Según la clasificación de Koppen el clima es semiárido y seco mediterráneo (Csb).

La precipitación media anual es 294 mm (11.57"). La Fig. 4.35 y 4.36, muestran el mapa hidrológico y el mapa de precipitación media anual de la cuenca del río Salinas.



Figura Nro 4.34. Vista aérea de la cuenca del río Salinas.

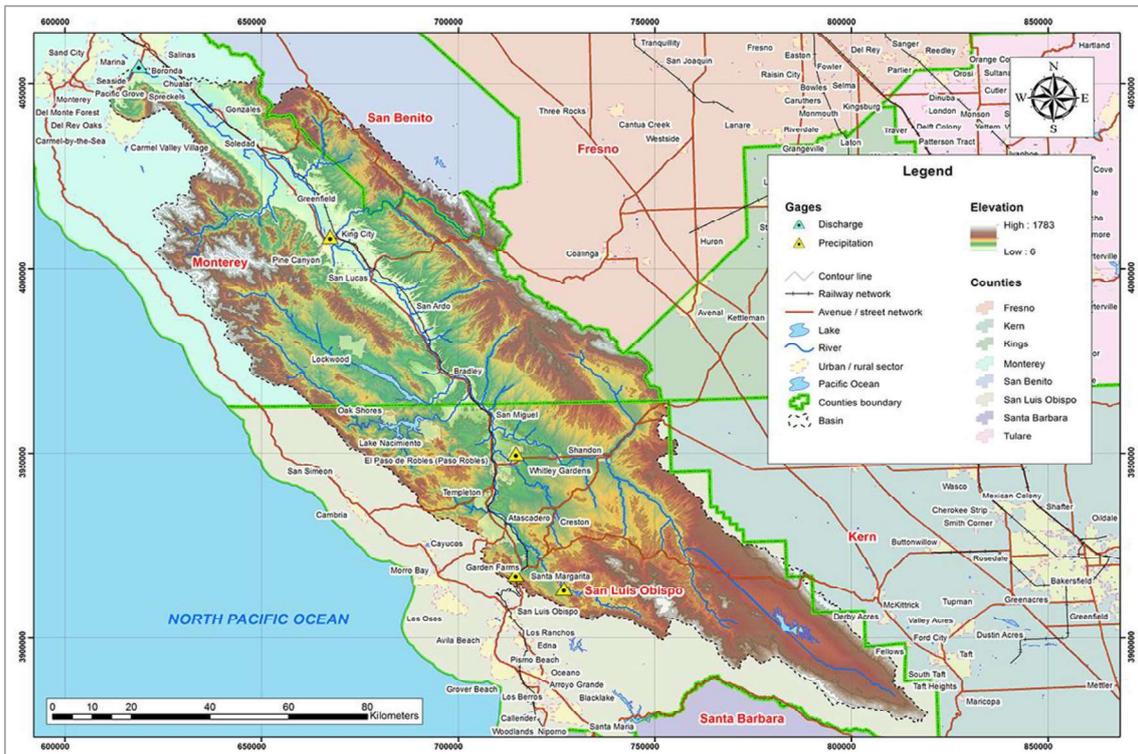


Figura Nro 4.35. Mapa hidrológico de la cuenca del río Salinas.

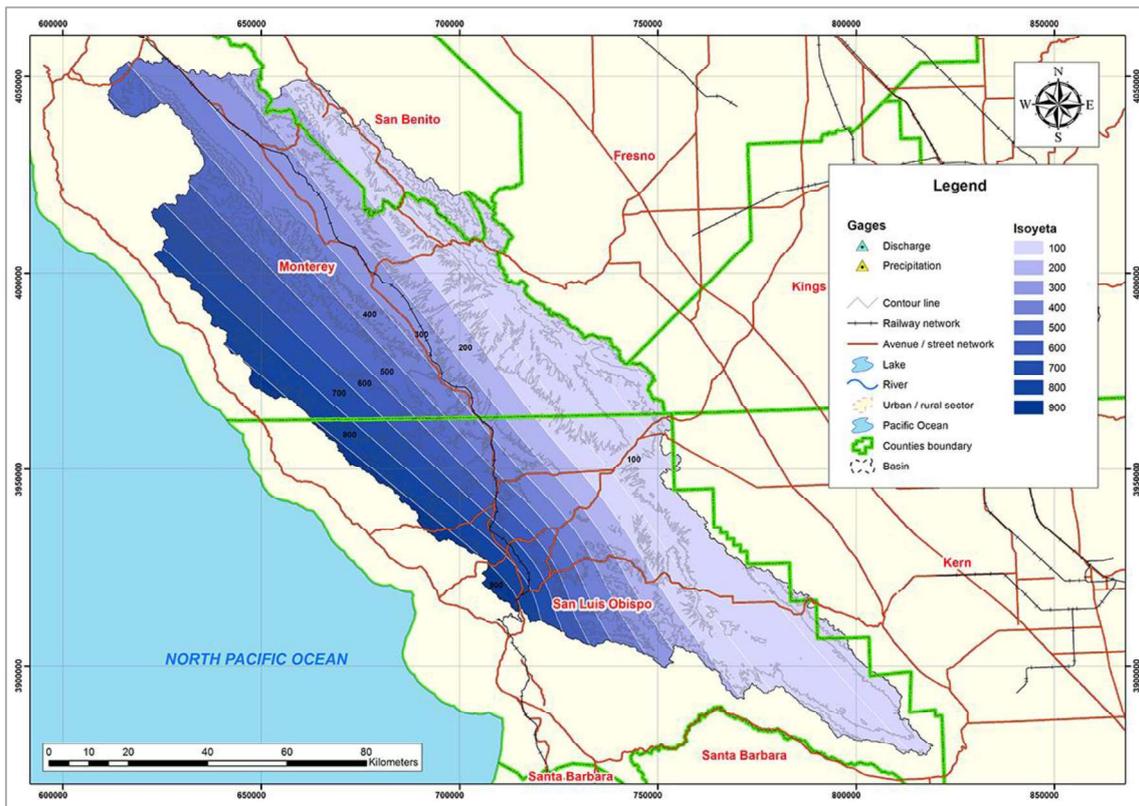


Figura Nro 4.36. Mapa de precipitación media anual de la cuenca del río Salinas.

La Tabla 4.18 muestra la relación de las estaciones de datos de precipitación y descarga para la cuenca del río Salinas. La Tabla 4.19 muestra los parámetros geomorfológicos e hidrológicos calculados para la cuenca del río Salinas.

Tabla Nro 4.18. Estaciones de la cuenca del río Salinas.

Variable	Agencia	Código	Nombre de la estación	Este (m)	Norte (m)	Elevación (msnm)
Precipitación	NWS	044555	King City	667407	4008509	98
Precipitación	NWS	046742	Paso Robles Muni	714660	3949908	247
Precipitación	NWS	047933	Santa Margarita Booster	714616	3917100	350
Precipitación	NWS	047672	Salinas Dam	726860	3913300	416
Descarga	USGS	111525000	Río Salinas, Spreckels	618786	4054773	6

Fuente: National Weather Service y United States Geological Service.

Tabla Nro 4.19. Parámetros geomorfológicos e hidrológicos de la cuenca del río Salinas.

No.	Descripción	Símbolo	Unidades	Valor
1	Área de drenaje	A	km ²	11777
2	Perímetro del área de drenaje	P	km	1104.78
3	Longitud hidráulica de la cuenca	L	km	334.21
4	Índice de forma	K_f	-	0.11
5	Índice de compacidad	K_c	-	2.87
6	Elevación máxima	$E_{m\acute{a}x}$	msnm	1783
7	Elevación mínima	$E_{m\acute{i}n}$	msnm	6
8	Pendiente promedio superficial	S_0	m/m	0.215
9	Pendiente del cauce (de 0 hasta 100%)	S_1	m/m	0.003
10	Pendiente del cauce (de 10 hasta 85%)	S_2	m/m	0.0021
11	Longitud total del canal principal	$\sum L$	km	1305.29
12	Precipitación media anual	P_{ma}	mm	294

Fuente: Elaboración propia.

Las Fig. 4.37 de (a) hasta (c), muestran los tres (3) hidrogramas de inundación seleccionados para el análisis.

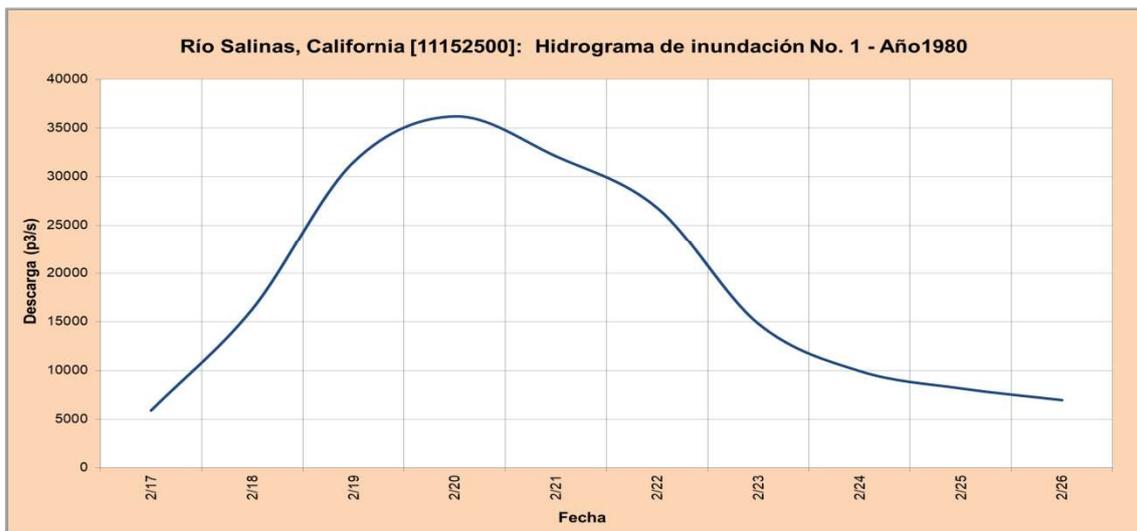


Figura Nro 4.37 (a) Hidrograma de inundación del río Salinas Nro. 1 – Año 1980.

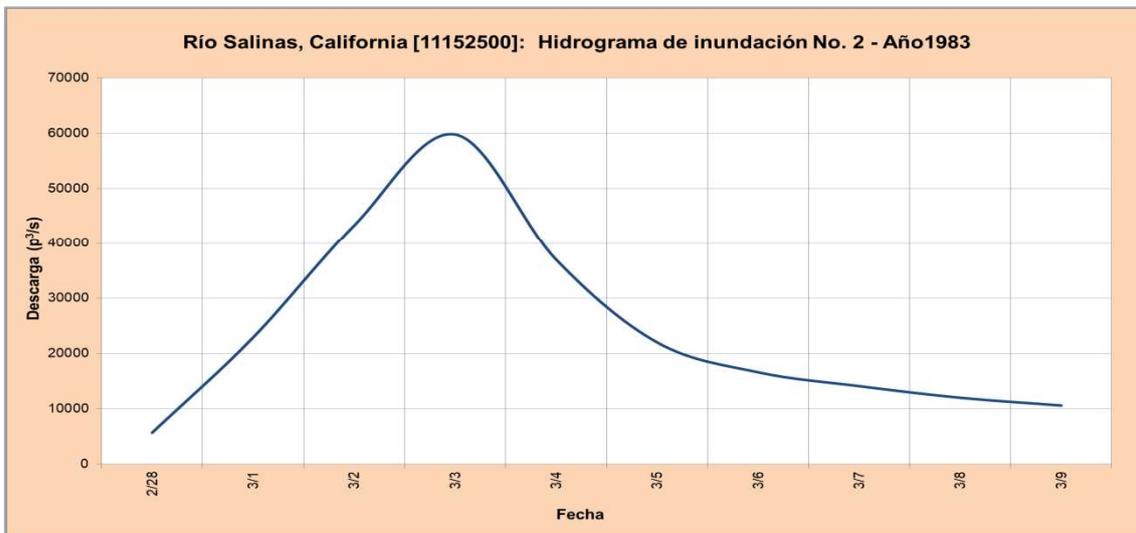


Figura Nro 4.37 (b) Hidrograma de inundación del río Salinas Nro. 2 – Año 1983.

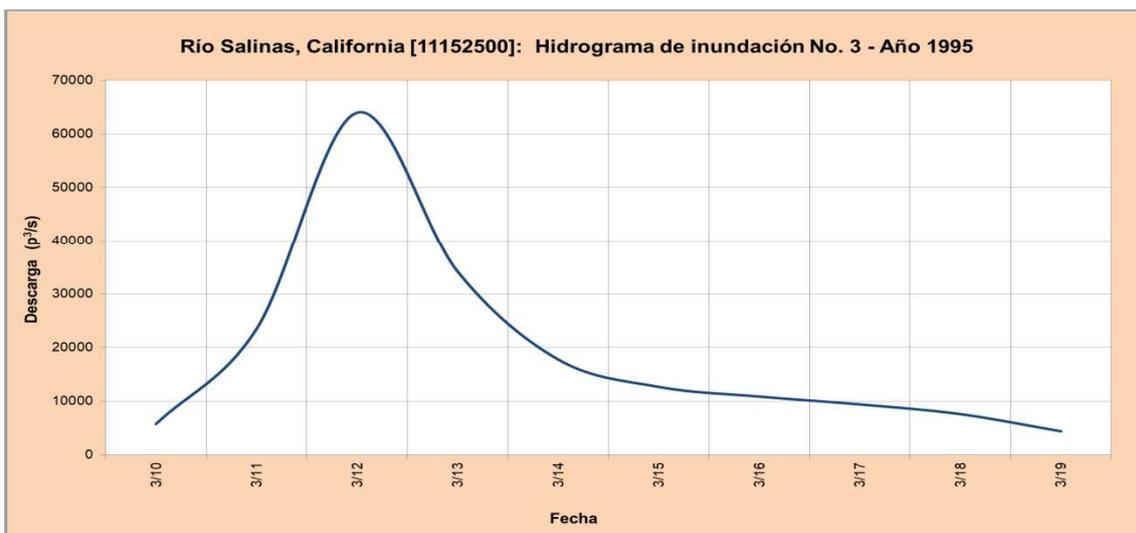
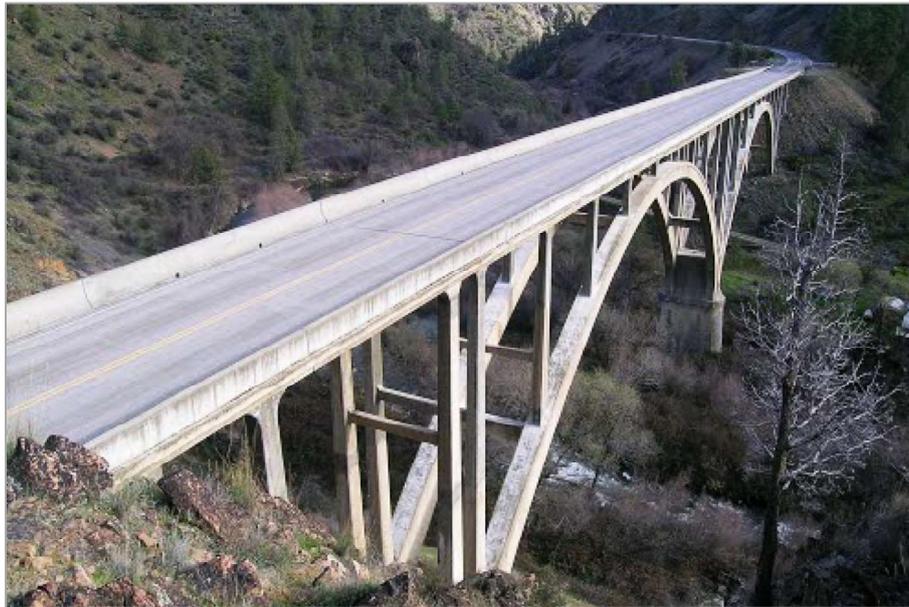


Figura Nro 4.37 (c) Hidrograma de inundación del río Salinas Nro. 3 – Año 1995.

4.4.10. Río Shasta en Montague, CA

La cabecera de la cuenca del río Shasta está localizada en las cercanías de la Montaña Shasta y de la Montaña China. La corriente fluye predominantemente en dirección noreste cruzando la comunidad de Edgewood (Fotografía 4.14), Gazelle, Grenada y Montague (Fig. 4.38).

La estación meteorológica del *National Weather Service* (NWS) Está localizada en la comunidad de Weed. La estación *hidrométrica del United States Geological Service* (USGS) se localiza cerca a Montague.



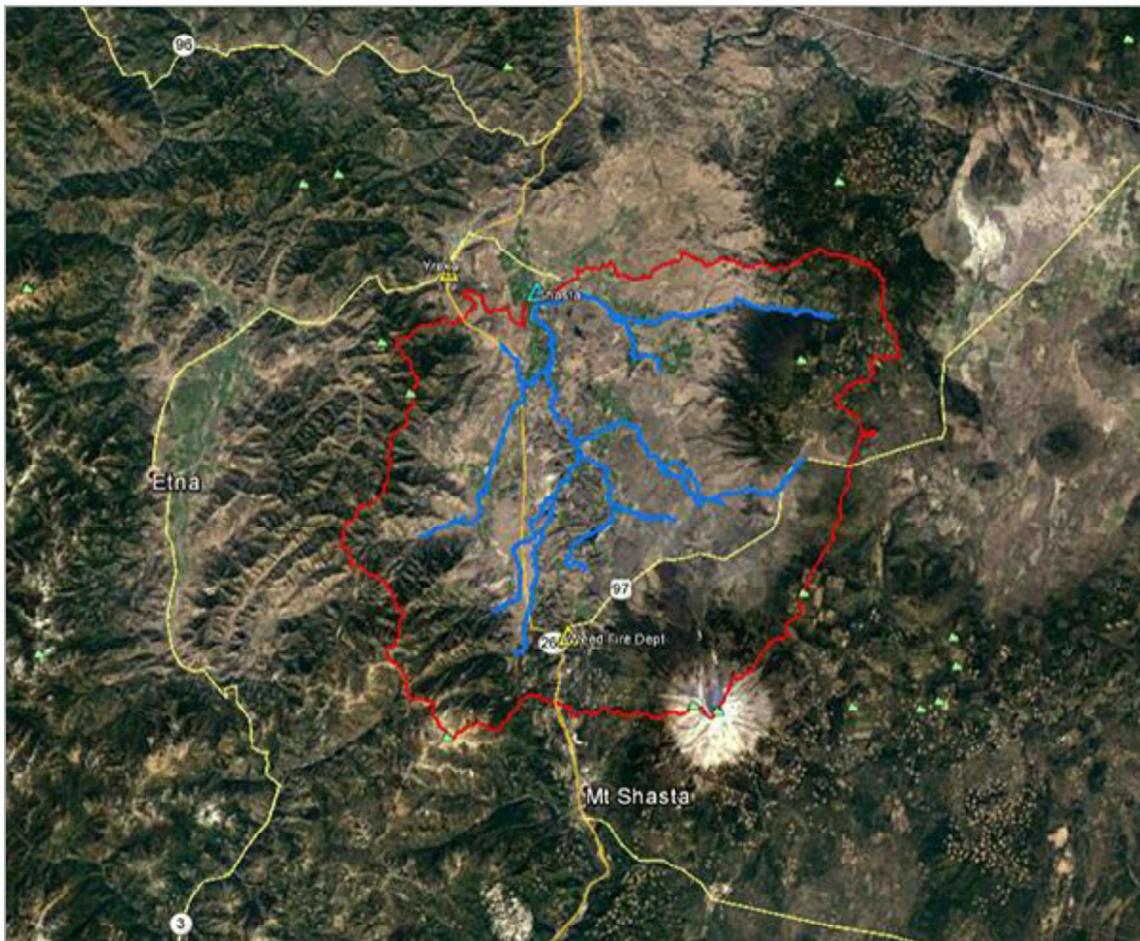
Fotografía Nro. 4.14. Río Shasta cerca de Edgewood, California.



Fuente: Google Earth.

Figura Nro 4.38. Río Shasta en la comunidad de Montague, California.

La Fig. 4.39 muestra la delimitación de la cuenca del río Shasta. La cuenca está localizada en el condado de Siskiyou en California. Según la clasificación Koppen se tiene un clima verano templado mediterráneo. La precipitación media anual es 478 mm (18.82"). La Fig. 4.40 muestra el mapa hidrológico de la cuenca del río Shasta.



Fuente: Google Earth.

Figura Nro 4.39. Vista aérea de la cuenca del río Shasta.

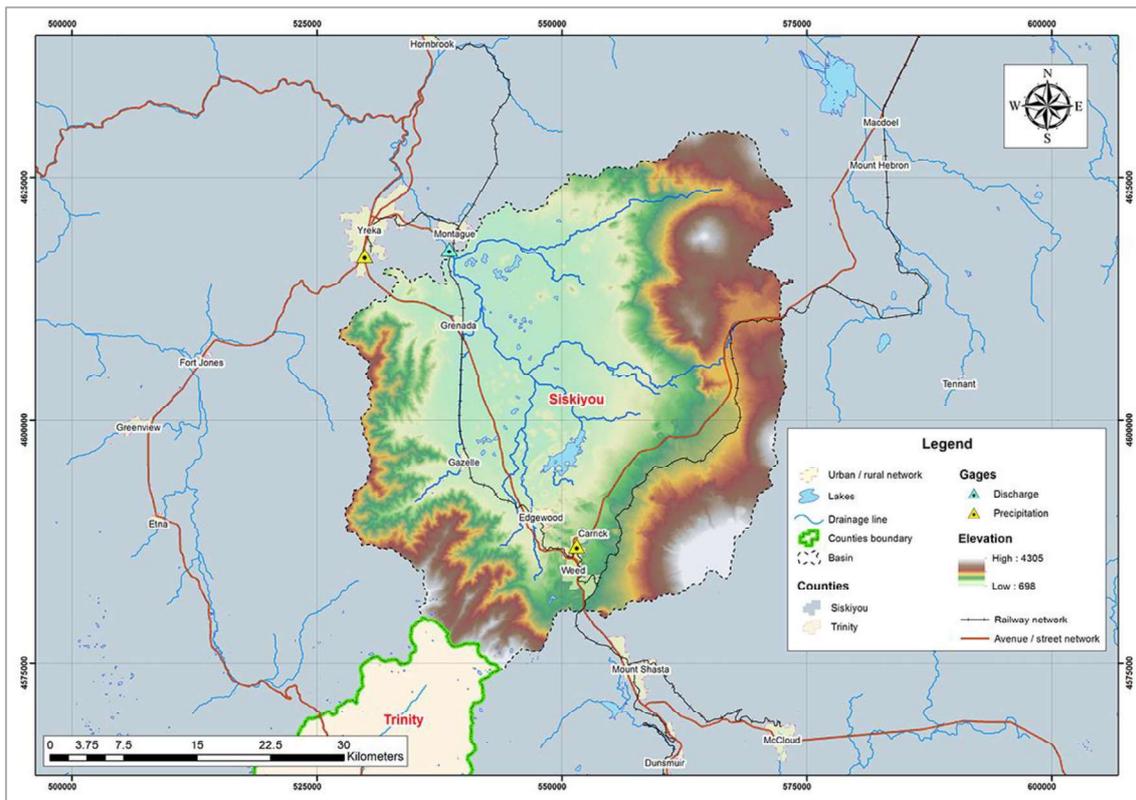


Figura Nro 4.40. Vista aérea de la cuenca del río Shasta.

La Tabla 4.20 muestra la relación de las estaciones de datos de precipitación y descarga para la cuenca del río Shasta. La Tabla 4.21 muestra los parámetros geomorfológicos e hidrológicos calculados para la cuenca del río Shasta.

Tabla Nro 4.20. Estaciones de la cuenca del río Shasta.

Variable	Agencia	Código	Nombre de la estación	Este (m)	Norte (m)	Elevación (msnm)
Precipitación	NWS	049866	Yreka	529883	4616932	800
Descarga	USGS	11517000	Río Shasta, Montague	538523	4617590	749

Fuente: National Weather Service y United States Geological Service.

Tabla Nro 4.21. Parámetros geomorfológicos e hidrológicos de la cuenca del río Shasta.

No.	Descripción	Símbolo	Unidades	Valor
1	Área de drenaje	A	km ²	1737
2	Perímetro del área de drenaje	P	km	283.32
3	Longitud hidráulica de la cuenca	L	km	67.73
4	Índice de forma	K_f	-	0.38
5	Índice de compacidad	K_c	-	1.92
6	Elevación máxima	$E_{máx}$	msnm	4305
7	Elevación mínima	$E_{mín}$	msnm	698
8	Pendiente promedio superficial	S_0	m/m	0.196
9	Pendiente del cauce (de 0 hasta 100%)	S_1	m/m	0.010
10	Pendiente del cauce (de 10 hasta 85%)	S_2	m/m	0.013
11	Longitud total del canal principal	$\sum L$	km	219.49
12	Precipitación media anual	P_{ma}	mm	478

Fuente: Elaboración propia.

Las Fig. 4.41 de (a) hasta (c), muestran los tres (3) hidrogramas de inundación seleccionados para el análisis.

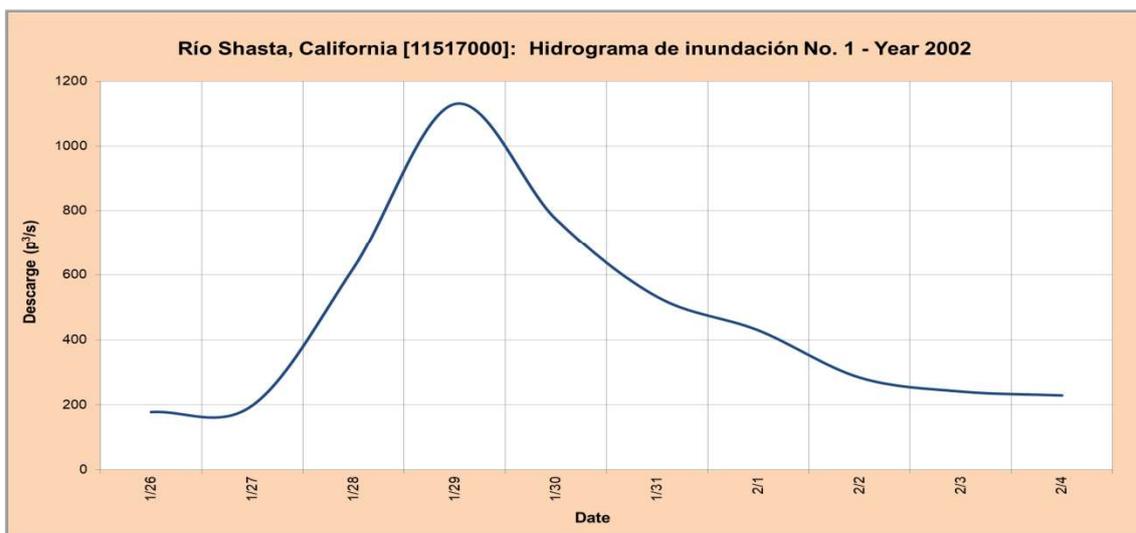


Figura Nro 4.41 (a) Hidrograma de inundación del río Shasta Nro. 1 – Año 2002.

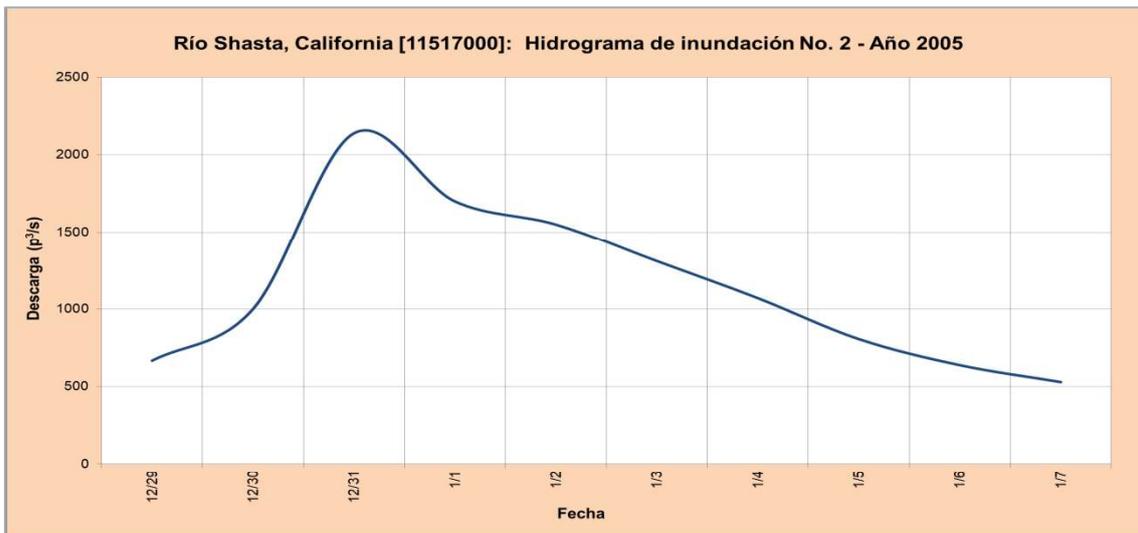


Figura Nro 4.41 (b) Hidrograma de inundación del río Shasta Nro. 2 – Año 2005.

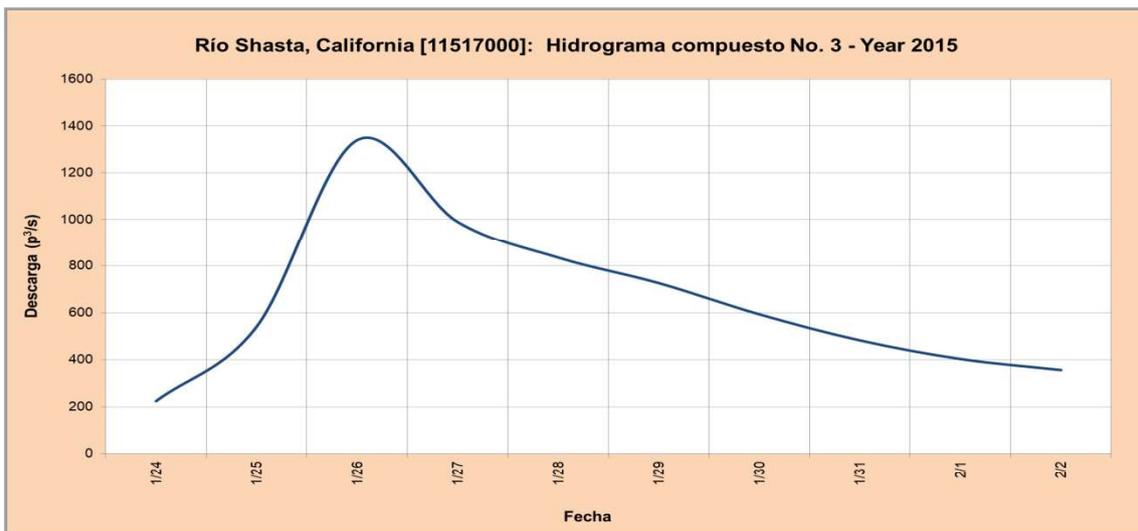


Figura Nro 4.41 (c) Hidrograma de inundación del río Shasta Nro. 3 – Año 2015.



CAPÍTULO 5. APLICACIÓN DEL MODELO HUAG

5.1. ANÁLISIS DE DATOS

Siguiendo la Sección 3, el análisis de datos puede basarse en: (a) tormentas simples, o (b) tormentas complejas. Para la mayor parte, la calidad de los datos impidió la aplicación del análisis de tormentas complejas. En consecuencia, las tormentas simples fueron elegidas como un compromiso práctico para la aplicación general.

Se escogieron tres (3) conjuntos de eventos de datos de precipitación-escorrentía correspondientes a cada cuenca. Los resultados del ejemplo a la quebrada Campo, se muestran en las Tablas 5.1 y 5.2.

La Tabla 5.1 muestra lo siguiente:

1. Columna 1: Número de evento.
2. Columna 2: Fecha (aammdd).
3. Columna 3: Precipitación (in).
4. Columna 4: Precipitación (cm).
5. Columna 5: Descarga (p^3/s).
6. Columna 6: Descarga directa (p^3/s), después de sustraer flujo base.
7. Columna 7: Descarga directa (m^3/s).
8. Columna 8: Ordenadas del hidrograma unitario, correspondiente a 1 cm de volumen de escorrentía.

La Tabla 5.2 muestra lo siguiente:

1. Columna 1: Tiempo adimensional t^* (Ec. 2-24).
2. Columnas 2 a 4: Descarga adimensional Q^* (Ec. 2-27).
3. Columna 5: Descarga adimensional promedio medida Q^* , el promedio de las Cols. 2 a 4.
4. Columna 6: Descarga adimensional predecida Q^* , correspondiente a los parámetros de cascada $C = 1.2$ y $N = 2$, obtenido por prueba y error de la teoría del HUAG.



Tabla Nro 5.1. Ejemplo de la quebrada Campo – datos de precipitación y descarga.

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
No.	Fecha	P (pulg)	P (cm)	Q (p ³ /s)	Q_d (p ³ /s)	Q_d (m ³ /s)	Q_{uh} (m ³ /s)
1	19830228	0	0	45	0	0	0
	19830301	0	0	68	23	0.65	0.49
	19830302	2.91	7.39	399	354	10.02	7.58
	19830303	1.27	3.23	347	302	8.55	6.46
	19830304	0.74	1.88	305	260	7.36	5.57
	19830305	0.11	0.28	179	134	3.79	2.87
	19830306	0.23	0.58	121	76	2.15	1.63
	19830307	0	0	75	30	0.85	0.64
19830308	0	0	45	0	0	0	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla Nro 5.2. Ejemplo de la quebrada Campo – Hidrograma unitario adimensional (HUA).

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Hidrograma unitario adimensional medido				Promedio medido	Predecido Q^* ($C = 1.2,$ $N = 2$)
t^*	No. 1	No. 2	No. 3		
	Q^*	Q^*	Q^*	Q^*	
0	0	0	0	0	0
1	0.12	0.42	0.34	0.29	0.28
2	0.32	0.49	0.46	0.43	0.42
3	0.31	0.07	0.15	0.18	0.19
4	0.16	0.01	0.04	0.07	0.07
5	0.06	0.001	0.01	0.02	0.02
6	0	0	0	0	0

Fuente: Elaboración propia.



5.1.1. Quebrada Campo

Siguiendo el procedimiento descrito en la Sección 3.1.1, los tres (3) grupos de eventos correspondientes a la información de precipitación-escorrentía fueron reunidos para la subcuenca de la quebrada Campo. Los resultados se resumen en las Tablas 5.3 y 5.4.

Tabla Nro 5.3. Subcuenca de la quebrada Campo – datos de precipitación y descarga.

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
No.	Fecha	P (pulg)	P (cm)	Q (p ³ /s)	Q_d (p ³ /s)	Q_d (m ³ /s)	Q_{uh} (m ³ /s)
1	19830228	0	0	45	0	0	0
	19830301	0	0	68	23	0.65	0.49
	19830302	2.91	7.39	399	354	10.02	7.58
	19830303	1.27	3.23	347	302	8.55	6.46
	19830304	0.74	1.88	305	260	7.36	5.57
	19830305	0.11	0.28	179	134	3.79	2.87
	19830306	0.23	0.58	121	76	2.15	1.63
	19830307	0	0	75	30	0.85	0.64
	19830308	0	0	45	0	0	0
2	19930115	0.62	1.58	65	0	0	0
	19930116	2.78	7.06	170	105	2.97	1.46
	19930117	1.03	2.62	745	680	19.24	9.42
	19930118	1.09	2.77	493	428	12.11	5.93
	19930119	0.64	1.63	372	307	8.69	4.25
	19930120	0	0	341	276	7.81	3.82
	19930121	0	0	90	25	0.71	0.35
	19930122	0	0	65	0	0	0
3	19980327	0.06	0.15	16	0	0	0
	19980328	1.33	3.38	77	61	1.73	6.50
	19980329	1.09	2.77	108	92	2.60	9.80
	19980330	0.04	0.10	53	37	1.05	3.94
	19980331	0	0	48	32	0.91	3.41
	19980401	0	0	31	15	0.43	1.60
	19980402	0	0	16	0	0	0

Fuente: Elaboración propia.

Tabla Nro 5.4. Subcuenca de la quebrada Campo – hidrograma unitario adimensional (HUA).

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Hidrograma unitario adimensional medido				Promedio medido Q^*	Predecido Q^* ($C = 1.2,$ $N = 2$)
t^*	No. 1 Q^*	No. 2 Q^*	No. 3 Q^*		
0	0	0	0	0	0
1	0.26	0.27	0.28	0.27	0.28
2	0.40	0.41	0.42	0.42	0.42
3	0.21	0.20	0.19	0.20	0.19
4	0.08	0.07	0.07	0.08	0.07
5	0.03	0.03	0.02	0.03	0.02
6	0	0	0	0	0

Fuente: Elaboración propia.

La Fig. 5.1 muestra los hidrogramas unitarios promedio medido vs. Predecido (HUA) para la subcuenca de la quebrada Campo, obtenido por método gráfico de la Col. 1 vs. Cols. 5 y 6 de la Tabla 5.4, respectivamente.

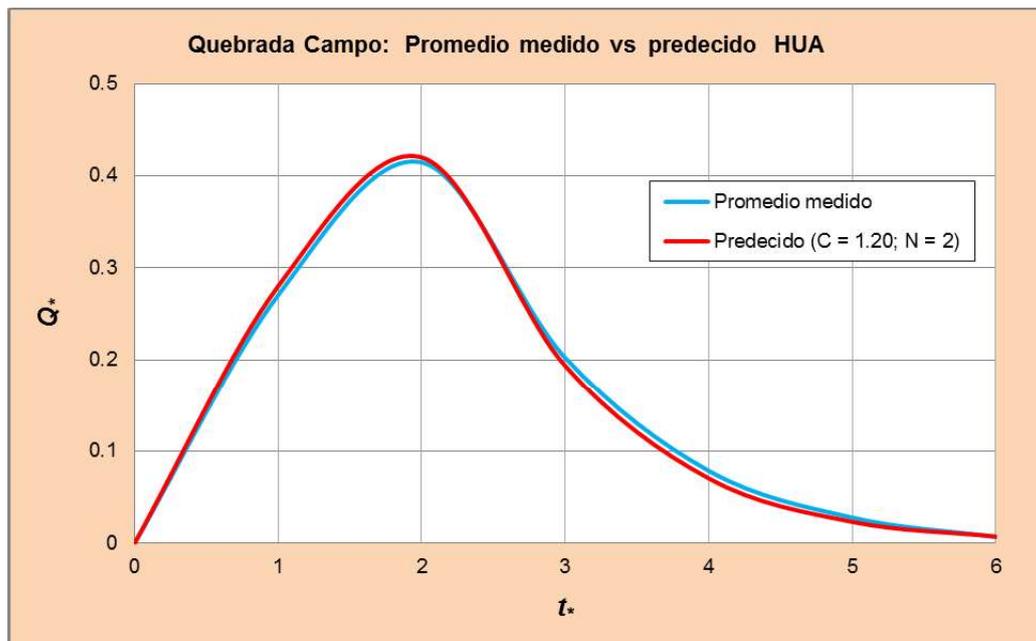


Figura Nro 5.1. Subcuenca de la quebrada Campo: Promedio medido vs. Predecido HUA.

5.1.2. Río Whitewater

Siguiendo el procedimiento descrito en la Sección 3.1.2, los tres (3) grupos de eventos correspondientes a la información de precipitación-escorrentía fueron reunidos para la cuenca del río Whitewater. Los resultados se resumen en las Tablas 5.5 y 5.6.

Tabla Nro 5.5. Cuenca del río Whitewater – datos de precipitación y descarga.

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
No.	Fecha	<i>P</i> (pulg)	<i>P</i> (cm)	<i>Q</i> (p ³ /s)	<i>Q_d</i> (p ³ /s)	<i>Q_d</i> (m ³ /s)	<i>Q_{uh}</i> (m ³ /s)
1	20080126	0.06	0.16	75	0	0	0
	20080127	1.47	3.73	89	14	0.39	32.9
	20080128	0.15	0.37	172	97	2.75	228.6
	20080129	0	0	138	63	1.78	148.5
	20080130	0	0	90	15	0.43	35.4
	20080131	0	0	75	0	0	0
2	20081215	0	0	35	0	0	0
	20081216	0.26	0.67	68	33	0.93	41.2
	20081217	0.14	0.36	177	142	4.02	177.2
	20081218	1.10	2.79	185	150	4.25	187.2
	20081219	0.38	0.97	67	32	0.91	39.9
	20081220	0	0	35	0	0	0
3	20150213	0	0	56.9	0	0	0
	20150214	0	0	63.7	6.8	0.19	23.1
	20150215	0.03	0.07	76.3	19.4	0.55	65.9
	20150216	0.15	0.37	115.6	58.7	1.66	199.2
	20150217	0.11	0.27	86.5	29.6	0.84	100.5
	20150218	0.1	0.02	73.6	16.7	0.47	56.7
	20150219	0	0	56.9	0	0	0

Fuente: Elaboración propia.

Tabla Nro 5.6. Cuenca del río Whitewater – hidrograma unitario adimensional (HUA).

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Hidrograma unitario adimensional medido				Promedio medido	Predecido Q^* ($C = 1.77$, $N = 4$)
t^*	No. 1	No. 2	No. 3		
	Q^*	Q^*	Q^*	Q^*	
0	0	0	0	0	0
1	0.09	0.14	0.11	0.11	0.10
2	0.30	0.35	0.35	0.33	0.32
3	0.36	0.31	0.37	0.35	0.36
4	0.19	0.13	0.15	0.16	0.18
5	0.05	0.04	0.01	0.04	0.03
6	0	0	0	0	0

Fuente: Elaboración propia.

La Fig. 5.2 muestra los hidrogramas unitarios promedio medido vs. Predecido (HUA) para la cuenca del río Whitewater, obtenido por método gráfico de la Col. 1 vs. Cols. 5 y 6 de la Tabla 5.6, respectivamente.

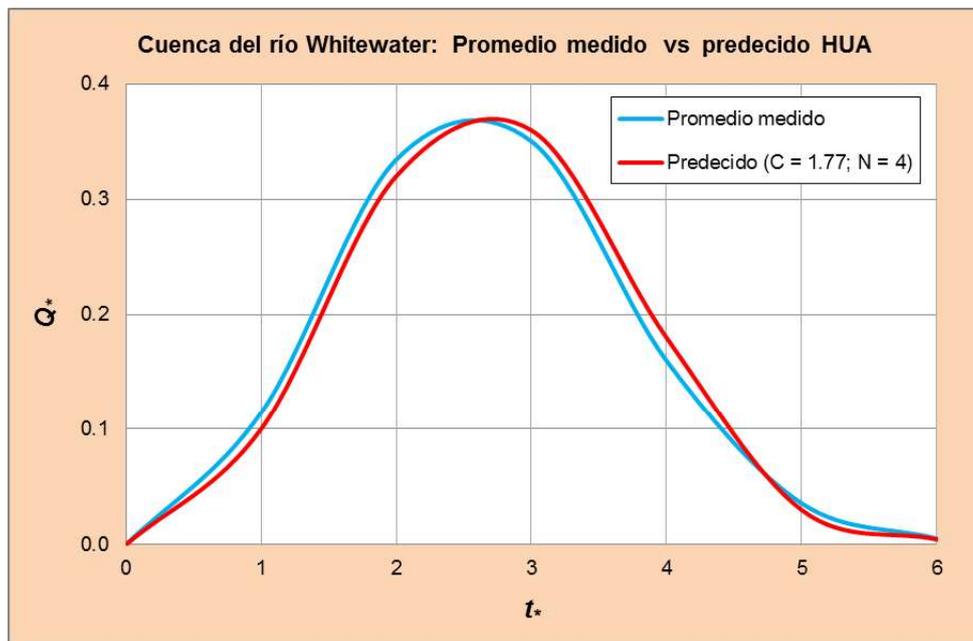


Figura Nro 5.2. Cuenca del río Whitewater: Promedio medido vs. Predecido HUA.

5.1.3. Río Mojave

Siguiendo el procedimiento descrito en la Sección 3.1.3, los tres (3) grupos de eventos correspondientes a la información de precipitación-escorrentía fueron reunidos para la cuenca del río Mojave. Los resultados se resumen en las Tablas 5.7 y 5.8.

Tabla Nro 5.7. Cuenca del río Mojave – datos de precipitación y descarga.

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
No.	Fecha	<i>P</i> (pulg)	<i>P</i> (cm)	<i>Q</i> (p ³ /s)	<i>Q_d</i> (p ³ /s)	<i>Q_d</i> (m ³ /s)	<i>Q_{uh}</i> (m ³ /s)
1	20100119	0.40	1.02	114	0	0	0
	20100120	0.51	1.30	1170	1056	29.88	1197.7
	20100121	0.73	1.86	2310	2196	62.15	2490.7
	20100122	0.31	0.79	2550	2436	68.94	2762.9
	20100123	0.01	0.01	200	86	2.43	97.5
	20100124	0	0	114	0	0	0
2	20110218	0.05	0.13	67.6	0	0	0
	20110219	0.19	0.48	393	325.4	9.21	1938.0
	20110220	0.13	0.32	575	507.4	14.36	3022.0
	20110221	0.01	0.03	256	188.4	5.33	1122.1
	20110222	0	0	146	78.4	2.22	466.9
	20110223	0	0	67.6	0	0	0
3	20170205	0	0	85	0	0	0
	20170206	0.03	0.07	3400	3315	93.81	3454.2
	20170207	0.02	0.04	2680	2595	73.44	2704
	20170208	0	0.01	340	255	7.22	265.7
	20170209	0	0	153	68	1.92	70.9
	20170210	0.05	0.12	137	52	1.47	54.2
	20170211	0.17	0.44	85	0	0	0

Fuente: Elaboración propia.

Tabla Nro 5.8. Cuenca del río Mojave – hidrograma unitario adimensional (HUA).

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Hidrograma unitario adimensional medido				Promedio medido	Predecido Q^* ($C = 1.8,$ $N = 4$)
t^*	No. 1	No. 2	No. 3		
	Q^*	Q^*	Q^*	Q^*	
0	0	0	0	0	0
1	0.12	0.11	0.09	0.11	0.10
2	0.36	0.34	0.30	0.33	0.32
3	0.37	0.37	0.36	0.37	0.37
4	0.14	0.16	0.19	0.16	0.17
5	0.01	0.02	0.05	0.03	0.03
6	0	0	0	0	0

Fuente: Elaboración propia.

La Fig. 5.3 muestra los hidrogramas unitarios promedio medido vs. Predecido (HUA) para la cuenca del río Mojave, obtenido por método gráfico de la Col. 1 vs. Cols. 5 y 6 de la Tabla 5.8, respectivamente.

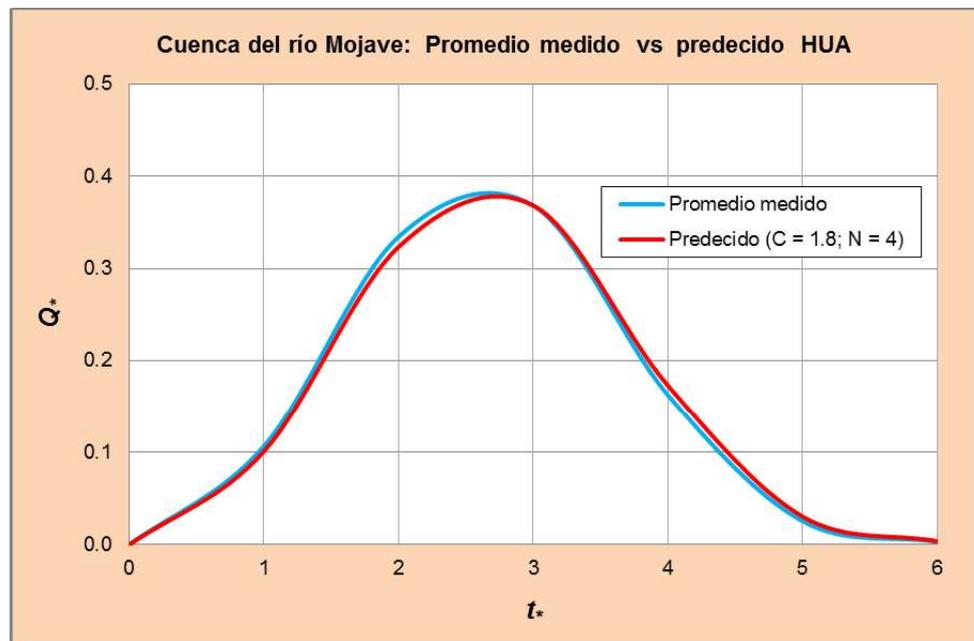


Figura Nro 5.3. Cuenca del río Mojave: Promedio medido vs. Predecido HUA.



5.1.4. Río Amargosa

Siguiendo el procedimiento descrito en la Sección 3.1.4, los tres (3) grupos de eventos correspondientes a la información de precipitación-escorrentía fueron reunidos para la cuenca del río Amargosa. Los resultados se resumen en las Tablas 5.9 y 5.10.

Tabla Nro 5.9. Cuenca del río Amargosa – datos de precipitación y descarga.

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
No.	Fecha	<i>P</i> (pulg)	<i>P</i> (cm)	<i>Q</i> (p ³ /s)	<i>Q_d</i> (p ³ /s)	<i>Q_d</i> (m ³ /s)	<i>Q_{uh}</i> (m ³ /s)
1	20030414	0.06	0.15	4.23	0	0	0
	20030414	0.11	0.28	97.70	93.47	2.65	279.6
	20030414	0.02	0.05	137.00	132.77	3.76	397.1
	20030414	0	0	61.80	57.57	1.63	172.2
	20030414	0	0	42.20	37.97	1.07	113.6
	20030414	0	0	4.23	0	0	0
2	20070921	0.01	0.03	39	0	0	0
	20070922	0.13	0.33	444	405	11.46	275.5
	20070923	0.03	0.08	683	644	18.23	438.0
	20070924	0.02	0.05	315	276	7.81	187.7
	20070925	0	0	129	90	2.55	61.2
	20070926	0	0	39	0	0	0
3	20100120	0	0	7.1	0	0	0
	20100121	0.1	0.25	30	22.90	0.65	257.50
	20100122	0.11	0.28	45	37.90	1.07	426.10
	20100123	0	0	25	17.90	0.51	201.20
	20100124	0	0	14	6.90	0.20	77.60
	20100125	0	0	7.1	0	0	0

Fuente: Elaboración propia.

Tabla Nro 5.10. Cuenca del río Amargosa – hidrograma unitario adimensional (HUA).

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Hidrograma unitario adimensional medido				Promedio medido	Predecido Q^* ($C = 1.30$, $N = 2$)
t^*	No. 1	No. 2	No. 3		
	Q^*	Q^*	Q^*	Q^*	
0	0	0	0	0	0
1	0.32	0.27	0.31	0.30	0.31
2	0.45	0.41	0.44	0.44	0.44
3	0.16	0.20	0.17	0.18	0.17
4	0.05	0.08	0.05	0.06	0.05
5	0.01	0.03	0.02	0.02	0.02
6	0	0	0	0	0

Fuente: Elaboración propia.

La Fig. 5.4 muestra los hidrogramas unitarios promedio medido vs. Predecido (HUA) para la cuenca del río Amargosa, obtenido por método gráfico de la Col. 1 vs. Cols. 5 y 6 de la Tabla 5.10, respectivamente.

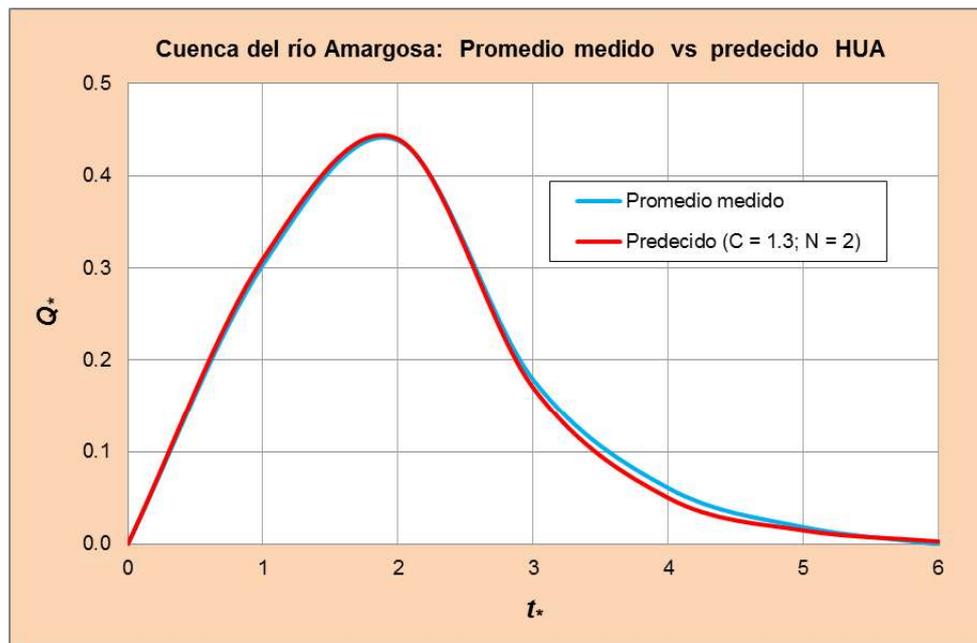


Figura Nro 5.4. Cuenca del río Amargosa: Promedio medido vs. Predecido HUA.



5.1.5. Río Petaluma

Siguiendo el procedimiento descrito en la Sección 3.1.5, los tres (3) grupos de eventos correspondientes a la información de precipitación-escorrentía fueron reunidos para la subcuenca del río Petaluma. Los resultados se resumen en las Tablas 5.11 y 5.12.

Tabla Nro 5.11. Subcuenca del río Petaluma – datos de precipitación y descarga.

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
No.	Fecha	<i>P</i> (pulg)	<i>P</i> (cm)	<i>Q</i> (p ³ /s)	<i>Q_d</i> (p ³ /s)	<i>Q_d</i> (m ³ /s)	<i>Q_{uh}</i> (m ³ /s)
1	20000220	0.34	0.86	106	0	0	0
	20000221	0.47	1.19	254	148	4.19	2
	20000222	0.25	0.64	468	362	10.24	4.8
	20000223	0.79	2.01	343	237	6.71	3.2
	20000224	0.27	0.69	166	60	1.7	0.8
	20000225	0.17	0.43	106	0	0	0
2	20021218	0	0	122	0	0	0
	20021219	0.04	0.1	183	61	1.73	0.3
	20021220	1.23	3.12	1000	878	24.85	4.8
	20021221	0.58	1.47	834	712	20.15	3.9
	20021222	0.24	0.61	404	282	7.98	1.5
	20021223	0	0	154	32	0.91	0.2
	20021224	0	0	122	0	0	0
3	20100204	0.17	0.43	124	0	0	0
	20100205	0.68	1.72	531	407	11.52	4.2
	20100206	0.49	1.25	719	595	16.84	6.1
	20100207	0	0	164	40	1.13	0.4
	20100208	0	0	124	0	0	0

Fuente: Elaboración propia.

Tabla Nro 5.12. Subcuenca del río Petaluma – hidrograma unitario adimensional (HUA).

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Hidrograma unitario adimensional medido				Promedio medido	Predecido Q^* ($C = 1.77$, $N = 3$)
t^*	No. 1	No. 2	No. 3		
	Q^*	Q^*	Q^*	Q^*	
0	0	0	0	0	0
1	0.2	0.2	0.34	0.25	0.21
2	0.45	0.45	0.46	0.45	0.45
3	0.29	0.29	0.15	0.24	0.29
4	0.05	0.05	0.04	0.05	0.05
5	0	0	0	0	0

Fuente: Elaboración propia.

La Fig. 5.5 muestra los hidrogramas unitarios promedio medido vs. Predecido (HUA) para la subcuenca del río Petaluma, obtenido por método gráfico de la Col. 1 vs. Cols. 5 y 6 de la Tabla 5.12, respectivamente.

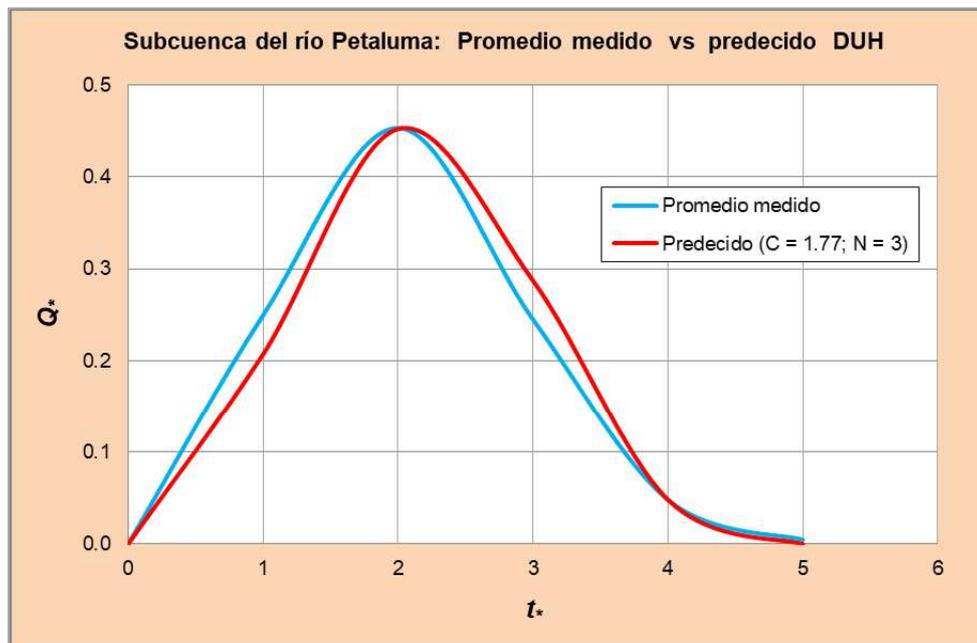


Figura Nro 5.5. Subcuenca del río Petaluma: Promedio medido vs. Predecido HUA.

5.1.6. Río Russian

Siguiendo el procedimiento descrito en la Sección 3.1.6, los tres (3) grupos de eventos correspondientes a la información de precipitación-escorrentía fueron reunidos para la cuenca del río Russian. Los resultados se resumen en las Tablas 5.13 y 5.14.

Tabla Nro 5.13. Cuenca del río Russian – datos de precipitación y descarga.

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
No.	Fecha	<i>P</i> (pulg)	<i>P</i> (cm)	<i>Q</i> (p ³ /s)	<i>Q_d</i> (p ³ /s)	<i>Q_d</i> (m ³ /s)	<i>Q_{uh}</i> (m ³ /s)
1	19941202	0.07	0.18	1350	0	0	0
	19941203	0.82	2.09	1980	630	17.83	39.9
	19941204	0.86	2.18	4970	3620	102.45	229.2
	19941205	0.02	0.04	2990	1640	46.41	103.8
	19941206	0.19	0.48	1790	440	12.45	27.9
	19941207	0.07	0.18	1350	0	0	0
2	19951229	1.07	2.72	2150	0	0	0
	19951230	2.05	5.21	7930	5780	163.57	142.8
	19951231	0.03	0.07	9960	7810	221.02	193
	19960101	0	0	4080	1930	54.62	47.7
	19960102	0	0	2850	700	19.81	17.3
	19960103	0	0	2150	0	0	0
3	20151029	0	0	2590	0	0	0
	20151030	0	0	8620	6030	170.65	118.4
	20151031	0	0	11800	9210	260.64	180.9
	20151101	0.15	0.38	5730	3140	88.86	61.7
	20151102	0.21	0.52	4080	1490	42.17	29.3
	20151103	0	0	3130	540	15.28	10.6
	20151104	0	0	2590	0	0	0

Fuente: Elaboración propia.

Tabla Nro 5.14. Cuenca del río Russian – hidrograma unitario adimensional (HUA).

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Hidrograma unitario adimensional medido				Promedio medido Q^*	Predecido Q^* ($C = 1.4,$ $N = 2$)
t^*	No. 1 Q^*	No. 2 Q^*	No. 3 Q^*		
0	0	0	0	0	0
1	0.23	0.39	0.33	0.31	0.34
2	0.46	0.48	0.45	0.46	0.46
3	0.28	0.11	0.16	0.18	0.15
4	0.04	0.02	0.05	0.04	0.04
5	0.004	0.003	0.012	0.01	0.01
6	0	0	0	0	0

Fuente: Elaboración propia.

La Fig. 5.6 muestra los hidrogramas unitarios promedio medido vs. Predecido (HUA) para la cuenca del río Russian, obtenido por método gráfico de la Col. 1 vs. Cols. 5 y 6 de la Tabla 5.14, respectivamente.

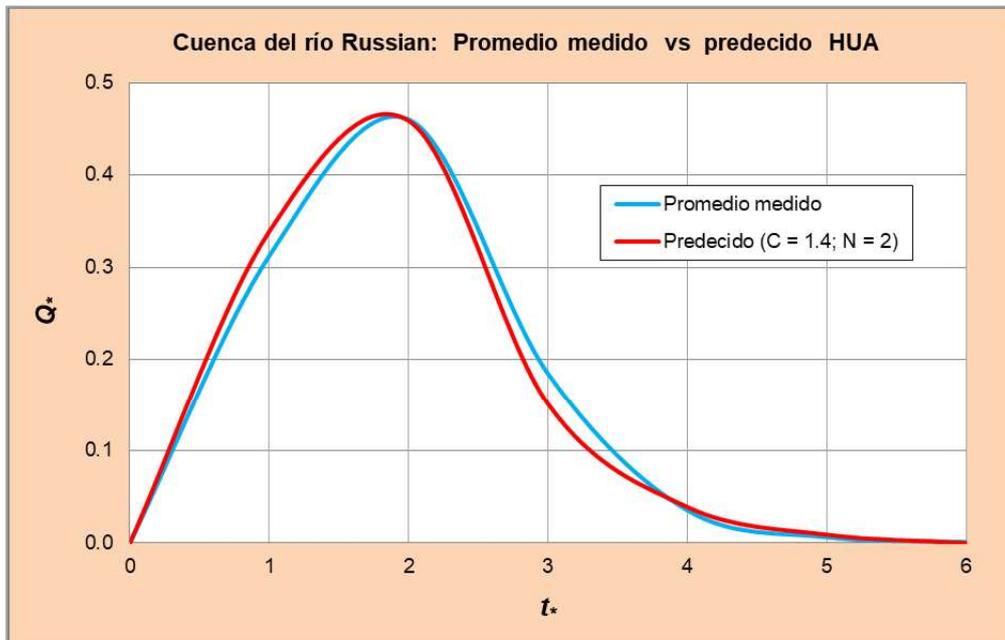


Figura Nro 5.6. Cuenca del río Russian: Promedio medido vs. Predecido HUA.



5.1.7. Quebrada Los Gatos

Siguiendo el procedimiento descrito en la Sección 3.1.7, los tres (3) grupos de eventos correspondientes a la información de precipitación-escorrentía fueron reunidos para la subcuenca de la quebrada Los Gatos. Los resultados se resumen en las Tablas 5.15 y 5.16.

Tabla Nro 5.15. Subcuenca de la quebrada Los Gatos – datos de precipitación y descarga.

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
No.	Fecha	P (pulg)	P (cm)	Q (p ³ /s)	Q_d (p ³ /s)	Q_d (m ³ /s)	Q_{uh} (m ³ /s)
1	19971225	0	0	0.39	0	0	0
	19971226	0.11	0.28	122	121.61	3.44	21.2
	19971227	1.6	4.06	41	40.61	1.15	7.08
	19971228	0.74	1.88	2.1	1.71	0.05	0.29
	19971229	0	0	0.39	0	0	0
2	19780114	0	0	42	0	0	0
	19780115	0.07	0.18	90	48	1.36	1.51
	19780116	0.14	0.36	796	754	21.34	23.71
	19780117	0	0	129	87	2.46	2.74
	19780118	0	0	62	20	0.57	0.63
	19780119	0	0	42	0	0	0
3	19780302	0.24	0.61	198	0	0	0
	19780303	0.21	0.53	267	69	1.95	2.37
	19780304	1.3	3.3	718	520	14.72	17.83
	19780305	0.08	0.2	389	191	5.41	6.55
	19780306	0	0	252	54	1.53	1.85
	19780307	0	0	198	0	0	0

Fuente: Elaboración propia.

Tabla Nro 5.16. Subcuenca de la quebrada Los Gatos – hidrograma unitario adimensional (HUA).

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Hidrograma unitario adimensional medido				Promedio medido	Predecido Q^* ($C = 1.24$, $N = 1$)
t^*	No. 1	No. 2	No. 3		
	Q^*	Q^*	Q^*	Q^*	
0	0	0	0	0	0
1	0.74	0.82	0.67	0.77	0.77
2	0.19	0.15	0.22	0.19	0.18
3	0.01	0.01	0.07	0.03	0.04
4	0.003	0.001	0.03	0.01	0.01
5	0	0	0	0	0

Fuente: Elaboración propia.

La Fig. 5.7 muestra los hidrogramas unitarios promedio medido vs. Predecido (HUA) para la subcuenca de la quebrada Los Gatos, obtenido por método gráfico de la Col. 1 vs. Cols. 5 y 6 de la Tabla 5.16, respectivamente.

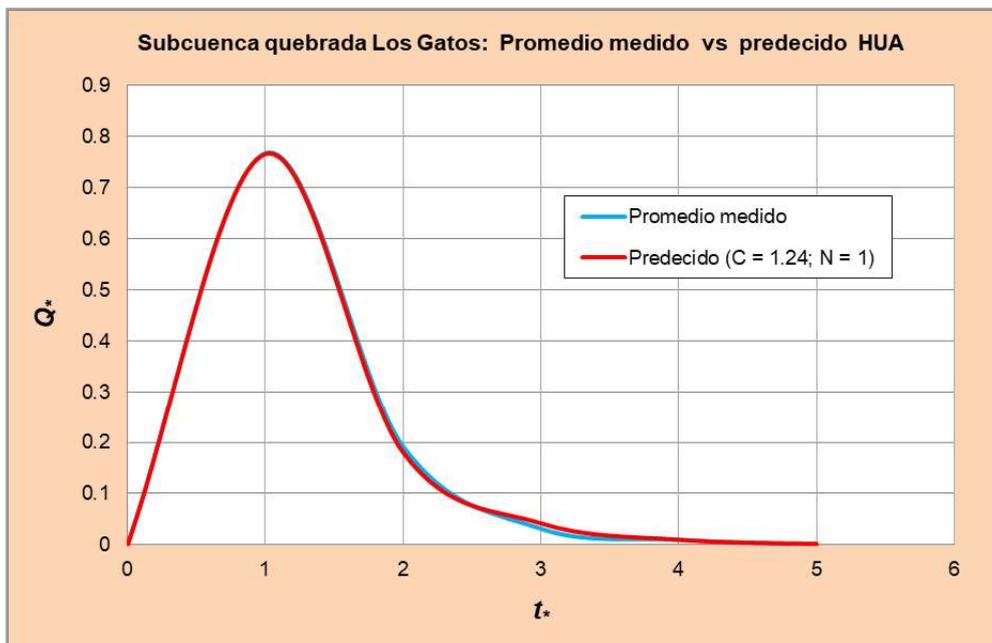


Figura Nro 5.7. Subcuenca de la quebrada Los Gatos: Promedio medido vs. Predecido HUA.

5.1.8. Quebrada Cottonwood

Siguiendo el procedimiento descrito en la Sección 3.1.8, los tres (3) grupos de eventos correspondientes a la información de precipitación-escorrentía fueron reunidos para la cuenca de la quebrada Cottonwood. Los resultados se resumen en las Tablas 5.17 y 5.18.

Tabla Nro 5.17. Cuenca de la quebrada Cottonwood – datos de precipitación y descarga.

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
No.	Fecha	<i>P</i> (pulg)	<i>P</i> (cm)	<i>Q</i> (p ³ /s)	<i>Q_d</i> (p ³ /s)	<i>Q_d</i> (m ³ /s)	<i>Q_{uh}</i> (m ³ /s)
1	19930119	0.18	0.46	1220	0	0	0
	19930120	0.44	1.12	20500	19280	545.62	124.4
	19930121	0.03	0.08	13900	12680	358.84	81.8
	19930122	0.01	0.03	9250	8030	227.25	51.8
	19930123	0	0	4920	3700	104.71	23.9
	19930124	0	0	1220	0	0	0
2	19961226	0.02	0.05	8210	0	0	0
	19961227	0.06	0.15	17800	9590	271.4	59.2
	19961228	1.24	3.15	32300	24090	681.75	148.7
	19961229	0	0	19100	10890	308.19	67.2
	19961230	0	0	9310	1100	31.13	6.8
	19961231	0	0	8210	0	0	0
3	19980320	0.32	0.81	2920	0	0	0
	19980321	2.01	5.11	15700	12780	361.67	89.1
	19780322	0.03	0.08	14800	11880	336.2	82.9
	19780323	0.03	0.08	11300	8380	237.15	58.4
	19780324	0	0	8290	5370	151.97	37.5
	19780325	0	0	4920	2000	56.6	13.9
	19780325	0	0	2920	0	0	0

Fuente: Elaboración propia.

Tabla Nro 5.18. Cuenca de la quebrada Cottonwood – hidrograma unitario adimensional (HUA).

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Hidrograma unitario adimensional medido				Promedio medido Q^*	Predecido Q^* ($C = 0.68,$ $N = 1$)
t^*	No. 1 Q^*	No. 2 Q^*	No. 3 Q^*		
0	0	0	0	0	0
1	0.44	0.52	0.31	0.51	0.51
2	0.25	0.12	0.22	0.23	0.25
3	0.14	0.06	0.15	0.14	0.12
4	0.08	0.03	0.1	0.08	0.06
5	0.04	0	0.07	0.05	0.03
6	0	0	0	0	0

Fuente: Elaboración propia.

La Fig. 5.8 muestra los hidrogramas unitarios promedio medido vs. Predecido (HUA) para la cuenca de la quebrada Cottonwood, obtenido por método gráfico de la Col. 1 vs. Cols. 5 y 6 de la Tabla 5.18, respectivamente.

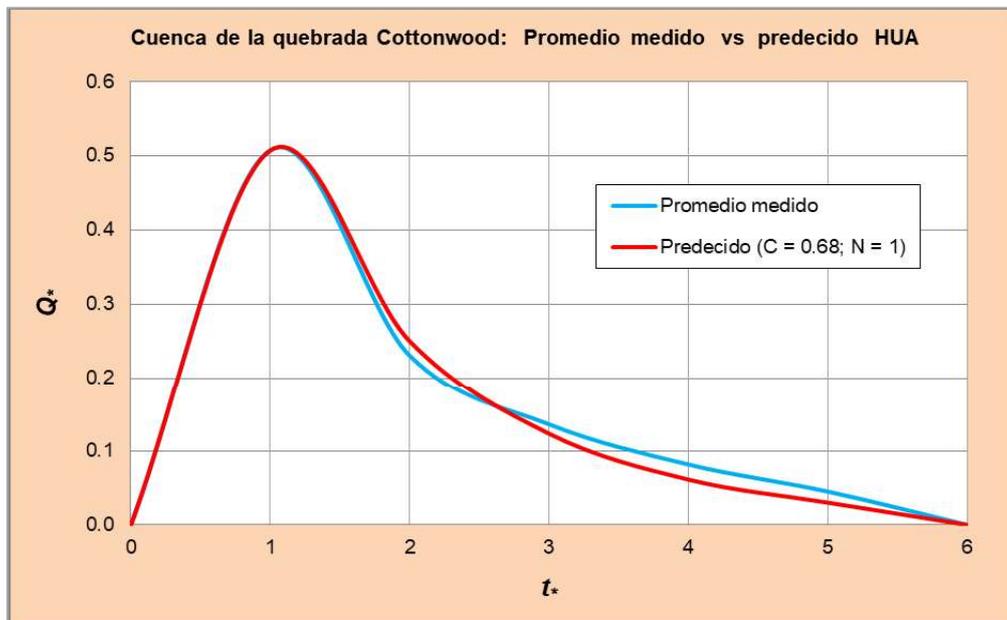


Figura Nro 5.8. Cuenca de la quebrada Cottonwood: Promedio medido vs. Predecido HUA.



5.1.9. Río Salinas

Siguiendo el procedimiento descrito en la Sección 3.1.9, los tres (3) grupos de eventos correspondientes a la información de precipitación-escorrentía fueron reunidos para la cuenca del río Salinas. Los resultados se resumen en las Tablas 5.19 y 5.20.

Tabla Nro 5.19. Cuenca del río Salinas – datos de precipitación y descarga.

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
No.	Fecha	<i>P</i> (pulg)	<i>P</i> (cm)	<i>Q</i> (p ³ /s)	<i>Q_d</i> (p ³ /s)	<i>Q_d</i> (m ³ /s)	<i>Q_{uh}</i> (m ³ /s)
1	19800217	2.19	5.57	5890	0	0	0
	19800218	2.02	5.14	16300	10410	294.6	116
	19800219	0.83	2.11	31500	25610	724.76	285.3
	19800220	0.65	1.65	36200	30310	857.77	337.7
	19800221	1.15	2.91	32100	26210	741.74	292
	19800222	0.02	0.04	26800	20910	591.75	232.9
	19800223	0.04	0.09	14800	8910	252.15	99.3
	19800224	0	0	5890	0	0	0
2	19830228	0	0	5680	0	0	0
	19830301	2.06	5.24	22900	17220	487.33	149.9
	19830302	1.14	2.9	43300	37620	1064.65	327.5
	19830303	0.68	1.71	59800	54120	1531.6	471.1
	19830304	0.31	0.77	37000	31320	886.36	272.6
	19830305	0.04	0.09	22000	16320	461.86	142.1
	19830306	0.06	0.16	0	0	0	0
3	19950310	4.13	10.5	5800	0	0	0
	19950311	3.11	7.91	12700	6900	195.27	76.3
	19950312	0.57	1.45	23500	17700	500.91	195.8
	19950313	0	0	64000	58200	1647.06	643.9
	19950314	0	0	34200	28400	803.72	314.2
	19950315	0	0	17800	12000	339.6	132.8
	19950316	0	0	5800	0	0	0

Fuente: Elaboración propia.

Tabla Nro 5.20. Cuenca del río Salinas – hidrograma unitario adimensional (HUA).

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Hidrograma unitario adimensional medido				Promedio medido Q^*	Predecido Q^* ($C = 1.36,$ $N = 4$)
t^*	No. 1 Q^*	No. 2 Q^*	No. 3 Q^*		
0	0	0	0.05	0.02	0
1	0.07	0.07	0.05	0.06	0.05
2	0.21	0.26	0.19	0.22	0.20
3	0.26	0.34	0.26	0.3	0.30
4	0.2	0.22	0.25	0.23	0.24
5	0.13	0.08	0.14	0.12	0.12
6	0.07	0.02	0.06	0.05	0.05
7	0	0	0	0	0

Fuente: Elaboración propia.

La Fig. 5.9 muestra los hidrogramas unitarios promedio medido vs. Predecido (HUA) para la cuenca del río Salinas, obtenido por método gráfico de la Col. 1 vs. Cols. 5 y 6 de la Tabla 5.20, respectivamente.

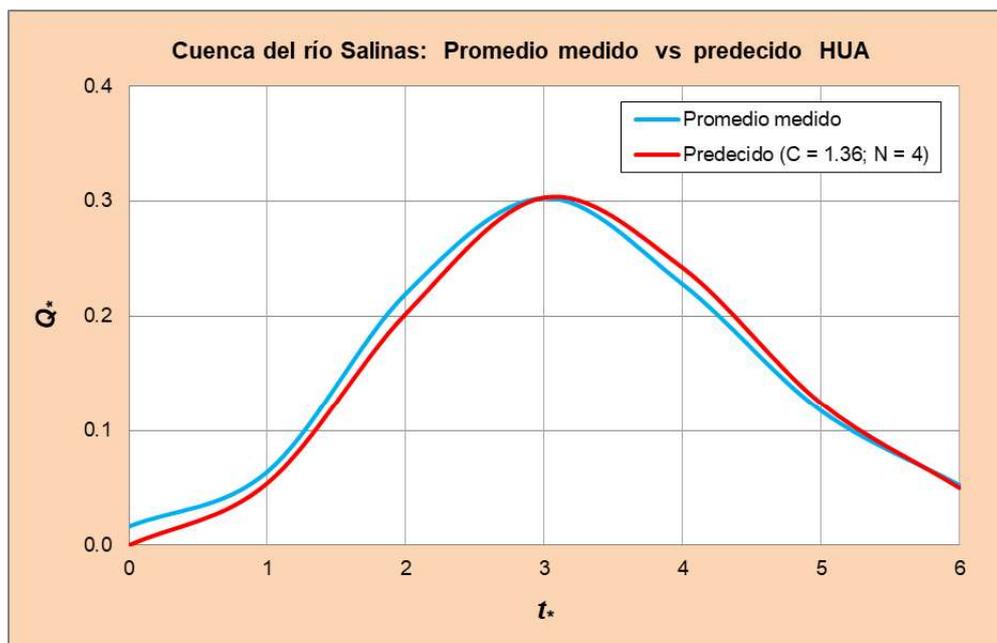


Figura Nro 5.9. Cuenca del río Salinas: Promedio medido vs. Predecido HUA.



5.1.10. Río Shasta

Siguiendo el procedimiento descrito en la Sección 3.1.10, los tres (3) grupos de eventos correspondientes a la información de precipitación-escorrentía fueron reunidos para la cuenca del río Shasta. Los resultados se resumen en las Tablas 5.21 y 5.22.

Tabla Nro 5.21. Cuenca del río Shasta – datos de precipitación y descarga.

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
No.	Fecha	<i>P</i> (pulg)	<i>P</i> (cm)	<i>Q</i> (p ³ /s)	<i>Q_d</i> (p ³ /s)	<i>Q_d</i> (m ³ /s)	<i>Q_{uh}</i> (m ³ /s)
1	20020127	0.11	0.03	198	0	0	0
	20020128	0.03	0.08	621	423	11.97	37.5
	20020129	0	0	1130	932	26.38	82.7
	20020130	0	0	774	576	16.3	51.1
	20020131	0	0	532	334	9.45	29.6
	20020201	0	0	198	0	0	0
2	20051229	0.39	0.99	667	0	0	0
	20051230	1.12	2.84	1000	333	9.42	18
	20051231	3.28	8.33	2140	1473	41.69	79.6
	20060101	0.73	1.85	1700	1033	29.23	55.8
	20060102	0.25	0.64	1550	883	24.99	47.7
	20060103	0.19	0.48	667	0	0	0
3	20150124	0.01	0.03	224	0	0	0
	20150125	0.46	1.17	540	316	8.94	19.2
	20150126	0	0	1340	1116	31.58	67.8
	20150127	0	0	990	766	21.68	46.5
	20150128	0	0	835	611	17.29	37.1
	20150129	0	0	726	502	14.21	30.5
	20150130	0	0	224	0	0	0

Fuente: Elaboración propia.

Tabla Nro 5.22. Cuenca del río Shasta – hidrograma unitario adimensional (HUA).

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Hidrograma unitario adimensional medido				Promedio medido	Predecido Q^* ($C = 1.08$, $N = 2$)
t^*	No. 1	No. 2	No. 3		
	Q^*	Q^*	Q^*	Q^*	
0	0	0	0	0	0
1	0.27	0.25	0.19	0.24	0.25
2	0.41	0.4	0.34	0.39	0.39
3	0.2	0.21	0.23	0.22	0.21
4	0.08	0.09	0.13	0.1	0.09
5	0.03	0	0.06	0.03	0.03
6	0	0	0.03	0.01	0.01
7	0	0	0	0	0

Fuente: Elaboración propia.

La Fig. 5.10 muestra los hidrogramas unitarios promedio medido vs. Predecido (HUA) para la cuenca del río Shasta, obtenido por método gráfico de la Col. 1 vs. Cols. 5 y 6 de la Tabla 5.22, respectivamente.

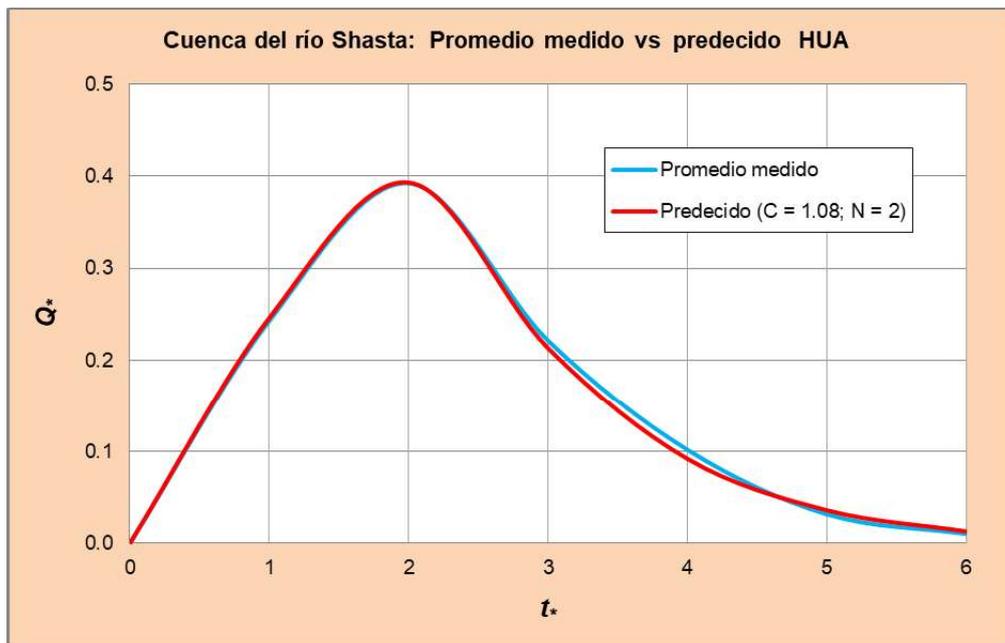


Figura Nro 5.10. Cuenca del río Shasta: Promedio medido vs. Predecido HUA.

5.2. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Para propósito ilustrativo, la Fig. 5.7 se repite aquí. Dónde se demuestra que los diez (10) casos estudiados (Sección 5.1) tienen una excelente concordancia entre el HUA promedio medido y el HUA predicho.

Por lo tanto, la metodología presentada en la Sección 3 puede ser utilizada para calcular los parámetros de la CRL con una expectativa razonable de precisión, considerando datos correspondientes a precipitación y escorrentía.

En la práctica, tres eventos de poca frecuencia de precipitación-escorrentía con características de hidrogramas similares pueden ser utilizados para desarrollar el HUA promedio medido, del que se puede obtener el HUA predicho. No obstante, la incertidumbre puede verse afectada para el caso donde los eventos seleccionados presenten características de hidrogramas muy diferentes.

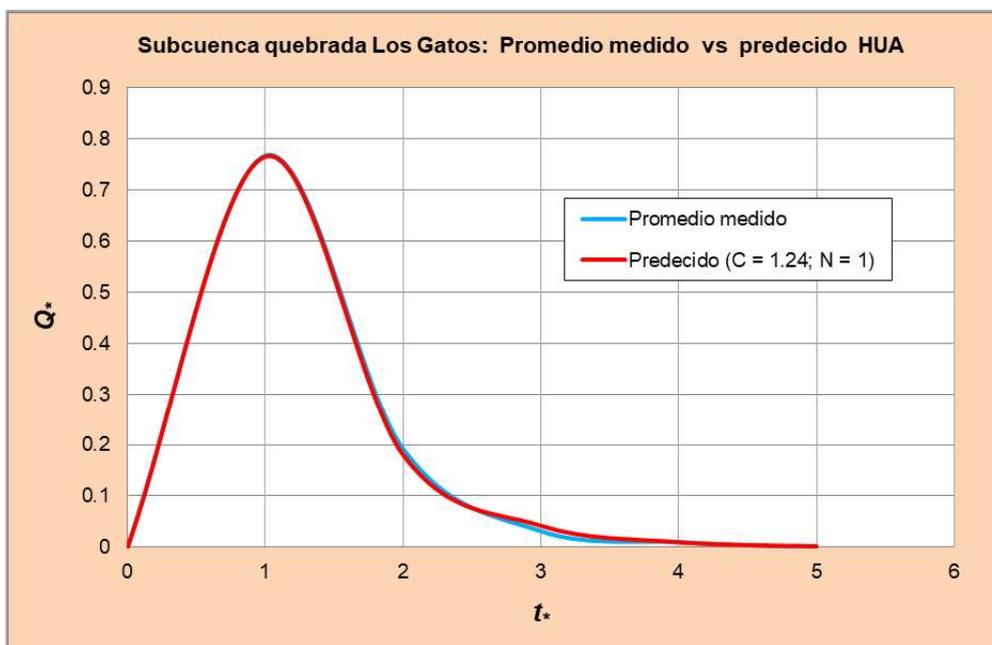


Figura Nro 5.7. Subcuenca de la quebrada Los Gatos: Promedio medido vs. Predicho HUA.



5.3. ANÁLISIS GEOMORFOLÓGICO

En esta sección, los parámetros geomorfológicos medidos descritos en la Sección 4.3, están relacionados con los parámetros de la CRL descritos en la Sección 5.1. En la Tabla 5.23 se muestra lo siguiente:

1. Columna 1: Número de cuenca.
2. Columna 2: Nombre de cuenca.
3. Columna 3: Área de drenaje A (km^2).
4. Columna 4: Pendiente promedio de la superficie del terreno S_0 (m/m).
5. Columna 5: Pendiente del canal principal S_1 (de 0 a 100%) (m/m).
6. Columna 6: Pendiente del canal principal S_2 (de 10 a 85%) (m/m).
7. Columna 7: Número de Courant C .
8. Columna 8: Número de reservorios lineales N .

Tabla Nro 5.23. Resumen de los parámetros geomorfológicos y de la CRL.

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
No.	Cuenca	Área (km^2)	S_0 (m/m)	S_1 (m/m)	S_2 (m/m)	C	N
1	Quebrada Campo	218	0.171	0.021	0.018	1.20	2
2	Río Whitewater	3849	0.268	0.028	0.012	1.77	4
3	Río Mojave	56583	0.164	0.0038	0.00014	1.80	4
4	Río Amargosa	8315	0.151	0.011	0.007	1.30	2
5	Río Petaluma	93	0.099	0.036	0.025	1.77	3
6	Río Russian	3463	0.242	0.005	0.002	1.40	2
7	Quebrada Los Gatos	247	0.328	0.037	0.015	1.24	1
8	Quebrada Cottonwood	2435	0.255	0.017	0.01	0.68	1
9	Río Salinas	11777	0.215	0.003	0.002	1.36	4
10	Río Shasta	1737	0.196	0.041	0.013	1.08	2

Fuente: Elaboración propia.

La Fig. 5.11 muestra los pares calculados de C/N para las cuencas estudiadas. En general, un valor inferior de N ($N = 1$) corresponde a una cuenca de pendiente pronunciada (No. 7 y 8), mientras que un valor superior de N ($N = 4$) corresponde a una cuenca de pendiente más suave (No. 2, 3 y 9). Como se muestra en la Sección 3.4, la difusión del hidrograma incrementa con el número de reservorios lineales.

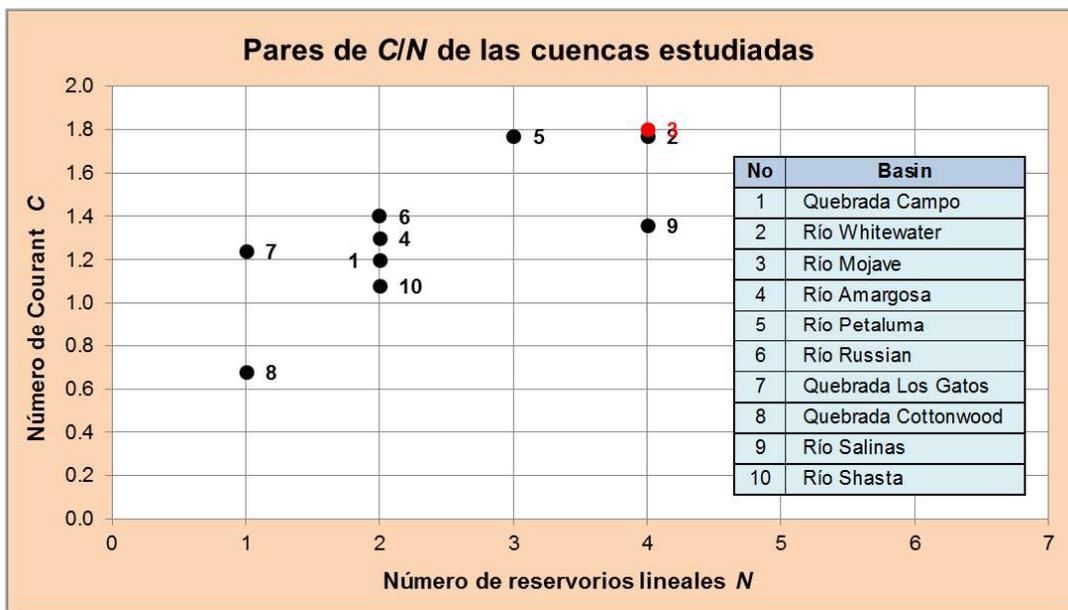


Figura Nro 5.11. Pares de C/N para las cuencas estudiadas.

La Fig. 5.12 muestra la relación entre la descarga pico Q_p^* y el tiempo pico t_p^* del hidrograma unitario adimensional (HUA) para las diez (10) cuencas estudiadas. Este gráfico demuestra que un incremento de la difusión del hidrograma se da con un decrecimiento de la pendiente del canal principal (comparar No. 7 y No. 9).

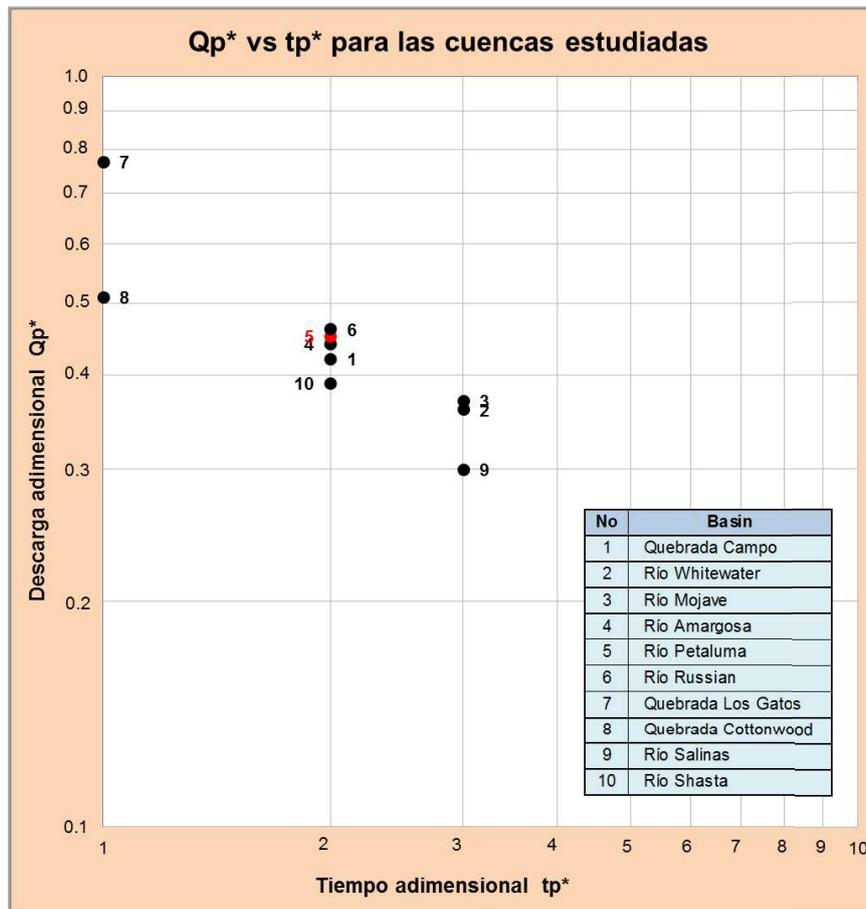


Figura Nro 5.12. Qp* vs. Tp* para las cuencas estudiadas.

5.4. MODELAMIENTO DE LA DIFUSIÓN DEL HIDROGRAMA UNITARIO

La Sección 3.4 muestra que la difusión del hidrograma incrementa con el aumento del valor de N y el decrecimiento del valor de C . Por lo tanto, un número de difusión D puede ser definido a continuación:

$$D = \frac{N}{C} \tag{5-1}$$

Las Figuras 5.13 a 5.16 muestran la correlación del número de difusión D con los parámetros geomorfológicos pertinentes: (1) Área de drenaje de la cuenca A , (2) pendiente promedio de la superficie del terreno S_0 , (3) pendiente del canal principal S_1 , y (4) pendiente del canal principal S_2 (referido a la Tabla 5.23). Los resultados de estas correlaciones se resumen en la Tabla 5.24.

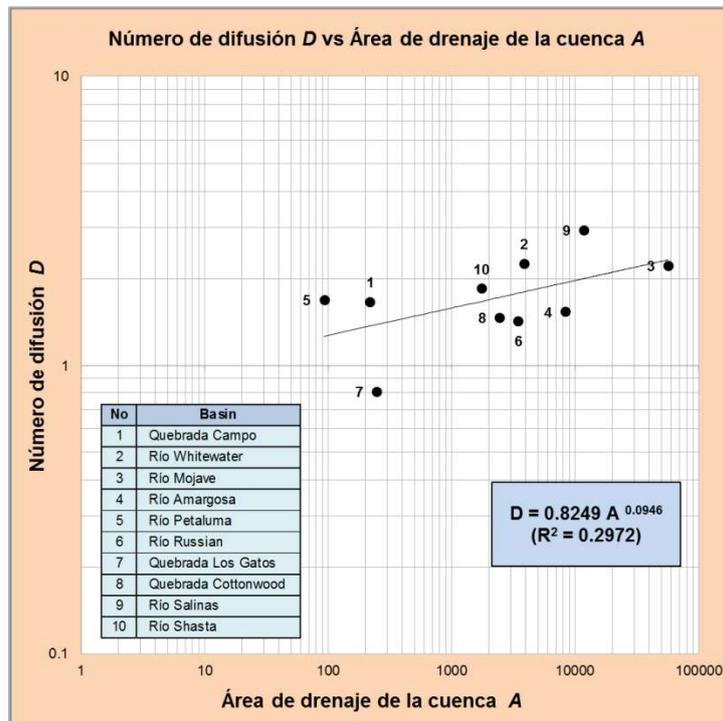


Figura Nro 5.13. Número de difusión D vs. Área de drenaje de la cuenca A .

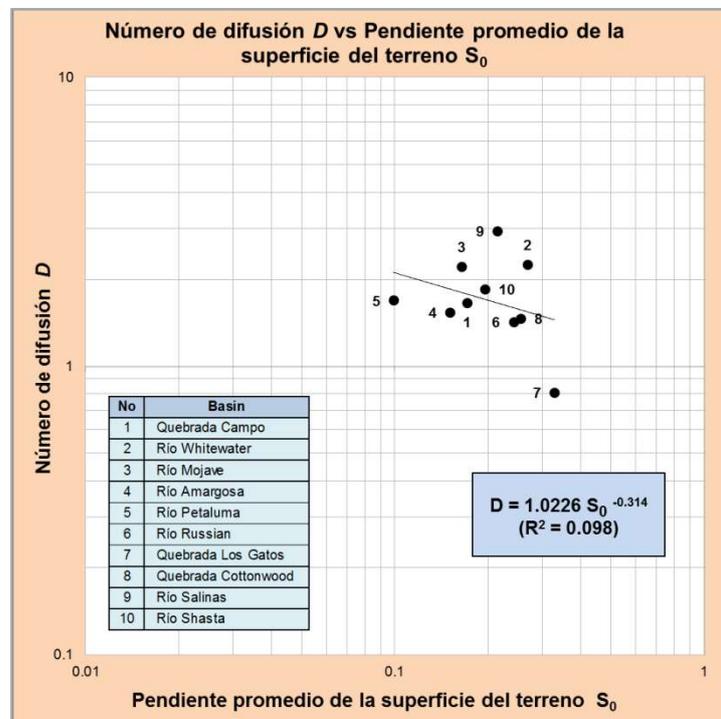


Figura Nro 5.14. Número de difusión D vs. Pendiente promedio de la superficie del terreno S_0 .

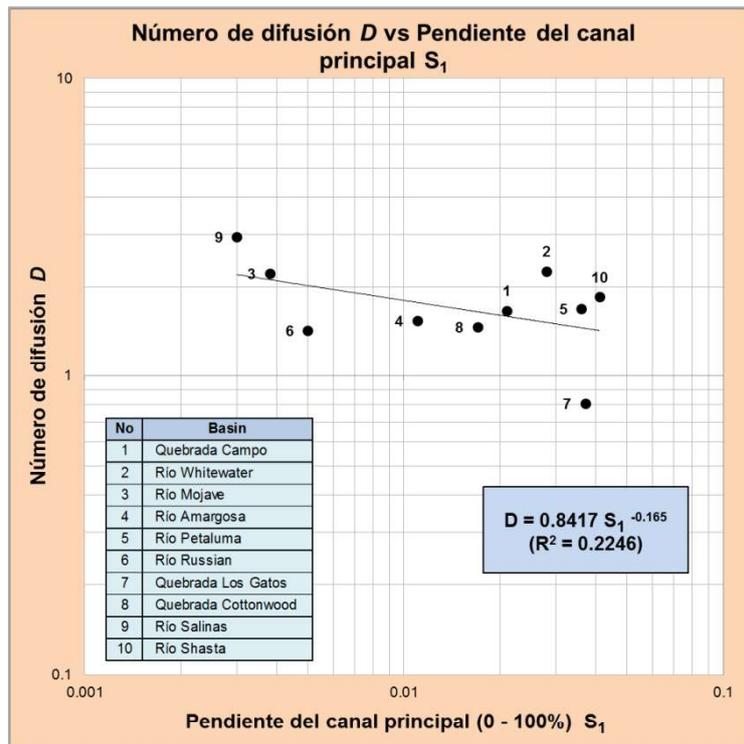


Figura Nro 5.15. Número de difusión D vs. Pendiente del canal principal S_1 .

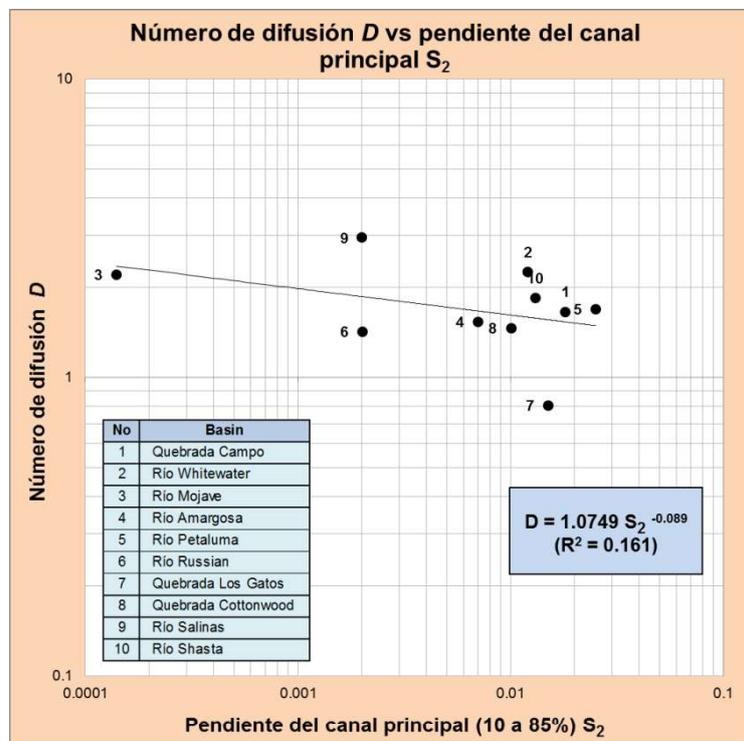


Figura Nro 5.16. Número de difusión D vs. Pendiente del canal principal S_2 .

Tabla Nro 5.24. Resumen de las correlaciones del número de difusión D .

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Variable independiente	α	β	R^2	R
Área de drenaje de la cuenca A	0.8249	0.0946	0.2972	0.55
Pendiente promedio de la superficie terrestre S_0	1.0226	-0.314	0.098	0.31
Pendiente del canal principal (0 a 100%) S_1	0.8417	-0.165	0.2246	0.47
Pendiente del canal principal (10 a 85%) S_2	1.0749	-0.089	0.161	0.40

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 5.24 demuestra que el número de difusión D se correlaciona razonablemente bien con el área de drenaje de la cuenca A , y en menor medida con la pendiente del canal principal S_1 . En una aplicación práctica, considerando un valor de A o S_1 , las correlaciones mostradas en esta tabla pueden ser utilizadas para calcular el número de difusión D .

Las Fig. 5.17 y 5.18, muestran la correlación del número de reservorios lineales N con los siguientes parámetros geomorfológicos: (1) área de drenaje de la cuenca A , y (2) canal principal de la cuenca S_1 . Dado un valor de A o S_1 , la correlación mostrada puede utilizarse para calcular N .

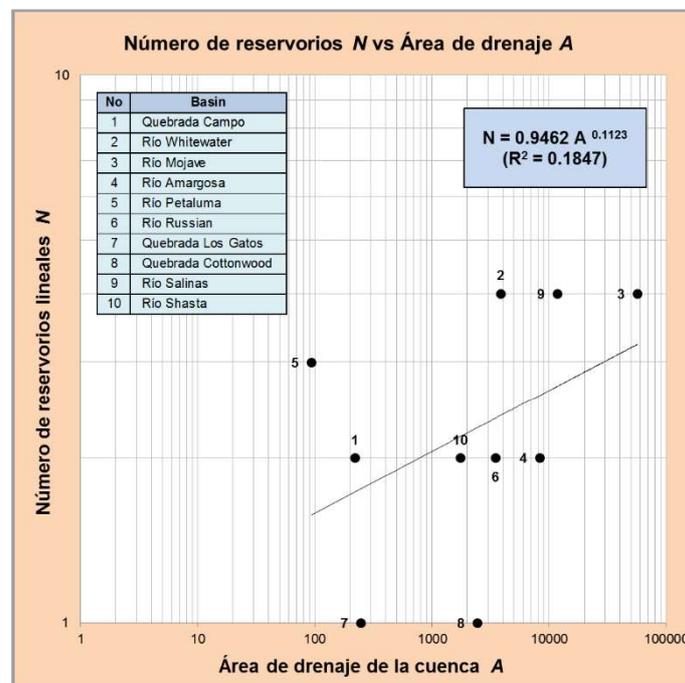


Figura Nro 5.17. Número de reservorios lineales N vs. Área de drenaje de la cuenca A .

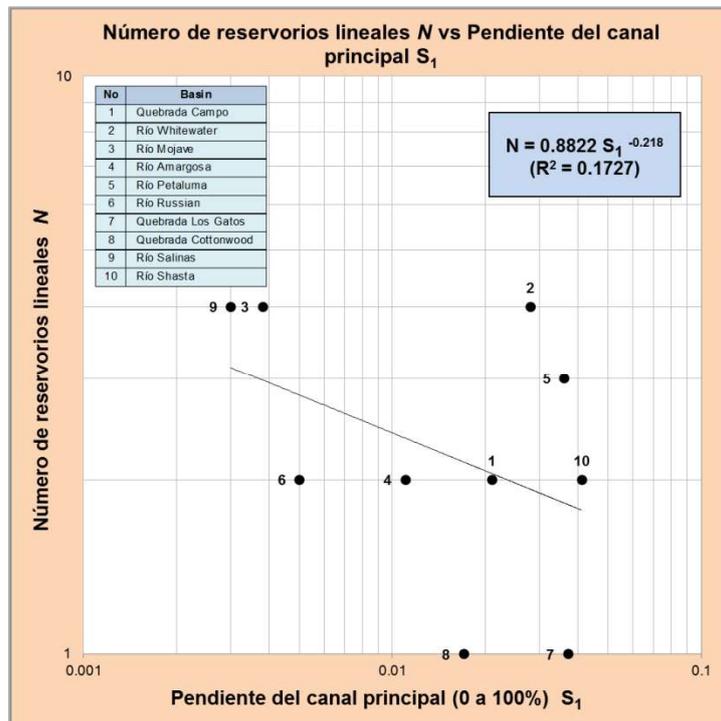


Figura Nro 5.18. Número de reservorios lineales N vs. Pendiente del canal principal S_1 .

5.5. CASO PRÁCTICO

Asumiendo un área de drenaje para una cuenca, $A = 1000 \text{ km}^2$. Utilizamos la metodología derivada aquí, para calcular el hidrograma unitario (1 cm) correspondiente para una duración de 1 día.

Solución:

Utilizando la línea 1 de la Tabla 5.24, el número de difusión es:

$$D = 0.8249 A^{0.0946} = 1.586$$

Utilizando la Fig. 5.17, el número de reservorios lineales es:

$$N = 0.9462 A^{0.1123} = 2.06 \approx 2.0$$

Utilizando la Ec. 5.1:

$$C = N/D \rightarrow C = 1.26$$

Las Fig. 5.19 y 5.20, muestran el hidrograma unitario adimensional (HUA) y el hidrograma unitario (HU) para el problema establecido, respectivamente.

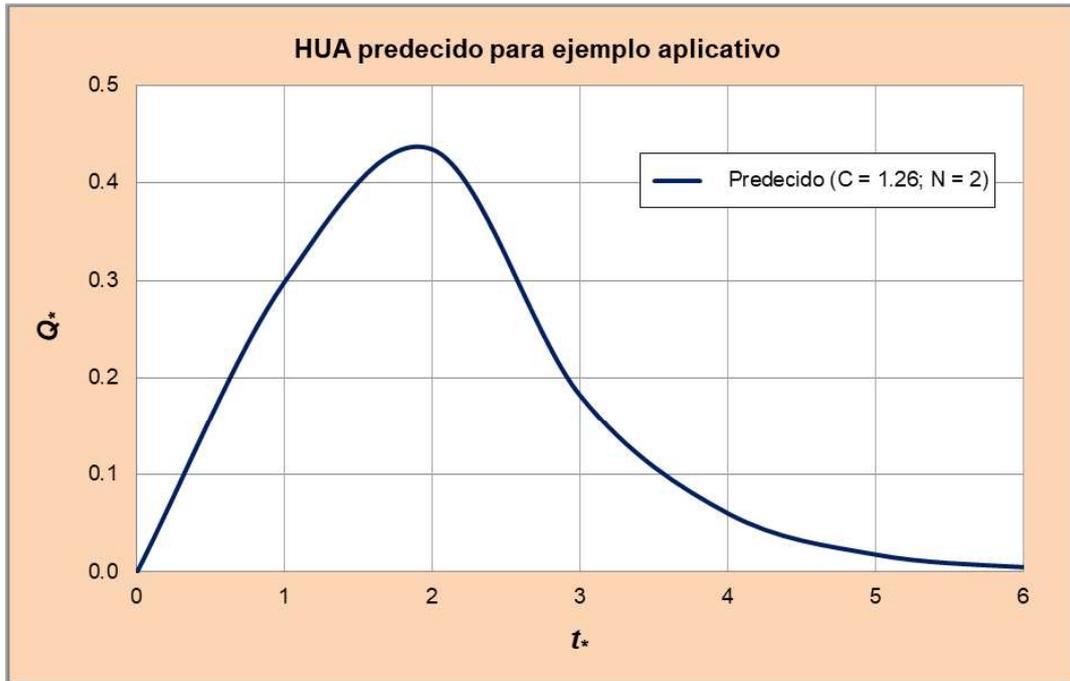


Figura Nro 5.19. Hidrograma unitario adimensional predecido para ejemplo aplicativo.

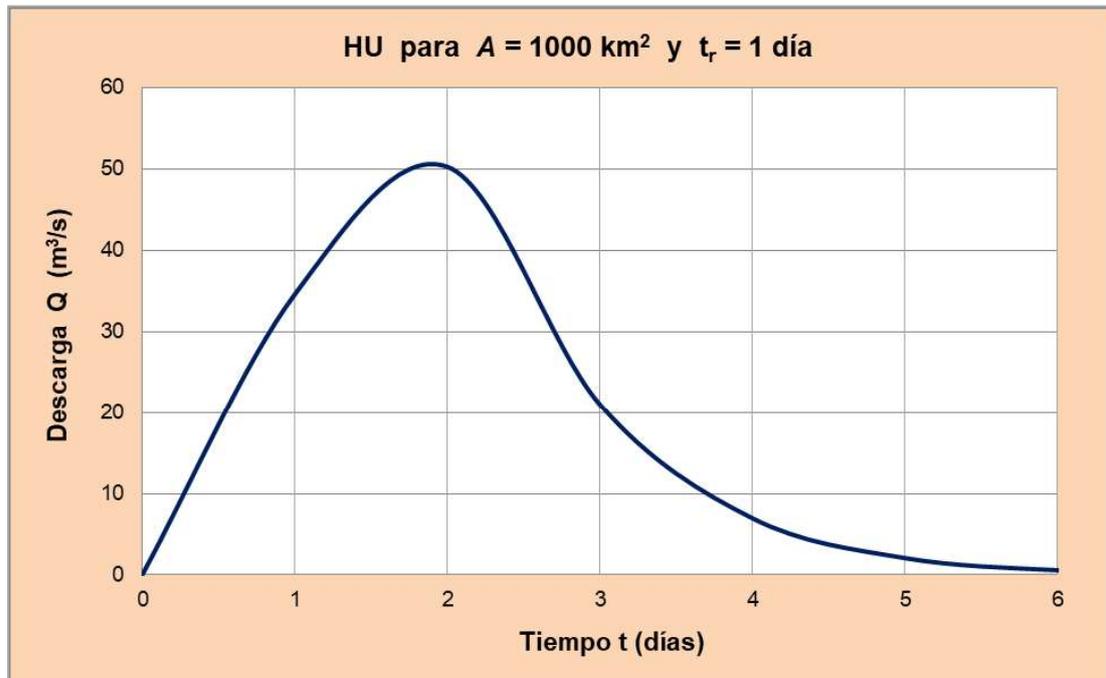


Figura Nro 5.20. Hidrograma unitario predecido para ejemplo aplicativo.



CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. RESUMEN

La investigación validó la teoría del hidrograma unitario adimensional general (HUAG) utilizando información de cuencas de California. El HUAG es una formulación adimensional del concepto del hidrograma unitario, de aplicabilidad general y de alcance global. Considerando un área de drenaje de cuenca A , para la cual se busca un hidrograma unitario de duración t_r , la metodología del HUAG nos proporciona un hidrograma unitario adimensional (HUA) que se basa en los parámetros de la cascada de reservorios lineales (CRL) como C y N , donde C = número de Courant y N = número de reservorios lineales en serie. La metodología está basada en comparar un HUA promedio medido con un HUA predecido.

Se seleccionaron diez (10) cuencas sustentables en California, cubriendo un rango amplio de parámetros geomorfológicos como el área de drenaje, la pendiente promedio de la superficie del terreno, y la pendiente principal del canal. Se escogieron tres (3) eventos de poca frecuencia de inundación, dando lugar a tres (3) hidrogramas unitarios, de los cuales se obtuvo un HUA promedio medido. Utilizando el modelo de la CRL, un HUA predecido, con parámetros C y N , fue calculado por prueba y error para ser comparado con un HUA promedio medido.

Se definió un parámetro de difusión D para ayudar en el modelamiento de la difusión del hidrograma unitario. Dado que este último aumenta con el incremento del valor de N y un decrecimiento en C , una primera aproximación D fue tomada como: $D = N / C$. Las correlaciones entre D y los parámetros geomorfológicos sustentados indicaron que existe un buen ajuste no lineal razonable entre el parámetro D y: (a) área de drenaje A , y (b) pendiente del canal principal S_1 . Adicionalmente, se realizó una correlación entre el número de reservorios lineales N y: (a) área de drenaje A , y (b) pendiente del canal principal S_1 . Estas dos (2) correlaciones permitieron el cálculo de la duración t_r del hidrograma unitario para una cuenca definida de área de drenaje A .



La metodología desarrollada en esta investigación proporciona una manera de vincular la forma del hidrograma unitario, es decir, la cantidad de la difusión de su escorrentía, con las características geomorfológicas de la cuenca. Es notorio que este objetivo ha sido el centro de la investigación del hidrograma unitario durante muchas décadas. Aplicaciones adicionales en todo el mundo podrían proporcionar más información para fortalecer las correlaciones más allá de este primer intento de validación de la teoría del HUAG.

6.2. CONCLUSIONES

Las siguientes conclusiones son derivadas de la investigación:

1. El modelo del hidrograma unitario adimensional general (HUAG) ha sido calibrado y probado utilizando información de cuencas de California. La teoría es conceptual, de aplicabilidad global, y puede ser utilizada sin restricciones en todo el mundo. Aplicaciones adicionales deberían fortalecer la utilidad del modelo como un predictor de hidrogramas unitarios basados en la geomorfología local/regional.
2. En el modelo del HUAG, la caracterización de la difusión de la escorrentía puede mejorarse utilizando un parámetro de difusión D , definido como la relación entre el valor del número de reservorios lineales N y el valor del número de Courant C :

$$D = \frac{N}{C} \quad (6-1)$$

3. Considerando un área de drenaje de una cuenca A , para la que se busca un hidrograma unitario de duración t_r , la metodología del HUAG puede ser utilizada para desarrollar un hidrograma unitario que sea consistente con la teoría de la difusión de escorrentía. Esto fue confirmado durante el trabajo de uno de los pioneros como Hayami (1951), quién indicó que la difusión de la escorrentía está intrínsecamente conectada con las características geomorfológicas de la cuenca.



6.3. RECOMENDACIONES

Las siguientes recomendaciones son ofrecidas para futuros trabajos:

1. Se recomienda el uso de datos geográficos que abarquen un rango mucho más amplio de pendientes de canales principales, que puedan variar desde una pendiente empinada como 0.10 m/m hasta una pendiente suave como 0.00001 m/m, para mejorar la predicción de los parámetros del modelo del HUAG.
2. Aplicaciones/validaciones adicionales del modelo del HUAG contribuirán a fortalecer la capacidad predictiva del modelo a través de los límites geográficos
3. Un aumento en la cantidad, calidad y disponibilidad Web (en línea) de los datos de precipitación y escorrentía en todo el mundo contribuirá a mejorar la calidad del ejercicio de la validación.



BIBLIOGRAFÍA

- Dooge, J. C. et. al. (1982). Hydrodynamic derivation of storage parameters of the Muskingum model. *Journal of Hydrology*, Vol. 54, 371-387.
- Dooge, J. C. I. (1973). Linear theory of hydrologic systems. *Technical Bulletin No. 1468, Agricultural Research Service, U. S. Department of Agriculture, Whashington D. C.*
- Hayami, S. (1951). On the propagation of flood waves. *Disaster prevention research institute, Kyoto University, Kyoto, Japa, December. Bulletin No. 1.*
- Hoyt, W. G. (1936, p. 123). Studies of relations of rainfall and runoff in the United States, U.S. Geological Survey. *Water - Supply Paper 772, Government Printing Office, Washington.*
- Lighthill, M. J. y Whitham, G. B. (1955). On kinematic waves: I. Flood movement in long rivers. *Proceedings, Royal Society of London, Series A, 229, 281-316.*
- Linsley, R., Kohler, M., & y Paulhus, L. (1962). *Hydrology for Engineers, Third edition.* New York: McGraw-Hill.
- Nash, J. E. (1957). The form of the instantaneous unit hydrograph. *International Association of Scientific Hydrology Publication, 45(3), 114-121.*
- Ponce, V. M. (1980). Linear reservoirs and numerical diffusion. *Journal of the Hydraulics Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. 106, No. HY5, 691-699.*
- Ponce, V. M. (1989). *Engineering hydrology, principles and practices.* Englewood Cliffs, New Jersey. Prentice Hall.
- Ponce, V. M. (1991a). The kinematic wave controversy. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 177, No. 4, 511-525.*
- Ponce, V. M. (1991b). News perspective on the Vedernikov number. *Water Resources Research, Vol. 27, No. 7, 1777-1779.*
- Ponce, V. M. (2009a). *A general dimensionless unit hydrograph. Online report.* Obtenido de http://ponce.sdsu.edu/general_dimensionless_unit_hydrograph.html
- Ponce, V. M. (2009b). *Cascade and convolution: One and the same. Online report.* Obtenido de http://ponce.sdsu.edu/cascade_and_convolution.html
- Ponce, V. M. (2014a). *Engineering hydrology, principles and practices, Secod Edition, Online.* San Diego, California.



-
- Ponce, V. M. (2014b). *Runoff diffusion reexamined. Online report.* Obtenido de http://ponce.sdsu.edu/runoff_diffusion_reexamined.html
- Ponce, V. M. et. al. (1997). Generalized conceptual modeling of dimensionless overland flow hydrographs. *Journal of Hydrology*, 200, 222-227.
- Ponce, V. M. y Klabunde A. C. (1999). Parking lot storage modeling using diffusion waves. *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 4, No. 4, October, 371-376.
- Ponce, V. M. y Simons, D. B. (1977). Shallow wave propagation in open channel flow. *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, Vol. 103, No. HY12, 1461-1476.
- Rodríguez-Iturbe, I. et. al. (1979). Discharge response analysis and hydrologic similarity: the interrelation between the geomorphologic IUH and the storms characteristics. *Water Resources Research*, Vol. 15, No. 6, 1435-1444.
- Rodríguez-Iturbe, I. y Valdés, J. B. (1979). The geomorphologic structure of hydrologic response. *Water Resources Research*, Vol. 15, No. 6, 1409-1420.
- Sherman, L. K. (1932). Streamflow from rainfall by unit-graph method. *Engineering News-Record*, Vol. 108, April 7. 501-505.
- U.S. Army Engineer North Pacific Division. (1972). *Program Description and User Manual for SSARR Model, Streamflow Synthesis And Reservoir Regulation, revised June 1975.* Portland, Oregon, EEUU.
- Valdés, J. B. et. al. (1979). A rainfall - runoff analysis of the geomorphologic IUH. *Water Resources Research*, Vol. 15, No. 6, 1421-1434.



ANEXOS

ANEXO 1. Información de precipitaciones del NOAA

[1] Dirigirse al siguiente enlace web: <https://www.ncdc.noaa.gov/>

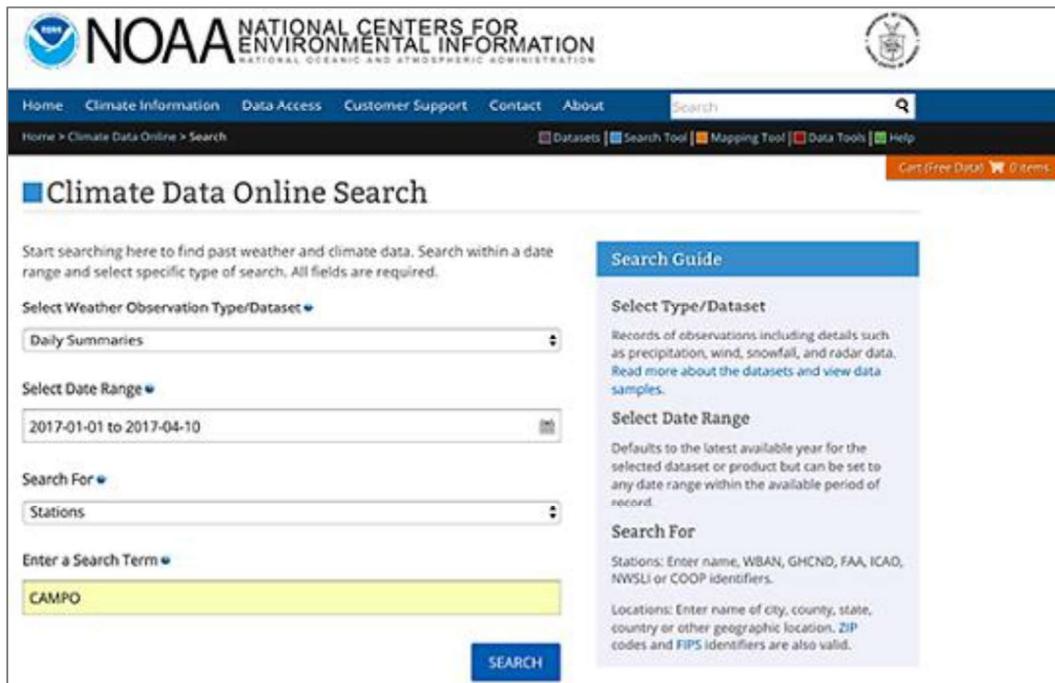
The screenshot shows the NOAA website homepage. At the top left is the NOAA logo with the text "NOAA Formerly the National Climatic Data Center (NCDC)... more about NCEI >". Below this is a navigation bar with links: Home, Climate Information, Data Access, Customer Support, Contact, About, and a search bar. A main content area on the left contains a "How may we assist you?" section with four options: "I want to search for data at a particular location.", "I want quick access to your products.", "I want to see your monthly climate reports.", "I want to find a specific dataset.", and "I want to know about climate change and variability." To the right is a map of the United States with a color-coded overlay, and a text box titled "Assessing the U.S. Climate in March 2017" stating: "The March temperature averaged across the contiguous United States was 46.2°F—4.7°F above the 20th century average." Below the map are numbered tabs 1 through 5. The bottom section is divided into three columns: "HIGHLIGHTS" with links to "Upcoming Events, Products, and Services", "Reporting on the State of the Climate in 2015", and "2014 Products and Services Guide Available Online"; "NEWSROOM" with links to "New State Climate Summaries Bring Local Information to You", "Periods of Greater Atlantic Hurricane Activity Linked to Weaker U.S. Landfalls", "December 2016 Regional Climate Impacts and Outlooks", "Attending the 2016 American Geophysical Union Meeting", and "Study: Global Warming Hiatus Attributed to Redistribution"; and "NCEI PARTNERS" with logos for "Climate.gov", "weather.gov", "MIDIS drought.gov", and "globalchange.gov".

[2] Hacemos clic en “Data Access”.

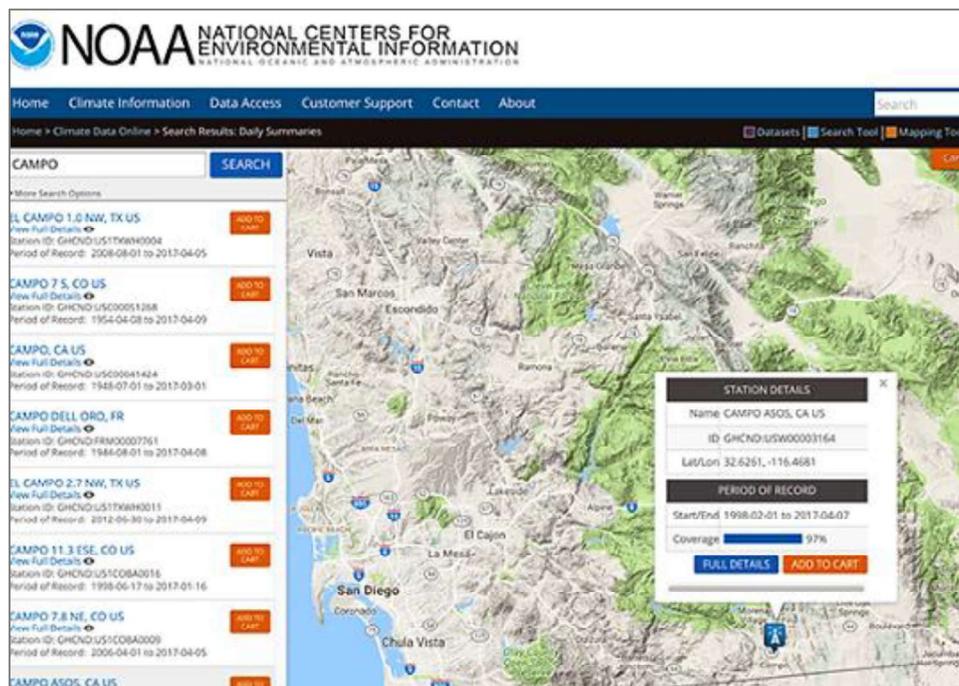
[3] Hacemos clic en “Land Based Station”.

[4] Hacemos clic en “Climate Data Online (CDO)”

[5] Hacemos clic en “Search Tool”, ingresamos el nombre de la estación que buscamos en “Enter a Search Term”.



[6] Visualizamos las estaciones identificadas por el sistema y que se localizan dentro del área de los Estados Unidos, luego seleccionamos la de nuestro interés. Hacemos clic en “Full Details”.



[7] Seleccionamos el año y el mes que buscamos, luego hacemos clic en “View Data”.

Daily Summaries Station Details

STATION DETAILS	
Name	CAMPO ASOS, CA US
Network ID	GHCND:USW00003164
Latitude/Longitude	32.6261°, -116.4681°
Elevation	805 m

PERIOD OF RECORD	
Start Date ¹	1998-02-01
End Date ¹	2017-04-07
Data Coverage ²	97%

[ADD TO CART](#)

Station Data Inventory, Access & History

Data & Inventory

[View Data](#)

Available Data Types

- Air Temperature
- Precipitation
- Sunshine
- Weather Type
- Wind

General History

1997 to Present

View Station Data

View current station data by selecting the desired options below and clicking the “View Data” button.

2017

January

[VIEW DATA](#)

View Station Data Help

View Station Data is a web based interface which allows easy access to NCDC's station databases. Data coverage is stored based on observations over a specific period of time whether annually, monthly, or daily. The date range changes based on the selected dataset.

Select the date range to choose a time period. Then click on the “VIEW DATA” button. If you find that you need more guidance, contact our customer support team.



[8] Descargamos el reporte meteorológico de la estación de interés.

U.S. Department of Commerce
 National Oceanic & Atmospheric Administration
 National Environmental Satellite, Data, and Information Service
 Elev: 2641 ft, Lat: 32.626° N Lon: 116.468° W
 Station: CAMPO ASOS, CA US GHCN:USW00003164

Record of Climatological Observations
 These data are quality controlled and may not be identical to the original observations.
 Generated on 04/13/2017

National Centers for Environmental Information
 151 Patton Avenue
 Asheville, North Carolina 28801
 Observation Time Temperature: Unknown Observation Time Precipitation: 2400

P r e c i p i t a t i o n	Y e a r	M o n e t h	D a y	Temperature (F)		24 hr P r e c i p i t a t i o n	Precipitation				Evaporation		Soil Temperature (F)						
				24 hrs. ending at observation time			24 Hour Amounts ending at observation time				At Obs Time	24 hour Wind Movement (ft)	Amount of Evap. (in)	4 in depth			8 in depth		
				Max.	Min.		Rain, melted snow, etc. (in)	F	Snow, ice pellets, hail, etc. (in)	F				Snow, ice pellets, hail, ice on ground (in)	Ground Cover (see *)	Max.	Min.	Ground Cover (see *)	Max.
	2017	1	1	49	39		0.04												
	2017	1	2	50	38		0.00												
	2017	1	3	53	37		0.00												
	2017	1	4	58	32		0.00												
	2017	1	5	54	44		0.02												
	2017	1	6	62	37		0.00												
	2017	1	7	69	34		0.00												
	2017	1	8	78	41		0.00												
	2017	1	9	56	43		0.06												
	2017	1	10	56	38		0.00												
	2017	1	11	51	47		0.03												
	2017	1	12	51	44		0.30												
	2017	1	13	53	40		0.44												
	2017	1	14	60	41		0.29												
	2017	1	15	53	35		0.00												
	2017	1	16	58	39		0.00												
	2017	1	17	58	30		0.00												
	2017	1	18	59	30		0.04												
	2017	1	19	54	41		0.75												
	2017	1	20	48	43		1.41												
	2017	1	21	49	38		0.11												
	2017	1	22	62	36		1.24												
	2017	1	23	48	37		1.29												
	2017	1	24	44	35		0.24												
	2017	1	25	53	28		0.00												
	2017	1	26	50	27		0.00												
	2017	1	27	47	39		0.00												
	2017	1	28	60	42		0.00												
	2017	1	29	62	49		0.00												
	2017	1	30	70	39		0.00												
	2017	1	31	69	31		0.00												
				Summary	58	38		6.66											

The ** flag in Precipitation indicates the data have not completed processing and quality control and may not be identical to the original observation.
 Empty, or blank, cells indicate that a data observation was not reported.
 *Ground Cover: 1=Green, 2=Ice/Snow, 3=Bare Ground, 4=Brown grass, 5=Red, 6=Brown mulch, 7=Green mulch, 8=Bare mulch, 9=Unknown
 *† This data value failed one of NOAA's quality control tests.
 *†† values in the Precipitation category above indicate a TRACER value was recorded.
 A values in the Precipitation Flag or the Snow Flag columns indicate a multi-day total, accumulated since last measurement, is being used.
 Data value inconsistency may be present due to rounding calculations during the conversion process from 32 bit float to standard integer units.

ANEXO 2. Información de Caudales del USGS

[1] Dirigirse al enlace web: <https://maps.waterdata.usgs.gov/mapper/index.html>



[2] Hacemos clic en el mapa para ampliar nuestra visualización e identificar la estación hidrométrica de interés.



[3] Seleccionamos la estación hidrométrica de nuestro interés y damos clic en "Access Data".

[4] Seleccionamos la opción de "Daily Data".

USGS 11016200 SWEETWATER R A DEHESA CA

Available data for this site SUMMARY OF ALL AVAILABLE DATA GO

Stream Site

DESCRIPTION:
 Latitude 32°46'27", Longitude 116°51'01" NAD83
 San Diego County, California, Hydrologic Unit 18070304
 Drainage area: 131 square miles
 Datum of gage: 520 feet above NGVD29.

AVAILABLE DATA:

Data Type	Begin Date	End Date	Count
Current / Historical Observations (availability statement)	2007-10-01	2017-04-13	
Daily Data			
Discharge, cubic feet per second	2005-10-01	2017-04-12	4212
Daily Statistics			
Discharge, cubic feet per second	2005-10-01	2016-11-07	4056
Monthly Statistics			
Discharge, cubic feet per second	2005-10	2016-11	
Annual Statistics			
Discharge, cubic feet per second	2006	2017	
Peak streamflow	2006-01-14	2016-01-07	11
Field measurements	2006-01-05	2017-03-09	90
Field/Lab water-quality samples	2008-02-01	2011-02-27	4
Water-Year Summary	2006	2016	11
Additional Data Sources	Begin Date	End Date	Count
Instantaneous-Data Archive **offsite**	2005-10-21	2007-09-30	68126

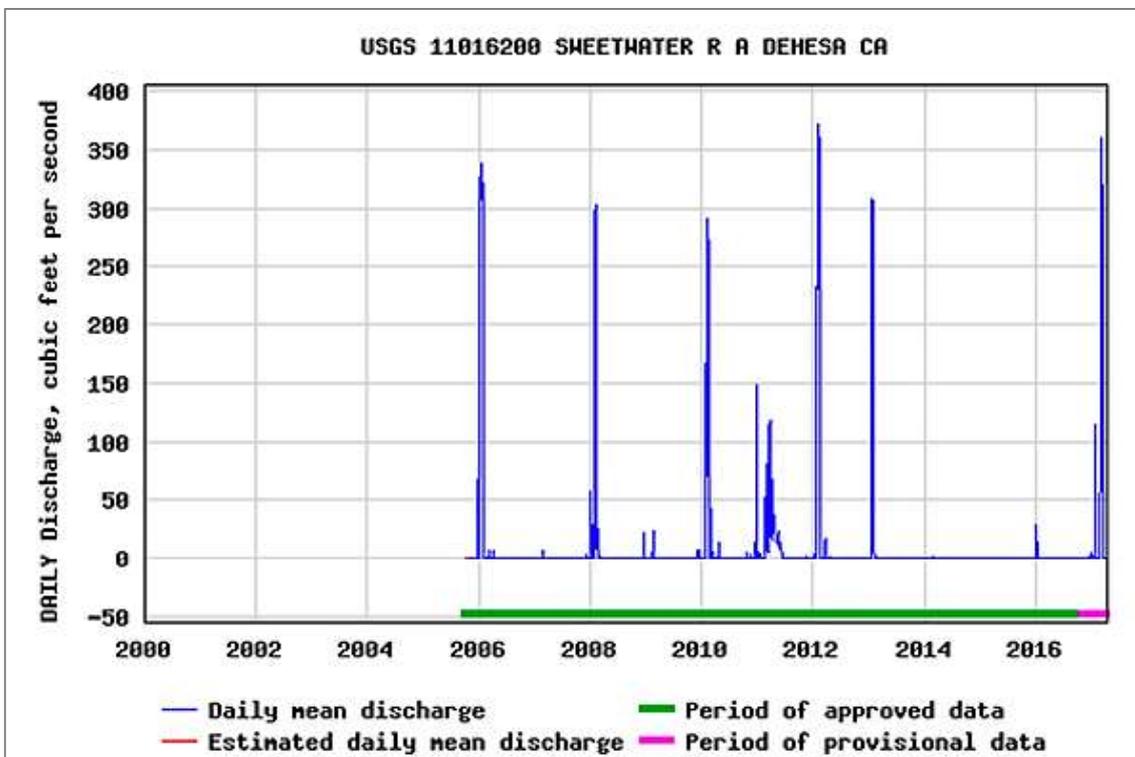
OPERATION:
 Record for this site is maintained by the USGS California Water Science Center
 Email questions about this site to [California Water Science Center Water-Data Inquiries](#)



[5] Ingresamos la fecha de inicio y fin del hidrograma que deseamos visualizar de manera gráfica.

Available Parameters <input type="checkbox"/> All 1 Available Parameters for this site <input checked="" type="checkbox"/> 00060 Discharge(Mean)	Period of Record 2005-10-01 2017-04-12	Output format <input checked="" type="radio"/> Graph <input type="radio"/> Graph w/ stats <input type="radio"/> Graph w/ meas <input type="radio"/> Graph w/ (up to 3) parms <input type="radio"/> Table <input type="radio"/> Tab-separated	Days (6311) 00 -- Or -- Begin date 2000-01-1 End date 2017-04-1
---	--	---	---

[Summary of all available data for this site](#)
[Instantaneous-data availability statement](#)





[6] Se puede visualizar en formato de tabla.

Date	Dis-charge, m ³ /s, (Mean)
02/04/2011	0.19 ^A
02/05/2011	0.23 ^A
02/06/2011	0.19 ^A
02/07/2011	0.16 ^A
02/08/2011	0.16 ^A
02/09/2011	0.15 ^A
02/10/2011	0.13 ^A
02/11/2011	0.09 ^A
02/12/2011	0.08 ^A
02/13/2011	0.09 ^A
02/14/2011	0.09 ^A
02/15/2011	0.10 ^A
02/16/2011	0.16 ^A
02/17/2011	0.28 ^A
02/18/2011	2.9 ^A
02/19/2011	5.3 ^A
02/20/2011	4.3 ^A
02/21/2011	1.2 ^A
02/22/2011	8.5 ^A
02/23/2011	10 ^A
02/24/2011	8.4 ^A
02/25/2011	8.2 ^A
02/26/2011	81 ^A
02/27/2011	43 ^A
02/28/2011	21 ^A