

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA  
LA MOLINA  
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**



**MODELOS HIDROLÓGICOS PARA LA GENERACIÓN  
DE CAUDALES DIARIOS EN LAS CUENCAS DE  
LOS RÍOS PISCO Y SAN JUAN - ICA**

Presentado por:

Angela del Rocio Chávez Torres

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE  
INGENIERO AGRÍCOLA

---

Lima - Perú  
2016

## **DEDICATORIA**

A la mujer luchadora, valiente y fuerte, que desde que tengo uso de razón vi esforzándose por sacar a su familia adelante sin importar levantarse a la dos de la madrugada para salir a trabajar, ni viajar a los lugares más recónditos del país exponiéndose a peligros inimaginables. A esa mujer que me amo desde el primer segundo que supo de mi existencia que a pesar de mis fallas y fracasos siempre está a mi lado para darme una palabra de amor. A ti la arquitecta perfecta de mi vida Eybe María Torres Fajardo el amor de mi vida, mi madre, te amo con todas las fuerzas de mi ser y mucho más.

A toda mi familia, que sé que en cualquier momento de mi vida sea bueno o malo estarán conmigo, en especial a mis abuelos maternos Ana María Fajardo Lizarbe y Víctor Torres Aguilar que son mis segundos padres, el amor que siento por ellos es inmensurable; a mi tía Katherine Torres Fajardo que es un ejemplo a seguir, sinceramente espero algún día lograr todo lo que con su esfuerzo y dedicación alcanzado, te amo infinitamente; a mi tía Liliana Torres Fajardo que a pesar de las dificultades que le toca vivir no se derrumba, todo lo contrario se fortalece.

A todas aquellas personas que me alentaron a seguir en este camino, que estuvieron en momentos buenos, pero estuvieron mucho más en mis momentos malos, son parte fundamental de mi vida y ocupan un lugar especial en mi corazón. Ustedes saben quiénes son, los quiero más que un te quiero.

Angela del Rocio Chávez Torres

## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar a Dios, porque sin su voluntad y el infinito amor que me tiene no podría ni respirar.

Eybe Torres, gracias por la paciencia y el gran amor que me tienes, tú labor de madre debió ser muy difícil porque sé que no es fácil lidiar con una persona tan bipolar y rebelde como yo. Gracias por perdonar mis fallas y darme la oportunidad de cumplir este sueño, sin ti nada de esto sería una realidad. Te amo desde lo más profundo de mí ser.

Ana Fajardo y Víctor Torres, mis abuelos que desde muy pequeña me engrieron aunque también me jalaban las orejas cuando lo tenían que hacer, y desde el día que empecé a recorrer este camino me dieron palabras de aliento y mostraron lo mucho que me aman. Gracias por ser como son, mi niñez con ustedes fue solo de amor y alegría.

Katherine Torres, más que mi tía todos estos años fuiste como mi otra mamá y no solo por darme cariño sino también para corregirme cuando actúo mal, estuviste conmigo desde que empecé la universidad dándome siempre consejos que en su tiempo quizá no entendí pero ahora los tengo muy presente, gracias por tanto.

Liliana Torres, Xiomara Lázaro e Izkra Aponte por más de quince años compartí con ustedes experiencias que marcaron mi vida y muchas de las cuales formaron mi personalidad. Ustedes siempre serán personas importantes y valiosas en mi vida.

Omar Ríos, la vida me guiño al ponerte en mi camino, compartimos momentos especiales que siempre los conservare, eres una persona increíble con sentimientos sinceros y con un corazón que vale oro. Me apoyaste durante todos los años de nuestra estadía universitaria y contribuiste mucho para terminar esta tesis, con tus palabras y tú cariño. Gracias por regalarme tantos momentos dichosos y por ser parte de mi vida, te quiero más que un te quiero.

Fredy Chávez, a pesar que no pudimos compartir muchos momentos juntos me enseñaste a madurar, ser fuerte y valiente. Tardamos muchos años en comprendernos, pero nunca es tarde, ahora eres parte de mi vida lo cual me alegra y agradezco. Siempre serás mi padre y me siento orgullosa de ello, te quiero.

Augusto Chávez, Natalia Yance, Mariella Chávez, Serafina Chávez, Aleja Chávez, Mercedes Chávez y Luz Chávez no solo me abrieron las puertas de su casa desde muy pequeña sino también pude sentir el aprecio que me tienen. Gracias, por todo el apoyo que recibo de parte de ustedes, sus palabras de aliento y las muestras de cariño.

Katherine Aguilar, aún recuerdo como nos conocimos, como tenía que ser en una fiesta, quizá ese día ni imagine que nos volveríamos las mejores amigas que a pesar de renegar la una con la otra pudimos superar muchos momentos de crisis. Tenemos un millón de historias que solo les contaremos a nuestros nietos, eres una de mis mejores amigas a la cual quiero y considero, gracias por estar conmigo en situaciones difíciles, compartir alegrías y darme tiempo cuando te necesito.

Gabriela Carita, haces de mis días los más divertidos sobre todo cuando tienes que aguantar todo lo que te digo. Tienes una forma de ser increíble, como que contigo nada es. Gracias por calmarme cuando tengo mis arranques de histeria y no permitir que mate a nadie, tú me entiendes. Siempre me sacas una sonrisa, la amistad que tenemos la aprecio y valoro, aún nos falta vivir momentos grandiosos como lo hemos venido haciendo.

Ana Dueñas, conocernos fue una gran bendición en mi vida, eres esa hermanita que no tengo y a la vez una de mis mejores amigas, con ese corazón maravilloso que tienes te ganaste todo mi cariño. La vida tenía un propósito para cada una, ambos queríamos la misma carrera, pero todo sucede por algo, y a pesar de que ahora cada una tenga un camino diferente, el lazo que tú y yo tenemos no se ha roto, todo lo contrario, se ha fortalecido. Gracias por todo el apoyo y cariño que me muestras siempre.

Rut Garcia, no puedo describir con palabras todo lo que significas para mí, la amistad que tenemos resiste hasta los temblores más fuertes y sí que lo pasamos. Tenemos tantas anécdotas y puedo decir que no me arrepiento de nada porque de unas nos reímos, aprendimos y de otras fortalecimos nuestra amistad. Recorrimos cinco años de aventuras universitarias apoyándonos la una a la otra en cada instante y ahora recorreremos otro camino, pero lo maravilloso es que lo hacemos más unidas que nunca, eres y serás una de mis mejores amigas hasta que estemos viejitas. El cariño que siento por ti es infinito y mucho más, gracias por tu apoyo incondicional y todas tus palabras para poder concluir esta etapa que me tocó vivir.



Carolay Melgarejo, mi primera amiga de la universidad, eres mi pepito grillo que siempre tienes la capacidad de hacerme cambiar de opinión cuando sabes que estoy equivocada, tu amistad significa mucho para mí. Cada vez que estamos juntas es solo para compartir momentos bellos, eres una personita con lindos sentimientos y un carácter que envidio. Gracias por sacarme siempre una sonrisa y compartir momentos lindos conmigo.

Augusto Chúa, no solo contribuiste con tus conocimientos hidrológicos en esta tesis, sino también siempre estás dispuesto a ayudarme cuando más te necesito. Eres una de las pocas personas en quien confío y a la que puedo llamar amigo, siempre estás dispuesto a escucharme a pesar de las tonterías que suelo hablar, nuestra amistad no se basa en el tiempo sino en todos los momentos que pasamos. Gracias por darme tu hombro y las palabras que hacen que pise tierra, tienes un lugar especial en mi corazón.

José Quintanilla, mi hermano y uno de mis mejores amigos, contigo aprendí no solo buenas cosas, sino también malas. Eres una de las pocas personas con las que puedo hablar de todo y sin prejuicios. Nuestros caminos se separaron, pero nuestra amistad siempre se conserva, como tú dices podemos dejarnos de ver por muchos años, pero cada vez que nos volvamos a encontrar será como si el tiempo no hubiera pasado. Gracias por darme siempre ánimo para concluir esta tesis.

César Ordoñez, conocernos estuvo predestinado, somos de la misma ciudad y nunca nos encontramos, fue bueno conocerte porque desde ese día pasamos momentos de todo un poco lo cual fue bueno para poder fortalecer nuestra amistad. Gracias, por preocuparte por mí, por todas tus palabras de aliento para concluir este proyecto y por todo el apoyo que me vienes dando desde que nos conocimos, eres y serás uno de mis mejores amigos. A pesar de pelearnos, dejarnos de hablar y comportarnos como niños tú sabes lo mucho que te aprecio y considero.

A la empresa Cesel Ingenieros, que me dio la oportunidad de acercarme y amar el campo hidrológico, en especial al Ing. Eduardo Torres, por los consejos y palabras de aliento. Siempre será un modelo a seguir y no solo por ser un gran profesional, sino también por su calidad humana, me siento afortunada de conocerlo y haber podido entablar una gran amistad.

A mi patrocinador Ing. Fano por todo el esfuerzo y tiempo dedicado a esta investigación. A mis jurados Ing. Chavarri, Ing. Santayana e Ing. Unsihuay por su disponibilidad, críticas y aportes.

# ÍNDICE GENERAL

	Página
<b>I. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1. GENERALIDADES.....	1
1.2. ANTECEDENTES.....	2
1.3. OBJETIVOS.....	3
1.3.1. OBJETIVO GENERAL.....	3
1.3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	3
<b>II. REVISIÓN DE LITERATURA.....</b>	<b>5</b>
2.1. CUENCA HIDROGRÁFICA.....	5
2.2. CICLO HIDROLOGICO.....	5
2.3. PRECIPITACIÓN.....	6
2.3.1. PRECIPITACIÓN CONVECTIVA.....	7
2.3.2. PRECIPITACIÓN OROGRÁFICA.....	8
2.3.3. PRECIPITACIÓN CICLÓNICA.....	8
2.4. TEMPERATURA.....	9
2.5. EVAPORACIÓN.....	9
2.6. EVAPOTRANSPIRACIÓN.....	10
2.6.1. EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA ( $E_t$ ).....	10
2.7. INFILTRACION.....	11
2.7.1. CAPACIDAD DE INFILTRACIÓN O TASA DE INFILTRACIÓN.....	11
2.8. ESCURRIMIENTO.....	12
2.8.1. ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL.....	12
2.8.2. ESCURRIMIENTO SUBTERRÁNEO.....	13
2.9. MODELO HIDROLÓGICO.....	13
2.9.1. MODELO FÍSICO.....	13
2.9.2. MODELO ANALÓGICO.....	13
2.9.3. MODELO MATEMÁTICO.....	14
2.10. PROCESO DE MODELACIÓN HIDROLÓGICA.....	15
2.10.1. CALIBRACION Y VERIFICACIÓN DEL MODELO.....	16
2.10.2. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.....	18

2.11.	SISTEMA DE MODELACIÓN HIDROLÓGICA RS-MINERVE.....	19
2.11.1.	MODELO GR4J.....	20
2.11.2.	MODELO SAC-SMA.....	24
<b>III.</b>	<b>MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>27</b>
3.1.	MATERIALES.....	27
3.1.1.	UBICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	27
3.1.2.	INFORMACIÓN CARTOGRÁFICA.....	31
3.1.3.	INFORMACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA.....	31
3.1.4.	EQUIPOS Y PROGRAMAS DE CÓMPUTO.....	34
3.2.	METODOLOGÍA.....	35
3.2.1.	ANÁLISIS DE CONSISTENCIA DE DATOS.....	35
3.2.2.	CARACTERÍSTICAS GEOMORFOLÓGICAS.....	39
3.2.3.	PROCESAMIENTO CON EL SISTEMA DE INFORMACION GEOGRÁFICA.....	44
3.2.4.	SISTEMA DE MODELACIÓN HIDROLÓGICA RS-MINERVE.....	46
<b>IV.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>73</b>
4.1.	DESCRIPCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS GEOMORFOLÓGICAS DE LAS CUENCAS DE LOS RIOS PISCO Y SAN JUAN.....	73
4.2.	DESCRIPCIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA PRECIPITACIÓN Y CAUDALES DIARIOS.....	75
4.2.1.	INFORMACIÓN PLUVIOMÉTRICA.....	75
4.2.2.	INFORMACIÓN HIDROMÉTRICA.....	75
4.3.	SIMULACION DEL COMPORTAMIENTO HIDROLOGICO DE LAS CUENCAS.....	76
4.3.1.	MODELO GR4J.....	76
4.3.2.	MODELO SAC-SMA.....	82
<b>V.</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>87</b>
<b>VI.</b>	<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>89</b>
<b>VII.</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>90</b>
<b>VIII.</b>	<b>ANEXO.....</b>	<b>95</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1: Ubicación política de las cuencas de los ríos Pisco y San Juan.....	28
Tabla 2: Ubicación geográfica en coordenadas UTM (WG84) .....	29
Tabla 3: Hojas de la carta nacional .....	31
Tabla 4: Estaciones meteorológicas pluviométricas y climatológica ordinaria.....	32
Tabla 5: Estaciones hidrológicas .....	33
Tabla 6: Valores de t de Student .....	39
Tabla 7: Índice de Gravelius para la evaluación de la forma .....	42
Tabla 8: Forma de la cuenca en función al factor de forma .....	42
Tabla 9: Clasificación de la pendiente según D.S. N° 017-2009-AG.....	44
Tabla 10: Lista de parámetros y condiciones iniciales para la estación meteorológica virtual.....	47
Tabla 11: Lista de parámetros y condiciones iniciales para el modelo GR4J.....	53
Tabla 12: Lista de parámetros y condiciones iniciales para el modelo SAC-SMA.....	60
Tabla 13: Indicadores de calibración.....	72
Tabla 14: Parámetros geomorfológicos de las cuencas de los ríos Pisco y San Juan.....	74
Tabla 15: Parámetros estadísticos modelo GR4J, sin calibración, de la cuenca del río Pisco.....	76
Tabla 16: Parámetros estadísticos modelo GR4J, calibrado, de la cuenca del río Pisco.....	78
Tabla 17: Parámetros calibrados del modelo GR4J para la cuenca del río Pisco .....	79
Tabla 18: Parámetros estadísticos modelo GR4J, sin calibración, de la cuenca del río Pisco.....	79
Tabla 19: Parámetros estadísticos modelo GR4J de la cuenca del río San Juan .....	81
Tabla 20: Parámetros calibrados del modelo GR4J para la cuenca del río San Juan .....	81

Tabla 21:	Parámetros estadísticos modelo SAC-SMA de la cuenca del río Pisco .....	83
Tabla 22:	Parámetros calibrados del modelo SAC-SMA para la cuenca del río Pisco .....	84
Tabla 23:	Parámetros estadísticos modelo SAC-SMA de la cuenca del río San Juan .....	85
Tabla 24:	Parámetros calibrados del modelo SAC-SMA para la cuenca del río Pisco .....	86
Tabla 25:	Temperatura de un año promedio – Estaciones cuenca Pisco .....	105
Tabla 26:	Temperatura de un año promedio – Estaciones cuenca San Juan.....	106
Tabla 27:	Evapotranspiración potencial de un año promedio – Estaciones cuenca Pisco..	108
Tabla 28:	Evapotranspiración potencial de un año promedio – Estaciones cuenca San Juan .....	108
Tabla 29:	Análisis estadístico método Cramer, estación Choclococha.....	118
Tabla 30:	Análisis estadístico método Cramer, estación Cusicancha .....	118
Tabla 31:	Análisis estadístico método Cramer, estación Fonagro .....	118
Tabla 32:	Análisis estadístico método Cramer, estación Hacienda Bernales .....	119
Tabla 33:	Análisis estadístico método Cramer, estación Hornada.....	119
Tabla 34:	Análisis estadístico método Cramer, estación Huachos.....	119
Tabla 35:	Análisis estadístico método Cramer, estación Huancano .....	120
Tabla 36:	Análisis estadístico método Cramer, estación Laguna Huichinga Aurahua.....	120
Tabla 37:	Análisis estadístico método Cramer, estación Castrovirreyna.....	120
Tabla 38:	Análisis estadístico método Cramer, estación San Juan de Yanac .....	121
Tabla 39:	Análisis estadístico método Cramer, estación San Pedro de Huacarpana.....	121
Tabla 40:	Análisis estadístico método Cramer, estación Sinto .....	121
Tabla 41:	Análisis estadístico método Cramer, estación Tantara.....	122
Tabla 42:	Análisis estadístico método Cramer, estación Totorá .....	122
Tabla 43:	Análisis estadístico método Cramer, estación Tunel Cero .....	122
Tabla 44:	Análisis estadístico método Cramer, estación Villa de Armas .....	123

Tabla 45:	Análisis estadístico método Fisher, estación Choclococha.....	123
Tabla 46:	Análisis estadístico método Fisher, estación Cusicancha .....	123
Tabla 47:	Análisis estadístico método Fisher, estación Fonagro .....	124
Tabla 48:	Análisis estadístico método Fisher, estación Hacienda Bernales .....	124
Tabla 49:	Análisis estadístico método Fisher, estación Hornada .....	124
Tabla 50:	Análisis estadístico método Fisher, estación Huachos.....	125
Tabla 51:	Análisis estadístico método Fisher, estación Huancano .....	125
Tabla 52:	Análisis estadístico método Fisher, estación Laguna Huichinga Aurahua.....	125
Tabla 53:	Análisis estadístico método Fisher, estación Castrovirreyna.....	126
Tabla 54:	Análisis estadístico método Fisher, estación San Juan de Yanac .....	126
Tabla 55:	Análisis estadístico método Fisher, estación San Pedro de Huacarpana.....	126
Tabla 56:	Análisis estadístico método Fisher, estación Sinto .....	127
Tabla 57:	Análisis estadístico método Fisher, estación Tantara.....	127
Tabla 58:	Análisis estadístico método Fisher, estación Totora .....	127
Tabla 59:	Análisis estadístico método Fisher, estación Tunel Cero.....	128
Tabla 60:	Análisis estadístico método Fisher, estación Villa de Armas .....	128
Tabla 61:	Análisis estadístico método Cramer, estación Letrayoc .....	130
Tabla 62:	Análisis estadístico método Cramer, estación Conta .....	130
Tabla 63:	Análisis estadístico método Fisher, estación Letrayoc.....	130
Tabla 64:	Análisis estadístico método Fisher, estación Conta .....	131
Tabla 65:	Matriz de pesos de la subcuenca 1 .....	140
Tabla 66:	Matriz de pesos de la subcuenca 2.....	140
Tabla 67:	Matriz de pesos de la subcuenca 3.....	141
Tabla 68:	Matriz de pesos de la subcuenca 4.....	141
Tabla 69:	Matriz de pesos de la subcuenca 5.....	141

Tabla 70:	Matriz de pesos de la subcuenca 1 .....	142
Tabla 71:	Matriz de pesos de la subcuenca 2 .....	142
Tabla 72:	Matriz de pesos de la subcuenca 3 .....	142
Tabla 73:	Matriz de pesos de la subcuenca 4 .....	142
Tabla 74:	Matriz de pesos de la subcuenca 5 .....	142
Tabla 75:	Matriz de pesos de la subcuenca 1 .....	143
Tabla 76:	Matriz de pesos de la subcuenca 2 .....	143
Tabla 77:	Matriz de pesos de la subcuenca 3 .....	143
Tabla 78:	Matriz de pesos de la subcuenca 4 .....	144
Tabla 79:	Matriz de pesos de la subcuenca 5 .....	144
Tabla 80:	Matriz de pesos de la subcuenca 1 .....	144
Tabla 81:	Matriz de pesos de la subcuenca 2 .....	145
Tabla 82:	Matriz de pesos de la subcuenca 3 .....	145
Tabla 83:	Matriz de pesos de la subcuenca 4 .....	145
Tabla 84:	Matriz de pesos de la subcuenca 5 .....	146

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1: Diagrama esquemático del ciclo hidrológico .....	6
Figura 2: Precipitación convectiva .....	7
Figura 3: Precipitación orográfica .....	8
Figura 4: Precipitación ciclónica .....	9
Figura 5: Esquema del proceso de infiltración .....	11
Figura 6: Proceso de modelación.....	16
Figura 7: Estructura de la ventana principal Rs-Minerve .....	21
Figura 8: Estructura del modelo diario de precipitación - escorrentía GR4J .....	23
Figura 9: Estructura del modelo Sacramento (SAC-SMA) .....	25
Figura 10: Imagen Satelital de la cuenca del rio Pisco, delimitada desde la estación de aforo Letrayoc .....	30
Figura 11: Imagen Satelital de la cuenca del rio San Juan, delimitada desde la estación de aforo Conta .....	30
Figura 12: Selección del cálculo ETo.....	50
Figura 13: Tabla de radiación solar extraterrestre.....	51
Figura 14: Modelo GR4J .....	52
Figura 15: Esquema conceptual del modelo SAC-SMA .....	59
Figura 16: Estructura de la base de datos del software Rs-Minerve.....	61
Figura 17: Capas de las subcuencas, ríos y confluencias de la cuenca del río Pisco .....	62
Figura 18: Capas de las subcuencas, ríos y confluencias de la cuenca del río San Juan .....	62
Figura 19: Topología del modelo GR4J para la cuenca del río Pisco .....	64
Figura 20: Topología del modelo SAC-SMA para la cuenca del río Pisco .....	65
Figura 21: Topología del modelo GR4J para la cuenca del río San Juan.....	66



Figura 22:	Topología del modelo SAC-SMA para la cuenca del río San Juan.....	67
Figura 23:	Caudales diarios observados y simulados de la cuenca del río Pisco, modelo GR4J sin calibración .....	77
Figura 24:	Caudales diarios observados y simulados de la cuenca del río Pisco, modelo GR4J calibrado.....	78
Figura 25:	Caudales diarios observados y simulados de la cuenca del río San Juan, modelo GR4J sin calibración .....	80
Figura 26:	Caudales diarios observados y simulados de la cuenca del río San Juan, modelo GR4J calibrado.....	82
Figura 27:	Caudales diarios observados y simulados de la cuenca del río Pisco, periodo 1980 – 2002 .....	83
Figura 28:	Caudales diarios observados y simulados de la cuenca del río San Juan, periodo 1980 - 2002 .....	85
Figura 29:	Histograma de precipitación total diaria (1980-2002), estación Choclococha.....	95
Figura 30:	Histograma de precipitación total diaria (1980-2002), estación Cusicancha .....	96
Figura 31:	Histograma de precipitación total diaria (1980-2002), estación Fonagro .....	96
Figura 32:	Histograma de precipitación total diaria (1980-2002), estación Hacienda Bernales .....	97
Figura 33:	Histograma de precipitación total diaria (1980-2002), estación Hornada.....	97
Figura 34:	Histograma de precipitación total diaria (1980 – 2002), estación Huachos .....	98
Figura 35:	Histograma de precipitación total diaria (1980-2002), estación Huancano .....	98
Figura 36:	Histograma de precipitación total diaria (1980-2002), estación Huichinga Aurahua .....	99
Figura 37:	Histograma de precipitación total diaria (1980-2002), estación San Juan de Castrovirreyna .....	99
Figura 38:	Histograma de precipitación total diaria (1980-2002), estación San Juan de Yanac .....	100

Figura 39:	Histograma de precipitación total diaria (1980-2002), estación San Pedro de Huacarpana .....	100
Figura 40:	Histograma de precipitación total diaria (1980 -2002), estación Sinto .....	101
Figura 41:	Histograma de precipitación total diaria (1980-2002), estación Tantara .....	101
Figura 42:	Histograma de precipitación total diaria (1980 -2002), estación Tоторa .....	102
Figura 43:	Histograma de precipitación total diaria (1980-2002), estación Tunel Cero .....	102
Figura 44:	Histograma de precipitación total diaria (1980-2002), estación Villa de Armas.....	103
Figura 45:	Histograma de caudal diario (1980-2002), estación Letrayoc .....	104
Figura 46:	Histograma de caudal diario (1980-2002), estación Conta.....	104
Figura 47:	Distribución de la temperatura media de un año promedio, estaciones de la cuenca del río Pisco.....	107
Figura 48:	Distribución de la temperatura de un año promedio, estaciones de la cuenca del río San Juan .....	107
Figura 49:	Distribución de la evapotranspiración potencial de un año promedio, estaciones de la cuenca del río Pisco .....	109
Figura 50:	Distribución de la evapotranspiración potencial de un año promedio, estaciones de la cuenca del río San Juan .....	109
Figura 51:	Identificación de saltos, estación Choclococha.....	110
Figura 52:	Identificación de saltos, estación Cusicancha .....	110
Figura 53:	Identificación de saltos, estación Fonagro.....	111
Figura 54:	Identificación de saltos, estación Hacienda Bernales.....	111
Figura 55:	Identificación de saltos, estación Hornada .....	112
Figura 56:	Identificación de saltos, estación Huachos .....	112
Figura 57:	Identificación de saltos, estación Huancano.....	113
Figura 58:	Identificación de saltos, estación Laguna Huichinga Aurahua.....	113

Figura 59:	Identificación de saltos, estación Castrovirreyna .....	114
Figura 60:	Identificación de saltos, estación San Juan de Yanac .....	114
Figura 61:	Identificación de saltos, estación San Pedro de Huacarpana .....	115
Figura 62:	Identificación de saltos, estación Sinto.....	115
Figura 63:	Identificación de saltos, estación Tantara.....	116
Figura 64:	Identificación de saltos, estación Tоторa .....	116
Figura 65:	Identificación de saltos, estación Tunel Cero.....	117
Figura 66:	Identificación de saltos, estación Villa de Armas .....	117
Figura 67:	Identificación de saltos, estación Letrayoc.....	129
Figura 68:	Identificación de saltos, estación Conta.....	129
Figura 69:	Transformación curvas de nivel a un modelo digital (DEM) .....	132
Figura 70:	Depresiones del DEM .....	133
Figura 71:	Dirección de flujo.....	134
Figura 72:	Acumulación de flujo.....	135
Figura 73:	Delimitación de subcuencas.....	136
Figura 74:	Subcuencas y corrientes en formato vectorial .....	137
Figura 75:	Delimitación de las cuencas de los ríos Pisco y San Juan.....	138
Figura 76:	Subcuencas de las cuencas de los ríos Pisco y San Juan.....	139
Figura 77:	Histograma de precipitación total diaria (1980-2002), estación virtual de la subcuencal .....	147
Figura 78:	Histograma de precipitación total diaria (1980-2002), estación virtual de la subcuencas2 .....	148
Figura 79:	Histograma de la precipitación total diaria (1980-2002), estación virtual de la subcuencas3 .....	148

Figura 80:	Histograma de la precipitación total diaria (1980-2002), estación virtual de la subcuena4 .....	149
Figura 81:	Histograma de la precipitación total diaria (1980-2002), estación virtual de la subcuena5 .....	149
Figura 82:	Histograma de la precipitación total diaria (1980-2002), estación virtual de la subcuena1 .....	150
Figura 83:	Histograma de la precipitación total diaria (1980-2002), estación virtual de la subcuena2 .....	150
Figura 84:	Histograma de la precipitación total diaria (1980-2002), estación virtual de la subcuena3 .....	151
Figura 85:	Histograma de la precipitación total diaria (1980-2002), estación virtual de la subcuena4 .....	151
Figura 86:	Histograma de la precipitación total diaria (1980-2002), estación virtual de la subcuena5 .....	152
Figura 87:	Histograma del caudal diario, simulado de la subcuena1, para el periodo 1980-2002.....	153
Figura 88:	Histograma del caudal diario, simulado de la subcuena2, para el periodo 1980-2002.....	154
Figura 89:	Histograma del caudal diario, simulado de la subcuena3, para el periodo 1980-2002.....	154
Figura 90:	Histograma del caudal diario, simulado de la subcuena4, para el periodo 1980-2002.....	155
Figura 91:	Histograma del caudal diario, simulado de la subcuena5, para el periodo 1980-2002.....	155
Figura 92:	Histograma del caudal diario, simulado de la cuenca del río Pisco, para el periodo 1980-2002 .....	156
Figura 93:	Histograma de los caudales diarios observados y simulados de la cuenca del río Pisco, para el periodo 1980-2002.....	156

Figura 94:	Histograma de los caudales diarios observados y simulados de la cuenca del río Pisco, periodo 1980-2002.....	157
Figura 95:	Histograma de los caudales diarios observados y simulados de la cuenca del río Pisco, periodo de calibración (1980-1991).....	157
Figura 96:	Histograma de los caudales diarios observados y simulados de la cuenca del río Pisco, periodo de validación (1992-2002).....	158
Figura 97:	Histograma del caudal diario, simulado de la subcuenca1, para el periodo 1980-2002.....	158
Figura 98:	Histograma del caudal diario, simulado de la subcuenca2, para el periodo 1980-2002.....	159
Figura 99:	Histograma del caudal diario, simulado de la subcuenca3, para el periodo 1980-2002.....	159
Figura 100:	Histograma del caudal diario, simulado de la subcuenca4, para el periodo 1980-2002.....	160
Figura 101:	Histograma del caudal diario, simulado de la subcuenca5, para el periodo 1980-2002.....	160
Figura 102:	Histograma del caudal diario, simulado de la cuenca del río Pisco, para el periodo 1980-2002.....	161
Figura 103:	Histograma de los caudales diarios observados y simulados de la cuenca del río Pisco, periodo 1980-2002.....	161
Figura 104:	Histograma de los caudales diarios observados y simulados de la cuenca del río Pisco, periodo de calibración (1980-1991).....	162
Figura 105:	Histograma de los caudales diarios observados y simulados de la cuenca del río Pisco, periodo de validación (1992-2002).....	162
Figura 106:	Histograma del caudal diario, simulado de la subcuenca1, para el periodo 1980-2002.....	163
Figura 107:	Histograma del caudal diario, simulado de la subcuenca2, para el periodo 1980-2002.....	163

Figura 108: Histograma del caudal diario, simulado de la subcuenca3, para el periodo 1980-2002.....	164
Figura 109: Histograma del caudal diario, simulado de la subcuenca4, para el periodo 1980-2002.....	164
Figura 110: Histograma del caudal diario, simulado de la subcuenca5, para el periodo 1980-2002.....	165
Figura 111: Histograma del caudal diario, simulado de la cuenca del río San Juan, para el periodo 1980-2002 .....	165
Figura 112: Histograma de los caudales diarios observados y simulados de la cuenca del río San Juan, periodo 1980-2002 .....	166
Figura 113: Histograma de los caudales diarios observados y simulados de la cuenca del río San Juan, periodo 1980-2002 .....	166
Figura 114: Histograma de los caudales diarios observados y simulados de la cuenca del río San Juan, periodo de calibración (1980-1991) .....	167
Figura 115: Histograma de los caudales diarios observados y simulados de la cuenca del río San Juan, periodo de validación (1992-2002).....	167
Figura 116: Histograma del caudal diario, simulado de la subcuenca1, para el periodo 1980-2002.....	168
Figura 117: Histograma del caudal diario, simulado de la subcuenca2, para el periodo 1980-2002.....	168
Figura 118: Histograma del caudal diario, simulado de la subcuenca3, para el periodo 1980-2002.....	169
Figura 119: Histograma del caudal diario, simulado de la subcuenca4, para el periodo 1980-2002.....	169
Figura 120: Histograma del caudal diario, simulado de la subcuenca5, para el periodo 1980-2002.....	170
Figura 121: Histograma del caudal diario, simulado de la cuenca del río San Juan, para el periodo 1980-2002 .....	170

Figura 122: Histograma de los caudales diarios observados y simulados de la cuenca del río San Juan, periodo 1980-2002 .....	171
Figura 123: Histograma de los caudales diarios observados y simulados de la cuenca del río San Juan, periodo de calibración (1980-1991) .....	171
Figura 124: Histograma de los caudales diarios observados y simulados de la cuenca del río San Juan, periodo de validación (1992-2002).....	172

## ÍNDICE DE ANEXOS

	Página
ANEXO 1: COMPORTAMIENTO DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS E HIDROMETRICAS.....	95
ANEXO 1.1: PLUVIOMETRÍA.....	95
ANEXO 1.2: HIDROMETRÍA.....	104
ANEXO 1.3 TEMPERATURA.....	105
ANEXO 1.4 EVAPOTRANSPIRACIÓN.....	108
ANEXO 2: ANALISIS DE CONSISTENCIA DE DATOS PLUVIOMÉTRICOS E HIDROMÉTRICOS.....	110
ANEXO 2.1: PLUVIOMETRÍA.....	110
A) ANÁLIS DE SALTOS.....	110
B) ANÁLISIS ESTADÍSTICO – MEDIA (MÉTODO T DE STUDENT).....	118
C) ANÁLISIS ESTADÍSTICO – VARIANZA (MÉTODO FISHER).....	123
ANEXO 2.2: HIDROMETRÍA.....	129
A) ANÁLISIS DE SALTOS.....	129
B) ANÁLISIS ESTADÍSTICO – MEDIA (MÉTODO T DE STUDENT).....	130
C) ANÁLISIS ESTADÍSTICO – VARIANZA (MÉTODO FISHER).....	130
ANEXO 3: PROCESAMIENTO CON EL SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG).....	132
ANEXO 4: MATRICES DE PESOS PONDERADOS DE LAS ESTACIONES VIRTUALES SEGÚN EL MÉTODO DE SHEPARD.....	140
ANEXO 4.1 SUBCUENCAS DE LA CUENCA DEL RIO PISCO.....	140
A) ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS.....	140
B) ESTACIONES METEOROLÓGICAS.....	142



ANEXO 4.2: SUBCUENCAS DE LA CUENCA DEL RIO SAN JUAN .....	143
A) ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS.....	143
B) ESTACIONES METEOROLÓGICAS .....	144
ANEXO 5: COMPORTAMINETO DE LAS ESTACIONES VIRTUALES PLUVIOMÉTRICAS DE LAS SUBCUENCAS DE LOS RIOS PISCO Y SAN JUAN.....	147
ANEXO 5.1 SUBCUENCAS DE LA CUENCA DEL RIO PISCO.....	147
ANEXO 5.2 SUBCUENCAS DE LA CUENCA DEL RIO SAN JUAN.....	150
ANEXO 6: SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO HIDROLÓGICO DE LAS CUENCAS .....	153
ANEXO 6.1 SIMULACIÓN DE LA CUENCA PISCO.....	153
A) MODELO GR4J SIN CALIBRACIÓN .....	153
B) MODELO GR4J CALIBRADO.....	157
C) MODELO SAC-SMA CALIBRADO .....	158
ANEXO 6.2 SIMULACIÓN DE LA CUENCA SAN JUAN .....	163
A) MODELO GR4J SIN CALIBRACIÓN.....	163
B) MODELO GR4J CALIBRADO.....	166
C) MODELO SAC-SMA CALIBRADO .....	168

## RESUMEN

Las relaciones hidrológicas que ocurren en una cuenca se pueden estudiar a través de modelos que simplifiquen y representen los distintos fenómenos que suceden al interior de ésta, siendo los modelos hidrológicos una herramienta importante, que vienen perfeccionándose vertiginosamente desde el siglo XX pudiendo manipular una serie grande de datos con mayor facilidad en los cálculos y más representativos a la realidad. El propósito del presente trabajo de investigación es desarrollar, mostrar la metodología y procedimiento en la elaboración de modelos precipitación – escorrentía, que permiten simular caudales en diferentes puntos de interés utilizando los modelos hidrológicos GR4J y SAC-SMA del software Rs-Minerve, aplicados a las cuencas, delimitadas desde los puntos de aforo Letrayoc y Conta, de los ríos Pisco y San Juan, respectivamente; la ventaja de los modelos mencionados es que trabajan a nivel diario, tomando como datos de entrada la precipitación y evapotranspiración ( $ET_0$ ). Las estaciones hidrométricas Letrayoc y Conta de los ríos Pisco y San Juan, respectivamente, contaban con información de caudales diarios, los cuales se utilizaron para calibrar y validar los modelos hidrológicos GR4J y SAC-SMA; así mismo, se recopiló información meteorológica dentro y alrededor de las cuencas de estudio, buscando estaciones que cuenten con información a nivel diario para la aplicación de los modelos, encontrándose dieciséis estaciones con información de precipitación y ocho estaciones con información de temperatura, ambas a nivel diario dentro de las cuencas: Pampas, Pisco y San Juan; para la simulación se utilizó un periodo de 23 años (1980-2002). El trabajo de investigación se basa principalmente en cuatro aspectos: a) análisis de información recopilada (pluviométrica e hidrométrica), donde primero se evaluó la calidad de datos mediante análisis estadísticos; b) delimitación de las cuencas de estudio y subcuenca, determinando los parámetros geomorfológicos y corrientes; c) simulación de los modelos GR4J y SAC-SMA, calibración y validación de los cuatro parámetros del modelo GR4J y los dieciséis parámetros del modelo SAC-SMA; d) identificación del modelo con mejores resultados de calibración y validación. Para esta investigación se demuestra que en la zona sur de la costa peruana el modelo GR4J no es funcional; sin embargo, los resultados obtenidos en la etapa de calibración y validación para el modelo SAC-SMA son satisfactorios.

Palabras claves: precipitación, temperatura, caudal, Rs-Minerve, GR4J y SAC-SMA.

## **ABSTRACT**

Hydrological relationships that occur in a watershed can be studied through models that simplify and represent the different phenomena that occur within it, being an important tool hydrological models, which are refined rapidly since the twentieth century can handle a large number data more easily and more representative calculations to reality. The purpose of this research is to develop and show the methodology and procedure, modeling rainfall - runoff to simulate flow in different points of interest using hydrological models SAC-SMA GR4J and Rs-Minerve software, applied to basins, bounded from Letrayoc gauging points and Conta, of Pisco and San Juan, respectively rivers; the advantage of the model is that they work on a daily basis, using as input precipitation and evapotranspiration (ET<sub>o</sub>). Letrayoc hydrometric stations and Conta of Pisco and San Juan, respectively, rivers had information of daily flows, which are used to calibrate and validate hydrological models GR4J and SAC-SMA; likewise, weather information was gathered in and around the watershed study, looking for stations that have information on a daily basis for the application of the models, sixteen stations with precipitation information and eight stations with temperature information is found, both to daily level within the basins: Pampas, Pisco and San Juan; simulation for a period of 23 years (1980 to 2002) was used. This research is based mainly on four aspects: a) analysis of information gathered (rainfall and hydrometric), where data quality was evaluated by statistical analysis; b) study delimitation of basins and sub basins, determining geomorphological and current parameters; c) simulation GR4J and SAC-SMA model, calibration and validation of the four parameters of the model parameters GR4J and sixteen SAC-SMA model; d) identification of the best performing model in calibration and validation. For this research it shows that in the southern part of the Peruvian coast the GR4J model is not functional; however, the results obtained in the calibration step and validation for SAC-SMA model are satisfactory.

**Keywords:** precipitation, temperature, flow, RS-Minerve, GR4J and SAC-SMA

# **I. INTRODUCCIÓN**

## **1.1. GENERALIDADES**

Actualmente, el aprovechamiento de los recursos hídricos del país, se halla restringido debido a un factor importante, que es la falta de registros largos y completos de información de las variables precipitación y descarga. Uno de los factores importante es la falta de interés, en implementar estaciones hidrometeorológicas por parte de los organismos competentes, lo cual impide que no se pueda conocer a cabalidad el potencial hidrológico de las cuencas hidrográficas, limitando la posibilidad de elaborar proyectos de aprovechamiento hídrico.

Las metodologías que se aplican para ejecutar estudios hidrológicos, con el pasar de los años fueron modernizándose, en la medida de su estudio e investigación, para realizar cálculos en menos tiempo, reemplazando así los procedimientos complicados del pasado. Antes de la disponibilidad de modelos se realizaba estimaciones de caudales cuyos valores no eran tan representativos, a lo que realmente sucedía en un determinado estudio; mediante la formulación y desarrollo de un modelo de simulación precipitación-escorrentía y su aplicación a una cuenca, se podrá evaluar indirectamente su comportamiento ante ciertas funciones de entrada.

La importancia de los modelos radica, entre otros aspectos, en la simulación y predicción de los fenómenos físicos a corto, mediano y largo plazo. En este contexto los modelos de simulación hidrológica constituyen la alternativa de contar con información suficiente y confiable, para la elaboración de proyectos hidráulicos, como por ejemplo proyectos hidroeléctricos, el cual necesita determinar la cantidad de energía que puede generar una central hidroeléctrica, para esto es indispensable generar series confiables de caudales mensuales que sirvan de evaluación y análisis, teniendo como base los caudales diarios se podrá generar los caudales mensuales para este tipo de proyectos, siendo más confiables y con datos que se asemejen a la realidad.

El presente trabajo de tesis consistió en aplicar y validar dos modelos de simulación hidrológica en las cuencas, delimitadas desde los puntos de aforo Letrayoc y Conta, de los

ríos Pisco y San Juan, respectivamente. Los modelos precipitación – escorrentía se denominan GR4J y SAC-SMA, los cuales se encuentran dentro del software Rs-Minerve que comenzó a desarrollarse en el 2002; los modelos simulan los principales procesos hidrológicos en una cuenca.

## **1.2. ANTECEDENTES**

Los modelos de simulación de cuencas o modelos de precipitación - escorrentía se empezaron a generar entre 1950 a 1960; con el uso de las computadoras se reemplazaban los cálculos manuales que realizaban los hidrólogos. Los pioneros en el campo de la modelación hidrológica fueron los profesores Ray Linsley y Norman Crawford de la universidad de Stanford, quienes desarrollaron el Modelo de Cuenca Stanford (Stanford Watershed Model) en 1966, este modelo no fue usado en plenitud debido a que las computadoras no eran de fácil acceso e ineficientes. En base a este modelo se han desarrollado otros modelos de simulación hidrológica que con el pasar de los años y el desarrollo de la tecnología resuelven problemas hidrológicos rápidamente. Para que los resultados de los modelos hidrológicos sean confiables los datos que se ingrese debe ser de buena calidad es decir datos de fuentes confiables que tengan buenos registros de información.

En la Facultad de Ingeniería Agrícola de la UNALM, se ha desarrollado diversas investigaciones sobre simulación hidrológica, algunas de las cuales se menciona a continuación:

- “Modelo matemático de simulación de descargas en la cuenca del río Rímac usando datos de precipitación”, desarrollado por el ingeniero Carlos Jorge Alfaro Chaca, en 1980.
- “Modelación de la relación Precipitación - Escorrentía en la cuenca del rio Mala, mediante el modelo PRECAUD v.1.0”, desarrollado por el ingeniero Pedro Saúl Jayo Jiménez, el 2011.

La facilidad que hoy en día muestra modelar flujos de agua en una cuenca, produjo adelantos en el campo hidrológico y el aprovechamiento de recursos hídricos el cual permite realizar estudios que benefician la calidad de vida a gran escala. El adecuado y oportuno aprovechamiento de la disponibilidad, posibilitan el mejor uso del agua. Para ello, el empleo

de modelos hidrológicos como respuesta de la cuenca a las precipitaciones que ocurren, en ella, apoyarán decididamente al mejor uso del agua en las cuencas.

En las cuencas de los ríos Pisco y San Juan no existen antecedentes sobre la aplicación de los modelos GR4J y SAC-SMA; sin embargo, existen estudios e investigaciones realizados en la cuenca, “Evaluación y ordenamiento de los recursos hídricos de la cuenca Pisco” y “Evaluación y ordenamiento de los recursos hídricos de la cuenca San Juan”, ambos estudios los realizó INRENA en el 2003.

Para la aplicación de estos modelos en las cuencas de los ríos Pisco y San Juan, se usó información proporcionada por diferentes entidades relacionadas con el uso del agua, como el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) y Autoridad Nacional del Agua (ANA).

### **1.3. OBJETIVOS**

#### **1.3.1. OBJETIVO GENERAL**

- Realizar la simulación del proceso precipitación-descarga con los modelos hidrológicos GR4J y SAC-SMA establecidos dentro del sistema informático RS-MINERVE, aplicados en las cuencas de los ríos Pisco y San Juan – Ica.

#### **1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Determinar las características geomorfológicas de las cuencas de los ríos Pisco y San Juan.
- Realizar el análisis de la precipitación total diaria de las cuencas de los ríos Pisco, San Juan y Pampas.
- Analizar el caudal diario en las cuencas de los ríos Pisco y San Juan; en las estaciones de Letrayoc y Conta, respectivamente.
- Calibrar y validar los parámetros de los modelos GR4J y SAC-SMA aplicados en las cuencas de los ríos Pisco y San Juan.
- Analizar la sensibilidad de los parámetros de los modelos GR4J y SAC-SMA.

## **II. REVISIÓN DE LITERATURA**

### **2.1. CUENCA HIDROGRÁFICA**

La cuenca hidrográfica es una unidad territorial formada por un río con sus afluentes y por un área colectora de aguas. En las cuencas están construidas los recursos naturales básicos para múltiples actividades humanas, como agua, suelo, vegetación y fauna. Todos ellos mantienen una continua y particular interacción con los aprovechamientos y desarrollos productivos del hombre (FAO, 2007).

Una hoya hidrográfica o conocida también como cuenca hidrográfica, es un área definida topográficamente, drenada por un curso de agua o un sistema conectado de cursos de agua, tal que todo el caudal efluente es descargado a través de una salida simple. La cuenca hidrográfica es la unidad básica de estudio del ciclo hidrológico.

Para el estudio de la cuenca hidrográfica, es importante determinar las características físicas de la cuenca, sistemas de drenaje, entre otros aspectos. Estas características dependen de la morfología, los tipos de suelos, la cobertura vegetal, la geología, las prácticas agrícolas, etc. Estos elementos, proporcionan la más conveniente posibilidad de conocer la variación en el espacio del régimen hidrológico (Monsalve, 1999).

### **2.2. CICLO HIDROLÓGICO**

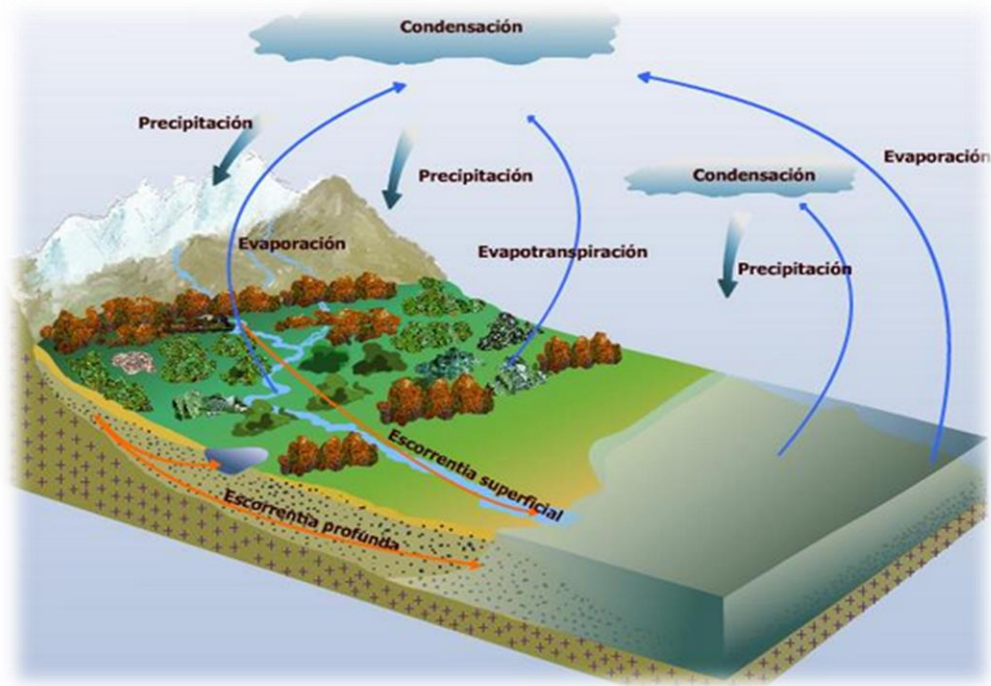
El ciclo hidrológico se considera el concepto fundamental de la hidrología, el cual describe el movimiento continuo y cíclico del agua en el planeta Tierra. Como todo ciclo, el hidrológico no tiene ni principio ni fin, y su descripción puede comenzar en cualquier punto (Aparicio, 2010).

En el ciclo hidrológico, el agua que se encuentra sobre la superficie terrestre o muy cerca de ella se evapora bajo el efecto de la radiación solar y el viento; la evaporación del agua en los océanos, es transportado por las masas de aire en movimiento hacia los continentes. Bajo condiciones meteorológicas adecuadas el vapor de agua se condensa para formar nubes, las cuales a su vez dan origen a las precipitaciones, variable importante dentro de la cuenca.

Durante la trayectoria hacia la superficie de la tierra, el agua precipitada, puede volver a evaporarse o ser retenida por las plantas o las construcciones, luego fluye por la superficie hasta las corrientes o se infiltra. El agua interceptada y una parte infiltrada, de la que corre por la superficie, se evapora nuevamente.

Por otra parte la precipitación que llega a las corrientes, una parte se infiltra y otras llegan hasta los océanos u otros grandes cuerpos de agua, como presas y lagos. Del agua infiltrada, una parte es absorbida por las plantas y posteriormente es transpirada, casi en su totalidad, hacia la atmósfera y otra parte fluye bajo la superficie de la tierra para llegar a cuerpos de agua o zonas profundas del suelo para ser almacenadas como agua subterránea y después aflorar en manantiales, ríos o el mar (Chow, 1994).

Todo el proceso del ciclo hidrológico se puede sintetizar en la Figura 1.



**Figura 1: Diagrama esquemático del ciclo hidrológico**

FUENTE: <http://www.imagui.com/a/agua-ciclo-idKbGxkad>

### 2.3. PRECIPITACIÓN

Es toda forma de humedad que originándose en las nubes, llega hasta la superficie del suelo; de acuerdo a esta definición la precipitación puede ser en forma de lluvia, garúa, granizo o nieve.



La precipitación toma lugar cuando una masa de agua cálida se eleva hacia la atmósfera y posteriormente se enfría debido a los cambios de presión y temperatura que ocurren, haciendo que parte de esta masa de agua caiga hacia la tierra, produciendo el fenómeno que llamamos precipitación.

Desde el punto de vista hidrológico, es la fuente primaria del agua de la superficie terrestre, y sus mediciones forman el punto de partida de los estudios concernientes al uso y control del agua.

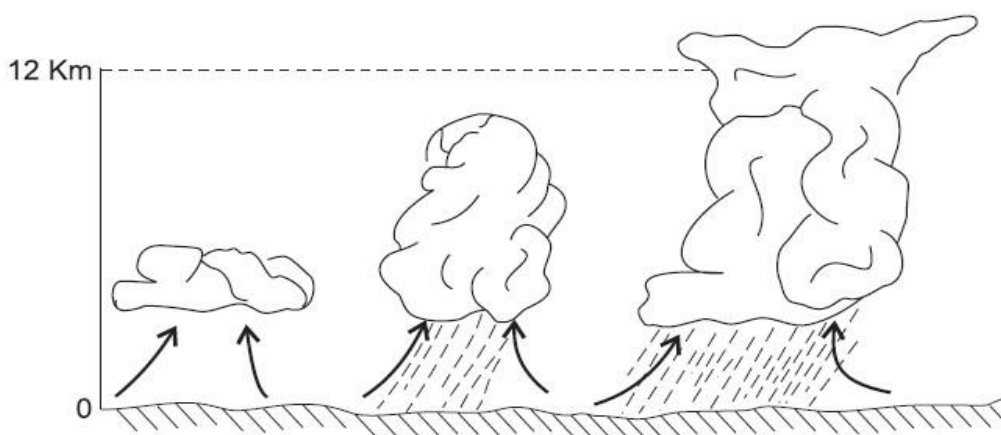
De acuerdo a la forma en que el agua asciende, se han determinado tres tipos distintos de precipitación: precipitación convectiva, precipitación orográfica y precipitación ciclónica (Guevara, 1982).

### 2.3.1. PRECIPITACIÓN CONVECTIVA

Sucede cuando una masa de aire próxima a la superficie del terreno aumenta su temperatura, la densidad disminuye y la masa de aire trata de ascender y de ser reemplazada por otra masa de aire más densa. El aire húmedo caliente se hace muy inestable, provocando corrientes verticales muy fuertes. Mientras asciende la masa de aire se va enfriando y cuando alcanza condiciones necesarias de vapor de agua precipita (Guevara, 1982).

Ocurre, normalmente, en zonas planas y boscosas de los trópicos, en los llanos amazónicos, en los mares y en el Perú, en la parte norte de la faja Costera. Este tipo de precipitación cae sobre un área determinada, es de gran intensidad y corta duración (Chávez, 1994).

En la Figura 2 se muestra el desarrollo de la precipitación tipo convectivo.



**Figura 2: Precipitación convectiva**

FUENTE: Guevara, 1982

### 2.3.2. PRECIPITACIÓN OROGRÁFICA

Los accidentes orográficos, montañas y cordilleras, actúan a manera de pantallas fijas y obstáculos que obligan a los vientos, masas de aire húmedo y caliente, a ascender y, en consecuencia, se producirá en las alturas un proceso adiabático que culminará en condensación y precipitación.

La circunstancia de que estas pantallas permanezcan en el mismo lugar obliga a que la precipitación se produzca, constantemente en la misma área. La intensidad y duración de la precipitación, es moderada y persistente respectivamente. Es el tipo dominante en la Sierra peruana y la única fuente inicial de agua para la Sierra y Costa peruana (Guevara, 1982).

En la Figura 3 se muestra como ocurre la precipitación orográfica.



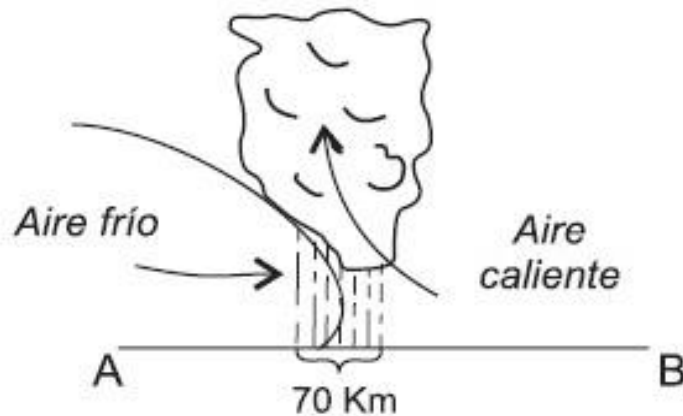
**Figura 3: Precipitación orográfica**

FUENTE: Guevara, 1982

### 2.3.3. PRECIPITACIÓN CICLÓNICA

Un ciclón es una enorme masa de aire que gira, a velocidades muy grandes, alrededor de un vórtice. Se forma por fuertes diferencias de temperatura entre estratos atmosféricos, diferencias que originan violentos cambios de posición de las masas de aire. En el vórtice la presión atmosférica es muy baja y por el ascienden, a modo de chimenea, las masas de aire caliente y húmedo que sufren un rápido proceso adiabático al expandirse en las alturas generándose condensación del vapor de agua y precipitación. La intensidad y duración de la precipitación es considerable. Este fenómeno se produce, generalmente, en zonas tropicales centro américa y del Caribe o en el Sur de China. En el Perú son desconocidos (Chávez, 1994).

En la Figura 4 se muestra el encuentro como ocurre la precipitación ciclónica.



**Figura 4: Precipitación ciclónica**  
 FUENTE: Guevara, 1982

#### 2.4. TEMPERATURA

La temperatura es un factor importante del ciclo hidrológico, pues interviene en todas sus etapas.

El efecto de los diversos procesos de intercambio de calor en el sistema tierra – atmósfera conduce a una distribución de temperatura según la dirección vertical, es decir, una disminución de la temperatura con la altitud de  $6.5\text{ }^{\circ}\text{C/km}$  en la tropósfera y condiciones, aproximadamente, isotérmicas en la estratósfera. La tasa de variación de la temperatura con la altitud es denominada gradiente vertical de temperatura.

El estudio del gradiente vertical de temperatura es de gran interés ya que a través de él se puede medir la estabilidad o inestabilidad de la atmósfera. La estabilidad atmosférica es determinada a través de gradientes de temperatura teórico íntimamente ligados a los procesos de evolución del aire, tales como: gradiente vertical de temperatura, distribución geográfica de la temperatura y variación de la temperatura con el tiempo (Aliaga, 1983).

#### 2.5. EVAPORACIÓN

La evaporación es una etapa permanente en el ciclo hidrológico. Hay evaporación en todo momento y en toda superficie húmeda. Considerada un fenómeno puramente físico, la evaporación es el paso del agua del estado líquido al estado gaseoso (Bustinza, 2008).

Dentro de los factores meteorológicos que afectan a la evaporación se encuentran la radiación solar, temperatura del aire, presión de vapor, viento y la presión atmosférica. Debido a que la

radiación solar es el factor más importante, la evaporación varía con la latitud, época del año, hora del día y condición de nubosidad (Villón, 2002).

## **2.6. EVAPOTRANSPIRACIÓN**

La evapotranspiración está constituida por las pérdidas totales, es decir la combinación de evaporación desde la superficie y la transpiración de la vegetación (Bustinza, 2008).

La evapotranspiración es un proceso que resulta del efecto combinado de la evaporación del agua de un suelo húmedo y la transpiración del correspondiente cultivo en activo crecimiento. La transpiración es la pérdida de agua por la planta, fundamentalmente a través del sistema foliar. El agua es captada del suelo a través del sistema radicular y circula por la estructura de la planta hasta salir al exterior. No se debe confundir con el agua que cae al follaje por intercepción y vuelve a la atmósfera por evaporación.

El conocimiento de la evapotranspiración es un factor determinante en el diseño de sistemas de riego, incluyendo las obras de almacenamiento, conducción, distribución y drenaje. Especialmente, el volumen útil de una presa para abastecer a una zona de riego depende en gran medida de la evapotranspiración (FAO, 2006).

### **2.6.1. EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA ( $ET_0$ )**

La evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ), es la cantidad de agua evaporada y transpirada por un cultivo de tamaño corto, que cubre toda la superficie, en estado activo de crecimiento y con un suministro adecuado y continuo de agua.

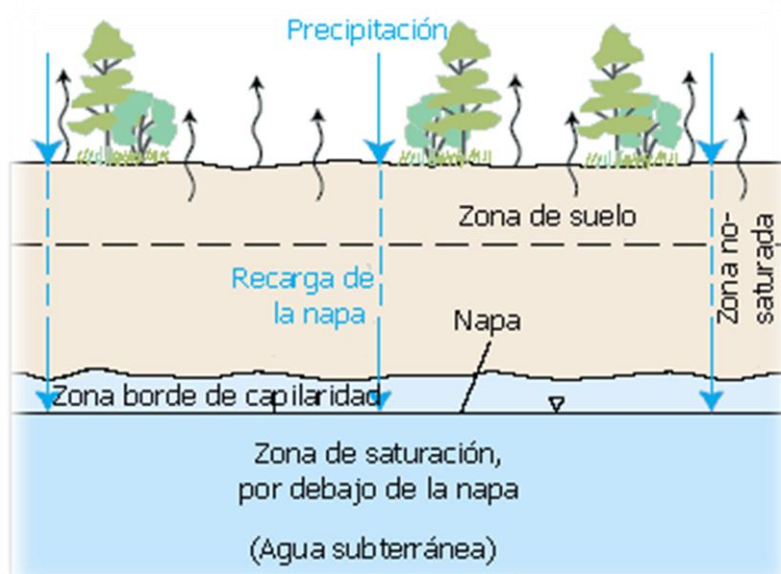
Existen varios métodos para determinar la evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ). Los más comunes son los siguientes:

- Lisímetros
- Tanque de evaporación
- Fórmulas que necesitan datos pocas veces disponibles (Penman, Jensen-Haise, etc)
- Fórmulas que necesitan datos accesibles (Blaney-Criddle, Hargreaves, etc)

## 2.7. INFILTRACIÓN

Se define como el movimiento del agua, a través de la superficie del suelo y hacia adentro del mismo, producido por la acción de las fuerzas gravitacionales y capilares; se distingue del proceso de percolación porque este último es el movimiento del agua dentro del suelo. Los fenómenos de infiltración y percolación están íntimamente ligados (Monsalve, 1999).

En la Figura 5 se muestra, en forma esquemática, el proceso de infiltración y las zonas en que ocurren.



**Figura 5: Esquema del proceso de infiltración**

FUENTE: <http://water.usgs.gov/edu/watercyclespanish.html>

La infiltración juega un papel de primer orden en la relación lluvia-escurrimiento y, por lo tanto, en los problemas de diseño y predicción asociados a la dimensión y operación de obras hidráulicas (Chavarri, 2010).

Parámetros característicos de la infiltración:

### 2.7.1. CAPACIDAD DE INFILTRACIÓN O TASA DE INFILTRACIÓN

Es la capacidad máxima con que un suelo, en una condición dada, puede absorber agua. Se denota como  $f$  y se expresa normalmente en mm/hr. Se define como exceso de precipitación la cantidad resultante de restar la intensidad de lluvia ( $i$ ), en mm/hr, a la capacidad de infiltración ( $f$ ), en mm/hr, en un tiempo dado ( $\Delta t$ ).

$$\text{Exceso de precipitación} = (i - f)\Delta t, \text{ en mm} \quad (1)$$

Donde:

i: Intensidad de lluvia, en mm/hr.

f: Capacidad de infiltración, en mm/hr.

A la capacidad de infiltración sólo se llega durante una lluvia si el exceso de precipitación es mayor o igual a cero. En caso contrario, la capacidad de absorción de agua del suelo no es máxima, y por consiguiente no es igual a la capacidad de infiltración.

Ahora bien, si:

$$\begin{aligned} i < f &\rightarrow f_0 = i \\ i \geq f &\rightarrow f_0 = f \end{aligned} \tag{2}$$

Donde:

$f_0$ : Infiltración, en mm/hr.

## **2.8. ESCURRIMIENTO**

El escurrimiento se define como el agua proveniente de la precipitación que circula en la superficie terrestre y llega a una corriente para finalmente ser drenada hasta la salida de la cuenca.

El agua proveniente de la precipitación que llega hasta la superficie terrestre, una vez que una parte ha sido interceptada y evaporada, sigue diversos caminos hasta llegar a la salida de la cuenca. Conviene dividir estos caminos en tres clases: escurrimiento superficial, escurrimiento subsuperficial y escurrimiento subterráneo (Domínguez, 2002).

### **2.8.1. ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL**

Proviene de la precipitación no infiltrada y que escurre sobre la superficie del suelo. El efecto sobre el escurrimiento total es inmediato y, existirá durante la tormenta e inmediatamente después de que ésta termine. La parte de la precipitación total que da lugar a este escurrimiento se denomina precipitación en exceso (Villón, 2002).

### **2.8.2. ESCURRIMIENTO SUBSUPERFICIAL**

Es la parte del agua que se desliza a través de los horizontes superiores del suelo hacia las corrientes. Una parte de este tipo de escurrimiento entra rápidamente a formar parte de las corrientes superficiales y a la otra le toma más tiempo unirse a ellas (Chow, 1964).

### **2.8.3. ESCURRIMIENTO SUBTERRÁNEO**

Es aquel que proviene del agua subterránea la cual es recargada por la parte de la precipitación que se infiltra, una vez que el suelo se ha saturado (Villón, 2002).

## **2.9. MODELO HIDROLÓGICO**

Los modelos hidrológicos son representaciones simplificadas de los sistemas hidrológicos reales complejos llamados prototipo, bajo forma física o matemática, a partir del cual se estudia la relación causa-efecto de una cuenca a través de los datos de entrada y salida, con los cuales se logra un mejor entendimiento de los procesos físico-hidrológicos que tienen lugar dentro de la cuenca. Además, permite simular el comportamiento hidrológico de los procesos físicos de la cuenca.

El objetivo de un modelo hidrológico es determinar con eficiencia y precisión los componentes del ciclo hidrológico de una cuenca y estimar eficientemente el comportamiento y la magnitud, abundancia y carencia, del agua en los fenómenos de frecuencia poco común. La consideración y el uso de los modelos hidrológicos es primordial para apreciar, simular y predecir los daños causados por las inundaciones, resolver problemas prácticos de inventarios, planear, diseñar, manejar y tomar decisiones de los recursos hidráulicos en una cuenca, región o país (Chow, 2000).

Los modelos en hidrología pueden dividirse en modelo físico, analógico y matemático.

### **2.9.1. MODELO FÍSICO**

El modelo físico representa en escala reducida al sistema real; generalmente, este modelo se trabaja en laboratorio bajo determinadas condiciones de modelación.

### **2.9.2. MODELO ANALÓGICO**

El modelo analógico representa un sistema complejo mediante otro más simple de características análogas, por ejemplo: un modelo analógico eléctrico de flujo permanente en un acuífero, hidrograma de inundación, etc.

### **2.9.3. MODELO MATEMÁTICO**

El modelo matemático representa el comportamiento del sistema real mediante relaciones y ecuaciones algebraicas entre sus parámetros. Este tipo de modelos son los más usados para la evaluación de recursos hídricos.

En la evaluación de los recursos hídricos se diferencian dos grandes grupos de modelos matemáticos, determinísticos y estocásticos. En el primer caso todos los parámetros del modelo matemático son determinados por leyes físicas, estos parámetros se consideran como exactos y la variabilidad de los resultados se explica completamente en base a ellos. Mientras que en los modelos estocásticos, los parámetros han sido calculados en base a probabilidades y dependen del tiempo (Duque, 1979).

Un modelo matemático es una representación simplificada de un sistema físico por otro que mediante expresiones matemáticas trata de representar el funcionamiento real del sistema físico.

El modelo matemático en hidrología permite: predecir y simular las descargas en diferentes puntos de una cuenca, evaluar la calidad de agua de los ríos, optimizar el uso del recurso hídrico, elaborar planes de contingencia ante falla de una presa, etc. En pocas palabras estos modelos ayudan a conocer con mayor exactitud la cantidad de recurso hídrico, predecir el comportamiento futuro de los ríos y tomar decisiones para la gestión del recurso hídrico en una cuenca.

En la estimación de las descargas producidas por las lluvias, los modelos matemáticos ayudan a generar series de caudales en cuencas donde solo se cuente con información pluviométrica y generar los caudales en base a las lluvias registradas. De esta forma se puede conocer con mayor exactitud la disponibilidad del recurso hídrico en una cuenca, y determinar con ello su mejor aprovechamiento y/o determinar los caudales para el diseño de estructuras hidráulicas (CIVILTEC, 1994).

El modelo matemático está dividido en dos grandes grupos determinístico y estocástico.

#### **a. Modelo determinístico**

En este tipo de modelo, todos los parámetros están libres de cualquier tipo de distribución de probabilidad, los parámetros son determinados mediante leyes físicas empíricas, conceptuales



o teóricas; se tiene por ejemplo: el tránsito de una masa de agua a través de un reservorio, la formulación matemática del hidrograma unitario, etc.

En el campo de la hidrología, este tipo de modelos son mayormente aceptados para la evaluación de recursos hídricos, ya que por su naturaleza reflejan los procesos esenciales del ciclo hidrológico, tomando como parámetros de entrada información que interviene en dichos procesos como: la precipitación, evapotranspiración, humedad del suelo, etc.

Ejemplos de modelos determinísticos son la ecuación de Laplace para flujos variables en un acuífero no confinado; el hidrograma unitario instantáneo estimado mediante la expansión de series armónicas (Estrela, 1992).

#### **b. Modelo estocástico**

En el modelo estocástico, se considera que las variables hidrológicas son aleatorias con distribución de probabilidad y con dependencia del tiempo. Los resultados de estos modelos se explican en base a las leyes de la probabilidad y depende del tiempo.

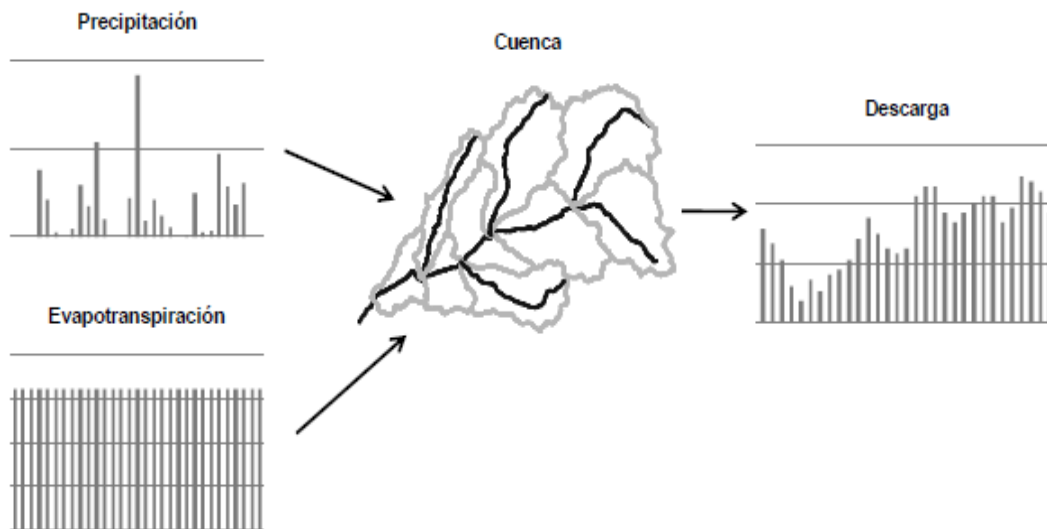
Un proceso probabilístico se diferencia de un estocástico en que el primero no hay dependencia en el tiempo entre los valores de la serie hidrológica y por lo tanto puede ser gobernado por cierta función de distribución de probabilidad, mientras que en un proceso estocástico si existe dependencia entre cada uno de los valores de la serie hidrológica, por lo que esta deberá ser representada por un modelo estocástico (Klemes, 1986).

Un proceso estocástico, desde el punto de vista netamente estadístico, es un proceso aleatorio. Mientras que en hidrología un proceso estocástico implica series de tiempo que son parcialmente aleatorias (Linsley, 1977).

### **2.10. PROCESO DE MODELACIÓN HIDROLÓGICA**

El proceso de modelación consiste en la realización de operaciones dentro de un sistema para la obtención de las salidas del mismo. En este caso el sistema con que se trabaja es un sistema hidrológico o cuenca, en donde se tiene como datos de entrada la precipitación y la evapotranspiración y mediante las operaciones definidas dentro del modelo que se emplee se obtendrán como salida los caudales en los puntos de interés (Silva, 1987).

En la Figura 6 se muestra el esquema del proceso de modelación.



**Figura 6: Proceso de modelación**

FUENTE: Silva, 1987

### 2.10.1. CALIBRACIÓN Y VERIFICACIÓN DEL MODELO

Lo más importante y esencial de cada modelo son las variables y los parámetros. Las variables son cantidades físicas en sí mismas y los parámetros son cantidades que controlan el comportamiento de las variables. Cada componente del modelo puede tener una o más variables y parámetros.

Los parámetros pueden ser de naturaleza determinística, conceptual, o empírica. Los parámetros de los modelos determinísticos están basados en leyes de procesos físicos, usualmente en conexión con aplicaciones del modelado distribuido, para los cuales los cálculos se realizan en los dominios temporales y espaciales. Los parámetros conceptuales son parte de los modelos conceptuales es decir, aquellos que simulan procesos físicos en un modo simple y práctico. Los parámetros empíricos son calculados directamente, basados en datos medidos o indirectamente, basados en la experiencia, como en el caso de la regionalización de parámetros de modelos.

En la práctica, es más probable que un cierto modelo de cuenca tenga más de un tipo de componente y, entonces, más de un tipo de parámetro. Generalizando, un modelo de cuenca se denomina determinístico, conceptual o empírico dependiendo de si la mayoría de sus componentes y parámetros tienen bases determinísticas, conceptuales o empíricas. El uso y la interpretación de los modelos de cuenca, en particular los procesos de calibración, verificación y análisis de sensibilidad, son una función del tipo de modelo.

## **a. Calibración del modelo**

La calibración del modelo consiste en identificar los parámetros del modelo que provean la mejor concordancia entre los flujos simulados y los registrados. La identificación de los parámetros puede ser llevada a cabo manualmente, por prueba y error, o automáticamente utilizando técnicas de optimización matemática (Ponce, 1989).

Este proceso puede realizarse de dos formas:

### **a.1. Prueba y error**

Es el método más utilizado y usualmente recomendado. Implica un ajuste manual de parámetros basado en el criterio del investigador. Tiene valor de aprendizaje, es lento y subjetivo.

### **a.2. Automática**

Optimiza los valores de los parámetros utilizando técnicas numéricas. A diferencia de la “prueba y error”, este método es mucho más rápido y objetivo; sin embargo, es numéricamente complejo y presenta problemas en la compensación de errores y en la captura de valores mínimos locales. Algunos ejemplos son: técnicas de escalamiento, algoritmos genéticos, etc.

En la práctica, se sugiere aplicar el primer método para conseguir una primera aproximación y luego optimizarla utilizando una calibración automática (Cabrera, 2012).

## **b. Validación del modelo**

La validación de un modelo es el proceso de demostración que el modelo es capaz de hacer predicciones en un lugar específico determinado para períodos fuera del período de calibración. De esta manera, se dice que un modelo ha sido validado si su precisión y capacidad predictiva en el período de validación muestran errores o límites aceptables.

Como se menciona, la validación de un modelo se hace para un lugar determinado pues es imposible, realizar una validación generalizada, así como es imposible realizar una calibración generalizada.

Usualmente, la validez de un modelo para un período diferente al de calibración se asume como verdadera, considerando condiciones futuras similares a las actuales. Estas asunciones son válidas para casos simples como completar datos pues el período desconocido se

encuentra “dentro” del período calibrado y las características pueden asumirse iguales, pero este no es el caso general (Refsgaard, 1996).

### **2.10.2. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD**

Las inseguridades en la práctica del modelado de cuencas han llevado a una confianza “in crescendo” en el análisis de sensibilidad, el proceso por el cual un modelo es probado para establecer una medida del cambio relativo en los resultados del modelo causado por un cambio correspondiente en los parámetros del modelo.

Este tipo de análisis es un complemento necesario para el ejercicio del modelado, especialmente porque provee información sobre el nivel de certeza, para asegurar los resultados del modelado. Los resultados del análisis de sensibilidad para las variaciones de parámetro son particularmente importantes en el caso de modelos determinísticos que tienen algunos componentes conceptuales. Debido a los componentes conceptuales, las calibraciones son estrictamente válidas solo dentro de rangos estrechos de las variables, de allí que, los errores en la estimación de los parámetros necesitan ser determinados de manera cualitativa.

La sensibilidad es analizada usualmente aislando el efecto de cierto parámetro. Si un modelo es altamente sensible a un parámetro dado, pequeños cambios en el valor de ese parámetro podrían producir cambios grandes en el rendimiento del modelo. Por ello, es necesario concentrar el esfuerzo del modelado en obtener buenas estimaciones de este parámetro. Por otro lado, los parámetros poco sensibles pueden ser relegados a un rol secundario.

En el modelado de cuencas, la elección de parámetros para el análisis de sensibilidad es función de la escala de problema. Por ejemplo, en pequeñas cuencas, el rendimiento del modelo es altamente sensible al parámetro abstracción, esto es el coeficiente de escurrimiento en el método racional. Por ello, es imperativo que el coeficiente de escurrimiento sea estimado de la mejor manera posible. Para eventos de baja frecuencia, valores altos del coeficiente de escurrimiento están generalmente justificados.

En el modelado de cuencas de tamaño medio, la sensibilidad del modelo usualmente gira sobre la distribución temporal de la lluvia, los parámetros de infiltración, y la forma del hidrograma unitario. La selección de la distribución de la lluvia es crucial desde el punto de vista del diseño. Los modelos de cuencas son usualmente muy sensibles a los parámetros de infiltración, lo cuales necesitan ser evaluados cuidadosamente, con particular atención a los

procesos físicos. Por ejemplo, una tormenta de corta duración y alta intensidad podría resultar en un pico de flujo alto, debido primariamente a una alta intensidad de lluvia. Sin embargo, una tormenta de baja intensidad y larga duración podría también resultar en un pico alto de flujo, esta vez debido a una larga duración de la lluvia, lo que provoca que las abstracciones hidrológicas se reduzcan a un mínimo.

En el modelado de cuencas grandes, la sensibilidad del modelo se focaliza en la distribución espacial de la tormenta, a pesar de que la distribución temporal y los parámetros de infiltración continúan jugando un rol significativo. De cualquier modo, una evaluación cuidadosa de la sensibilidad del modelo es necesaria para incrementar la confianza en los resultados del modelado. Los análisis proveen medios efectivos de muestra con las complejidades inherentes del modelado de desagües, incluyendo las incertidumbres de los parámetros asociados. En este sentido, los modelos distribuidos, mientras son vistos ampliamente como determinísticos pueden frecuentemente mostrar una cualidad distintiva pirobalística diferente (Ponce, 1989).

## **2.11. SISTEMA DE MODELACIÓN HIDROLÓGICA RS-MINERVE**

El software Rs-Minerve, fue desarrollado por el Centre de Recherche sur l'Environnement Alpin – CREALP, conjuntamente con la oficina de ingeniería HydroCosmo S.A. y con la colaboración de dos universidades la Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne y la Universidad Politécnica de Valencia los cuales actualmente difunden el software en sus programas de posgrado.

Rs-Minerve es un software de simulación de caudales que permite la modelización de redes hidrológicas e hidráulicas siendo un enfoque semi-distribuido; es capaz de representar no solo los principales procesos hidrológicos tales como la fusión de nieve y glaciación, la escorrentía superficial y sub-superficial, sino también las infraestructuras de regulación como son los diques de retención, aliviaderos, las tomas de agua, turbina y bombas; el análisis global de una red hidrológico-hidráulico es esencial para la mayoría de los casos, como la optimización de las centrales hidroeléctricas, el diseño y la regulación de los aliviaderos o el desarrollo y optimización de un concepto de protección contra inundaciones apropiado. Rs-Minerve permite este tipo de análisis debido a su interfaz simple y fácil manejo.

En la nueva versión, los modelos de precipitación-escorrentía GSM, SOCONT, SAC-SMA, GR4J y VHB son disponibles para la modelización del comportamiento hidrológico de las cuencas hidrográficas. El modelo de consumo permite incluir ciudades y tierras de cultivo,

calculando el déficit de agua. El modelo de hidroeléctrica calcula la altura de la red y las pérdidas de carga lineal, proporcionando valores de producción de energía y el ingreso total basado en el rendimiento de la turbina y en el precio de venta de energía.

Varios proyectos y tesis han utilizado este programa para las cuencas de estudio en Suiza, Afganistán, España y Francia. Además del centro de investigación CREALP y la oficina de ingeniería HydroCosmos S.A., que actualmente desarrollan Rs-Minerve, dos universidades, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne y la Universitat Politècnica de Valencia, trabajan en estrecha colaboración para mejorar y utilizar dentro de los cursos para estudiantes de maestría de Ingeniería Civil y Ciencias Ambientales. Otras colaboraciones, como con la Asociación Hydro10, complementa y mejora el desarrollo de Rs-Minerve (Foehn et al., 2014).

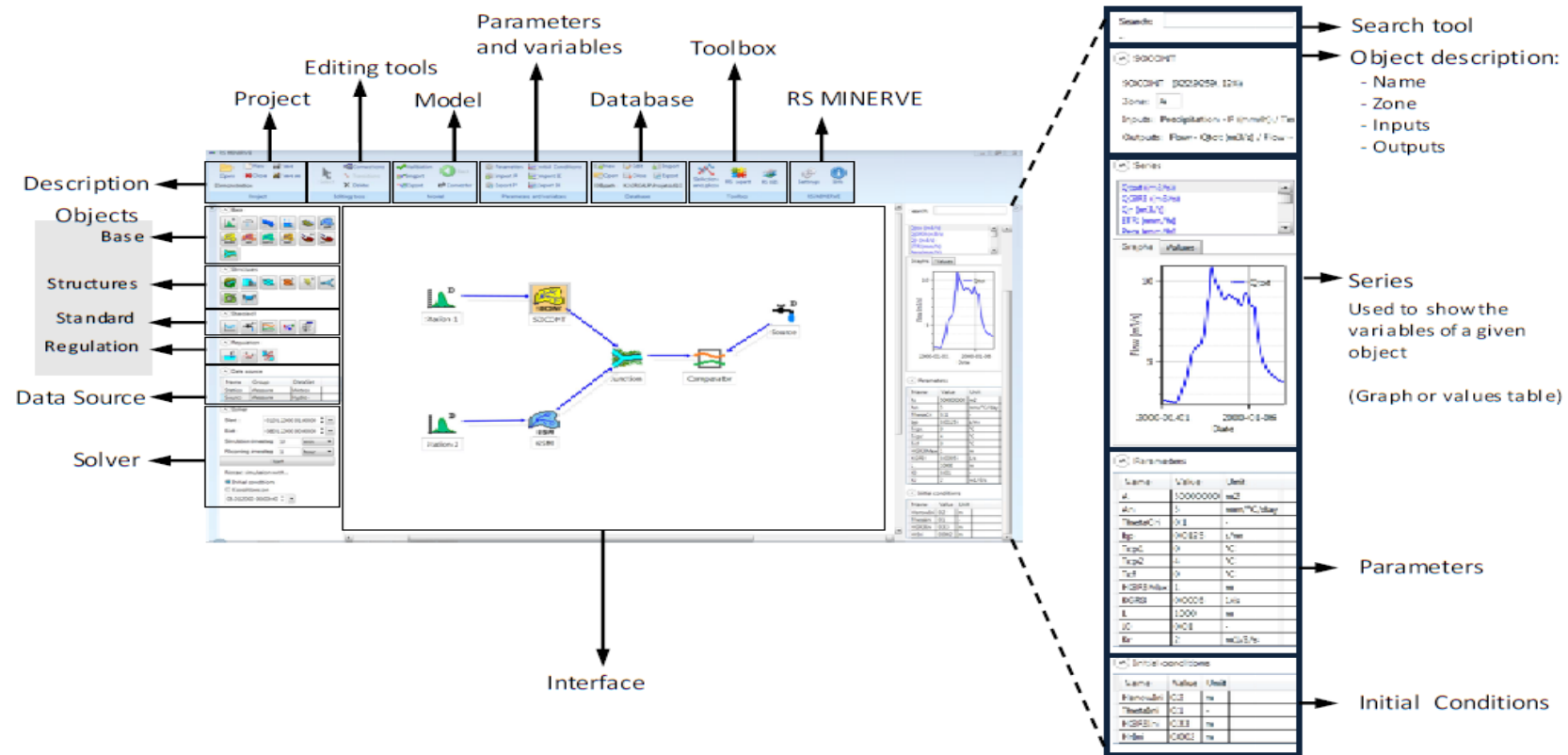
La estructura de la ventana principal Rs-Minerve y los diferentes campos por el que está compuesto se presenta en la Figura 7.

#### **2.11.1. MODELO GR4J**

El modelo diario de precipitación – escorrentía GR4J fue desarrollado en el Cemagref-Antony, Francia (Edijatno et al., 1999; Perrin, 2002), y es un modelo de cuatro parámetros para simular los caudales diarios en una cuenca. En sus dominios de aplicación se encuentra la modelización precipitación – escorrentía con pocos parámetros.

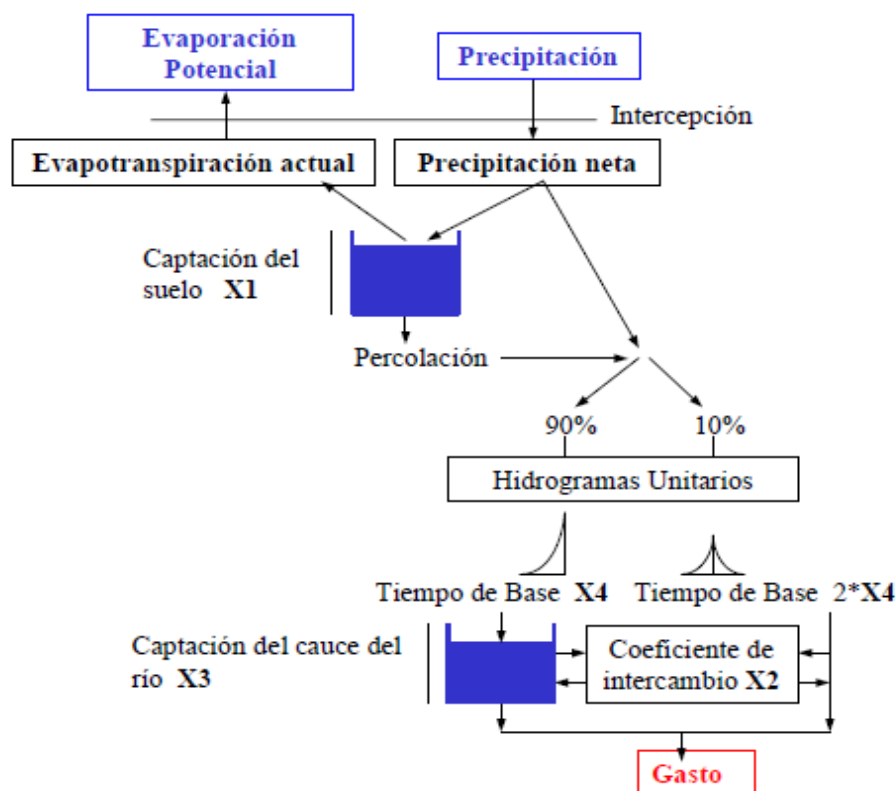
El modelo GR4J es un modelo empírico ya que descompone la transformación de la precipitación en caudal en subprocesos que son tratados de manera global. Estos subprocesos toman la forma de reservas o captaciones que se llenan y se vacían en el curso del tiempo, permitiendo al sistema tener una memoria de las condiciones anteriores. El modelo es esquemáticamente constituido por captaciones interconectadas que aseguran la transformación de la precipitación en caudal, siguiendo la representación del sistema hidrológico modelizado.

En la Figura 8 se puede apreciar la estructura del modelo diario de precipitación – escorrentía GR4J.



**Figura 7: Estructura de la ventana principal Rs-Minerve**

FUENTE: Manual del Usuario Rs-Minerve, 2014



**Figura 8: Estructura del modelo diario de precipitación - escorrentía GR4J**

FUENTE: Perrin, 2000

En el modelo GR4J, la representación del ciclo hidrológico parte de la precipitación; a partir de la cual se crea una precipitación neta al perder parte de la precipitación bruta por evapotranspiración. Una parte de la precipitación neta alimenta la reserva del suelo y el resto transita hacia el punto de salida de la cuenca. Cuando la precipitación bruta es interceptada en su totalidad por el medio ambiente, el agua contenida en el suelo empieza a evaporarse. La cantidad de agua que escurre hacia la salida de la cuenca es retardada en función de la respuesta de la cuenca a la lluvia, tiempo de base del hidrograma unitario, y es separada en dos componentes de escurrimiento: el escurrimiento semi-directo y el escurrimiento directo. El tiempo de base del hidrograma unitario permite simular el tiempo que transcurre entre el inicio de la lluvia y el establecimiento del escurrimiento directo. El escurrimiento directo representa el 90 por ciento de la lluvia eficaz y es retardado por el hidrograma unitario que simula el tiempo de pico, tiempo en que se produce el gasto máximo de la tormenta, circulando así por la captación del cauce del río hasta llegar a la salida de la cuenca. El 10 por ciento restante de la lluvia eficaz corresponde al escurrimiento semi-directo y el tiempo de base del hidrograma unitario es dos veces el tiempo de pico del escurrimiento directo, llegando directamente a la salida de la cuenca. El gasto en el punto de salida de la cuenca está



alimentado por la infiltración. La infiltración superficial o profunda está definida por los intercambios de agua superficiales o subterráneos.

### **2.11.2. MODELO SAC-SMA**

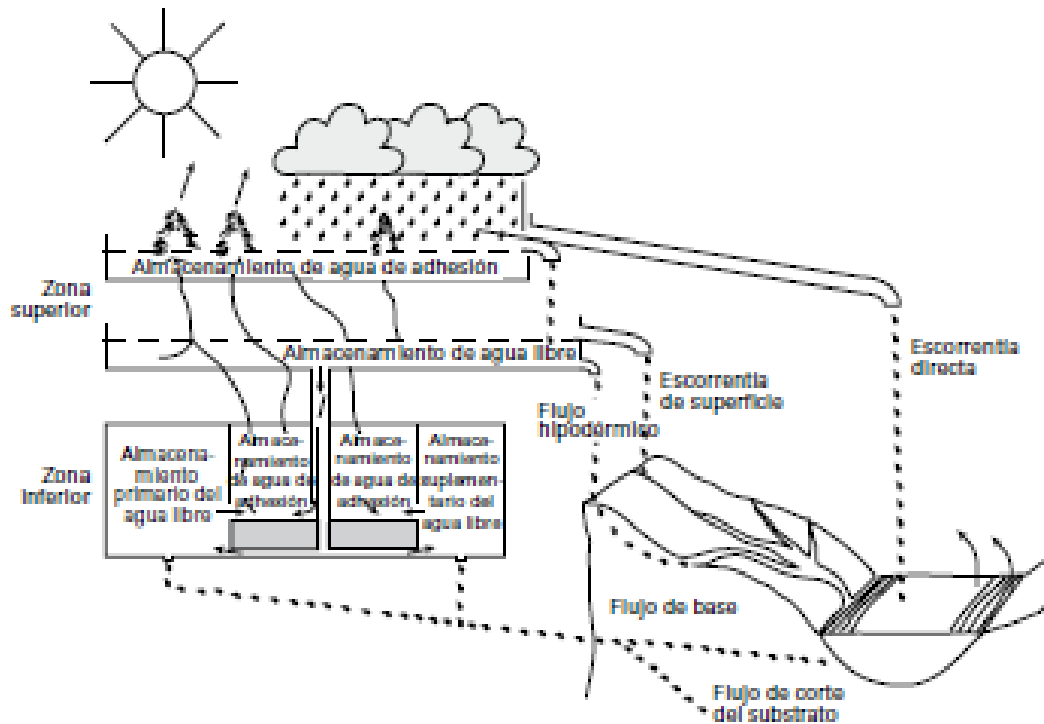
El modelo Sacramento o SAC-SMA fue desarrollado por el personal del Centro de Predicción Fluvial del Servicio Meteorológico Nacional en Sacramento, California.

Incorpora un algoritmo complejo de los procesos de humedad que permite obtener los volúmenes de varios componentes de la escorrentía, utilizándose seguidamente un método bastante simple y muy empírico para convertir esos valores entrantes en el hidrograma del flujo saliente. El manto del suelo se divide en dos partes: una zona superior y otra inferior, cada una de las cuales tiene una capacidad dada de agua de adhesión y de agua libre. La primera está firmemente ligada a las partículas del suelo y se agota solo mediante evapotranspiración. Se permite el drenaje descendente y horizontal del agua libre.

La capacidad de almacenamiento del agua de adhesión y libre en cada una de las zonas son valores especificados como parámetros del modelo. El agua que accede a una de las zonas es incorporada al almacenamiento de agua de adhesión, siempre y cuando no se rebase su capacidad, mientras que el exceso es incorporado al almacenamiento de agua libre.

Para cada proceso de precipitación, una parte de esta es desviada inmediatamente al sistema de cauces en forma de escorrentía directa. Representa la parte que descarga sobre el sistema del canal y las superficies impermeables adyacentes. La extensión de esta superficie varía en función del tiempo. Toda el agua de lluvia y de fusión de nieve, excepto la desviada en forma de escorrentía directa, penetra en la zona superior. El agua libre de la zona superior pasa a la inferior en forma de flujo hipodérmico o mediante percolación. Cuando la tasa de suministro de humedad a la zona superior es mayor que la tasa de agotamiento, el exceso se convierte en escorrentía superficial. El agua libre de la zona inferior se clasifica en tres tipos de almacenamiento: primario, de drenaje lento y secundario (Argüelles, 2007).

En la Figura 9 se observa la representación de los elementos principales del modelo SAC-SMA.



**Figura 9: Estructura del modelo Sacramento (SAC-SMA)**

FUENTE: Argüelles, 2007

La percolación desde la zona superior hacia la inferior se define mediante la ecuación 3.

$$\text{PRATE} = \text{PBASE} \left( 1 + \text{ZPERC} * \text{RDC}^{\text{REXP}} \right) * \frac{\text{UZFWC}}{\text{UZFWM}} \quad (3)$$

Donde:

PRATE: Tasa de percolación.

PBASE: Tasa hipotética de percolación cuando la zona inferior está llena y se dispone de un suministro ilimitado de agua en la zona superior. Es numéricamente igual al flujo de salida máximo de la zona inferior, y su valor se obtiene sumando las capacidades de agua libre primaria y secundaria de la zona inferior, multiplicadas por su coeficiente de agotamiento.

RDC: Cociente entre la deficiencia de la zona inferior y la capacidad de la zona inferior. En otras palabras, RDC es igual a cero cuando la zona inferior está llena, e igual a uno cuando está vacía.

ZPERC: Parámetro del modelo que define la horquilla de tasas de percolación. Suponiendo que se disponga de un suministro ilimitado de agua libre en la zona superior, la tasa variara entre PBASE (zona inferior llena) y PBASE (1 + ZPERC), cuando la zona inferior está vacía.

REXP: Parámetro del modelo que define la forma de la curva comprendida entre los valores mínimo y máximo anteriormente indicados.

UZFWC: Contenido de agua libre de la zona superior.

UZFWM: Capacidad de agua libre de la zona superior.

El cociente entre ambas,  $UZFWC/UZFWM$ , representa la fuerza impulsora de la zona superior. Cuando esta está vacía, no hay percolación. Cuando está llena, su tasa de agotamiento vendrá determinada por la deficiencia de la zona inferior. Esta ecuación es el elemento básico del modelo.

Interactúa con otros componentes del modelo de tal modo que controla el desplazamiento del agua en todas las partes del perfil del suelo, tanto por encima como por debajo de la interfaz de percolación y, a su vez, es controlada por el desplazamiento del agua en todas las partes del perfil. Las tasas de evapotranspiración se calculan a partir de variables meteorológicas o de datos de observaciones en tanque. Pueden utilizarse valores medios diarios o de largo periodo. El potencial de la cuenca es el producto de la evapotranspiración meteorológica y de un factor que estará en función de la fecha que, a su vez, reflejará el estado de la vegetación. Las variables de humedad incorporadas al modelo permiten extraer la pérdida por evapotranspiración directa o, indirectamente, a partir del contenido en los elementos de almacenamiento y/o a partir del sistema de cauces. La pérdida se distribuye con arreglo a una jerarquía de prioridades y está limitada por la disponibilidad de humedad y por la demanda calculada.

El desplazamiento de la humedad a través del manto del suelo es un proceso continuo. En un punto cualquiera, el caudal varía con la tasa de aporte de humedad y con el contenido de los elementos de almacenamiento correspondientes. Este proceso es simulado mediante un cálculo cuasi lineal. El cálculo del proceso de drenaje y percolación a lo largo de un único intervalo de tiempo está basado en el supuesto implícito de que el desplazamiento de la humedad durante ese periodo está definido mediante las condiciones existentes al comienzo del intervalo. Esta aproximación solo es aceptable si el intervalo de tiempo es relativamente corto. En el modelo, la duración del intervalo está en función del volumen. En otras palabras, el intervalo se selecciona de tal modo que en cada ciclo de cálculo no se procesan más de 5 mm de agua (Argüelles, 2007).m

### **III. MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.1. MATERIALES**

Para el desarrollo del presente estudio se utilizaron materiales y/o datos que pueden ser agrupados de la siguiente manera:

- Ubicación y descripción de la zona de estudio.
- Información cartográfica.
- Información hidrometeorológica.
- Equipos y programas de cómputo.

##### **3.1.1. UBICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO**

Las cuencas de los ríos Pisco y San Juan, delimitadas desde los puntos de aforo Letrayoc y Conta, respectivamente, se encuentran ubicadas políticamente, en los departamentos o regiones de Ica y Huancavelica, entre las provincias de Pisco y Chincha.

En la Tabla 1 se muestra a detalle la localización política de las cuencas en estudio.

Geográficamente, la cuenca del río Pisco, orientada de Nor-Este a Sur-Oeste se encuentra entre los paralelos  $12^{\circ}52'$  -  $13^{\circ}48'$  de latitud sur y los meridianos  $75^{\circ}02'$  -  $76^{\circ}13'$  de longitud oeste. Por otro lado, la cuenca del río San Juan se encuentra entre los paralelos  $12^{\circ}48'$  -  $13^{\circ}36'$  de latitud sur y los meridianos  $75^{\circ}20'$  -  $78^{\circ}12'$  de longitud oeste; el área de estudio abarca 2 unidades hidrográficas: cuenca San Juan y cuenca Pisco, de la región hidrográfica del pacífico.

En la Tabla 2 se presenta la proyección de los límites en coordenadas UTM (m) de la zona sur 18 (S18), así mismo, la variación altitudinal (m) del área que se trabajó.

**Tabla 1: Ubicación política de las cuencas de los ríos Pisco y San Juan**

<b>Cuenca</b>	<b>Departamento</b>	<b>Provincia</b>	<b>Distrito</b>
Pisco	Huancavelica	Castrovirreyna	Castrovirreyna
			Cocas
			Santa Ana
			Ticrapo
		Huaytara	Huaycundo Arma
			Huaytara
			Quito Arma
	Ica	Pisco	San Antonio de Cusicancha
			Huancano
			Humay
			Independencia
			Paracas
			Pisco
San Juan	Huancavelica	Castrovirreyna	San Andres
			Tupac Amaru Inca
			Arma
			Aurahua
			Chupamarca
			Huachos
			Huamatambo
	Ica	Chincha	San Juan
			Tantára
			Alto Laran
			Chincha Alta
			Chincha Baja
		El Carmen	
Pisco	Pisco	San Juan de Yanac	
		San Pedro de Huacrapana	
		Sumanpe	
			Tambo de Mora
			Huáncano
			Independencia

FUENTE: Elaboración propia

**Tabla 2: Ubicación geográfica en coordenadas UTM (WG84)**

<b>Cuenca</b>	<b>Coordenadas UTM (WG84)</b>		<b>Variación Altitudinal (m.s.n.m)</b>
	<b>Norte (m)</b>	<b>Este (m)</b>	
Pisco	8'473,994 – 8'576,196	365,978 – 495,455	0.0 – 5,218
San Juan	8'492,815 - 8'586,315	366,306 - 463,710	0.0 – 5,250

FUENTE: Elaboración propia

Los límites hidrográficos para las cuencas de los ríos Pisco y San Juan se listan a continuación:

a) Límites hidrográficos de la cuenca del río Pisco

Norte: Cuencas de los ríos San Juan y Mantaro.

Sur: Cuenca del río Ica e intercuenca del río Seco.

Este: Cuencas de los ríos Mantaro, Pampas e Ica.

Oeste: Océano Pacífico.

b) Límites hidrográficos de la cuenca del río San Juan

Norte: Cuencas de los ríos Mantaro, Cañete e intercuenca Topará.

Sur: Cuenca del río Pisco.

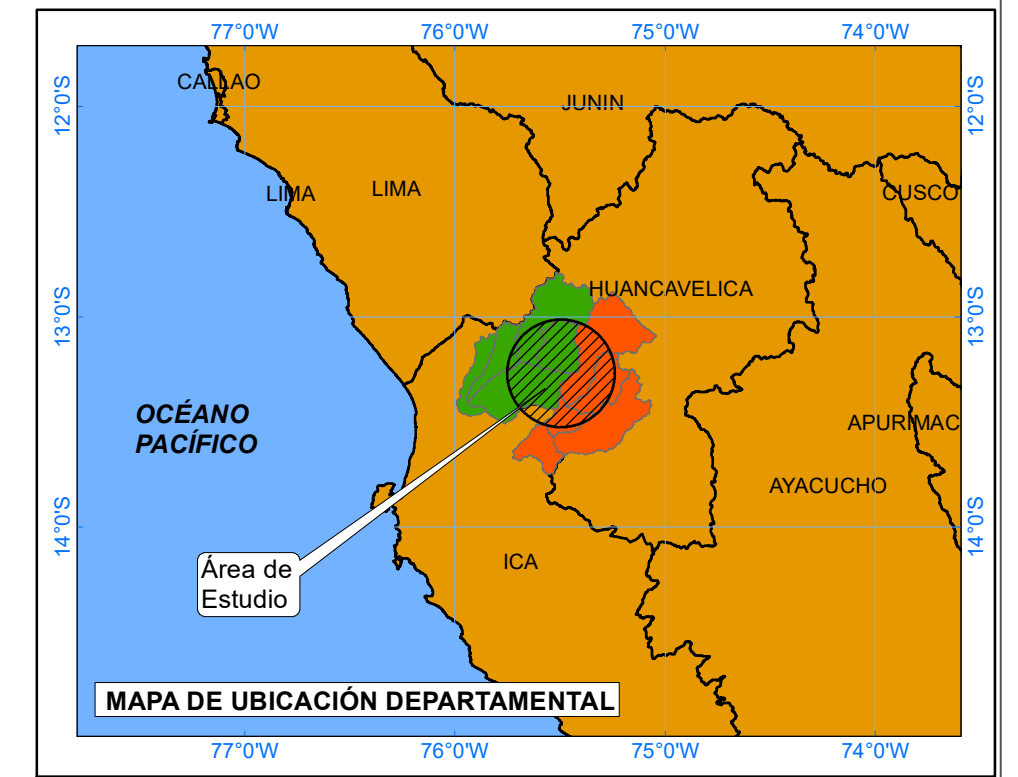
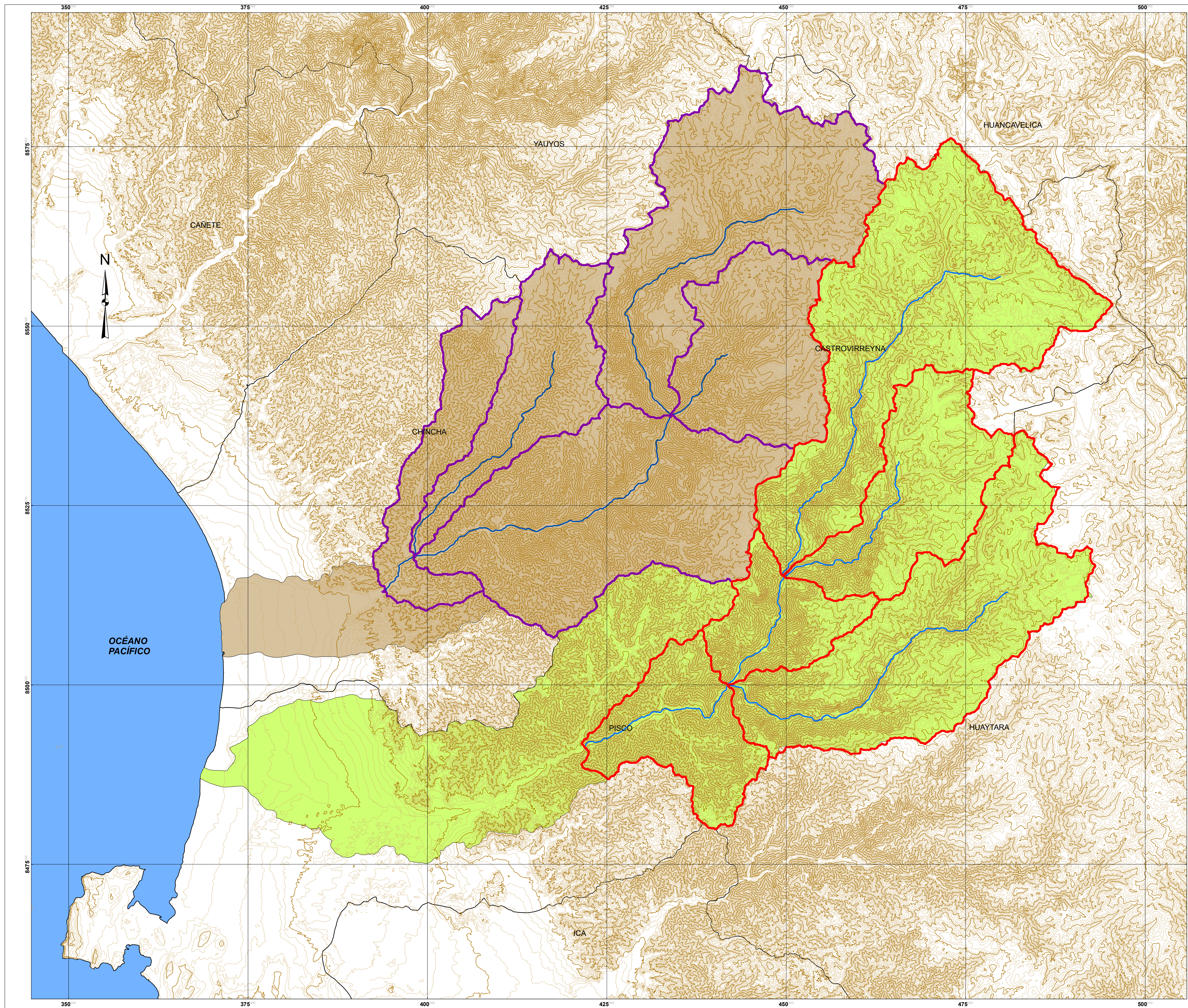
Este: Cuencas de los ríos Mantaro y Pisco.

Oeste: Océano Pacífico.

En las Figuras 10 y 11 se aprecia, en imagen satelital, la delimitación y red hidrográfica de las cuencas de interés.

En el Mapa N° 1, se puede apreciar los límites: geográficos, donde se diferencian las dos unidades hidrográficas, así como los dos departamentos que abarca el área de estudio, además de la red hídrica de las cuencas, las curvas de nivel cada 50 m. y capitales de provincia.





### SIMBOLOGÍA

- Curvas de Nivel
- Límite Provincial
- YAUYOS** Provincia
- Delimitación Cuenca Pisco
- Delimitación Cuenca San Juan
- Cuenca Hidrográfica Pisco
- Cuenca Hidrográfica San Juan
- Río Pisco
- Río San Juan

NOTA:  
1.- LA ESCALA GRÁFICA MOSTRADA ES PARA EL FORMATO A-1, PARA A-3 CONSIDERAR EL DOBLE.

Fuente: Cartografía 1:100 000  
UTM WGS 84

**UNIVERSIDAD NACIONAL  
AGRARIA LA MOLINA**

TESIS :

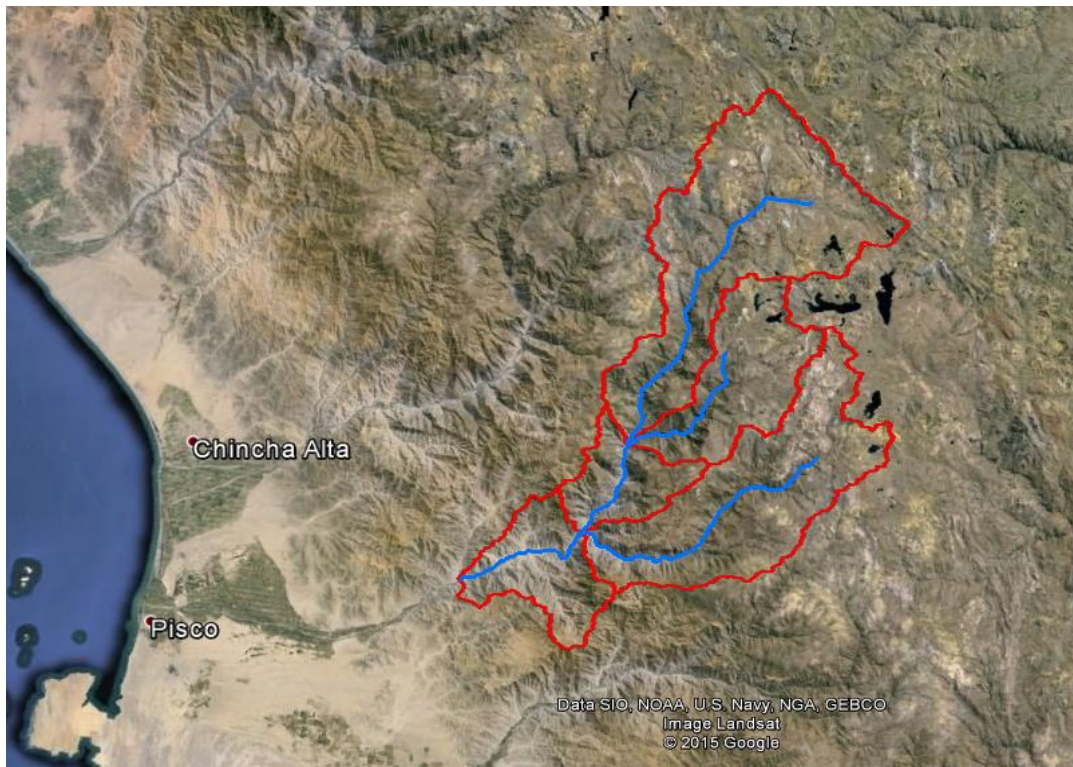
## MODELOS HIDROLÓGICOS PARA EL PRONÓSTICO DE CAUDALES DIARIOS EN LAS CUENCAS DE LOS RÍOS PISCO Y SAN JUAN - ICA

FACULTAD : **INGENIERÍA AGRÍCOLA**

MAPA : **UBICACIÓN GENERAL  
DE LAS  
CUENCAS ESTUDIADAS**

ESCALA : 1:250,000	PATROCINADOR : GONZALO FANO	FECHA : ENERO - 2016
FUENTE : ELABORACIÓN PROPIA	MAPA N° : 1	





**Figura 10: Imagen Satelital de la cuenca del rio Pisco, delimitada desde la estación de aforo Letrayoc**

FUENTE: Imagen Google Earht



**Figura 11: Imagen Satelital de la cuenca del rio San Juan, delimitada desde la estación de aforo Conta**

FUENTE: Imagen Google Earht



### 3.1.2. INFORMACIÓN CARTOGRÁFICA

Se recopiló información cartográfica en formato Shape (\*.shp) a escala 1:100 000 del Ministerio de Educación del Perú.

Las cartas que abarca la zona de estudio son:

**Tabla 3: Hojas de la carta nacional**

N° DE CARTA	NOMBRE
27 - k	Chincha
27 - i	Tantára
27 - m	Castrovirreyna
28 - k	Pisco
28 - i	Guadalupe
28 - m	Santiago de Chocorvos

FUENTE: Elaboración propia

### 3.1.3. INFORMACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA

Se recopiló información hidrometeorológica necesaria para desarrollar el presente estudio. Los datos hidrometeorológicos, están constituidos por registros de precipitación, temperatura y descarga, proporcionado por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) y la Autoridad Nacional del Agua (ANA).

La relación de estaciones meteorológicas e hidrológicas se muestra en las Tabla 4 y 5, respectivamente.

#### a. Información pluviométrica

La información pluviométrica recopilada abarca 16 estaciones; se cuenta con información de precipitación diaria (1980-2002) de las siguientes estaciones:

- Cuenca Pisco: Cusicancha, Hacienda Bernales, Hornada, Huáncano, Sinto y Totorá.
- Cuenca San Juan: Fonagro, Huachos, Laguna Huichinga Aurahua, San Juan de Castrovirreyna, San Juan de Yanac, San Pedro de Huacarpana, Tantara y Villa de Armas.
- Cuenca Pampas: Choclococha y Tunel Cero.

**Tabla 4: Estaciones meteorológicas pluviométricas y climatológica ordinaria**

Nombre Estación	Cuenca Hidrográfica	Tipo	Ubicación Geográfica			Ubicación Política		
			Longitud	Latitud	Altitud	Departamento	Provincia	Distrito
Choclococha	Pampas	Pluviométrica	75°4'15''	13°9'30''	4350	Huancavelica	Castrovirreyna	Santa Ana
Cusicancha	Pisco	Pluviométrica	75°18'	13°29'	3550	Huancavelica	Huaytara	San Antonio de Cusicancha
Fonagro	San Juan	Climatológica Ordinaria	76°8'	13°27'45''	50	Ica	Chincha	Alto Lara
Hacienda Bernales	Pisco	Climatológica Ordinaria	75°57'	13°45'	250	Ica	Pisco	Humay
Hornada	Pisco	Pluviométrica	75°6'	13°26'	4430	Huancavelica	Huaytara	Pilpichaca
Huachos	San Juan	Climatológica Ordinaria	75°32'	13°13'	2680	Huancavelica	Castrovirreyna	Huachos
Huáncano	Pisco	Climatológica Ordinaria	75°37'	13°36'	1006	Ica	Pisco	Huancano
Laguna Huichinga Aurahua	San Juan	Pluviométrica	75°34'	13°2'	3480	Huancavelica	Castrovirreyna	Aurahua
San Juan de Castrovirryena	San Juan	Climatológica Ordinaria	75°37'45''	13°12'39''	1810	Huancavelica	Castrovirreyna	San Juan
San Juan de Yanac	San Juan	Climatológica Ordinaria	75°47'30''	13°12'30''	2400	Ica	Chincha	San Juan de Yanac

Continuación

San Pedro de Huacarpana	San Juan	Climatológica Ordinaria	75°39'	13°3'	3280	Ica	Chincha	Huacarpana
Sinto	Pisco	Pluviométrica	75°20'	13°20'	3600	Huancavelica	Castrovirreyna	Castrovirreyna
Tantara	San Juan	Pluviométrica	75°38'	13°4'	2890	Huancavelica	Castrovirreyna	Tantara
Totora	Pisco	Pluviométrica	75°19'	13°7'	4100	Huancavelica	Castrovirreyna	Castrovirreyna
Tunel Cero	Pampas	Pluviométrica	75°5'8''	13°15'32''	4425	Huancavelica	Huaytara	Pilpichaca
Villa de Armas	San Juan	Climatológica Ordinaria	75°33'	13°8'	3280	Huancavelica	Castrovirreyna	Arma

FUENTE: Elaboración propia

**Tabla 5: Estaciones hidrológicas**

Nombre Estación	Cuenca Hidrográfica	Tipo	Ubicación Geográfica			Ubicación Política		
			Longitud	Latitud	Altitud	Departamento	Provincia	Distrito
Conta	San Juan	Hidrométrica	75°59'	13°27'	350	Ica	Chincha	El Carmen
Letrayoc	Pisco	Hidrométrica	75°43'	13°39'	720	Ica	Pisco	Huancano

FUENTE: Elaboración propia

El comportamiento de la información histórica de las estaciones pluviométricas se presenta en el Anexo 1.1.

#### **b. Información climatológica ordinaria**

La información climatológica utilizada para el estudio fue temperatura a nivel diario (1980 – 2002), de las siguientes estaciones:

- Cuenca Pisco: Hacienda Bernales y Huáncano.
- Cuenca San Juan: Fonagro, Huachos, San Juan de Castrovirreyna, San Juan de Yanac, San Pedro de Huacarpana y Villa de Armas.

En el Anexo 1.2 se muestra los valores de la distribución media, mínima y máxima mensual de temperatura del año promedio del periodo de registro (1980-2002) de las estaciones de las cuencas de los ríos Pisco y San Juan.

#### **c. Información hidrométrica**

Las cuencas de los ríos Pisco y San Juan cuentan con las estaciones hidrométricas Letrayoc y Conta, respectivamente, que miden el escurrimiento superficial originado por la precipitación que se produce en dichas cuencas. Para el presente estudio se ha considerado la información diaria para un periodo de registro 1980-2002, en ambas estaciones, que al mismo tiempo fueron utilizadas para realizar la calibración y validación de los modelos.

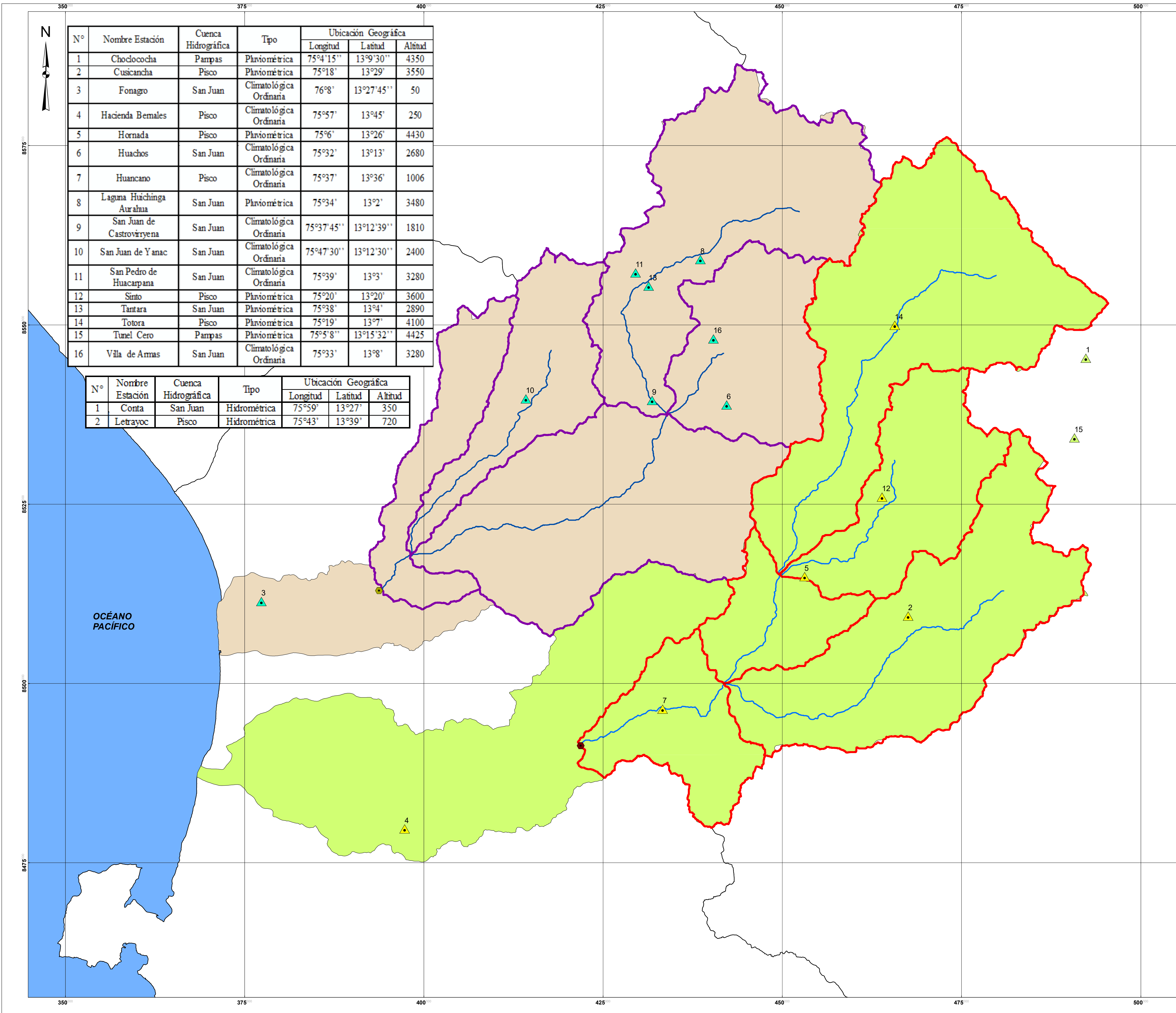
El comportamiento de la información histórica de las estaciones hidrométricas se presenta en el Anexo 1.3.

En el Mapa N° 2, se puede ver la ubicación espacial de la red meteorológica e hidrológica sobre las cuencas en estudio; asimismo se aprecia que el 82 por ciento del total de estaciones meteorológicas están ubicadas en el área de estudio; además, se puede observar que las estaciones hidrológicas, que por su función de calibrar y validar la metodología, son los puntos de desfogue de las cuencas en estudio.

### **3.1.4. EQUIPOS Y PROGRAMAS DE CÓMPUTO**

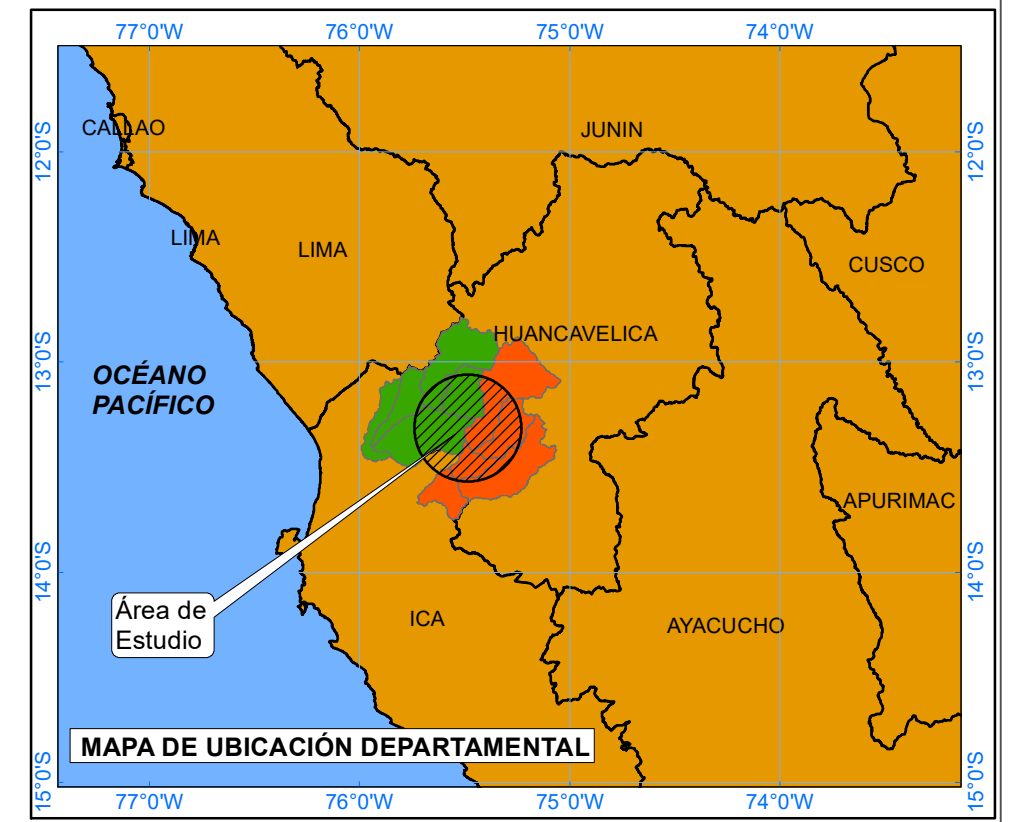
Para el procesamiento de la información se emplearon equipos de cómputo: PC y laptop con el sistema operativo Windows 8 e impresora.

Las herramientas computacionales empleadas son:



N°	Nombre Estación	Cuenca Hidrográfica	Tipo	Ubicación Geográfica		
				Longitud	Latitud	Altitud
1	Chocococha	Pampas	Pluviométrica	75°4'15"	13°9'30"	4350
2	Cuscancha	Pisco	Pluviométrica	75°18'	13°29'	3550
3	Fonagro	San Juan	Climatológica Ordinaria	76°8'	13°27'45"	50
4	Hacienda Bemales	Pisco	Climatológica Ordinaria	75°57'	13°45'	250
5	Hornada	Pisco	Pluviométrica	75°6'	13°26'	4430
6	Huachos	San Juan	Climatológica Ordinaria	75°32'	13°13'	2680
7	Huancano	Pisco	Climatológica Ordinaria	75°37'	13°36'	1006
8	Laguna Huichinga Auralua	San Juan	Pluviométrica	75°34'	13°2'	3480
9	San Juan de Castrovirryena	San Juan	Climatológica Ordinaria	75°37'45"	13°12'39"	1810
10	San Juan de Yanac	San Juan	Climatológica Ordinaria	75°47'30"	13°12'30"	2400
11	San Pedro de Huacarpana	San Juan	Climatológica Ordinaria	75°39'	13°3'	3280
12	Sinto	Pisco	Pluviométrica	75°20'	13°20'	3600
13	Tantara	San Juan	Pluviométrica	75°38'	13°4'	2890
14	Totora	Pisco	Pluviométrica	75°19'	13°7'	4100
15	Tunel Cero	Pampas	Pluviométrica	75°5'8"	13°15'32"	4425
16	Villa de Armas	San Juan	Climatológica Ordinaria	75°33'	13°8'	3280

N°	Nombre Estación	Cuenca Hidrográfica	Tipo	Ubicación Geográfica		
				Longitud	Latitud	Altitud
1	Conta	San Juan	Hidrométrica	75°59'	13°27'	350
2	Letrayoc	Pisco	Hidrométrica	75°43'	13°39'	720



### SIMBOLOGÍA

- Límite Departamental
- ▲ Estación Meteorológica Pampas
- ▲ Estación Meteorológica Pisco
- ▲ Estación Meteorológica San Juan
- Estación Hidrométrica Letrayoc
- Estación Hidrométrica Conta
- Delimitación Cuenca Pisco
- Delimitación Cuenca San Juan
- Cuenca Hidrográfica Pisco
- Cuenca Hidrográfica San Juan
- Río Pisco
- Río San Juan

NOTA:  
1.- LA ESCALA GRÁFICA MOSTRADA ES PARA EL FORMATO A-1, PARA A-3 CONSIDERAR EL DOBLE.

Fuente: Cartografía 1:100 000  
UTM WGS 84



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

TESIS :  
**MODELOS HIDROLÓGICOS PARA EL PRONÓSTICO DE CAUDALES DIARIOS EN LAS CUENCAS DE LOS RÍOS PISCO Y SAN JUAN - ICA**

FACULTAD :  
**INGENIERÍA AGRÍCOLA**

MAPA :  
**UBICACIÓN GENERAL DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS E HIDROMÉTRICAS**

ESCALA : 1:250,000	PATROCINADOR : GONZALO FANO	FECHA : ENERO - 2016
FUENTE : ELABORACIÓN PROPIA	MAPA N°: 2	

- ArcGis 10.2, se utilizó para el pre procesamiento de información, edición y elaboración de mapas. Estas tareas del SIG se dieron gracias al conjunto de aplicaciones integradas: ArcMap, ArcCatalog y ArcToolbox, con énfasis en la extensión Spatial Analyst.
- ArcHydroTools, extensión de ArcGis que permitió la delimitación de las cuencas y subcuencas.
- Excel 2007, sirvió para el apoyo del cálculo de los diferentes análisis estadísticos y para la elaboración de cuadros finales.
- Rs-Minerve, software que permite la generación de los modelos hidrológicos GR4J y SAC-SMA.

## **3.2. METODOLOGÍA**

### **3.2.1. ANÁLISIS DE CONSISTENCIA DE DATOS**

El análisis de la información hidrometeorológica se refiere al ajuste de los datos a condiciones homogéneas incluyendo la corrección de los mismos.

Inconsistencia es sinónimo de error sistemático y se presenta como saltos y tendencias, y la no homogeneidad es definida como los cambios de los datos originales con el tiempo (Aliaga, 1983).

Antes de utilizar los datos observados de las dieciséis estaciones meteorológicas y las dos estaciones hidrométricas en los modelos GR4J y SAC-SMA, existe la necesidad de realizar el análisis de los valores de precipitación y caudales. En el Anexo 2 se observa el análisis realizado para la consistencia de datos.

Se ha efectuado el análisis de información mediante el análisis estadístico, el cual es un proceso de inferencia para la media y desviación estándar de los diferentes periodos de información, mediante las pruebas estadísticas de T de Student y Fisher, respectivamente. Mediante estas pruebas se establece si existe diferencia estadística a un nivel significativo, de la media y varianza entre dos periodos de información considerados dudosos.

Para la identificación de los registros inconsistentes y no homogéneos se realizó el siguiente procedimiento:

### **a. Identificación de saltos**

Los saltos son formas determinísticas transitorias que permiten a una serie hidrológica periódica o no periódica pasar desde un estado a otro. Es decir, que la serie se comporta como si fueran dos series diferentes con sus respectivas medias, desviación estándar, etc.; las causas posibles que originan los saltos, son los cambios de lugar de las estaciones, derivación aguas arriba de una estación de control, entre otras.

La identificación de los saltos tuvo por objeto detectar la presencia del mismo y evaluar las causas que pueden haber ocasionado, sea esta por la intervención del hombre o por fenómeno natural. El procedimiento de identificación del salto es la siguiente:

#### **a.1. Análisis de histograma de precipitación**

Consiste en analizar visualmente la distribución de la información histórica para lo cual, ésta se grafica en coordenadas cartesianas, representando en el eje de las ordenadas el valor de la información y en el eje de abscisas, el tiempo respectivo; el gráfico resultante es denominado histograma de precipitación y caudal.

De los histogramas se deduce el período o períodos en los cuales la información es dudosa, así como también, los períodos cuya información es confiable.

Consiste en analizar visualmente la distribución temporal de toda la información disponible, para detectar la regularidad o irregularidad de los mismos. El histograma es la representación de la variable (precipitación o caudal) en el eje de las ordenadas y el variable tiempo (diario) en el eje de las abscisas.

### **b. Evaluación y/o cuantificación**

Luego de identificar el salto o quiebre de los registros históricos de cada estación, se realiza un análisis estadístico, es decir un proceso de interferencia para la media y desviación estándar, de ambos periodos; mediante las pruebas de T de Student y Fisher, respectivamente.

Habiéndose obtenido de los histogramas originales el periodo o periodos dudosos, se realiza la cuantificación mediante un análisis estadístico; es decir, se infiere sobre la diferencia de medias y la razón de desviación estándar usando los procedimientos paramétricos conocidos (Jayo, 2011).

### b.1. Prueba estadística de T de Student

La prueba estadística T de Student es poderosa para detectar la inconsistencia en la media, además de ser un test riguroso, excepto cuando la longitud de los dos periodos seleccionados para la comparación de sus medias no es igual, por lo que la distribución de los datos puede no ser imparcial.

Es recomendable aplicar la prueba T de Student, cuando los valores de  $n_1$  y  $n_2$  sean similares.

El estadístico de la T de Student está definido por la ecuación 4.

$$td = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\left( \frac{n_1 S_1^2 + n_2 S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \left( \frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right) \right)^{1/2}} \quad (4)$$

Siendo  $S_1^2$  y  $S_2^2$  las varianzas en los dos periodos de registro respectivamente.

Entonces  $n_1 S_1^2$  puede ser calculada con la ecuación 5.

$$n_1 S_1^2 = \sum_1^{n_1} x_i^2 - \frac{1}{n_1} \left( \sum_1^{n_1} x_i \right)^2 \quad (5)$$

Y de manera similar  $n_2 S_2^2$ .

El valor absoluto de  $td$  (calculado) se compara con el valor de la distribución T de Student ( $t$  de tabla) de dos colas y con  $v = n_1 + n_2 - 2$  (Grados de libertad) y con 5 % de nivel de significancia. Los valores de  $t$  de tabla se tienen en la Tabla 6.

Los criterios de decisión serán si:

$Td < \text{igual } t \text{ de tabla}$  (Existe consistencia en la media)

$Td > \text{igual } t \text{ de tabla}$  (No existe consistencia en la media)

### b.2. Prueba Estadística Fisher

El análisis consiste en probar, mediante la prueba "F", si los valores de la desviación estándar de las sub muestras son estadísticamente iguales o diferentes con un cinco por ciento de nivel de significancia ( $\alpha = 0.05$ )



$$H_0: S_1^2(x) = S_2^2(x) \tag{6}$$

$$H_0: S_1^2(x) \neq S_2^2(x)$$

Donde:

$S_1^2(x), S_2^2(x)$ : Variancia de los períodos 1 y 2

- Fisher Calculado (Fc)

$$F_c = \frac{S_1^2(x)}{S_2^2(x)}, \text{ si } S_1^2(x) > S_2^2(x) \tag{7}$$

$$F_c = \frac{S_2^2(x)}{S_1^2(x)}, \text{ si } S_2^2(x) > S_1^2(x)$$

- Fisher Tabla (Ft)

El valor crítico de F se obtiene en las tablas F de Fisher, con nivel de significancia ( $\alpha = 0.05$ ) y para grados de libertad según:

Grados de libertad del numerador =  $n_1 - 1$

Grados de libertad del denominador =  $n_2 - 1$

- Comparación del Fc con Ft

Sí:

$$F_c < F_t(95\%) : S_1(x) = S_2(x) \text{ Estadísticamente} \tag{8}$$

No necesita realizar corrección en los datos.

Sí:

$$F_c > F_t(95\%) : S_1(x) \neq S_2(x) \text{ Estadísticamente} \tag{9}$$

Se debe corregir los datos del período dudosos.

**Tabla 6: Valores de t de Student**

<b>Distribución t de Student</b>		
<b>Grados de Libertad</b>	<b>5% de nivel de significancia</b>	
	<b>Una cola</b>	<b>Dos colas</b>
17	1,740	2,110
18	1,734	2,101
19	1,729	2,093
20	1,725	2,086
21	1,721	2,080
22	1,717	2,074
23	1,714	2,069
24	1,711	2,064
25	1,708	2,060
26	1,706	2,056
27	1,703	2,052
28	1,701	2,048
29	1,699	2,045
30	1,697	2,042
40	1,684	2,021
60	1,671	2,000
120	1,658	1,980
Inf.	1,645	1,960

FUENTE: Chavarri, 2010

### **3.2.2. CARACTERÍSTICAS GEOMORFOLÓGICAS**

Son los parámetros necesarios para la estimación de descarga de un curso de agua los cuales son:

#### **a. Parámetros del relieve**

##### **a.1. Área de la cuenca (A)**

Es el tamaño de la superficie de cada cuenca expresada en km<sup>2</sup>. El área de una cuenca en general, se encuentra relacionada con los procesos que en ella ocurren. También, se ha comprobado que la relación del área con la longitud de la misma es proporcional y también que está inversamente relacionada a aspectos como la densidad de drenaje y el relieve relativo.

#### a.2. Perímetro de la cuenca (P)

Es la longitud de la divisoria de agua, la cual es una línea imaginaria que divide la precipitación que cae en cuencas vecinas y que encamina la escorrentía superficial resultante para uno u otro sistema fluvial. Expresada en km.

#### a.3. Pendiente media de la cuenca (Sc)

Parámetro importante en el estudio de toda la cuenca, tiene una relación y compleja con la infiltración del suelo, y la contribución del agua subterránea a la escorrentía. Es uno de los factores que controla el tiempo de escurrimiento y concentración de la lluvia en los canales de drenaje, y tiene importancia directa en la relación a las crecidas.

#### a.4. Rectángulo equivalente

El rectángulo equivalente es una transformación geométrica, que representar a la cuenca en un rectángulo de igual área, igual coeficiente de compacidad y misma repartición hipsométrica; además, de suponer que la distribución del suelo, vegetación y densidad de drenaje se encuentran diferenciadas por las áreas comprendidas entre curvas de nivel.

El lado mayor (L) del rectángulo equivalente es calculado mediante la ecuación 10, mientras que el lado menor (l) del rectángulo, es calculado mediante la ecuación 11.

$$L = \frac{Kc\sqrt{A}}{1.128} * \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.128}{Kc}\right)^2}\right) \quad (10)$$

$$l = \frac{Kc\sqrt{A}}{1.128} * \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.128}{Kc}\right)^2}\right) \quad (11)$$

Donde:

Kc: Coeficiente de compacidad

A: Área de la cuenca (km<sup>2</sup>)

#### a.5. Coeficiente de masividad (Cm)

El coeficiente de masividad se define como el cociente entre la pendiente media de la cuenca y su área. Se expresa mediante la ecuación 12.

$$C_m = \frac{S_c}{A} \quad (12)$$

Donde:

$C_m$ : Coeficiente de masidad

$S_c$ : Pendiente media de la cuenca (m/km)

$A$ : Área de la cuenca (km<sup>2</sup>)

## **b. Parámetros de forma**

### **b.1. Ancho de la cuenca (W)**

El ancho se define como la relación entre el área ( $A$ ) y la longitud de la cuenca ( $L$ ) y se designa por la letra ( $w$ ).

### **b.2. Coeficiente de compacidad ( $K_c$ )**

El coeficiente de compacidad  $K_c$  relaciona el perímetro de la cuenca con el perímetro de una cuenca teórica circular de igual área; estima, por tanto, la relación entre el ancho promedio del área de captación y la longitud de la cuenca. Se expresa mediante la ecuación 13.

$$K_c = \frac{0,28 * P}{\sqrt{A}} \quad (13)$$

Donde:

$K_c$ : Coeficiente de compacidad

$P$ : Perímetro de la cuenca, en km

$A$ : Área de la cuenca, en km<sup>2</sup>

Este valor adimensional, independiente del área estudiada tiene por definición un valor de 1 para cuencas imaginarias de forma exactamente circular. Los valores de  $K_c$  nunca serán inferiores a 1. El grado de aproximación de este índice a la unidad indica la tendencia a concentrar agua de escurrimiento, siendo más acentuado cuando más cercano sea a la unidad, lo cual quiere decir que entre más bajo sea  $K_c$  mayor será la concentración de agua. En la Tabla 7 se muestra la clasificación de la forma.

**Tabla 7: Índice de Gravelius para la evaluación de la forma**

CLASE	RANGO	DESCRIPCIÓN
Kc1	1 a 1,25	Forma casi redonda a oval – redonda
Kc2	1,25 a 1,5	Forma oval – redonda a oval – alargada
Kc3	1,5 a 1,75	Forma oval – alargada a alargada

FUENTE: Ortiz, 2004

### b.3. Factor de forma (F)

Expresa la relación entre el ancho promedio de la cuenca (w) y la longitud (L). Si  $F > 1$ , la forma de la cuenca es redondeada; si  $F < 1$ , la forma de la cuenca es alargada.

$$F = \frac{w}{L} = \frac{A}{L^2} \quad (14)$$

Donde:

F: Factor de forma

w: Ancho promedio de la cuenca, en km ( $w = A/L$ )

A: Área de la cuenca, en  $\text{km}^2$

L: Longitud del cauce principal, en km

**Tabla 8: Forma de la cuenca en función al factor de forma**

FACTOR DE FORMA	FORMA DE LA CUENCA
$F > 1$	Redondeada
$F < 1$	Alargada

FUENTE: Villón, 2002

### b.4. Relación de elongación (Re)

Se define como el cociente adimensional entre el diámetro de un círculo que tiene igual área que la cuenca y la longitud ( $L_c$ ) de la misma. La longitud ( $L_c$ ) se define como la más grande dimensión de la cuenca, a lo largo de una línea recta desde la salida hasta la divisoria, paralela al cauce principal. Se expresa mediante la ecuación 15.

$$Re = \frac{D}{L_c} = 1.1284 \frac{\sqrt{A}}{L_c} \quad (15)$$

Donde:

Re: Relación de elongación

A: Área de la cuenca (km<sup>2</sup>)

Lc: Longitud máxima de la cuenca (km)

Valores de Re cercanos a la unidad se encuentran correlacionados con relieves fuertes y pendientes pronunciadas.

#### **b.5. Relación de circularidad (Rc)**

El índice de circularidad de Miller compara el área de la cuenca con el área de un círculo cuya circunferencia es igual al perímetro de la cuenca. Se expresa mediante la ecuación 16.

$$Rc = \frac{4\pi A}{P^2} \quad (16)$$

Donde:

Rc: Relación de circularidad

P: Perímetro de la cuenca (km)

A: Área de la cuenca (km<sup>2</sup>)

Los valores oscilan de 0 a 1, y el máximo valor equivalente a la unidad, corresponde a una cuenca de forma circular.

#### **c. Parámetros del cauce**

##### **c.1. Longitud del cauce mayor (L)**

Es la longitud horizontal del cauce principal de la cuenca, desde su nacimiento hasta su salida.

##### **c.2. Pendiente del curso principal (S)**

La pendiente es el cociente, que resulta de dividir, el desnivel de los extremos del cauce y la proyección horizontal de su longitud. La pendiente del curso de agua influye en los valores de descarga del río de forma significativa.

**Tabla 9: Clasificación de la pendiente según D.S. N° 017-2009-AG**

<b>RANGO</b>	<b>TERMINO DESCRIPTIVO</b>
0 – 2 %	Plano o casi a nivel
2 – 4 %	Ligeramente inclinado
4 – 8 %	Moderadamente inclinado
8 – 15 %	Fuertemente inclinado
15 – 25 %	Moderadamente empinado
25 – 50 %	Empinado
50 – 75 %	Muy empinado
> 75 %	Extremadamente empinado

FUENTE: El peruano, 2009

### **3.2.3. PROCESAMIENTO CON EL SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA**

En la presente investigación se utilizó como una herramienta el software ArcMap 10.2, el cual es un programa computacional. Una de las extensiones del ArcMap 10.2 de mayor importancia es el ArcHydroTools que permitió realizar la delimitación y cálculo de los parámetros geomorfológicos de las cuencas estudiadas.

Previo al procedimiento en el ArcHydroTools, se procedió a realizar con la extensión Topo to Raster, la transformación de las curvas topográficas descargadas a un Modelo Digital (DEM).

#### **a. Depresiones del DEM**

El primer paso realizado en el procesamiento del DEM fue rellenar las depresiones (vacíos), por incremento de elevaciones de la celda, al nivel del terreno circundante con el fin de determinar la dirección del flujo. El relleno de depresiones permite fluir al agua por la superficie del terreno. Para el relleno de las depresiones se utilizó la herramienta Fill del ArcHydroTools.

**b. Dirección del flujo**

Para definir la dirección del flujo, en pendiente descendente, para cada celda, se utilizó la herramienta Flow Direction del ArcHydroTools, la capa resultante indicó la dirección hacia donde fluye el agua.

**c. Acumulación del flujo**

Este paso determinó celdas de drenaje aguas arriba, dada una celda, que fue calculado multiplicando, los valores de acumulación de flujo con el área de la celda. Para determinar la acumulación del flujo se utilizó la herramienta Flow Accumulation del ArcHydroTools.

**d. Definición de la red de drenaje**

Permitió la clasificación de todas las celdas con mayor acumulación de flujo, que fue definido previamente, como celdas pertenecientes a la red de corriente. La especificación puede ser definida en unidad de área o por el número de celdas, para este caso se definió por la unidad de área. La herramienta utilizada para la definición de la red de drenaje fue Stream Definition del ArcHydroTools.

**e. Segmentación de la red de drenaje**

Dividió la red de drenaje en segmentos de corriente, en las secciones de una red de drenaje que conectan dos sucesivas confluencias. Una confluencia y una salida, o división del drenaje. La herramienta utilizada para la segmentación de la red de drenaje fue Stream Segmentation del ArcHydroTools.

**f. Delimitación de sub cuencas**

Para la delimitación de las sub cuencas se usó la herramienta Catchment Grid Delineation del ArcHydroTools.

**g. Vectorización de sub cuencas y corrientes**

Convirtió las sub cuencas y corrientes a formato vectorial. La herramienta utilizada fue Catchment Polygon Processing y Drainage Line Processing del ArcHydroTools, para las sub cuencas y corrientes, respectivamente.

**h. Delimitación del área de estudio**

Para delimitar las cuencas de los ríos Pisco y San Juan se tomó como punto de desfogue las estaciones de aforo Letrayoc y Conta, respectivamente. La herramienta utilizada para la delimitación de las cuencas fue Batch subwatershed Delineation del ArcHydroTools.



En el Anexo 3 se aprecia gráficamente el proceso realizado con el sistema de información geográfica.

#### **3.2.4. SISTEMA DE MODELACIÓN HIDROLÓGICA RS-MINERVE**

El software Rs-Minerve simula la formación de la superficie libre de la escorrentía flujo y de propagación. Los modelos de precipitación – escorrentía GSM, SOCONT, SAC-SMA, GR4J y VHB se encuentran disponibles para la simulación del comportamiento hidrológico de cuencas hidrográficas.

Permite la simulación de múltiples escenarios climáticos o varios conjuntos de parámetros y condiciones iniciales para el estudio de la variabilidad y la sensibilidad de los resultados del modelo.

##### **a. Estación meteorológica virtual**

El objeto «estación virtual» (que se asocia con las coordenadas X, Y, Z) permite la distribución espacial de las variables meteorológicas (precipitación, temperatura, ETo) disponibles o estimadas de una base de datos, con referencia espacial en el sistema métrico de coordenadas.

Los métodos encontrados en el software para la distribución espacial de la precipitación, la temperatura y la ETo corresponden a los métodos de Thiessen y Shepard. El primer método, Thiessen, busca a la estación meteorológica más cercana para cada variable meteorológica. El segundo, Shepard, busca todas las estaciones disponibles que están en un radio de búsqueda y calcula la variable meteorológica en función de la ponderación de distancia inversa.

Para este estudio se utilizó la interpolación Shepard, puesto que permitió utilizar todas las estaciones de ambas cuencas y así abarcar una mayor variedad de información meteorológica.

La Tabla 10 muestra la lista de parámetros y condiciones iniciales, así como también los rangos de valores para cada parámetro de la estación virtual.

**Tabla 10: Lista de parámetros y condiciones iniciales para la estación meteorológica virtual**

<b>Objeto</b>	<b>Nombre</b>	<b>Unidad</b>	<b>Descripción</b>	<b>Rango de Valores</b>
Estación	X, Y, Z	-	Coordenadas de la estación virtual	-
	Radio de búsqueda	m	Radio de búsqueda de estaciones meteorológicas	> 0
	N° mínimo de estaciones	-	Número mínimo de estaciones utilizada para la interpolación	>= 1
	Gradiente P	m/s/m	Gradiente Precipitación	-
	Gradiente T	°C/m	Gradiente Temperatura	-0.007 a -0.004
	Gradiente ETP	m/s/m	Gradiente Evapotranspiración	-
	Coeff P	-	Coefficiente de corrección Precipitación	0.5 – 2
	Coeff T	°C	Coefficiente de corrección Temperatura	-2 – 2
	Coeff ETP	-	Coefficiente de corrección evapotranspiración	0.5 - 2

FUENTE: Manual técnico Rs-Minerve, 2014

### **a.1. Shepard interpolación**

La evaluación de una variable en una estación virtual “s” desde “n” estaciones meteorológicas localizadas en  $i = 1, 2, \dots, n$  se obtiene ponderando según la inversa del cuadrado de la distancia  $d_{i,s}$  entre la estación meteorológica  $i$  de la base de datos y la estación virtual “s”. Tal como se muestra en la ecuación.

$$d_{i,s} = \sqrt{(x_i - x_s)^2 + (y_i - y_s)^2} \quad (17)$$

Donde:

$x_i, y_i$ : Posición de la estación meteorológica “i” de la base de datos.

$x_s, y_s$ : Posición de la estación virtual “s”.

$r_s$ : distancia entre la estación meteorológica “i” y la estación virtual “s”.

Las estaciones meteorológicas “n” para la interpolación espacial en la estación “s” virtuales se determinan automáticamente respetando a la ecuación 18. Por lo tanto, el número “n” de estaciones meteorológicas es variable para cada par (s, rs). Sin embargo, se puede fijar un número mínimo de estaciones a utilizar para la interpolación.

$$d_{i,s} \leq r_s \quad (18)$$

Donde:

$r_s$ : radio de búsqueda de estaciones meteorológicas.

El método de interpolación Shepard toma en cuenta la evolución de las variables meteorológicas en función de la altitud. Por lo tanto, las variables  $P_i$ ,  $T_i$ ,  $ETo$ , localizada en la altitud  $z_i$  son reemplazados por sus equivalentes relacionados con la altitud de la estación virtual “s”, de acuerdo con una relación lineal con una elevación constante gradiente  $dXs/dz$ , correspondiente a los gradientes de precipitación (Gradiente P,  $dPs/dz$ ), temperatura (Gradiente T,  $dT/dz$ ) o la evapotranspiración (Gradiente  $ETo$ ,  $dETo/dz$ ). Además, un coeficiente para la precipitación, la evapotranspiración o la temperatura potencial también se incluye en el método para obtener el valor final en la estación “s” virtual, tal como se presentan en las ecuaciones 19, 20 y 21.

$$P_s = \text{Coeff}P_s \cdot \frac{\sum_{i=1}^n P_i + \frac{dPs}{dz} * (z_s - z_i) * \frac{1}{d_{i,s}^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_{i,s}^2}} \quad (19)$$

$$T_s = \text{Coeff}T_s \cdot \frac{\sum_{i=1}^n T_i + \frac{dT_s}{dz} * (z_s - z_i) * \frac{1}{d_{i,s}^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_{i,s}^2}} \quad (20)$$

$$ETos = \text{CoeffETos} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n P_i + \frac{dETos}{dz} * (z_s - z_i) * \frac{1}{d_{i,s}^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_{i,s}^2}} \quad (21)$$

Donde:

Ps: Valor de la precipitación en la estación virtual de “s”

Ts: Valor de la temperatura en la estación virtual de “s”

ETos: Valor de la evapotranspiración en la estación virtual de “s”

Pi: Valor de la precipitación en la estación meteorológica “i”

Ti: Valor de la temperatura en la estación meteorológica “i”

EToi: Valor de la evapotranspiración en la estación meteorológica “i”

CoeffPs: Coeficiente de precipitación

CoeffTs: Coeficiente de temperatura (°C)

CoeffETos: Coeficiente de evapotranspiración

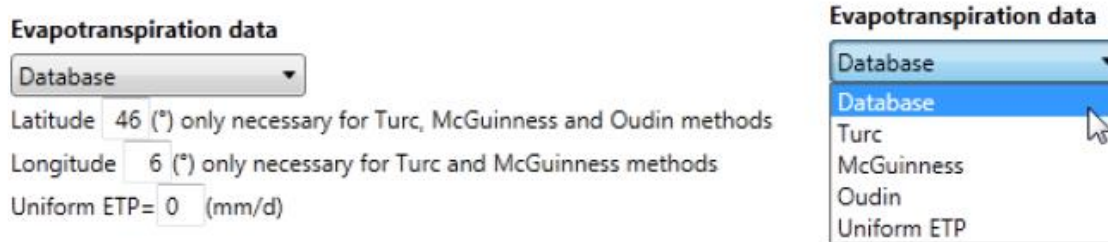
Zs: Altitud de la estación virtual de “s” (m.s.n.m)

Zi: Posición de la estación meteorológica “i” de la base de datos (m.s.n.m)

En el anexo 4 se muestra la matriz de pesos ponderados para las estaciones virtuales según el método de interpolación de Shepard para las cinco subcuencas de la cuenca del río Pisco, así como también para las cinco subcuencas de la cuenca del río San Juan.

## **a.2. Evapotranspiración (ETo)**

Si no hay valores de ETo disponibles en la base de datos, Rs-Minerve ofrece también la posibilidad del cálculo de la ETo con diferentes métodos directamente en la estación virtual. Estos métodos pueden ser seleccionados en MINERVE Ajustes RS, en el marco de la evapotranspiración. En la Figura 21 se muestra los cuatro métodos de cálculo para la ETo que cuenta el software.



**Figura 12: Selección del cálculo ETo**

FUENTE: Manual Técnico Rs-Minerve, 2014

Los métodos disponibles dentro del software son: Turc, McGuinness, Oudin y ETP uniforme; el software también permite cargar los datos de ETo calculados previamente, para esta investigación se realizara el cálculo mediante la fórmula de Hargreaves, el cual se describe a continuación.

### a.3. Cálculo de la evapotranspiración (Eto)

Para el cálculo de la evapotranspiración (ETo) se utilizó la fórmula de Hargreaves, el cual necesita solamente datos de temperatura y de radiación solar. Expresada mediante la ecuación 22.

$$ETo = 0.0135 * (t_{med} + 17.78) * Rs \quad (22)$$

Donde:

ETo: Evapotranspiración diaria (mm/día)

$t_{med}$ : Temperatura media (°C)

Rs: Radiación solar incidente (mm/día)

La radiación solar incidente, Rs, se evalúa a partir de la radiación solar extraterrestre (la que llega a la parte exterior de la atmósfera, que sería la que llegaría al suelo si no existiera atmósfera); ésta última aparece según los autores como R0, y se lee en tablas en función de la latitud del lugar y del mes.

Para la obtención de la radiación solar incidente (Rs), se utiliza la ecuación 23.

$$Rs = R_0 * KT * (t_{max} - t_{min})^{0.5} \quad (23)$$

Donde:

Rs = Radiación solar incidente (mm/día)

R0 = Radiación solar extraterrestre (tabulada)

KT = coeficiente

tmax = temperatura diaria máxima (°C)

tmin = temperatura diaria mínima (°C)

El coeficiente KT de la ecuación 23 es un coeficiente empírico que se puede calcular a partir de datos de presión atmosférica, pero Hargreaves, recomienda:

KT = 0.162 para regiones del interior

KT = 0.19 para regiones costeras

Para esta investigación el KT utilizado es 0.19 debido a que la zona de estudio se encuentra en una región costera (Sánchez, 2010).

En la Figura 13 se muestra la radiación solar extraterrestre R0 para diferentes latitudes del hemisferio Sur. La zona de estudio se encuentra en el hemisferio sur 18.

Lat. deg.	Southern Hemisphere											
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	July	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
70	41.4	28.6	15.8	4.9	0.2	0.0	0.0	2.2	10.7	23.5	37.3	45.3
68	41.0	29.3	16.9	6.0	0.8	0.0	0.0	3.2	11.9	24.4	37.4	44.7
66	40.9	30.0	18.1	7.2	1.5	0.1	0.5	4.2	13.1	25.4	37.6	44.1
64	41.0	30.8	19.3	8.4	2.4	0.6	1.2	5.3	14.4	26.3	38.0	43.9
62	41.2	31.5	20.4	9.6	3.4	1.2	2.0	6.4	15.5	27.2	38.3	43.9
60	41.5	32.3	21.5	10.8	4.4	2.0	2.9	7.6	16.7	28.1	38.7	43.9
58	41.7	33.0	22.6	12.0	5.5	2.9	3.9	8.7	17.9	28.9	39.1	44.0
56	42.0	33.7	23.6	13.2	6.6	3.9	4.9	9.9	19.0	29.8	39.5	44.1
54	42.2	34.3	24.6	14.4	7.7	4.9	6.0	11.1	20.1	30.6	39.9	44.3
52	42.5	35.0	25.6	15.6	8.8	6.0	7.1	12.2	21.2	31.4	40.2	44.4
50	42.7	35.6	26.6	16.7	10.0	7.1	8.2	13.4	22.2	32.1	40.6	44.5
48	42.9	36.2	27.5	17.9	11.1	8.2	9.3	14.6	23.3	32.8	40.9	44.5
46	43.0	36.7	28.4	19.0	12.3	9.3	10.4	15.7	24.3	33.5	41.1	44.6
44	43.2	37.2	29.3	20.1	13.5	10.5	11.6	16.8	25.2	34.1	41.4	44.6
42	43.3	37.7	30.1	21.2	14.6	11.6	12.8	18.0	26.2	34.7	41.6	44.6
40	43.4	38.1	30.9	22.3	15.8	12.8	13.9	19.1	27.1	35.3	41.8	44.6
38	43.4	38.5	31.7	23.3	16.9	13.9	15.1	20.2	28.0	35.8	41.9	44.5
36	43.4	38.9	32.4	24.3	18.1	15.1	16.2	21.2	28.8	36.3	42.0	44.4
34	43.4	39.2	33.0	25.3	19.2	16.2	17.4	22.3	29.6	36.7	42.0	44.3
32	43.3	39.4	33.7	26.3	20.3	17.4	18.5	23.3	30.4	37.1	42.0	44.1
30	43.1	39.6	34.3	27.2	21.4	18.5	19.6	24.3	31.1	37.5	42.0	43.9
28	43.0	39.8	34.8	28.1	22.5	19.7	20.7	25.3	31.8	37.8	41.9	43.6
26	42.8	39.9	35.3	29.0	23.5	20.8	21.8	26.3	32.5	38.0	41.8	43.3
24	42.5	40.0	35.8	29.8	24.6	21.9	22.9	27.2	33.1	38.3	41.7	43.0
22	42.2	40.1	36.2	30.6	25.6	23.0	24.0	28.1	33.7	38.4	41.4	42.6
20	41.9	40.0	36.6	31.3	26.6	24.1	25.0	28.9	34.2	38.6	41.2	42.1
18	41.5	40.0	37.0	32.1	27.5	25.1	26.0	29.8	34.7	38.7	40.9	41.7
16	41.1	39.9	37.2	32.8	28.5	26.2	27.0	30.6	35.2	38.7	40.6	41.2
14	40.6	39.7	37.5	33.4	29.4	27.2	27.9	31.3	35.6	38.7	40.2	40.6
12	40.1	39.6	37.7	34.0	30.2	28.1	28.9	32.1	36.0	38.6	39.8	40.0

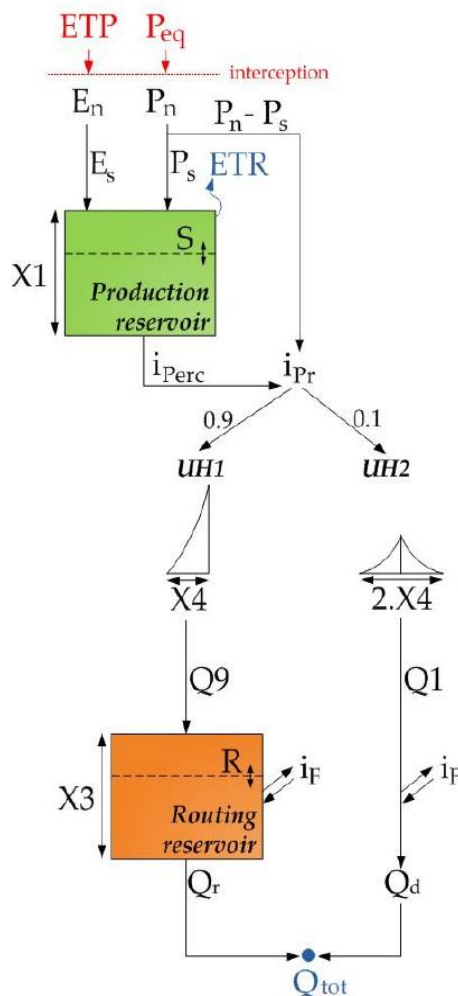
**Figura 13: Tabla de radiación solar extraterrestre**

FUENTE: <http://www.fao.org/docrep/annex2.meteorologicaltables>

**b. Modelo GR4J**

El modelo diario de precipitación-caudal GR4J fue desarrollado por Perrin (2003), es un modelo de cuatro parámetros que se utiliza para simular los caudales diarios en una cuenca. Se trata de un modelo empírico ya que descompone la transformación de la precipitación en caudal en subprocesos que son tratados de manera global, estos subprocesos toman la forma de reservas o captaciones que se llenan y se vacían en el curso del tiempo, permitiendo al sistema tener una memoria de las condiciones anteriores; la estructura del modelo es similar a la de un modelo conceptual.

El modelo se aplica con pocos insumos, precipitación y evapotranspiración; el GR4J se encuentra esquemáticamente constituido por captaciones interconectadas que aseguran la transformación de la precipitación diaria en caudal diario, siguiendo la representación del sistema hidrológico modelado (Foehn et all, 2014).



**Figura 14: Modelo GR4J**

FUENTE: Manual Técnico Rs-Minerve, 2014

**Tabla 11: Lista de parámetros y condiciones iniciales para el modelo GR4J**

Nombre	Unidad	Descripción	Rango
A	m <sup>2</sup>	Superficie de la cuenca	> 0
X1	m	Capacidad del almacén de producción	0.1 – 1.2
X2	m	Coefficiente de intercambio de agua	-0.005 – 0.003
X3	m	Capacidad del almacén de enrutamiento	0.02 – 0.3
X4	d	Tiempo base UH.	1.1 – 2.9
<b>Condiciones Iniciales</b>			
Slni	m	Contenido inicial de agua en el reservorio de producción	-
Rlni	m	Nivel inicial de agua en el reservorio.	-

FUENTE: Manual Técnico Rs-Minerve, 2014

El primer cálculo es la neutralización de  $P_{eq}$  por  $E_{To}$  para determinar una intensidad de lluvia neta ( $P_n$ ) y una evapotranspiración neta ( $E_n$ ) según las ecuaciones 24 y 25.

$$\begin{aligned}
 P_n &= P_{eq} - E_{To} & \text{Si: } P \geq E_{TP} \\
 E_n &= 0 \\
 P_n &= 0 \\
 E_n &= E_{To} - P_{eq} & \text{Si: } P < E_{TP}
 \end{aligned}
 \tag{24}$$

Donde:

$P_n$ : Intensidad de la lluvia neta

$P_{eq}$ : Precipitación equivalente

$E_{To}$ : Evapotranspiración

$E_n$ : Evapotranspiración neta

Cuando la intensidad de lluvia neta ( $P_n$ ) no es cero, una parte de esta que alimenta el embalse de producción ( $P_s$ ) alimenta el depósito de producción ( $S$ ), como se presenta en ecuación 26. Del mismo modo, cuando la evapotranspiración neta ( $E_n$ ) no es cero, la evapotranspiración de referencia, desde el depósito de producción ( $E_s$ ) se calcula en función al nivel de agua en el depósito de producción tal como se describe en la ecuación 26.



$$P_s = \frac{d}{dt} \frac{X1 * (1 - \left(\frac{S}{X1}\right)^2) * \tanh\left(\frac{P_n * dt}{X1}\right)}{1 + \left(\frac{S}{X1}\right) * \tanh\left(\frac{P_n * dt}{X1}\right)} \quad (25)$$

$$E_s = \frac{d}{dt} \frac{S * (2 - \left(\frac{S}{X1}\right) * \tanh\left(\frac{E_n * dt}{X1}\right))}{1 + \left(\frac{S}{X1}\right) * \tanh\left(\frac{E_n * dt}{X1}\right)} \quad (26)$$

Donde:

$P_s$ : Intensidad de la lluvia que alimenta el embalse de producción

$X1$ : Capacidad máxima de embalse de la producción  $S$

$S$ : Contenido de agua en el depósito de producción

$E_s$ : Evapotranspiración desde el depósito de producción

La intensidad de percolación ( $iPerc$ ) que fluye desde el depósito de producción se calcula con la ecuación 27.

$$iPerc = \frac{d}{dt} (S + (P_s - E_s) * dt) * \left(1 - \left(1 + \left(\frac{4}{9} * \frac{(S + (P_s - E_s) * dt)^4}{X1}\right)\right)^{-1/4}\right) \quad (27)$$

Donde:

$iPerc$ : Intensidad percolación.

Finalmente, la variación en el depósito de producción  $S$  se obtiene según la ecuación 28.

$$\frac{dS}{dt} = P_s - E_s - iPerc \quad (28)$$

$$S \geq 0$$

La cantidad de agua ( $iPr$ ) que va al depósito de encaminamiento es proporcionada por:

$$iPr = iPerc + (P_n - P_s) \quad (29)$$

Donde:

$iPr$ : Intensidad que fluye hacia el depósito de enrutamiento.

Después, para el cálculo de hidrogramas unitarios, los DPI se divide en dos componentes de flujo: 90 por ciento se encaminan por un UH1 hidrograma unitario y un depósito de enrutamiento y el 10 por ciento por un simétrico unidad UH2 hidrograma. UH1 y UH2 dependen del parámetro X4, que es el tiempo base.

Las ordenadas de los hidrogramas se calculan a partir de curvas SH1 y SH2, que corresponden al hidrograma acumulado. SH1 y SH2 se definen en función de la etapa de tiempo t como se presenta en las ecuaciones 30 y 31. Las ordenadas de UH1 y UH2 se calculan mediante las ecuaciones 32 y 33.

$$\begin{aligned}
 &SH1_t=0 \quad Si:t\leq 0 \\
 &SH1_t=\left(\frac{t}{X4}\right)^{5/2} \quad Si:0<t<X4 \\
 &SH1_t=1 \quad Si:t\geq X4
 \end{aligned} \tag{30}$$

$$\begin{aligned}
 &SH2_t=0 \quad Si:t\leq 0 \\
 &SH2_t=\frac{1}{2}*\left(\frac{t}{X4}\right)^{5/2} \quad Si:0<t<X4 \\
 &SH2_t=1-\frac{1}{2}*\left(2-\frac{t}{X4}\right)^{5/2} \quad Si:X4\leq t\leq 2*X4 \\
 &SH2_t=1 \quad Si:t\geq 2*X4
 \end{aligned} \tag{31}$$

$$UH1_j=SH1_j-SH1_{j-1} \tag{32}$$

$$UH2_j=SH2_j-SH2_{j-1} \tag{33}$$

Donde:

SH1: Hidrograma 1 de S

SH2: Hidrograma 2 de S

t: Tiempo

X4: Base de tiempo

UH1: Hidrograma de SH1

UH2: Hidrograma de SH2

Entonces, en cada paso de tiempo k, las salidas Q1 y Q9 de los dos hidrogramas corresponden a la convolución de las intensidades anteriores. Las ecuaciones 34 y 35 muestran el cálculo de las salidas.

$$Q9=0.9* \sum_{j=1}^l (UH1_j*iPr_{k-j-l}) \quad (34)$$

$$Q1=0.1* \sum_{i=1}^m (UH2_j*iPr_{k-j-l}) \quad (35)$$

Donde:

Q9: Flujo unitario del hidrograma UH1

Q1: Flujo unitario del hidrograma UH2

M j: Día entero

l = valor entero de X4 + 1

m = valor entero de 2 \* X4 + 1

Entonces, una función de intercambio (iF) con el exterior no atmosférica produce el cambio de agua subterránea de acuerdo a la ecuación 36 (interpretación física de esta función, no es directa). Luego, el depósito de enrutamiento (Qr') se vacía, el cual se calcula mediante la ecuación 37.

$$iF=\frac{d}{dt}*X2*\left(\frac{R}{X3}\right)^{7/2} \quad (36)$$

$$Qr'=\frac{d}{dt}*(R+(Q9+iF)*dt)*\left(1-\left(1+\left(\frac{R+(Q9+iF)*dt}{X3}\right)^4\right)^{-1/4}\right) \quad (37)$$

Donde:

iF: Función de intercambio

X2: Coeficiente de intercambio de agua, positivo para las contribuciones, negativo para pérdidas debido a la infiltración o cero cuando no hay intercambio

R: Nivel de agua en el depósito de enrutamiento

X3: Capacidad de enrutamiento en un día de depósito

Qr': Depósito de enrutamiento

La variación del nivel de agua en el depósito de enrutamiento es:

$$\frac{dR}{dt} = Q_9 - iF - Q_r \quad (38)$$

$$R \geq 0$$

El flujo de salida Q1 del hidrograma UH2 tiene también el mismo cambio de proporcionar flujo complementario a Qd.

$$Q_d' = Q_1 + iF \quad (39)$$

Donde:

Qd ': Salida complementaria unitaria.

Finalmente, las salidas del modelo se calculan tal como se presenta en las ecuaciones 40 y 41 y el flujo total en la salida, Qtot, tal como se presenta en la ecuación 42:

$$Q_r = Q_r' * A \quad (40)$$

$$Q_d = Q_d' * A \quad (41)$$

$$Q_{total} = Q_r' + Q_d \quad (42)$$

Donde:

Qr: Flujo de salida desde el depósito de enrutamiento

A: Superficie de la cuenca

Qd: Salida complementaria

Qtot: Salida total

Las variables asociadas a este modelo son  $S_{lni}$  y  $R_{lni}$ . Los parámetros para ajustar son  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$  y  $X_4$ . El parámetro  $A$  se supone que es constante después de su cálculo.

Las entradas del modelo son la precipitación equivalente ( $P_{eq}$ ) y la evapotranspiración ( $E_{To}$ ). La salida es la descarga total en la salida del modelo ( $Q_{tot}$ ).

### **c. Modelo SAC-SMA**

El modelo de Sacramento es quizá el más popular de modelo hidrológico aplicable a crecidas y que pretenden una representación con sentido físico de la cuenca.

El modelo determina los caudales a partir de la precipitación y la evapotranspiración en la cuenca. Utiliza, además, un grupo de almacenamientos con determinada capacidad, los cuales están conectados por procesos que permiten al sistema representar muchas de las condiciones de humedad del suelo que controlan la producción de caudal. El agua de los almacenamientos puede salir de estos a través de tres caminos que representan la evapotranspiración, la percolación y la descarga lateral. El modelo de Sacramento es un modelo agregado en el que se utilizan variables globales sobre toda la cuenca para representar los siguientes elementos:

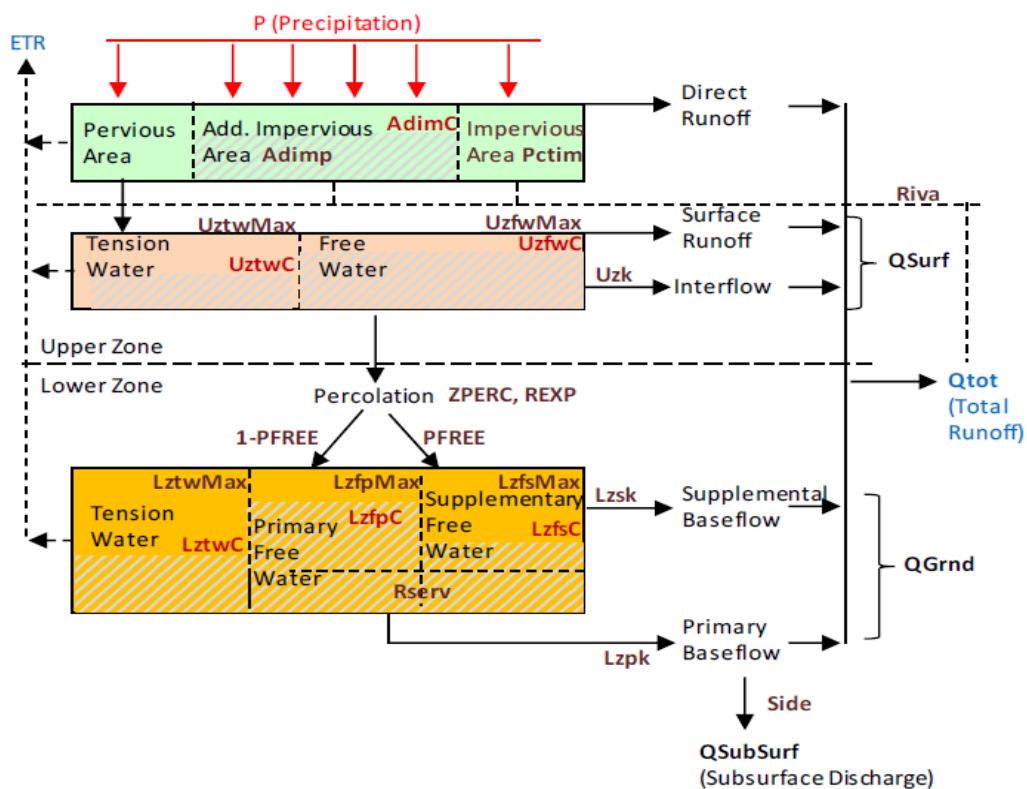
- La evaporación.
- El almacenamiento de agua capilar en el suelo.
- El almacenamiento de agua libre en la capa superior del suelo.
- La percolación desde el almacenamiento de agua libre en la capa superior del suelo hacia la capa inferior.
- El almacenamiento de agua capilar en la capa inferior.
- El almacenamiento de agua libre en la capa inferior (principal y suplementario).
- El caudal de agua subterránea no observable en el río.
- La escorrentía directa proveniente de las zonas impermeables. La escorrentía superficial ocurre cuando la intensidad de la lluvia supera la tasa de infiltración (flujo hortoniano).
- El interflujo cuando la capa superior de almacenamiento del suelo se encuentra saturada y se presenta por descarga lateral desde un almacenamiento de agua freática.

- El flujo base suplementario que corresponde a una respuesta rápida de la zona de almacenamiento inferior del suelo.
- El flujo base principal procedente de la zona de almacenamiento inferior del suelo, que constituye la descarga con respuesta lenta.

Para la simulación de eventos, el modelo de Sacramento divide la cuenca en “áreas Sacramento” que se representan como unos planos inclinados que drenan hacia un canal y, tanto sobre los planos como sobre el canal, la escorrentía se traslada de acuerdo a la ecuación de la onda cinemática utilizando la ecuación de Manning. La escorrentía que se produce en cada área de Sacramento se transita y se agrega aguas abajo sobre la red de canales.

El modelo de Sacramento es un modelo con 16 parámetros que definen las capacidades de las zonas del suelo, las tasas de drenaje de las zonas, la forma de la curva de percolación y los tamaños de las áreas impermeables. El producto de salida del modelo SAC-SMA son las series temporales de escorrentías y humedad del suelo (Smith, 1999).

En la Figura 15 se muestra el esquema conceptual del modelo SAC-SMA.



**Figura 15: Esquema conceptual del modelo SAC-SMA**

FUENTE: Manual Técnico Rs-Minerve, 2014

**Tabla 12: Lista de parámetros y condiciones iniciales para el modelo SAC-SMA**

<b>Nombre</b>	<b>Unidad</b>	<b>Descripción</b>	<b>Rango</b>
A	m <sup>2</sup>	Superficie de la cuenca	>0
Adimp	-	Máxima fracción de un área impermeable adicional debido a la saturación	0 – 0.2
Pctim	-	Fracción permanente de área impermeable	0 – 0.05
Riva	-	Fracción de rivera zona vegetal	0 – 0.2
UztlwMax	m	Capacidad de agua de tensión zona alta	0.01 – 0.15
UzflwMax	m	Capacidad de agua libre zona alta	0.005 – 0.10
Uzk	1/d	Tasa de agotamiento interflujo desde el almacenamiento de agua zona libre superior	0.10 – 0.75
Zperc	-	Relación de la curva máximo y mínimo de percolación	10 – 350
Rexp	-	Parámetro de forma de la curva de percolación	1 – 4
Pfree	-	Fracción percolación que va directamente a los depósitos de agua de zonas francas menor	0 – 0.6
LztlwMax	m	Zona de baja capacidad de agua de tensión	0.05 – 0.40
LzflpMax	m	Zona inferior libre primaria de capacidad de agua	0.03 – 0.80
LzflsMax	m	Zona inferior libre suplementaria a la capacidad de agua	0.01 – 0.40
Rserv	-	Fracción de zona inferior de agua libre no transferible a zona inferior	0 - 1
Lzpk	1/d	Tasa de agotamiento del almacenamiento de agua libre inferior principal de la zona	0.001 – 0.3
Lzsk	1/d	Tasa de agotamiento de la zona inferior de almacenamiento de agua libre suplementario	0.02 – 0.3
Side	-	Relación de percolación profunda de almacenamientos de agua libre de la zona baja	0 – 0.5
<b>Condiciones Iniciales</b>			
Adimlni	m	Contenido inicial de agua en la zona de tensión Adimp	-
Uztlwni	m	Contenido inicial de agua en la zona superior.	-
Uzflwni	m	Contenido inicial de agua libre en la zona superior	-
Lztlwni	m	Contenido inicial de agua en la zona de tensión baja	-

Continuación

LzfpIni	m	Contenido inicial libre suplementario de la zona baja	-
LzfsIni	m	Contenido inicial libre de la zona principal	-

FUENTE: Manual Técnico Rs-Minerve, 2014

#### d. Aplicación de los modelos

Luego de verificar la consistencia de los registros de precipitación y caudal, se aplicó los modelos en las cuencas. Los modelos GR4J y SAC-SMA, usaron la información base a partir de archivos en Microsoft Excel que fueron trasladados a la base del programa Rs-Minerve; la delimitación y los parámetros calculados de las cuencas en estudio también fueron exportados a la base del software.

##### d.1. Construcción de la base de datos

La primera etapa es la construcción de la base de registro de información el cual contiene datos de precipitación, temperatura, evapotranspiración y caudal. En la Figura 16 se observa la estructura de la base datos para las dos cuencas en estudio.



**Figura 16: Estructura de la base de datos del software Rs-Minerve**

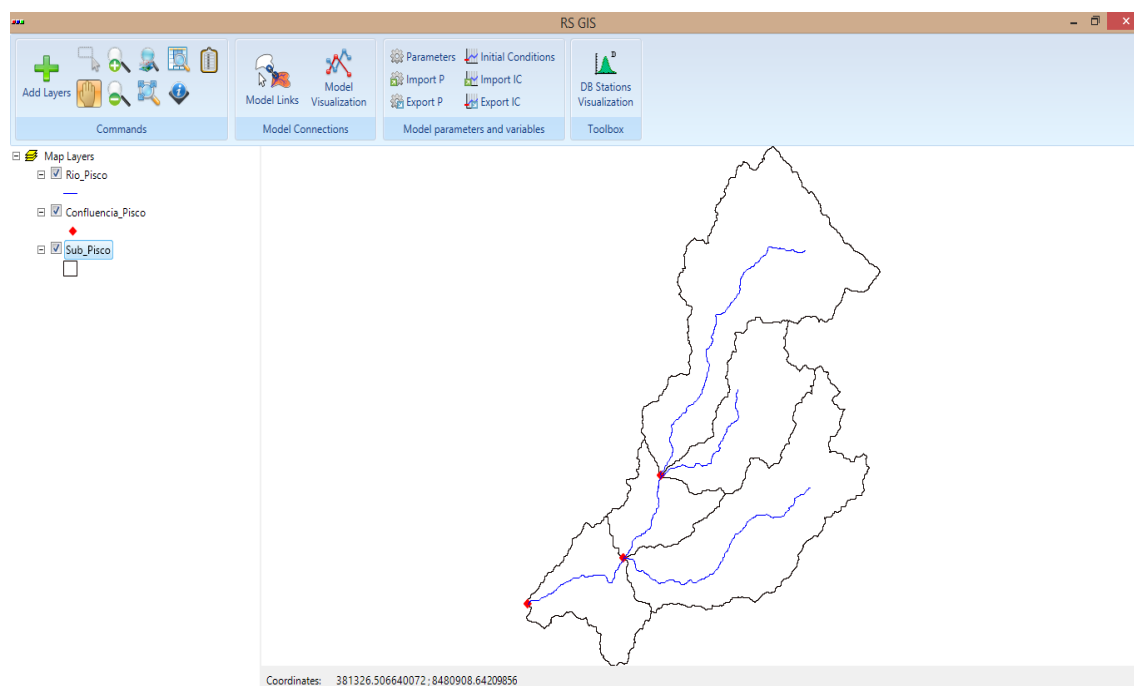
FUENTE: Elaboración propia

##### d.2. Construcción del modelo hidrológico

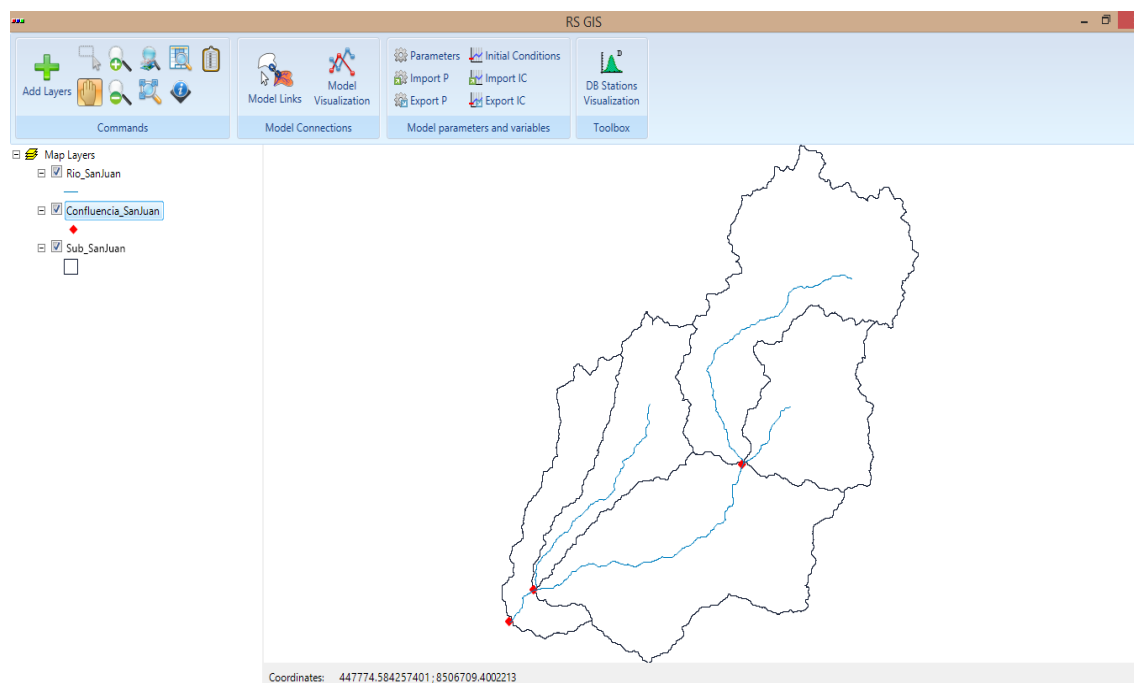
Para construir el modelo hidrológico se utilizó el módulo RS GIS del software Rs-Minerve. En este módulo, se carga las distintas capas de shapefiles (subcuencas, ríos, puntos de



confluencia y la desembocadura). En las Figuras 17 y 18 se observa las capas cargadas al software Rs-Minerve para la zona en estudio



**Figura 17: Capas de las subcuencas, ríos y confluencias de la cuenca del río Pisco**  
FUENTE: Elaboración propia



**Figura 18: Capas de las subcuencas, ríos y confluencias de la cuenca del río San Juan**  
FUENTE: Elaboración propia

A partir de estas capas se crean los objetos hidrológicos (GR4J y SAC-SMA); los elementos contenidos en cada capa, se exportaron (datos de coordenadas XYZ de los centros de gravedad de cada subcuenca, su área y perímetro de contorno), para el caso de la capa Sub\_Cuenca; en el caso de la capa Ríos las propiedades fueron la longitud de cada tramo del río así como su pendiente.

El esquema resultante para cada modelo y cada cuenca se presenta en las Figuras 19 al 22.

### **d.3. Calibración y validación de los modelos**

La calibración se realizó de manera manual, es decir, mediante ensayos de prueba y error, hasta encontrar los valores estadísticos de bondad de ajuste más óptimos los cuales reducen la incertidumbre entre los valores obtenidos con la simulación y los valores observados.

Para la etapa de calibración se usó los datos de enero 1980 – diciembre 1991, y para la validación enero 1992 – diciembre 2002.

Se utilizaron seis parámetros estadísticos para determinar el grado de confiabilidad de la calibración y validación de la simulación los cuales fueron: eficiencia de Nash Sutcliffe, coeficiente de Nash Sutcliffe para los valores del logaritmo, correlación de Pearson, Bias Score, error relativo al volumen y valores picos normalizado.

#### a) Eficiencia de Nash Sutcliffe

El criterio de Nash-Sutcliffe se utiliza para evaluar el poder predictivo de modelos hidrológicos. Se expresa mediante la ecuación 43.

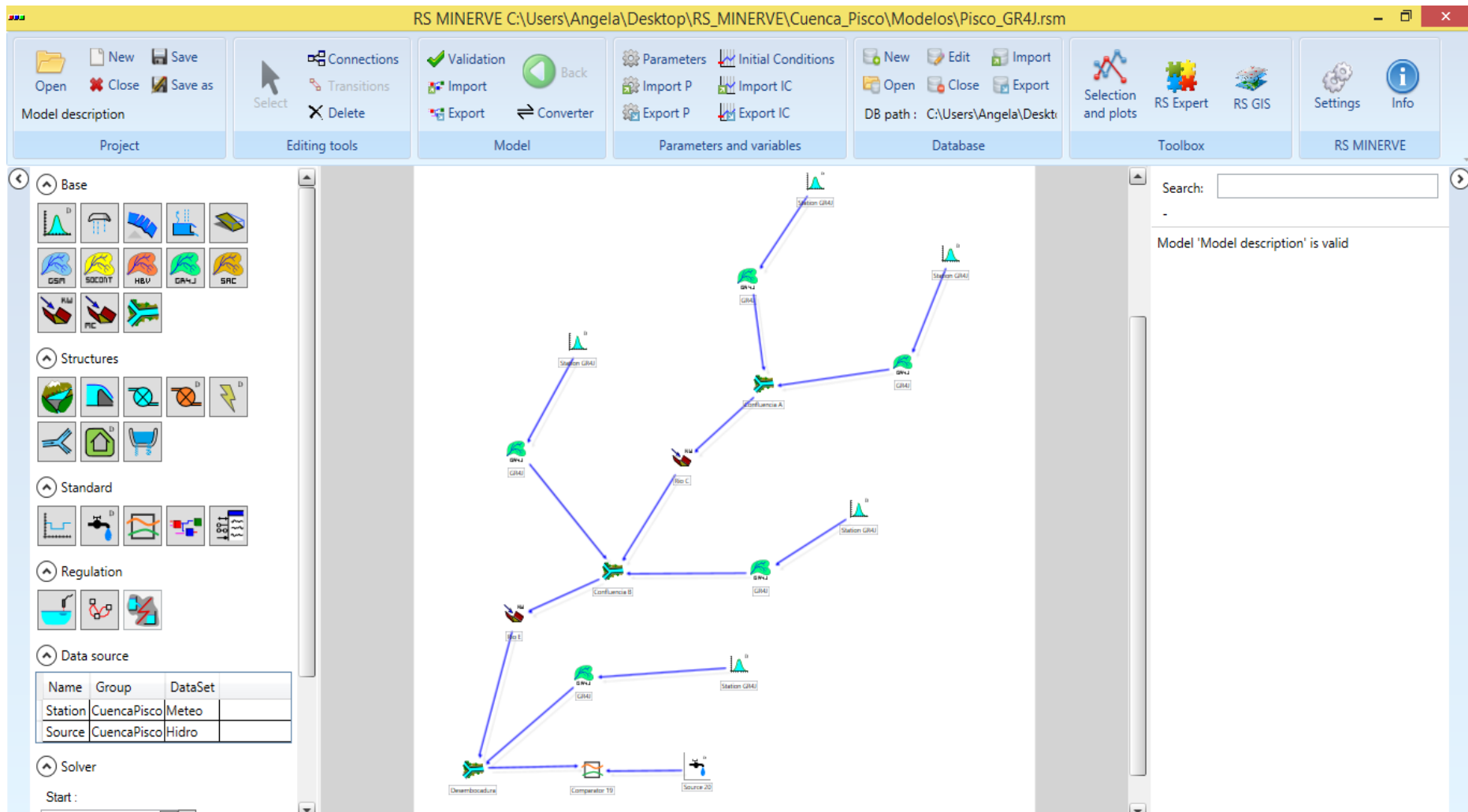
$$\text{Nash} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{\text{sim},i} - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q}_i)^2} \quad (43)$$

Donde:

$Q_{\text{sim},i}$  : Caudal simulado para el día  $i$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

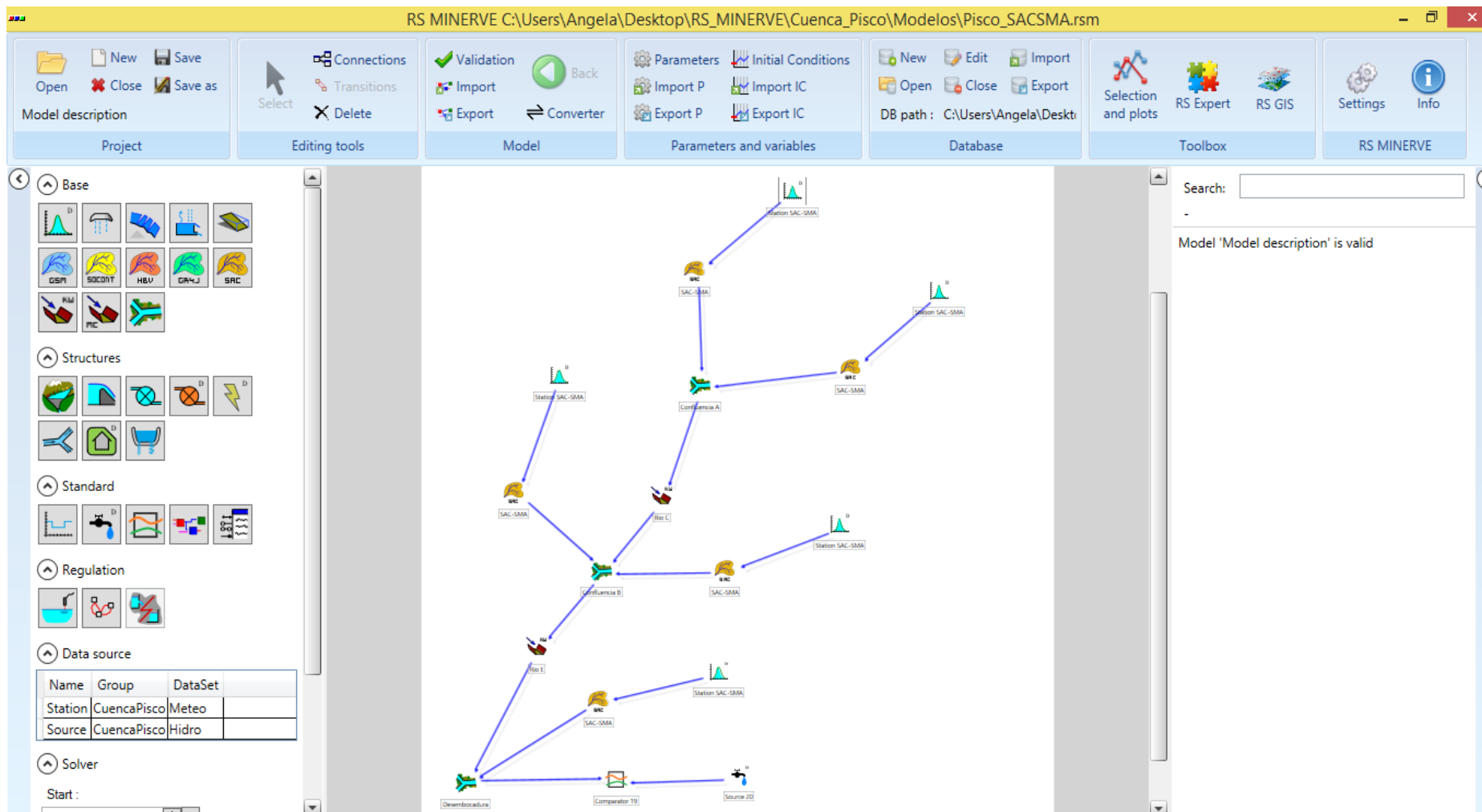
$Q_i$  : Caudal observado para el día  $i$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$\bar{Q}_i$  : Media del caudal ( $\text{m}^3/\text{s}$ )



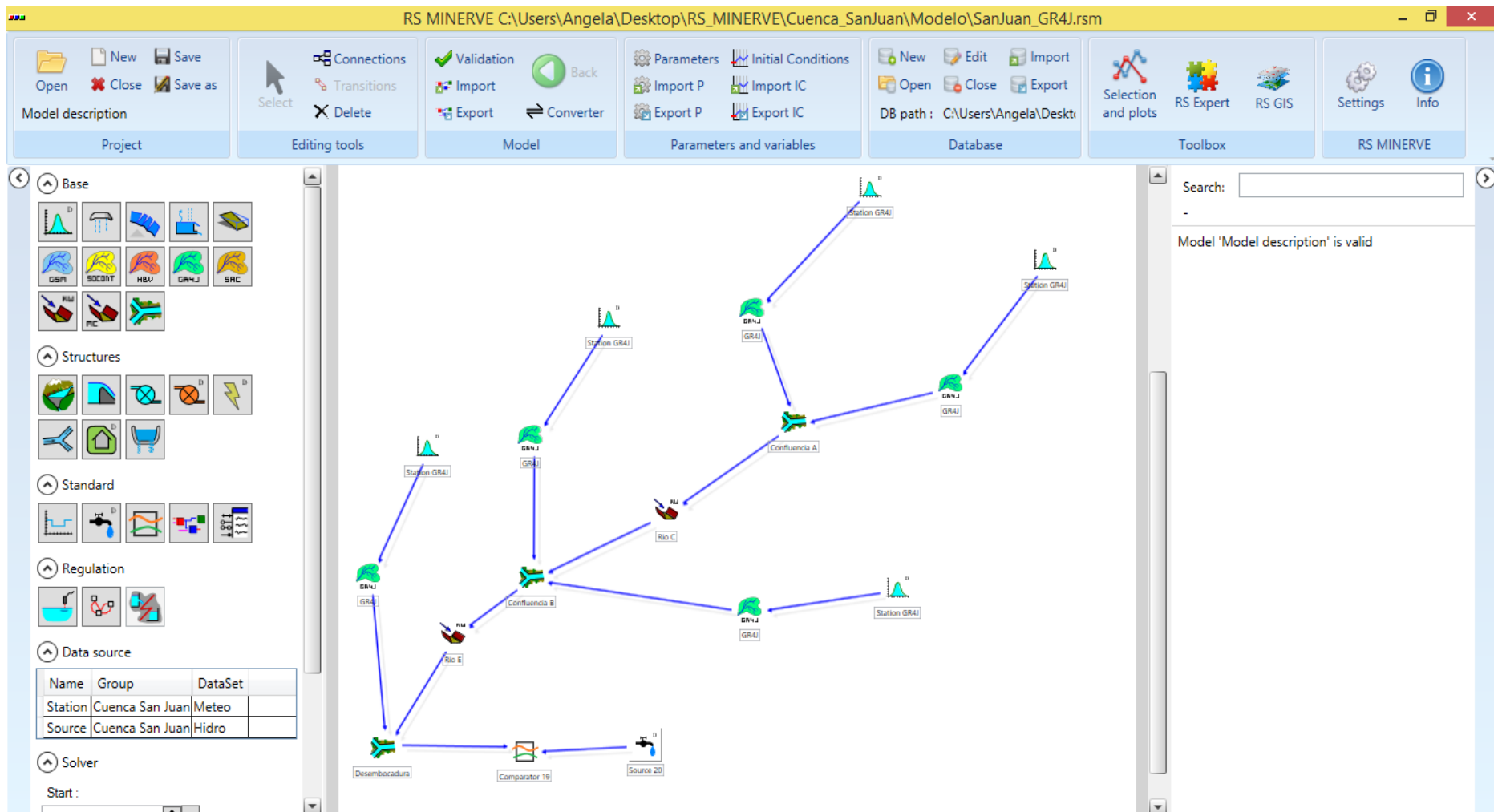
**Figura 19: Topología del modelo GR4J para la cuenca del río Pisco**

FUENTE: Elaboración propia



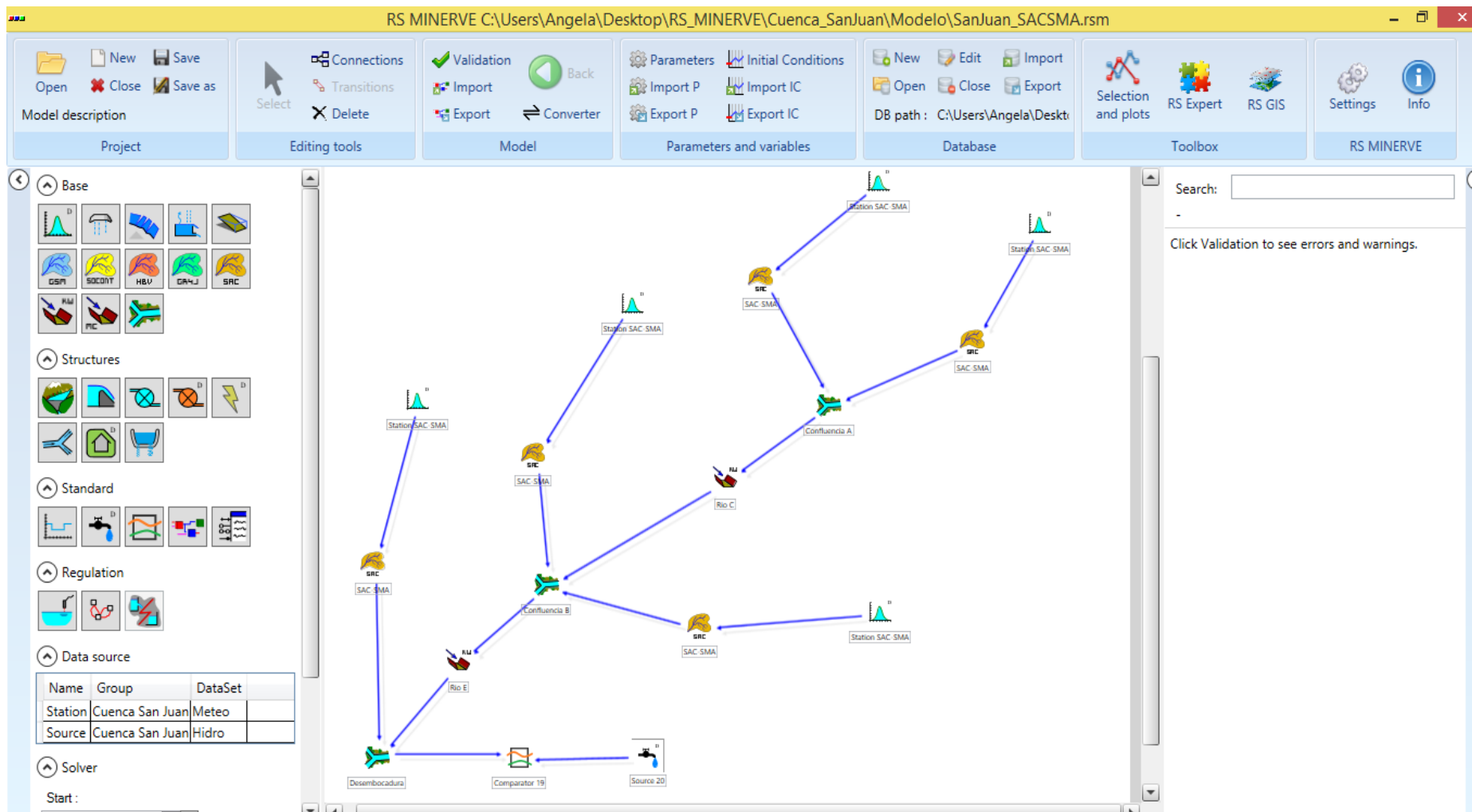
**Figura 20: Topología del modelo SAC-SMA para la cuenca del río Pisco**

FUENTE: Elaboración propia



**Figura 21: Topología del modelo GR4J para la cuenca del río San Juan**

FUENTE: Elaboración propia



**Figura 22: Topología del modelo SAC-SMA para la cuenca del río San Juan**

FUENTE: Elaboración propia

El coeficiente de Nash Sutcliffe mide cuánto de la variabilidad de las observaciones es explicada por la simulación. Varía de  $-\infty$  a 1, el valor de 1 representa la mejor actuación del modelo.

b) Coeficiente de Nash Sutcliffe para los valores del logaritmo

El coeficiente de Nash-Sutcliffe para valores de flujo logaritmo (Nash-LN) se utiliza para evaluar el rendimiento hidrológico de los modelos para caudales bajos. Se expresa mediante la ecuación 44.

$$\text{Nash-LN} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\ln(Q_{\text{sim},i}) - \ln(Q_i))^2}{\sum_{i=1}^n (\ln(Q_i) - \ln(\bar{Q}_i))^2} \quad (44)$$

Donde:

$Q_{\text{sim},i}$  : Caudal simulado para el día i ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$Q_i$  : Caudal observado para el día i ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$\bar{Q}_i$  : Media del caudal ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

Varía de  $-\infty$  a 1, el valor de 1 representa la mejor actuación del modelo.

c) Coeficiente de correlación de Pearson

Expresa la dependencia lineal entre dos variables que, para esta investigación, son los caudales observados y simulados. Se expresa mediante la ecuación 45.

$$\text{Pearson} = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q}_i) * (Q_{\text{sim},i} - \bar{Q}_{\text{sim},i})}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q}_i)^2 * \sum_{i=1}^n (Q_{\text{sim},i} - \bar{Q}_{\text{sim},i})^2} \quad (45)$$

Donde:

$Q_{\text{sim},i}$  : Caudal simulado para el día i ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$Q_i$  : Caudal observado para el día i ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$\bar{Q}_i$  : Media del caudal ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$\bar{Q}_{\text{sim},i}$  : Media de los caudales simulados ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

El coeficiente de correlación puede tomar valores entre  $-1 < \text{Pearson} < 1$ : a mayor valor de  $r$ , mejor ajuste. El uso de esta medida de bondad de ajuste se recomienda cuando se espera una relación lineal entre las variables observadas y simuladas.

d) Bias Score (BS)

Es una estimación simétrica entre el caudal promedio de la simulación y el caudal medio observado. Su valor está dado por la ecuación 46.

$$BS = 1 - \left( \max \left( \frac{\bar{Q}_{sim}}{\bar{Q}_i}, \frac{\bar{Q}_i}{\bar{Q}_{sim}} \right) - 1 \right)^2 \quad (46)$$

Donde:

$\bar{Q}_{sim}$  : Media del caudal simulado ( $m^3/s$ )

$\bar{Q}_i$ : Media del caudal observado ( $m^3/s$ )

Varía de 0 a 1, donde 1 representa el mejor rendimiento

e) Raíz del error cuadrático medio (RRMSE)

La raíz del error cuadrático medio permite cuantificar la magnitud de la desviación de los valores simulados respecto a los observados. Se expresa mediante la ecuación 47.

$$RRMSE = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - Q_i)^2}{n}}}{\bar{Q}_i} \quad (47)$$

Donde:

$Q_{sim,i}$  : Caudal simulado para el día  $i$  ( $m^3/s$ )

$Q_i$  : Caudal observado para el día  $i$  ( $m^3/s$ )

$\bar{Q}_i$  : Media del caudal observado ( $m^3/s$ )

$n$  : Número de días de evaluación

El rango de valores que puede tomar va desde 0 hasta el infinito (positivo). El 0 corresponde a un ajuste perfecto mientras que valores más grandes indican un menor ajuste.



f) Error Relativo al Volumen (RVB)

Representa el error en volumen entre la simulación y los volúmenes observados durante el periodo estudiado, pudiendo variar positiva o negativamente, dependiendo de si existe un exceso o un defecto (en volumen) respecto a la simulación. Se expresa mediante la ecuación 48.

$$RVB = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - Q_i)}{\sum_{i=1}^n Q_i} \quad (48)$$

Donde:

$Q_{sim,i}$  : Caudal simulado para el día  $i$  ( $m^3/s$ )

$Q_i$  : Caudal observado para el día  $i$  ( $m^3/s$ )

$n$  : Número de días de evaluación

En el proceso de calibración, se debe buscar alcanzar el valor más bajo de RVB, el valor ideal es  $RVB=0$ . Los valores negativos representan que la descarga simulada, en promedio, es menor que la descarga observada (modelo déficit), mientras que los valores positivos significan lo contrario (modelo excedente).

g) Error de los valores picos normalizados (NPE)

El error de los valores picos normalizados indican el error relativo entre los caudales picos simulados y observados, tal como se presenta en la ecuación 49.

$$NPE = \frac{S_{max} - R_{max}}{R_{max}} \quad (49)$$

Donde:

$S_{max}$ : Caudal máximo simulado para el periodo de estudio ( $m^3/s$ )

$R_{max}$ : Caudal máximo observado para el periodo de estudio ( $m^3/s$ )

La NPE varía de  $-\infty$  a  $+\infty$ . Los valores negativos representa la descarga simulada máxima se encuentra por debajo de los valores observados, mientras que los valores positivos significan lo contrario. Valores cercanos a cero indican un buen rendimiento de picos simulados relativos observados.

En la Tabla 13 se presenta el resumen de los indicadores de calibración con respectivo rango de evaluación, asimismo el valor ideal para cada indicador.

**Tabla 13: Indicadores de calibración**

<b>Indicador</b>	<b>Rango de Evaluación</b>	<b>Valor Ideal</b>
Nash	$-\infty$ a 1	1
Nash-ln	$-\infty$ a 1	1
Pearson	-1 a 1	1
BS	0 a 1	1
RRMSE	0 a $+\infty$	0
RVB	$-\infty$ a $+\infty$	0
NPE	$-\infty$ a $+\infty$	0

FUENTE: Elaboración propia

#### **d.4. Análisis de sensibilidad**

La realización del análisis de sensibilidad de los parámetros de los modelos amplia el conocimiento sobre el grado de influencia de los parámetros que comprenden la modelación hidrológica. Este análisis se realizó para los cuatro parámetros del modelo GR4J y para los dieciséis parámetros del modelo SAC-SMA.

## **IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Los resultados y discusión de la presente investigación tiene la siguiente secuencia: Descripción de las características geomorfológicas de las cuencas de los ríos Pisco y San Juan, descripción del comportamiento de las precipitaciones y caudales diarios, simulación hidrológico de los modelos GR4J y SAC-SMA en las cuencas de los ríos Pisco y San Juan.

### **4.1. DESCRIPCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS GEOMORFOLÓGICAS DE LAS CUENCAS DE LOS RÍOS PISCO Y SAN JUAN**

- El área de las cuencas delimitadas de los ríos Pisco y San Juan desde los puntos de aforo Letrayoc y Conta es de 3085.08 y 3031.91 km<sup>2</sup>, respectivamente, mientras que el perímetro es de 474.9 km para la cuenca del río Pisco y 400.8 km para la cuenca del río San Juan.
- La altitud media ponderada de la cuenca del río Pisco es de 3600 m.s.n.m. y de la cuenca del río San Juan es de 3450 m.s.n.m.
- La pendiente de la cuenca del río Pisco es de 85.30 por ciento mientras que de la cuenca del río San Juan es de 114.78 por ciento, estos valores indican que las cuencas son extremadamente empinadas.
- El coeficiente de compacidad de la cuenca del río Pisco es de 2.41, mientras que de la cuenca del río San Juan es de 2.05, ambos valores son cercanos, lo cual representa la irregularidad de la forma de dichas cuencas.
- La relación de elongación en la cuenca del río Pisco es de 0.71, mientras que en la cuenca del río San Juan es de 0.78, al poseer la cuenca del río Pisco un valor menor que la de la cuenca del río San Juan, se puede deducir que esta última presenta un relieve más pronunciado que la primera cuenca, lo cual guarda relación con la pendiente media de la cuenca.

- El factor de forma de la cuenca del río Pisco es de 0.014, mientras que la de la cuenca del río San Juan es de 0.019, ambos valores indican que las cuencas son alargadas.
- El coeficiente de masividad de la cuenca del río Pisco es de 0.027 m/km<sup>2</sup>, mientras que la de la cuenca del río San Juan es de 0.038 m/km<sup>2</sup>. El valor de 0.038 de la cuenca del río San Juan muestra que posee una estructura fisiográfica más montañosa que la de cuenca del río Pisco. Así mismo, este parámetro se relaciona con la pendiente media de la cuenca.
- La relación de circularidad de la cuenca del río Pisco es de 0.15 mientras que la de la cuenca del río San Juan es de 0.24, al poseer la cuenca del río San Juan una relación 0.24 nos indica que se aproxima a una forma circular y ovalada.

En la Tabla 14 se muestra el resumen de los parámetros geomorfológicos obtenidos de la cuenca de los ríos Pisco y San Juan.

**Tabla 14: Parámetros geomorfológicos de las cuencas de los ríos Pisco y San Juan**

Parámetro		Unidad	Cuenca		
			Pisco	San Juan	
Relieve	Superficie	Km <sup>2</sup>	3085.08	3031.91	
	Perímetro	Km <sup>2</sup>	474.9	400.8	
	Pendiente media de la cuenca	%	85.30	114.78	
	Altitud media ponderada de la cuenca	msnm	3600	3450	
	Altitud máxima	msnm	4800	4750	
	Altitud mínima	msnm	750	300	
	Rectángulo equivalente	Lado menor	Km	13.80	16.51
		Lado mayor	Km	223.54	183.62
	Coeficiente de masividad	m/km <sup>2</sup>	0.027	0.038	
Forma	Coeficiente de compacidad	-	2.41	2.05	
	Ancho de la cuenca	-	6.49	7.56	
	Factor de forma	-	0.014	0.019	
	Relación de elongación	-	0.71	0.78	
	Relación de circularidad	-	0.15	0.24	
Cauce	Longitud del cauce principal	Km	113	111	
	Pendiente equivalente del cauce principal	%	2.60	6.36	

FUENTE: Elaboración propia

## **4.2. DESCRIPCIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA PRECIPITACIÓN Y CAUDALES DIARIOS**

### **4.2.1. INFORMACIÓN PLUVIOMÉTRICA**

Los histogramas de las series de las dieciséis estaciones se presentan en las Figuras 29 al 44 del Anexo 1.1.; los histogramas de cada estación fueron elaborados a partir de la información proporcionada por el Servicio Nacional de Meteorología (SENAMHI) y la Autoridad Nacional del Agua (ANA).

Se identificó los saltos de los registros históricos los cuales se aprecian en las Figuras 51 al 66 del Anexo 2.1, para luego realizar el análisis de consistencia de datos de las series de precipitación diaria de las 16 estaciones, mediante los métodos estadísticos de t de Student y Fisher que se presentan en las Tablas 29 al 60.

El análisis de las dieciséis estaciones resultó consistente para los dos métodos estadísticos, es decir que los valores estadísticos  $T_d$  y  $F_{cal}$  de los registros históricos se encuentran por debajo del valor t de Student de la tabla y el valor Fisher de la tabla, respectivamente; por lo que se puede afirmar que los registros históricos son homogéneos.

### **4.2.2. INFORMACIÓN HIDROMÉTRICA**

Los histogramas de las estaciones Letrayoc y Conta se presentan en las Figuras 50 y 51, respectivamente del Anexo 1.2.; los histogramas de las dos estaciones fueron elaborados a partir de la información proporcionada por el Servicio Nacional de Meteorología (SENAMHI) y la Autoridad Nacional del Agua (ANA).

Se identificó los saltos de los registros históricos los cuales se aprecian en las Figuras 67 y 68 del Anexo 2.2, para luego realizar el análisis de consistencia de datos de las series de caudal diario de las dos estaciones, mediante los métodos estadísticos de t de Student y Fisher que se presentan en las Tablas 61 al 64.

El análisis de las estaciones Letrayoc y Conta resultó consistente para los dos métodos estadísticos, es decir que los valores estadísticos  $T_d$  y  $F_{cal}$  de los registros históricos se encuentran por debajo de los valores t de Student y Fisher de las tablas, respectivamente; por lo que se puede afirmar que los registros históricos son homogéneos.

### 4.3. SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO HIDROLÓGICO DE LAS CUENCAS

#### 4.3.1. MODELO GR4J

##### a. Para la cuenca del río Pisco

Los valores de los parámetros estadísticos (Nash, Nash-ln, Pearson, RRMSE y RVB) de la simulación, sin calibración, de la cuenca del río Pisco mediante el modelo GR4J, se encuentran dentro del rango de evaluación y cercanos a los valores ideales; BS es el único parámetro estadístico que no se encuentra dentro del rango de evaluación.

El resumen de los parámetros estadísticos de la simulación se muestra en la Tabla 15.

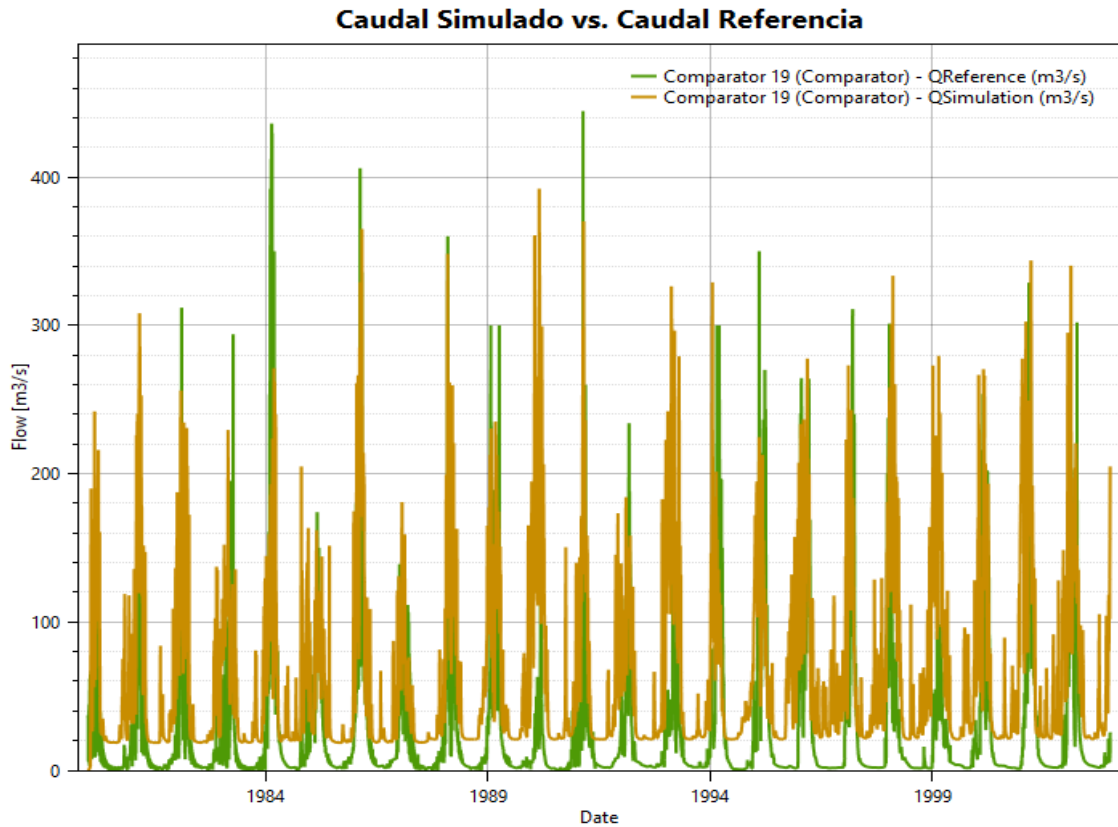
**Tabla 15: Parámetros estadísticos modelo GR4J, sin calibración, de la cuenca del río Pisco**

<b>Parámetros estadísticos</b>	<b>Simulación (enero 1980 – diciembre 2002)</b>
Nash	-0.84
Nash-ln	-0.28
Pearson	0.58
BS	-1.02
RRMSE	2.38
RVB	1.42
NPE	-0.11

FUENTE: Elaboración propia

El modelo GR4J cuenta con cuatro parámetros; para esta simulación se observó que los parámetros X1 (capacidad de almacén de producción) y X3 (capacidad de almacén de enrutamiento) no se encuentran dentro del rango establecido en el sistema Rs-Minerve.

En la Figura 23 se muestra los caudales simulados (sin calibración) y observados del periodo 1980-2002.



**Figura 23: Caudales diarios observados y simulados de la cuenca del río Pisco, modelo GR4J sin calibración**

FUENTE: Elaboración propia

Se realizó múltiples pruebas de calibración de los parámetros del modelo GR4J, sin embargo, en todos los casos se obtuvo coeficientes de Nash para el periodo de calibración y validación, valores lejanos al valor ideal de los indicadores de calibración; permitiendo calificar al modelo para la cuenca del río Pisco como malo; lo mismo ocurre para los demás indicadores de calibración, todos se encuentran lejanos a los valores ideales.

La Tabla 16 muestra el resumen de cada una de las medidas de bondad de ajuste del modelo hidrológico de la cuenca del río Pisco.

El modelo GR4J para la cuenca del río Pisco no es funcional; en la Figura 24 se muestra los caudales observados y simulados, este último siendo cero en todo el periodo modelado.

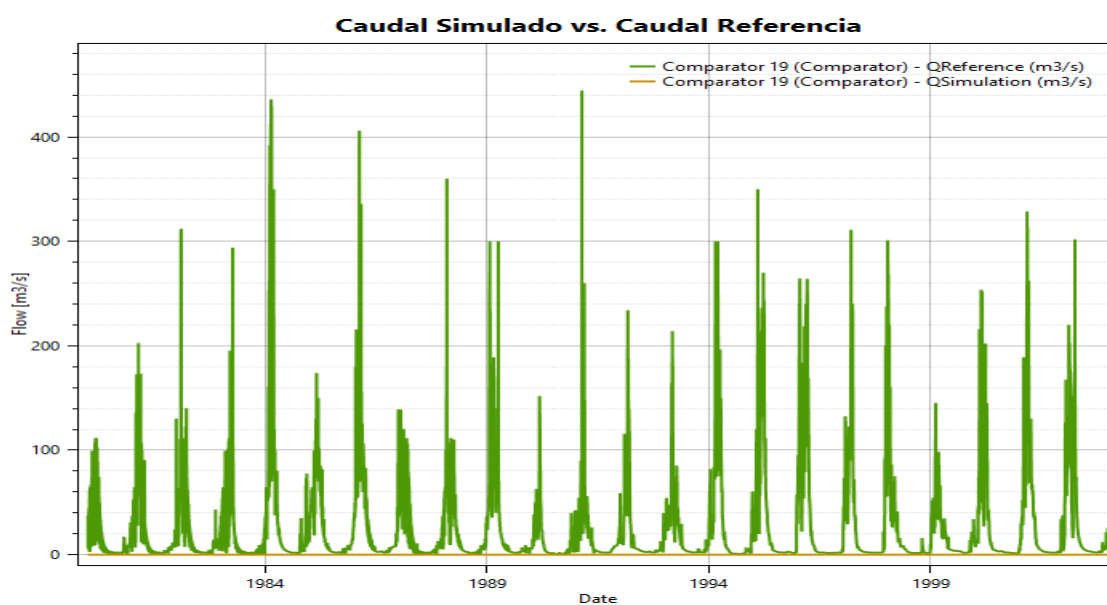
**Tabla 16: Parámetros estadísticos modelo GR4J, calibrado, de la cuenca del río Pisco**

<b>Parámetros estadísticos</b>	<b>Calibración (enero 1980 – diciembre 1991)</b>	<b>Validación (enero 1992 – diciembre 2002)</b>
Nash	-6.52 E+39	-Infinito
Nash-ln	-0.24	-Infinito
Pearson	0.11	Infinito
BS	-7.25 E+41	-Infinito
RRMSE	1.67 E+21	Infinito
RVB	8.51 E+20	Infinito
NPE	2.33 E+19	Infinito

FUENTE: Elaboración propia

El resumen de los cuatro parámetros del modelo GR4J se muestra en la Tabla 17, los cuales se asumieron para luego realizar la calibración usando los caudales diarios.

Se realizaron análisis de sensibilidad de los cuatro parámetros mencionados anteriormente del modelo GR4J. Los parámetros (X1 y X3) del modelo resultan más sensibles para la simulación de descargas.



**Figura 24: Caudales diarios observados y simulados de la cuenca del río Pisco, modelo GR4J calibrado**

FUENTE: Elaboración propia



**Tabla 17: Parámetros calibrados del modelo GR4J para la cuenca del río Pisco**

<b>Parámetros calibrados</b>	<b>Unidad</b>	<b>Sub1</b>	<b>Sub2</b>	<b>Sub3</b>	<b>Sub4</b>	<b>Sub5</b>
X1	m	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
X2	m	0.0019	0.0019	0.0019	0.0019	0.0019
X3	m	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
X4	d	1.90	1.90	1.90	1.90	1.90

FUENTE: Elaboración propia

**b. Para la cuenca del río San Juan**

Los valores de los parámetros estadísticos (Nash, Nash-ln, Pearson, BS, RRMSE y RVB) de la simulación, sin calibración, de la cuenca del río San Juan mediante el modelo GR4J, se encuentran dentro del rango de evaluación, sin embargo sus valores son lejanos al valor ideal de cada indicador estadístico.

El resumen de los parámetros estadísticos de la simulación se muestra en la Tabla 15.

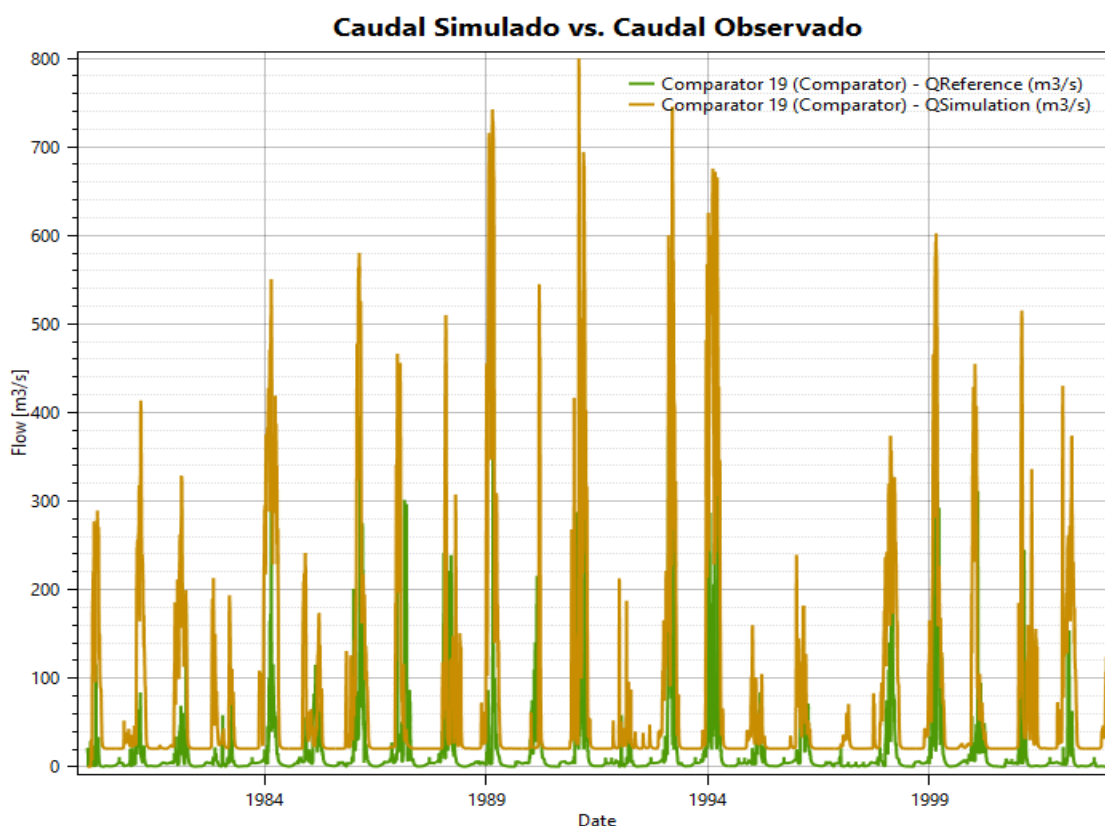
**Tabla 18: Parámetros estadísticos modelo GR4J, sin calibración, de la cuenca del río Pisco**

<b>Parámetros estadísticos</b>	<b>Simulación (enero 1980 – diciembre 2002)</b>
Nash	-6.92
Nash-ln	-Infinito
Pearson	0.50
BS	-10.39
RRMSE	6.95
RVB	3.38
NPE	0.61

FUENTE: Elaboración propia

El modelo GR4J cuenta con cuatro parámetros, para esta simulación se observó que los parámetros X1 (capacidad de almacén de producción) y X3 (capacidad de almacén de enrutamiento) no se encuentran dentro del rango establecido en el sistema Rs-Minerve.

En la Figura 25 se muestra los caudales simulados (sin calibración) y observados del periodo 1980-2002.



**Figura 25: Caudales diarios observados y simulados de la cuenca del río San Juan, modelo GR4J sin calibración**

FUENTE: Elaboración propia

Se realizó múltiples pruebas de calibración de los parámetros del modelo GR4J, sin embargo, en todos los casos se obtuvo coeficientes de Nash para el periodo de calibración y validación, valores lejanos al valor ideal de los indicadores de calibración; permitiendo calificar al modelo para la cuenca del río San Juan como malo; lo mismo ocurre para los demás indicadores de calibración, todos se encuentran lejanos a los valores ideales.

La Tabla 19 muestra el resumen de cada una de las medidas de bondad de ajuste del modelo hidrológico de la cuenca del río San Juan.

El modelo GR4J para la cuenca del río San Juan no es funcional; en la Figura 26 se muestra los caudales observados y simulados, este último siendo cero en todo el periodo modelado.

**Tabla 19: Parámetros estadísticos modelo GR4J de la cuenca del río San Juan**

<b>Parámetros estadísticos</b>	<b>Calibración (enero 1980 – diciembre 1991)</b>	<b>Validación (enero 1992 – diciembre 2002)</b>
Nash	-4.22 E+36	-2.40 E+36
Nash-ln	-2.05	-23.69
Pearson	0.23	0.32
BS	-1.57 E+37	-9.61 E+36
RRMSE	1.01 E+19	8.22 E+18
RVB	3.96 E+18	3.11 E+18
NPE	2.27 E+18	9.42 E+17

FUENTE: Elaboración propia

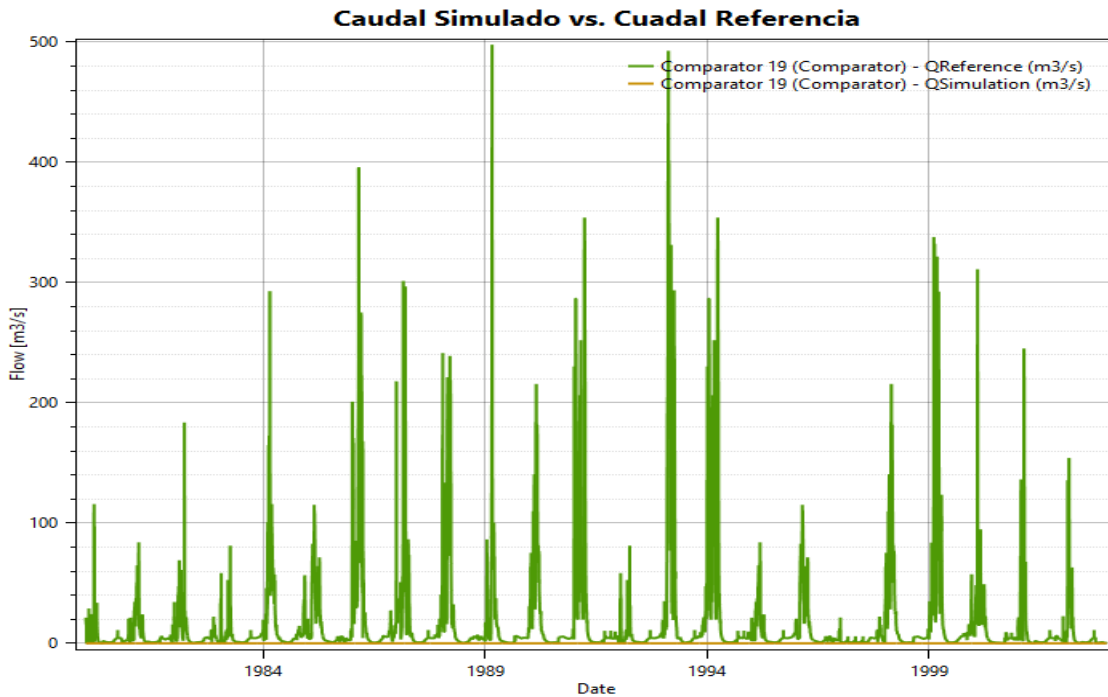
El resumen de los cuatro parámetros del modelo GR4J se muestra en la Tabla 20, los cuales se asumieron para luego realizar la calibración usando los caudales medios diarios.

Se realizaron análisis de sensibilidad de los cuatro parámetros mencionados anteriormente del modelo GR4J. Los parámetros (X1 y X3) del modelo resultan más sensibles para la simulación de descargas.

**Tabla 20: Parámetros calibrados del modelo GR4J para la cuenca del río San Juan**

<b>Parámetros calibrados</b>	<b>Unidad</b>	<b>Sub1</b>	<b>Sub2</b>	<b>Sub3</b>	<b>Sub4</b>	<b>Sub5</b>
X1	m	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
X2	m	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
X3	m	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
X4	d	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7

FUENTE: Elaboración propia



**Figura 26: Caudales diarios observados y simulados de la cuenca del río San Juan, modelo GR4J calibrado**

FUENTE: Elaboración propia

Como se puede apreciar en ninguna de las dos cuencas (Pisco y San Juan) se pudo obtener la generación de caudales mediante el modelo GR4J, es por ello que se muestra la generación del caudal sin calibración, sin embargo, cuando se realizó la calibración de los 4 parámetros que cuenta dicho modelo el resultado es cero; esto nos indica que el modelo GR4J no es funcional para dichas cuencas.

#### 4.3.2. MODELO SAC-SMA

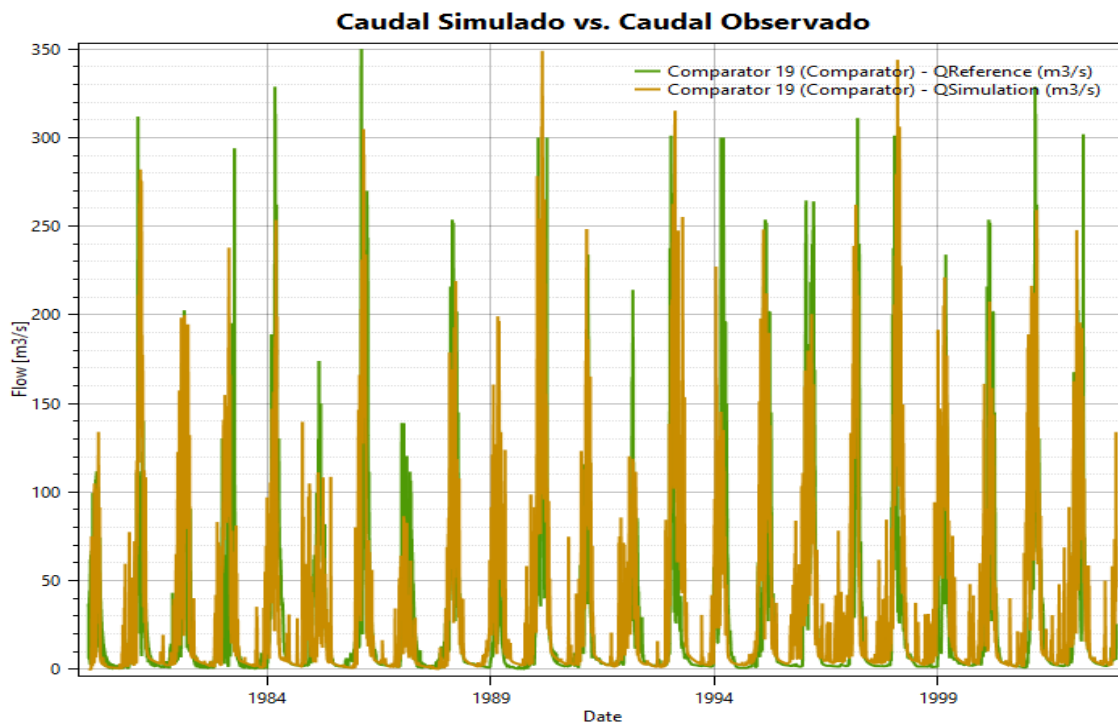
##### a. Para la cuenca del río Pisco

Se obtuvo coeficientes de Nash 0.64 y 0.60 para la calibración y validación respectivamente; permitiendo calificar al modelo como bueno; más aún, tratándose de un modelo construido a escala diaria. Por otro lado, los coeficientes de correlación Pearson mostraron valores aceptables de 0.68 y 0.59 para la calibración y validación, respectivamente. Para la raíz cuadrática medio (RRMSE) se obtuvo valores aceptables de 0.90 y 0.87 para la calibración y validación respectivamente, también se mostraron resultados satisfactorios para el error de los valores picos normalizados (NPE) siendo estos de -0.003 para la calibración y 0.04 para la validación. La Tabla 21 muestra el resumen de cada una de las medidas de bondad de ajuste del modelo hidrológico de la cuenca del río Pisco; mientras que la Figura 27 muestra la gráfica de caudales observados y simulados.

**Tabla 21: Parámetros estadísticos modelo SAC-SMA de la cuenca del río Pisco**

<b>Parámetros estadísticos</b>	<b>Calibración (enero 1980 – diciembre 1991)</b>	<b>Validación (enero 1992 – diciembre 2002)</b>
Nash	0.64	0.60
Nash-ln	0.46	0.33
Pearson	0.68	0.59
BS	0.98	0.92
RRMSE	0.90	0.87
RVB	0.17	0.28
NPE	-0.003	0.04

FUENTE: Elaboración propia



**Figura 27: Caudales diarios observados y simulados de la cuenca del río Pisco, periodo 1980 – 2002**

FUENTE: Elaboración propia

El resumen de los dieciséis parámetros del modelo SAC-SMA se muestra en la Tabla 22, los cuales se asumieron para luego realizar la calibración usando los caudales medios diarios.

Se realizaron análisis de sensibilidad de los dieciséis parámetros mencionados anteriormente del modelo SAC-SMA. Los parámetros (Adimp, Uzk y Pfree) del modelo resultan más sensibles para la simulación de descargas; los parámetros restantes solo produjeron leves variaciones en los estadísticos analizados.

**Tabla 22: Parámetros calibrados del modelo SAC-SMA para la cuenca del río Pisco**

<b>Parámetros calibrados</b>	<b>Unidad</b>	<b>Sub1</b>	<b>Sub2</b>	<b>Sub3</b>	<b>Sub4</b>	<b>Sub5</b>
Adimp	-	0.17	0.19	0.18	0.15	0.17
Pctim	-	0.04	0.01	0.02	0.02	0.04
Riva	-	0.14	0.12	0.13	0.09	0.19
UztwMax	m	0.02	0.01	0.02	0.03	0.02
UzfwMax	m	0.10	0.10	0.08	0.02	0.02
Uzk	1/d	0.33	0.41	0.57	0.30	0.46
Zperc	-	31.70	32.50	29.50	31.60	29.90
Rexp	-	2.95	1.75	2.88	3.02	3.09
Pfree	-	0.49	0.30	0.47	0.26	0.45
LztwMax	m	0.08	0.07	0.05	0.10	0.09
LzfpMax	m	0.18	0.22	0.09	0.28	0.16
LzfsMax	m	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01
Rserv	-	0.47	0.32	0.43	0.28	0.37
Lzpk	1/d	0.005	0.003	0.005	0.003	0.006
Lzsk	1/d	0.08	0.09	0.10	0.10	0.008
Side	-	0.38	0.42	0.28	0.28	0.36

FUENTE: Elaboración Propia

**b. Para la cuenca del río San Juan**

Se obtuvo coeficientes de Nash 0.61 y 0.59 para la calibración y validación respectivamente; permitiendo calificar al modelo como bueno; más aún, tratándose de un modelo construido a escala diaria. Por otro lado, los coeficientes de correlación Pearson mostraron valores aceptables de 0.44 y 0.52 para la calibración y validación, respectivamente. Para la raíz cuadrático medio (RRMSE) se obtuvo valores aceptables de 1.84 y 2.08 para la calibración y validación, respectivamente, también se mostraron resultados satisfactorios para el error de los valores picos normalizados (NPE) siendo 0.01 para la calibración y 0.05 para la validación. La Tabla 23 muestra el resumen de cada una de las medidas de bondad de ajuste del modelo

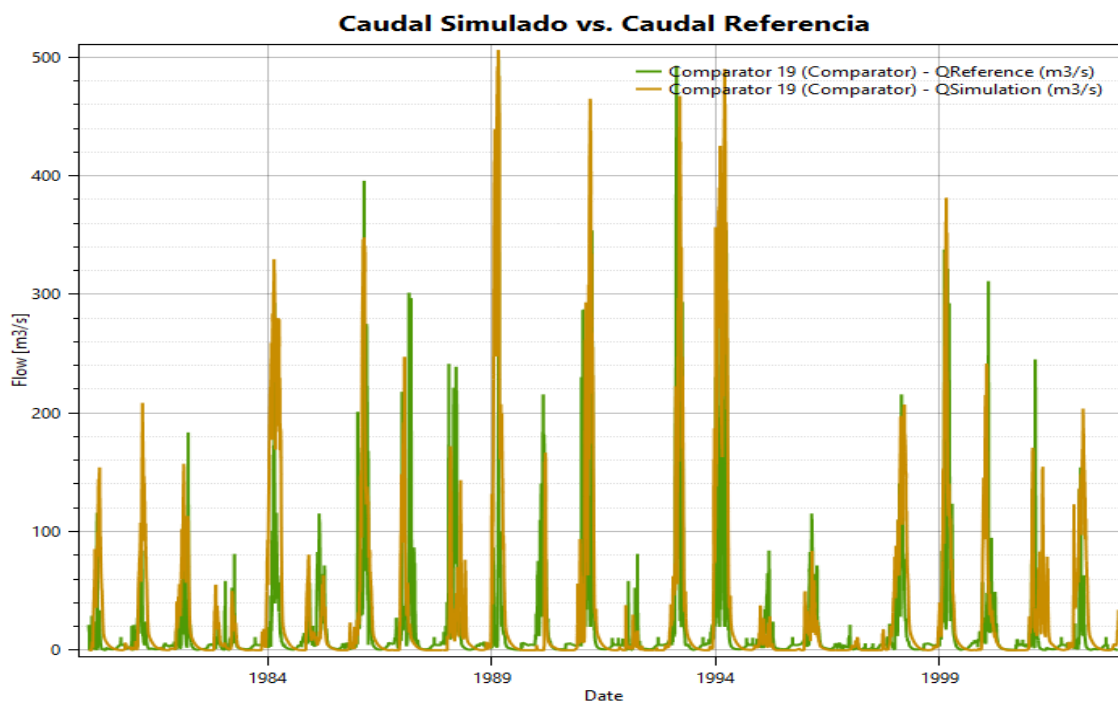
hidrológico de la cuenca del río San Juan; mientras que la Figura 28 muestra la gráfica de caudales observados y simulados.

**Tabla 23: Parámetros estadísticos modelo SAC-SMA de la cuenca del río San Juan**

<b>Parámetros estadísticos</b>	<b>Calibración (enero 1980 – diciembre 1991)</b>	<b>Validación (enero 1992 – diciembre 2002)</b>
Nash	0.61	0.59
Nash-In	0.43	0.40
Pearson	0.44	0.52
BS	0.27	0.32
RRMSE	1.84	2.08
RVB	-0.23	-0.17
NPE	0.01	0.05

FUENTE: Elaboración Propia.

El resumen de los dieciséis parámetros del modelo SAC-SMA se muestra en la Tabla 24, los cuales se asumieron para luego realizar la calibración usando los caudales medios diarios.



**Figura 28: Caudales diarios observados y simulados de la cuenca del río San Juan, periodo 1980 - 2002**

FUENTE: Elaboración propia

**Tabla 24: Parámetros calibrados del modelo SAC-SMA para la cuenca del río Pisco**

<b>Parámetros calibrados</b>	<b>Unidad</b>	<b>Sub1</b>	<b>Sub2</b>	<b>Sub3</b>	<b>Sub4</b>	<b>Sub5</b>
Adimp	-	0.20	0.15	0.17	0.19	0.12
Pctim	-	0.01	0.05	0.03	0.01	0.01
Riva	-	0.12	0.10	0.10	0.11	0.10
UztwMax	m	0.14	0.08	0.10	0.11	0.12
UzfwMax	m	0.05	0.02	0.04	0.05	0.05
Uzk	1/d	0.68	0.50	0.58	0.66	0.42
Zperc	-	207.48	205.63	203.12	200.12	208.11
Rexp	-	1.98	1.15	1.87	1.76	2.54
Pfree	-	0.52	0.40	0.42	0.60	0.57
LztwMax	m	0.36	0.29	0.30	0.26	0.26
LzfpMax	m	0.15	0.20	0.18	0.12	0.10
LzfsMax	m	0.36	0.34	0.29	0.37	0.34
Rserv	-	0.30	0.26	0.36	0.30	0.30
Lzpk	1/d	0.002	0.001	0.02	0.001	0.002
Lzsk	1/d	0.23	0.27	0.23	0.23	0.21
Side	-	0.18	0.15	0.17	0.11	0.12

FUENTE: Elaboración Propia.

Se realizaron análisis de sensibilidad de los dieciséis parámetros mencionados anteriormente del modelo SAC-SMA. Los parámetros (Adimp, Uzk y Pfree) del modelo resultan más sensibles para la simulación de descargas; los parámetros restantes solo produjeron leves variaciones en los estadísticos analizados.



## V. CONCLUSIONES

La cuenca del río Pisco fue dividida en cinco subcuencas, se utilizó los datos de precipitación y temperatura diaria registrada de las seis estaciones de la cuenca del río Pisco y dos estaciones de la cuenca del río Pampas, así como los datos de descarga registrado en la estación Letrayoc; para el caso de la cuenca del río San Juan también se dividió en cinco subcuencas y se utilizó ocho estaciones de la cuenca del río San Juan que contenían datos de precipitación y temperatura a nivel diario, los datos de descarga utilizado fue de la estación Conta. La información de las estaciones meteorológicas e hidrométricas corresponde al periodo 1980-2002; de acuerdo a esto se pueden llegar a las siguientes conclusiones:

- Se realizó la simulación hidrológica del modelo GR4J para las dos cuencas, sin embargo, cuando se procede a la calibración el sistema presenta problemas con el rango de parámetros sugeridos.
- Se aplicó satisfactoriamente la simulación del comportamiento hidrológico del modelo SAC-SMA para evaluar y cuantificar los caudales en las cuencas de los ríos Pisco y San Juan. El modelo SAC-SMA proporciona resultados que son útiles para la correcta estimación del recurso hídrico, lo cual ha sido comprobado en la presente tesis.
- El análisis geomorfológico de las cuencas Pisco y San Juan, permitió relacionar las características de relieve y red de drenaje para cada área de contribución con el comportamiento hidrológico de cada una de ellas, lo que ayudo a la comprensión de los procesos hidrológicos en la etapa de calibración de los modelos.
- El análisis de consistencia de las series pluviométricas e hidrométricas, brindo información estadística y grafica suficiente para afirmar que las series de tiempo son lo confiables para emplearlas en la modelización hidrológica.
- Se calibró y valido el modelo hidrológico SAC-SMA para las cuencas de los ríos Pisco y San Juan ubicadas en las zonas altas de las estaciones Letrayoc y Conta, respectivamente. Los resultados de la modelación fueron satisfactorios entre la escorrentía simulada y

observada para un periodo de 22 años (1980-2002); los valores obtenidos de los indicadores de calibración para el modelo SAC-SMA de la simulación de las cuencas de los ríos Pisco y San Juan son muy próximos los valores ideales, por lo que se afirma que la simulación es buena.

- Con respecto al análisis de sensibilidad, de los dieciséis parámetros del modelo SAC-SMA, los parámetros Adimp (máxima fracción de un área impermeable adicional debido a la saturación), Uzk (tasa de agotamiento interflujo desde el almacenamiento de agua zona libre superior) y Pfree (fracción percolación que va directamente a los depósitos a los depósitos de agua de zonas francas menor) resultan más sensibles para la simulación de descarga y los restantes solo producen leves variaciones en los estadísticos analizados; en el caso del GR4J de los cuatro parámetro el X1 (capacidad de almacén de producción) y X3 (capacidad del almacén de enrutamiento) son los más sensibles para la simulación de descarga los otros dos parámetros solo producen leves variaciones en los estadísticos analizados.

## VI. RECOMENDACIONES

- Continuar con esta investigación empleando los otros siete modelos hidrológicos con que cuenta el software Rs-Minerve (SNOW-GSM, GLACIER-GSM, GR3, SWMM, GSM, SOCONT y VHB), para poder comparar los parámetros estadísticos de calibración (Nash, Nash-In, Pearson, BS, RRMSE, RVB, NPE); de esta manera, se tendrá un mayor panorama de qué modelo actúa mejor en las cuencas de los ríos Pisco y San Juan.
- Ampliar el uso del modelo SAC-SMA hacia otras cuencas del país y validar sus resultados con información de caudales medios diarios que se disponga.
- En lo posible emplear estaciones hidrometeorológicas que tengan información diaria para usarla en los modelos hidrológicos GR4J y SAC-SMA, de esta forma se trabajará con información más representativa de la cuenca en estudio.
- Es de suma importancia implementar estaciones de aforo, o realizar aforos en las cuencas y subcuencas del país para tener la posibilidad de comparar los valores observados con los simulados, de manera que los modelos se puedan calibrar para adecuarlos a las condiciones del medio.
- Se recomienda a los autores del Rs-Minerve, revisar la formulación correspondiente al modelo GR4J, debido a que presenta problemas en su proceso de calibración.
- Se recomienda a SENAMHI instalar estaciones hidrometeorológicas en diferentes puntos de las cuencas del país, que permitan tener datos certeros y confiables a nivel diario; es necesario que se haga un mantenimiento y seguimiento a estaciones hidrometeorológicas e hidrométricas instaladas, para poder contar con data que permite a la simulación y obtener resultados que se asemejen a lo que realmente ocurre en las cuencas.

## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Aliaga, A. 1983. Tratamiento de datos hidrometeorológicos. Lima, Perú.
2. Ambrosio, W. 2001. Estudio de máximas avenidas y transporte de sedimentos en el río Chancay – Huaral con fines de control de inundaciones. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú.
3. Aparicio, F. 2010. Fundamentos de hidrología de superficie. Limusa S.A. México D.F., México.
4. Argüelles, A. 2007. Modelos para la planificación hidrológica – cuenca del Guadalquivir. Valencia, España.
5. Bustinza, V. 2008. Efectos del cambio y la variabilidad climática sobre los recursos hídricos. Proyecto PACC. Lima, Perú.
6. Cárdenas, M. 2008. Modelamiento hidrológico de la cuenca Huancabamba con fines de operación en épocas de avenida. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú.
7. Cabrera, J. 2012. Calibración de modelos hidrológicos. Facultad de Ingeniería Civil. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú.
8. Chavarri, E. 2010. Separatas de hidrología para estudiantes de ingeniería agrícola. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú.
9. Chávez, R. 1994. Hidrología para ingenieros. Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima, Perú.
10. Chereque, W. 1996. Hidrología para estudiantes de ingeniería civil. Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima, Perú.
11. Chow, VT. 1964. Mc Graw Hill. Handbook of applied hydrology.
12. Chow, VT. 2000. Mc Graw Hill. Hidrología aplicada. Bogotá, Colombia.
13. CIVILTEC. 1994. Tecnológico de Monterrey.
14. Clarke, R. 1973. Mathematical models in hidrology, irrigation and drainage. FAO. Roma, Italia.

15. Domínguez, R. 2002. Fundamentos de la hidrología de superficie. Universidad Autónoma de México. México D.F., México.
16. Duque, R. 1979. Modelo de simulación paramétrica STANFORD IV. Banco de programas CIDIAT. Venezuela.
17. Eagleson, P. 1970. Dynamic hidrology. Mc Graw Hill – Book. London.
18. Edijatno, O., Yang, X., Makhlof, Z. and Michel, C. 1999. "GR3J: a daily watershed model with three free parameters". Hydrological Sciences Journal.
19. EL PERUANO. 2009. Decreto Supremo N° 017-2009-AG. Reglamento de clasificación de tierras por capacidad de uso mayor. Lima, Perú.
20. Esquivas, G. 1993. Modelos de predicción aplicados a las descargas del río Vizcachas – Moquegua. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú.
21. Estrela, T. 1992. Modelo matemático para la evaluación de recursos hídricos. Centro de estudios y experimentación de obras. Madrid, España.
22. FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 2007. Generación de programas y proyectos de gestión de cuencas hidrográficas. Roma.
23. FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 2006. Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Italia.
24. Foehn, A., García, J., Claude, A., Roquier, B., Paredes, J. and Boillat, J. 2014. RS MINERVE – User's manual v1.12. RS MINERVE Group.
25. Guevara, E. 1982; Introducción a la ciencia hidrológica aplicada. Universidad de Carabobo. Venezuela.
26. INRENA (Instituto Nacional de Recursos Naturales). 2003. Evaluación de los recursos hídricos de la cuenca del río Pisco. Estudio hidrológico.
27. INRENA (Instituto Nacional de Recursos Naturales). 2003. Evaluación de los recursos hídricos de la cuenca del río San Juan. Estudio hidrológico.

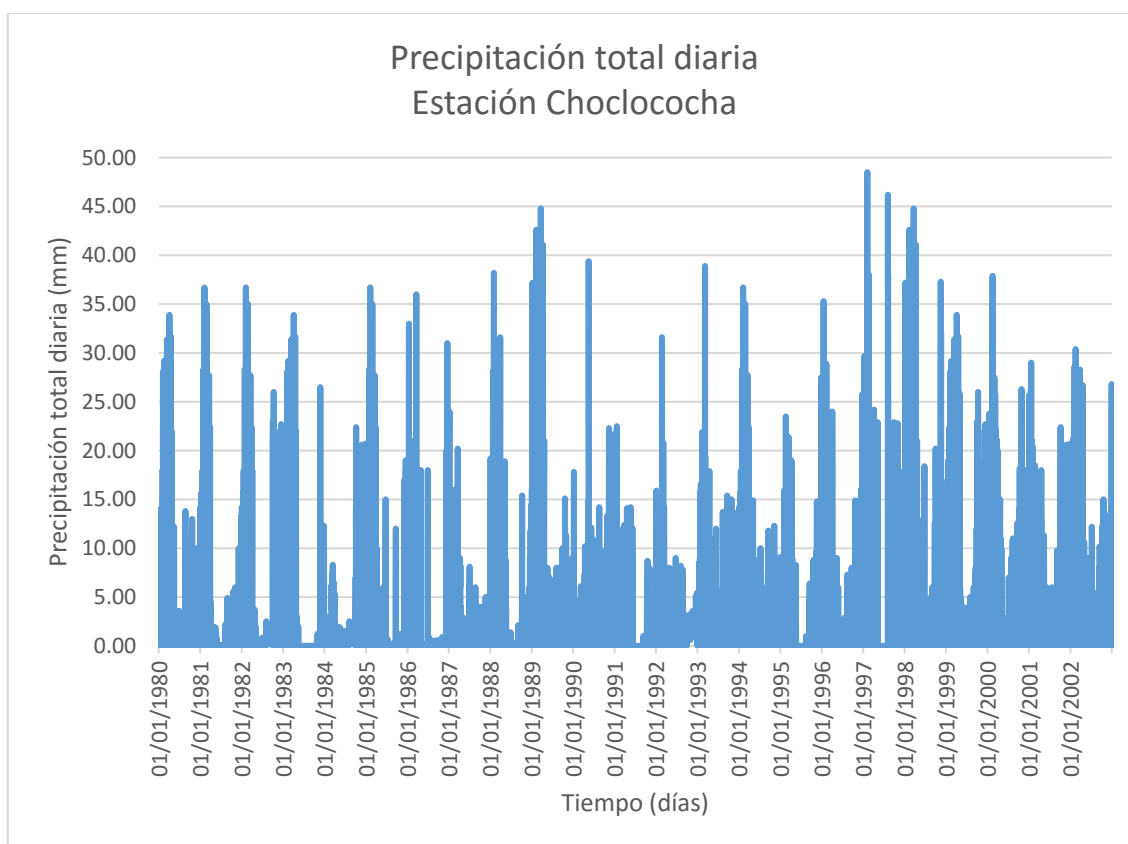
28. Jayo, P. 2011. Modelación de la relación precipitación – escorrentía en la cuenca del río Mala mediante el modelo PRECAUD V.10. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú.
29. Klemes, V. 1986. Operational testing of hydrological simulation models. Hydrological Sciences Journal des Sciences Hydrologiques.
30. Monsalve, G. 1999. Hidrología en la ingeniería. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. Colombia.
31. Linsley, J. 1977. Hidrología para ingenieros. Mc-Graw Hill Latinoamericana. Bogotá, Colombia.
32. Ortiz, J. 2004. Evaluación hidrológica. Revista Hidro Red. Red Latinoamericana de Micro Hidroenergía.
33. Osorio, E. 2000. Estimación de la precipitación media mensual a través del método Kriging en las cuencas Chira y Piura. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú.
34. Perrin, C. 2000. Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative. INPG (Grenoble) / Cemagref (Antony).
35. Perrin, C., 2002. Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative. La Houille Blanche.
36. Ponce, V. 1989. Engineering hydrology. Prentice Hall. Capítulo N°13.
37. Refsgaard, J. and Knudsen, J. 1996. Operational validation and intercomparison of different types of hydrological models. Water Resources Research.
38. Salazar, R 1979. Guía para estudios de evapotranspiración. Instalación de parcelas demostrativas con riego por superficie. Programa de Asistencia Técnica CID-ATA/CLASS. Lima, Perú
39. Santayana, S. 2007. Separatas de hidrología para estudiantes de ingeniería agrícola. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú.
40. Silva, M. 1987. Análisis comparativo de modelos determinísticos de simulación de cuencas. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú.

41. Sotero, II. 1987. Estudio de máxima avenidas haciendo uso de modelos probabilísticos – aplicación río Chicama. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú.
42. Smith, M. 1999. Modelo Sacramento de contabilidad de Humedad del Suelo. Hydrologic Research Laboratory.
43. Villón, M. 2002. Hidrología estadística. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica.

## VIII. ANEXOS

### ANEXO 1: COMPORTAMIENTO DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS E HIDROMÉTRICAS

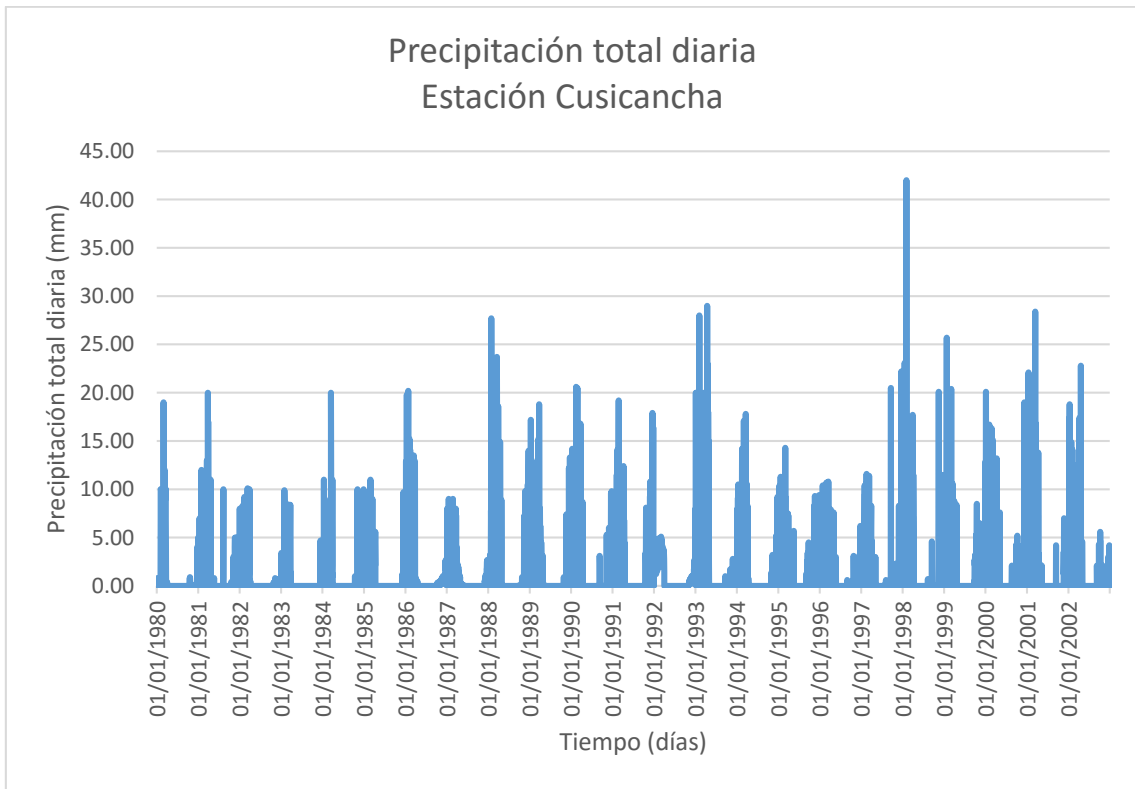
#### ANEXO 1.1: PLUVIOMETRÍA



**Figura 29: Histograma de precipitación total diaria (1980-2002), estación Choclococha**

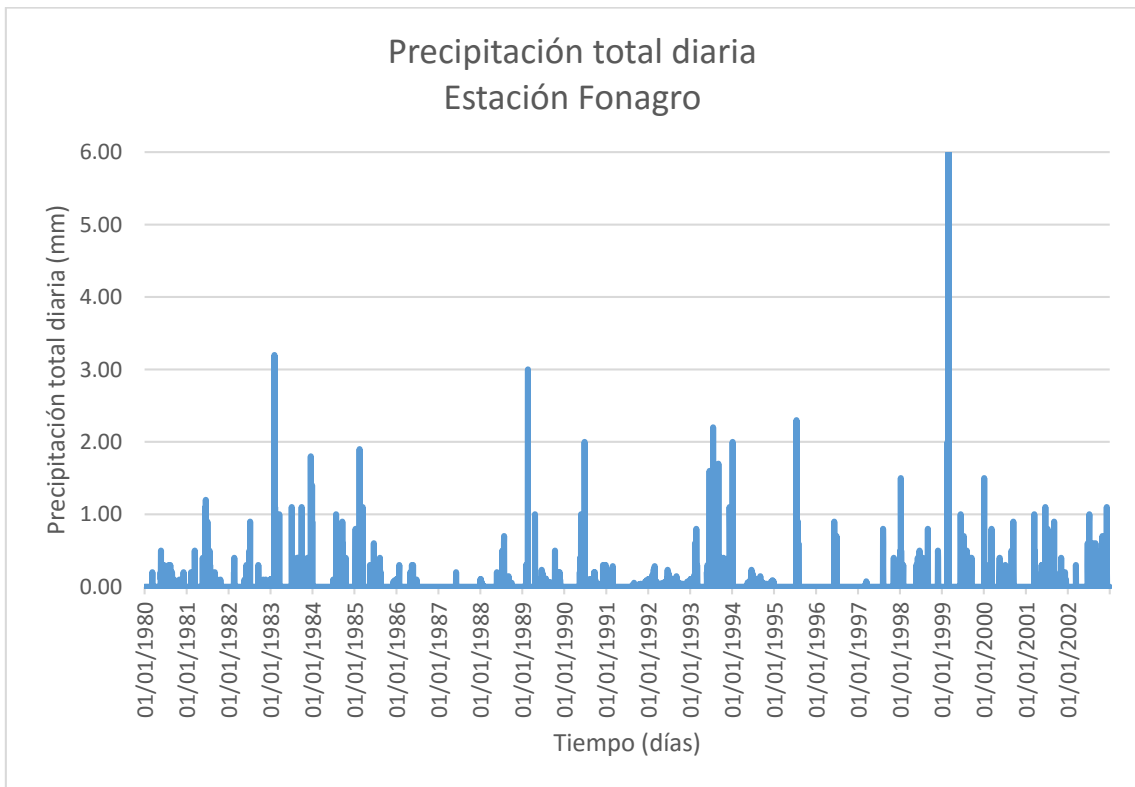
FUENTE: Elaboración propia





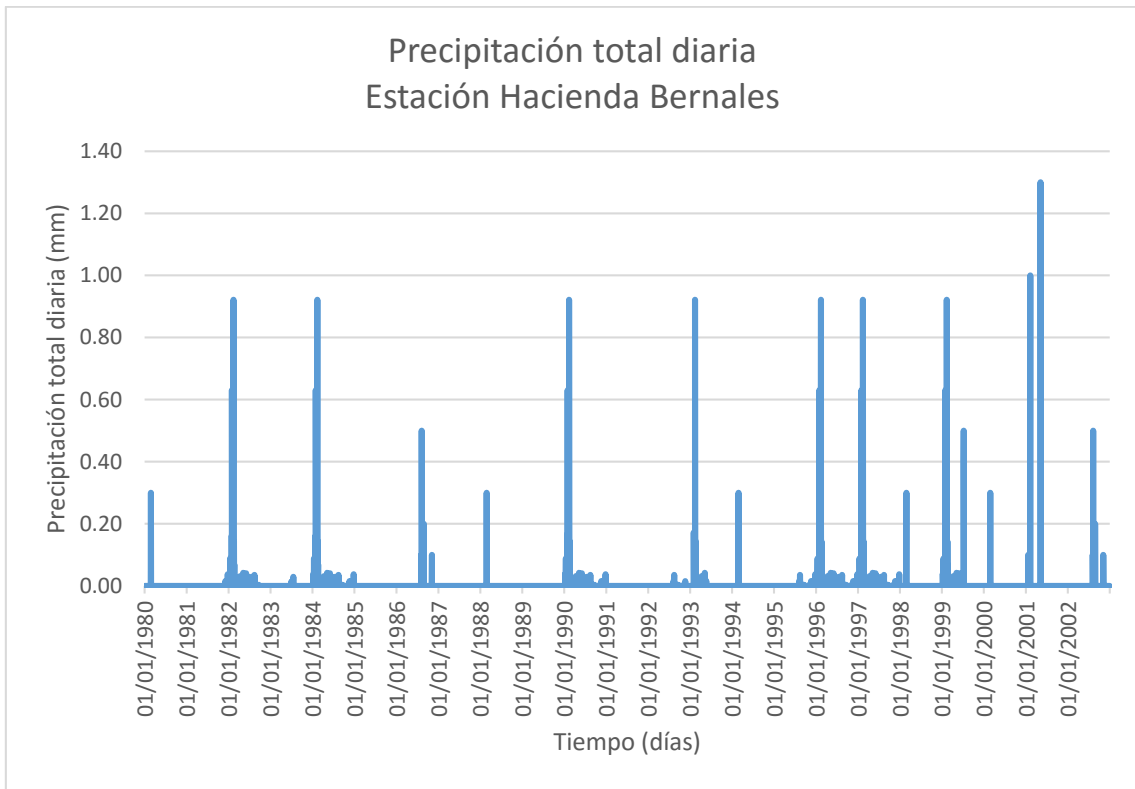
**Figura 30: Histograma de precipitación total diaria (1980-2002), estación Cusicancha**

FUENTE: Elaboración propia



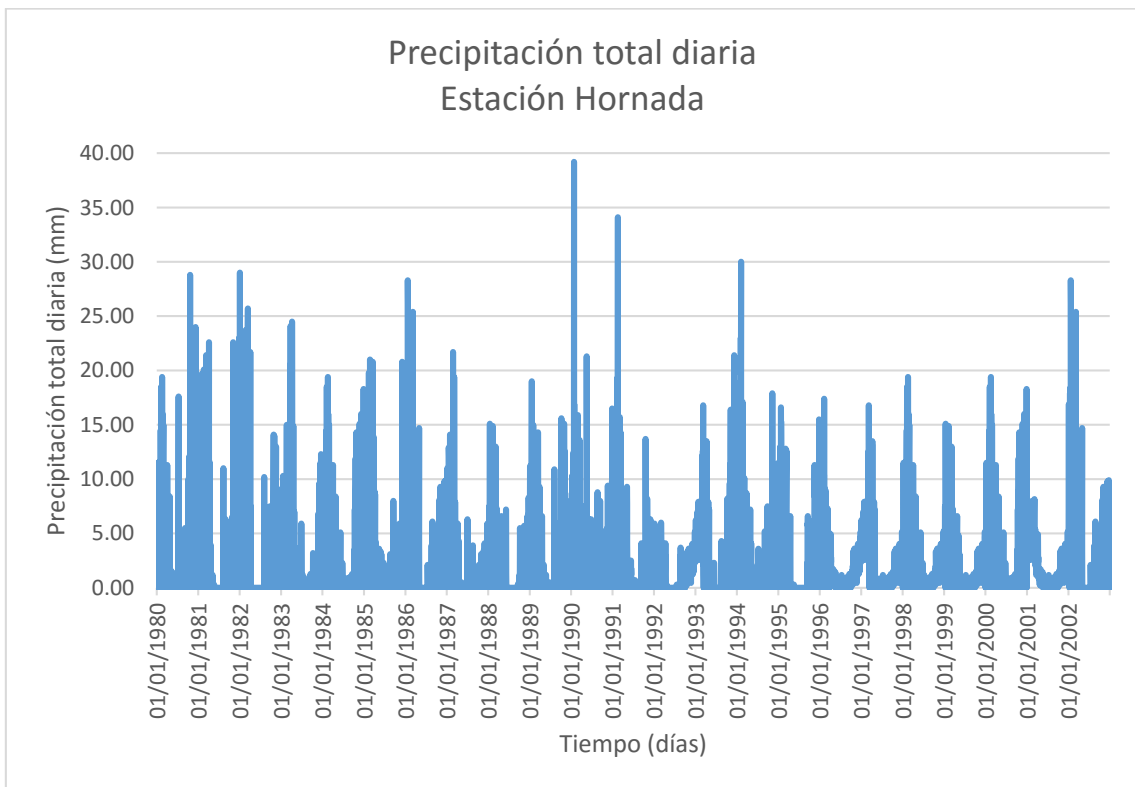
**Figura 31: Histograma de precipitación total diaria (1980-2002), estación Fonagro**

FUENTE: Elaboración propia



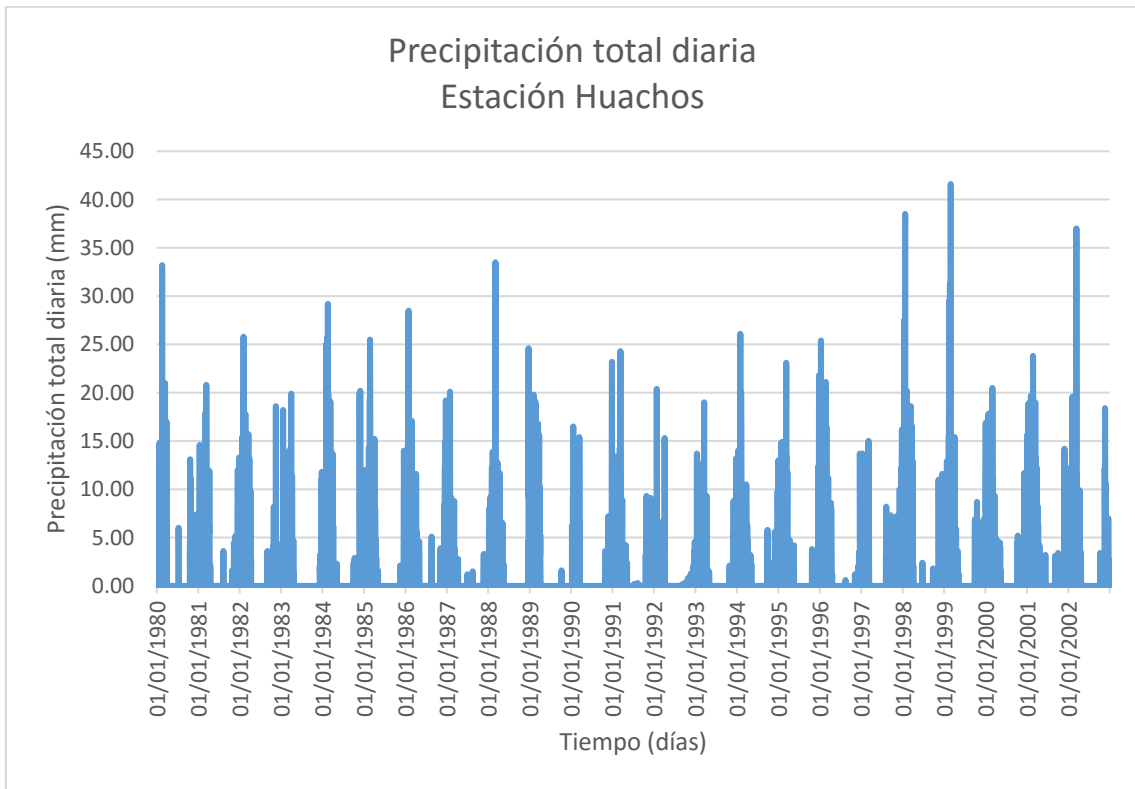
**Figura 32: Histograma de precipitación total diaria (1980-2002), estación Hacienda Bernales**

FUENTE: Elaboración propia



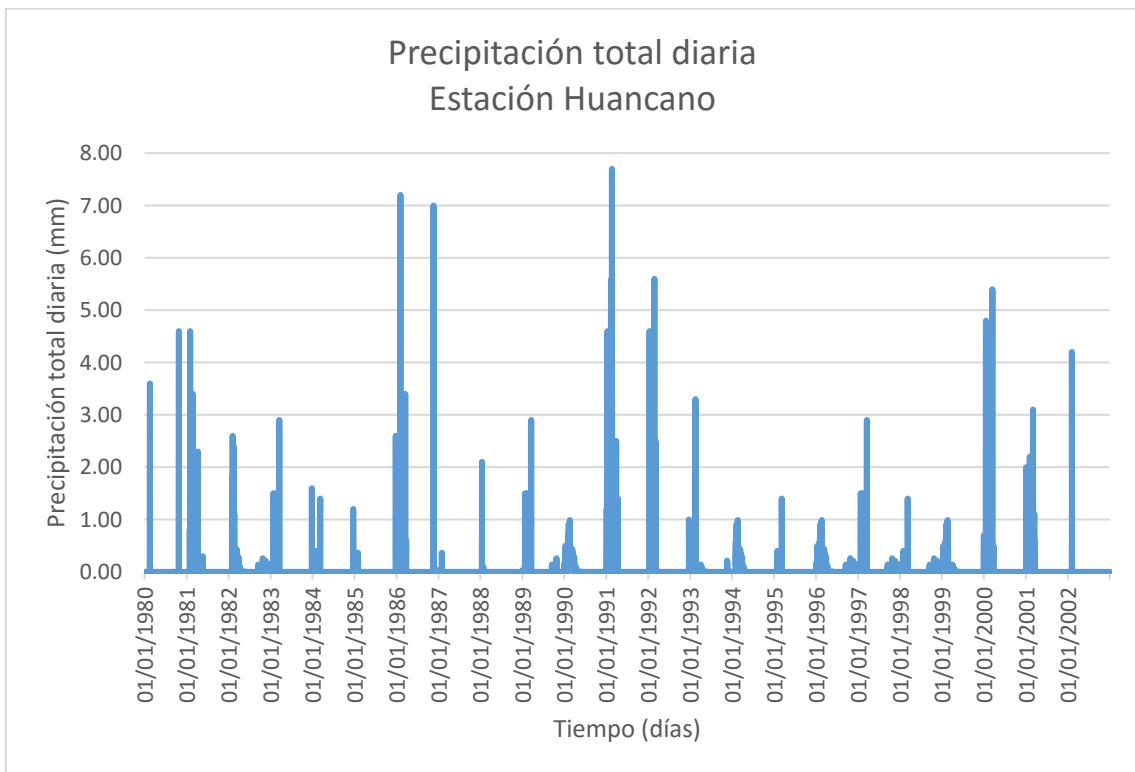
**Figura 33: Histograma de precipitación total diaria (1980-2002), estación Hornada**

FUENTE: Elaboración propia



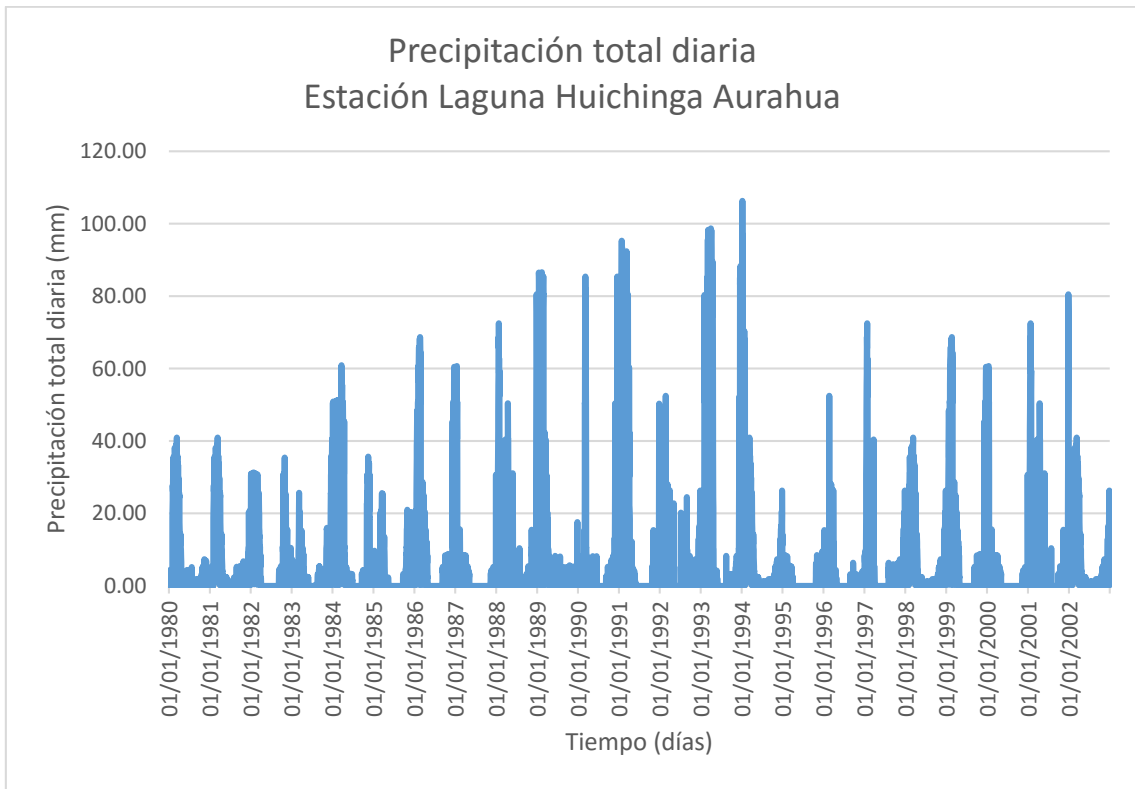
**Figura 34: Histograma de precipitación total diaria (1980 – 2002), estación Huachos**

FUENTE: Elaboración propia



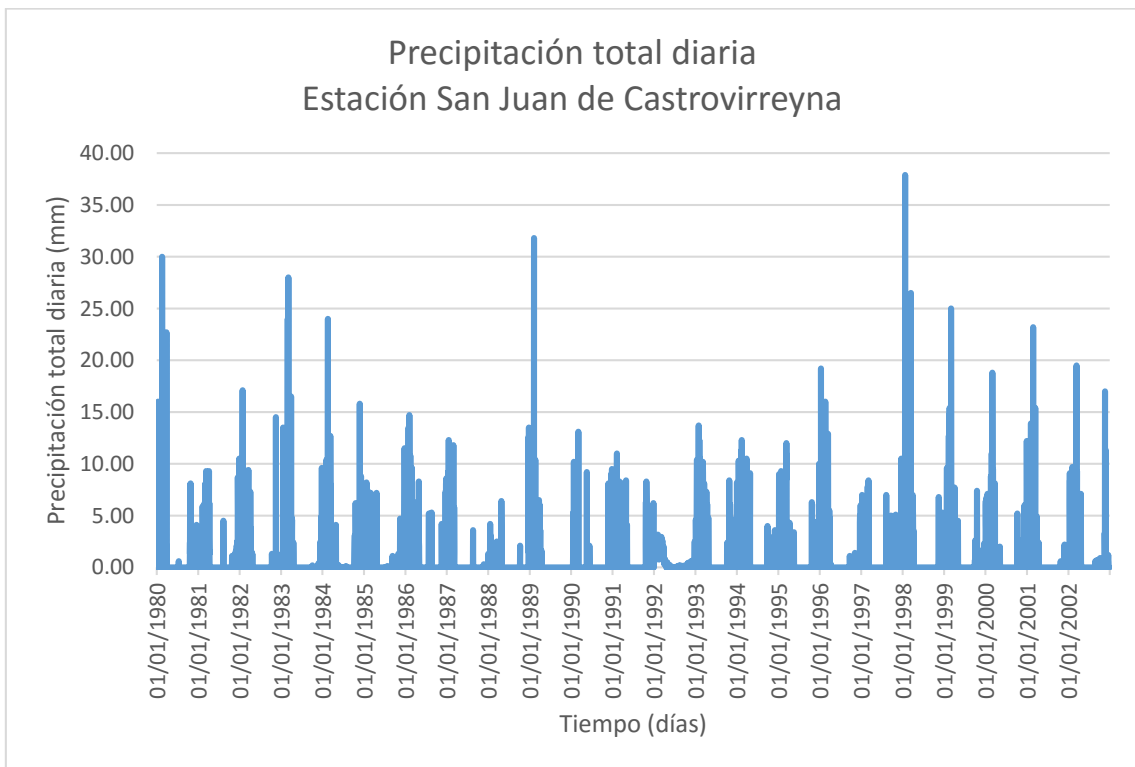
**Figura 35: Histograma de precipitación total diaria (1980-2002), estación Huancano**

FUENTE: Elaboración propia



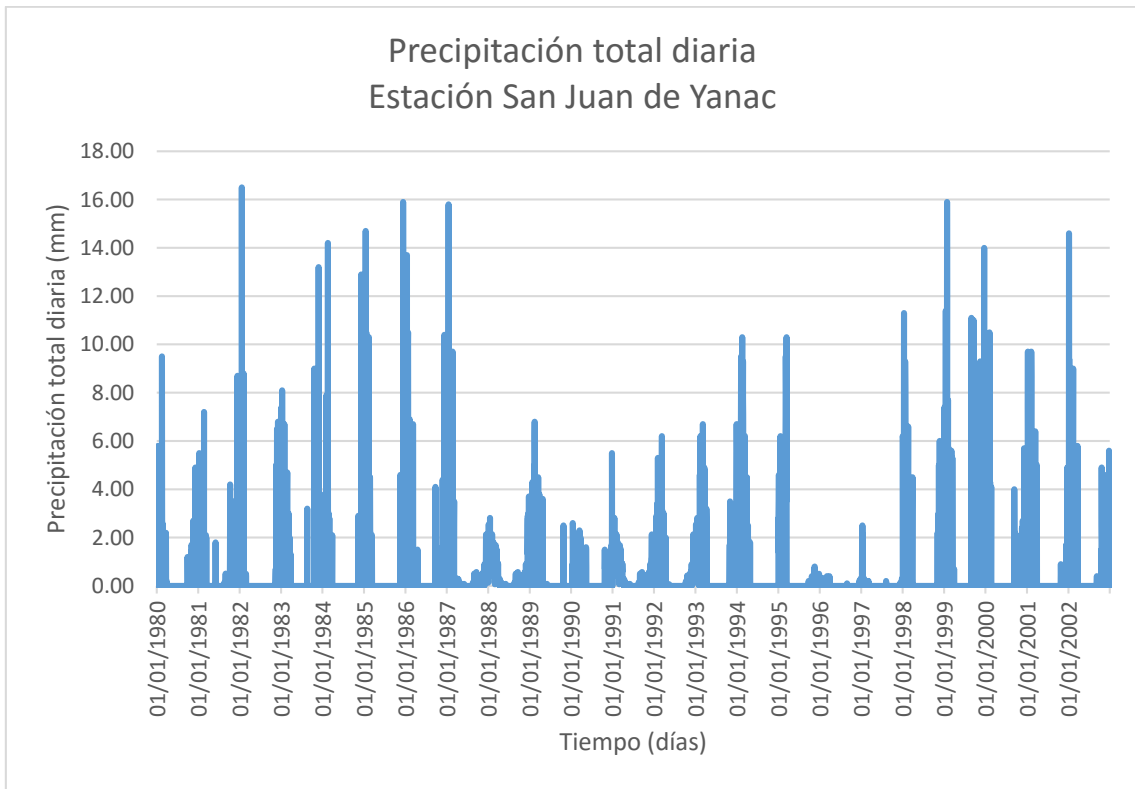
**Figura 36: Histograma de precipitación total diaria (1980-2002), estación Huichinga Aurahua**

FUENTE: Elaboración propia



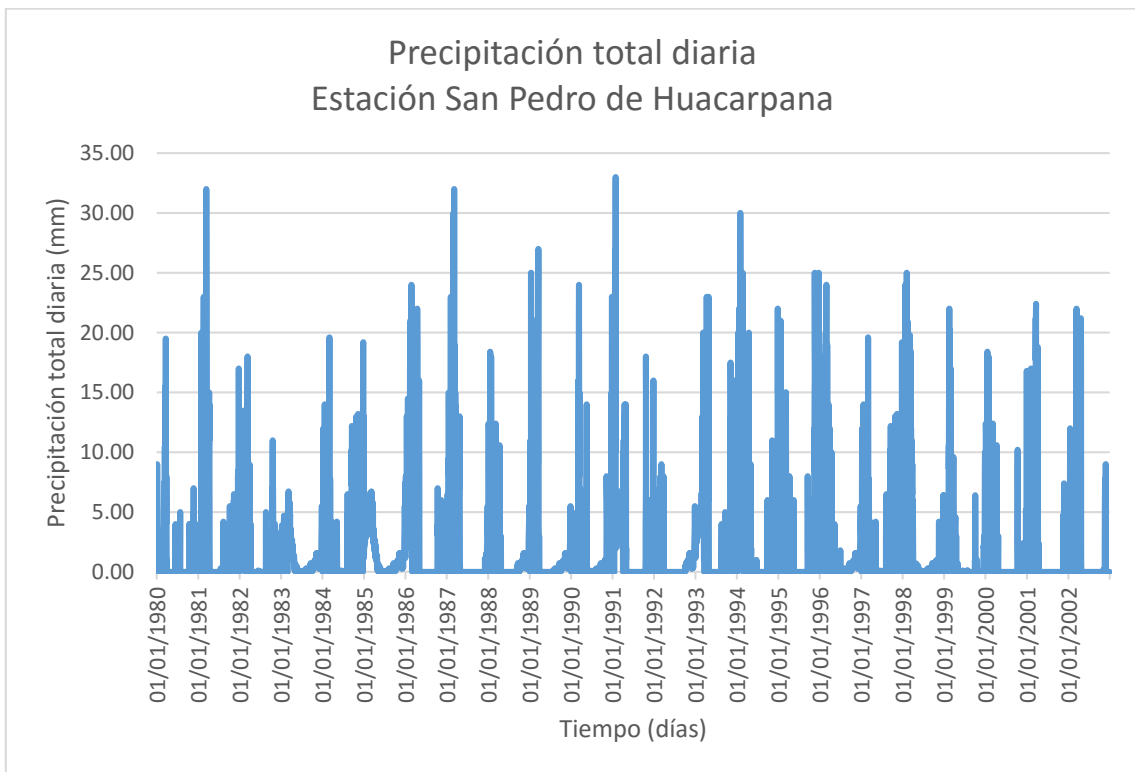
**Figura 37: Histograma de precipitación total diaria (1980-2002), estación San Juan de Castrovirreyna**

FUENTE: Elaboración propia



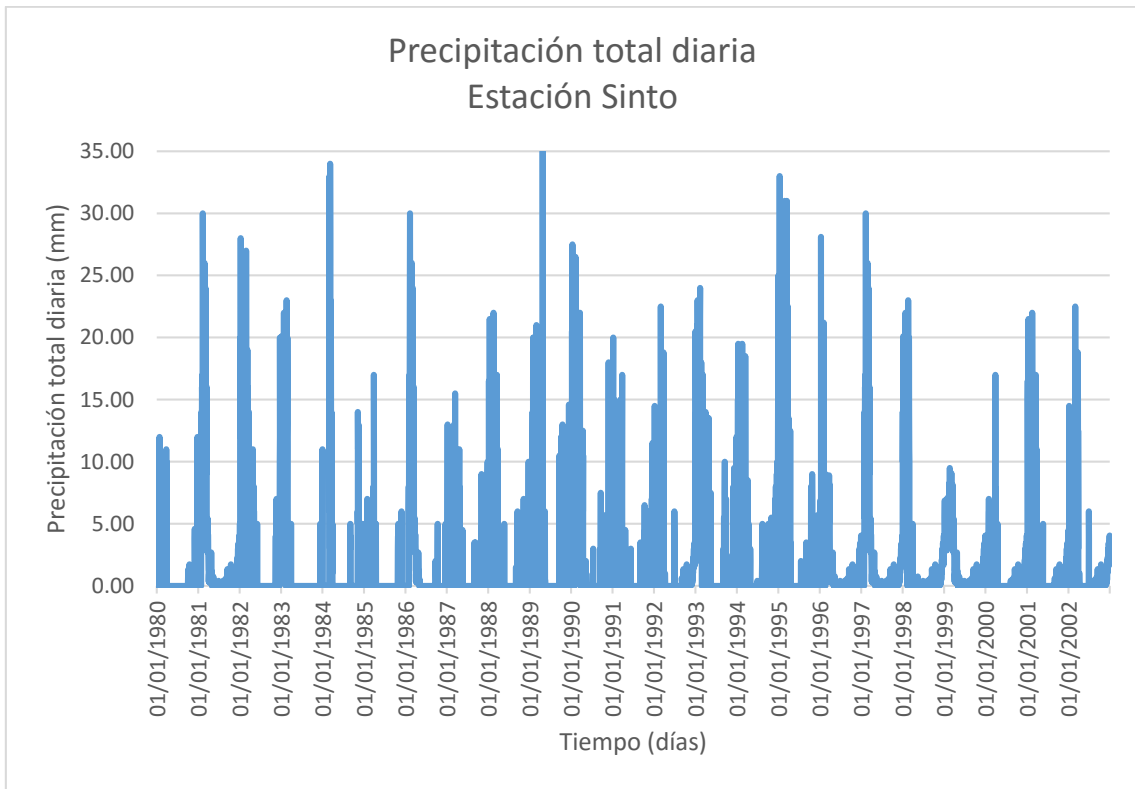
**Figura 38: Histograma de precipitación total diaria (1980-2002), estación San Juan de Yanac**

FUENTE: Elaboración propia

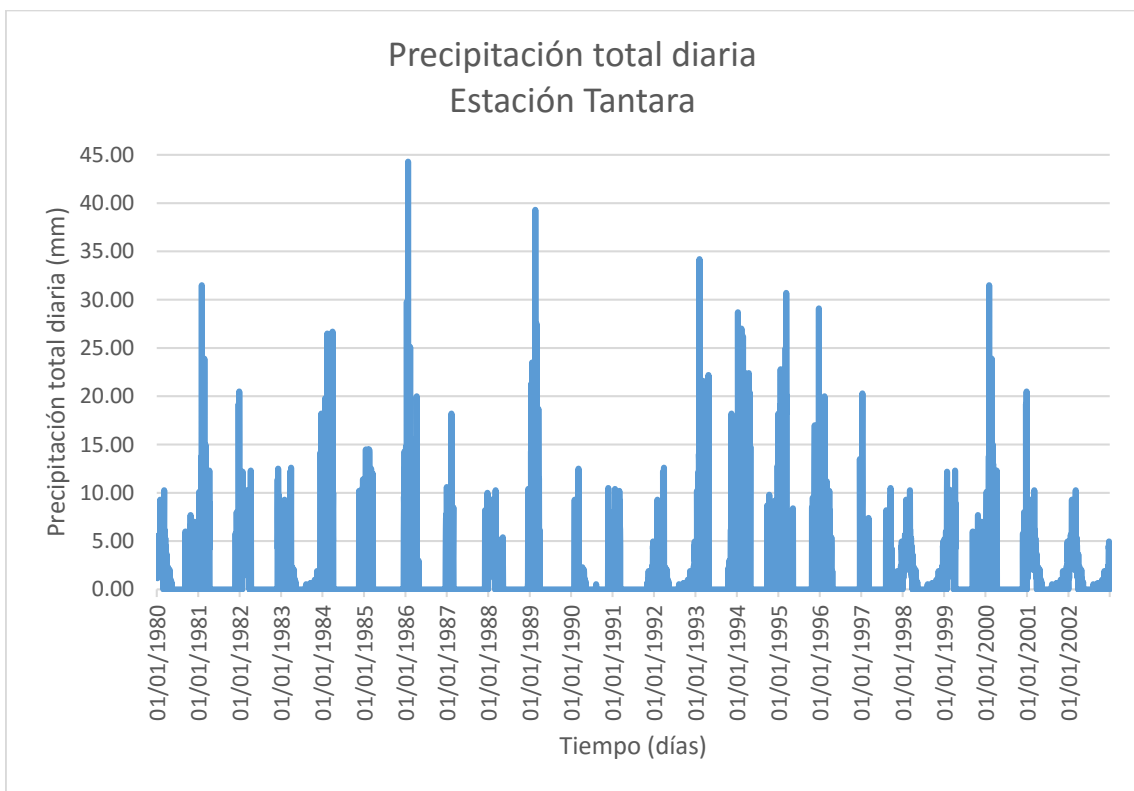


**Figura 39: Histograma de precipitación total diaria (1980-2002), estación San Pedro de Huacarpana**

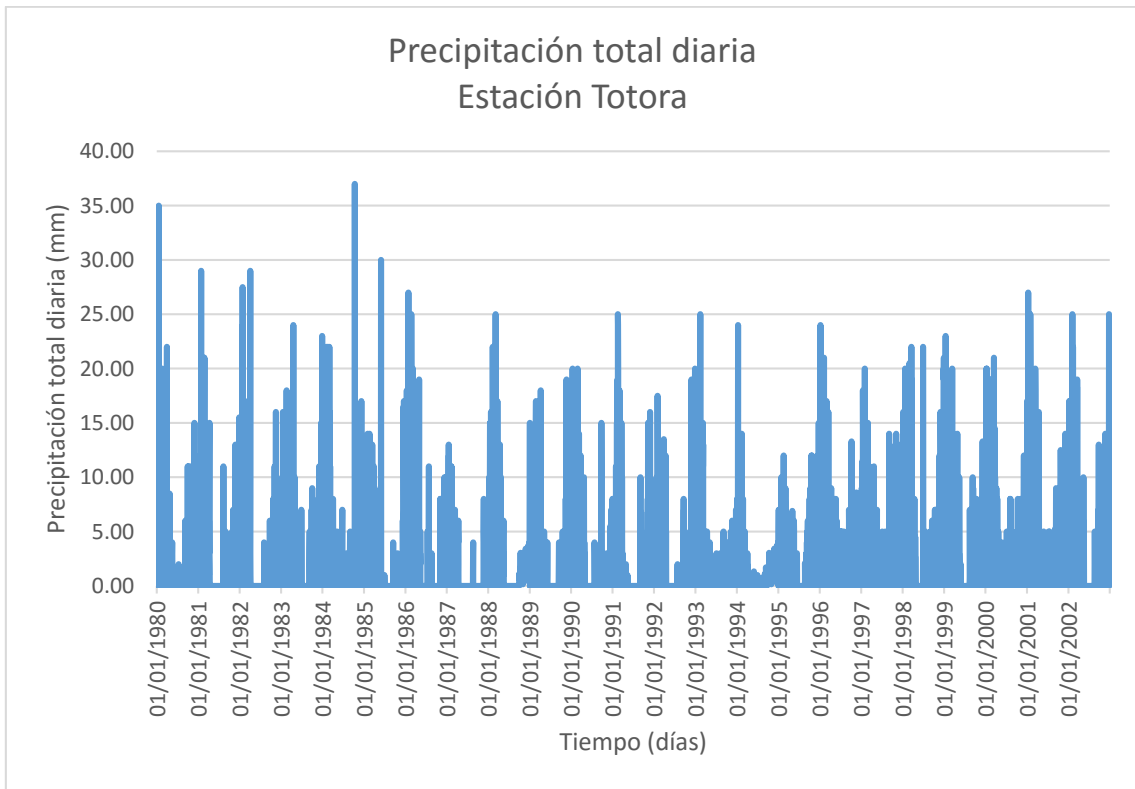
FUENTE: Elaboración propia



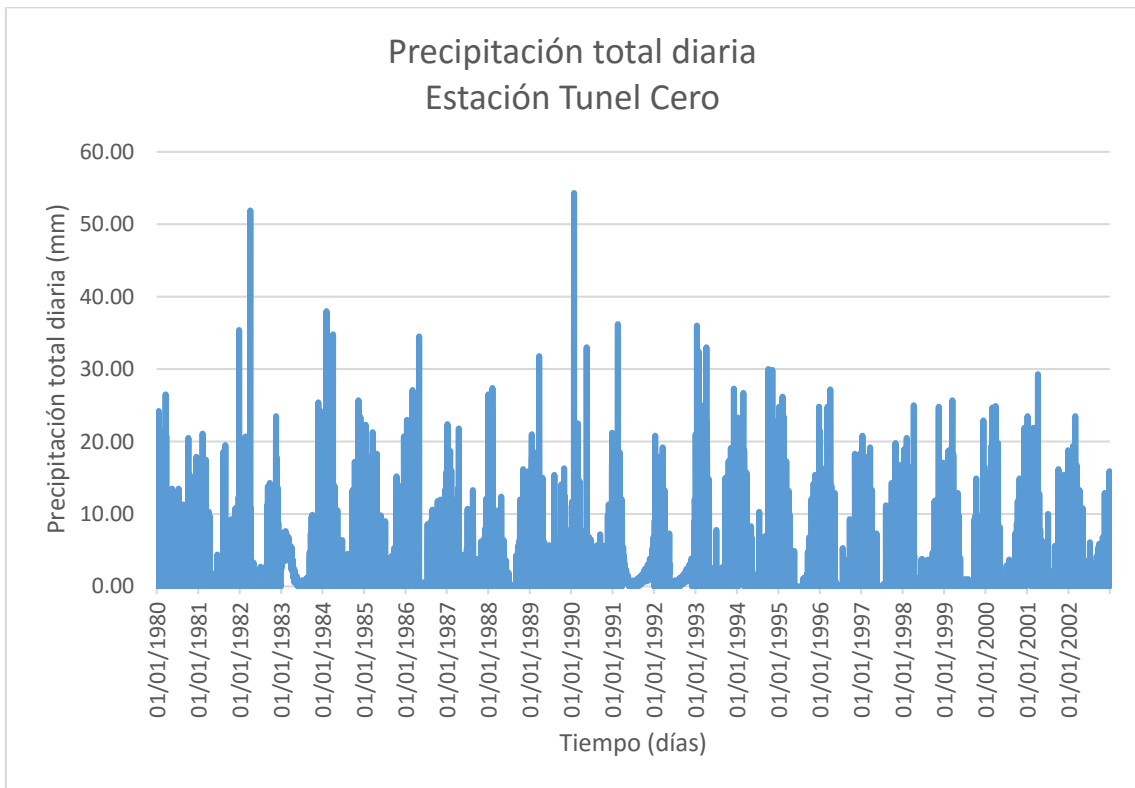
**Figura 40:** Histograma de precipitación total diaria (1980 -2002), estación Sinto  
FUENTE: Elaboración propia



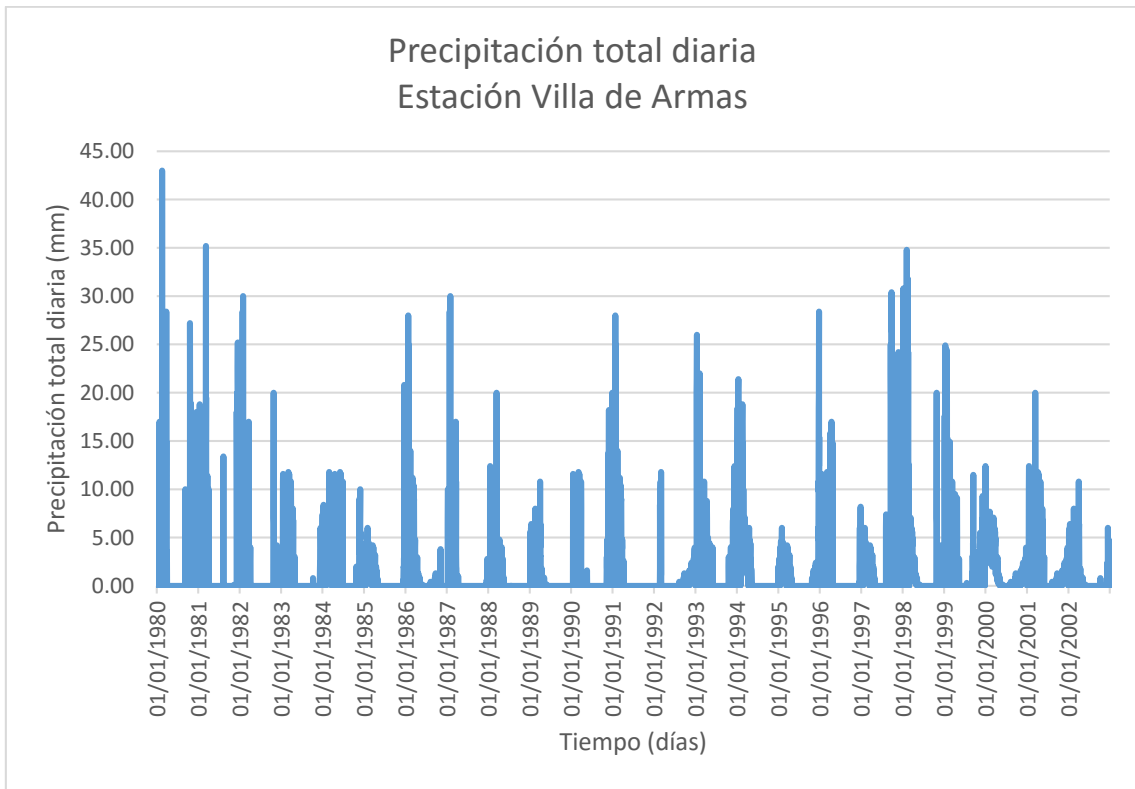
**Figura 41:** Histograma de precipitación total diaria (1980-2002), estación Tantara  
FUENTE: Elaboración propia



**Figura 42:** Histograma de precipitación total diaria (1980 -2002), estación Totora  
FUENTE: Elaboración propia



**Figura 43:** Histograma de precipitación total diaria (1980-2002), estación Tunnel Cero  
FUENTE: Elaboración propia

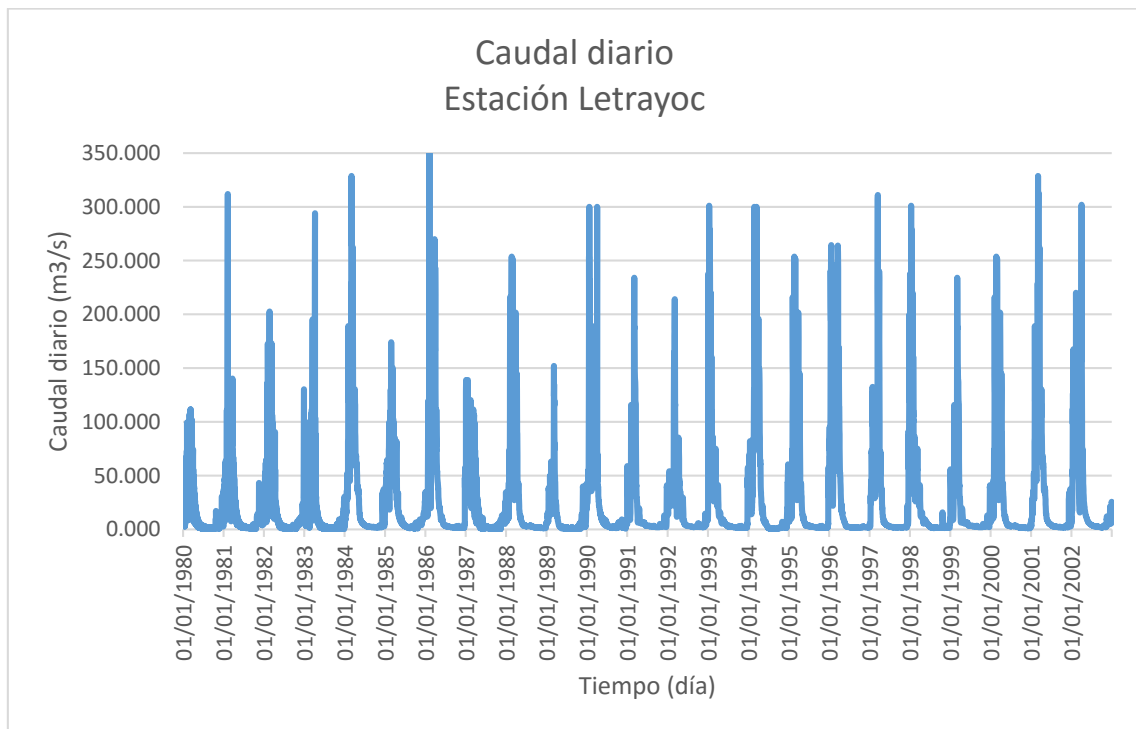


**Figura 44: Histograma de precipitación total diaria (1980-2002), estación Villa de Armas**

FUENTE: Elaboración propia

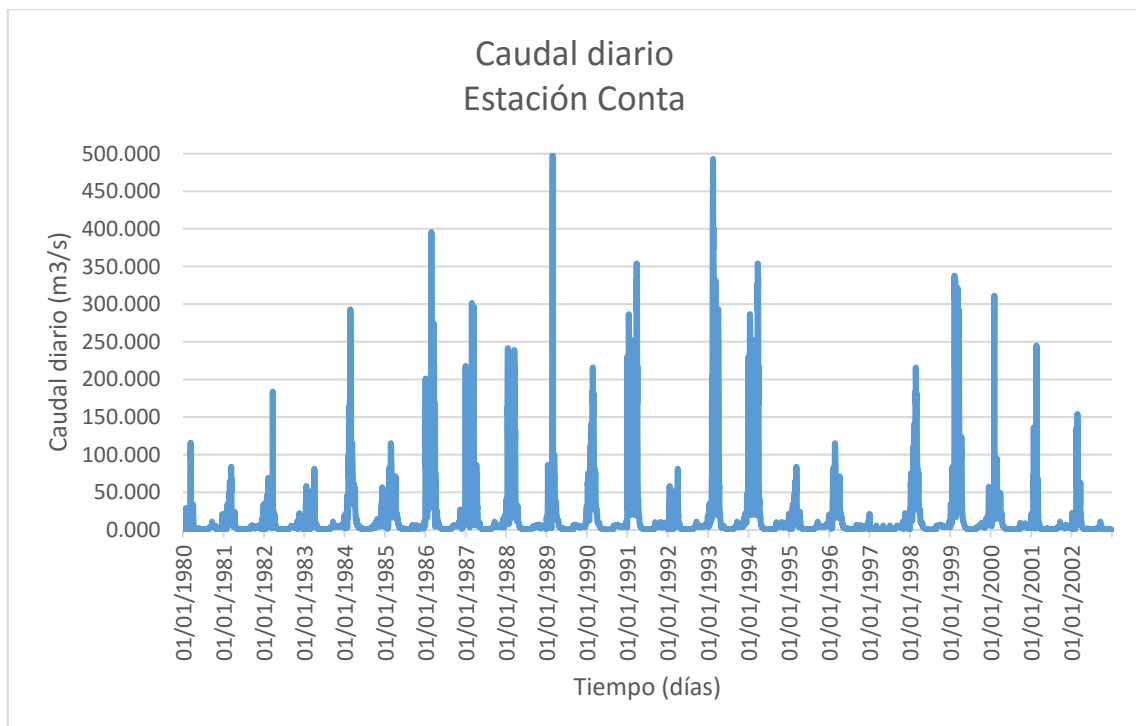


## ANEXO 1.2: HIDROMETRÍA



**Figura 45: Histograma de caudal diario (1980-2002), estación Letrayoc**

FUENTE: Elaboración propia



**Figura 46: Histograma de caudal diario (1980-2002), estación Conta**

FUENTE: Elaboración propia

### ANEXO 1.3 TEMPERATURA

**Tabla 25: Temperatura de un año promedio – Estaciones cuenca Pisco**

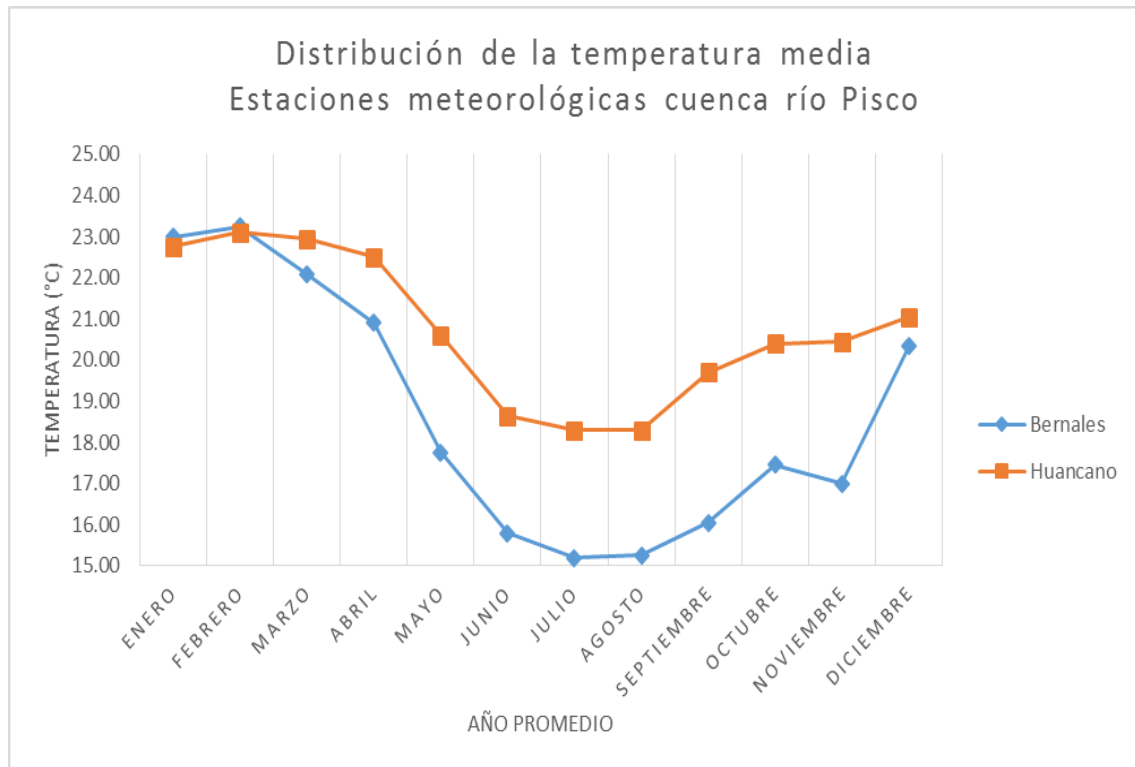
ESTACIÓN		AÑO PROMEDIO											
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
BERNALES	Media	23.00	23.25	22.10	20.90	17.75	15.80	15.20	15.25	16.05	17.45	17.00	20.35
	Mínima	21.20	21.50	21.30	20.10	16.60	14.30	14.00	14.00	14.70	15.90	14.90	19.80
	Máxima	24.80	25.00	22.90	21.70	18.90	17.30	16.40	16.50	17.40	19.00	19.10	20.90
HUANCANO	Media	22.75	23.10	22.95	22.50	20.60	18.65	18.30	18.30	19.70	20.40	20.45	21.05
	Mínima	21.30	21.90	22.00	21.20	19.90	17.60	17.40	17.70	18.80	19.80	19.50	20.00
	Máxima	24.20	24.30	23.90	23.80	21.30	19.70	19.20	18.90	20.60	21.00	21.40	22.10

FUENTE: Elaboración propia

**Tabla 26: Temperatura de un año promedio – Estaciones cuenca San Juan**

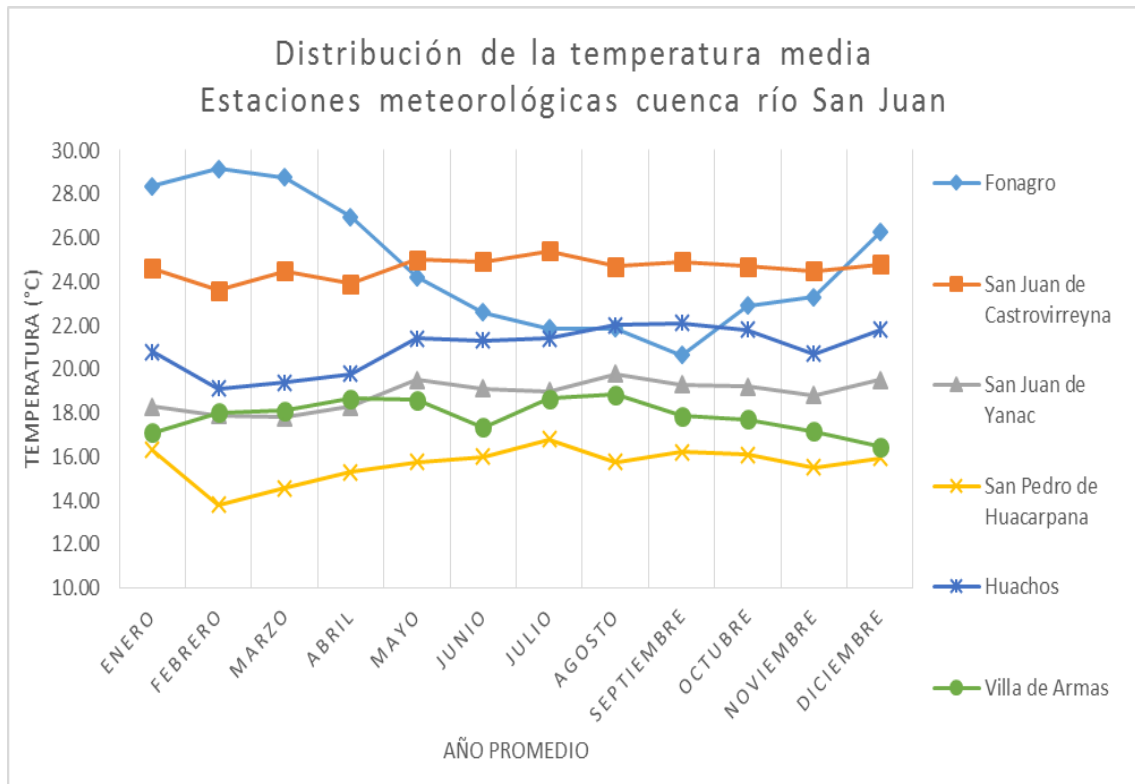
EST		AÑO PROMEDIO											
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Agos	Sep	Oct	Nov	Dic
FONAGRO	Medio	28.35	29.15	28.75	26.95	24.20	22.60	21.85	21.85	20.65	22.90	23.30	26.25
	Mínima	26.10	27.00	27.50	25.80	22.10	19.00	18.70	18.70	20.00	21.00	21.20	24.40
	Máxima	30.60	31.30	30.00	28.10	26.30	26.20	25.00	25.00	21.30	24.80	25.40	28.10
SAN JUAN DE CASTROVIRREYNA	Medio	24.60	23.60	24.50	23.90	25.00	24.90	25.40	24.70	24.90	24.70	24.50	24.80
	Mínima	20.50	21.80	22.70	22.60	23.60	24.70	24.40	23.70	24.70	23.80	22.90	24.40
	Máxima	28.70	25.40	26.30	25.20	26.40	25.10	26.40	25.70	25.10	25.60	26.10	25.20
SAN JUAN DE YANAC	Medio	18.30	17.90	17.80	18.30	19.50	19.10	19.00	19.80	19.30	19.20	18.80	19.50
	Mínima	16.40	16.60	15.20	14.30	16.90	14.80	17.90	17.20	18.60	17.20	16.40	14.60
	Máxima	20.20	19.20	20.40	22.30	22.10	23.40	20.10	22.40	20.00	21.20	21.20	24.40
HUACHOS	Medio	20.80	19.10	19.40	19.80	21.40	21.30	21.40	22.00	22.10	21.80	20.70	21.80
	Mínima	18.40	18.10	17.30	16.10	19.00	18.40	18.90	19.10	20.10	18.80	16.00	19.40
	Máxima	23.20	20.10	21.50	23.50	23.80	24.20	23.90	24.90	24.10	24.80	25.40	24.20
VILLA DE ARMAS	Medio	17.10	18.00	18.10	18.65	18.60	17.35	18.65	18.85	17.85	17.70	17.15	16.45
	Mínima	12.90	12.70	13.80	13.70	13.20	12.80	13.40	14.40	14.50	14.10	13.80	13.30
	Máxima	21.30	23.30	22.40	23.60	24.00	21.90	23.90	23.30	21.20	21.30	20.50	19.60

FUENTE: Elaboración propia



**Figura 47: Distribución de la temperatura media de un año promedio, estaciones de la cuenca del río Pisco**

FUENTE: Elaboración propia



**Figura 48: Distribución de la temperatura de un año promedio, estaciones de la cuenca del río San Juan**

FUENTE: Elaboración propia

## ANEXO 1.4 EVAPOTRANSPIRACIÓN

**Tabla 27: Evapotranspiración de un año promedio – Estaciones cuenca Pisco**

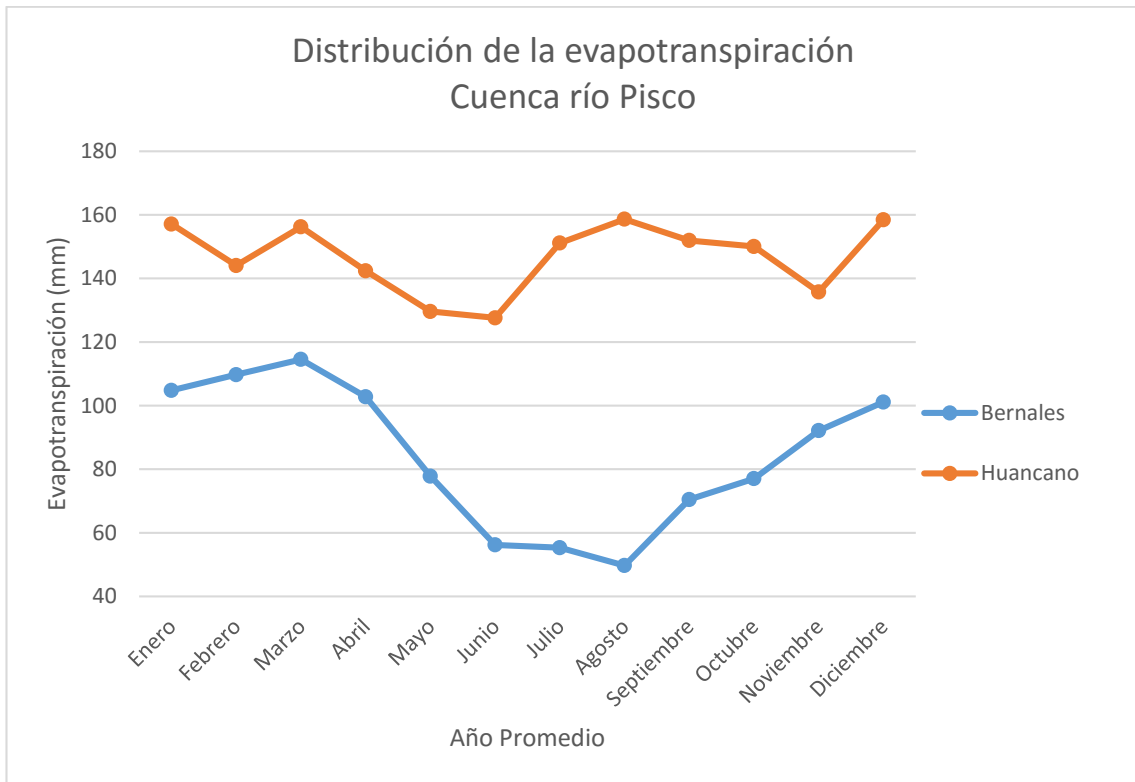
ESTACIÓN	AÑO PROMEDIO											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
BERNALES	104.80	109.72	114.54	102.78	77.80	56.20	55.30	49.70	70.45	77.04	92.12	101.12
HUANCANO	157.10	144.06	156.22	142.40	129.60	127.60	151.13	158.62	151.92	150.05	135.72	158.46

FUENTE: Elaboración propia

**Tabla 28: Evapotranspiración de un año promedio – Estaciones cuenca San Juan**

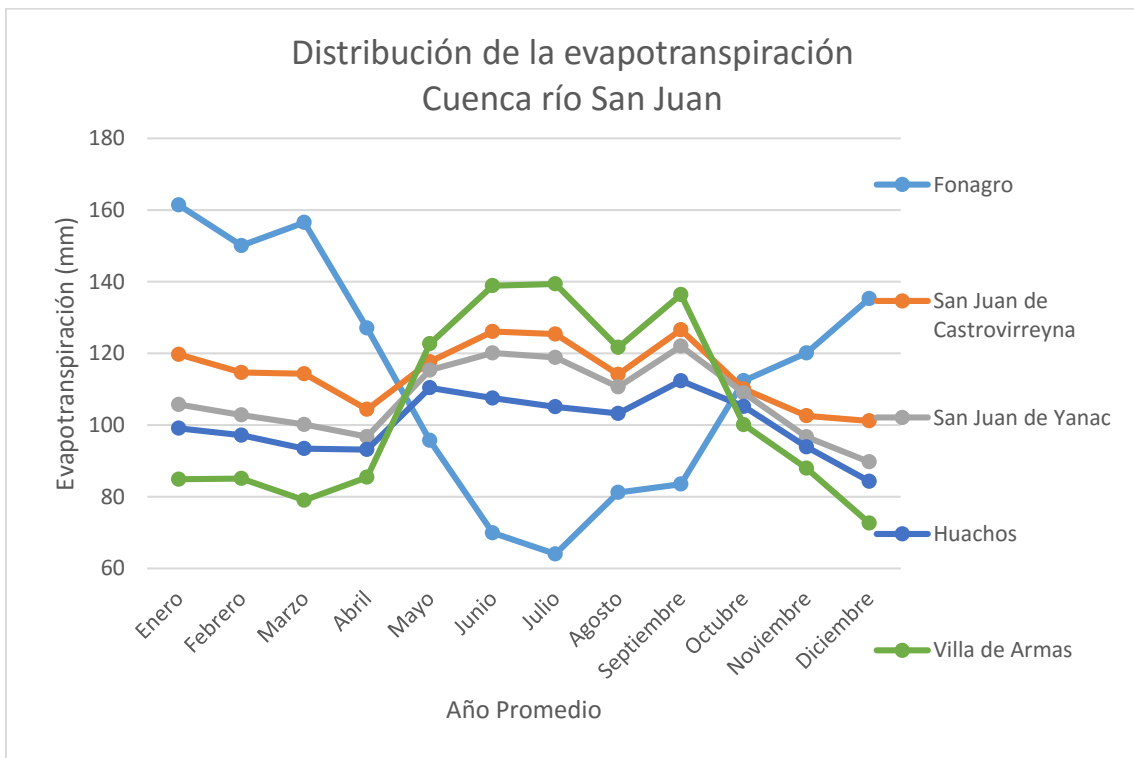
ESTACIÓN	AÑO PROMEDIO												
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Agos	Sep	Oct	Nov	Dic	
FONAGRO	161.39	150.08	156.54	127.05	95.72	69.92	64.03	81.20	83.52	112.37	120.12	135.30	
CASTROVIRREYNA	119.71	114.67	114.31	104.37	117.66	126.09	125.39	114.14	126.59	110.07	102.58	101.16	
SAN JUAN DE YANAC	105.73	102.80	100.15	96.77	115.33	120.11	118.86	110.63	122.00	108.97	96.70	89.72	
HUACHOS	99.10	97.16	93.43	93.16	110.40	107.51	105.09	103.24	112.34	105.20	93.910	84.29	
VILLA DE ARMAS	84.89	85.09	79.03	85.43	122.67	138.90	139.39	121.65	136.41	100.10	87.93	72.65	

FUENTE: Elaboración propia



**Figura 49:** Distribución de la evapotranspiración de un año promedio, estaciones de la cuenca del río Pisco

FUENTE: Elaboración propia



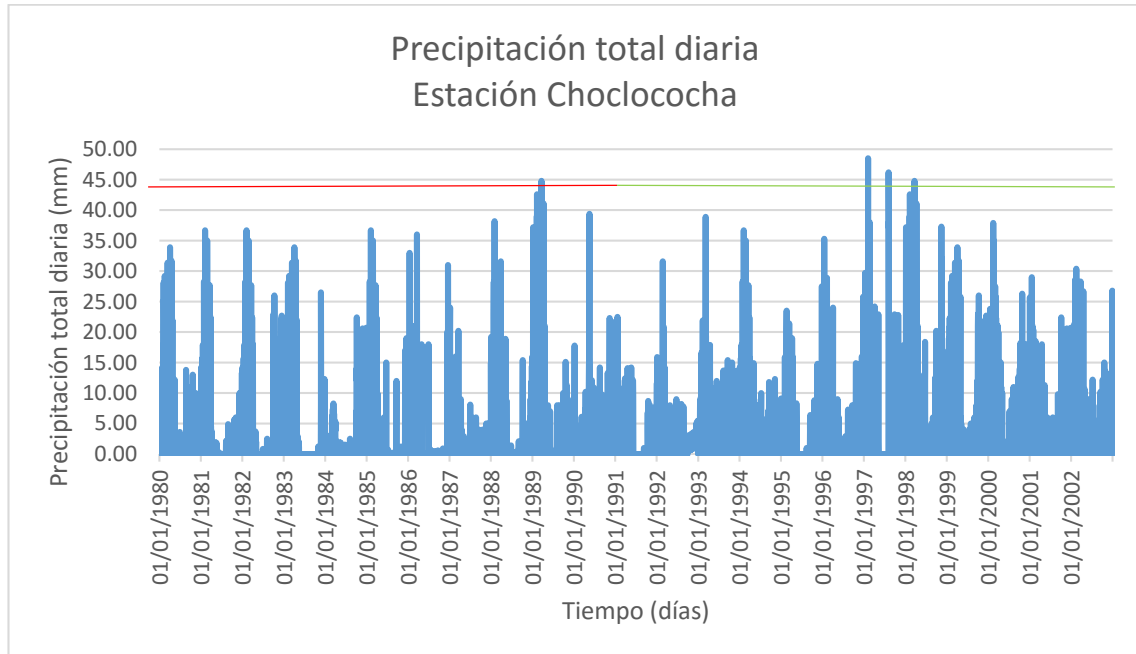
**Figura 50:** Distribución de la evapotranspiración de un año promedio, estaciones de la cuenca del río San Juan

FUENTE: Elaboración propia

## ANEXO 2: ANÁLISIS DE CONSISTENCIA DE DATOS PLUVIOMÉTRICOS E HIDROMÉTRICOS

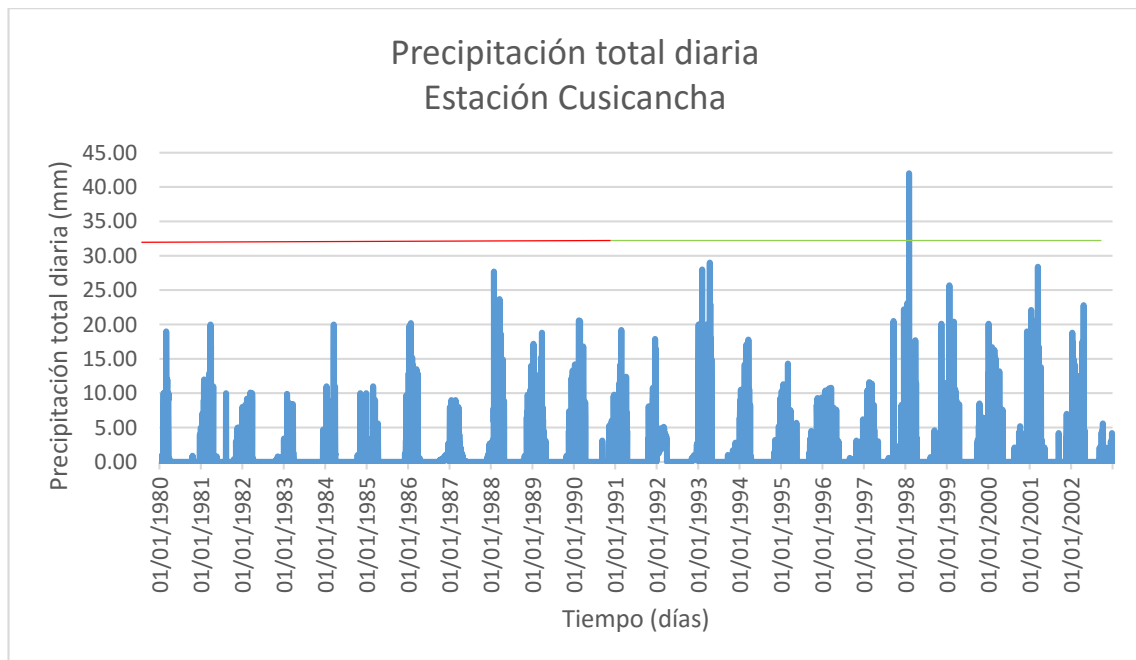
### ANEXO 2.1: PLUVIOMETRÍA

#### A) ANÁLISIS DE SALTOS



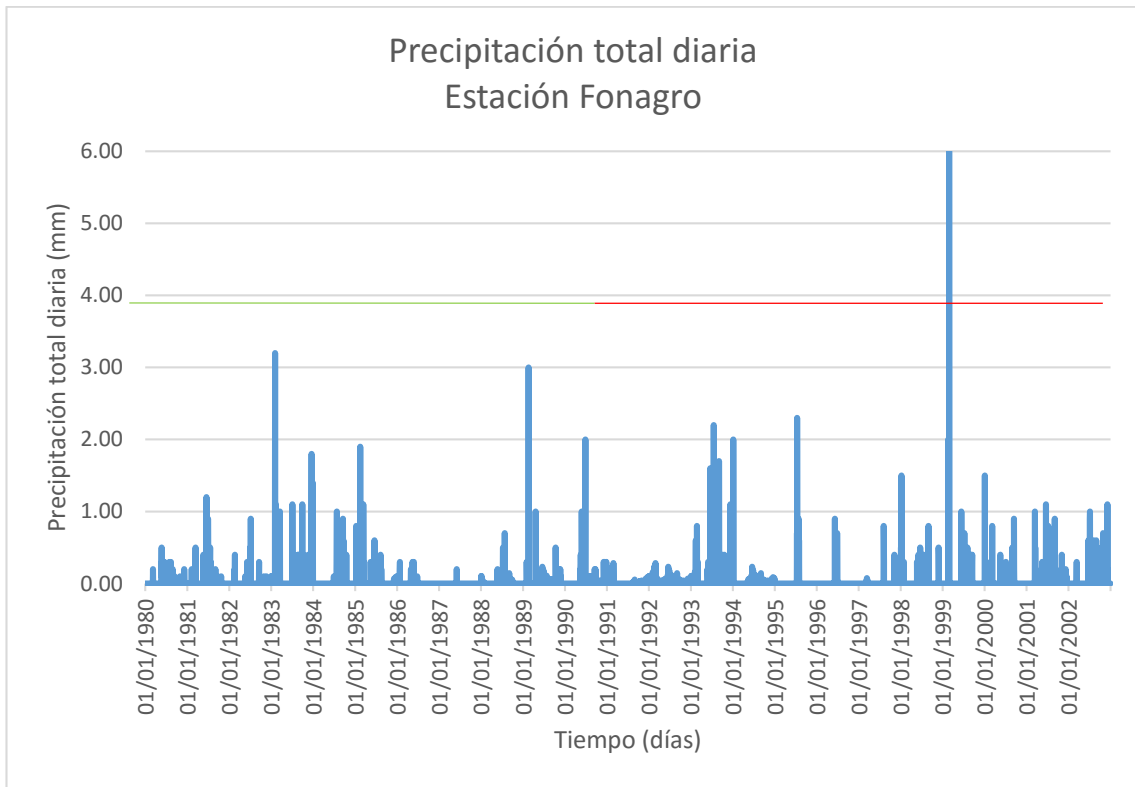
**Figura 51: Identificación de saltos, estación Choclococha**

FUENTE: Elaboración propia



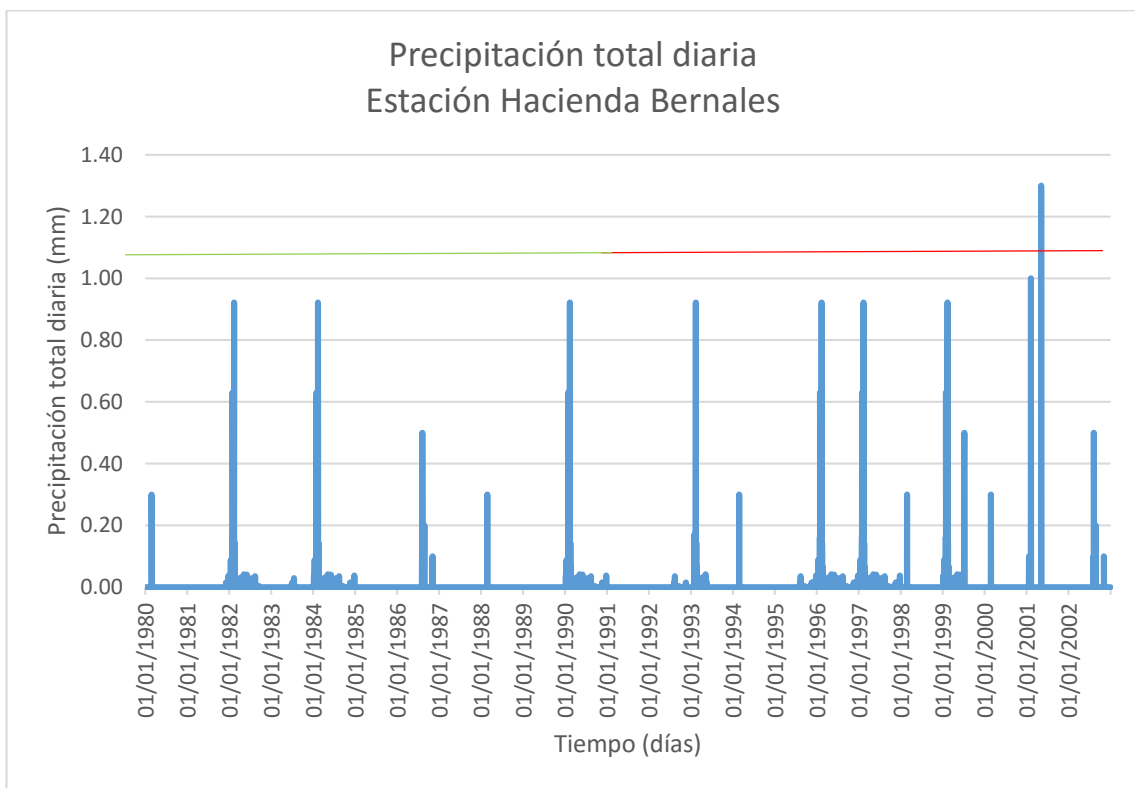
**Figura 52: Identificación de saltos, estación Cusicancha**

FUENTE: Elaboración propia



**Figura 53: Identificación de saltos, estación Fonagro**

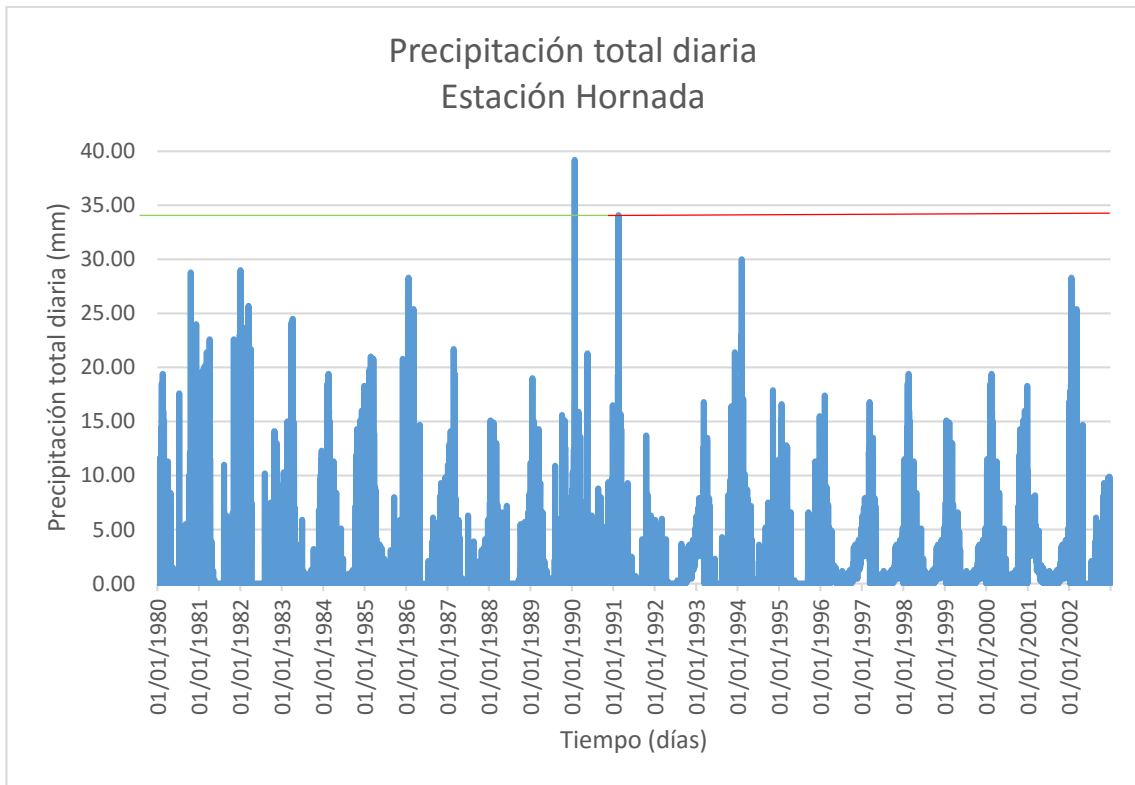
FUENTE: Elaboración propia



**Figura 54: Identificación de saltos, estación Hacienda Bernales**

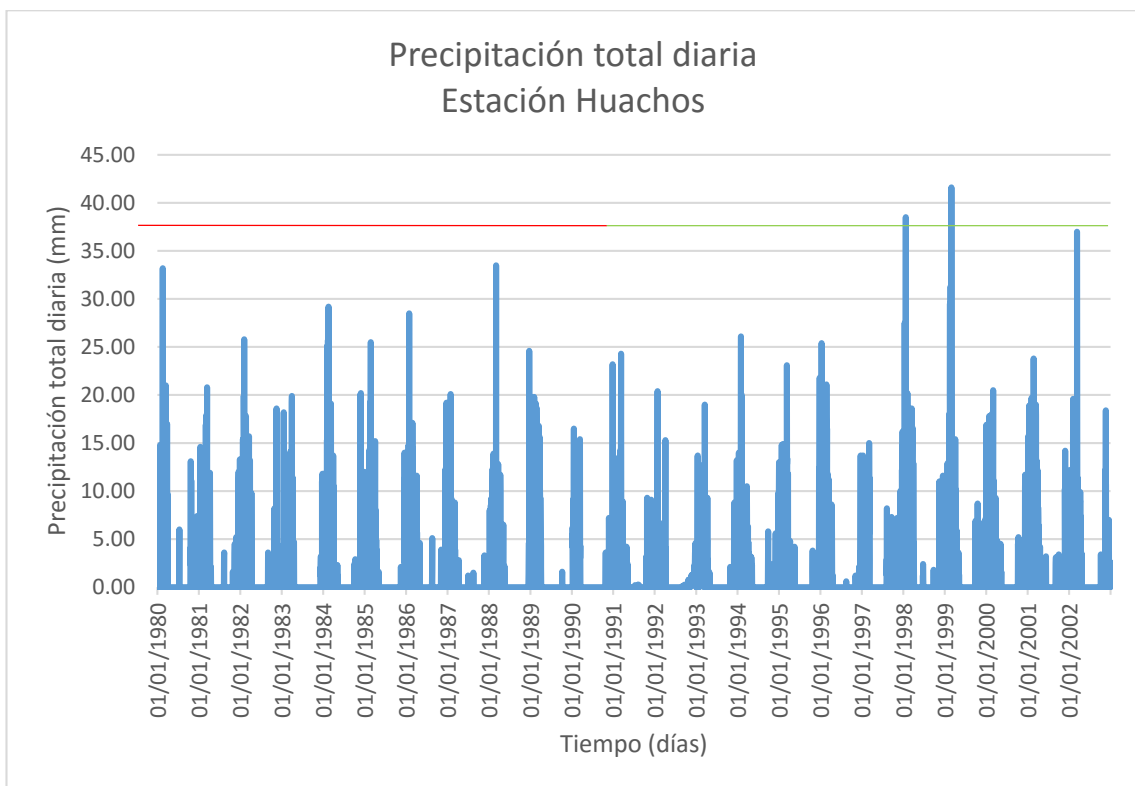
FUENTE: Elaboración propia





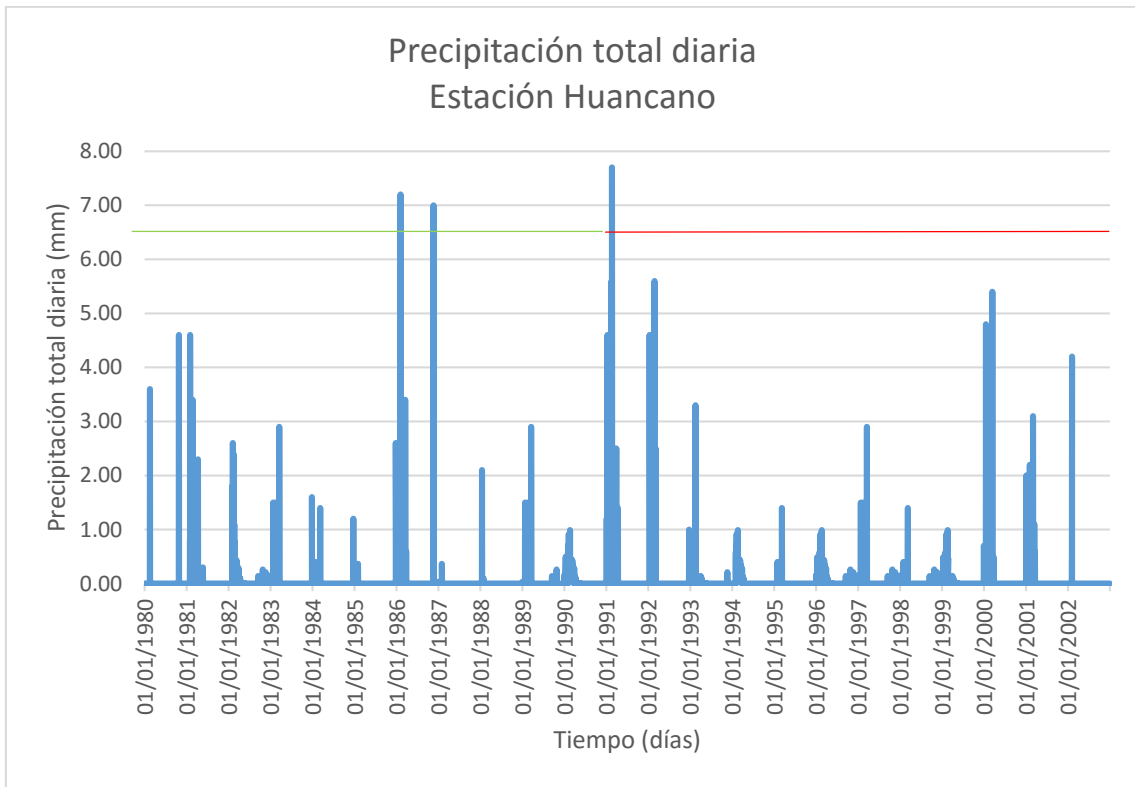
**Figura 55: Identificación de saltos, estación Hornada**

FUENTE: Elaboración propia



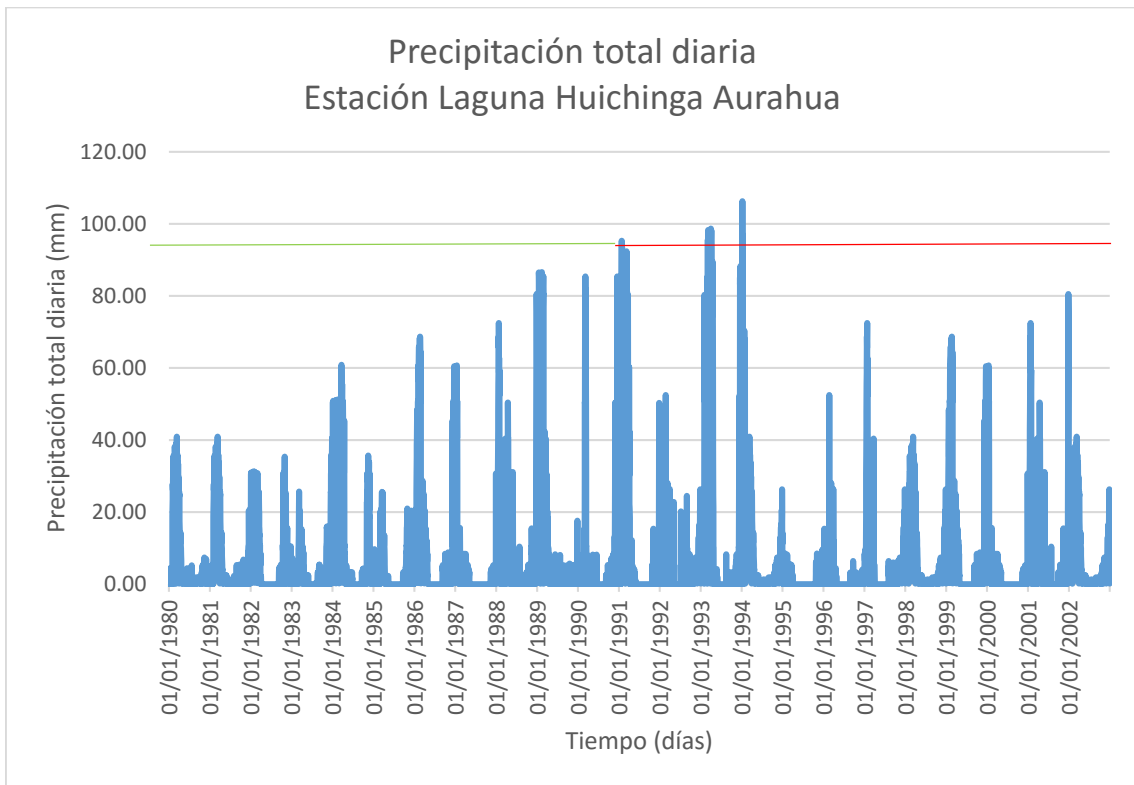
**Figura 56: Identificación de saltos, estación Huachos**

FUENTE: Elaboración propia



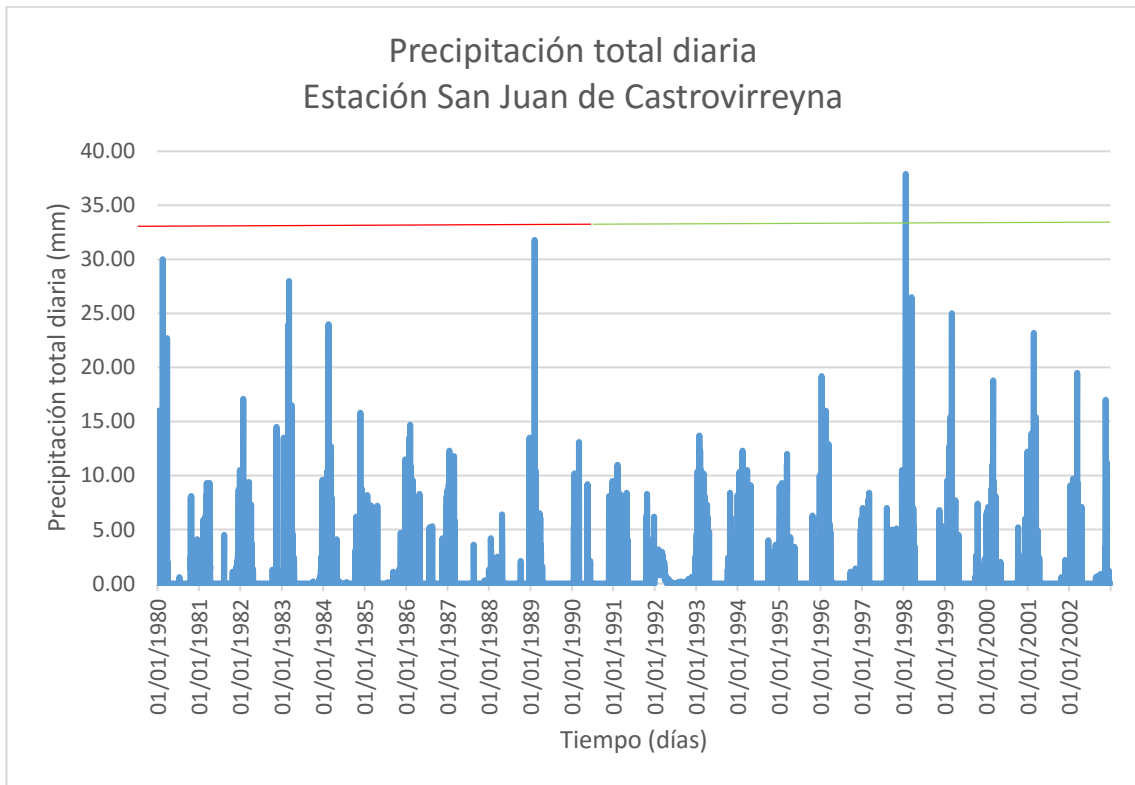
**Figura 57: Identificación de saltos, estación Huancano**

FUENTE: Elaboración propia



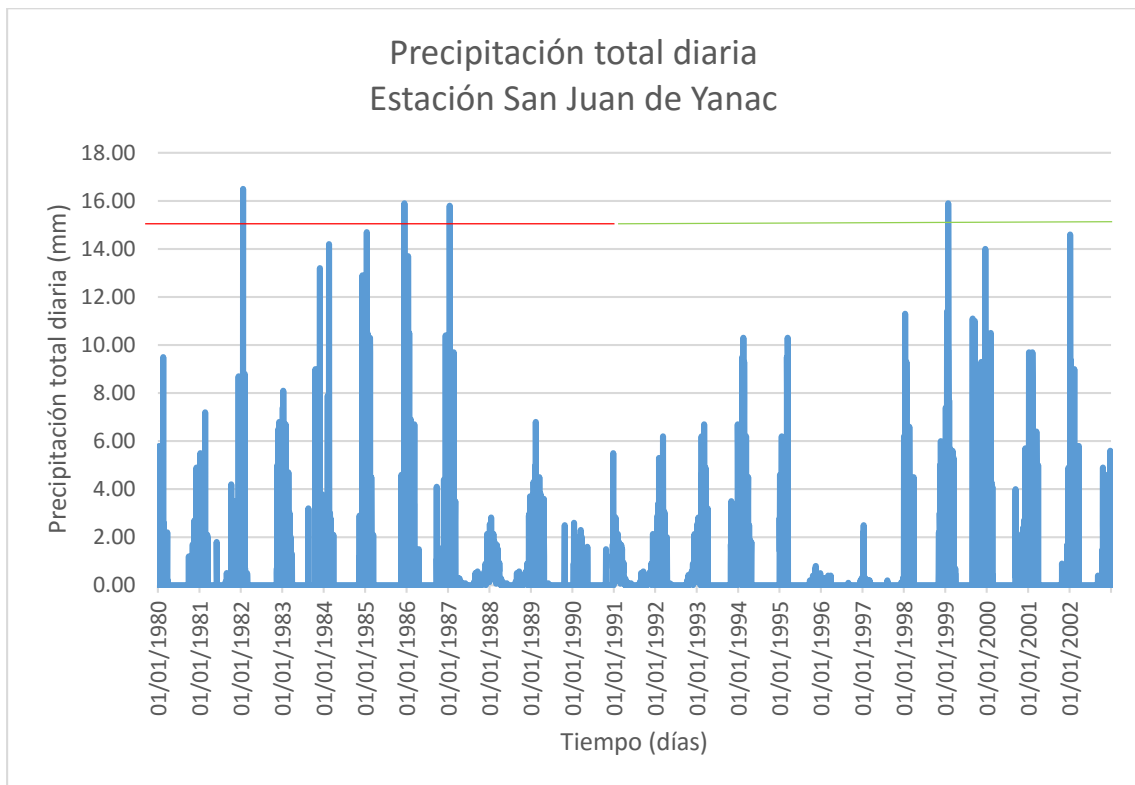
**Figura 58: Identificación de saltos, estación Laguna Huichinga Aurahua**

FUENTE: Elaboración propia



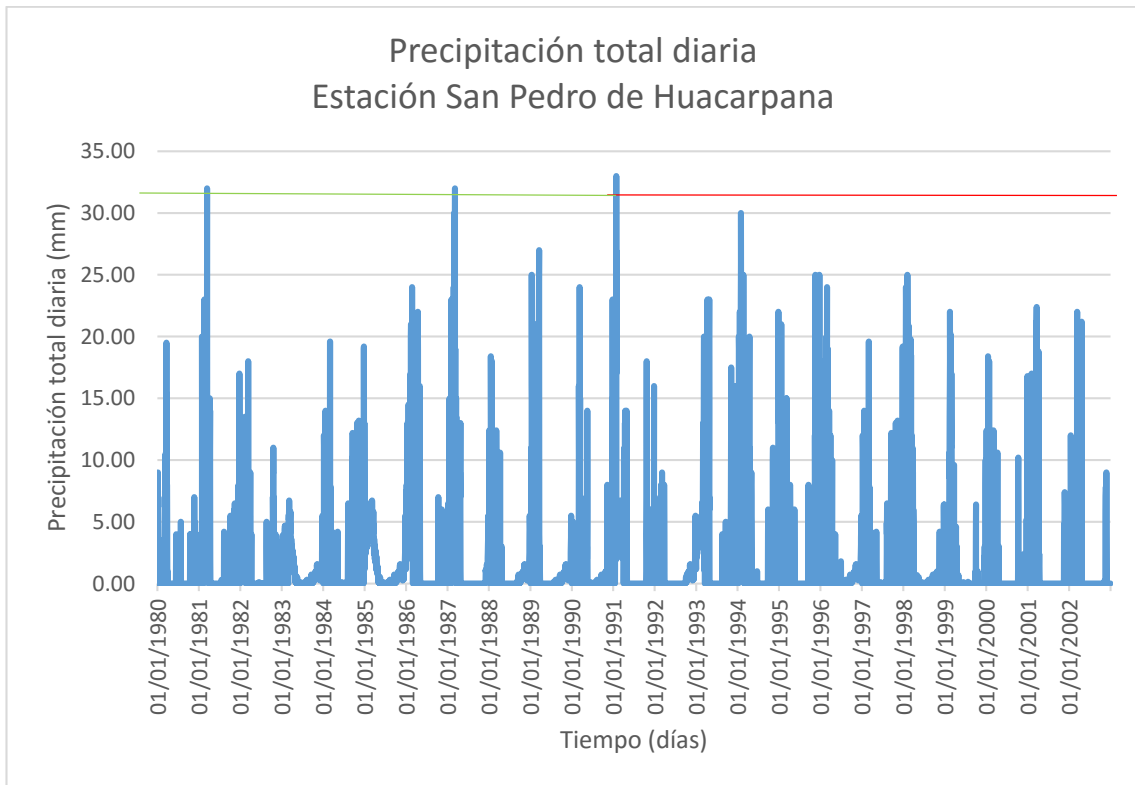
**Figura 59: Identificación de saltos, estación Castrovirreyna**

FUENTE: Elaboración propia

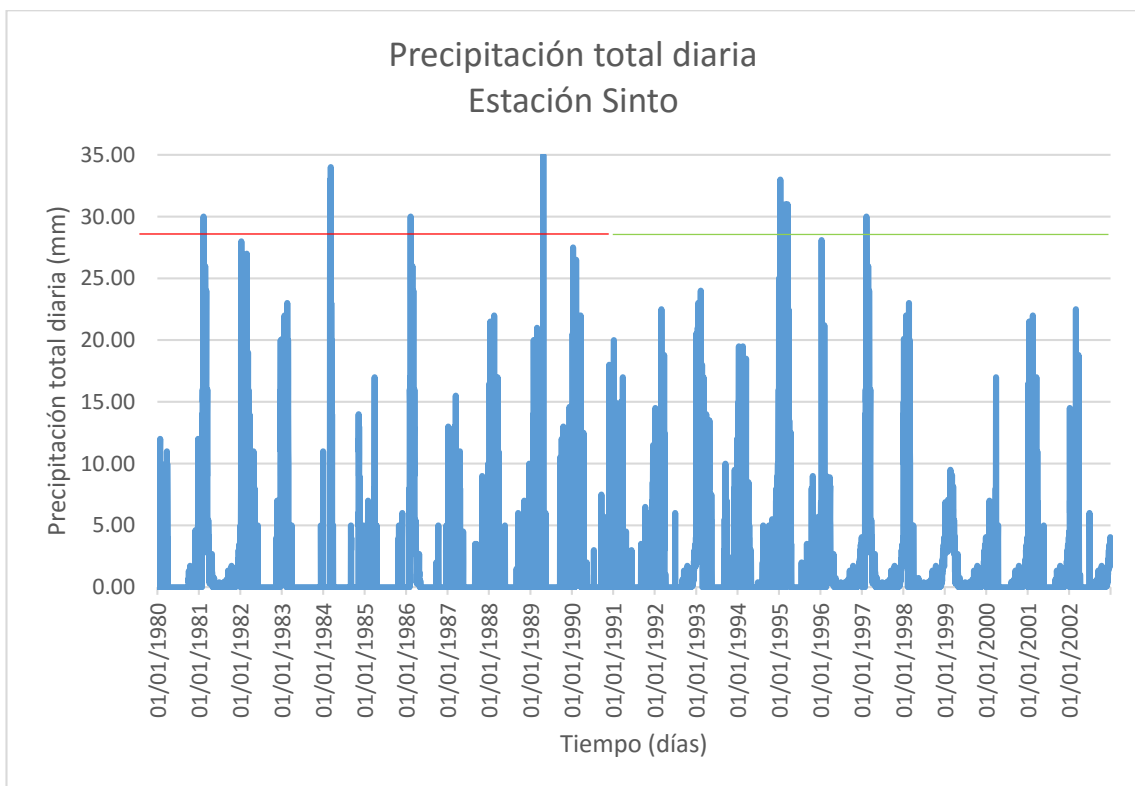


**Figura 60: Identificación de saltos, estación San Juan de Yanac**

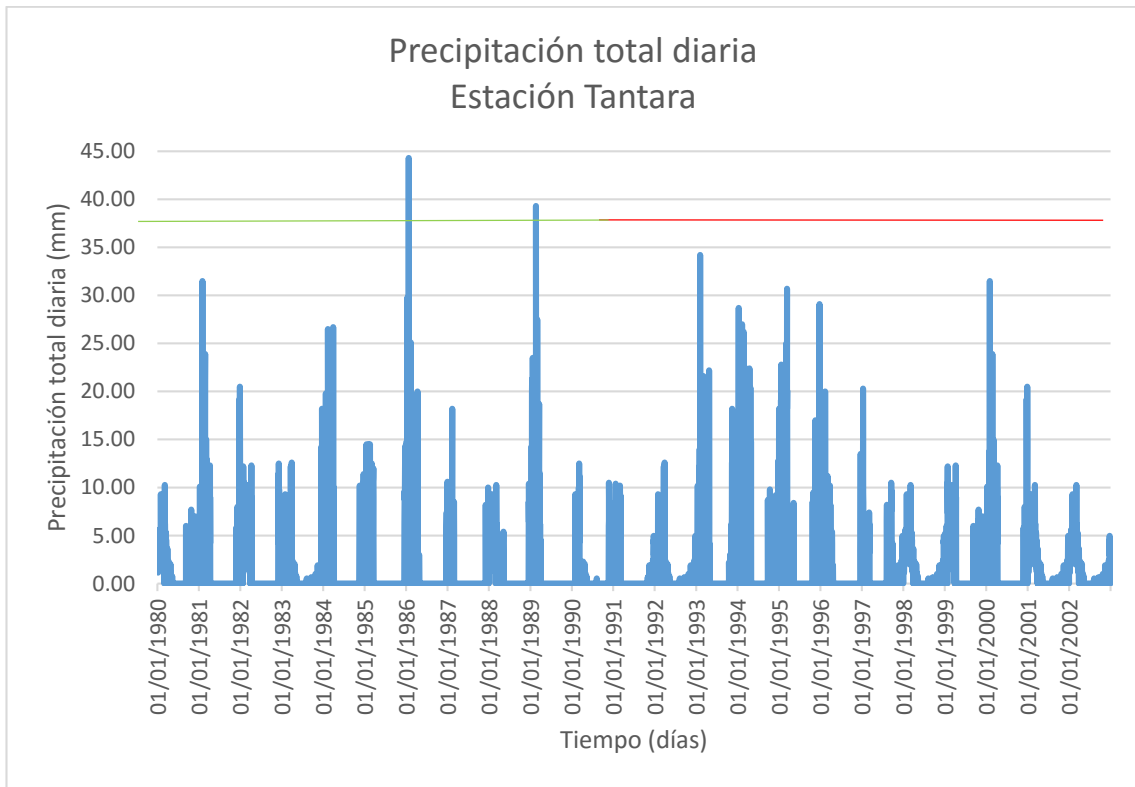
FUENTE: Elaboración propia



**Figura 61: Identificación de saltos, estación San Pedro de Huacarpana**  
FUENTE: Elaboración propia

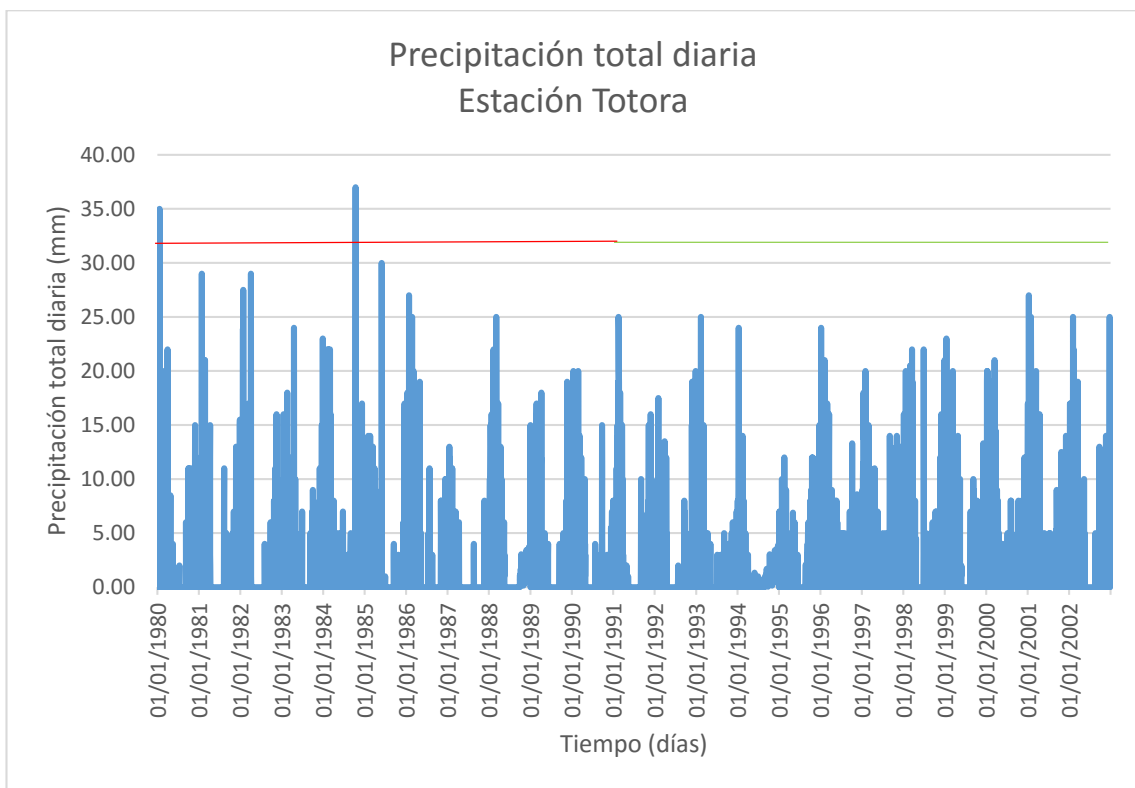


**Figura 62: Identificación de saltos, estación Sinto**  
FUENTE: Elaboración propia



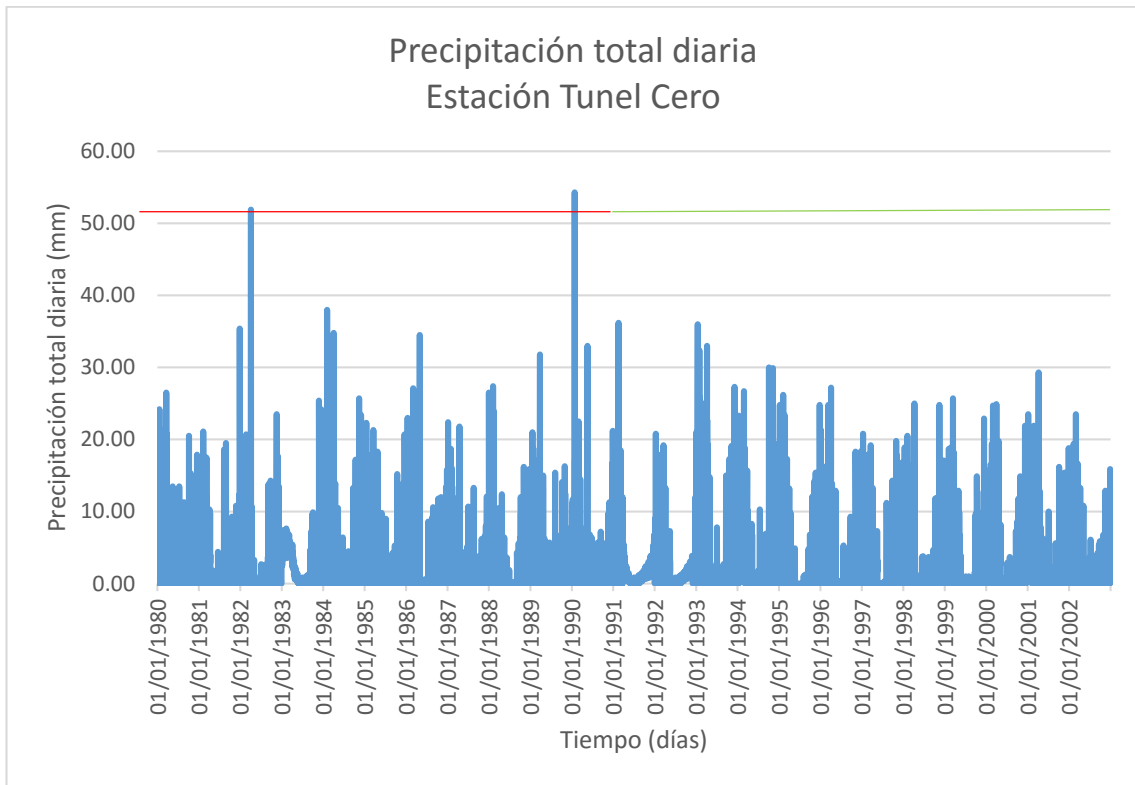
**Figura 63: Identificación de saltos, estación Tantara**

FUENTE: Elaboración propia



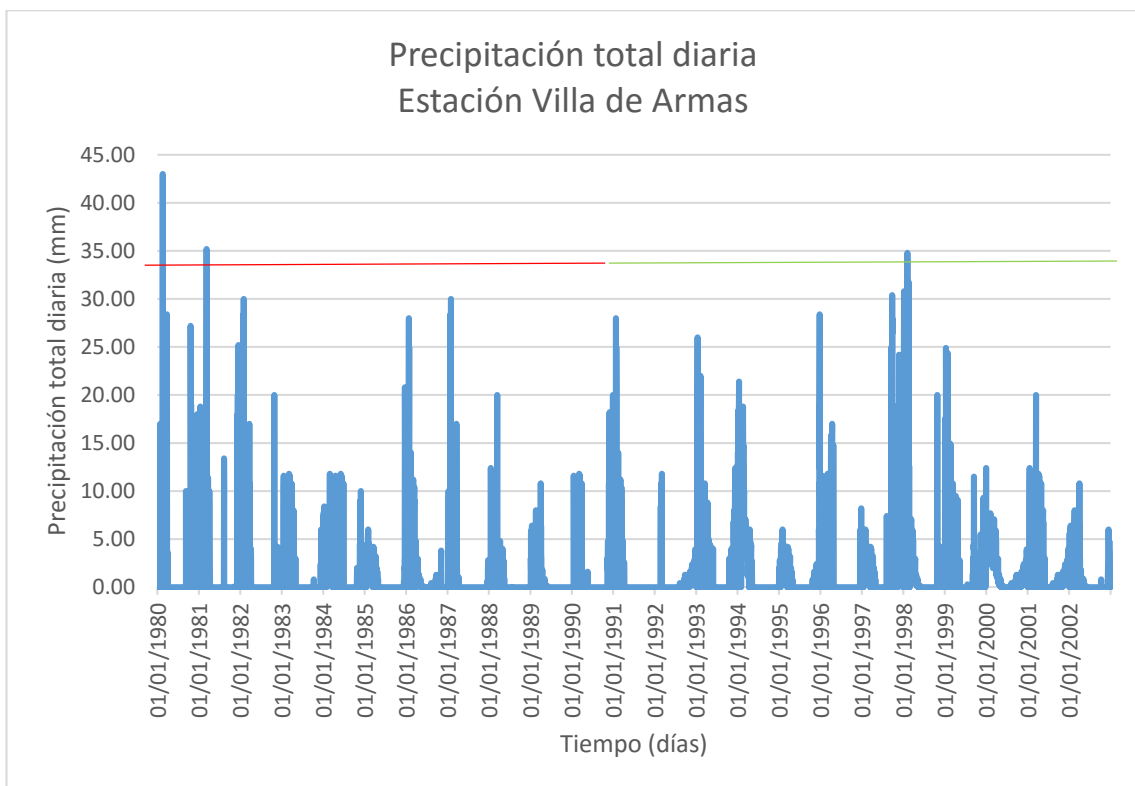
**Figura 64: Identificación de saltos, estación Totora**

FUENTE: Elaboración propia



**Figura 65: Identificación de saltos, estación Tunel Cero**

FUENTE: Elaboración propia



**Figura 66: Identificación de saltos, estación Villa de Armas**

FUENTE: Elaboración propia

## B) ANÁLISIS ESTADÍSTICO – MEDIA (MÉTODO T DE STUDENT)

**Tabla 29: Análisis estadístico método T de Student, estación Choclococha**

<b>Prueba td</b>	<b>Julio 1991 – Diciembre 2002</b>	<b>Enero 1980 – Junio 1991</b>
Observaciones	4202	4199
Media	2.66	2.44
Varianza	35.67	31.08
Valor estadístico td	1.76	
Valor de T tabla	1.96	
Conclusión	(Tt > td) Consistente	

FUENTE: Elaboración propia

**Tabla 30: Análisis estadístico método T de Student, estación Cusicancha**

<b>Prueba td</b>	<b>Julio 1991 – Diciembre 2002</b>	<b>Enero 1980 – Junio 1991</b>
Observaciones	4202	4199
Media	1.12	1.04
Varianza	10.21	7.74
Valor estadístico td	1.26	
Valor de T tabla	1.96	
Conclusión	(Tt > td) Consistente	

FUENTE: Elaboración propia

**Tabla 31: Análisis estadístico método T de Student, estación Fonagro**

<b>Prueba td</b>	<b>Julio 1991 – Diciembre 2002</b>	<b>Enero 1980 – Junio 1991</b>
Observaciones	4202	4199
Media	0.03	0.02
Varianza	0.02	0.01
Valor estadístico td	1.08	
Valor de T tabla	1.96	
Conclusión	(Tt > td) Consistente	

FUENTE: Elaboración propia

**Tabla 32: Análisis estadístico método T de Student, estación Hacienda Bernales**

<b>Prueba td</b>	<b>Julio 1991 – Diciembre 2002</b>	<b>Enero 1980 – Junio 1991</b>
Observaciones	4202	4199
Media	0.01	0.02
Varianza	0.02	0.01
Valor estadístico td	0.79	
Valor de T tabla	1.96	
Conclusión	(Tt > td) Consistente	

FUENTE: Elaboración propia

**Tabla 33: Análisis estadístico método T de Student, estación Hornada**

<b>Prueba td</b>	<b>Enero 1980 – Junio 1991</b>	<b>Julio 1991 – Diciembre 2002</b>
Observaciones	4199	4202
Media	2.02	1.97
Varianza	15.96	10.82
Valor estadístico td	0.62	
Valor de T tabla	1.96	
Conclusión	(Tt > td) Consistente	

FUENTE: Elaboración propia

**Tabla 34: Análisis estadístico método T de Student, estación Huachos**

<b>Prueba td</b>	<b>Julio 1991 – Diciembre 2002</b>	<b>Enero 1980 – Junio 1991</b>
Observaciones	4202	4199
Media	1.24	1.21
Varianza	11.29	11.27
Valor estadístico td	0.41	
Valor de T tabla	1.96	
Conclusión	(Tt > td) Consistente	

FUENTE: Elaboración propia



**Tabla 35: Análisis estadístico método T de Student, estación Huancano**

<b>Prueba td</b>	<b>Enero 1980 – Junio 1991</b>	<b>Julio 1991 – Diciembre 2002</b>
Observaciones	4199	4202
Media	0.04	0.03
Varianza	0.11	0.07
Valor estadístico td	0.39	
Valor de T tabla	1.96	
Conclusión	(Tt > td) Consistente	

FUENTE: Elaboración propia

**Tabla 36: Análisis estadístico método T de Student, estación Laguna Huichinga Aurahua**

<b>Prueba td</b>	<b>Enero 1980 – Junio 1991</b>	<b>Julio 1991 – Diciembre 2002</b>
Observaciones	4199	4202
Media	8.38	7.74
Varianza	272.55	244.38
Valor estadístico td	1.80	
Valor de T tabla	1.96	
Conclusión	(Tt > td) Consistente	

FUENTE: Elaboración propia

**Tabla 37: Análisis estadístico método T de Student, estación Castrovirreyna**

<b>Prueba td</b>	<b>Julio 1991 – Diciembre 2002</b>	<b>Enero 1980 – Junio 1991</b>
Observaciones	4202	4199
Media	0.56	0.50
Varianza	4.45	3.86
Valor estadístico td	1.29	
Valor de T tabla	1.96	
Conclusión	(Tt > td) Consistente	

FUENTE: Elaboración propia

**Tabla 38: Análisis estadístico método T de Student, estación San Juan de Yanac**

<b>Prueba td</b>	<b>Julio 1991 – Diciembre 2002</b>	<b>Enero 1980 – Junio 1991</b>
Observaciones	4202	4199
Media	0.39	0.37
Varianza	1.83	1.53
Valor estadístico td	0.74	
Valor de T tabla	1.96	
Conclusión	(Tt > td) Consistente	

FUENTE: Elaboración propia

**Tabla 39: Análisis estadístico método T de Student, estación San Pedro de Huacarpana**

<b>Prueba td</b>	<b>Enero 1980 – Junio 1991</b>	<b>Julio 1991 – Diciembre 2002</b>
Observaciones	4199	4202
Media	1.80	1.78
Varianza	14.55	15.57
Valor estadístico td	0.29	
Valor de T tabla	1.96	
Conclusión	(Tt > td) Consistente	

FUENTE: Elaboración propia

**Tabla 40: Análisis estadístico método T de Student, estación Sinto**

<b>Prueba td</b>	<b>Julio 1991 – Diciembre 2002</b>	<b>Enero 1980 – Junio 1991</b>
Observaciones	4202	4199
Media	1.71	1.59
Varianza	15.72	17.44
Valor estadístico td	1.31	
Valor de T tabla	1.96	
Conclusión	(Tt > td) Consistente	

FUENTE: Elaboración propia

**Tabla 41: Análisis estadístico método T de Student, estación Tantara**

<b>Prueba td</b>	<b>Enero 1980 – Junio 1991</b>	<b>Julio 1991 – Diciembre 2002</b>
Observaciones	4199	4202
Media	1.25	1.23
Varianza	11.17	9.69
Valor estadístico td	0.27	
Valor de T tabla	1.96	
Conclusión	(Tt > td) Consistente	

FUENTE: Elaboración propia

**Tabla 42: Análisis estadístico método T de Student, estación Totora**

<b>Prueba td</b>	<b>Julio 1991 – Diciembre 2002</b>	<b>Enero 1980 – Junio 1991</b>
Observaciones	4202	4199
Media	1.69	1.63
Varianza	14.21	12.63
Valor estadístico td	0.73	
Valor de T tabla	1.96	
Conclusión	(Tt > td) Consistente	

FUENTE: Elaboración propia

**Tabla 43: Análisis estadístico método T de Student, estación Tunel Cero**

<b>Prueba td</b>	<b>Julio 1991 – Diciembre 2002</b>	<b>Enero 1980 – Junio 1991</b>
Observaciones	4202	4199
Media	2.44	2.41
Varianza	19.60	19.65
Valor estadístico td	0.26	
Valor de T tabla	1.96	
Conclusión	(Tt > td) Consistente	

FUENTE: Elaboración propia

**Tabla 44: Análisis estadístico método T de Student, estación Villa de Armas**

<b>Prueba td</b>	<b>Julio 1991 – Diciembre 2002</b>	<b>Enero 1980 – Junio 1991</b>
Observaciones	4202	4199
Media	1.30	1.16
Varianza	11.92	10.63
Valor estadístico td	1.92	
Valor de T tabla	1.96	
Conclusión	(Tt > td) Consistente	

FUENTE: Elaboración propia

### **C) ANÁLISIS ESTADÍSTICO – VARIANZA (MÉTODO FISHER)**

**Tabla 45: Análisis estadístico método Fisher, estación Choclococha**

<b>Prueba F</b>	<b>Julio 1991 – Diciembre 2002</b>	<b>Enero 1980 – Junio 1991</b>
Observaciones	4202	4199
Media	2.66	2.44
Varianza	35.67	31.08
Valor estadístico Fcal	1.15	
Valor de T tabla	1.53	
Conclusión	(Ft > Fcal) Consistente	

FUENTE: Elaboración propia

**Tabla 46: Análisis estadístico método Fisher, estación Cusicancha**

<b>Prueba F</b>	<b>Julio 1991 – Diciembre 2002</b>	<b>Enero 1980 – Junio 1991</b>
Observaciones	4202	4199
Media	1.12	1.04
Varianza	10.21	7.74
Valor estadístico Fcal	1.32	
Valor de T tabla	1.53	
Conclusión	(Ft > Fcal) Consistente	

FUENTE: Elaboración propia

**Tabla 47: Análisis estadístico método Fisher, estación Fonagro**

<b>Prueba F</b>	<b>Julio 1991 – Diciembre 2002</b>	<b>Enero 1980 – Junio 1991</b>
Observaciones	4202	4199
Media	0.03	0.02
Varianza	0.02	0.01
Valor estadístico Fcal	1.50	
Valor de T tabla	1.53	
Conclusión	(Ft > Fcal) Consistente	

FUENTE: Elaboración propia

**Tabla 48: Análisis estadístico método Fisher, estación Hacienda Bernales**

<b>Prueba F</b>	<b>Julio 1991 – Diciembre 2002</b>	<b>Enero 1980 – Junio 1991</b>
Observaciones	4202	4199
Media	0.01	0.02
Varianza	0.002	0.001
Valor estadístico Fcal	1.50	
Valor de T tabla	1.53	
Conclusión	(Ft > Fcal) Consistente	

FUENTE: Elaboración propia

**Tabla 49: Análisis estadístico método Fisher, estación Hornada**

<b>Prueba F</b>	<b>Enero 1980 – Junio 1991</b>	<b>Julio 1991 – Diciembre 2002</b>
Observaciones	4199	4202
Media	2.02	1.97
Varianza	15.97	10.82
Valor estadístico Fcal	1.48	
Valor de T tabla	1.53	
Conclusión	(Ft > Fcal) Consistente	

FUENTE: Elaboración propia

**Tabla 50: Análisis estadístico método Fisher, estación Huachos**

<b>Prueba F</b>	<b>Julio 1991 – Diciembre 2002</b>	<b>Enero 1980 – Junio 1991</b>
Observaciones	4202	4199
Media	1.24	1.21
Varianza	11.29	11.27
Valor estadístico Fcal	1.00	
Valor de T tabla	1.53	
Conclusión	(Ft > Fcal) Consistente	

FUENTE: Elaboración propia

**Tabla 51: Análisis estadístico método Fisher, estación Huancano**

<b>Prueba F</b>	<b>Enero 1980 – Junio 1991</b>	<b>Julio 1991 – Diciembre 2002</b>
Observaciones	4199	4202
Media	0.04	0.03
Varianza	0.11	0.07
Valor estadístico Fcal	1.52	
Valor de T tabla	1.53	
Conclusión	(Ft > Fcal) Consistente	

FUENTE: Elaboración propia

**Tabla 52: Análisis estadístico método Fisher, estación Laguna Huichinga Aurahua**

<b>Prueba F</b>	<b>Enero 1980 – Junio 1991</b>	<b>Julio 1991 – Diciembre 2002</b>
Observaciones	4199	4202
Media	8.38	7.74
Varianza	272.55	244.38
Valor estadístico Fcal	1.12	
Valor de T tabla	1.53	
Conclusión	(Ft > Fcal) Consistente	

FUENTE: Elaboración propia

**Tabla 53: Análisis estadístico método Fisher, estación Castrovirreyña**

<b>Prueba F</b>	<b>Julio 1991 – Diciembre 2002</b>	<b>Enero 1980 – Junio 1991</b>
Observaciones	4202	4199
Media	0.56	0.50
Varianza	4.45	3.86
Valor estadístico Fcal	1.15	
Valor de T tabla	1.53	
Conclusión	(Ft > Fcal) Consistente	

FUENTE: Elaboración propia

**Tabla 54: Análisis estadístico método Fisher, estación San Juan de Yanac**

<b>Prueba F</b>	<b>Julio 1991 – Diciembre 2002</b>	<b>Enero 1980 – Junio 1991</b>
Observaciones	4202	4199
Media	0.39	0.37
Varianza	1.83	1.53
Valor estadístico Fcal	1.19	
Valor de T tabla	1.53	
Conclusión	(Ft > Fcal) Consistente	

FUENTE: Elaboración propia

**Tabla 55: Análisis estadístico método Fisher, estación San Pedro de Huacarpana**

<b>Prueba F</b>	<b>Enero 1980 – Junio 1991</b>	<b>Julio 1991 – Diciembre 2002</b>
Observaciones	4199	4202
Media	1.80	1.78
Varianza	14.55	15.57
Valor estadístico Fcal	1.07	
Valor de T tabla	1.53	
Conclusión	(Ft > Fcal) Consistente	

FUENTE: Elaboración propia

**Tabla 56: Análisis estadístico método Fisher, estación Sinto**

<b>Prueba F</b>	<b>Julio 1991 – Diciembre 2002</b>	<b>Enero 1980 – Junio 1991</b>
Observaciones	4202	4199
Media	1.71	1.59
Varianza	15.72	17.44
Valor estadístico Fcal	1.11	
Valor de T tabla	1.53	
Conclusión	(Ft > Fcal) Consistente	

FUENTE: Elaboración propia

**Tabla 57: Análisis estadístico método Fisher, estación Tantara**

<b>Prueba F</b>	<b>Enero 1980 – Junio 1991</b>	<b>Julio 1991 – Diciembre 2002</b>
Observaciones	4199	4202
Media	1.25	1.23
Varianza	11.17	9.69
Valor estadístico Fcal	1.15	
Valor de T tabla	1.53	
Conclusión	(Ft > Fcal) Consistente	

FUENTE: Elaboración propia

**Tabla 58: Análisis estadístico método Fisher, estación Totora**

<b>Prueba F</b>	<b>Julio 1991 – Diciembre 2002</b>	<b>Enero 1980 – Junio 1991</b>
Observaciones	4202	4199
Media	1.69	1.63
Varianza	14.21	12.63
Valor estadístico Fcal	1.12	
Valor de T tabla	1.53	
Conclusión	(Ft > Fcal) Consistente	

FUENTE: Elaboración propia



**Tabla 59: Análisis estadístico método Fisher, estación Tunel Cero**

<b>Prueba F</b>	<b>Julio 1991 – Diciembre 2002</b>	<b>Enero 1980 – Junio 1991</b>
Observaciones	4202	4199
Media	2.44	2.41
Varianza	19.60	19.65
Valor estadístico Fcal	1.00	
Valor de T tabla	1.53	
Conclusión	(Ft > Fcal) Consistente	

FUENTE: Elaboración propia

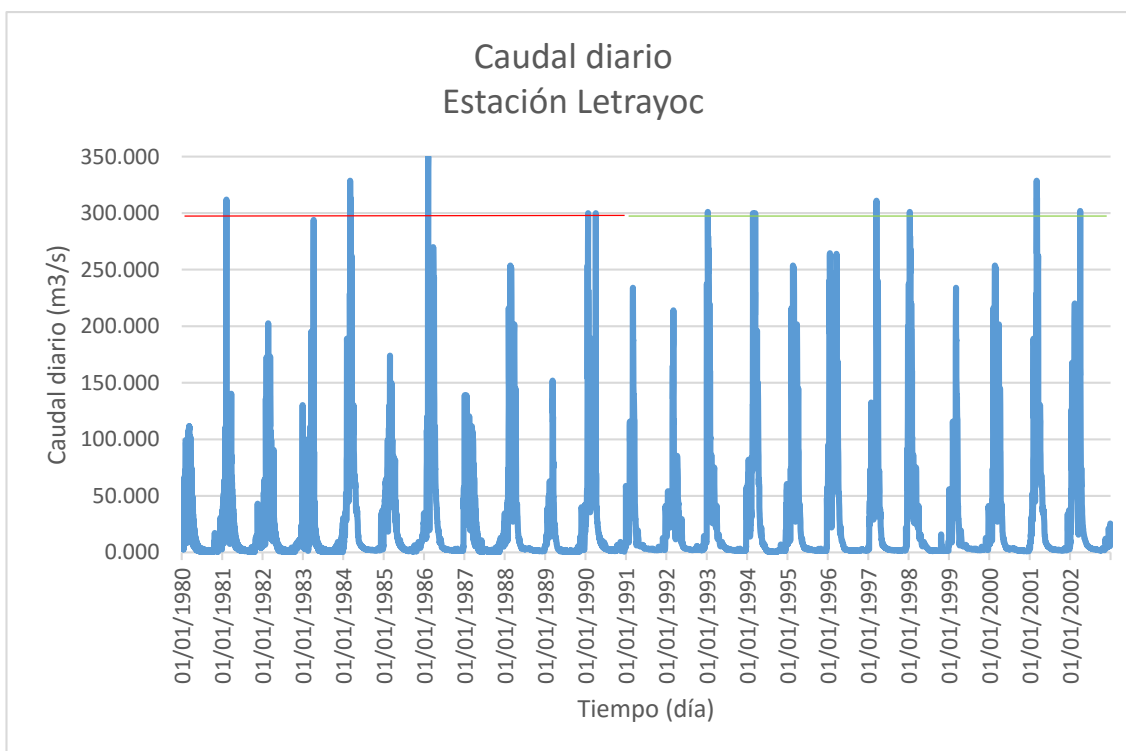
**Tabla 60: Análisis estadístico método Fisher, estación Villa de Armas**

<b>Prueba F</b>	<b>Julio 1991 – Diciembre 2002</b>	<b>Enero 1980 – Junio 1991</b>
Observaciones	4202	4199
Media	1.30	1.16
Varianza	11.92	10.63
Valor estadístico Fcal	1.21	
Valor de T tabla	1.53	
Conclusión	(Ft > Fcal) Consistente	

FUENTE: Elaboración propia

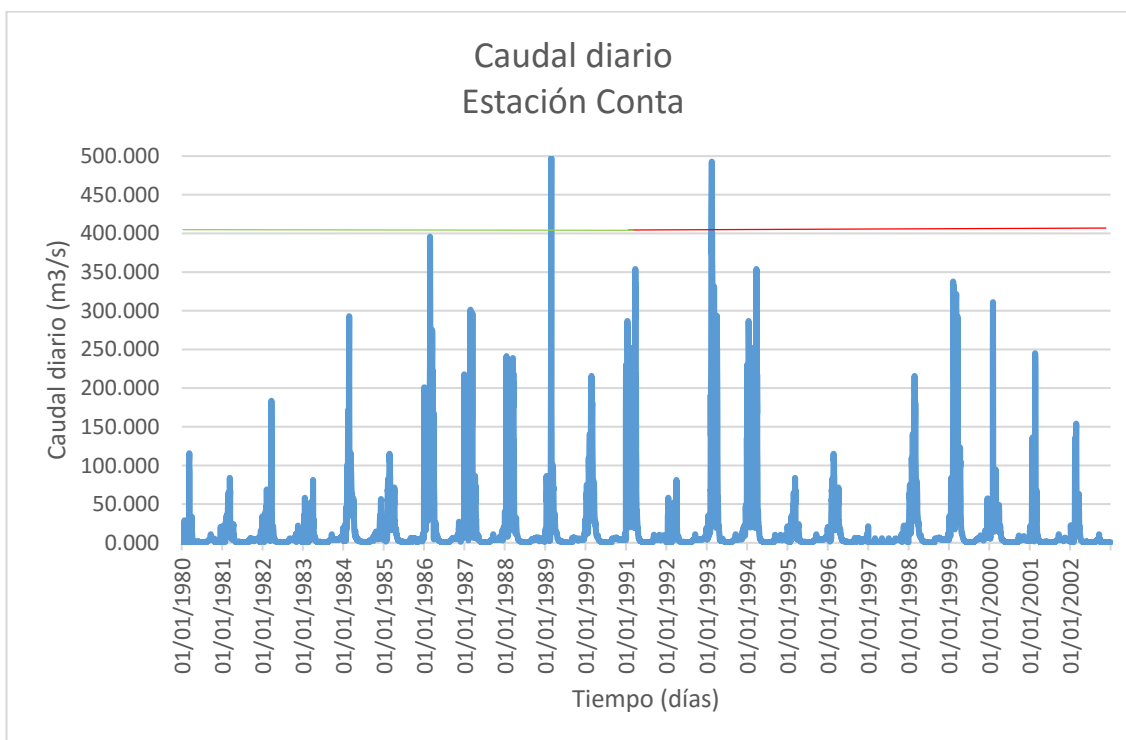
## ANEXO 2.2: HIDROMETRÍA

### A) ANÁLISIS DE SALTOS



**Figura 67: Identificación de saltos, estación Letrayoc**

FUENTE: Elaboración propia



**Figura 68: Identificación de saltos, estación Conta**

FUENTE: Elaboración propia

## B) ANÁLISIS ESTADÍSTICO – MEDIA (MÉTODO T DE STUDENT)

Tabla 61: Análisis estadístico método T de Student, estación Letrayoc

Prueba td	Julio 1991 – Diciembre 2002	Enero 1980 – Junio 1991
Observaciones	4202	4199
Media	26.17	25.21
Varianza	2505.20	1784.36
Valor estadístico td	0.94	
Valor de T tabla	1.96	
Conclusión	(Tt > td) Consistente	

FUENTE: Elaboración propia

Tabla 62: Análisis estadístico método Cramer, estación Conta

Prueba td	Enero 1980 – Junio 1991	Julio 1991 – Diciembre 2002
Observaciones	4199	4202
Media	18.29	17.81
Varianza	1750.94	2018.42
Valor estadístico td	0.51	
Valor de T tabla	1.96	
Conclusión	(Tt > td) Consistente	

FUENTE: Elaboración propia

## C) ANÁLISIS ESTADÍSTICO – VARIANZA (MÉTODO FISHER)

Tabla 63: Análisis estadístico método Fisher, estación Letrayoc

Prueba F	Julio 1991 – Diciembre 2002	Enero 1980 – Junio 1991
Observaciones	4202	4199
Media	26.17	25.21
Varianza	2505.20	1784.36
Valor estadístico Fcal	1.40	
Valor de T tabla	1.53	
Conclusión	(Ft > Fcal) Consistente	

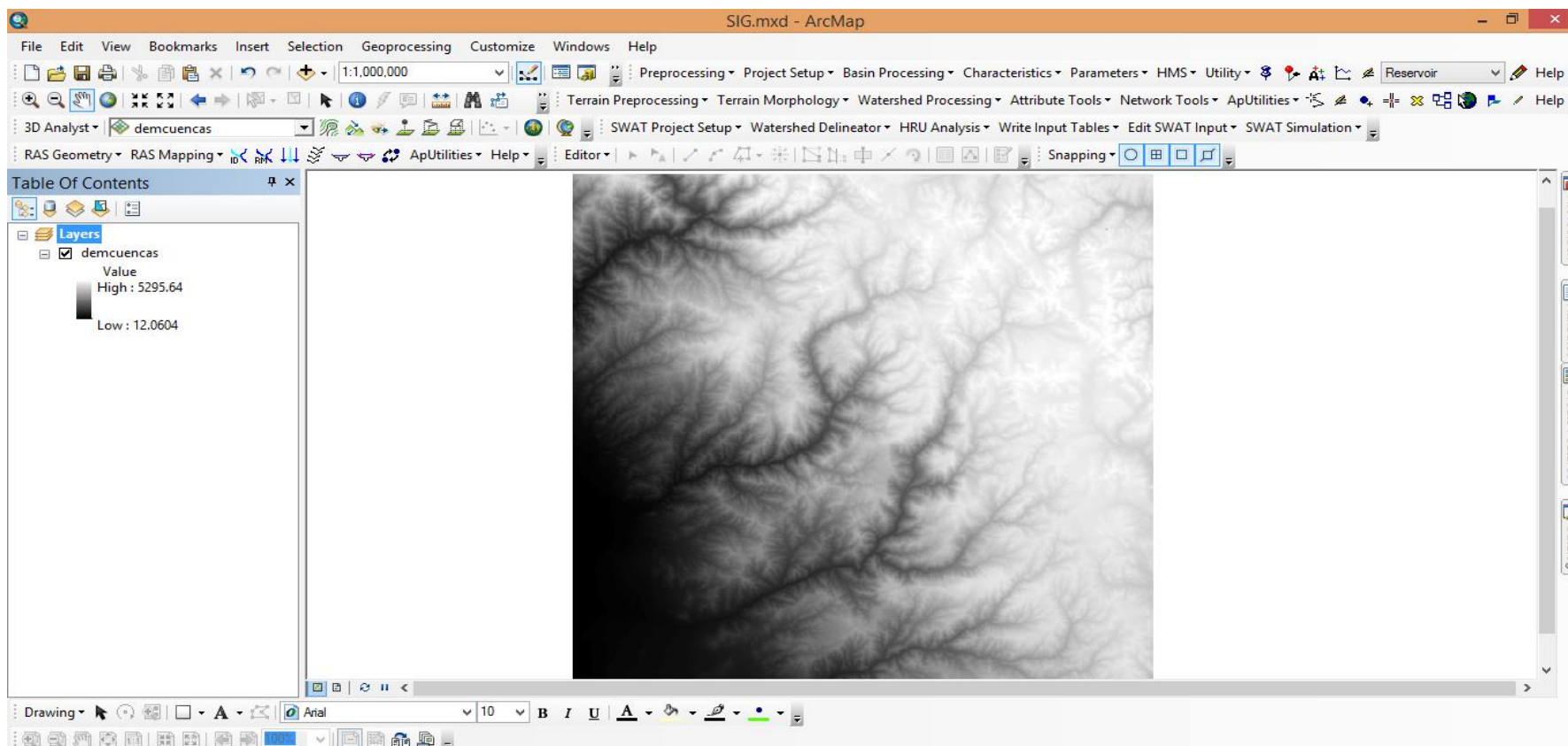
FUENTE: Elaboración propia

**Tabla 64: Análisis estadístico método Fisher, estación Conta**

<b>Prueba F</b>	<b>Enero 1980 – Junio 1991</b>	<b>Julio 1991 – Diciembre 2002</b>
Observaciones	4199	4202
Media	18.29	17.81
Grados de Libertad	1750.94	2018.42
Valor estadístico Fcal	1.15	
Valor de T tabla	1.53	
Conclusión	(Ft > Fcal) Consistente	

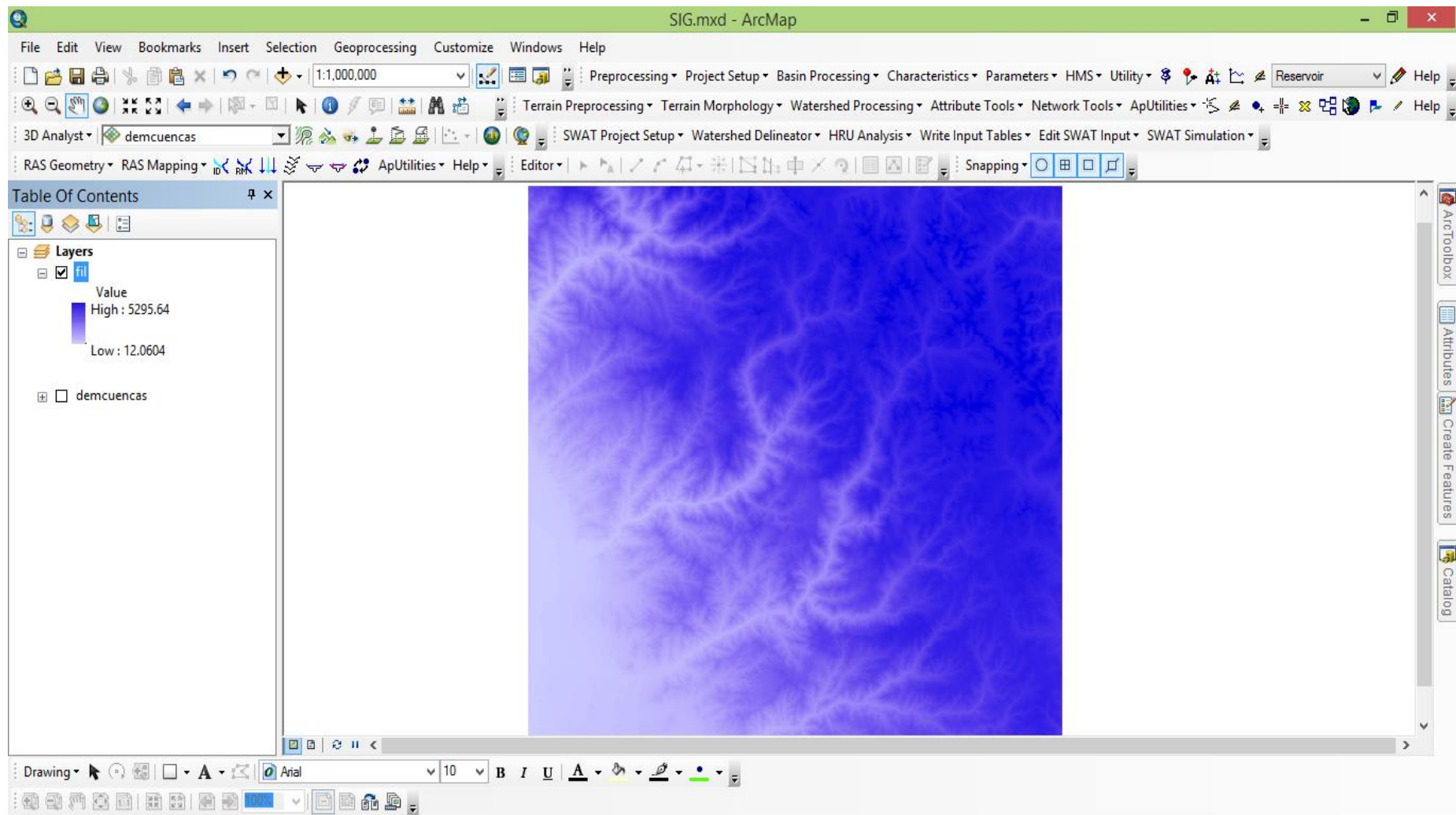
FUENTE: Elaboración propia

### ANEXO 3: PROCESAMIENTO CON EL SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)



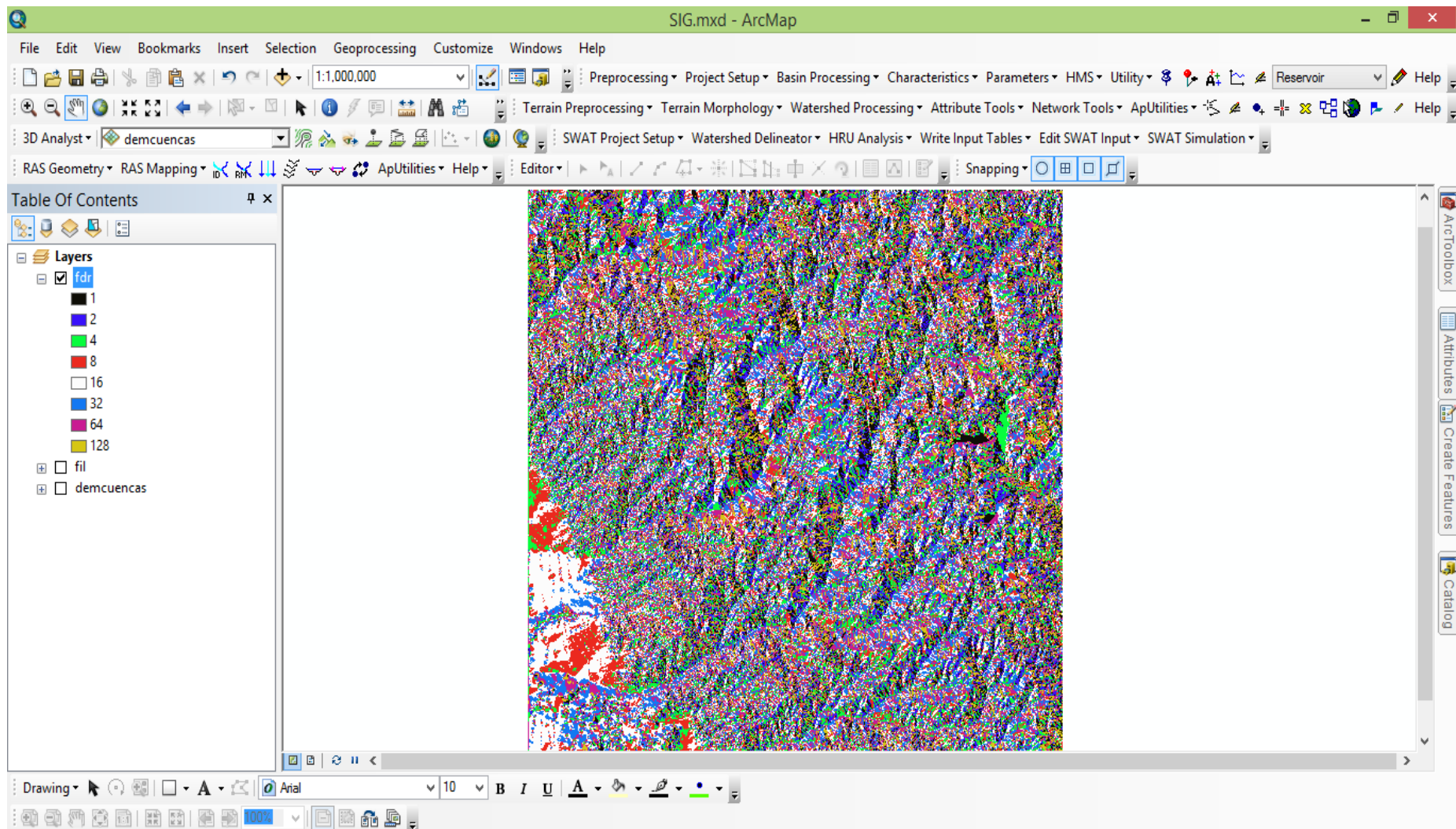
**Figura 69: Transformación curvas de nivel a un modelo digital (DEM)**

FUENTE: Elaboración propia



**Figura 70: Depresiones del DEM**

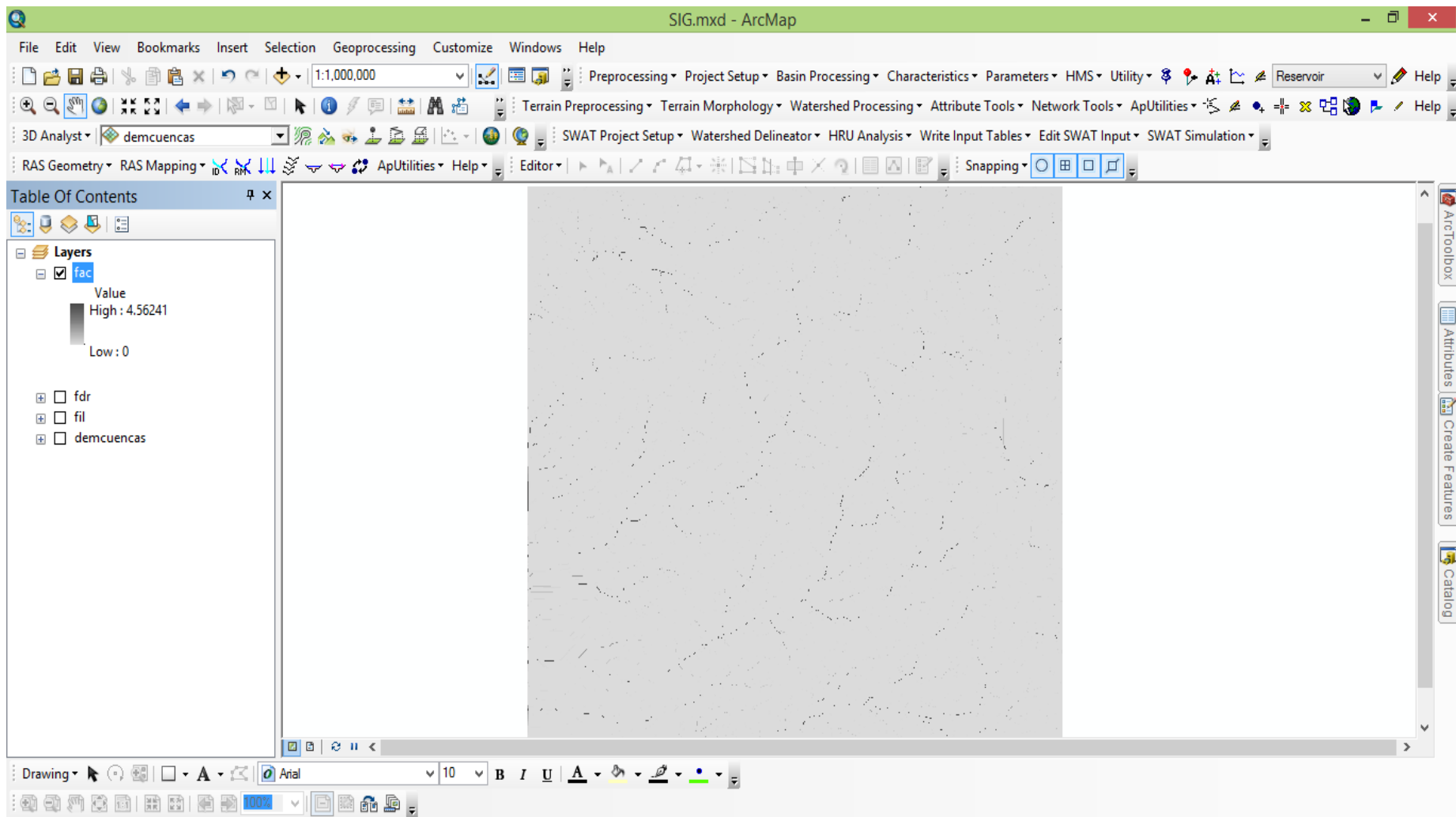
FUENTE: Elaboración propia



**Figura 71: Dirección de flujo**

FUENTE: Elaboración propia

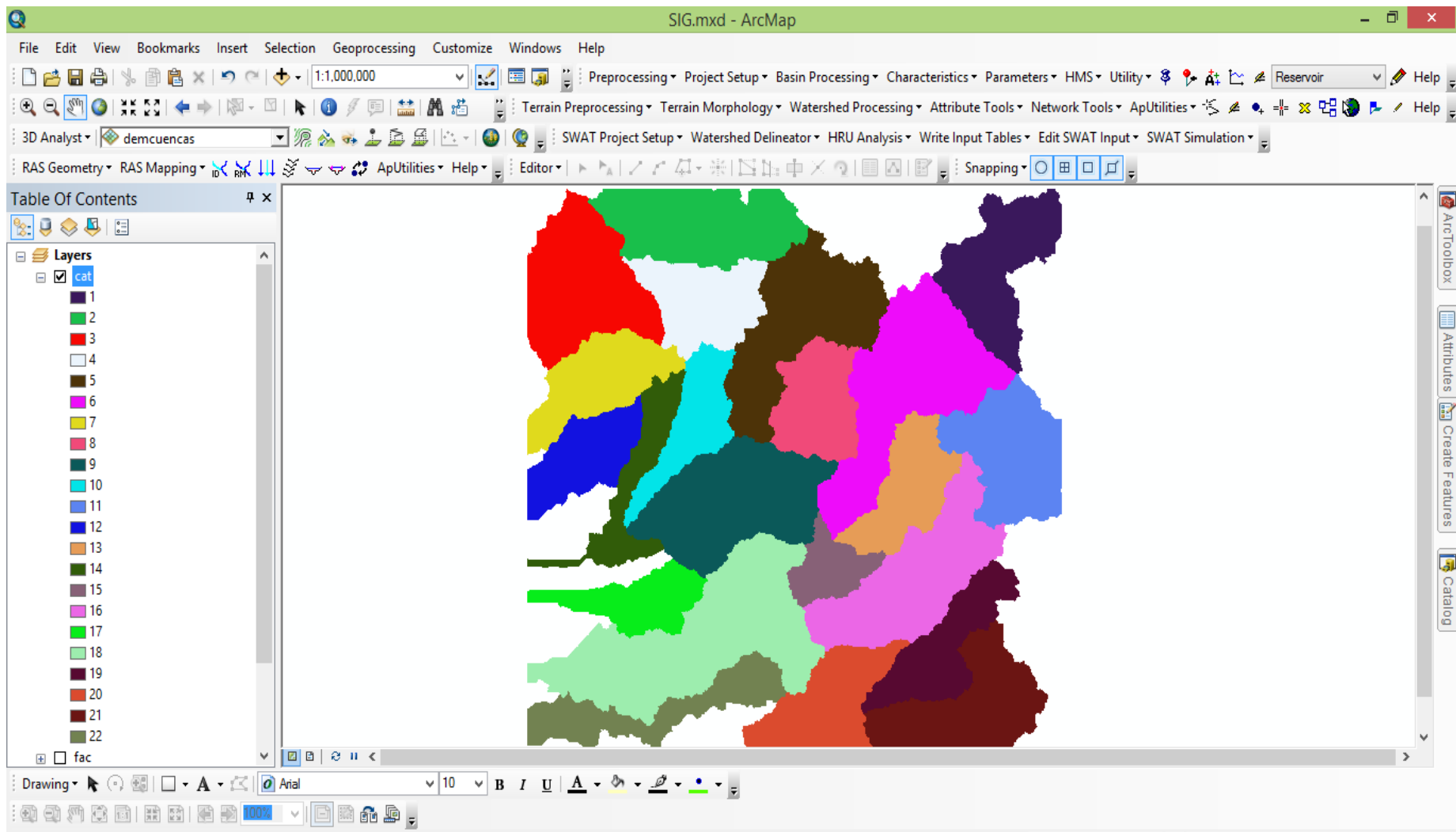




**Figura 72: Acumulación de flujo**

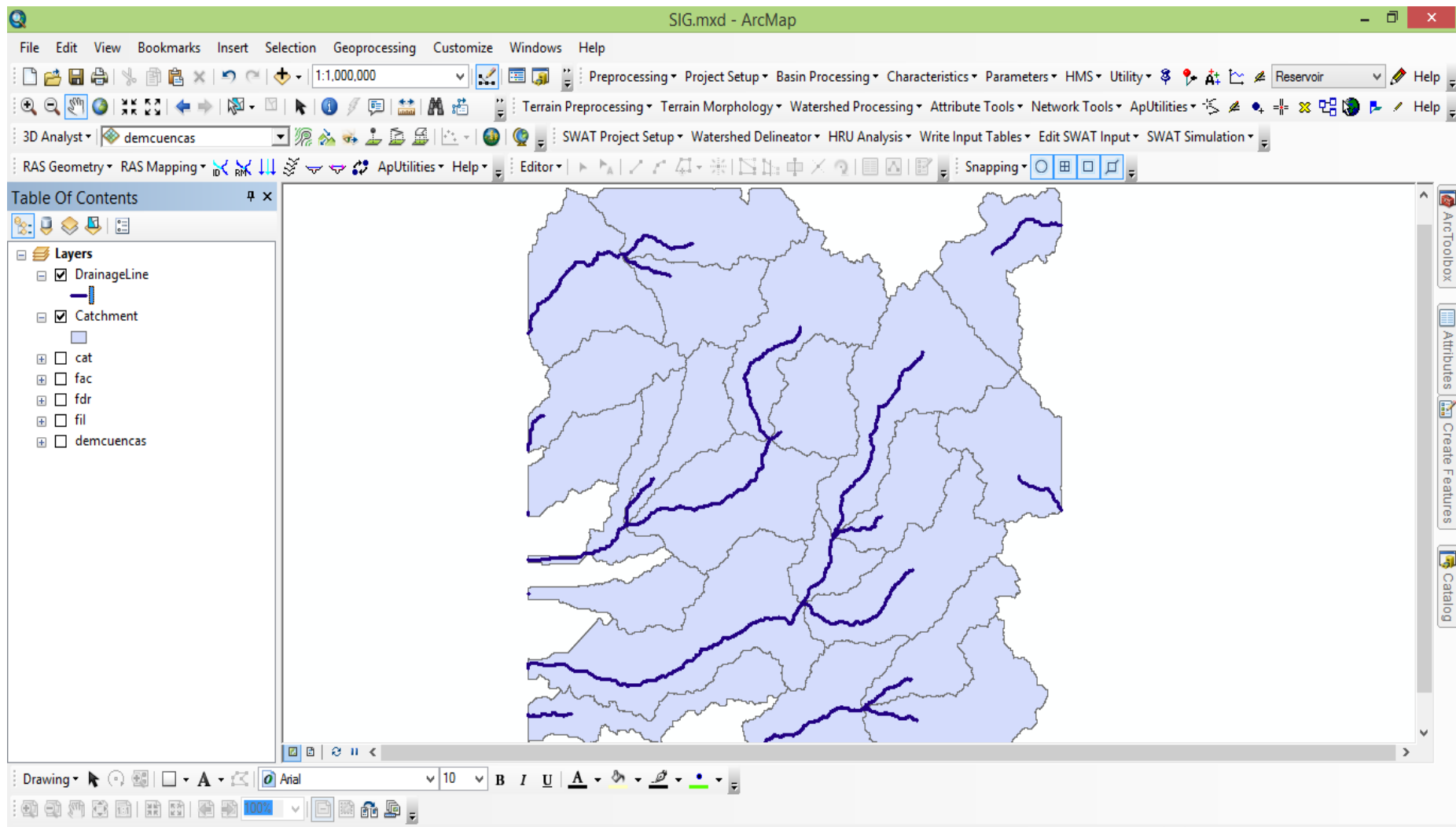
FUENTE: Elaboración propia





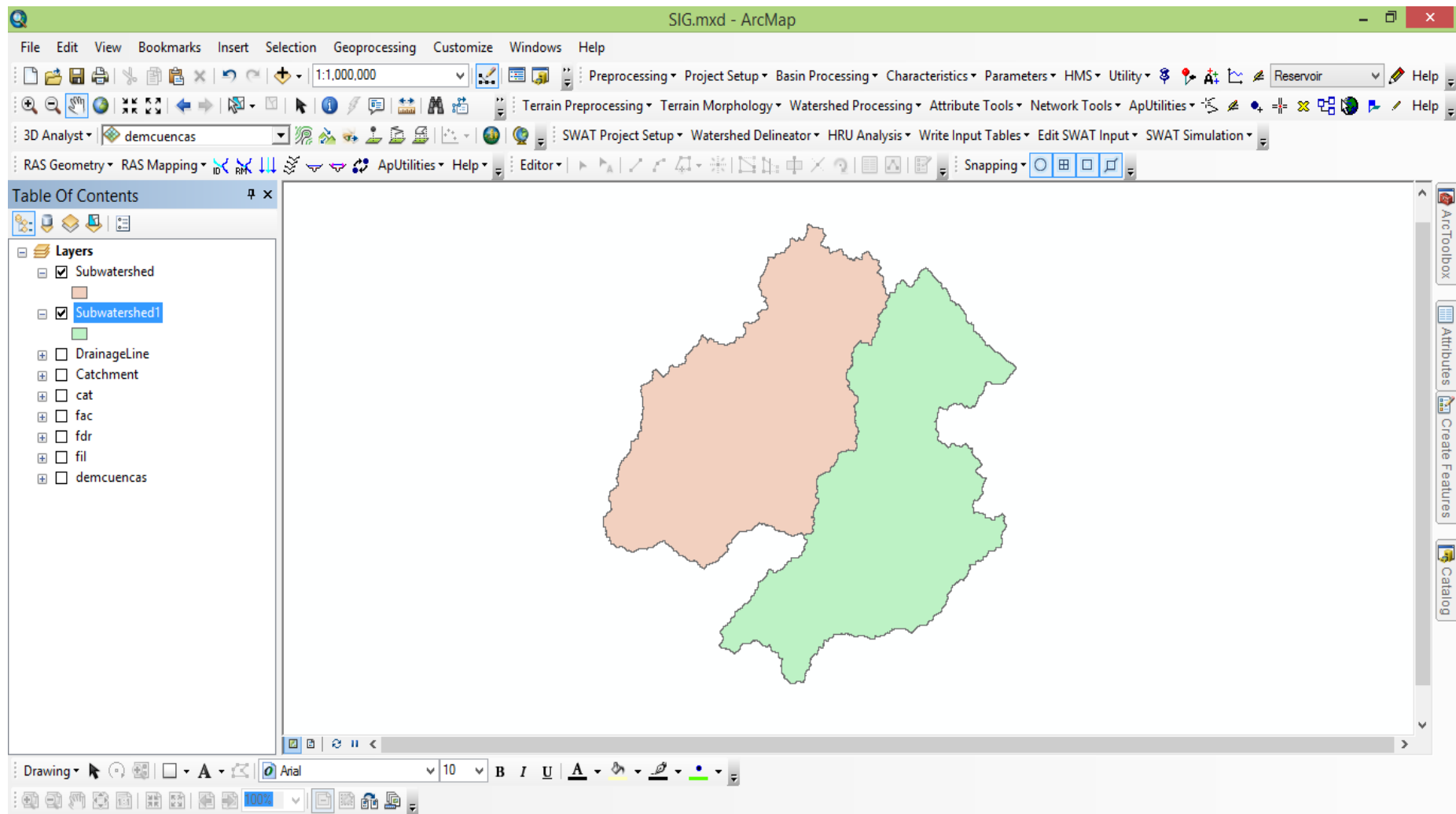
**Figura 73: Delimitación de subcuencas**

FUENTE: Elaboración propia



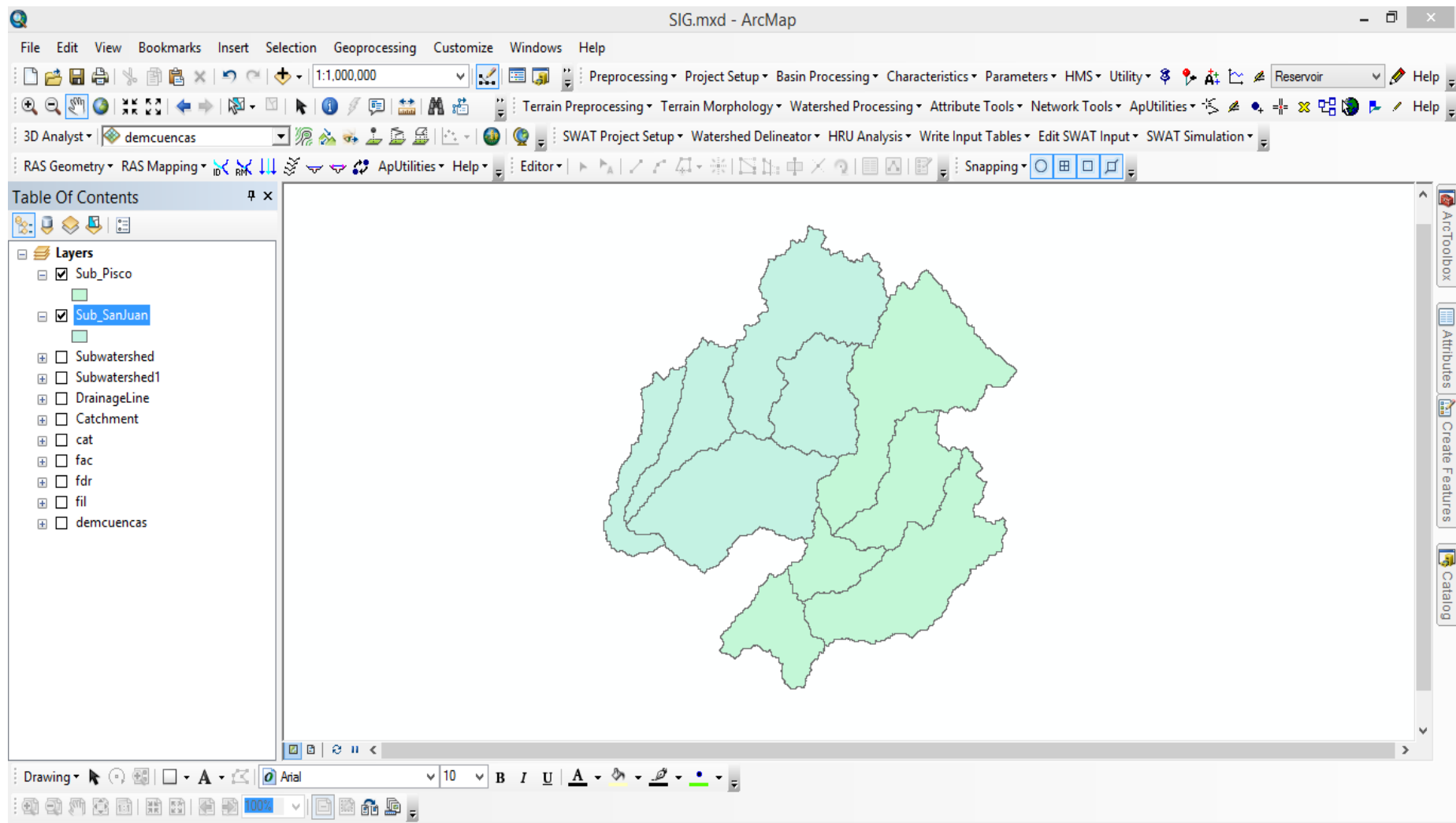
**Figura 74: Subcuencas y corrientes en formato vectorial**

FUENTE: Elaboración propia



**Figura 75: Delimitación de las cuencas de los ríos Pisco y San Juan**

FUENTE: Elaboración propia



**Figura 76:** Subcuencas de las cuencas de los ríos Pisco y San Juan

FUENTE: Elaboración propia

## **ANEXO 4: MATRICES DE PESOS PONDERADOS DE LAS ESTACIONES VIRTUALES SEGÚN EL MÉTODO DE SHEPARD**

### **ANEXO 4.1 SUBCUENCAS DE LA CUENCA DEL RIO PISCO**

#### **A) ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS**

**Tabla 65: Matriz de pesos de la subcuenca 1**

<b>Nombre de Estación</b>	<b>Peso</b>
Totora	0.965
Sinto	0.010
Choclococha	0.010
Tunel Cero	0.008
Cusicancha	0.004
Hornada	0.004

FUENTE: Elaboración propia

**Tabla 66: Matriz de pesos de la subcuenca 2**

<b>Nombre de Estación</b>	<b>Peso</b>
Sinto	0.857
Cusicancha	0.046
Totora	0.027
Tunel Cero	0.025
Hornada	0.024
Choclococha	0.015
Huancano	0.007

FUENTE: Elaboración propia

**Tabla 67: Matriz de pesos de la subcuenca 3**

<b>Nombre de Estación</b>	<b>Peso</b>
Cusicancha	0.326
Huancano	0.282
Sinto	0.219
Hornada	0.068
Totora	0.058
Tunel Cero	0.047

FUENTE: Elaboración propia

**Tabla 68: Matriz de pesos de la subcuenca 4**

<b>Nombre de Estación</b>	<b>Peso</b>
Cusicancha	0.929
Sinto	0.024
Hornada	0.022
Tunel Cero	0.008
Huancano	0.006
Totora	0.005
Choclococha	0.005

FUENTE: Elaboración propia

**Tabla 69: Matriz de pesos de la subcuenca 5**

<b>Nombre de Estación</b>	<b>Peso</b>
Huancano	0.973
Cusicancha	0.011
Hacienda Bernales	0.008
Sinto	0.007

FUENTE: Elaboración propia

## B) ESTACIONES METEOROLÓGICAS

**Tabla 70: Matriz de pesos de la subcuenca 1**

Nombre de Estación	Peso
Huancano	1

FUENTE: Elaboración propia

**Tabla 71: Matriz de pesos de la subcuenca 2**

Nombre de Estación	Peso
Huancano	1

FUENTE: Elaboración propia

**Tabla 72: Matriz de pesos de la subcuenca 3**

Nombre de Estación	Peso
Huancano	1

FUENTE: Elaboración propia

**Tabla 73: Matriz de pesos de la subcuenca 4**

Nombre de Estación	Peso
Huancano	1

FUENTE: Elaboración propia

**Tabla 74: Matriz de pesos de la subcuenca 5**

Nombre de Estación	Peso
Huancano	0.991
Hacienda Bernales	0.009

FUENTE: Elaboración propia

## ANEXO 4.2: SUBCUENCAS DE LA CUENCA DEL RIO SAN JUAN

### A) ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS

**Tabla 75: Matriz de pesos de la subcuenca 1**

<b>Nombre de Estación</b>	<b>Peso</b>
Laguna Huichinga Aurahua	0.617
Tantara	0.116
San Pedro de Huacarpana	0.108
Villa de Armas	0.081
Huachos	0.033
San Juan de Castrovirreyna	0.030
San Juan de Yanac	0.016

FUENTE: Elaboración propia

**Tabla 76: Matriz de pesos de la subcuenca 2**

<b>Nombre de Estación</b>	<b>Peso</b>
Villas de Armas	0.510
Huachos	0.236
Laguna Huichinga Aurahua	0.075
San Juan de Castrovirreyna	0.067
Tantara	0.055
San Pedro de Huacarpana	0.042
San Juan de Yanac	0.015

FUENTE: Elaboración propia

**Tabla 77: Matriz de pesos de la subcuenca 3**

<b>Nombre de Estación</b>	<b>Peso</b>
San Juan de Yanac	0.949
San Juan de Castrovirreyna	0.014
San Pedro de Huacarpana	0.009
Tantara	0.009
Villa de Armas	0.012
Laguna Huichinga Aurahua	0.007

FUENTE: Elaboración propia



**Tabla 78: Matriz de pesos de la subcuenca 4**

<b>Nombre de Estación</b>	<b>Peso</b>
San Juan de Castrovirreyna	0.280
San Juan de Yanac	0.222
Huachos	0.157
Villa de Armas	0.099
Tantara	0.079
San Pedro de Huacarpana	0.072
Laguna Huichinga Aurahua	0.057
Fonagro	0.034

FUENTE: Elaboración propia

**Tabla 79: Matriz de pesos de la subcuenca 5**

<b>Nombre de Estación</b>	<b>Peso</b>
San Juan de Yanac	0.504
San Juan de Castrovirreyna	0.105
Fonagro	0.088
San Pedro de Huacarpana	0.071
Tantara	0.070
Huachos	0.059
Villa de Armas	0.057
Laguna Huichinga Aurahua	0.047

FUENTE: Elaboración propia

## **B) ESTACIONES METEOROLÓGICAS**

**Tabla 80: Matriz de pesos de la subcuenca 1**

<b>Nombre de Estación</b>	<b>Peso</b>
San Pedro de Huacarpana	0.405
Villa de Armas	0.303
Huachos	0.123
San Juan de Castrovirreyna	0.111
San Juan de Yanac	0.058

FUENTE: Elaboración propia

**Tabla 81: Matriz de pesos de la subcuenca 2**

<b>Nombre de Estación</b>	<b>Peso</b>
Villa de Armas	0.586
Huachos	0.271
San Juan de Castrovirreyna	0.077
San Pedro de Huacarpana	0.048
San Juan de Yanac	0.018

FUENTE: Elaboración propia

**Tabla 82: Matriz de pesos de la subcuenca 3**

<b>Nombre de Estación</b>	<b>Peso</b>
San Juan de Yanac	0.962
San Juan de Castrovirreyna	0.014
San Pedro de Huacarpana	0.009
Villa de Armas	0.006
Huachos	0.006
Fonagro	0.002

FUENTE: Elaboración propia

**Tabla 83: Matriz de pesos de la subcuenca 4**

<b>Nombre de Estación</b>	<b>Peso</b>
San Juan de Castrovirreyna	0.324
San Juan de Yanac	0.257
Huachos	0.181
Villa de Armas	0.115
San Pedro de Huacarpana	0.083
Fonagro	0.039

FUENTE: Elaboración propia

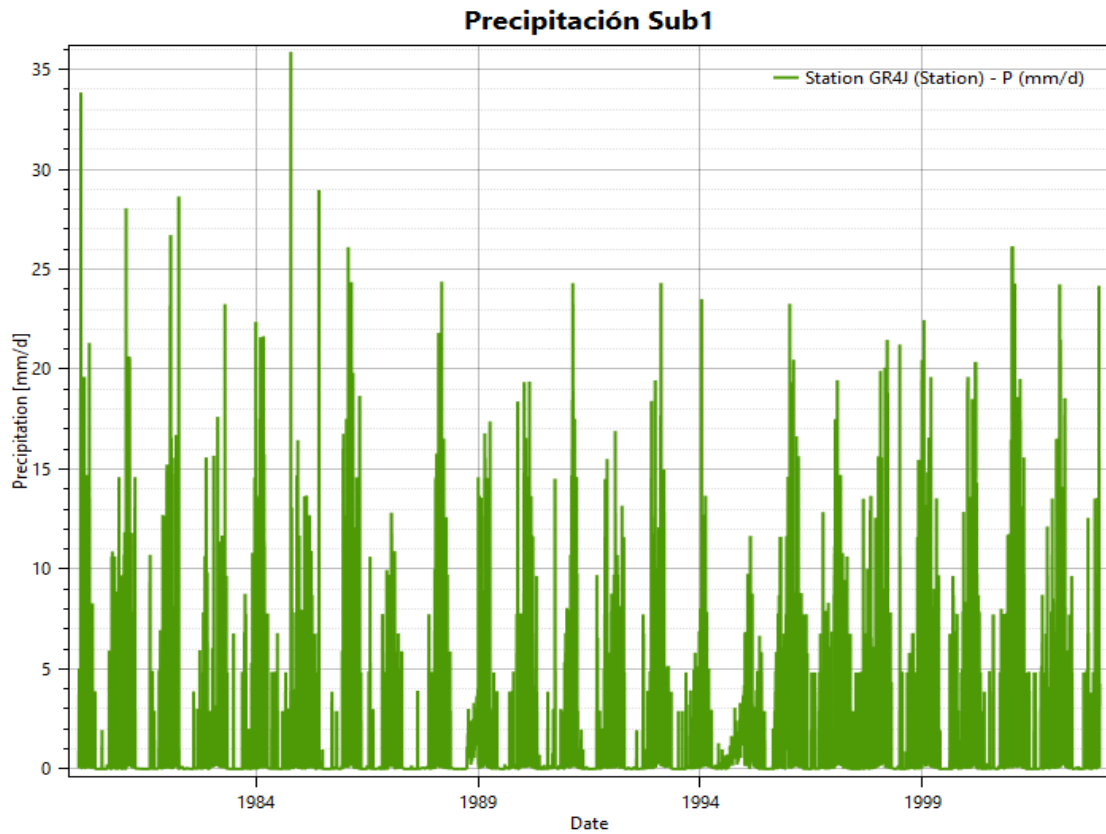
**Tabla 84: Matriz de pesos de la subcuenca 5**

<b>Nombre de Estación</b>	<b>Peso</b>
San Juan de Yanac	0.571
San Juan de Castrovirreyna	0.119
Fonagro	0.100
San Pedro de Huacarpana	0.080
Huachos	0.067
Villa de Armas	0.064

FUENTE: Elaboración propia

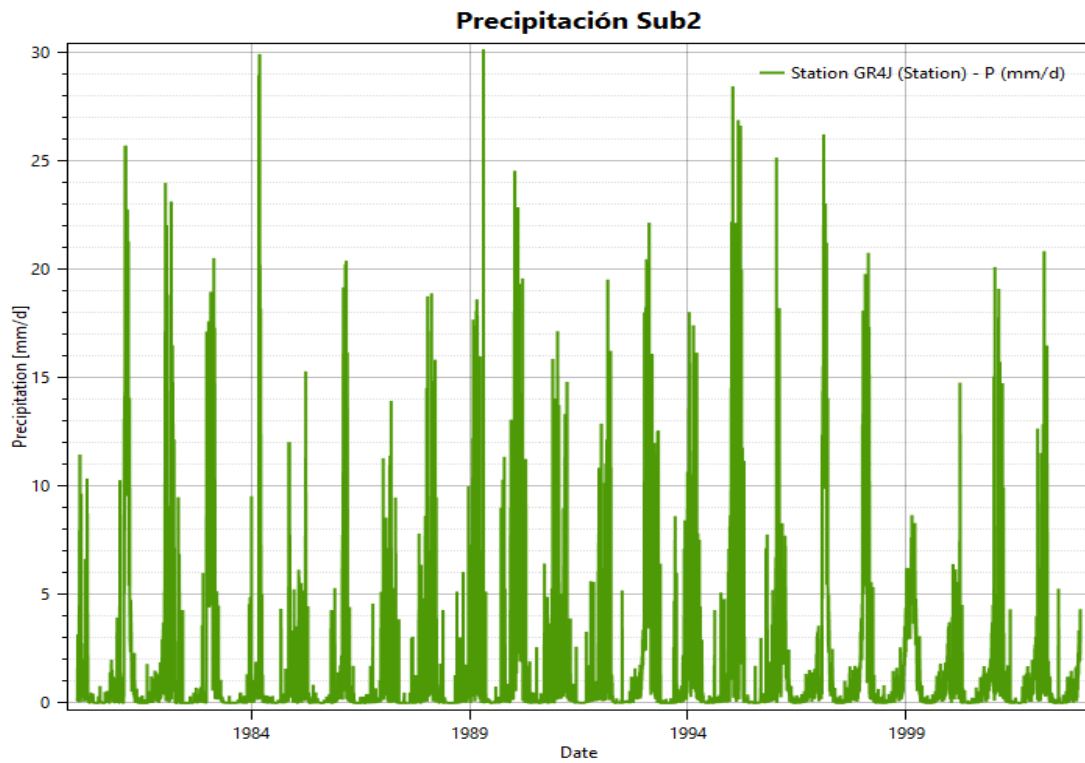
**ANEXO 5: COMPORTAMIENTO DE LAS ESTACIONES VIRTUALES  
PLUVIOMÉTRICAS DE LAS SUBCUENCAS DE LOS RIOS PISCO Y SAN  
JUAN**

**ANEXO 5.1 SUBCUENCAS DE LA CUENCA DEL RIO PISCO**



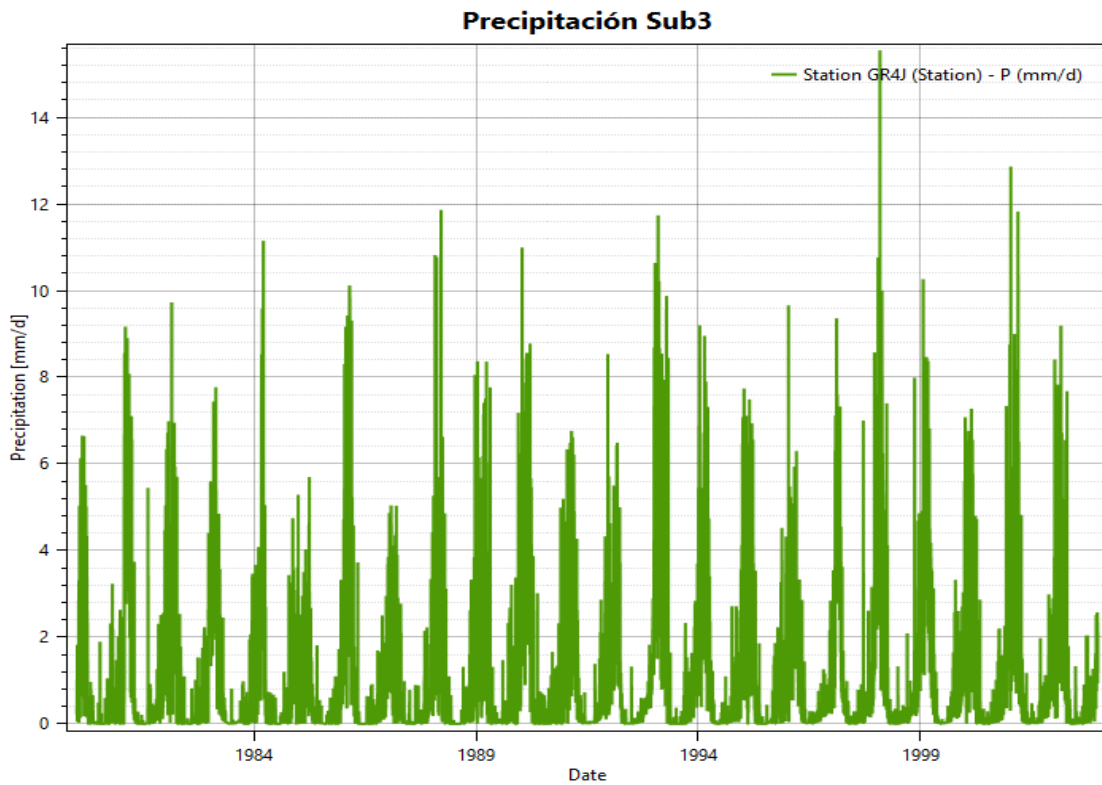
**Figura 77: Histograma de precipitación total diaria (1980-2002), estación virtual de la subcuenca1**

FUENTE: Elaboración propia



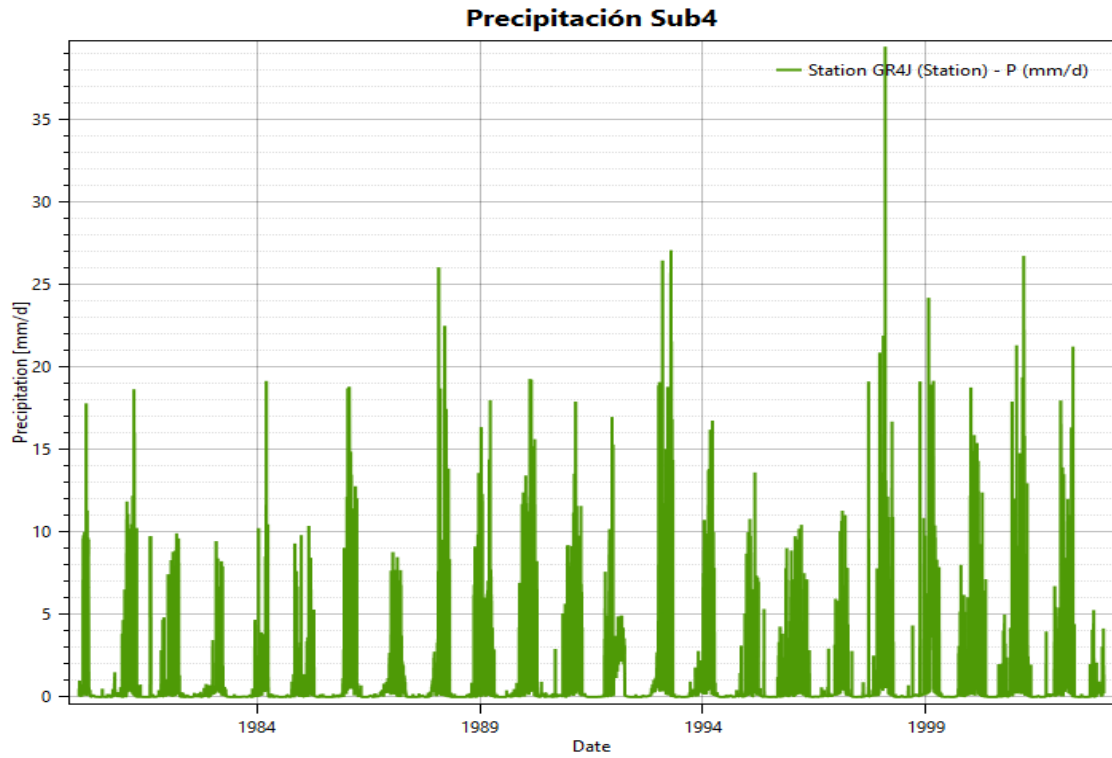
**Figura 78:** Histograma de precipitación total diaria (1980-2002), estación virtual de la subcuenca2

FUENTE: Elaboración propia



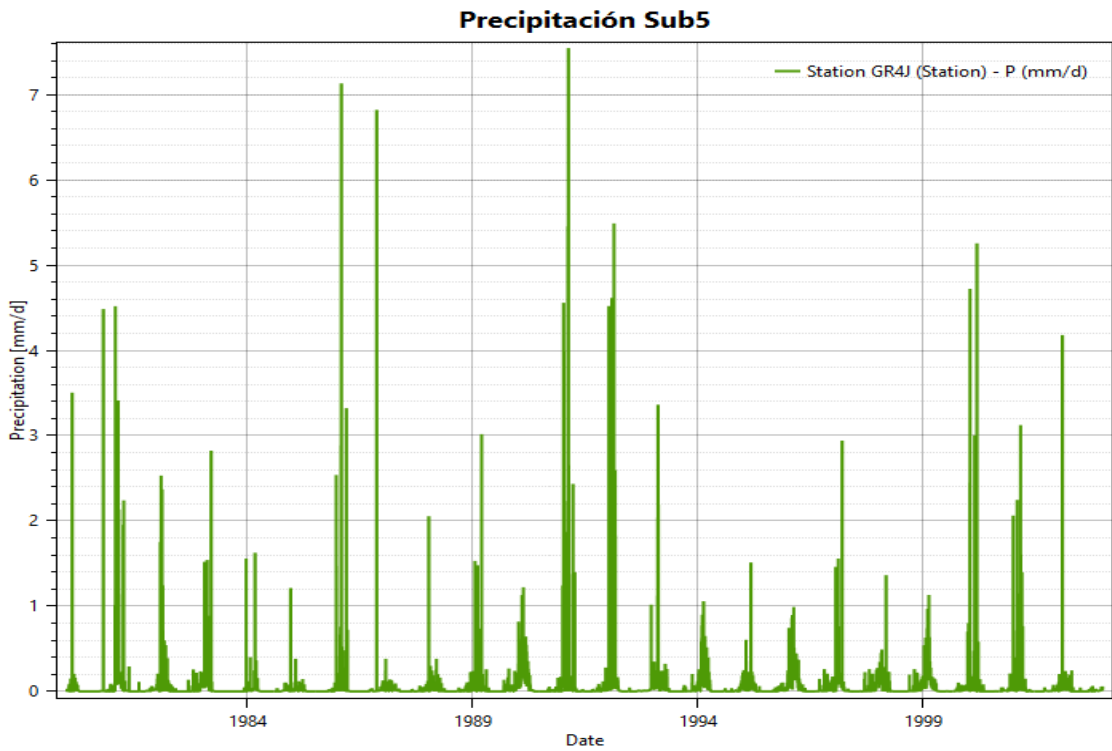
**Figura 79:** Histograma de la precipitación total diaria (1980-2002), estación virtual de la subcuenca3

FUENTE: Elaboración propia



**Figura 80:** Histograma de la precipitación total diaria (1980-2002), estación virtual de la subcuenca4

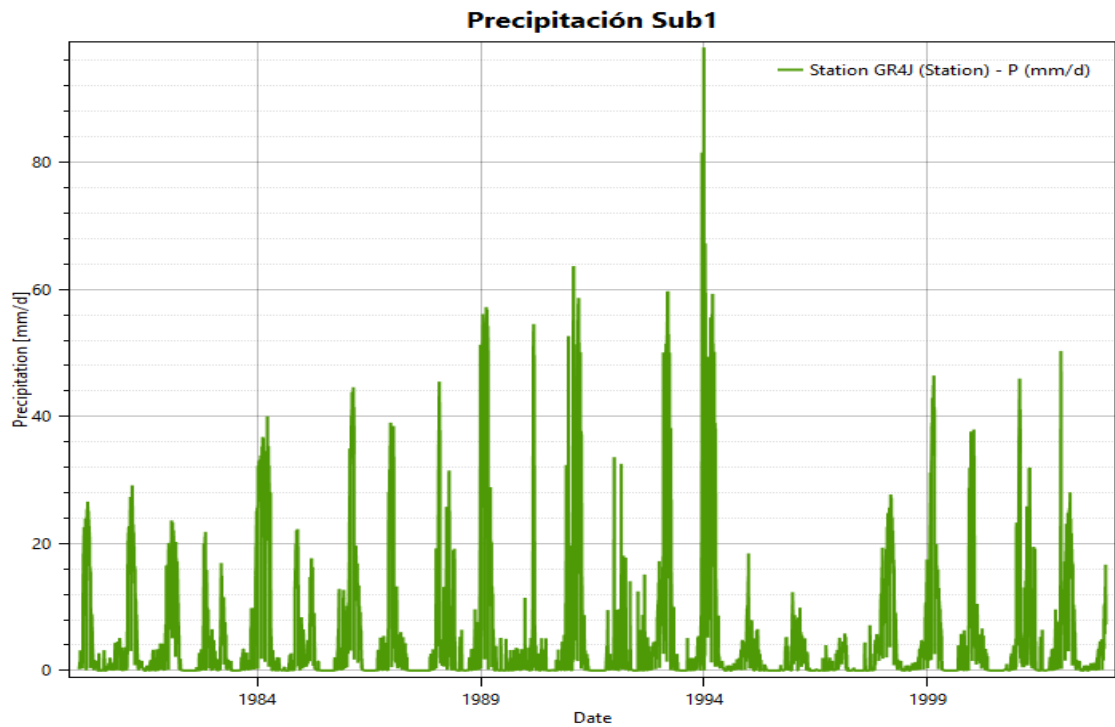
FUENTE: Elaboración propia



**Figura 81:** Histograma de la precipitación total diaria (1980-2002), estación virtual de la subcuenca5

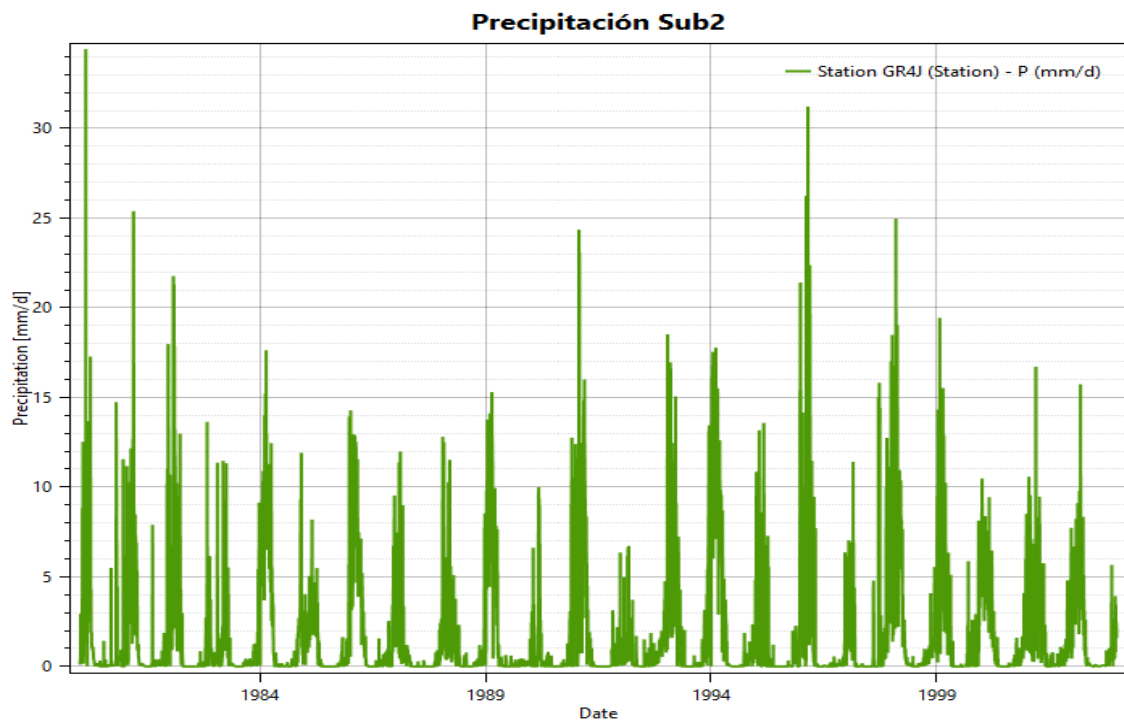
FUENTE: Elaboración propia

## ANEXO 5.2 SUBCUENCAS DE LA CUENCA DEL RIO SAN JUAN



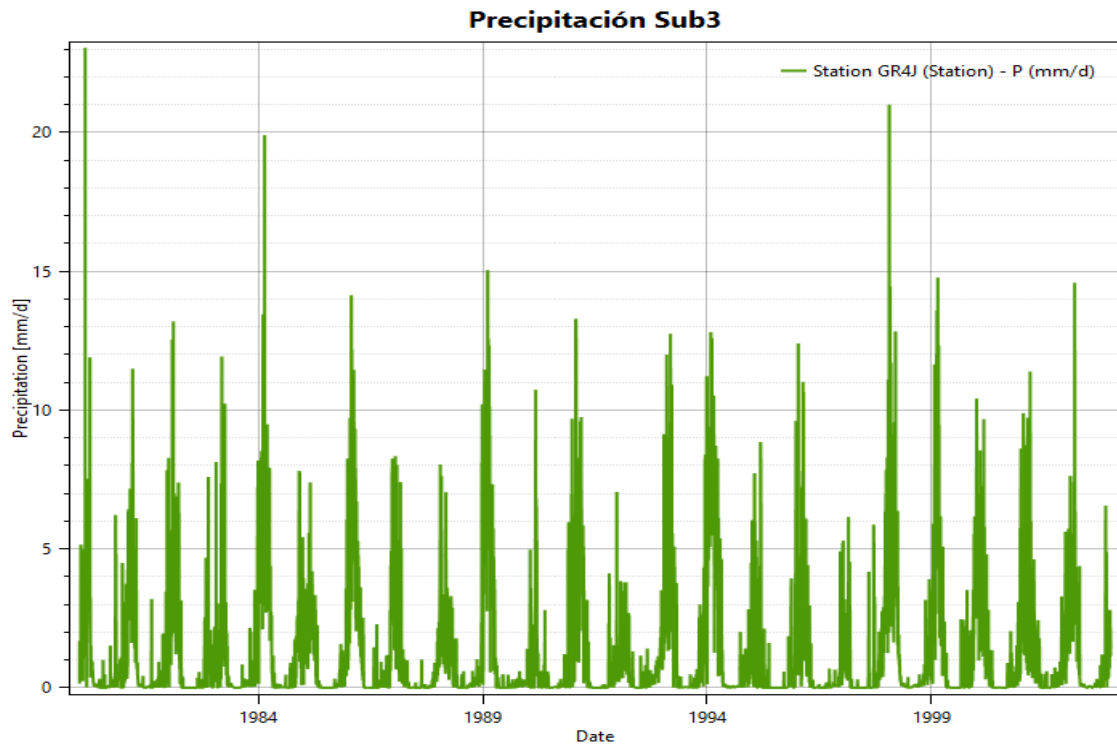
**Figura 82:** Histograma de la precipitación total diaria (1980-2002), estación virtual de la subcuenca1

FUENTE: Elaboración propia



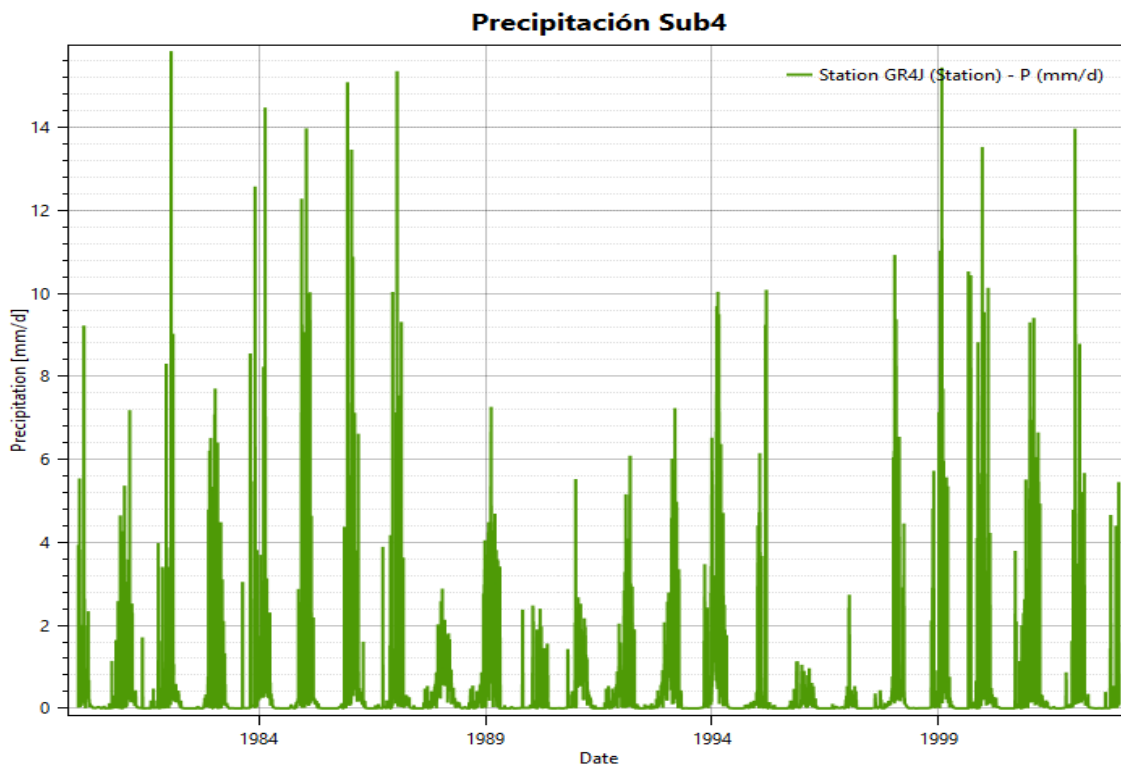
**Figura 83:** Histograma de la precipitación total diaria (1980-2002), estación virtual de la subcuenca2

FUENTE: Elaboración propia



**Figura 84:** Histograma de la precipitación total diaria (1980-2002), estación virtual de la subcuenca3

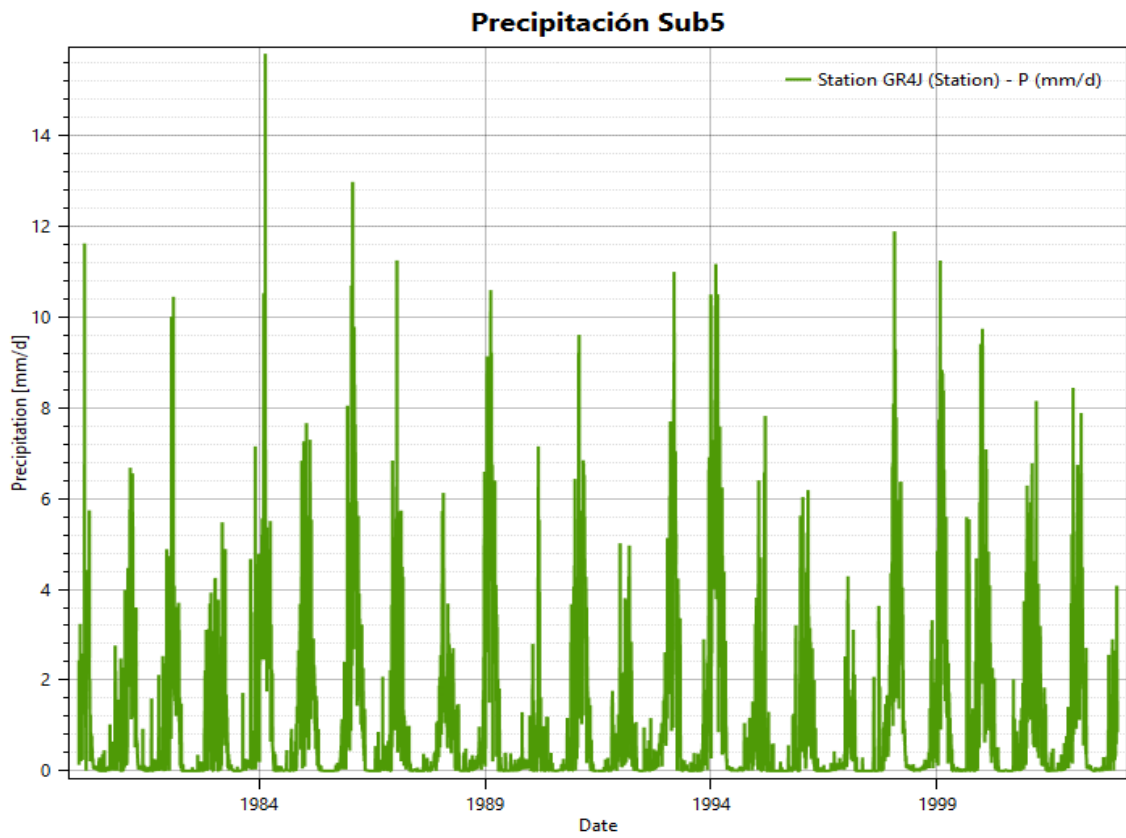
FUENTE: Elaboración propia



**Figura 85:** Histograma de la precipitación total diaria (1980-2002), estación virtual de la subcuenca4

FUENTE: Elaboración propia





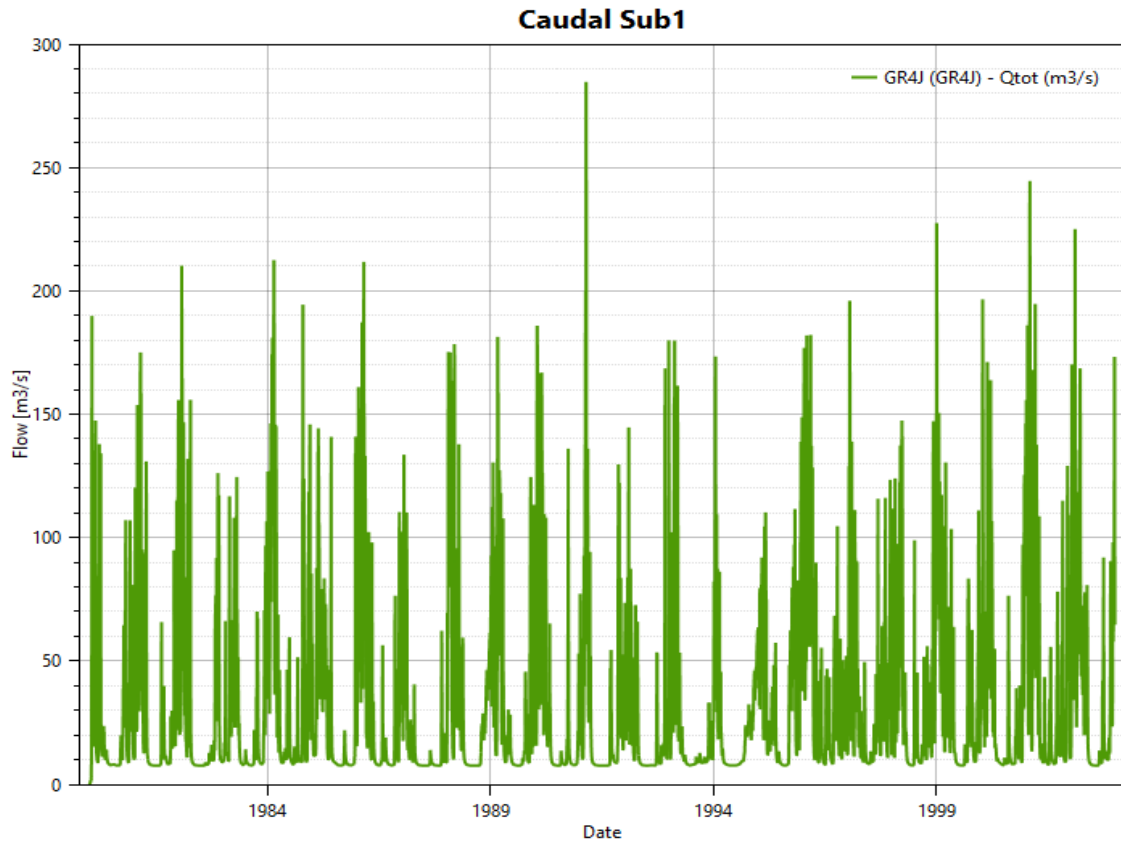
**Figura 86: Histograma de la precipitación total diaria (1980-2002), estación virtual de la subcuenca5**

FUENTE: Elaboración propia

## ANEXO 6: SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO HIDROLÓGICO DE LAS CUENCAS

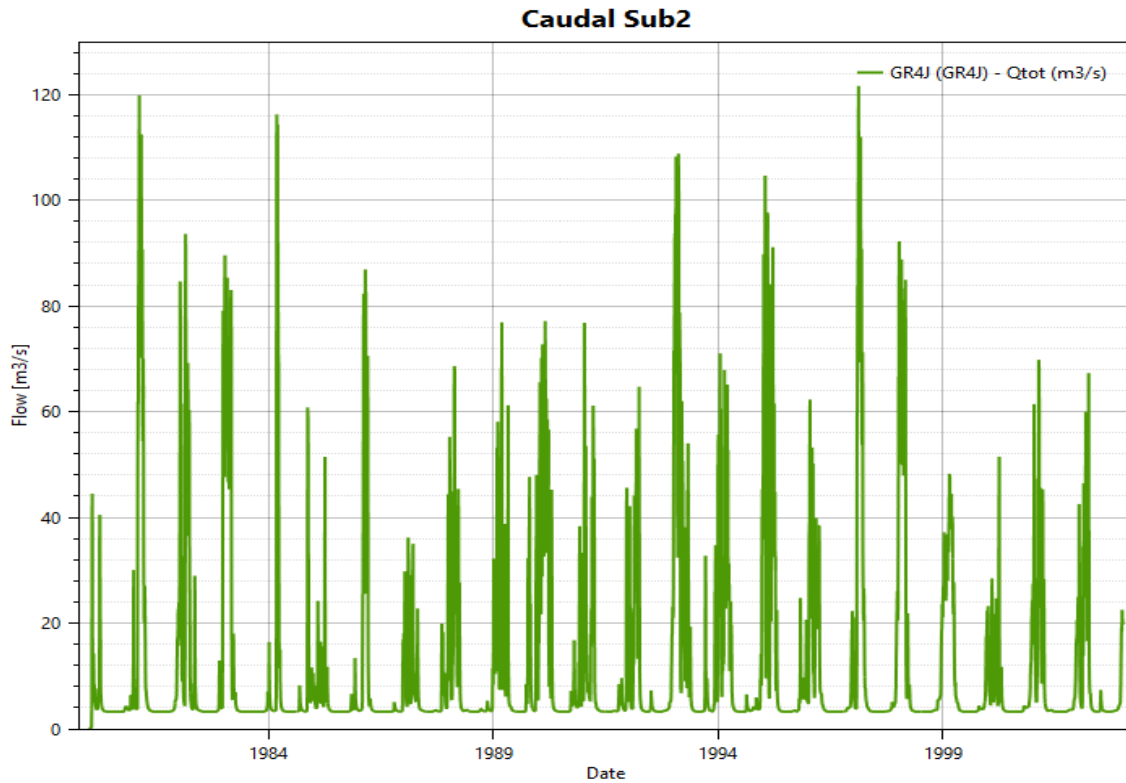
### ANEXO 6.1 SIMULACIÓN DE LA CUENCA PISCO

#### A) MODELO GR4J SIN CALIBRACIÓN



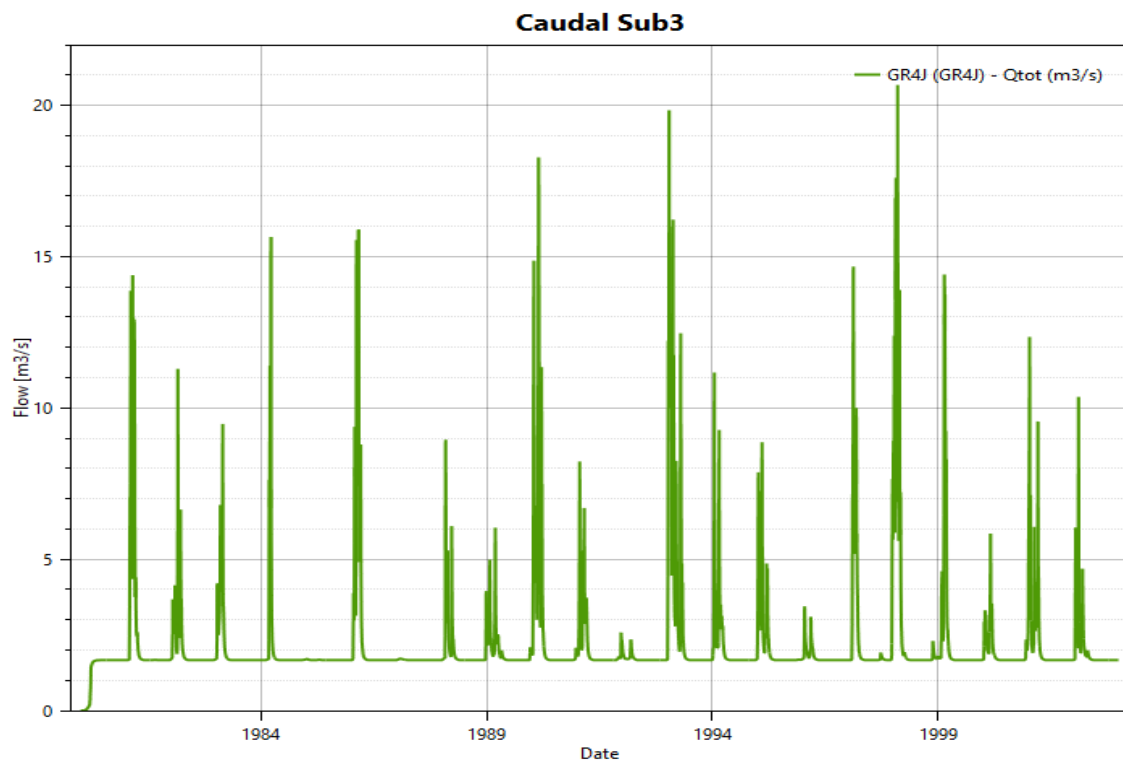
**Figura 87:** Histograma del caudal diario, simulado de la subcuenca1, para el periodo 1980-2002

FUENTE: Elaboración propia



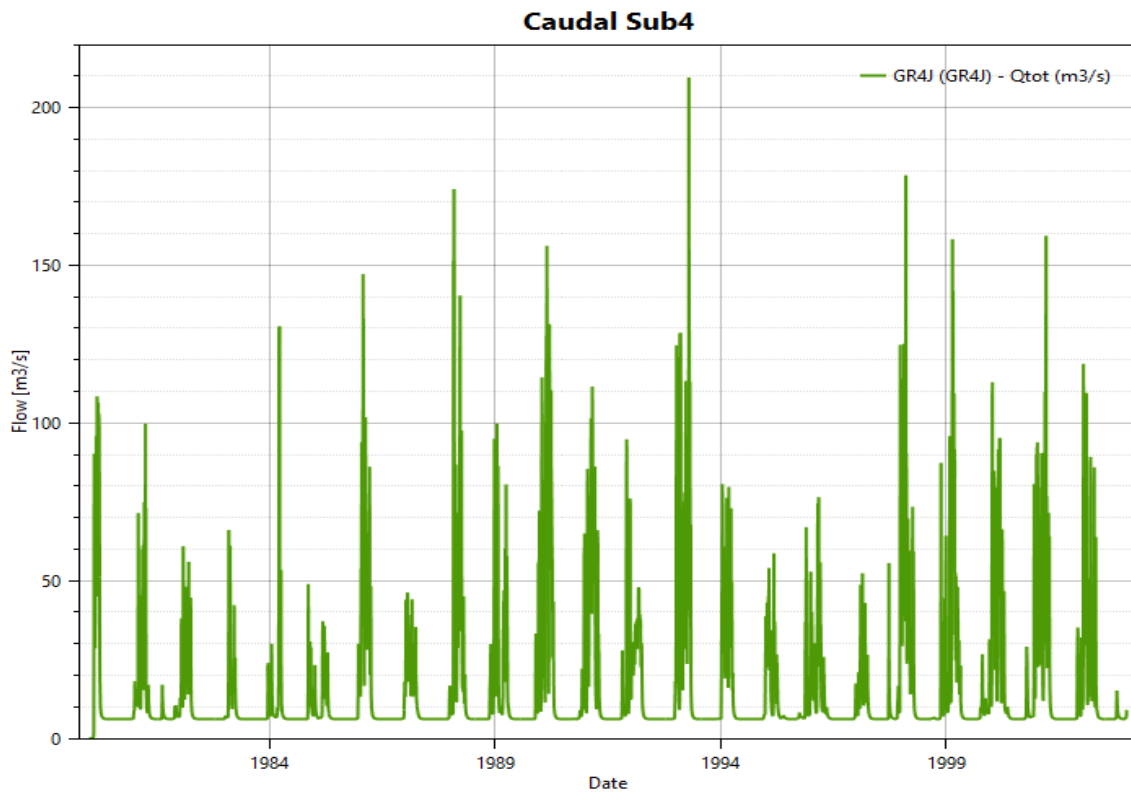
**Figura 88:** Histograma del caudal diario, simulado de la subcuena2, para el periodo 1980-2002

FUENTE: Elaboración propia



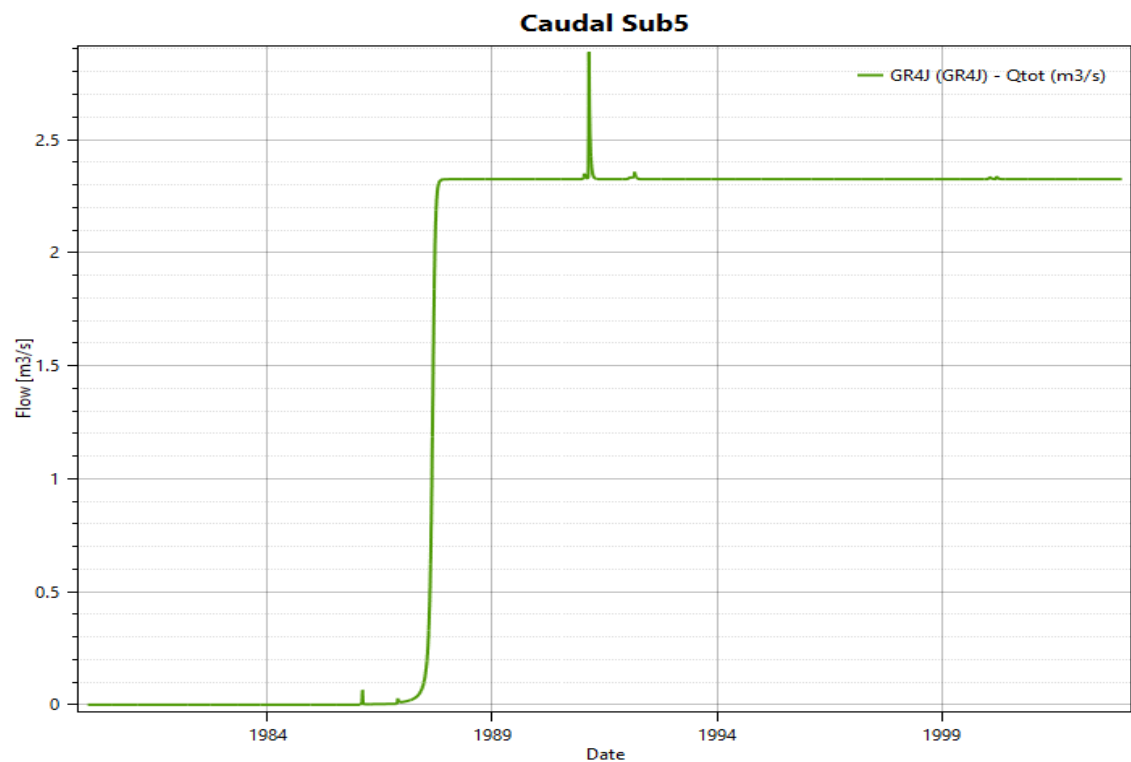
**Figura 89:** Histograma del caudal diario, simulado de la subcuena3, para el periodo 1980-2002

FUENTE: Elaboración propia



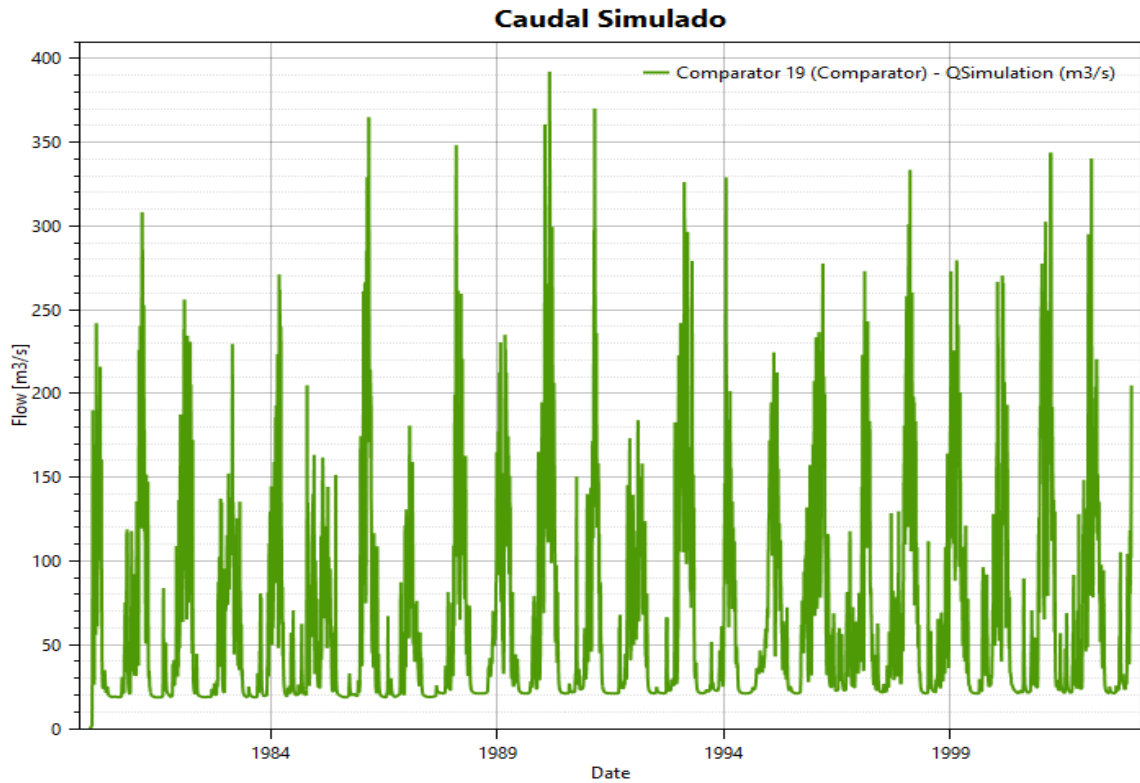
**Figura 90:** Histograma del caudal diario, simulado de la subcuena4, para el periodo 1980-2002

FUENTE: Elaboración propia



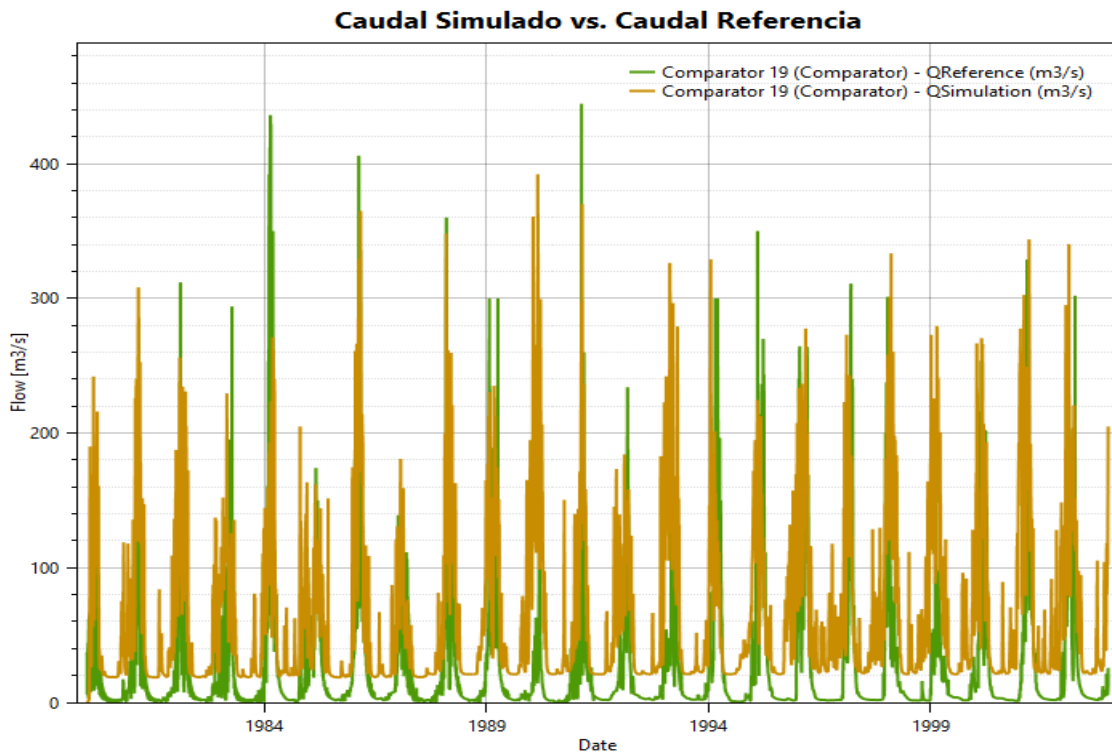
**Figura 91:** Histograma del caudal diario, simulado de la subcuena5, para el periodo 1980-2002

FUENTE: Elaboración propia



**Figura 92:** Histograma del caudal diario, simulado de la cuenca del río Pisco, para el periodo 1980-2002

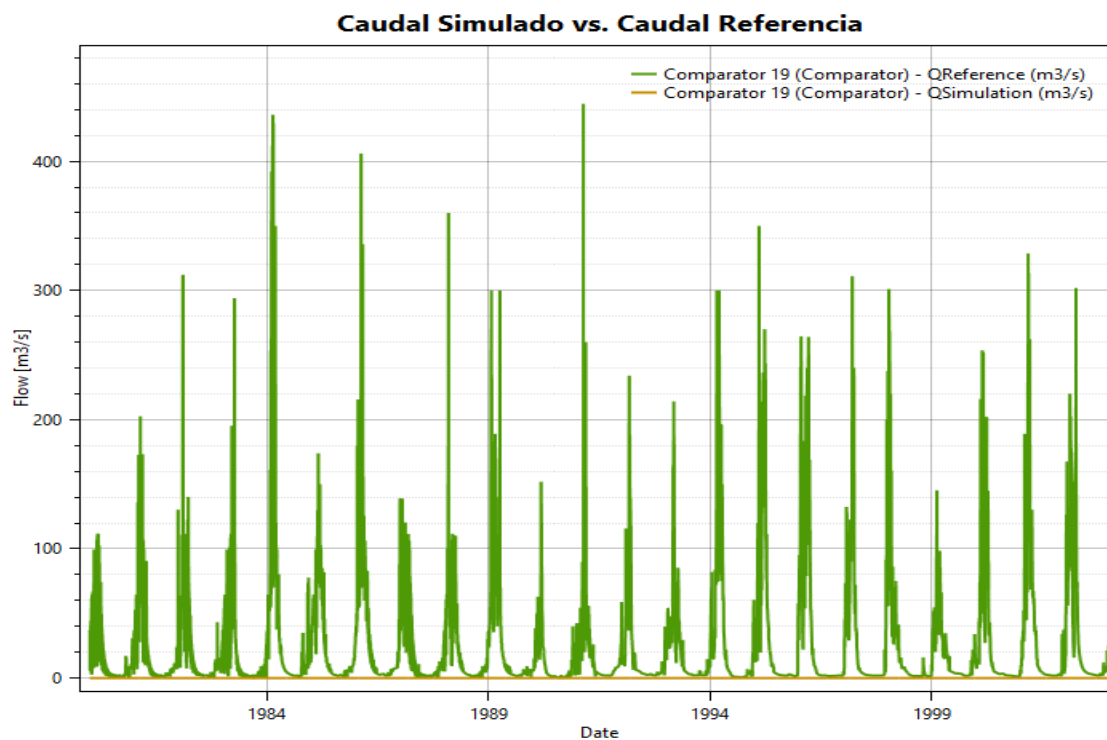
FUENTE: Elaboración propia



**Figura 93:** Histograma de los caudales diarios observados y simulados de la cuenca del río Pisco, para el periodo 1980-2002

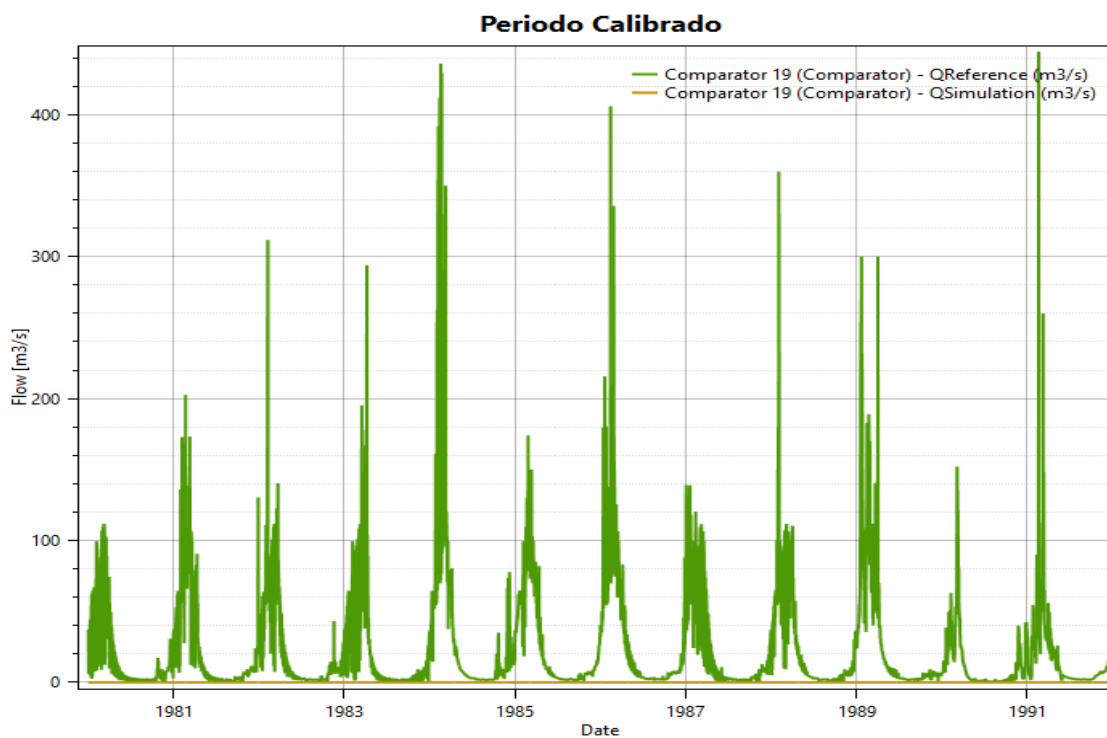
FUENTE: Elaboración propia

## B) MODELO GR4J CALIBRADO



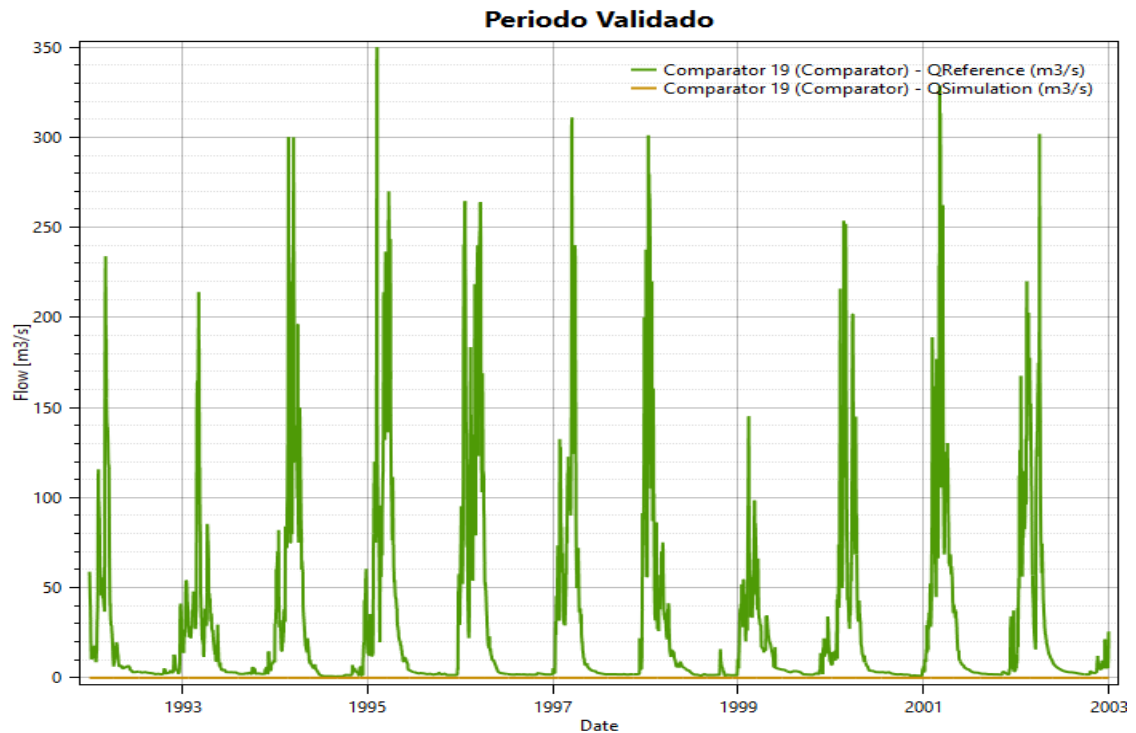
**Figura 94:** Histograma de los caudales diarios observados y simulados de la cuenca del río Pisco, periodo 1980-2002

FUENTE: Elaboración propia



**Figura 95:** Histograma de los caudales diarios observados y simulados de la cuenca del río Pisco, periodo de calibración (1980-1991)

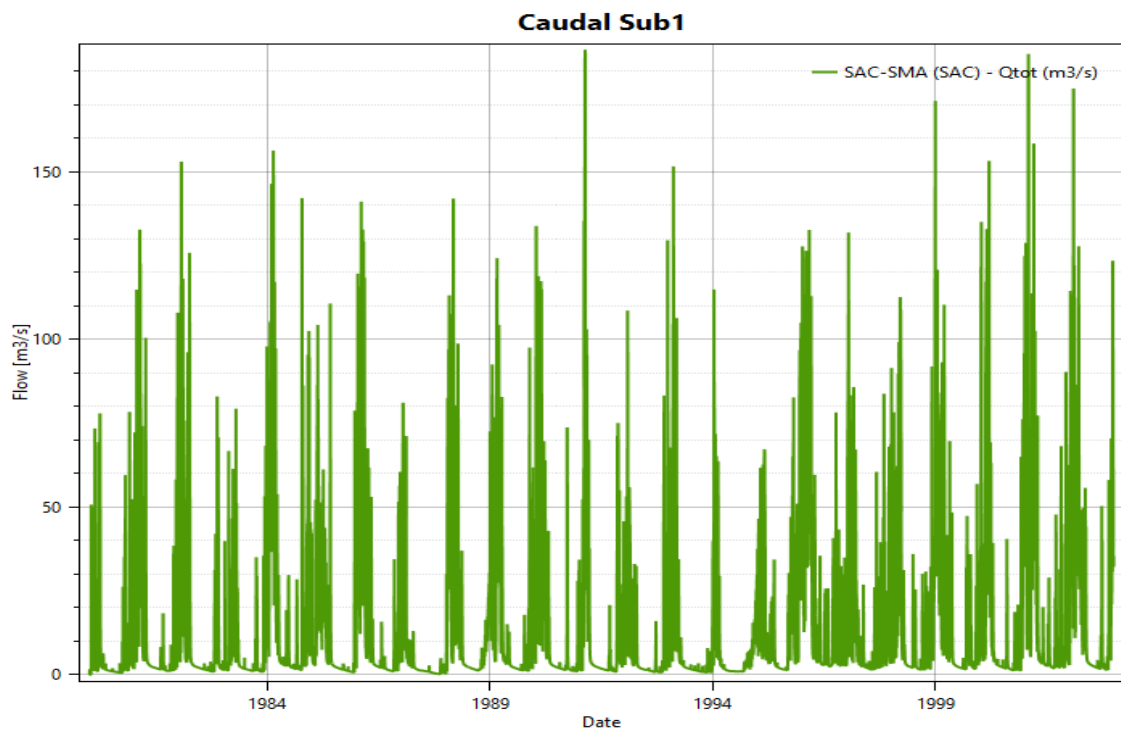
FUENTE: Elaboración propia



**Figura 96:** Histograma de los caudales diarios observados y simulados de la cuenca del río Pisco, periodo de validación (1992-2002)

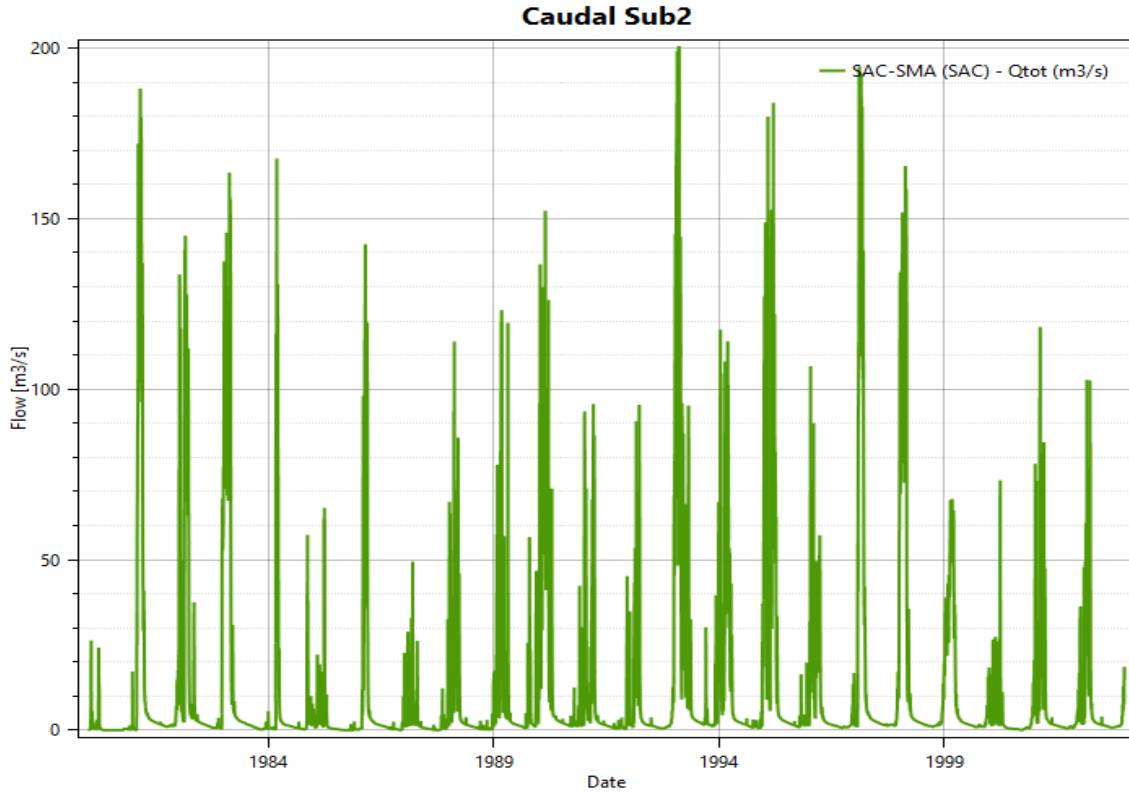
FUENTE: Elaboración propia

### C) MODELO SAC-SMA CALIBRADO



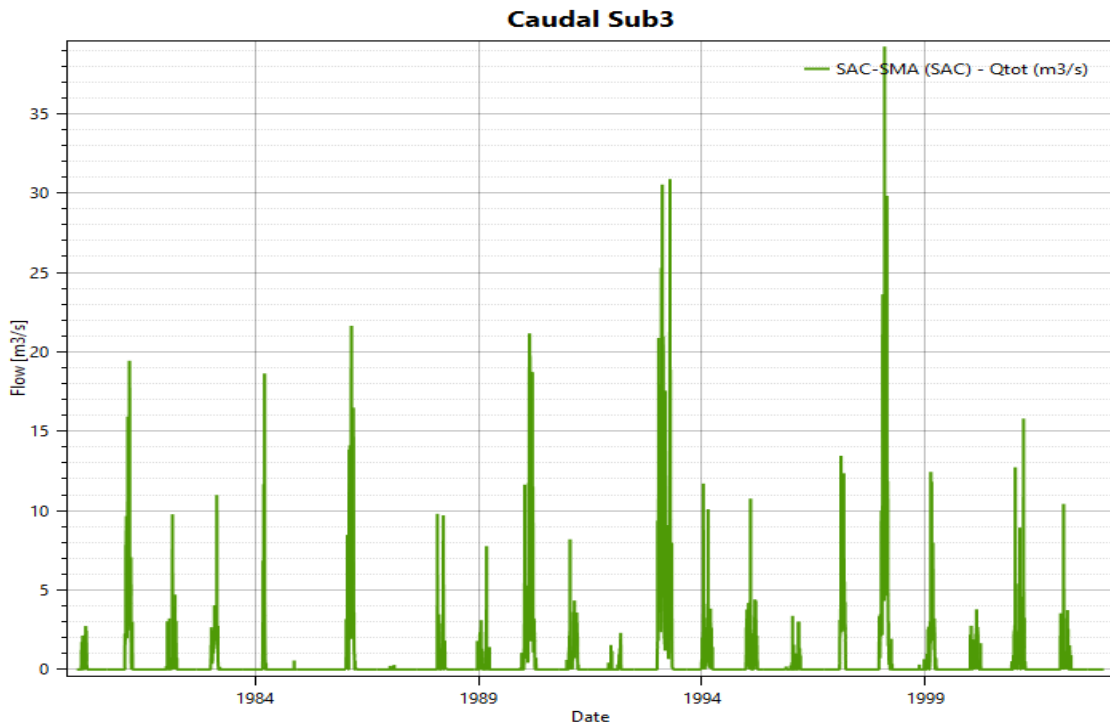
**Figura 97:** Histograma del caudal diario, simulado de la subcuenca1, para el periodo 1980-2002

FUENTE: Elaboración propia



**Figura 98: Histograma del caudal diario, simulado de la subcuena2, para el periodo 1980-2002**

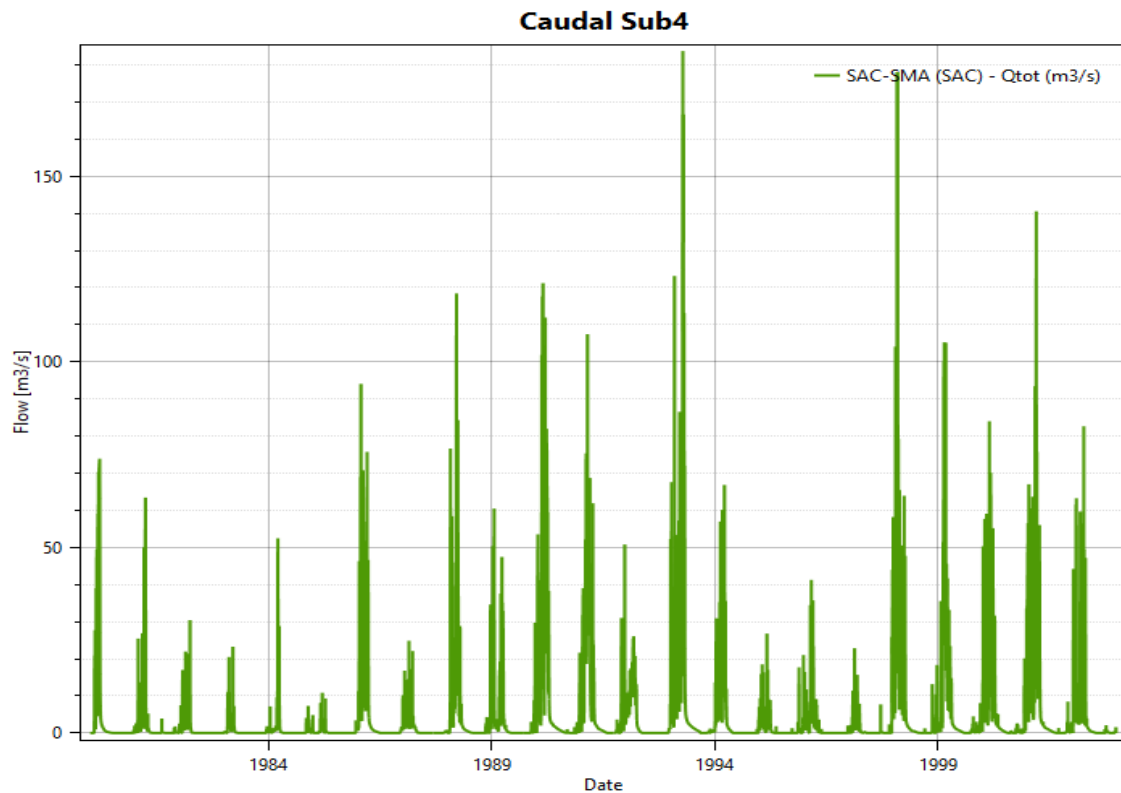
FUENTE: Elaboración propia



**Figura 99: Histograma del caudal diario, simulado de la subcuena3, para el periodo 1980-2002**

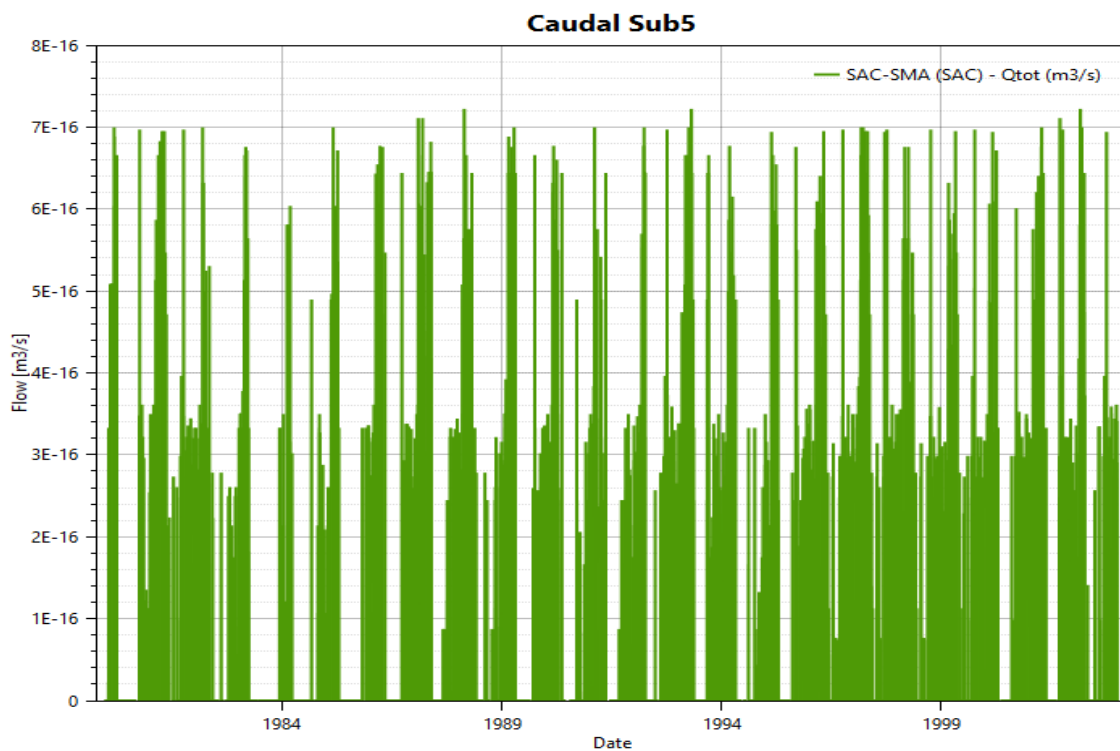
FUENTE: Elaboración propia





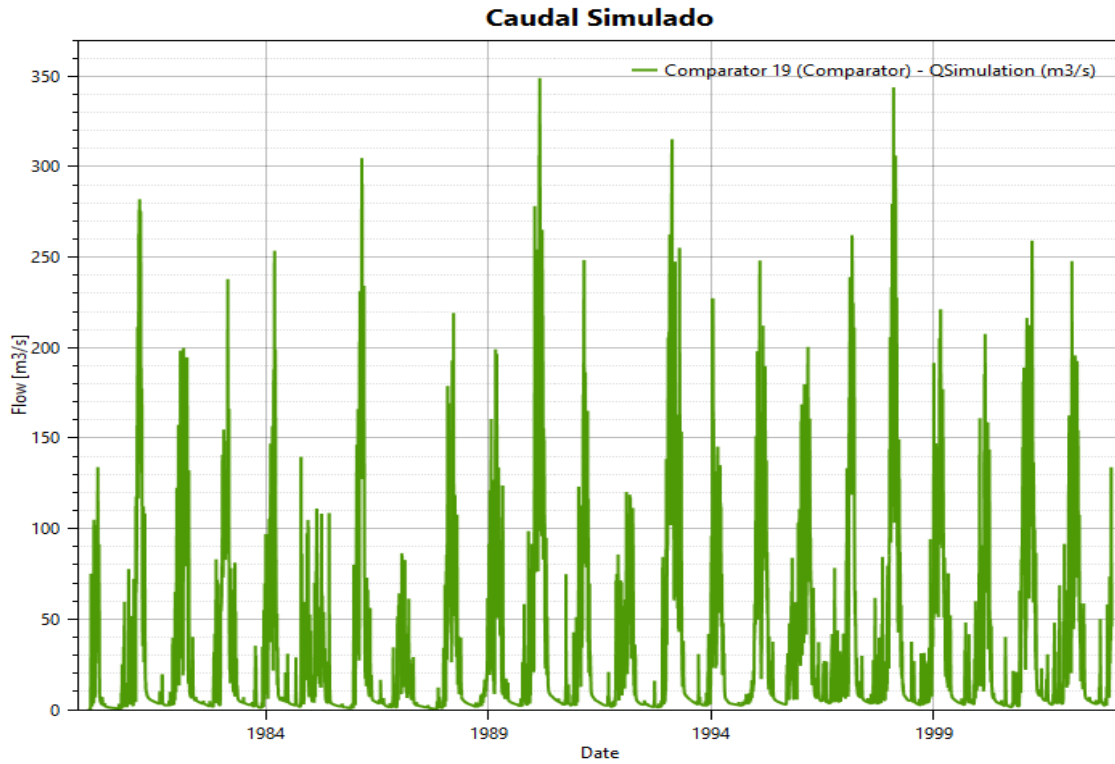
**Figura 100: Histograma del caudal diario, simulado de la subcuena4, para el periodo 1980-2002**

FUENTE: Elaboración propia



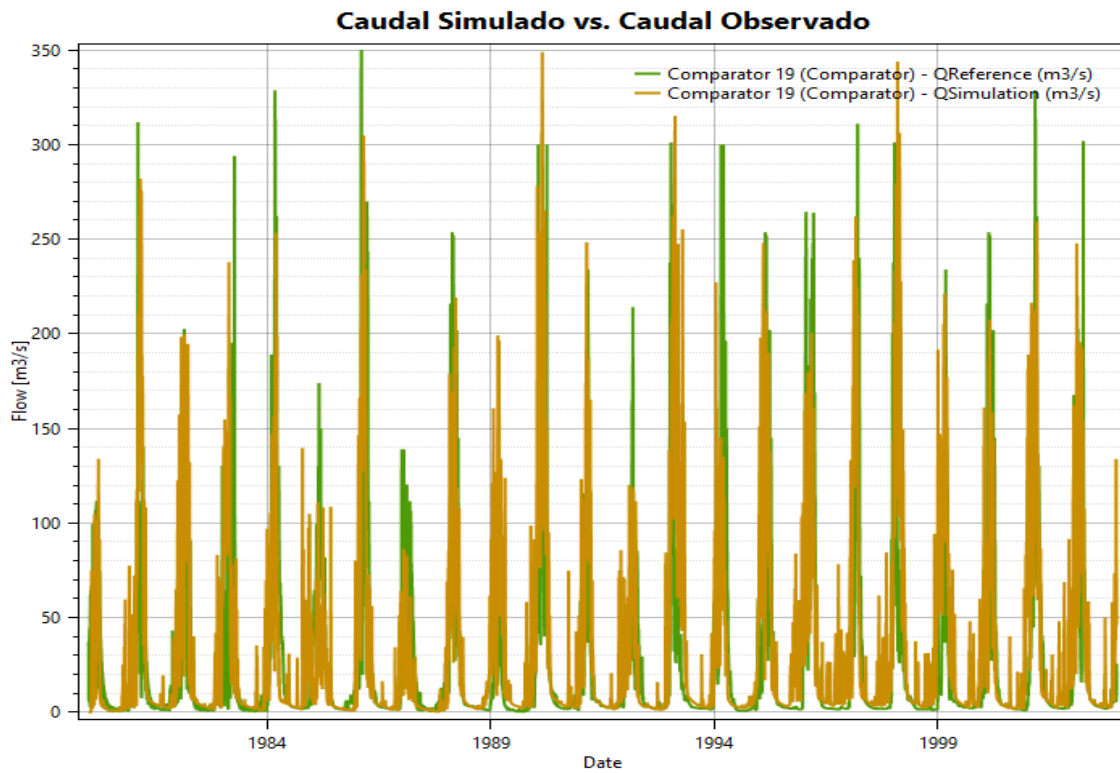
**Figura 101: Histograma del caudal diario, simulado de la subcuena5, para el periodo 1980-2002**

FUENTE: Elaboración propia



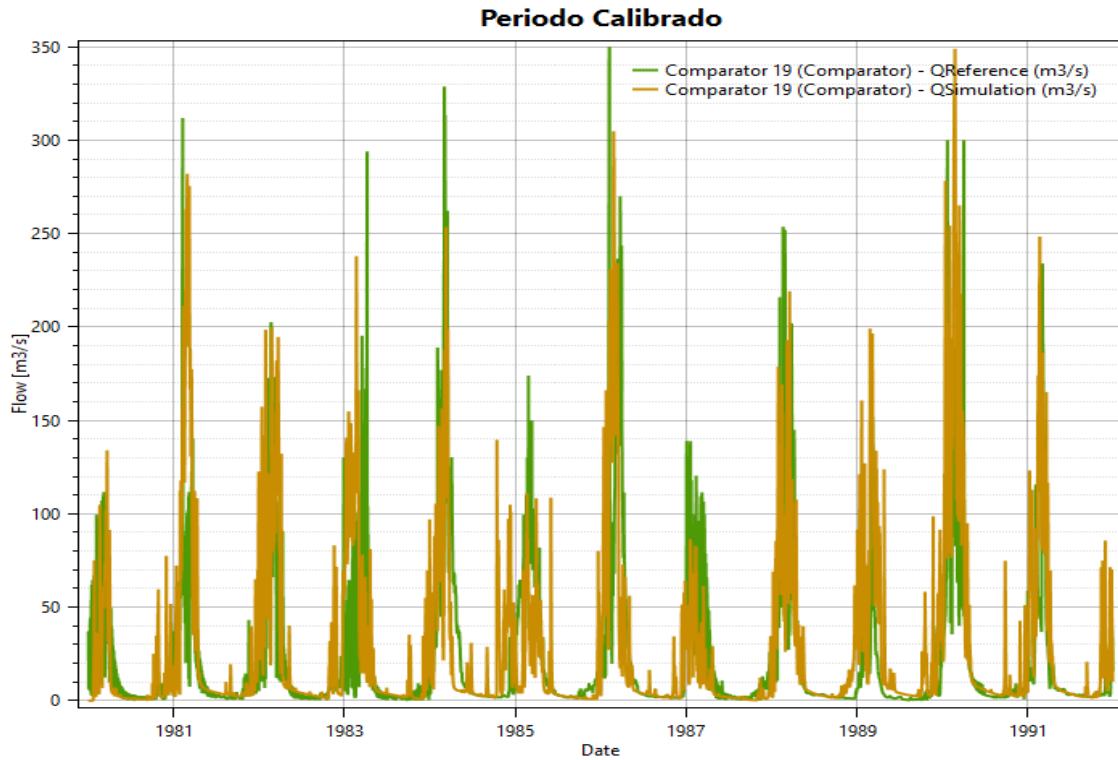
**Figura 102: Histograma del caudal diario, simulado de la cuenca del río Pisco, para el periodo 1980-2002**

FUENTE: Elaboración propia



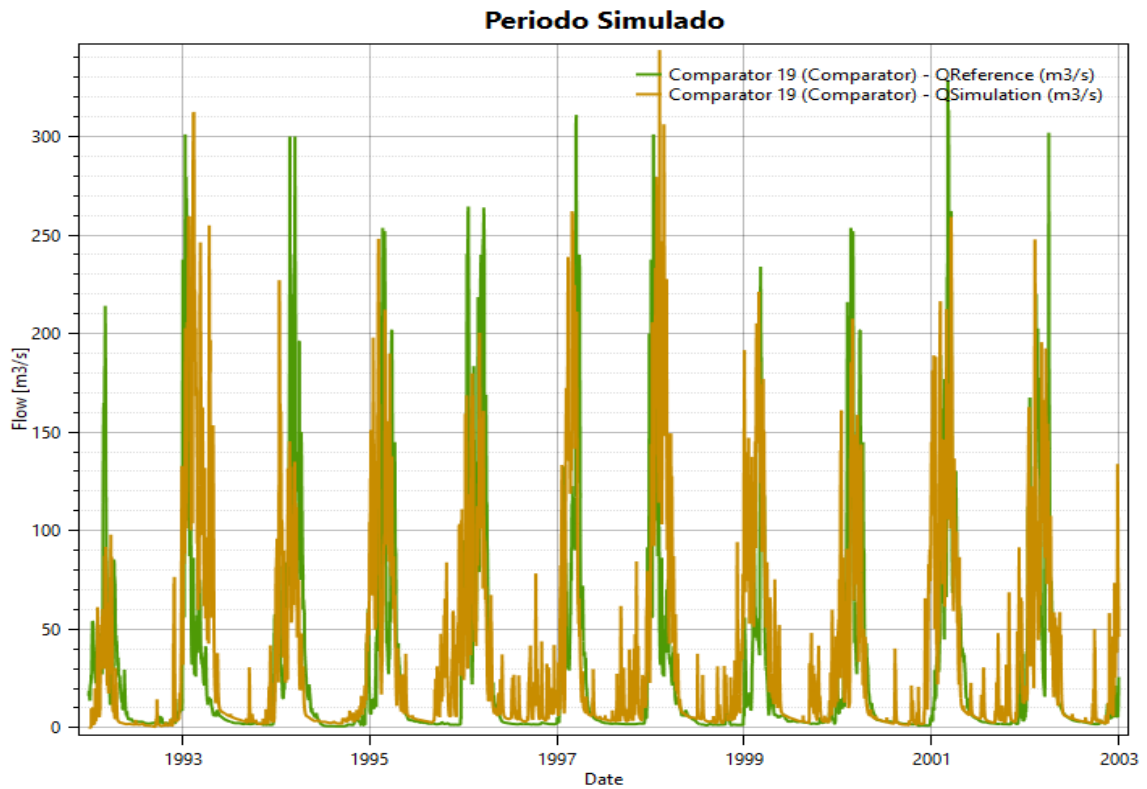
**Figura 103: Histograma de los caudales diarios observados y simulados de la cuenca del río Pisco, periodo 1980-2002**

FUENTE: Elaboración propia



**Figura 104:** Histograma de los caudales diarios observados y simulados de la cuenca del río Pisco, periodo de calibración (1980-1991)

FUENTE: Elaboración propia

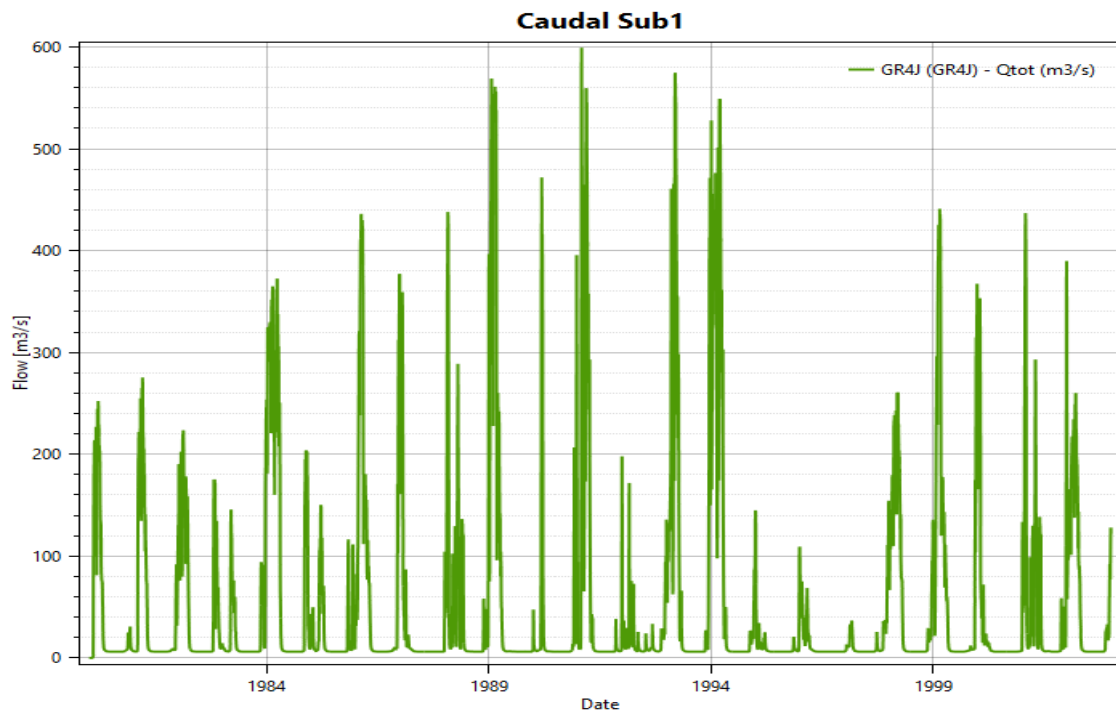


**Figura 105:** Histograma de los caudales diarios observados y simulados de la cuenca del río Pisco, periodo de validación (1992-2002)

FUENTE: Elaboración propia

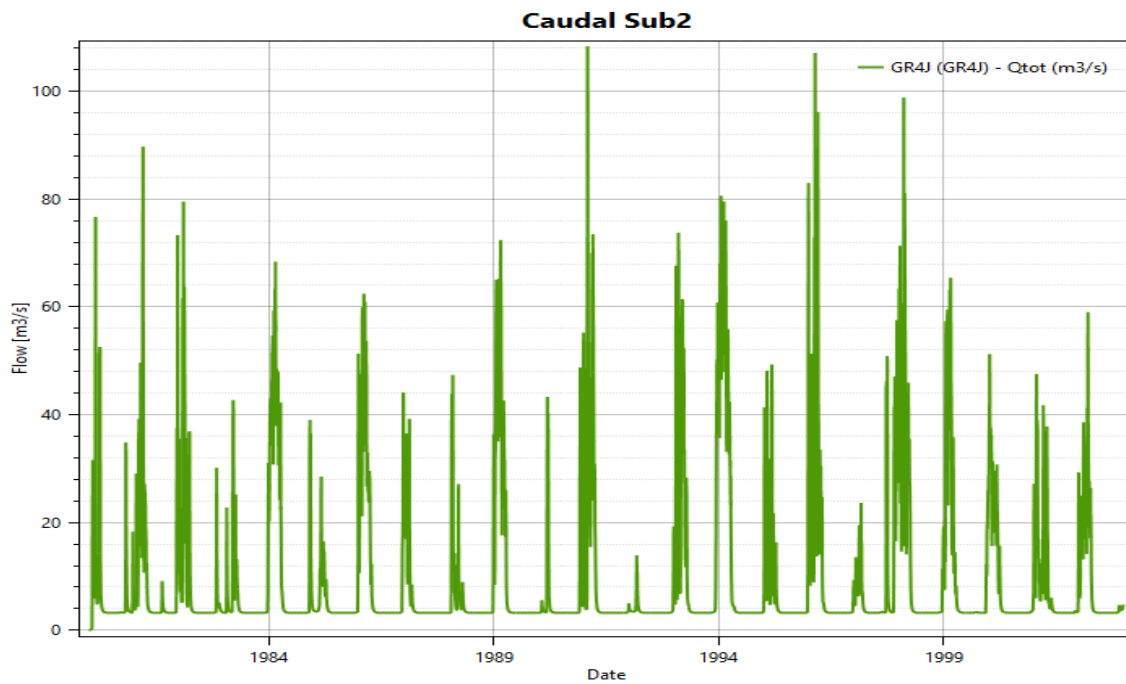
## ANEXO 6.2 SIMULACIÓN DE LA CUENCA SAN JUAN

### A) MODELO GR4J SIN CALIBRACIÓN



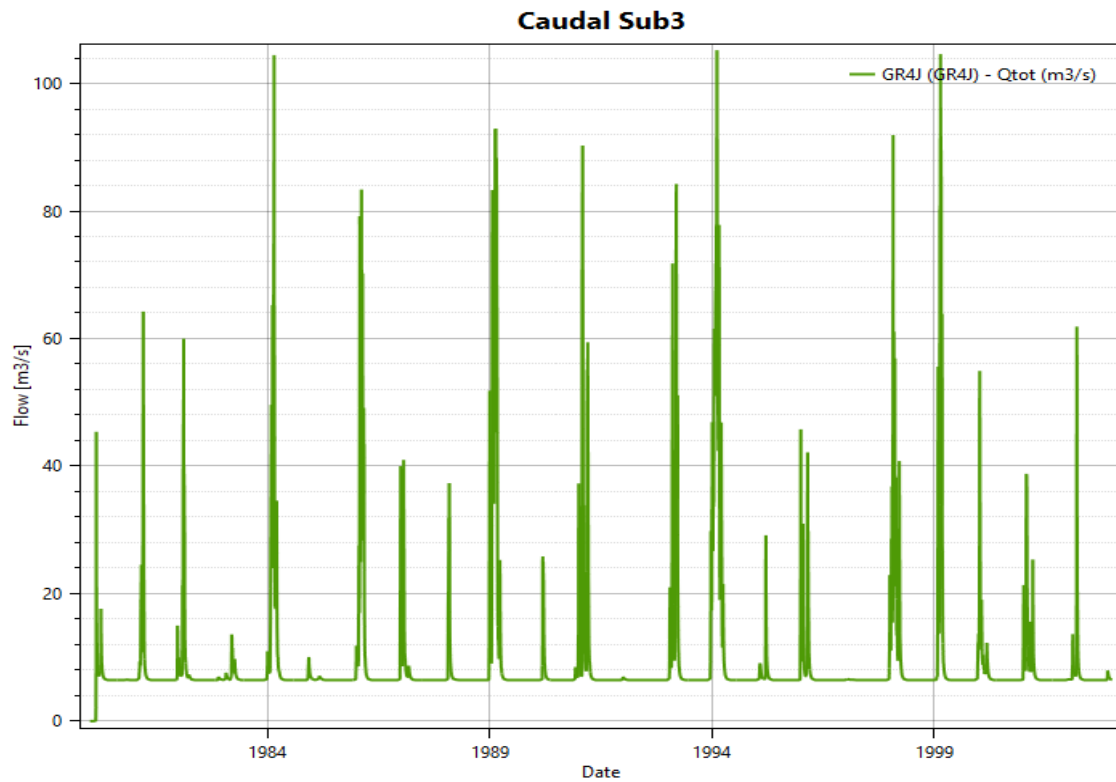
**Figura 106:** Histograma del caudal diario, simulado de la subcuenca1, para el periodo 1980-2002

FUENTE: Elaboración propia



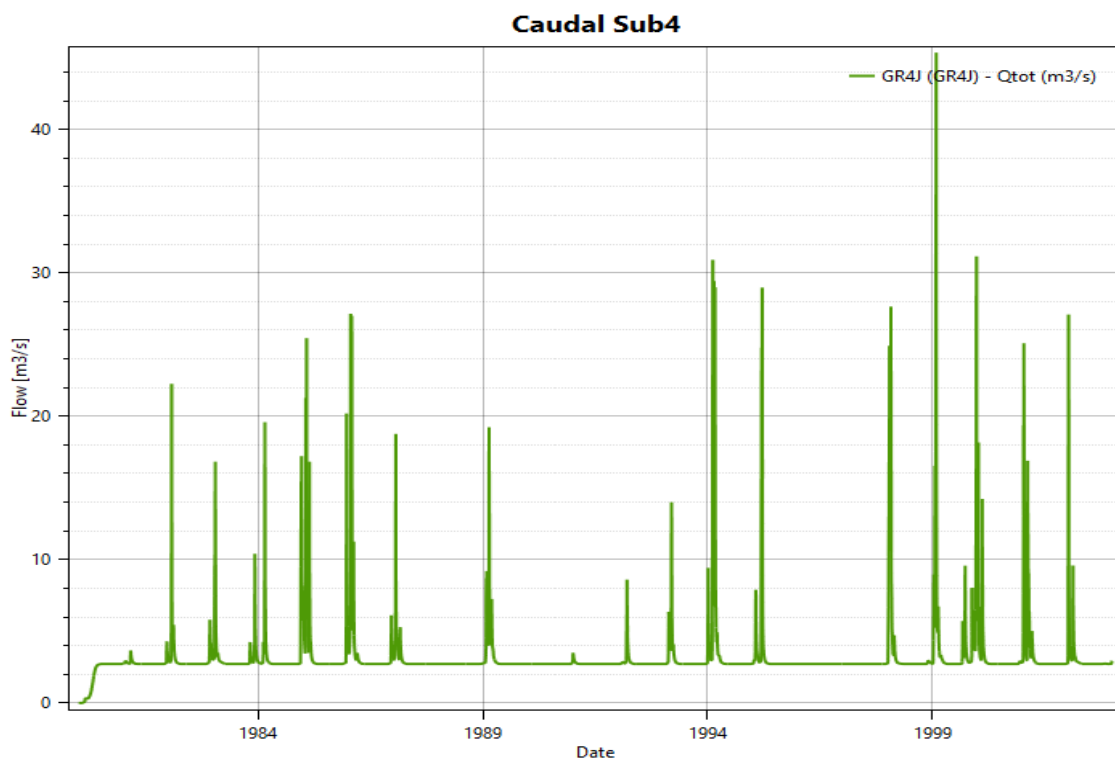
**Figura 107:** Histograma del caudal diario, simulado de la subcuenca2, para el periodo 1980-2002

FUENTE: Elaboración propia



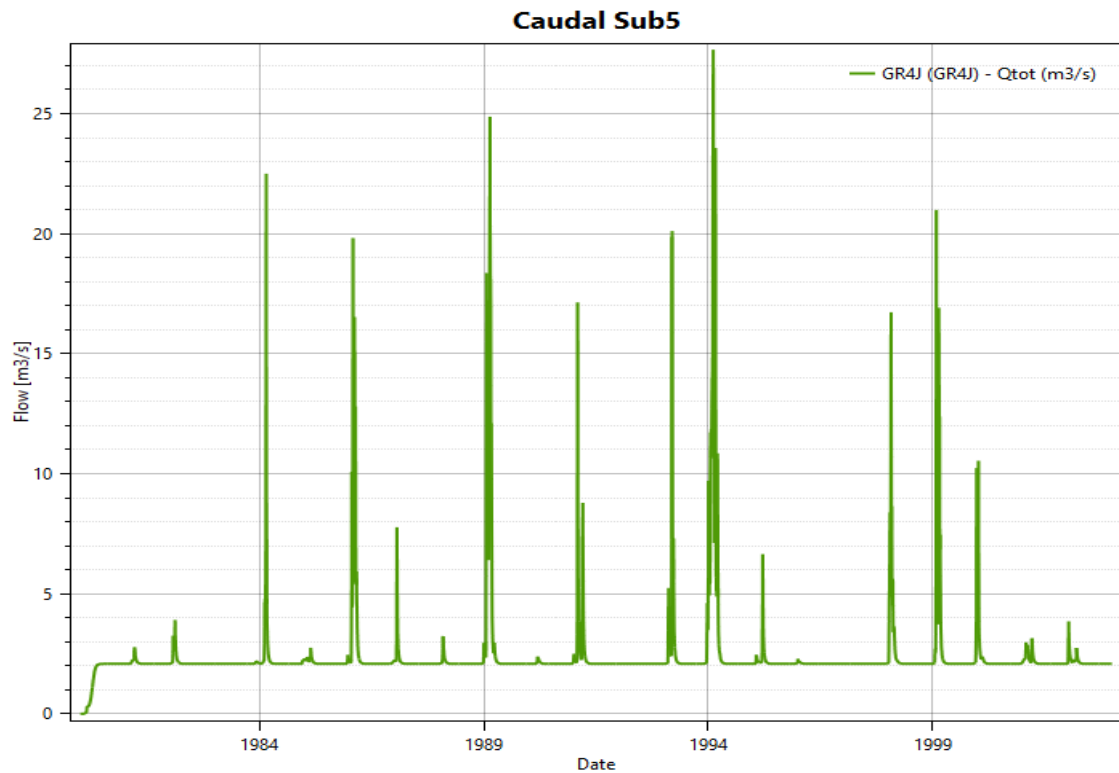
**Figura 108: Histograma del caudal diario, simulado de la subcuena3, para el periodo 1980-2002**

FUENTE: Elaboración propia



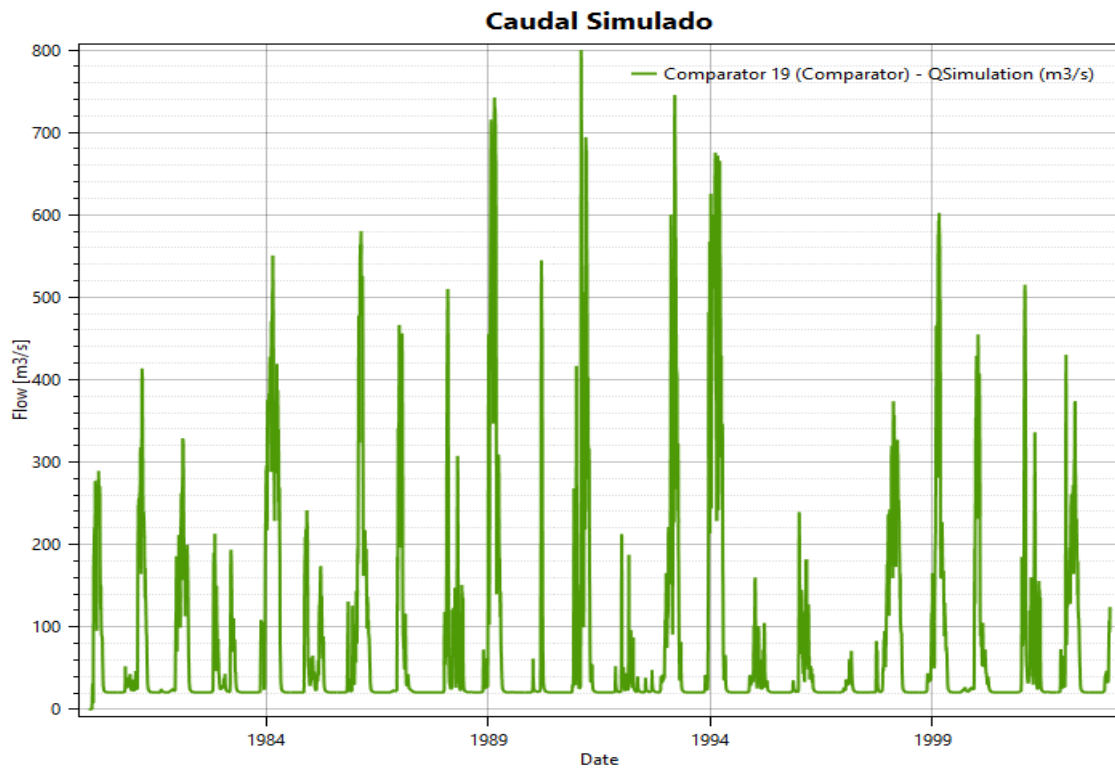
**Figura 109: Histograma del caudal diario, simulado de la subcuena4, para el periodo 1980-2002**

FUENTE: Elaboración propia



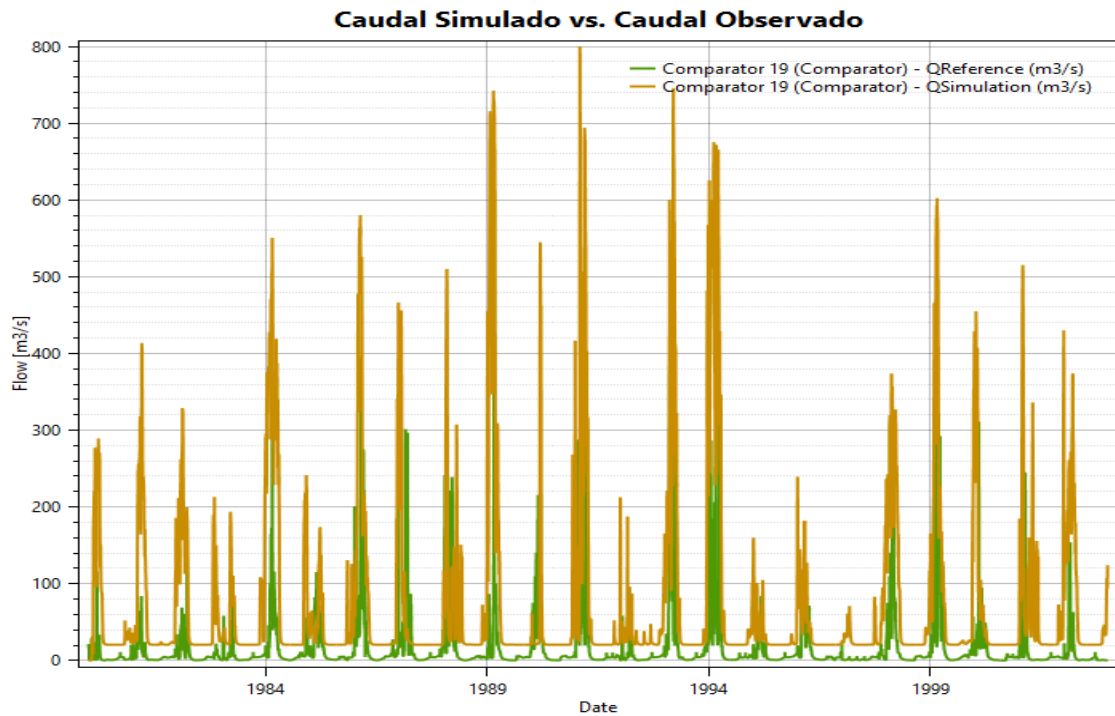
**Figura 110:** Histograma del caudal diario, simulado de la subcuena5, para el periodo 1980-2002

FUENTE: Elaboración propia



**Figura 111:** Histograma del caudal diario, simulado de la cuenca del río San Juan, para el periodo 1980-2002

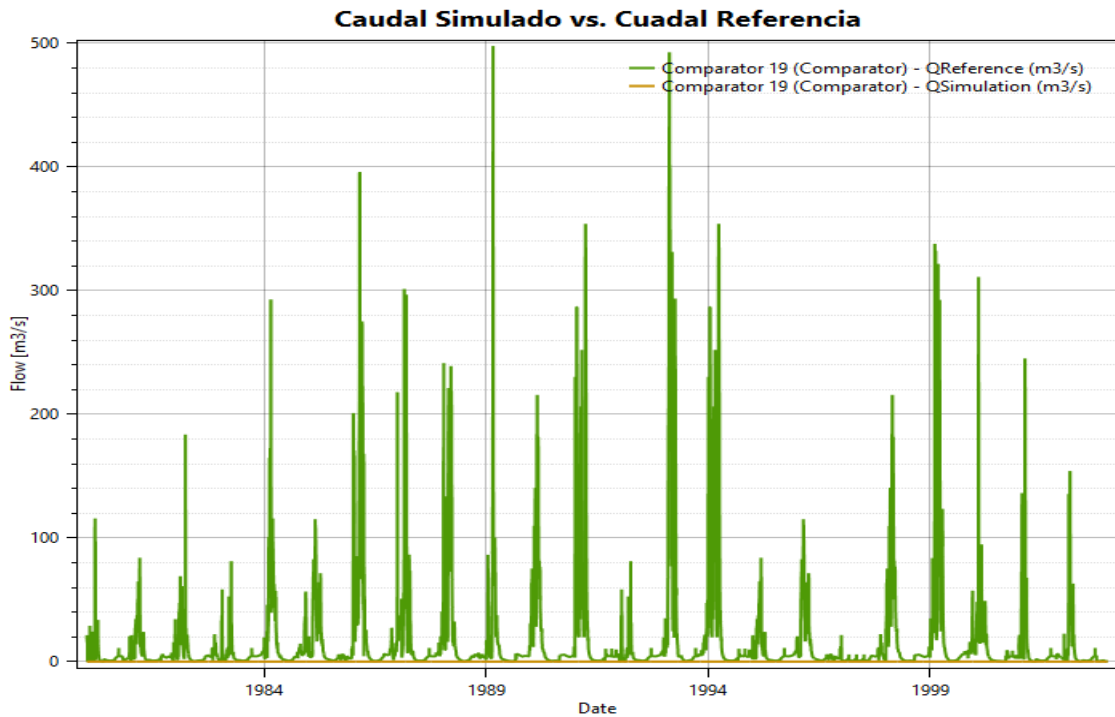
FUENTE: Elaboración propia



**Figura 112: Histograma de los caudales diarios observados y simulados de la cuenca del rio San Juan, periodo 1980-2002**

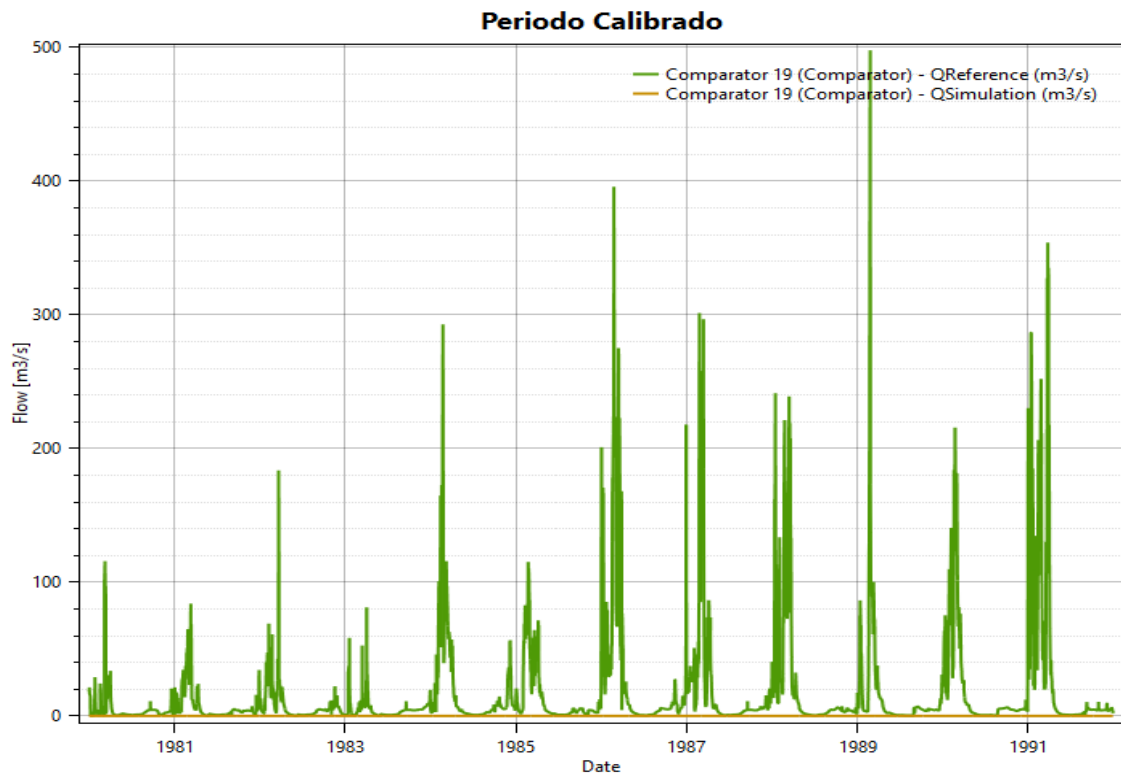
FUENTE: Elaboración propia

### B) MODELO GR4J CALIBRADO



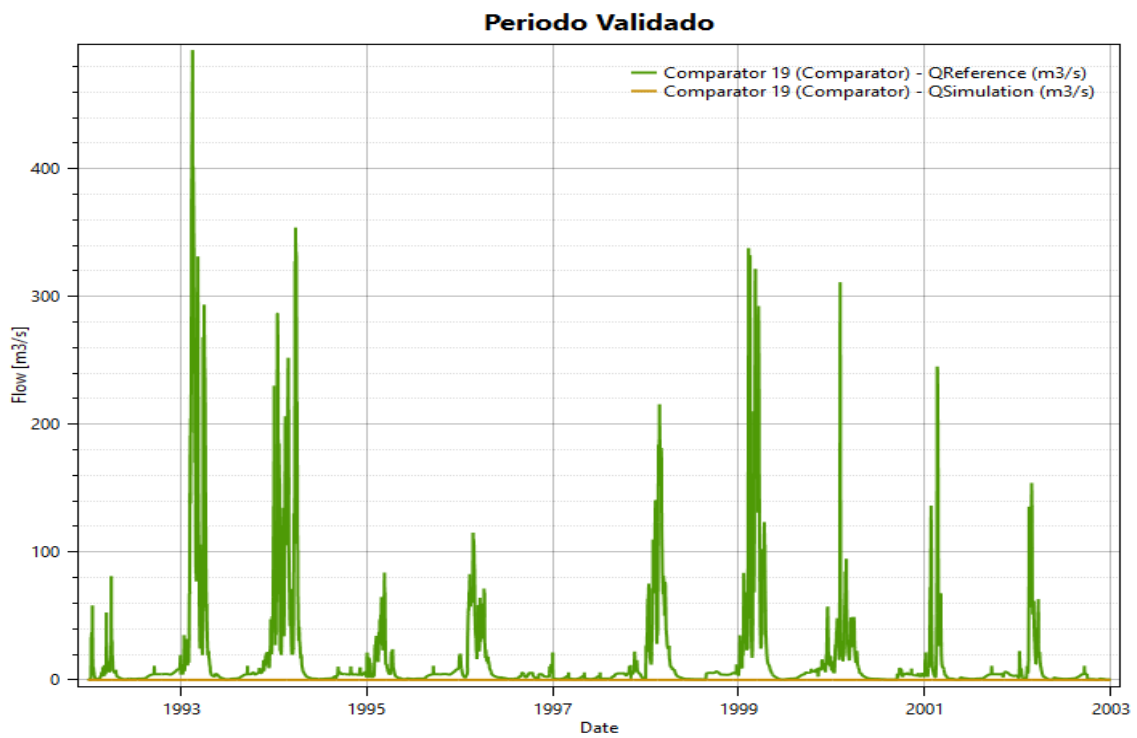
**Figura 113: Histograma de los caudales diarios observados y simulados de la cuenca del rio San Juan, periodo 1980-2002**

FUENTE: Elaboración propia



**Figura 114:** Histograma de los caudales diarios observados y simulados de la cuenca del río San Juan, periodo de calibración (1980-1991)

FUENTE: Elaboración propia

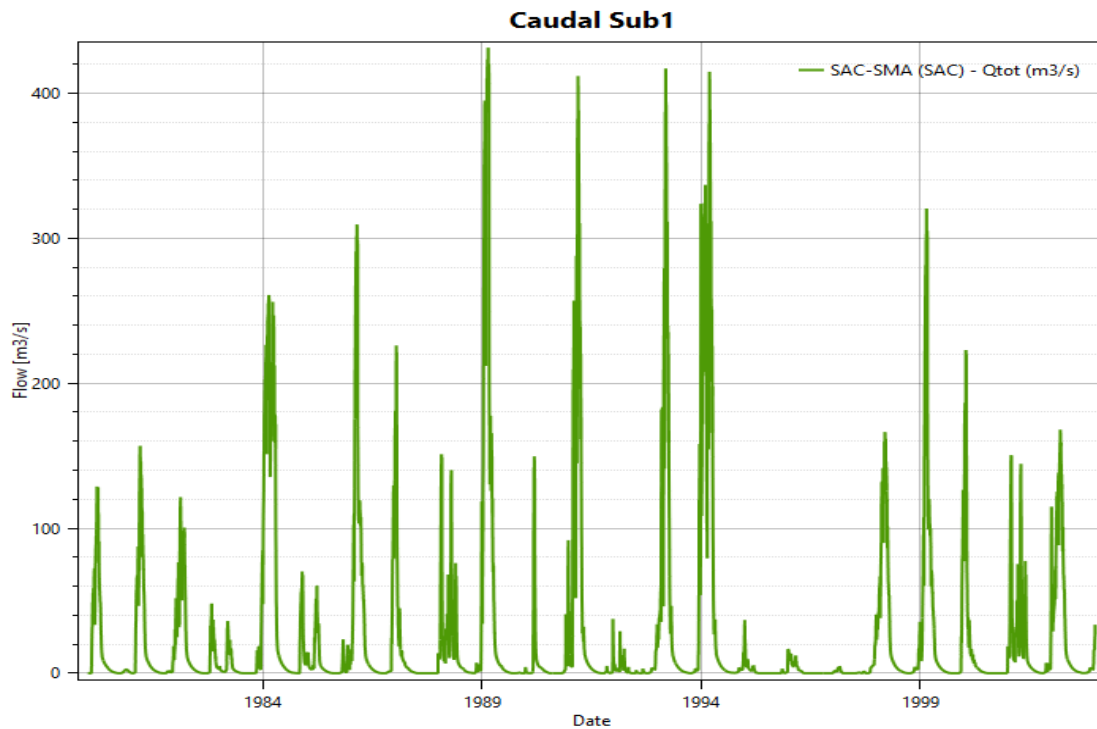


**Figura 115:** Histograma de los caudales diarios observados y simulados de la cuenca del río San Juan, periodo de validación (1992-2002)

FUENTE: Elaboración propia

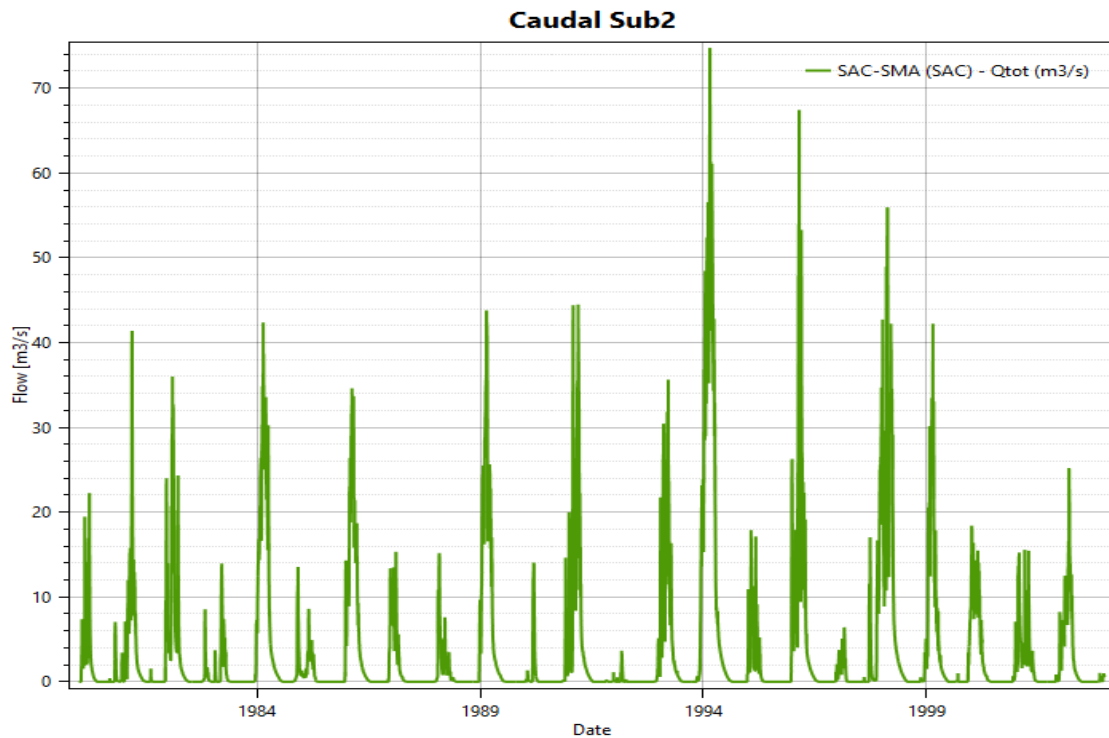


### C) MODELO SAC-SMA CALIBRADO



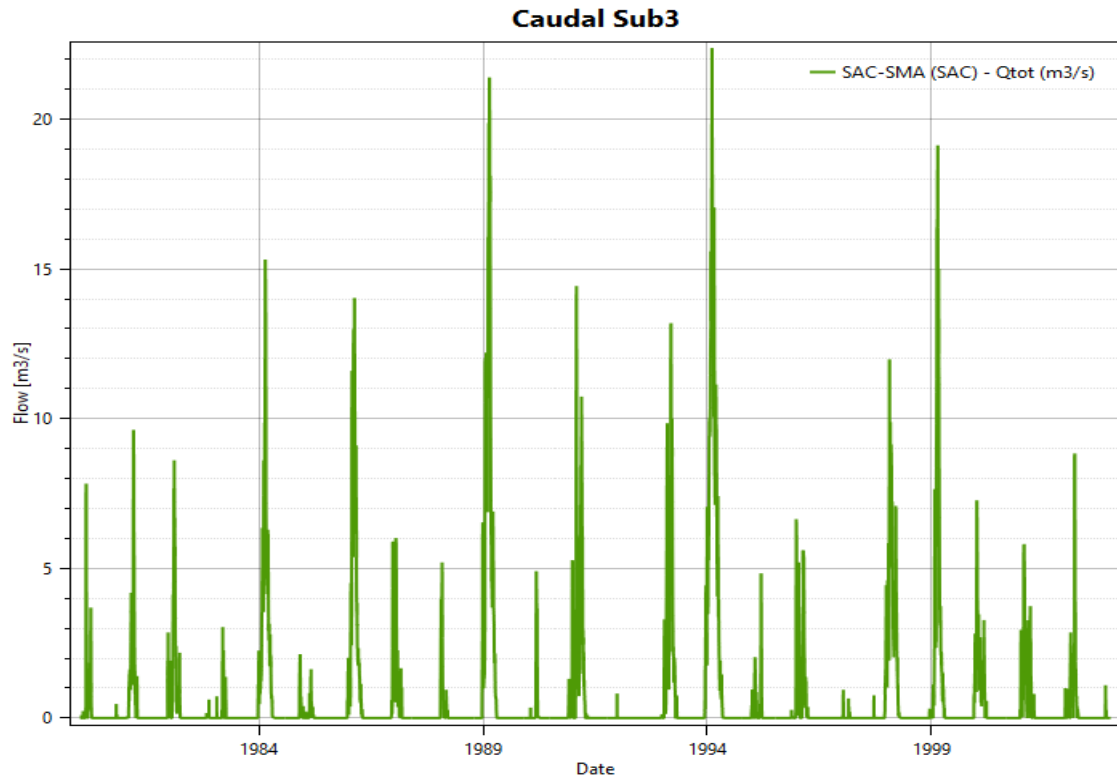
**Figura 116:** Histograma del caudal diario, simulado de la subcuena1, para el periodo 1980-2002

FUENTE: Elaboración propia



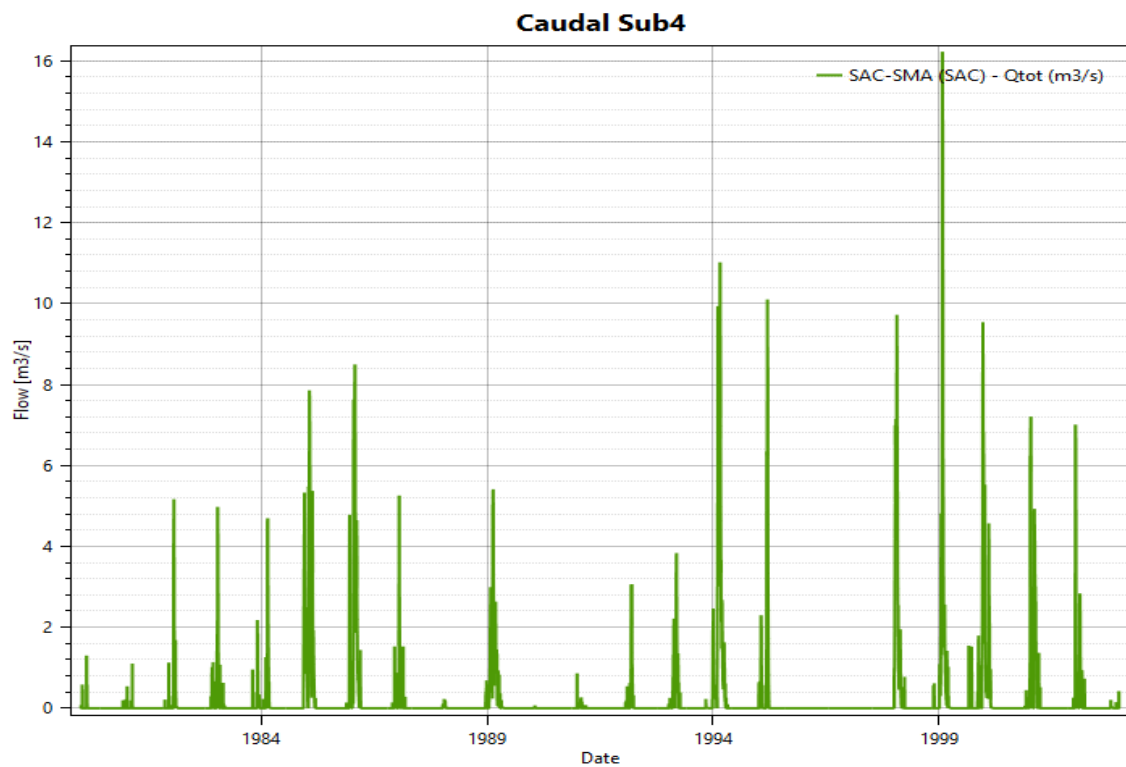
**Figura 117:** Histograma del caudal diario, simulado de la subcuena2, para el periodo 1980-2002

FUENTE: Elaboración propia



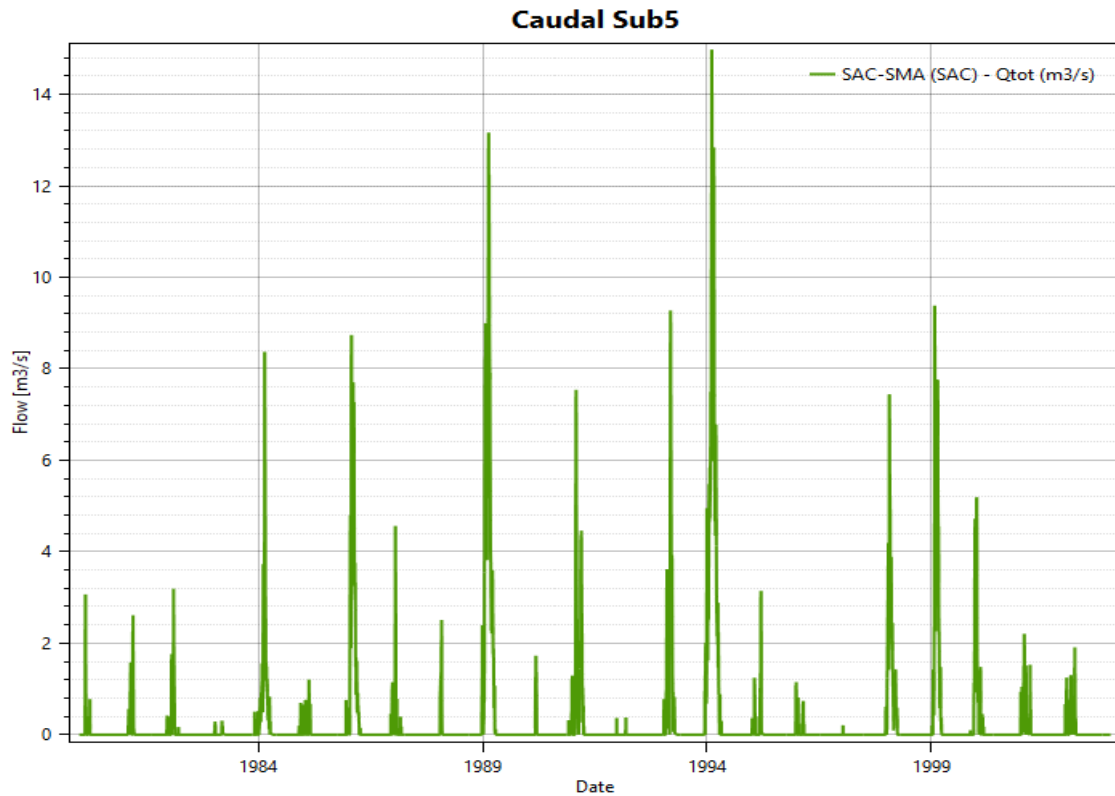
**Figura 118:** Histograma del caudal diario, simulado de la subcuena3, para el periodo 1980-2002

FUENTE: Elaboración propia



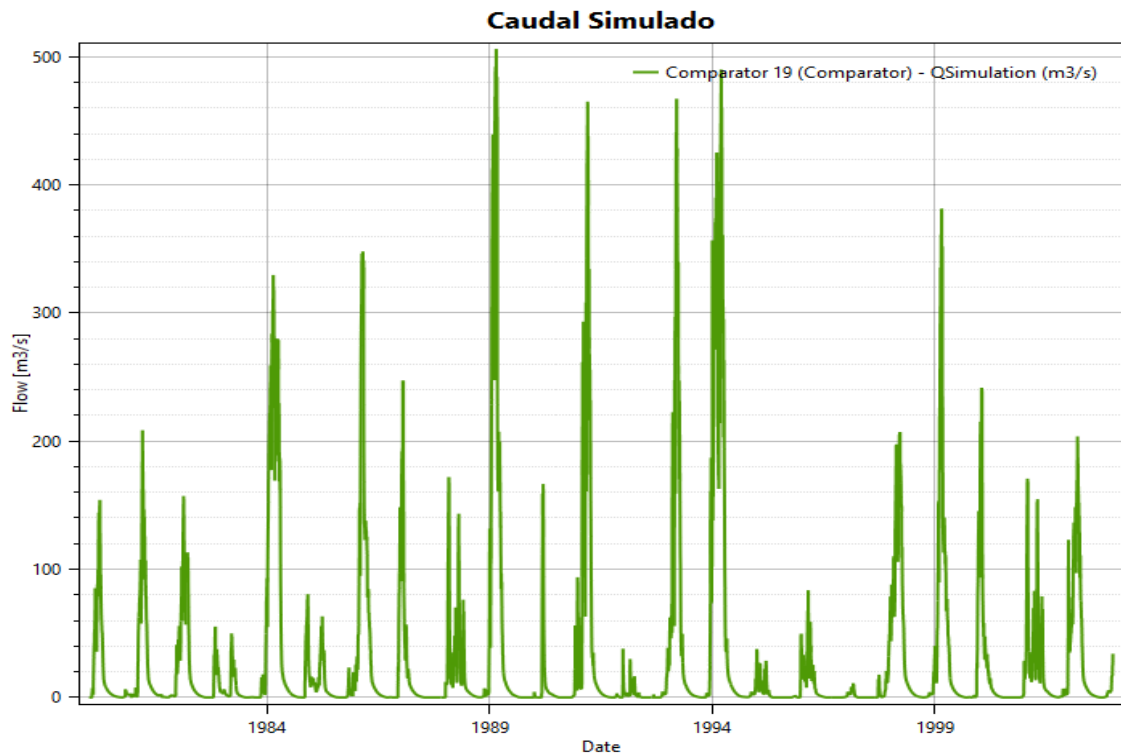
**Figura 119:** Histograma del caudal diario, simulado de la subcuena4, para el periodo 1980-2002

FUENTE: Elaboración propia



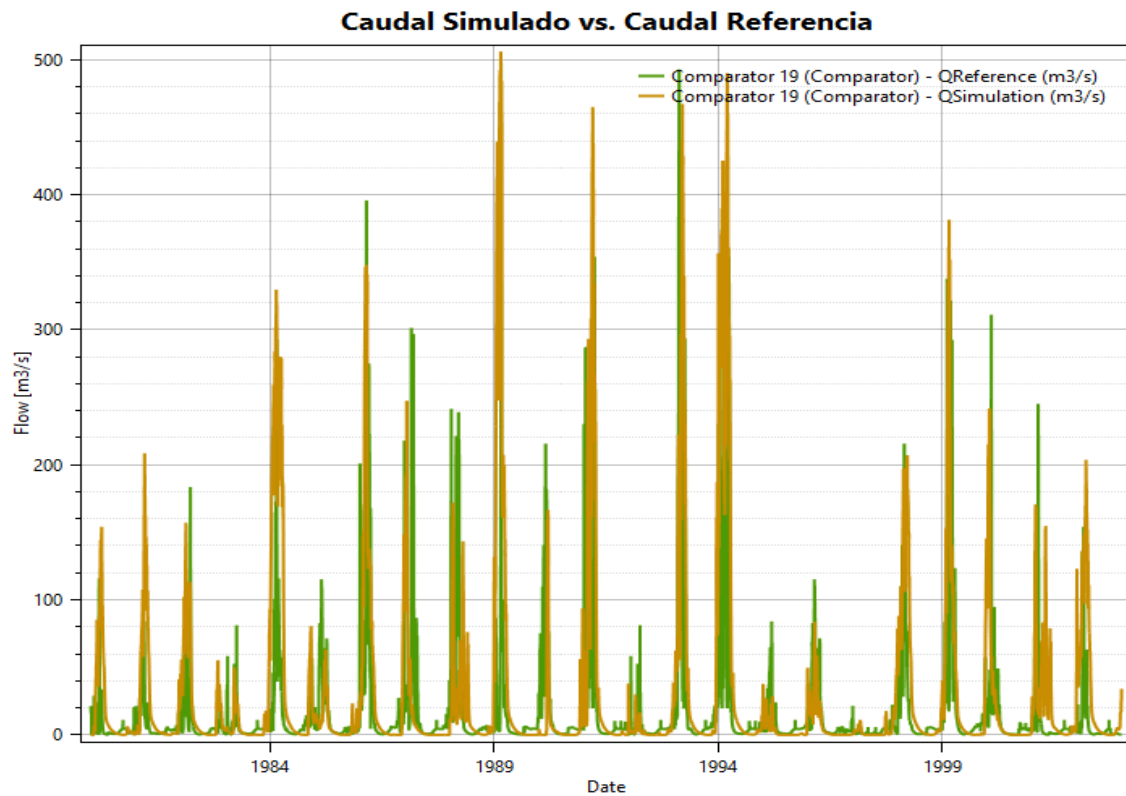
**Figura 120: Histograma del caudal diario, simulado de la subcuena5, para el periodo 1980-2002**

FUENTE: Elaboración propia



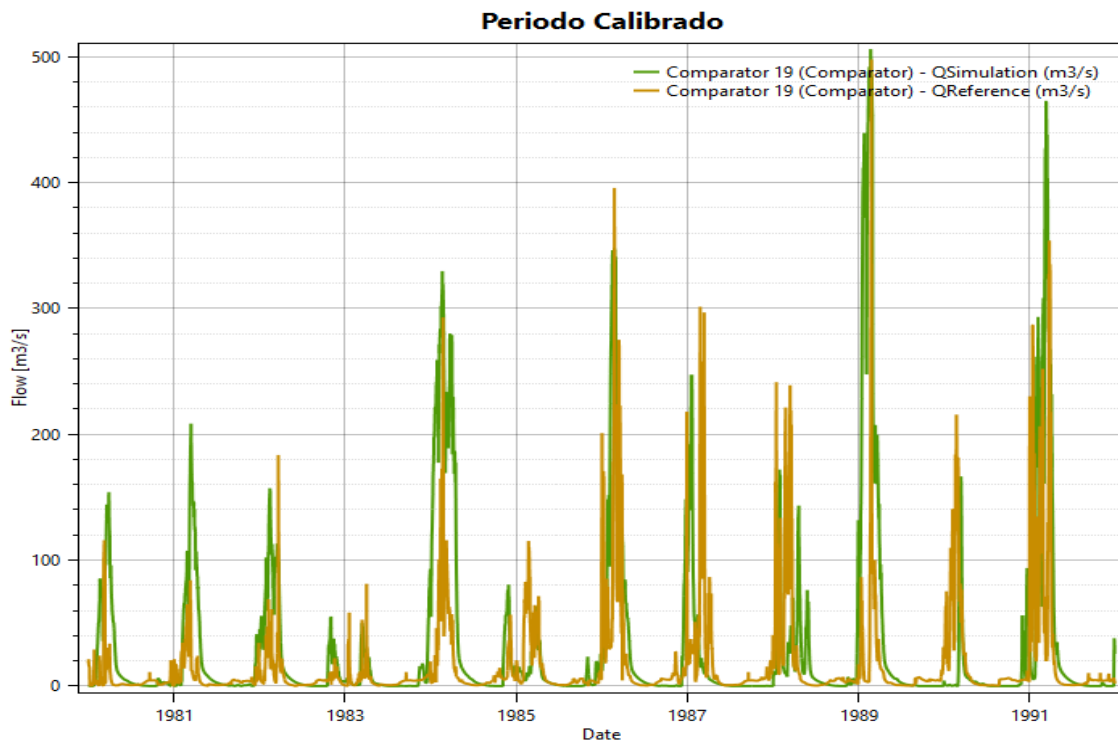
**Figura 121: Histograma del caudal diario, simulado de la cuenca del río San Juan, para el periodo 1980-2002**

FUENTE: Elaboración propia



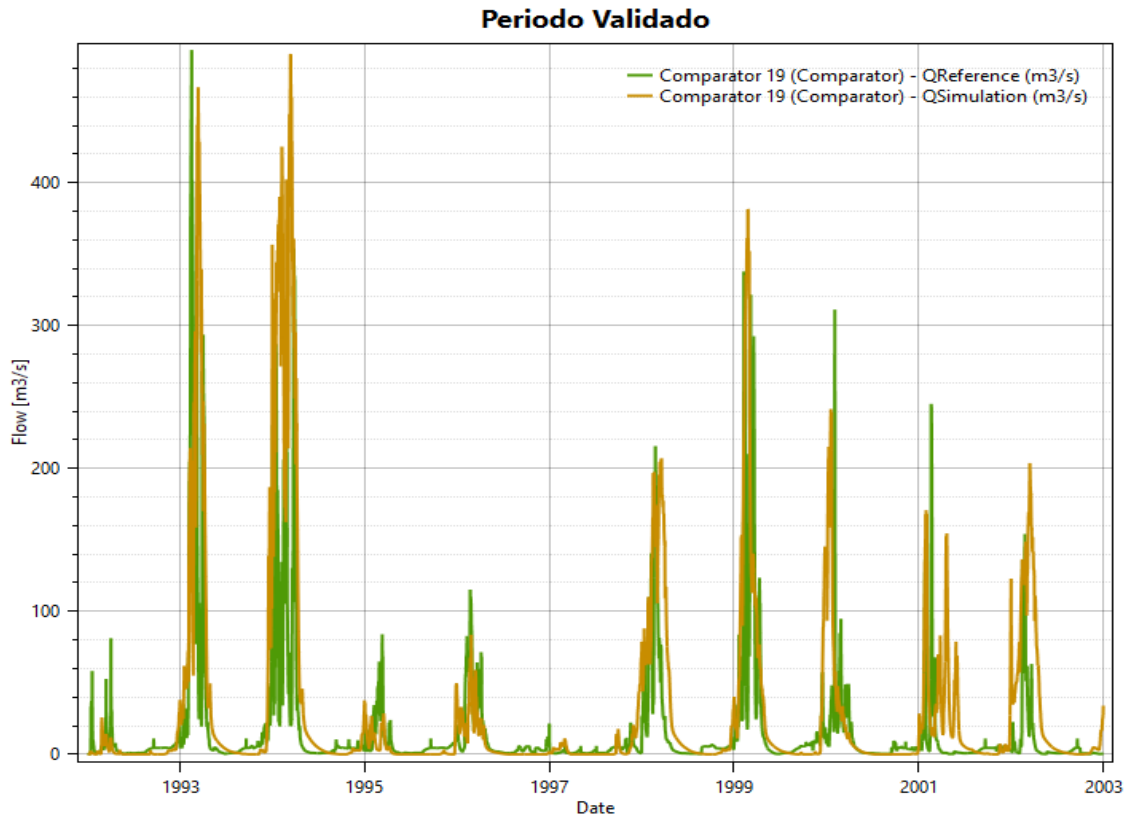
**Figura 122:** Histograma de los caudales diarios observados y simulados de la cuenca del rio San Juan, periodo 1980-2002

FUENTE: Elaboración propia



**Figura 123:** Histograma de los caudales diarios observados y simulados de la cuenca del rio San Juan, periodo de calibración (1980-1991)

FUENTE: Elaboración propia



**Figura 124: Histograma de los caudales diarios observados y simulados de la cuenca del rio San Juan, periodo de validación (1992-2002)**

FUENTE: Elaboración propia