



UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO



**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, DE
SISTEMAS Y DE ARQUITECTURA**

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

TESIS

**Estudio comparativo de los modelos GR4J, HBV, SACRAMENTO, SOCONT
para la evaluación hidrológica de la cuenca Chancay-Lambayeque, utilizando
el software Rs Minerve**

Para optar el título profesional de Ingeniero (a) Civil

Autores:

Bach. Rojas Nuñez Deysi Marilyn

Bach. Saavedra Sanchez Christian Jordan

Asesor:

Dr. Ing. Arbulú Ramos José del Carmen

Lambayeque – Abril 2026



UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, DE
SISTEMAS Y DE ARQUITECTURA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

TESIS

Estudio comparativo de los modelos GR4J, HBV, SACRAMENTO, SOCONT
para la evaluación hidrológica de la cuenca Chancay-Lambayeque, utilizando
el software Rs Minerve

Para optar el título profesional de Ingeniero (a) Civil

Aprobado por los miembros del jurado:

Dr. Ing. Coronado Zuloeta Omar
PRESIDENTE

Dr. Ing. Cueva Campos Hamilton Vladimir
SECRETARIO

Dr. Ing. Huangal Castañeda Nelson
VOCAL

Lambayeque – Abril 2026



UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, DE
SISTEMAS Y DE ARQUITECTURA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

TESIS

Estudio comparativo de los modelos GR4J, HBV, SACRAMENTO, SOCONT
para la evaluación hidrológica de la cuenca Chancay-Lambayeque, utilizando
el software Rs Minerve

Para optar el título profesional de Ingeniero (a) Civil

Presentado por:

Bach. Rojas Nuñez Deysi Marilyn
AUTORA

Bach. Saavedra Sanchez Christian Jordan
AUTOR

Dr. Ing. Arbulú Ramos José del Carmen
ASESOR

Lambayeque – Abril 2026



ACTA DE SUSTENTACIÓN N° 352-2026-UI-FICSA



Siendo las 11:00 am del día 15 de abril del 2026, se reunieron los miembros de jurado de la Tesis titulada: "ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS MODELOS GR4J, HBV, SACRAMENTO, SOCONT PARA LA EVALUACIÓN HIDROLÓGICA DE LA CUENCA CHANCAY-LAMBAYEQUE, UTILIZANDO EL SOFTWARE RS MINERVE" con código N° IC_V_2023_079, y designado por Resolución Decanal Virtual N° 627-2023-UNPRG-FICSA con la finalidad de Evaluar y Calificar la sustentación de la tesis profesional antes mencionada, conformado por los siguientes docentes:

DR. ING. OMAR CORONADO ZULOETA	PRESIDENTE
DR. ING. HAMILTON VLADIMIR CUEVA CAMPOS	SECRETARIO
DR. ING. NELSON ENRIQUE HUANGAL CASTAÑEDA	VOCAL

Asesorado por DR. ING. ARBULU RAMOS JOSÉ DEL CARMEN.

El acto de sustentación fue autorizado por OFICIO VIRTUAL N° 75-2026-UIFICSA, la tesis profesional fue presentada y sustentada por los Bachilleres: **ROJAS NUÑEZ DEYSI MARILYN Y SAAVEDRA SANCHEZ CHRISTIAN JORDAN**, tuvo una duración de 25 minutos Después de la sustentación, y absueltas las preguntas y observaciones de los miembros del jurado; se procedió a la calificación respectiva:

	NUMERO	LETRAS	CALIFICATIVO
ROJAS NUÑEZ DEYSI MARILYN	17	DIECISIETE	BUENO
SAAVEDRA SANCHEZ CHRISTIAN JORDAN	17	DIECISIETE	BUENO

Por lo que quedan APTOS para obtener el Título Profesional de **INGENIERO (A) CIVIL** de acuerdo con la Ley Universitaria 30220 y la normatividad vigente de la Facultad de Ingeniería Civil De Sistemas y de Arquitectura de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

Siendo las 12:15; del mismo día, se dio por concluido el presente acto académico, dándose conformidad al presente acto, con la firma de los miembros del jurado.

DR. ING. OMAR CORONADO ZULOETA
PRESIDENTE

DR. ING. HAMILTON VLADIMIR CUEVA CAMPOS
SECRETARIO

DR. ING. NELSON ENRIQUE HUANGAL CASTAÑEDA
VOCAL



“Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana”

CONSTANCIA DE VERIFICACIÓN DE ORIGINALIDAD DE TESIS

Yo Dr. Ing. JOSE DEL CARMEN ARBULÚ RAMOS, Asesor de Tesis de los sustentantes:

- ROJAS NUÑEZ DEYSI MARILYN
- SAAVEDRA SANCHEZ CHRISTIAN JORDAN

De la Tesis Titulada: **“Estudio comparativo de los Modelos Gr4j, Hbv, Sacramento, Socont para la evaluación hidrológica de la Cuenca Chancay-Lambayeque, utilizando el software Rs Minerve”**

Luego de la revisión exhaustiva del documento constato que la misma tiene un índice de similitud de 15 % verificable en el reporte de similitud del programa TURNITIN.

El suscrito analizó dicho reporte y concluyó que cada una de las coincidencias detectadas no constituyen plagio. A mi leal saber y entender la tesis cumple con todas las normas para el uso de citas y referencias establecidas por la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

Lambayeque, 2 de enero 2026

Atentamente

Dr. Ing. José Del Carmen Arbulú Ramos
DNI:16486578
ASESOR

TESIS - FINAL CORREGIDO_SAAVEDRA Y ROJAS

INFORME DE ORIGINALIDAD

15%

INDICE DE SIMILITUD

15%

FUENTES DE INTERNET

4%

PUBLICACIONES

3%

TRABAJOS DEL
ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	repositorio.unprg.edu.pe Fuente de Internet	3%
2	repositorio.lamolina.edu.pe Fuente de Internet	3%
3	repositorio.unsch.edu.pe Fuente de Internet	1%
4	repositorio.ana.gob.pe Fuente de Internet	<1%
5	repositorio.unap.edu.pe Fuente de Internet	<1%
6	purl.org Fuente de Internet	<1%
7	repositorio.udh.edu.pe Fuente de Internet	<1%
8	repositorio.ucv.edu.pe Fuente de Internet	<1%
9	cybertesis.unmsm.edu.pe Fuente de Internet	<1%



10

www.coursehero.com

Fuente de Internet

<1 %

11

pirhua.udep.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

12

bibdigital.epn.edu.ec

Fuente de Internet

<1 %

13

repositorio.unfv.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

14

Submitted to Universidad Nacional Agraria La Molina

Trabajo del estudiante

<1 %

15

repositorio.uss.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

16

cdn.www.gob.pe

Fuente de Internet

<1 %

17

digital.cic.gba.gob.ar

Fuente de Internet

<1 %

18

dspace.unitru.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

19

repositorioacademico.upc.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

20

repositorio.unp.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

www.studylib.es

21	Fuente de Internet	<1 %
22	servicio.bc.uc.edu.ve Fuente de Internet	<1 %
23	1library.co Fuente de Internet	<1 %
24	Submitted to Universidad Cesar Vallejo Trabajo del estudiante	<1 %
25	fdocuments.ec Fuente de Internet	<1 %
26	repositorio.usil.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
27	repositorio.utc.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
28	www.scribd.com Fuente de Internet	<1 %
29	qdoc.tips Fuente de Internet	<1 %
30	www.slideshare.net Fuente de Internet	<1 %
31	alicia.concytec.gob.pe Fuente de Internet	<1 %
32	#N/A. "DIA del Mejoramiento y Ampliación del Servicio de Protección contra Inundaciones"	<1 %



DR. ING. JOSE DEL CARMEN ARBULÚ RAMOS
DNI: 16486578
ASESOR

de los Riachuelos de San Luis José María
Arguedas del Centro Poblado Las Américas-
IGA0020481", R.D.G. N° 139-2019-MINAGRI-
DVDIAR-DGAAA, 2022

Publicación

33 Submitted to Universidad Continental <1 %
Trabajo del estudiante

34 repositorio.unasam.edu.pe <1 %
Fuente de Internet

35 Pinochet Fuenzalida, Tomas Ignacio. "Análisis
de modelos de capacidad y demora en
intersecciones prioritarias", Pontificia
Universidad Católica de Chile (Chile), 2021
Publicación

36 www.repositorio.usac.edu.gt <1 %
Fuente de Internet

37 www.researchgate.net <1 %
Fuente de Internet

38 Submitted to Instituto de Ensino e Pesquisa
em Administracao - INEPAD <1 %
Trabajo del estudiante

39 issuu.com <1 %
Fuente de Internet

40 patents.google.com <1 %
Fuente de Internet





Recibo digital

Este recibo confirma que su trabajo ha sido recibido por **Turnitin**. A continuación podrá ver la información del recibo con respecto a su entrega.

La primera página de tus entregas se muestra abajo.

Autor de la entrega: Christian J. Saavedra Sanchez y Deysi M. Rojas Nuñez
Título del ejercicio: Informe final de tesis
Título de la entrega: TESIS - FINAL CORREGIDO_SAAVEDRA Y ROJAS.docx
Nombre del archivo: TESIS_-_FINAL_CORREGIDO_SAAVEDRA_Y_ROJAS.docx
Tamaño del archivo: 48.36M
Total páginas: 185
Total de palabras: 21,946
Total de caracteres: 125,901
Fecha de entrega: 01-ene-2026 09:58p.m. (UTC-0500)
Identificador de la entrega: 2852217603



**UNIVERSIDAD NACIONAL
PEDRO RUIZ GALLO**

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, DE
SISTEMAS Y DE ARQUITECTURA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

TESIS

Estudio comparativo de los modelos GR4J, HBV, SACRAMENTO, SOCONT
para la evaluación hidrológica de la cuenca Chancay-Lambayeque, utilizando
el software Rs Minerve

Para optar el título profesional de Ingeniero (a) Civil

Autores:

Bach. Rojas Nuñez Deysi Marilyn
Bach. Saavedra Sanchez Christian Jordan

Asesor:

Dr. Ing. Arbulú Ramos José del Carmen

LAMBAYEQUE - PERU
2025

1

DEDICATORIA:

A mis progenitores, Ana y Carlos, por prodigarme su sostén invariable a lo largo de esta travesía, así como por infundirme la tenacidad indispensable para no claudicar frente a los contratiempos.

A mi consanguíneo Jehu, por incitarme sin tregua y rememorarme que es menester aspirar siempre a los anhelos, pues mediante tesón y resolución es factible concretar las metas.

A mi hermano Gian, a quien le auguro ventura en su derrotero profesional

A Liam, cuya presencia me alienta a proseguir con entereza y a persistir en cada propósito que me impongo

Y a Deysi, por transitar conmigo esta empresa académica, por su constancia infatigable y por la sinergia que permitió consumir este cometido.

Christian Saavedra.

A mi padre Jesús Nelson, por ser mi inspiración, y por guiarme desde el cielo

A mi madre Maritza, mi ejemplo a seguir, por darme su amor infinito, su apoyo incondicional y acompañarme durante cada paso de mi vida.

A mi hermano Erik, por su apoyo, sus sabios consejos, y por ser mi imagen paternal

A mis abuelos por la comprensión, y la motivación constante.

A Nelsito y Mateito, mis angelitos, cuyas existencias dejaron una huella eterna en mi corazón.

Y a Christian, por los buenos momentos compartidos en la vida universitaria y por su valioso esfuerzo que contribuyó a alcanzar esta meta.

Marilyn.

AGRADECIMIENTO:

A la UNPRG, por albergarme en sus aulas logrando concluir mis estudios universitarios.

Al Dr. Ing. Arbulú Ramos José del Carmen, expreso mi profundo agradecimiento por el acompañamiento, la asesoría y el respaldo permanente, los cuales resultaron clave para la realización de esta tesis.

Christian Saavedra

A mi alma mater, por acogerme y permitirme disfrutar de esta maravillosa carrera

A los docentes por brindarme los conocimientos y experiencias compartidas

Al Dr. Ing. Arbulú Ramos José del Carmen, por sus enseñanzas impartidas en la carrera, por el apoyo y acompañamiento en el avance de la tesis.

Marilyn.

RESUMEN

En la presente indagación se analizó la dinámica hidrológica del sector medio-superior de la cuenca Chancay–Lambayeque, tomando como punto de referencia hidrométrica la estación Racarrumi. Se implementó el programa RS Minerve para derivar los caudales mediante los esquemas GR4J, HBV, SACRAMENTO y SOCONT, con el propósito de contrastar los flujos simulados respecto a los empíricos y discernir el modelo que mejor representa la realidad hidrográfica de la cuenca. La simulación contempló dos contextos: (1) ausencia de influencia del Túnel Chotano (sin trasvase) y (2) con trasvase, figurando el régimen genuino. Se recurrió a registros diarios de precipitación, temperatura y evapotranspiración, esta última estimada mediante el algoritmo ODIN incorporado en el RS Minerve. Los datos geomorfológicos (superficie, recorrido del cauce y gradiente) se extrajeron mediante análisis geoespacial en ArcGIS. La etapa de calibración comprendió el intervalo 1993–2007, y la validación abarcó de 2008 a 2022, valiéndose de ajustes tanto heurísticos como automatizados (SCE-UA). Los parámetros estadísticos (NSE, KGE, Pearson, RRMSE, RVB y BS) evidenciaron que el modelo HBV ostentó la mayor fidelidad (NSE = 0.75; KGE = 0.81), replicando de manera satisfactoria los picos de caudal. El GR4J exhibió una correspondencia admisible (NSE = 0.60; KGE = 0.76), mientras que SOCONT y SACRAMENTO manifestaron un grado inferior de exactitud. En síntesis, el modelo HBV se erige como el más fidedigno para reproducir la simulación hidrológica de la cuenca, evidenciando la ductilidad del RS Minerve para engendrar caudales diarios por subcuenca, modelar contextos de trasvase y respaldar la planificación de eventuales infraestructuras hidráulicas.

Palabras claves: Modelo hidrológico, precipitación, GR4J, HBV, SACRAMENTO, SOCONT, calibración, validación, evapotranspiración, temperatura.

ABSTRACT

This inquiry appraised the fluvial comportment of the superior segment of the Chancay–Lambayeque watershed, designating the Racarrumi hydrometric node as the referential locus. The RS Minerve apparatus was deployed to emulate fluvials via the GR4J, HBV, SACRAMENTO, and SOCONT paradigms, juxtaposing synthesized and empirical effluents to ascertain the most emblematic schema for the hydrological demarcation.

The simulation encompassed bifurcated eventualities: (1) devoid of hydraulic conveyance from the Chotano Tunnel (absent interbasin diversion), and (2) inclusive of such conveyance, epitomizing the pristine flow regimen. Daily records of precipitation, temperature, and evapotranspiration were used, the latter estimated using the ODIN algorithm incorporated in RS Minerve. Geomorphometric attributes (areal extent, thalweg elongation, and declivity) were extracted through ArcGIS geoprocessing.

This calibration phase spanned the period from 1993 to 2007, and the validation period covered 2008 to 2022, employing both heuristic and automated adjustments (SCE-UA). Stochastic fidelity indices (NSE, KGE, Pearson, RRMSE, RVB, and BS) unveiled HBV as the most veracious model (NSE = 0.75; KGE = 0.81), adeptly mirroring observed discharge apices. GR4J exhibited tolerable congruence (NSE = 0.60; KGE = 0.76), whereas SOCONT and SACRAMENTO manifested diminished prognostic coherence.

In denouement, the HBV schema emerged as the most apposite for encapsulating the basin's hydrodynamic essence, underscoring the polymorphic utility of RS Minerve in engendering sub-basin diurnal flows, extrapolating diversionary hypotheticals, and underpinning the conception of fluvial engineering edifices.

Keywords: Hydrological Model, Precipitation, GR4J, HBV, SACRAMENTO, SOCONT, Calibration, Validation, Evapotranspiration, Temperature.

INDICE

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO	15
1.1. Situación problemática:	15
1.2. Formulación del problema:	15
1.3. Hipótesis:	16
1.4. Objetivo general:	16
1.5. Objetivos específicos:.....	16
1.6. Justificación de la Investigación:	17
1.7. Antecedentes de la investigación:	17
1.7.1. Internacionales:	17
1.7.2. Nacional:	19
1.7.3. Local:	21
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	23
2.1. Ciclo hidrológico o ciclo del agua	23
2.1.1. Evapotranspiración	24
2.1.2. Precipitación	24
2.1.3. Infiltración.....	24
2.1.4. Escurrimiento.....	25
2.1.5. Temperatura	25
2.2. Cuenca Hidrográfica	25
2.3. Geomorfología de la Cuenca.....	26
2.3.1. Parámetros de Forma.....	26
2.3.2. Parámetros de Relieve	26
2.3.3. Parámetros de Drenaje	27
2.4. Tratamiento de datos hidrometeorológicos:	28
2.4.1. Análisis de consistencia de datos:.....	28
2.4.2. Completación de datos:	34
2.5. Periodos de Retorno	34
2.6. Métodos Probabilísticos –Estadísticos.....	35
2.6.1. Método Gumbel:.....	36
2.6.2. Método Nash:	37
2.6.3. Método Levediev:	39
2.7. Modelos hidrológicos	41
2.8. Calibración de Modelos hidrológicos.....	42
2.9. Validación de Modelos hidrológicos.....	47
2.10. Software Rs-Minerve	48

2.10.1.	Modelo GR4J	53
2.10.2.	Modelo HBV	55
2.10.3.	Modelo Sacramento (SAC-SMA)	57
2.10.4.	Modelo Socont.....	60
CAPITULO III: MARCO METODOLÓGICO		63
3.1. Estudio general de la zona:		63
3.1.1	Ubicación de la Cuenca.....	63
3.1.2.	Clima:	65
3.1.3	Temperatura:	65
3.2. Recolección y compilación de datos:		66
3.2.1	Información Cartográfica:.....	66
3.2.2	Información pluviométrica	67
3.2.3	Información hidrométrica.....	¡Error! Marcador no definido.
CAPITULO IV: CALCULOS Y PROCESAMIENTOS DE DATOS		69
4.1. Parámetros geomorfológicos:		69
4.1.1.	Delimitación de la cuenca en estudio:	69
4.1.2.	Caracterización Geomorfológica de la cuenca.	70
4.2. Análisis de estaciones Pluviométricas.....		72
4.2.1.	Registro histórico.	72
4.2.2.	Análisis de Consistencia de Datos.	73
4.2.3.	Evaluación y cuantificación	74
4.2.4.	Corrección de datos:.....	75
4.2.5.	Completación de datos.....	75
4.2.6.	Registro completado de la precipitación diaria	76
4.3. Análisis de la temperatura diaria.....		79
4.3.1.	Fuente de la información.....	79
4.3.2.	Procesamiento de datos.	80
4.4. Análisis de estaciones Hidrométricas.		81
4.4.1.	Registro histórico.	81
4.4.2.	Análisis de Consistencia de Datos.	81
4.4.3.	Evaluación y cuantificación	83
4.4.4.	Corrección de datos:.....	85
4.4.5.	Completación de datos.....	85
4.4.6.	Prueba de datos dudosos.	87
4.5. Proyección de caudales.....		89
4.5.1	Proyección de caudales estación Racarrumi	89
4.5.2.	Proyección de caudales estación Túnel Chotano	93
4.7. Construcción del modelo hidrológico en Rs Minerve.....		95
4.7.1.	Construcción de la base de datos	95
4.7.2.	Construcción del modelo hidrológico en el aparatado GIS	95
4.8. Simulación del modelamiento hidrológico en Rs Minerve, Escenario 1.		98
4.8.1.	Modelo GR4J:	99
4.8.2.	Modelo SOCONT	101

4.8.3. Modelo SACRAMENTO	104
4.8.4. Modelo HBV	107
4.8.5. Caudales Máximos obtenidos por los modelos hidrológicos del Rs Minerve, Escenario 1	110
4.9. Simulación del modelamiento hidrológico en Rs Minerve, Escenario 2.	111
<i>CAPITULO V: RESULTADOS</i>	<i>113</i>
5.1. Resultados de caudales máximos generados	113
5.1.1. Resultados de caudales máximos generados para el Escenario 1:	113
5.1.1. Resultados de caudales máximos generados para el Escenario 2:	117
5.1. Discusión de Resultados:	122
5.1.1. Validación de modelos hidrológicos:	122
<i>CAPITULO VI: CONCLUSIONES</i>	<i>124</i>
<i>CAPITULO VIII: RECOMENDACIONES</i>	<i>127</i>
<i>CAPITULO IX: REFERENCIA BIBLIOGRÁFICAS</i>	<i>129</i>
<i>CAPITULO X: ANEXOS</i>	<i>132</i>
ANEXO N° 01: DATOS GEOMORFOLOGICOS DE LA CUENCA EN ESTUDIO	132
ANEXO N° 02: ANALISIS DE CONSISTENCIA DE DATOS	135
ANEXO N° 03: DATOS DIARIOS DE TEMPERATURA.....	150
ANEXO N° 04: TIEMPO DE CONCETRACIÓN POR CADA SUBCUENCA.....	154
ANEXO N° 05: CAUDALES MÁXIMOS SIMULADOS DE LOS MODELOS HIDROLÓGICOS	164
ANEXO N° 06: CAUDAL PERIODO DE RETORNO	165
ANEXO N° 07: PROCESAMIENTO EN EL SOFTWARE RS MINERVE	169
ANEXO N° 08: MAPAS	180

INDICE DE FIGURAS

<i>Figura N° 01: Representación descriptiva del ciclo hidrológico</i>	<i>23</i>
<i>Figura N° 02: Selección de cálculo Evapotranspiración</i>	<i>53</i>
<i>Figura N° 03: Estructura del modelo GR4J</i>	<i>54</i>
<i>Figura N° 04: Estructura del modelo HBV</i>	<i>56</i>
<i>Figura N° 05: Estructura del modelo SACRAMENTO</i>	<i>59</i>
<i>Figura N° 06: Estructura del modelo SOCONT</i>	<i>61</i>
<i>Figura N° 07: Ubicación de los Departamentos de Lambayeque y Cajamarca</i>	<i>64</i>
<i>Figura N° 08: Ubicación de la Cuenca Chancay-Lambayeque</i>	<i>64</i>
<i>Figura N° 09: Delimitación de la Cuenca Chancay-Lambayeque.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura N° 10: Delimitación de la Cuenca Chancay-Lambayeque, parte Alta y Media.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura N° 11: Curva Hipsométrica de la parte alta y media de la Cuenca Chancay-Lambayeque</i>	<i>71</i>
<i>Figura N° 12: Curva Hipsométrica y Frecuencia de altitudes de la parte alta y media de la Cuenca Chancay-Lambayeque.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura N° 13: Análisis de Saltos mediante Histogramas.</i>	<i>73</i>
<i>Figura N° 14: Registro histórico de precipitación diaria.</i>	<i>77</i>
<i>Figura N° 15: Procesamiento de datos de temperatura en Rstudio.</i>	<i>80</i>
<i>Figura N° 16: Análisis de Saltos mediante Histogramas, E. Racarrumi</i>	<i>82</i>
<i>Figura N° 17: Análisis de Saltos mediante Histogramas, E. Túnel Chotano.....</i>	<i>82</i>
<i>Figura N° 18: Registro histórico de caudal diario.</i>	<i>86</i>
<i>Figura N° 19: Proyección de caudales máximos con los métodos estadísticos, Estación Racarrumi.....</i>	<i>90</i>
<i>Figura N° 20: Proyección de caudales máximos con los métodos probabilísticos, E. Racarrumi.....</i>	<i>91</i>
<i>Figura N° 21: Proyección de caudales máximos con los métodos probabilísticos y estadísticos, E. Racarrumi</i>	<i>92</i>
<i>Figura N° 22: Estructura de los datos a utilizar en el programa Rs-Minerve.....</i>	<i>95</i>
<i>Figura N° 23: Componentes necesarios para el modelamiento hidrológico</i>	<i>96</i>
<i>Figura N° 24: Construcción del modelo hidrológico de la cuenca Chancay-Lambayeque, Escenario 1</i>	<i>97</i>

Figura N° 25: Construcción del modelo hidrológico de la cuenca Chancay-Lambayeque, Escenario 2	98
Figura N° 26.a: Caudales observados y simulados de la cuenca con el modelo GR4J, calibrados	100
Figura N° 26.b: Caudales observados y simulados de la cuenca con el modelo GR4J, validados	101
Figura N° 27.a: Caudal observados y simulados de la cuenca con modelo SOCONT, calibrados	102
Figura N° 27.b: Caudal observados y simulados de la cuenca con modelo SOCONT, validados	103
Figura N° 28.a: Caudal observados y simulados de la cuenca con modelo SACRAMENTO, calibrados	105
Figura N° 28.b: Caudal observados y simulados de la cuenca con modelo SACRAMENTO, validados	106
Figura N° 29.a: Caudal observados y simulados de la cuenca con modelo HVB, calibrado	108
Figura N° 29.b: Caudal observados y simulados de la cuenca con modelo HVB, validados	109
Figura N° 30: Comparación gráfica de los caudales máximos por cada periodo de retorno – Escenario 1.....	117
Figura N° 31: Comparación gráfica de los caudales máximos por cada periodo de retorno – Escenario 2.....	121

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Indicadores de calibración	47
Tabla 2: Número de parámetros y condiciones iniciales de los modelos hidrológicos	49
Tabla 3: Variables de entrada para los modelos hidrológicos.	49
Tabla 4: Rangos y parámetros del modelo GR4J	55
Tabla 5: Rangos y parámetros del modelo HBV	57
Tabla 6: Rangos y parámetros del modelo SACRAMENTO	59
Tabla 7: Rangos y parámetros del modelo SOCONT	62
Tabla 8: Estaciones pluviométricas consideradas	67
Tabla 9: Estaciones hidrométricas consideradas.....	68
Tabla 10: Características geomorfológicas de la parte alta y media de la Cuenca Chancay-Lambayeque.....	72
Tabla 11: Registro histórico de precipitaciones	73
Tabla 12: Análisis de consistencia de la Estación Huambos	74
Tabla 13: Corrección de datos no homogéneos	75
Tabla 14: Completación de datos faltantes por método de regresión lineal.....	76
Tabla 15: Registro histórico de las Estaciones Hidrométricas.....	81
Tabla 16: Análisis de consistencia de la Estación Racarrumi	83
Tabla 17: Análisis de consistencia de la Estación Túnel Chotano.....	84
Tabla 18: Corrección de datos diarios de la Estaciones Hidrométricas	85
Tabla 19: Prueba de datos dudosos en las estaciones en estudio.....	87
Tabla 20: Registro de caudales máximos de la Estación Racarrumi y Túnel Chotano.	88
Tabla 21: Proyección de caudales máximos con los métodos Estadísticos, Estación Racarrumi.....	89
Tabla 22: Proyección de caudales máximos con los métodos Probabilísticos, Estación Racarrumi.....	90
Tabla 23: Proyección de caudales máximos mediante el método Log Normal 3 Parámetros, E. Racarrumi.	93
Tabla 24: Proyección de caudales máximos mediante el método Gumbel, E. Túnel Chotano.....	93
Tabla 25: Tiempo de concentración por método Temez	94

Tabla 26: Comparación de los indicadores estadísticos del modelo GR4J.	99
Tabla 27: Parámetros del modelo GR4J, calibrado para la cuenca en estudio	100
Tabla 28: Comparación de los indicadores estadísticos del modelo SOCONT.	102
Tabla 28: Parámetros del modelo SOCONT, calibrado para la cuenca en estudio.....	103
Tabla 30: Comparación de los indicadores estadísticos del modelo SACRAMENTO.	105
Tabla 31: Parámetros del modelo SACRAMENTO, calibrado para la cuenca en estudio.	106
Tabla 32: Comparación de los indicadores estadísticos del modelo HBV.....	108
Tabla 33: Parámetros del modelo HVB, calibrado para la cuenca en estudio	109
Tabla 34: Caudales máximos anuales obtenidos por cada modelo, escenario 1, sin trasvase.....	110
Tabla 35: Caudales máximos anuales obtenidos por cada modelo, escenario 2.	112
Tabla 36: Comparativa de caudales máximos en el escenario 1, sin aporte del túnel chotano, por cada subcuenca.....	114
Tabla 37: Comparativa de caudales máximos en el escenario 1 (Sin aporte del Túnel Chotano).....	116
Tabla 38: Comparativa de caudales máximos en el escenario 2, con aporte del túnel chotano, por cada subcuenca.....	118
Tabla 39: Comparativa de caudales máximos en el escenario 2, con aporte del Túnel Chotano.....	120
Tabla 40: Validación de los modelos	122
Tabla 41: Evaluación de la validación de los modelos.....	123

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

1.1. Situación problemática:

La cuenca Chancay-Lambayeque padece una problemática vinculada a la recurrencia de anegamientos, primordialmente ligados a precipitaciones copiosas y al desbordamiento de flujos fluviales regulares y excepcionales. Dichos episodios se exacerban durante el lapso en que se manifiesta el Fenómeno El Niño, cuando el acrecentamiento del caudal del río Chancay-Lambayeque ocasiona desbordes que impactan de manera crítica al ámbito territorial.

Las secuelas de tales anegamientos se traducen en la devastación de núcleos habitacionales, perjuicios a la infraestructura civil y pérdidas económicas de magnitud considerable. Esta coyuntura pone de relieve la notoria fragilidad de la cuenca ante eventos hidrometeorológicos, lo cual propicia el interés por emprender el modelado hidrológico de la hoya del río Chancay-Lambayeque, con la finalidad de estimar los caudales pico en el enclave de interés (Tineo, 2018).

En el seno de la cuenca del río Chancay-Lambayeque, se llevará a cabo una indagación desde sus sectores alto y medio hasta el sitio de aforo en la Estación Racarrumi, a efectos de efectuar la evaluación hidrológica con miras al aprovechamiento del recurso hídrico.

1.2. Formulación del problema:

¿Cómo podemos determinar cuál de los modelos hidrológicos GR4J, HBV, SACRAMENTO y SOCONT utilizando el software Rs Minerve, ¿es el más recomendado en la obtención de caudales máximos en el punto de aforo de la Estación Racarrumi de la cuenca Chancay- Lambayeque?

1.3. Hipótesis:

Mediante un estudio comparativo de los modelos GR4J, HBV, SACRAMENTO y SOCONT se puede evaluar hidrológicamente la cuenca en estudio, utilizando el Software Rs Minerve, a partir de precipitación y escurrimiento.

1.4. Objetivo general:

Evaluar y comparar la capacidad de respuesta de los modelos de GR4J, HBV, SACRAMENTO y SOCONT, para identificar cuáles son los más adecuados para obtener caudales máximos en la Cuenca Chancay-Lambayeque hasta el punto de interés utilizando el software Rs Minerve.

1.5. Objetivos específicos:

- Determinar las características geomorfológicas en la zona de estudio
- Realizar un análisis comparativo de los caudales con los diferentes modelos a usar.
- Realizar los modelos hidrológicos en el programa Rs Minerve.
- Hacer una correcta calibración de los modelos hidrológicos para obtener resultados aceptables.
- Verificar la viabilidad a largo plazo de los modelos hidrológicos aplicados.
- Realizar un análisis de los caudales obtenidos con los registros hidrométricos de la estación Racarrumi con los métodos probabilísticos-estadísticos.
- Realizar un análisis comparativo de los resultados obtenidos con los modelos planteados y el obtenido con métodos probabilísticos-estadísticos en la estación Racarrumi, considerando dos escenarios, con y sin trasvase del río Chotano.
- Determinar la disponibilidad hídrica actual de la cuenca en estudio.

1.6. Justificación de la Investigación:

En el ámbito de la cuenca Chancay–Lambayeque no se han registrado indagaciones que contrasten de manera sistemática el rendimiento de diversos esquemas hidrológicos (GR4J, SOCONT, SACRAMENTO, HBV.) en la simulación de caudales extremos, fundamentales para la anticipación de episodios hidrometeorológicos severos. La presente pesquisa brindará sustento empírico respecto a qué modelos presentan mayor fidelidad bajo las condiciones geomorfológicas y climáticas idiosincráticas de la cuenca, lo cual facilitará una visión más holística sobre cuál enfoque resulta más idóneo para determinar los caudales correspondientes a crecidas extraordinarias.

La aplicación informática Rs Minerve posibilita la implementación y ajuste de múltiples esquemas en una plataforma unificada, optimizando el cotejo analítico y permitiendo valorar su rendimiento computacional y su grado de adecuación a sistemas hidrográficos de índole andina.

1.7. Antecedentes de la investigación:

1.7.1. Internacionales:

López (2020), en su disertación denominada "Modelación hidrológica utilizando el software RS Minerve en la subcuenca del río Villalobos, orientada a la gestión del riesgo" y elaborada en la Universidad de San Carlos de Guatemala, edificó un arquetipo hidrológico con el propósito de representar la dinámica de dicha subcuenca con fines vinculados a la administración del riesgo. Al replicar el lapso comprendido entre 2003–2019 mediante RS Minerve, constató que los esquemas GR4J y Socont arrojan caudales simulados que superan los valores medios diarios observados. En cambio, los modelos HBV y SAC-SMA manifestaron una afinidad más estrecha con los registros empíricos. En consecuencia, el análisis concluyó que, para fines de planificación, los esquemas HBV y SAC-SMA resultan

ser los más pertinentes, mientras que para propósitos orientados a la gestión del riesgo, los modelos GR4J y Socont se muestran como los más idóneos.

Muñoz (2017), en su tesina magistral intitulada *"Impacto del cambio climático en los recursos hídricos de la subcuenca Quillcayhuanca, Perú"*, gestada en la Universidad Politécnica de Valencia, auscultó las incidencias del trastorno climático sobre la accesibilidad hídrica del sistema fluvial Quillcayhuanca. Para tal cometido, se recurrió a una arquitectura hidrológica semidistribuida con cadencia temporal mensual, valiéndose del entorno computacional RS Minerve. Derivado de los indicios recabados, se concluyó que la estructura GSM+HBV manifestó un comportamiento preeminente durante los procedimientos de calibrado y validación, en tanto que la sinergia GSM+SOCONT se mostró apta para estimaciones celeradas. En antítesis, la configuración GSM+GR4J fue descartada como propicia para cuencas caracterizadas por una notoria oscilación hidrológica.

Estrada y López (2015), en su disertación titulada *"Modelación hidrológica del río Palo utilizando el modelo hidrológico HBV para simular escenarios de variabilidad climática asociados al fenómeno ENOS en su fase fría La Niña"*, elaborada en la Universidad del Valle (Santiago de Cali), llevaron a cabo la modelación del sistema fluvial del río Palo mediante la implementación del modelo HBV, con la finalidad de correlacionar los outputs simulados con la fase boreal del fenómeno ENOS. El análisis estableció que el procedimiento de ajuste paramétrico alcanzó una eficacia tolerable para dicha demarcación hidrográfica, evidenciada en la consonancia entre las curvas hidrométricas empíricas y las generadas. De igual forma, la etapa de validación reveló que una contracción en el horizonte temporal simulado repercute negativamente en la exactitud y la robustez de los resultados arrojados.

Oseguera (2018), en su tesina titulada *"Análisis comparativo de modelos hidrológicos para la evaluación de los recursos hídricos en la cuenca del lago de Cuitzeo"*, presentada como requisito para la obtención del grado de magíster en la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, efectuó una contrastación entre diversos esquemas hidrológicos con el objetivo de discernir cuál de ellos permite una valoración más idónea de los recursos hídricos superficiales. Entre los hallazgos más relevantes, se evidenció que los modelos HBV y SAC alcanzaron un rendimiento superior, particularmente en la emulación de crecidas, al registrar los márgenes de error más exigüos; en tanto que los esquemas GR4J y SOCONT exhibieron fluctuaciones contenidas en sus métricas estadísticas de eficacia.

1.7.2. Nacional:

Coras (2019), en su tesina intitulada *"Modelación hidrológica para la generación de caudales diarios en la subcuenca Shullcas"*, desarrollada en la Universidad Nacional Agraria La Molina, tuvo como finalidad engendrar caudales cotidianos mediante la instauración del artefacto informático RS Minerve, con el propósito de discernir el arquetipo hidrológico más fidedigno para dicha subunidad hidrográfica. La pesquisa constató que, durante el intervalo comprendido entre enero de 2005 y abril de 2012, se obtuvo un desempeño calificado como "excelso". Empero, el esquema SACRAMENTO, pese a las 1299 reiteraciones automáticas ejecutadas, no alcanzó métricas de eficacia satisfactorias, siendo por ello catalogado como escasamente representativo para la demarcación analizada. Por contraste, el paradigma HBV exhibió una eficiencia superior, en tanto que el modelo GR4J arrojó valores análogos a la serie empírica, figurando con mayor exactitud los caudales observados respecto a los datos de referencia.

Vergaray (2018), en su monografía de titulación denominada *"Simulación de los caudales de ingreso al embalse Torata – Moquegua mediante la aplicación de modelos*

precipitación–escorrentía", formulada en la Universidad Nacional Agraria La Molina, diseñó un constructo hidrológico orientado a representar los flujos hídricos cotidianos que penetran en el embalse Torata. Con tal cometido, implementó y cotejó los esquemas GR4J, HBV y SAC-SMA. En los dictámenes se evidenció que el modelo SAC-SMA alcanzó coeficientes de Nash–Sutcliffe de 0.854 en la fase de ajuste y 0.707 en la etapa de contrastación, siendo calificado como "excelente". El esquema HBV arrojó valores de 0.698 y 0.558, siendo reputado como de ejecución "satisfactoria". Finalmente, el modelo GR4J obtuvo 0.579 en la etapa de calibrado y 0.160 en la de validación, considerándose de comportamiento "modesto". Por ende, la indagación resolvió que el modelo SAC-SMA exhibió la performance más elevada conforme a los cuatro parámetros de eficiencia considerados.

Alvarado (2021), en su tesina titulada *"Modelación de máximas avenidas a paso diario (1964–2014), con un enfoque semidistribuido mediante el uso del modelo GR4J, en la cuenca del río Camaná, Arequipa–Perú"*, sustentada para obtener el grado de magíster en Ingeniería Hidráulica en la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, erigió un arquetipo hidrológico semidistribuido a través del modelo GR4J con el cometido de emitir pronósticos de crecidas a cadencia diaria en dicha hoya fluvial. La modelación fue instrumentada valiéndose de la interfaz RS Minerve. El autor determinó que la configuración del GR4J calibrada por subcuencas permitió segmentar el ámbito de análisis en las demarcaciones A, B, C, D, E, F, H e I. En la etapa de validación se alcanzó un acoplamiento calificado como "muy bueno" para las zonas A y B, y "excelso" para las zonas E, F, G, H e I.

García (2022), en su disertación titulada *"Simulación de máximas avenidas de la quebrada del Diablo, con fines de protección de la ciudad de Tacna, Perú"*, llevada a cabo en la Universidad Nacional Agraria La Molina, persiguió como objetivo indagar las causales que originaron la activación de la quebrada del Diablo y replicar el episodio

hidrometeorológico acaecido el 21 de febrero de 2020 mediante la utilización del esquema SOCONT, integrado en la plataforma RS Minerve. Las inferencias revelaron que dicho fenómeno pluviométrico extremo se correlacionó con una anomalía térmica positiva en la superficie marina de entre $+1\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$ registrada frente al litoral tacneño durante los meses de enero y febrero de 2020. Igualmente, se puntualizó que el aluvión subsiguiente fue provocado por el colapso de un dique empírico que funcionaba como pasarela entre ambas riberas de la quebrada, localizado a aproximadamente 2 km aguas arriba del enclave poblacional La Florida.

1.7.3. Local:

Tineo (2018), en su disertación intitulada “Aplicación del modelo hidrológico distribuido Tetis para estimar la variabilidad hidrológica en la cuenca del río Chancay Lambayeque”, llevada a cabo en la Universidad César Vallejo, se propuso como finalidad cardinal evidenciar la aptitud del esquema distribuido Tetis para auscultar la oscilación hidrológica en dicha hoya hidrográfica. Para tal propósito, el autor acopió registros cotidianos de pluviosidad acumulada, los cuales fueron tratados mediante un escrutinio gráfico de doble masa y posteriormente empleados en la generación y emulación de caudales. Los rendimientos obtenidos durante las etapas de ajuste y contraste reflejaron una métrica objetivo Nash-Sutcliffe (NSE) de 0.6582, valor que, según la taxonomía del rendimiento hidrológico, representa una eficacia “notoria”. En consecuencia, el estudio postula que el modelo Tetis ostenta un comportamiento idóneo para reproducir los procesos hidrológicos de la cuenca del río Chancay, Lambayeque, logrando una tenue disparidad entre los caudales empíricos y los simulados.

Anavella y Esquivas (2019), llevaron a cabo un análisis denominado “Análisis comparativo de los métodos Racional modificado Témez, Hidrogramas Unitarios SCS, Clark y Snyder en la obtención de caudales máximos para las subcuencas Cañad y Alto Chancay

Lambayeque – Cuenca Chancay Lambayeque”, en la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, donde se examinó un repertorio de métodos empíricos destinados a la estimación de caudales extremos ante la ausencia de series hidrométricas. El trabajo tuvo por cometido discernir el procedimiento que arroja resultados más pertinentes para la cuantificación de crecidas en dichas subunidades hidrográficas. Los autores resolvieron que el método de Snyder reporta valores más afines en comparación con las restantes metodologías contrastadas.

Gonzales (2023), en su tesis intitulada “Aplicación del modelo Sacramento para la evaluación hidrológica en la cabecera de la cuenca Chancay–Lambayeque”, se orientó a aplicar el arquetipo Sacramento con el objeto de engendrar caudales medios diarios mediante procesos de ajuste y verificación. El autor señala que los parámetros de mayor sensibilidad fueron P_{free} , $Adimp$ y Uzk . Igualmente, reporta que se alcanzó un rendimiento catalogado como aceptable conforme al coeficiente de Nash, con puntuaciones de 0.60 en la etapa de calibrado y 0.45 en la de validación. Finalmente, refiere que la fase de ajuste requirió una inversión temporal más prolongada debido a las múltiples iteraciones necesarias para arribar a resultados satisfactorios.

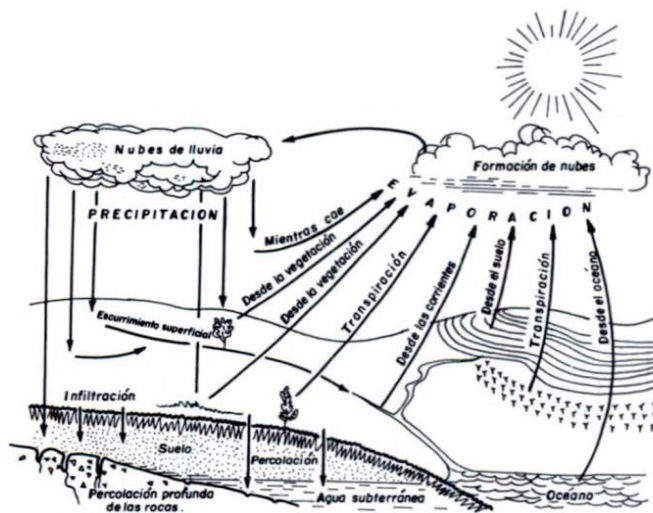
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Ciclo hidrológico o ciclo del agua

Villón (2002) define que “se denomina ciclo hidrológico, al conjunto de cambios que experimenta el agua en la naturaleza, tanto en estado (sólido, líquido, gaseoso) como en su forma (agua superficial, agua subterránea, etc.)” (p. 16).

Dicho fenómeno se inicia con la volatilización del agua acumulada en la corteza terrestre, propiciando la génesis de nubosidades mediante el proceso de condensación. Subseguidamente, por acción de la fuerza gravitatoria, el líquido precipita sobre la superficie edáfica. Una porción de esta precipitación se insinúa a través de los intersticios del substrato pedológico, en tanto que el remanente discurre superficialmente generando escorrentía. (Coras, 2019).

Figura N° 01: Representación descriptiva del ciclo hidrológico



Fuente: Procesos del Ciclo Hidrológico. Adaptado por Campos (1998)

2.1.1. Evapotranspiración

La evapotranspiración constituye el proceso mediante el cual el agua es trasladada desde la geosuperficie hacia la atmósfera, articulando dos mecanismos primordiales: la volatilización hídrica y la transpiración vegetal. La evaporación alude a la transición de fase del agua desde sustratos como suelos, lagunas o corrientes fluviales hacia su forma vaporosa, mientras que la transpiración se refiere a la exudación hídrica efectuada por las especies vegetales a través de los estomas dispuestos en sus órganos foliares. En sinergia, ambas dinámicas configuran un flujo persistente de transferencia de humedad en el seno del ciclo hidrológico, condicionando la disponibilidad hídrica en las hoya hidrográficas y afectando los equilibrios hidrológicos zonales (Villón, 2002). Se reconoce, asimismo, la noción de evapotranspiración efectiva, cuyo valor es inferior al de la evapotranspiración potencial; para su estimación se disponen de diversas metodologías como Thornthwaite, Turc, Blaney-Criddle, Hargreaves, Jensen-Heise, entre otras.

2.1.2. Precipitación

La precipitación designa las múltiples modalidades mediante las cuales el agua de procedencia atmosférica retorna al estrato terrestre, manifestándose primordialmente en forma de lluvia, nevisca o granizo. Este suceso se desencadena cuando el vapor acuoso presente en la atmósfera alcanza un grado de condensación superior a la temperatura ambiental, propiciando la génesis y subsecuente descenso de gotas líquidas o cristales hibernales. Para su cuantificación se emplean dispositivos como los pluviómetros, que consignan la pluviometría acumulada en milímetros; no obstante, con el objeto de capturar su comportamiento en función del tiempo, se recurre a los pluviógrafos, los cuales permiten obtener un registro continuo y detallado del episodio pluviométrico. (Vélez, 2000).

2.1.3. Infiltración

La infiltración alude al fenómeno mediante el cual el líquido pluvial se introduce en el sustrato edáfico por acción gravitacional, condicionándose primordialmente por la tipología del

suelo y su grado de porosidad. Se denomina infiltración al ingreso hídrico a través de la interfase superficial, en tanto que el tránsito subsiguiente por estratos interiores recibe el nombre de percolación. Tal dinámica está sujeta a variables como la cobertura fitológica, la pluviosidad, la humedad antecedente del suelo, la granulometría del terreno y la inclinación orográfica de la cuenca (Araque et al., 2019).

2.1.4. Escurrimiento

El escurrimiento designa el caudal hídrico derivado de la precipitación que discurre por la superficie o se filtra subterráneamente hasta confluir en los cauces y evacuar la cuenca (Domínguez, 2017). Dicha dinámica depende de parámetros vinculados a la pluviosidad, las propiedades edáficas, las condiciones atmosféricas y la morfología de la cuenca (Llamas, 1993). El volumen escurrido transita desde las altitudes superiores hacia los colectores principales, abarcando tanto el flujo exógeno como el endógeno al curso fluvial.

2.1.5. Temperatura

La temperatura refiere al grado térmico ya sea cálido o gélido presente en una masa hídrica, superficial o freática, siendo modulada por la altitud y las oscilaciones estacionales. A su vez, constituye un vector determinante en las dinámicas evaporativas.

2.2. Cuenca Hidrográfica

La cuenca hidrográfica se concibe como una unidad territorial delimitada por líneas divisorias de aguas también denominadas parteaguas que determinan la dirección de los escurrimientos superficiales (Gámez, 2009). Igualmente, puede interpretarse como el ámbito espacial donde las aguas meteóricas convergen hacia un cauce axial hasta desembocar en un único exutorio (Villón, 2002).

2.3. Geomorfología de la Cuenca

La cuenca se caracteriza mediante un conjunto de parámetros vinculados a su morfometría, configuración orográfica y sistema de drenaje, los cuales se detallan seguidamente:

2.3.1. Parámetros de Forma

Según Bateman (2007), los atributos morfológicos comprenden:

- **Área de drenaje:** Denota la extensión superficial que tributa escorrentía hacia el entramado hidrográfico principal, y se define como el ámbito contenido dentro del parteaguas, proyectado ortogonalmente sobre el relieve.
- **Forma de la cuenca:** La configuración morfotectónica de la cuenca incide de manera directa en el lapso de concentración, en tanto condiciona la trayectoria y temporalidad con que el líquido pluvial alcanza el exutorio del sistema. Para su evaluación se emplean diversos coeficientes geométricos.
- **Índice de Gravelius:** Este coeficiente establece una relación entre el perímetro de la cuenca y el de una circunferencia de área equivalente. Su formulación matemática se expresa como:

$$A = \pi r^2$$
$$K_c = \frac{P}{2\pi r} = 0.28 \frac{P}{A^{1/2}} \quad (3)$$

donde A representa la superficie de la cuenca, P su perímetro y r el radio de la circunferencia de área equivalente.

- **Factor de forma:** Constituye un parámetro geométrico que determina la proporción entre la anchura media de la cuenca y su eje longitudinal principal.

2.3.2. Parámetros de Relieve

Conforme señalan Avellaneda y Montalvo (2019), los principales parámetros de relieve son los siguientes:

- Curva Hipsométrica: consiste en una representación gráfica que ilustra cómo se distribuyen las superficies de la cuenca según diferentes rangos de elevación definidos, donde la altitud se coloca en el eje vertical, mientras que el área acumulada se representa en el eje horizontal.

Inclinación Media de la Cuenca: Este indicador reviste relevancia esencial, dado que modula la celeridad del escurrimiento superficial, incidiendo de forma directa en el lapso requerido para que el agua se acumule y se desplace hacia el cauce axial.

Cota Media de la Cuenca: Se entiende como el valor altimétrico promedio, derivado de la curva hipsométrica, calculado mediante un promedio ponderado que incorpora la proporción de superficie cuencal correspondiente a cada intervalo altitudinal.

2.3.3. Parámetros de Drenaje

De acuerdo con Saravia y Vilchez (2021), los parámetros de drenaje pueden describirse de la siguiente manera:

- Orden de los cauces: Alude a un sistema clasificatorio de índole jerárquica que permite discernir la estructuración ramificada del entramado de drenaje en el interior de la cuenca. Los cursos de primer orden son aquellos que no reciben tributarios; la confluencia de dos de estos origina un cauce de segundo orden, y así sucesivamente en progresión.
- Densidad de Drenaje (Dd): Se conceptualiza como el cociente entre la longitud acumulada de los cauces que conforman la red hidrográfica y la superficie total de la cuenca. La expresión matemática se puede representar como:

$$D_d = \frac{L}{A}$$

donde L representa la extensión drenaje y A el área de la cuenca

2.4. Tratamiento de datos hidrometeorológicos:

2.4.1. Análisis de consistencia de datos:

Una vez acopiados los datos pluviométricos junto con los registros hidrométricos, se impone la ejecución de un análisis de consistencia que viabilice la obtención de información fidedigna y pertinente para el ulterior diseño. Tal evaluación se orienta a constatar la continuidad y veracidad de las series temporales. La falta de homogeneidad y las disonancias dentro de los registros hidrológicos constituyen elementos críticos, puesto que yerros significativos durante este procedimiento podrían distorsionar o alterar los resultados definitivos.

Del mismo modo, el escrutinio de series cronológicas provenientes de estaciones emplazadas estratégicamente en el interior de la cuenca o incluso en cuencas adyacentes reviste importancia cardinal, ya que permite una extrapolación más rigurosa entre puntos con vinculación hidrológica (Vera, 1994).

2.4.1.1. Análisis de Salto:

Un salto dentro de una serie hidrológica se entiende como una modificación determinista que provoca un cambio brusco entre dos condiciones del sistema, la cual puede estar vinculada a actividades humanas, como el uso y manejo del recurso hídrico, o a la ocurrencia de eventos naturales repentinos.

a. Identificación de Salto

La detección y evaluación de saltos en una serie hidrológica requiere examinar las causas que los originan, ya sea debido a acciones antrópicas o a eventos naturales. Para ello, se plantea un procedimiento metodológico que permite identificar la presencia de estos cambios dentro del registro analizado.

- **Análisis de hidrogramas**

El análisis comienza con la revisión visual de la distribución temporal de los registros meteorológicos mediante la representación gráfica del hidrograma, con el propósito de identificar posibles valores atípicos, tanto máximos como mínimos. Posteriormente, estos resultados preliminares deben ser evaluados con mayor detalle para confirmar su comportamiento dentro de la serie analizada.

b. Consistencia en la media

La corroboración de la congruencia en el valor medio se aprecia mediante el test estadístico t de Student, recurso que faculta discernir si las discrepancias entre los promedios de dos fragmentos dentro de una cronología pluviométrica revisten significancia estadística. Para tal fin, se estipula de antemano un umbral de significancia (α), el cual denota la tolerancia al yerro asumida; comúnmente se adopta un $\alpha = 0.05$.

El protocolo inicia con el cómputo del promedio y la dispersión típica asignados a cada una de las submuestras que integran la secuencia examinada.

$$\bar{x}_1 = \frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} (x_i)$$

$$S_1 = \left[\frac{1}{n_1 - 1} \sum_{i=1}^{n_1} (x_i - \bar{x}_1)^2 \right]^{1/2}$$

$$\bar{x}_2 = \frac{1}{n_2} \sum_{i=1}^{n_2} (x_i)$$

$$S_2 = \left[\frac{1}{n_2 - 1} \sum_{i=1}^{n_2} (x_i - \bar{x}_2)^2 \right]^{1/2}$$

Donde:

$X_1; X_2$: Media de los periodos 1 y 2 respectivamente.

$X_i; X_j$: Valores de la serie del periodo 1 y 2 respectivamente.

$S_1; S_2$: Desviación estándar de los periodos 1 y 2 respectivamente.

$n_1; n_2$: Tamaño de muestra.

- **Prueba media**

Establecer la hipótesis planteada y la hipótesis alternativa

$H_p = \mu_1 = \mu_2$; (media poblacional)

$H_a = \mu_1 \neq \mu_2$; $\alpha/2 = 0.025$.

- **Cálculo de la desviación estándar de la diferencia de los promedios**

$$s_d = s_p \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)^{1/2}$$

$$s_p = \left[\frac{(n_1 - 1) \cdot S_1^2 + (n_2 - 1) \cdot S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \right]^{1/2}$$

Donde:

S_d : Desviación estándar de los promedios.

S_p : Desviación estándar ponderada.

c. Realización de la prueba T- Student

$$T_c = \frac{(x_1 - x_2) - (U_1 - U_2)}{\vec{S}_d}$$

La cuantía absoluta de T_c (derivado) se coteja con el valor correspondiente de la distribución T de Student (t tabulado), bajo el supuesto de bilateralidad, considerando G. L = $n_1 + n_2 - 2$ (grados de franquía) y un nivel crítico de significancia del 5%.

Los dictámenes decisorios se establecerán conforme a los siguientes supuestos si:

$|T_c| \leq T_t \rightarrow X_1 = X_2$, (Salto no significativo)

$|T_c| > T_t \rightarrow X_1 \neq X_2$, (Salto es significativo, es necesarios su corrección)

$|T_c| > T_t \rightarrow X_1 \neq X_2$, (Salto es significativo, es necesarios su corrección)

d. Consistencia en la desviación estándar

Se lleva a cabo mediante la prueba estadística F de Fisher; a continuación, se describe:

$$s_1^2(x) = \left[\frac{1}{n_1 - 1} \right] \sum_{i=1}^{n_1} (x_i - \bar{x}_1)^2$$

$$s_2^2(x) = \left[\frac{1}{n_2 - 1} \right] \sum_{i=1}^{n_2} (x_i - \bar{x}_2)^2$$

Se establece la hipótesis planteada y alternativa

Hp: $\delta_1^2 = -\delta_2^2$; (Variancias poblacionales).

Hp: $\delta_1^2 \neq -\delta_2^2$; $\alpha = 0.05$.

e. Realización de la prueba de F:

$$F_c = \frac{S_1^2(x)}{S_2^2(x)}; s_1^2(x) > s_2^2(x)$$

$$F_c = \frac{S_2^2(x)}{S_1^2(x)}; s_2^2(x) > s_1^2(x)$$

La cifra de F_c (estimada) se contrapone con el umbral crítico de la distribución F de Fisher (extraído de la tabla), empleando los grados de soltura pertinentes: G.L.N = $n_1 - 1$, para el numerador, y G.L.D = $n_2 - 1$, para el denominador, bajo un parámetro de significancia del 5%.

Las pautas resolutivas se formularán conforme a los siguientes escenarios si::

$$F_c \leq F_t \rightarrow S_1 = S_2 \text{ (Salto no es significativo)}$$

$$F_c > F_t \rightarrow S_1 \neq S_2 \text{ (Salto es significativo, necesario su corrección)}$$

Tras la ejecución de los escrutinios de ruptura mediante la confrontación de promedios vía la prueba t de Student, así como la indagación sobre la homogeneidad de la varianza, y una vez corroboradas ambas metodologías en cada punto de observación analizado, se infiere que las secuencias de datos exhiben solidez estadística.

f. Corrección de datos

En caso de detectarse inconsistencias en la información, originadas por la falta de homogeneidad en los registros diarios, se realizará la corrección de los datos mediante la aplicación de las fórmulas correspondientes

$$X'_{(t)} = \frac{x_i - \bar{x}_1}{S_1(x)} * S_2(x) + \bar{x}_2 ; \text{ usar si se corregirá muestra n1}$$

$$X'_{(t)} = \frac{x_i - \bar{x}_2}{S_2(x)} * S_1(x) + \bar{x}_1 ; \text{ usar si se corregirá muestra n2}$$

Donde:

$X'_{(t)}$: Valor corregido de saltos.

X_i : Valor a ser corregido.

2.4.1.2. Análisis de Datos y Recursos Estadísticos para el Agua (ANDREA)

Para la elaboración del presente estudio, se adoptaron como fundamento los protocolos inferenciales estipulados por la Autoridad Nacional del Agua (ANA) a través de la interfaz ANDREA (Análisis de Datos y Recursos Estadísticos para el Agua), la cual se erige como instrumento oficial para el tratamiento y verificación cualitativa de secuencias hidrometeorológicas. Sin embargo, dado que ANDREA opera con información de cadencia mensual y que la presente indagación demanda datos cotidianos para la implementación del modelado hidrológico ininterrumpido en RS Minerve, se ejecutó una reconfiguración metodológica orientada a trasponer tales criterios inferenciales directamente sobre series de periodicidad diaria.

Dicha reformulación metodológica abarca los siguientes procesos:

- Examen de la coherencia de los registros mediante inspección gráfica y contrastes de homogeneidad, tales como la prueba t de Student y la prueba de Fisher, aplicadas a secuencias diarias.
- Identificación de observaciones anómalas mediante el análisis de umbrales físicos y la congruencia cronológica de los datos.
- Imputación de vacíos de información por medio de métodos regresivos con estaciones hidrometeorológicas adyacentes, emulando los algoritmos de interpolación empleados por la interfaz ANDREA.

La aplicación de esta metodología adaptada permite superar las limitaciones asociadas a la resolución temporal mensual, manteniendo el rigor estadístico de los protocolos oficiales y garantizando la confiabilidad y calidad de los datos en la escala requerida para el modelamiento hidrológico de alta resolución.

2.4.2. Completación de datos:

Los procedimientos empleados para la restitución de datos hidrometeorológicos se cimentan en la implementación de esquemas inferenciales y formulaciones matemáticas dirigidas a reconstituir la información ausente. La valoración de la fiabilidad de cada método aplicado representa un componente esencial, en tanto que permite salvaguardar la exactitud, congruencia y estabilidad de los resultados obtenidos.

Entre las metodologías más recurrentes para la completación de secuencias hidrometeorológicas sobresale el esquema de regresión lineal simple, susceptible de ser implementado mediante un cotejo de correlación cruzada entre estaciones próximas o a través de la autocorrelación temporal inherente a la propia serie de registros.

2.5. *Periodos de Retorno*

Se entiende que tiene lugar un episodio extremo cuando una variable aleatoria X alcanza o supera un determinado umbral x_T . El lapso de manifestación T se delimita como el tiempo transcurrido entre dos incidencias sucesivas que satisfacen la condición $X \geq x_T$. En este marco, el período de recurrencia se asocia al valor medio esperado de dicho intervalo. Del mismo modo, la probabilidad de que un fenómeno de tal envergadura se presente en una observación cualquiera equivale al recíproco de su período de retorno. (Fuentes, 2016).

$$P(X \geq x_T) = \frac{1}{T}$$

Para la gestación de la presente indagación se contemplaron lapsos de recurrencia de 2, 5, 10, 20, 25, 50 y 100 anualidades, los cuales facultan el escrutinio de fenómenos hidrológicos con disímiles grados de reiteración y envergadura.

2.6. *Métodos Probabilísticos –Estadísticos*

Con sustento en los registros hidrometeorológicos disponibles en las estaciones emplazadas en la hoya hidrográfica, correspondientes a precipitaciones y escurrimientos, se procede a la elección del arquetipo estocástico que represente con propiedad el comportamiento inferencial de la variable examinada. Una vez constatado que la adecuación estadística resulta propicia, la distribución escogida puede ser utilizada en el examen hidrológico, presuponiendo que las variables obedecen a una ley probabilística delimitada (Avellaneda & Montalvo, 2019).

Entre las funciones de distribución teóricas frecuentemente empleadas en el ámbito hidrológico figuran la normal, lognormal, gamma, Pearson tipo III y Gumbel.

De igual modo, los métodos inferenciales presuponen que la caudal cúspide constituye una variable aleatoria que se rige por una distribución probabilística determinada, cuya estimación demanda el uso de series anuales de caudales máximos. Para alcanzar resultados de mayor veracidad, es aconsejable disponer de registros prolongados, dado que la extensión muestral incide de forma directa en la fineza del análisis. Entre los procedimientos más recurrentes destacan las distribuciones de Gumbel, Nash y Levediev (Villón, 2002)

2.6.1. Método Gumbel:

Para la conjetura del gasto cúspide vinculado a un cierto lapso de recurrencia, se recurre a una formulación matemática que vincula los atributos inferenciales de la secuencia hidrológica con la verosimilitud de manifestación del suceso extremo.

Dicha ecuación faculta el cómputo del valor esperable del caudal apical correspondiente a un intervalo de retorno determinado, a partir de la distribución estocástica escogida

$$Q_{\max} = Q_m - \frac{\sigma_Q}{\sigma_N} (\bar{y}_N - \ln T)$$

$$\sigma_Q = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N Q_i^2 - N Q_m^2}{N - 1}}$$

Donde:

$Q_{\max}$ = caudal máximo para un período de retorno determinado, en m³/s

N = número de años de registro

Q_i = caudales máximos anuales registrados, en m³/s

$$Q_m = \frac{\sum_{i=1}^N Q_i}{N}$$

= caudal promedio, en m³ /s

T = período de retorno.

σ_N y $\bar{y}_N$ = constantes función de N, tabla 6.13 (variables reducidas)

σ_Q = desviación estándar de los caudales

Para el cómputo del lapso de certidumbre, esto es, aquel dentro del cual puede oscilar $Q_{\max}$ conforme al acervo de datos disponible, se procede del siguiente modo:

1. Si $\phi = 1-1/T$ varía entre 0.20 y 0.80, el intervalo de confianza se calcula con la fórmula:

$$\Delta Q = \pm \sqrt{N\alpha\sigma_m} \frac{\sigma_Q}{\sigma_N \sqrt{N}}$$

2. Si $\phi > 0.90$, el intervalo se calcula como:

$$\Delta Q = \pm \frac{1.14\sigma_Q}{\sigma_N}$$

El gasto cúspide de diseño para un lapso de recurrencia determinado se obtiene mediante la adición al caudal apical estimado del intervalo de certidumbre correspondiente, el cual permite incorporar la indeterminación estadística intrínseca a la conjetura de episodios extremos.

$$Q_d = Q_{m\acute{a}x} + \Delta Q$$

2.6.2. Método Nash:

Conforme al postulado de Nash, el gasto cúspide correspondiente a un lapso de recurrencia determinado puede inferirse a través de una relación funcional que enlaza el caudal con dicho período, derivada del escrutinio inferencial de los escurrimientos máximos anuales consignados. Esta formulación posibilita la representación del comportamiento estocástico de los episodios extremos mediante una expresión matemática de adecuación lineal. (Villón, 2002).

$$Q_{max} = a + b \log \log \frac{T}{T-1}$$

Donde:

a,b = constantes en función del registro de caudales máximos anuales

Qmáx = caudal máximo para un período de retorno determinado, en m³/s

T = período de retorno, en años

Los coeficientes a y b se infieren mediante el procedimiento de los mínimos cuadrados, aplicando la ecuación lineal: $Q = a + bX$, a partir de las siguientes formulaciones:

$$a = Q_m - bX_m$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^N X_i Q_i - NX_m Q_m}{\sum_{i=1}^N X_i^2 - NX_m^2}$$

$$X_i = \log \log \frac{T}{T-1}$$

Donde:

N = número de años de registro

Qi = caudales máximos anuales registrados, en m³ /s

Qm= caudal medio, en m³ /s

Xi = constante para cada caudal Q registrado, en función de su período de retorno correspondiente

Xm= valor medio de las Xs

El intervalo dentro del cual puede variar el caudal máximo estimado mediante la ecuación de Nash se obtiene considerando la variabilidad estadística del ajuste, lo que permite definir un rango de confianza asociado al valor calculado.

$$\Delta Q = \pm \sqrt{\frac{S_{qq}}{N^2(N-1)} + (X - X_m)^2 \frac{1}{N-2} \frac{1}{S_{xx}} \left(S_{qq} - \frac{S_{xq}^2}{S_{xx}} \right)}$$

Siendo:

$$S_{xx} = N \sum x_i^2 - \left(\sum x_i \right)^2$$

$$S_{qq} = N \sum Q_i^2 - \left(\sum Q_i \right)^2$$

$$S_{xq} = N \sum Q_i x_i - \left(\sum Q_i \right) \left(\sum x_i \right)$$

El gasto cúspide de diseño para un lapso de recurrencia determinado se obtiene al adicionar al caudal apical estimado el intervalo de certidumbre correspondiente, con la finalidad de integrar la indeterminación inferencial inherente al análisis de episodios extremos, a saber:

$$Q_d = Q_{m\acute{a}x} + \Delta Q$$

2.6.3. Método Levediev:

La técnica de Levediev se fundamenta en la premisa de que los escurrimientos máximos anuales pueden modelarse como magnitudes aleatorias, permitiendo la deducción del caudal de diseño mediante una expresión empírica que incorpora parámetros estadísticos extraídos del acervo hidrológico. A partir de dicha formulación, se torna factible computar el gasto asociado a un determinado lapso de retorno, considerando la extensión temporal y la fluctuación de la serie de datos.

Donde:

$$\begin{aligned} Q_{max} &= Q_m(KC_v + 1) \\ Q_d &= Q_{m\acute{a}x} + \Delta Q \end{aligned} \qquad \Delta Q = \pm \frac{AE_r Q_{m\acute{a}x}}{\sqrt{N}}$$

Los términos que aparecen en las ecuaciones anteriores tienen el siguiente significado: A = coeficiente que varía de 0.7 a 1.5, dependiendo del número de años del registro. Cuantos más años de registro haya, menor será el valor del coeficiente. Si N es mayor de 40 años, se toma el valor de 0.7.

Cs = coeficiente de asimetría, se calcula como:

$$C_s = \frac{\sum_{i=1}^N \left(\frac{Q_i}{Q_m} - 1 \right)^3}{NC_v^3}$$

Por otra parte, Lebediev recomienda tomar los siguientes valores:

$C_s = 2C_v$ para avenidas producidas por deshielo

$C_s = 3C_v$ para avenidas producidas por tormentas

$C_s = 5C_v$ para avenidas producidas por tormentas en cuencas ciclónicas

Donde:

C_v = coeficiente de variación, que se obtiene de la ecuación:

$$C_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \left(\frac{Q_i}{Q_m} - 1 \right)^2}{N}}$$

E_r = coeficiente que depende de los valores de C_v (ecuación 6.42) y de la probabilidad $P = 1/T$, su valor se encuentra de la figura 6.3 K = coeficiente que depende de la probabilidad $P = 1/T$, expresada en porcentaje de que se repita el caudal de diseño y del coeficiente de asimetría C_s .

2.7. Modelos hidrológicos

La dinámica hidrológica se distingue por su notable enrevesamiento, dado que su evolución espontánea resulta ardua de anticipar con precisión, exhibiendo un considerable grado de indeterminación en su escrutinio. Bajo esta tesitura, un modelo hidrológico constituye una abstracción teórica y numérica de los mecanismos físico-naturales que tienen lugar en el seno de una cuenca, así como de la interrelación entre sus diversos elementos. La implementación de tales esquemas demanda insumos cuya índole y volumen se subordinan a la tipología del modelo seleccionado. Del mismo modo, los productos generados fluctúan conforme a las metas delineadas por el analista, suministrando figuraciones verosímiles que conllevan un rango de imprecisión tolerable, imprescindible en los procesos decisionales relativos a la administración del patrimonio acuífero, tanto en el presente como en horizontes venideros.

La morfología y el andamiaje de un modelo hidrológico se articulan en consonancia con el propósito para el cual ha sido concebido. A título ilustrativo, los esquemas aplicados al manejo de crecidas distan de aquellos orientados a la producción hidroenergética, el régimen operativo de embalses o la gobernanza holística de los recursos hídricos y ecológicos.

Según la clase de modelo adoptado, las exigencias informativas pueden fluctuar, siendo los registros hidrometeorológicos, geomorfológicos, agrosistémicos, edafológicos, litológicos e hidrológicos los más emblemáticos.

Los registros hidrometeorológicos abarcan magnitudes como la pluviometría, la térmica, la higrometría, la anemometría y la evaporación. Los insumos geomorfológicos comprenden datos vinculados a la orografía, la trama de drenajes, superficies de cuenca, trayectorias fluviales y gradientes altitudinales. La información de índole agrícola alude a la fisonomía vegetal y al aprovechamiento edáfico. En lo que respecta a los datos edafológicos, estos engloban atributos físicos del suelo, tales como la tipología, granulometría, organización estructural, porosidad y grado de humedad.

2.8. Calibración de Modelos hidrológicos

El procedimiento de ajuste de un modelo hidráulico radica en la modulación del coeficiente de aspereza de Manning hasta alcanzar una correspondencia entre los niveles emulados en la sección de medición y los valores constatados in situ. Para tal fin, se calcula previamente el declive medio del cauce en el segmento objeto de análisis y se implementa el modelo bajo supuestos de régimen subcrítico. La estimación preliminar del coeficiente de aspereza fluvial puede derivarse de la curva granulométrica del sedimento del lecho, en tanto que el coeficiente relativo a las riberas se determina atendiendo a la densidad vegetal en la planicie de inundación, asignándose valores superiores en áreas cubiertas por herbazales altos (Chow et al., 1994).

a). Eficiencia de Nash Sutcliffe:

El parámetro de eficiencia Nash–Sutcliffe se emplea para valorar el rendimiento y la aptitud proyectiva de los modelos hidrológicos, cotejando las magnitudes simuladas con los datos empíricamente registrados. Este índice posibilita la cuantificación del grado de concordancia del modelo, teniendo en cuenta la dispersión de los datos y la fidelidad de las estimaciones.

$$Nash = 1 - \frac{\sum_{t=ti}^{tf} (Q_{Sim,t} - Q_{ref,t})^2}{\sum_{t=ti}^{tf} (Q_{ref,t} - \bar{Q}_{ref})^2}$$

Donde:

$Q_{sim,t}$: Caudal simulado en el tiempo t (m3/s).

$Q_{ref,t}$: Caudal observado para el tiempo t (m3/s).

$\bar{Q}_{ref}$: Caudal observado media para el periodo considerado (m3/s).

El coeficiente de eficiencia de Nash–Sutcliffe refleja la fracción de la variabilidad inherente a los datos empíricos que logra ser replicada mediante la simulación computacional del modelo. Este índice puede oscilar desde menos infinito hasta la unidad, siendo un valor próximo a uno indicativo de un acoplamiento óptimo y, en consecuencia, de un rendimiento superior del esquema hidrológico.

b). Coeficiente de Nash para valores logaritmo:

La versión logarítmica del coeficiente de eficiencia de Nash–Sutcliffe (Nash-Ln), aplicada a caudales transformados mediante logaritmicación, se utiliza para apreciar el rendimiento de los modelos hidrológicos, especialmente en lo relativo a la emulación de flujos bajos y de evolución estable en un intervalo temporal determinado. Esta formulación atenúa la preponderancia de los valores extremos, posibilitando una apreciación más fina de los caudales mínimos, conforme a la ecuación siguiente:

$$Nash - Ln = 1 - \frac{\sum_{t=ti}^{tf} (Ln(Q_{Sim,t}) - Ln(Q_{ref,t}))^2}{\sum_{t=ti}^{tf} (Ln(Q_{ref,t}) - Ln(\bar{Q}_{ref}))^2}$$

Donde:

$Q_{sim,t}$: Caudal simulado en el tiempo t (m3/s).

$Q_{ref,t}$: Caudal observado para el tiempo t (m3/s).

$\bar{Q}_{ref}$: Caudal observado media para el periodo considerado (m3/s)

Los valores que puede adoptar este indicador se extienden desde menos infinito hasta 1, siendo este último el que representa el desempeño óptimo del modelo.

c). Coeficiente de correlación de Pearson:

El índice de correlación de Pearson constituye un parámetro estadístico que posibilita la apreciación del vínculo lineal entre los caudales empíricos y los generados, evidenciando la aptitud del modelo para emular la oscilación del entramado hidrológico y coadyuvar a la aminoración de dislates en la modelización.

$$Pearson = 1 - \frac{\sum_{t=ti}^{tf} (Q_{sim,t} - \bar{Q}_{sim}) \cdot (Q_{ref,t} - \bar{Q}_{ref})}{\sqrt{\sum_{t=ti}^{tf} (Q_{sim,t} - \bar{Q}_{sim})^2 \cdot \sum_{t=ti}^{tf} (Q_{ref,t} - \bar{Q}_{ref})^2}}$$

Donde:

$Q_{sim,t}$: Caudal simulado en el tiempo t (m3/s).

$\bar{Q}_{sim}$: Caudal medio

$Q_{ref,t}$: Caudal observado para el tiempo t (m3/s).

$\bar{Q}_{ref}$: Caudal observado media para el periodo considerado (m3/s)

Los valores de este indicador se encuentran comprendidos entre -1 y 1, siendo el valor unitario indicativo del mejor desempeño del modelo en la representación de los datos observados.

d). Bias Score (BS):

El BS constituye un parámetro métricamente equilibrado que faculta la ponderación del nivel de desviación entre magnitudes modeladas y empíricas, a través del cotejo de sus medias aritméticas. Una cifra adyacente a la unidad denota una afinidad aceptable entre ambas series de datos, si bien no presupone una concordancia plena.

$$BS = 1 - \left[\max \left(\frac{\bar{Q}_{sim}}{\bar{Q}_{ref}}, \frac{\bar{Q}_{ref}}{\bar{Q}_{sim}} \right) - 1 \right]^2$$

Donde:

$\bar{Q}_{sim}$: Caudal medio

$\bar{Q}_{ref}$: Caudal observado media para el periodo considerado (m3/s)

Los valores de este indicador varían entre 0 a 1, donde 1 indica el mejor rendimiento del modelo.

e). Error cuadrático de la raíz relativa (RRMSE):

El RRMSE es una medida adimensional que cuantifica el ratio de fallo entre los caudales, permitiendo evaluar el desempeño del modelo de forma relativa mediante la normalización del error cuadrático medio.

$$RRMSE = \frac{\sqrt{\sum_{t=ti}^{tf} (Q_{sim,t} - Q_{ref,t})^2}}{\bar{Q}_{ref}}$$

Donde:

$Q_{sim,t}$: Caudal simulado en el tiempo t (m3/s).

$Q_{ref,t}$: Caudal observado para el tiempo t (m3/s).

$\bar{Q}_{ref}$: Caudal observado media para el periodo considerado (m3/s)

n : Número de días de evaluación.

Los valores de este indicador varían entre 0 a $+\infty$, cuando menos sea el RRMSE, será más optimo.

f). Sesgo de volumen relativo (RVB):

El índice de dislocación volumétrica posibilita la estimación del desvío entre las cuantías simuladas y las empíricamente registradas a lo largo del intervalo de observación, pudiendo adquirir cifras positivas en casos de sobrestimación y negativas ante infravaloraciones del modelo. Su formulación se consigna mediante la expresión siguiente:

$$RVB = \frac{\sum_{t=t_i}^{t_f} (Q_{Sim,t} - Q_{ref,t})^2}{\sum_{t=t_i}^{t_f} (Q_{ref,t})}$$

Donde:

$Q_{sim,t}$: Caudal simulado en el tiempo t (m3/s).

$Q_{ref,t}$: Caudal observado para el tiempo t (m3/s).

$\bar{Q}_{ref}$: Caudal observado media para el periodo considerado (m3/s)

El RVB fluctúa entre -1 y $+\infty$, donde aproximaciones al cero denotan una calibración satisfactoria del esquema modelístico. Valores por debajo de cero evidencian una carencia en la replicación, mientras que cifras por encima reflejan una sobreproyección del caudal estimado en relación con el constatado.

g). Error de los valores picos normalizados (NPE):

El NPE posibilita dimensionar la discrepancia relativa entre los flujos cúspides obtenidos mediante simulación y aquellos corroborados in situ, constituyéndose como métrica del rendimiento del modelo frente a episodios hidrológicos extremos. Esta medida se formaliza mediante la ecuación subsiguiente:

$$NPE = \frac{S_{max} - R_{max}}{R_{max}}$$

Donde:

S_{max} : Caudal máximo simulado para el periodo de estudio (m3/s).

R_{max} : Caudal máximo observado para el periodo de estudio (m3/s).

Este indicador presenta un rango de valores que va desde -1 hasta $+\infty$. Los resultados negativos evidencian una subestimación de los caudales pico por parte del modelo, mientras que los valores positivos reflejan una sobreestimación de los mismos. Valores próximos a cero indican un adecuado desempeño del modelo en la representación de los picos.

Ahora, con la tabla N° 1 se mostrará el resumen de los indicadores de calibración con el respectivo rango de evaluación, y en la última columna el valor ideal de cada indicador.

Tabla 1: Indicadores de calibración

INDICADOR	RANGO DE EVALUACIÓN	VALOR IDEAL	RANGO ACEPTABLE
Nash	$-\infty$ a 1	1	≥ 0.50
Nash-Ln	$-\infty$ a 1	1	≥ 0.50
Pearson	-1 a 1	1	≥ 0.70
BS	0 a 1	0	± 0.15
RRMSE	0 a $+\infty$	0	< 0.30
RVB	$-\infty$ a $+\infty$	0	± 0.10
NPE	$-\infty$ a $+\infty$	0	± 0.10

Fuente: Elaboración propia

2.9. Validación de Modelos hidrológicos

Pascual y Díaz (2016) arguyen que la fase de validación concierne a la constatación del rendimiento del arquetipo tras culminar su etapa de ajuste, a través de simulacros que posibiliten corroborar su operatividad adecuada y su consonancia con los propósitos para los cuales fue concebido. De igual modo, subrayan que, además de ser operativo, dicho arquetipo ha de exhibir manejabilidad, tanto en lo relativo a la aprehensión de su entramado como a las exigencias implicadas en su parametrización (p. 19)

La comprobación de los esquemas hidrológicos se llevará a cabo mediante el escrutinio de métricas de eficacia ampliamente reconocidas en la bibliografía hidrológica contemporánea, atendiendo a los parámetros delineados por Moriasi et al. (2007) y Knoben et al. (2019).

En el presente trabajo se utilizaron los subsiguientes índices:

- a. **El Nash-Sutcliffe (NSE):** Evalúa la precisión general respecto a la media observada, con umbral mínimo de 0.50 para considerar el modelo satisfactorio.
- b. **El Kling-Gupta Efficiency (KGE):** Combina correlación, sesgo y variabilidad, proporcionando una evaluación más balanceada que el NSE (umbral ≥ 0.70).
- c. **El Relative Volume Bias (RVB):** Mide el sesgo asociado al volumen total de agua simulado respecto al observado, siendo especialmente relevante para aplicaciones prácticas; se considera aceptable un rango comprendido entre $\pm 10\%$.

Estos indicadores fueron seleccionados por su carácter complementario, ya que permiten identificar distintos tipos de errores asociados a la magnitud, la distribución temporal y el volumen de los caudales simulados, evitando evaluaciones parciales basadas únicamente en métricas de correlación lineal.

2.10. Software Rs-Minerve

El artefacto informático Rs-Minerve posibilita emular la génesis de la pluviosidad y el escurrimiento mediante un entramado conceptual que abarca siete tipologías hidrológicas: SWMM, Snow-GMS, SOCONT, SAC-SMA, GR4J y HBV.

Dicho sistema integra múltiples esquemas lluvia–escorrentía, entre los cuales figuran SOCONT, SAC-SMA, GR4J y HBV, comúnmente empleados en indagaciones hidrológicas. En la presente investigación se recurre a estos cuatro modelos por su idoneidad en estudios análogos y su aptitud para reproducir los procesos prevalentes en la cuenca analizada. Los parámetros y las condiciones iniciales correspondientes a cada uno de ellos se consignan en la Tabla 2.

Tabla 2: Número de parámetros y condiciones iniciales de los modelos hidrológicos

Modelo	N° de parámetros	N° de condiciones iniciales
GR4J	4	2
SOCONT	11	4
HBV	14	5
SAC-SMA	16	6

Fuente: Elaboración propia

Los cuatro esquemas hidrológicos utilizados en esta indagación demandan, como insumo fundamental, un compendio hidrometeorológico previamente depurado y corroborado a través de métodos estadísticos, con el propósito de asegurar su integración fidedigna en la plataforma RS Minerve. En la Tabla 3 se consignan los insumos requeridos por cada uno de los modelos contemplados.

Tabla 3: Variables de entrada para los modelos hidrológicos.

Modelo Hidrológico	Variables de entrada
GR4J	Precipitación y evapotranspiración
SAC-SMA	Precipitación y evapotranspiración
HBV	Precipitación y Temperatura
SOCONTO	Precipitación y temperatura

Fuente: Elaboración propia

a. Estación Meteorológica virtual.

En RS Minerve, los datos hidrometeorológicos se estructuran mediante estaciones meteorológicas virtuales, definidas a partir de coordenadas espaciales (X, Y, Z), lo que posibilita la asignación distribuida de variables como la pluviosidad, la temperatura atmosférica y la evapotranspiración potencial (ET_p) sobre la demarcación hidrográfica en análisis.

Para la extrapolación espacial de dichas magnitudes, el aplicativo ofrece diversos algoritmos de cálculo, entre los cuales sobresalen los métodos de Thiessen y Shepard. El procedimiento de Thiessen adjudica los valores correspondientes a la estación más contigua, mientras que el de Shepard incorpora la incidencia simultánea de múltiples estaciones, aplicando coeficientes de ponderación en

función de la distancia. En la presente pesquisa se optó por el método de Shepard, dado que propicia una representación espacial más refinada al integrar la información procedente del conjunto de estaciones disponibles en el entorno de la cuenca.

a.1. Método Shepard.

El algoritmo de Shepard posibilita la estimación de una variable meteorológica en una estación virtual tomando como referencia los registros obtenidos en un conjunto de estaciones reales situadas en su proximidad. Para dicho fin, se otorga a cada estación un coeficiente de influencia proporcionalmente inverso a su distancia respecto del punto virtual, de modo que aquellas más próximas inciden con mayor preeminencia en el valor interpolado. Esta ponderación se determina mediante la inversa del cuadrado de la distancia entre cada estación física y la estación virtual en cuestión.

Esta ponderación se determina mediante la inversa del cuadrado de la distancia entre cada estación física y la estación virtual en cuestión.

En esta operativa, las estaciones meteorológicas convocadas para la interpolación son seleccionadas de forma automatizada dentro de un perímetro de indagación preestablecido. Consecuentemente, la cantidad de estaciones implicadas puede fluctuar según cada estación virtual, si bien el modelo habilita la fijación de un umbral mínimo de estaciones a fin de

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

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”.

s: Distancia entre la estación meteorológica “i” y la estación virtual “s”.
salvaguardar la solidez del cómputo.

Donde:

r_s : Radio de búsqueda de estaciones meteorológicas.

De manera complementaria, el método incorpora una rectificación altitudinal de las magnitudes meteorológicas, aspecto cardinal en cuencas con oscilaciones acusadas de altimetría. Parámetros tales como la pluviosidad, la temperatura aérea y la evapotranspiración potencial, consignados a una altitud específica, son ajustados para representar fielmente las condiciones en la cota de la estación virtual. Dicha adecuación se efectúa a través de ecuaciones lineales que recurren a gradientes altimétricos invariables propios de cada parámetro, así como a coeficientes de afinamiento que posibilitan una estimación más certera de los valores resultantes en la estación virtual.

$$P_s = CoeffP_s \frac{\sum_{i=1}^n P_i + \frac{dP_s}{dz} * (z_s - z_i) * \frac{1}{d_{i,s}^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_{i,s}^2}}$$

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

$$ET_{os} = CoeffET_{os} \frac{\sum_{i=1}^n ET_{oi} + \frac{dET_{os}}{dz} * (z_s - z_i) * \frac{1}{d_{i,s}^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_{i,s}^2}}$$

Donde:

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

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

ETos: Valor de la evapotranspiración en la estación virtual “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.

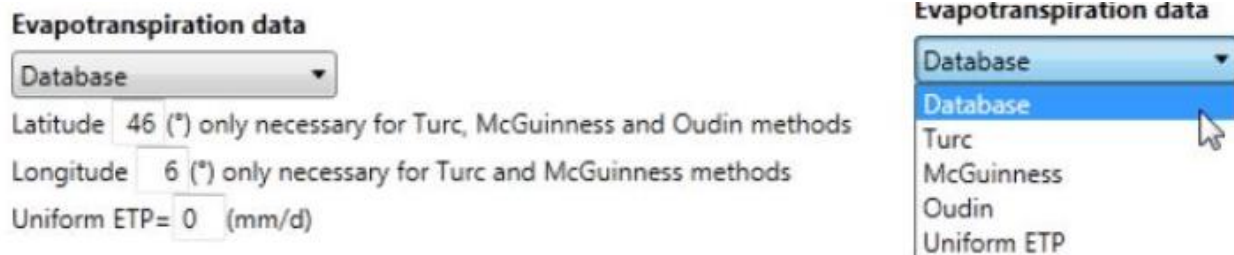
Zs: Altitud de la estación virtual de “s” (m.s.n.m).

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

a.2. Evapotranspiración (ETo).

Cuando no se dispone de información directa de evapotranspiración potencial en la base de datos, el software RS-Minerve permite estimar esta variable directamente en las estaciones virtuales mediante diferentes formulaciones integradas en el sistema. La selección del método de cálculo se realiza desde el módulo de configuración de evapotranspiración del programa, el cual ofrece varias alternativas de acuerdo con la disponibilidad de información climática.

Figura N° 02: Selección de cálculo Evapotranspiración



Fuente: Manual Técnico Rs-Minerve 2014

Entre los métodos implementados se incluyen Turc, McGuinness, Oudin y una opción de evapotranspiración uniforme. Asimismo, el sistema admite la incorporación de series de ETo previamente calculadas por el usuario. En el estudio se adoptó el método de Oudin para la estimación de la evapotranspiración potencial, debido a que requiere únicamente datos de temperatura del aire, lo que resulta compatible con la información disponible en la cuenca analizada. Este método ha mostrado un desempeño adecuado en estudios hidrológicos desarrollados en cuencas con condiciones climáticas similares, ofreciendo un equilibrio entre simplicidad y confiabilidad en los resultados.

2.10.1. Modelo GR4J

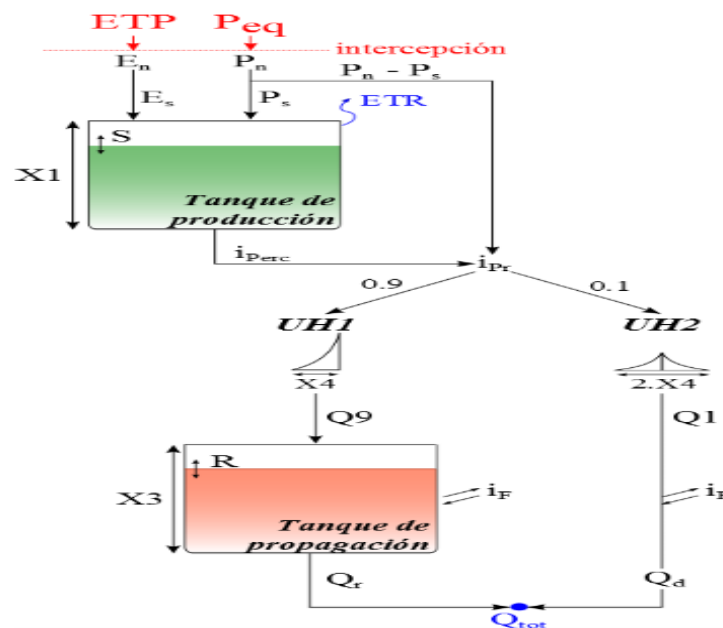
Perrin (2003) concibió el modelo GR4J (Génie Rural à 4 paramètres journaliers), un arquetipo conceptual de precipitación–escorrentía de índole lumped y cadencia diaria. Esta formulación constituye una derivación del esquema GR3J, esbozado inicialmente por Edijatno y

Michel (1989), el cual fue ulteriormente afinado y depurado por distintos investigadores con la finalidad de optimizar su eficacia hidrológica.

El GR4J posibilita la emulación de caudales cotidianos a partir de un acervo sintético de datos hidrometeorológicos, demandando únicamente cronogramas de pluviosidad y evapotranspiración potencial media diaria. Su arquitectura se articula en torno a cuatro parámetros susceptibles de calibración y dos depósitos cardinales: uno vinculado al fenómeno de producción y otro al mecanismo de transferencia del flujo. Tales módulos representan tanto el acopio como la transmutación hídrica dentro de la cuenca, considerando pérdidas por infiltración, percolación y el estado hídrico precedente del suelo.

Igualmente, el modelo incorpora hidrogramas unitarios, los cuales posibilitan la caracterización del comportamiento de la respuesta hidrológica de la cuenca ante pulsos de precipitación, favoreciendo la simulación del desplazamiento del líquido hacia el exutorio del sistema.(Coras, 2019).

Figura N° 03: Estructura del modelo GR4J



Fuente: Manual Rs Minerve.

Parámetros del modelo:

El modelo cuenta con cuatro parámetros (Tabla 4) que se deben ajustarse para obtener una simulación correcta.

Tabla 4: Rangos y parámetros del modelo GR4J

Modelo	Parámetro	(Unidad)	Descripción	Rango
GR4J	A	(m ²)	Área	> 0
	X1	(m)	Capacidad del primer tanque de producción	0.1 a 1.2
	X2	(m)	Coefficiente del intercambio de agua	-0.005 a 0.03
	X3	(m)	Capacidad del segundo tanque de producción	0.02 a 0.3
	X4	(d)	Tiempo base de los hidrogramas unitarios	1.1 a 1.9

Fuente: Manual Rs Minerve

2.10.2. Modelo HBV

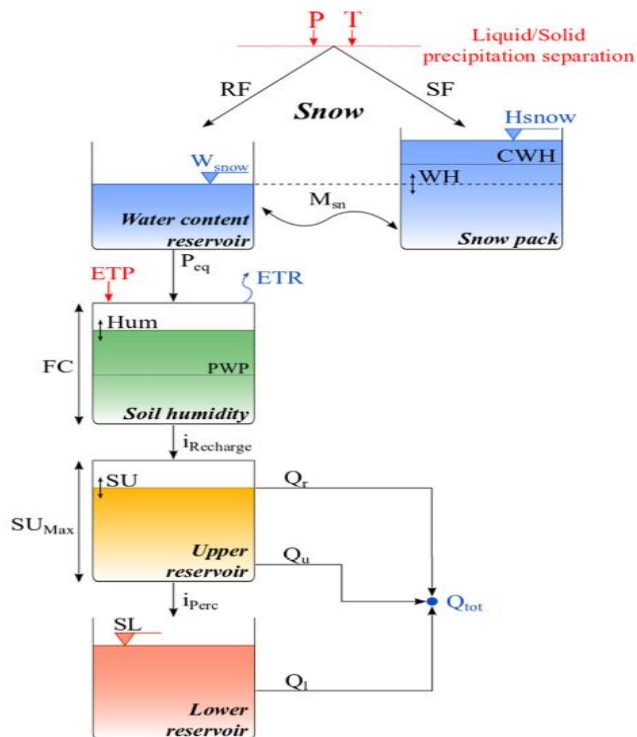
El modelo HBV (Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning) constituye un entramado hidrológico de naturaleza conceptual y carácter determinista, originalmente ideado por Bergström (1992), con la finalidad de cuantificar la esorrentía engendrada en una cuenca hidrográfica a partir de datos hidrometeorológicos de frecuencia diaria. Para su operatividad, dicho modelo demanda como insumos cronologías de pluviosidad, temperatura y evapotranspiración potencial.

La arquitectura del HBV amalgama diversos procesos hidrológicos mediante rutinas diferenciadas, entre las cuales sobresalen la representación del deshielo nival a través del método de grado-día, el balance hídrico edáfico y la emulación del flujo freático. Tales procesos son plasmados mediante un armazón conceptual constituido por reservorios interconectados, cuya cinemática se rige por ecuaciones lineales y funciones de transferencia que posibilitan replicar la respuesta hidrológica de la cuenca (Seibert, 1997).

El modelo considera tres principales zonas de almacenamiento: una asociada a la humedad del suelo y dos vinculadas al tránsito del flujo, correspondientes a los depósitos superior e inferior del sistema subterráneo. En total, el HBV emplea un conjunto aproximado de 14 parámetros calibrables, de los cuales una parte significativa corresponde al submodelo de nieve, el cual permite diferenciar la precipitación sólida de la líquida, de manera similar a otros modelos conceptuales como SOCONT (Coras, 2019).

Debido a su flexibilidad y capacidad de representación de procesos hidrológicos en climas fríos y templados, el modelo HBV ha sido ampliamente utilizado en aplicaciones prácticas, tales como la predicción de crecidas súbitas y el diseño de infraestructuras hidráulicas, incluyendo aliviaderos y obras de control de avenidas (Bergström, 1992; Harlin, 1992; Blöschl et al., 2007).

Figura N° 04: Estructura del modelo HBV



Fuente: Manual Rs Minerve

Parámetros del modelo:

El modelo cuenta con catorce parámetros (Tabla 5) que se deben ajustarse para obtener una simulación correcta.

Tabla 5: Rangos y parámetros del modelo HBV

<i>Modelo</i>	<i>Parámetro</i>	<i>(Unidad)</i>	<i>Descripción</i>	<i>Rango</i>
HVB	A	(m ²)	Área	> 0
	CFMax	(Mm/°C/d)	Factor de fusión	0.5 a 20
	CFR	-	Factor de recongelación	0.005
	CWH	-	Contenido crítico relativo de agua en el manto de nieve	0.1
	T. T	(°C)	Temperatura umbral de lluvia /nieve	0 a 3
	TTInt	(°C)	Intervalo de temperatura para la mezcla de lluvia y nieve	0 a 3
	TSM-T	(°C)	Temperatura umbral para el derretimiento de la nieve	0
	Beta	-	Parámetro del modelo (Coeficiente de forma)	1 a 5
	FC	(m)	Capacidad máxima de almacenamiento del suelo	0.050 a 0.65
	PWP	-	Umbral del punto de marchitez permanente del suelo	0.030 a 1
	SUMax	(m)	Umbral de nieve de agua del embalse superior	0 a 0.10
	Kr	(1/día)	Coeficiente de almacenamiento de flujo cercano a la superficie	0.05 a 0.5
	Ku	(1/día)	Coeficiente de almacenamiento entre flujos	0.01 a 0.4
	KI	(1/día)	Coeficiente de almacenamiento de flujo base	0 a 0.15
	Kperc	(1/día)	Coeficiente de almacenamiento por percolación	0 a 0.8

2.10.3. Modelo Sacramento (SAC-SMA)

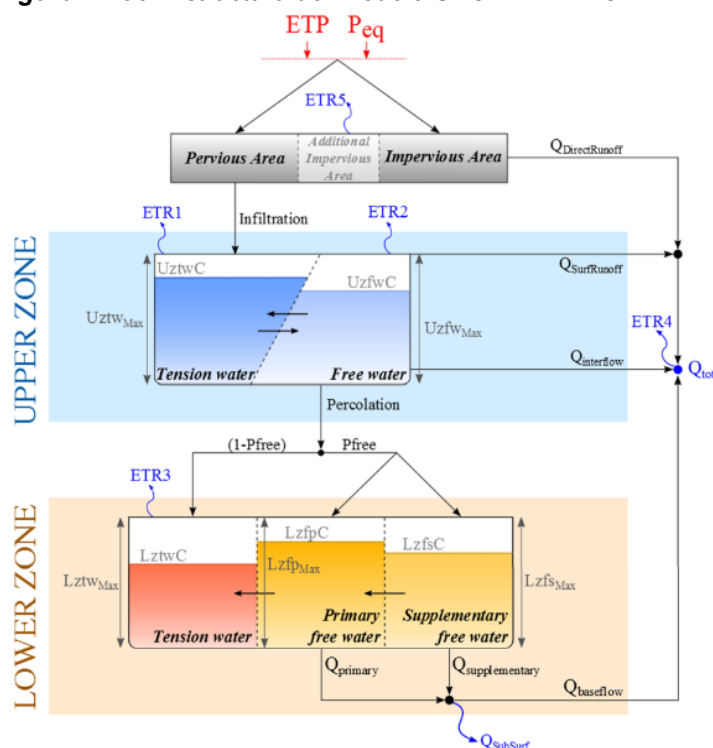
El artefacto hidrológico SAC-SMA, igualmente designado como esquema Sacramento, fue concebido en sus albores por Burnash (1973) con la finalidad de reproducir minuciosamente las dinámicas de retención y tránsito hídrico en el edafosistema, incorporando diversos estratos y modalidades de percolación. Su arquitectura permite una emulación eficaz del escurrimiento generado en una demarcación hidrográfica, en particular en indagaciones hidrológicas de índole meso o macroscópica.

Este modelo computa la descarga íntegra a partir de la sinergia entre la precipitación y la evapotranspiración potencial, conforme a un repertorio de parámetros y estados iniciales que configuran la condición hídrica del sustrato. La configuración teórica del SAC-SMA se cimenta en una esquematización sistemática del aparato de almacenamiento de humedad edáfica, valiéndose de simplificaciones de los procesos hidrológicos predominantes descritos en la bibliografía, estructuradas de forma que viabilizan su ajuste mediante datos empíricos (Burnash, 1973). Para su implementación, el modelo exige como insumo secuencias de pluviometría media diaria, evapotranspiración potencial y humedades iniciales del suelo, posibilitando así la elaboración de series ininterrumpidas de caudales.

Debido a su intrincado andamiaje y a la cuantía de parámetros considerados en torno a 16, este artificio requiere una comprensión exhaustiva de las propiedades físicas de la cuenca, resultando idóneo para territorios de más de 100 km².

Desde una óptica estructural, el SAC-SMA modeliza el suelo mediante tres compartimentos cardinales. El primero se fragmenta en superficies permeables e impermeables, generadoras de escurrimiento superficial cuando la pluviosidad sobrepasa la capacidad de absorción. El segundo reservorio se adscribe a la zona edáfica superior (upper zone), donde se origina el flujo subsuperficial asociado a transferencias laterales y al sustento del caudal base, especialmente bajo condiciones de saturación. Por último, el tercer compartimento simboliza la zona inferior del suelo (lower zone), vinculada a descargas lentas que regulan la respuesta hidrológica basal del conjunto (Coras, 2019).

Figura N° 05: Estructura del modelo SACRAMENTO



Fuente: Manual Rs Minerve

Parámetros del modelo:

El modelo cuenta con dieciséis parámetros (Tabla 6) que se deben ajustarse para obtener una simulación correcta.

Tabla 6: Rangos y parámetros del modelo SACRAMENTO

Modelo	Parámetro	(Unidad)	Descripción	Rango
SACRAMENTO	A	(m ²)	Área	> 0
	Adimp	-	Máxima fracción de un área impermeable adicional debido a la saturación	0 a 0.2
	Pctim	-	Fracción permanente de área impermeable	0 a 0.005
	Riva	-	Fracción de rivera zona vegetal	0 a 0.2
	Uz _{tw} Max	(m)	Capacidad de agua de tensión zona alta	0.01 a 0.15
	Uz _{fw} Max	(m)	Capacidad de agua libre zona alta	0.005 a 0.10
	Uzk	(1/d)	Tasa de agotamiento interflujo desde el almacenamiento de agua zona libre superior	0.10 a 0.75
	Zperc	-	Relación de la curva máximo y mínimo de percolación	10 a 350
	Rexp	-	Parámetro de forma de la curva de percolación	1 a 4
	Pfree	-	Fracción percolación que va directamente a los depósitos de agua de zonas francas menor	0 a 0.6
	Lz _{tw} Max	(m)	Zona de baja capacidad de agua de tensión	0.05 a 0.40
	Lz _{fp} Max	(m)	Zona inferior libre primaria de capacidad de agua	0.03 a 0.80

	LzfsMax	(m)	Zona inferior libre suplementaria a la capacidad de agua	0.01 a 0.40
	Rserv	-	Fracción de zona inferior de agua libre no transferible a zona inferior	0 a 1
	Lzpk	(1/d)	Tasa de agotamiento de almacenamiento de agua libre inferior principal de la zona	0.001 a 0.3
	Lzsk	(1/d)	Tasa de agotamiento de la zona inferior de almacenamiento de agua libre suplementario	0.02 a 0.3
	Side	-	Relación de percolación profunda de almacenamientos de agua libre de la zona baja	0 a 0.5

Fuente: Manual Rs Minerve

2.10.4. Modelo Socont

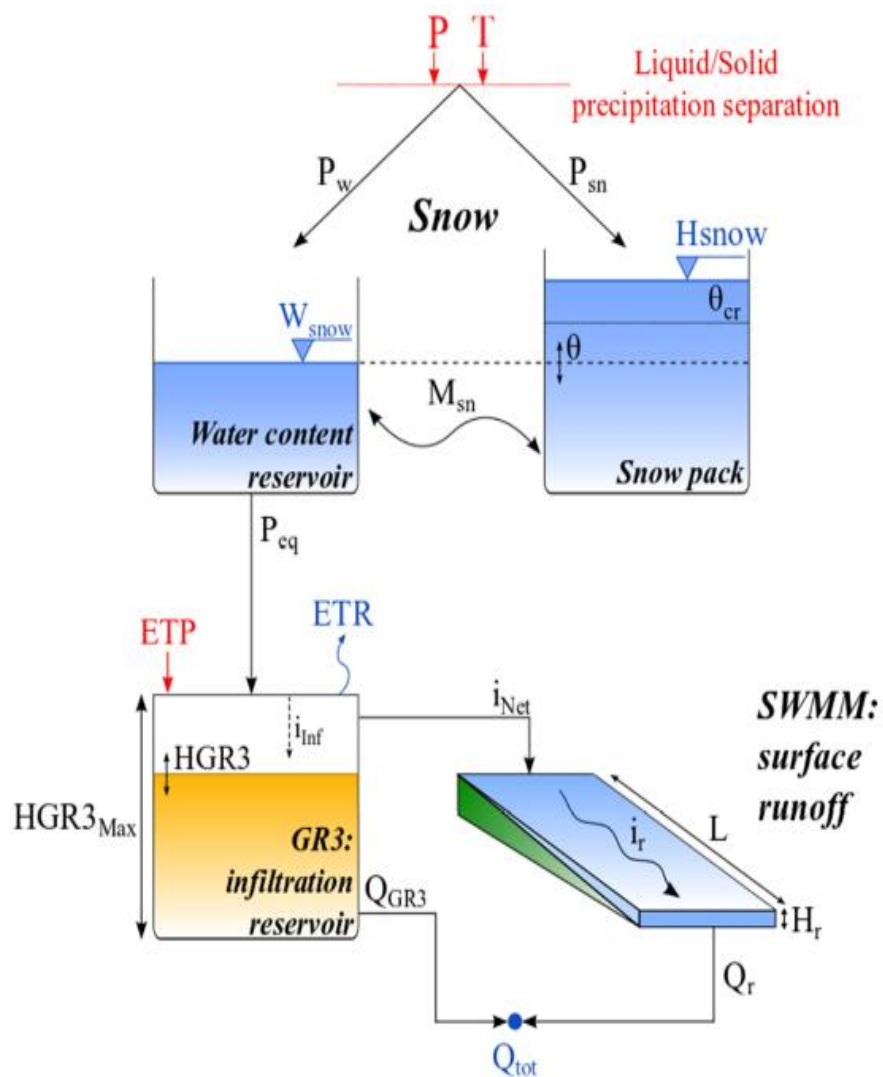
El arquetipo hidrológico SOCONT (Soil Contribution) constituye una formulación conceptual que amalgama de manera encadenada tres submodelos hidrológicos de arquitectura simplificada, con la finalidad de reproducir los mecanismos cardinales de generación de escurrimiento en un ámbito hidrográfico (Consuegra & Vélez, 1996).

El primer módulo corresponde al submodelo SnowGSM (Glacier Snow Melting), caracterizado como un esquema determinista–conceptual abocado a emular la evolución temporal de los procesos de acumulación y deshielo nivoso. Esta dinámica se parametriza principalmente a partir de la temperatura atmosférica y de la precipitación equivalente, posibilitando la estimación del caudal derivado de la fusión nival.

Las emisiones hídricas producidas por el SnowGSM operan como insumos para el submodelo GR3 (Génie Rural à 3 paramètres), el cual emplea la pluviometría neta y la evapotranspiración para computar tanto los fenómenos de infiltración como la génesis del flujo subterráneo en el seno de la cuenca. Dicho submodelo permite una representación simplificada aunque coherente del comportamiento hídrico del perfil edáfico.

En última instancia, los productos generados por el GR3 son canalizados hacia el modelo SWMM (Storm Water Management Model), responsable de simular la conversión de los sobrantes hídricos en escorrentía superficial. De este modo, el SOCONT ofrece una representación holística de los procesos de nieves, infiltración, retención y escurrimiento, resultando idóneo para el análisis de dinámicas hidrológicas continuas en cuencas con predominio nival.

Figura N° 06: Estructura del modelo SOCONT



Fuente: Manual Rs Minerve

Parámetros del modelo:

El modelo cuenta con dieciséis parámetros (Tabla 7) que se deben ajustarse para obtener una simulación correcta.

Tabla 7: Rangos y parámetros del modelo SOCONT

Modelo	Parámetro	(Unidad)	Descripción	Rango
SOCONT	A	(m ²)	Área	> 0
	S	(mm°C/d)	Coeficiente de deshielo de nieve de referencia en grados-día	0.5 a 20
	SI _{nt}	(mm°C/d)	Intervalo de deshielo de nieve en grados-día	0 a 4
	SMin	(mm°C/d)	Coeficiente mínimo de deshielo de nieve en grados-día	≥0
	SPh	(d)	Desplazamiento de fase de la función sinusoidal	1 a 365
	ThetaCri	-	Contenido crítico relativo de agua en el manto de nieve	0.1
	Bp	(d/mm)	Coeficiente de fusión debido a la precipitación líquida	0.0125
	Tcp1	(°C)	Temperatura crítica mínima para la precipitación líquida	0
	Tcp2	(°C)	Temperatura crítica máxima para la precipitación sólida	4
	Tcf	(°C)	Temperatura crítica de deshielo	0
	HGR3Max	(m)	Altura máxima del depósito de infiltración	0 a 2
	KGR3	(1/s)	Coeficiente de liberación del depósito de infiltración	0.00025 a 0.1
	L	(m)	Longitud del plano	>0
	J0	-	Pendiente de escorrentía	>0
	Kr	(m ^{1/3} /s)	Coeficiente de Strickler	0.1 a 90
	CFR	-	Coeficiente de recongelación	0 a 1

Fuente: Manual Rs Minerve

CAPITULO III: MARCO METODOLÓGICO

3.1. Estudio general de la zona:

3.1.1 Ubicación de la Cuenca

Conforme a la Autoridad Nacional del Agua (ANA, 2015), la hoya hidrográfica del río Chancay–Lambayeque se emplaza en el septentrión peruano, abarcando jurisdicciones de los departamentos de Lambayeque y Cajamarca. En la demarcación de Lambayeque, el ámbito de la cuenca comprende porciones de las provincias de Chiclayo, Lambayeque y Ferreñafe; mientras que en Cajamarca se extiende sobre sectores de las provincias de Chota, Santa Cruz, San Miguel y Hualgayoc.

El río Chancay–Lambayeque halla su génesis en la laguna Mishacocha, adoptando inicialmente la denominación de quebrada Mishacocha. Este punto de origen se sitúa entre las elevaciones denominadas Coymolache y Los Callejones, a una cota aproximada de 3 800 m s.n.m. (ANA, 2015).

Desde la óptica geográfica, la cuenca se halla circunscrita entre los paralelos 06°21'12" y 06°57'09" de latitud austral, y los meridianos 78°32'17" y 80°10'39" de longitud occidental, conforme se representa en las Figuras N.º 2 y N.º 3 (ANA, 2015).

Por el norte : Cuenca del Río La Leche

Por el sur : Cuenca del Río Jequetepeque-Zaña

Por el este : Cuenca del Río Chotano

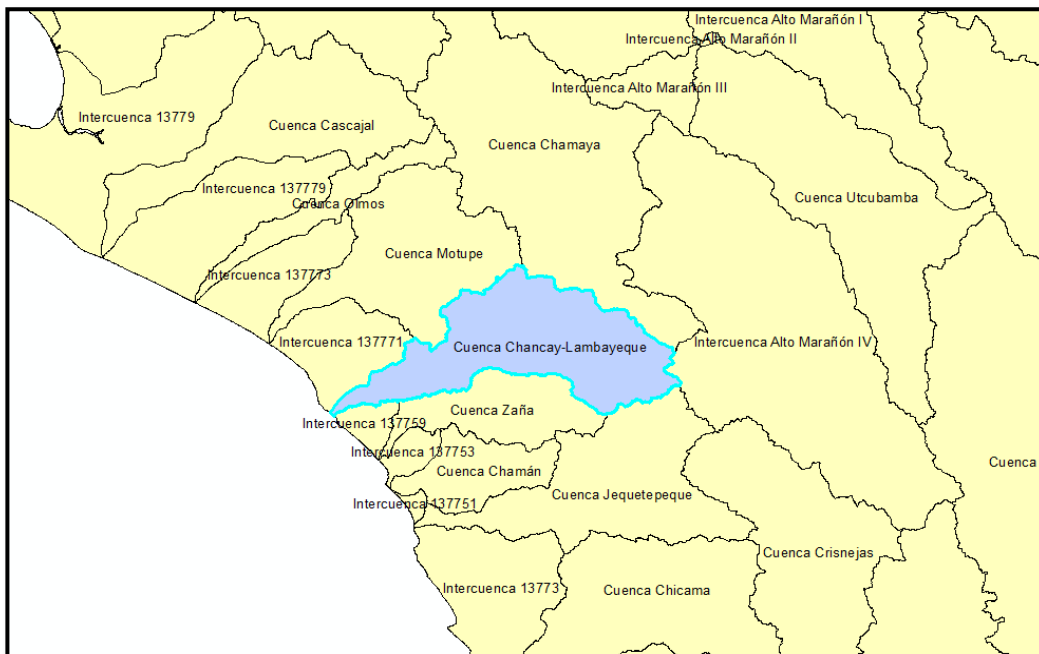
Por el Oeste : Océano Pacífico

Figura N° 07: Ubicación de los Departamentos de Lambayeque y Cajamarca



Fuente: Elaboración propia usando Software ArcGIS 10.3

Figura N° 08: Ubicación de la Cuenca Chancay-Lambayeque



Fuente: Elaboración propia usando Software ArcGIS 10.3

3.1.2. Clima:

De acuerdo con la Autoridad Nacional del Agua (ANA, 2015), la cuenca del río Chancay–Lambayeque exhibe una notoria oscilación climática, atribuible tanto a la incidencia de la corriente helada de Humboldt como al gradiente altitudinal que se extiende desde el litoral hasta la serranía. En el tramo inferior de la cuenca predomina un régimen climático subtropical xérico a semiárido, definido por una pluviometría exigua y temperaturas templadas, dotando a esta franja de un cariz marcadamente desértico. En la porción media, donde se emplaza el embalse Tinajones, se manifiesta un clima semiárido, con una mayor higrometría y la ocurrencia esporádica de precipitaciones estivales (entre enero y marzo), lo que configura una zona de transición entre el desierto costero y los ambientes altoandinos.

En la cuenca alta, el clima varía desde semiárido hasta subhúmedo y húmedo, dependiendo de la altitud. En estas zonas se registran mayores precipitaciones anuales, temperaturas más bajas y menor evaporación, especialmente en los sectores de páramo y zonas montañosas, ubicadas por encima de los 3 500 m s.n.m., donde las condiciones térmicas son más estables a lo largo del año (ANA, 2015).

3.1.3 Temperatura:

Según información de la ANA (ANA, 2015), el régimen térmico de la cuenca del río Chancay–Lambayeque presenta una variación espacial asociada principalmente a la altitud.

a) Temperatura mínima

Las temperaturas mínimas medias anuales en la cuenca oscilan aproximadamente entre 10,0 °C y 18,0 °C. En la cuenca baja, la influencia de la corriente de Humboldt contribuye a un clima templado a semitemplado, mientras que en los sectores altoandinos las temperaturas

mínimas disminuyen progresivamente con la altitud, registrándose los valores más bajos en las zonas más elevadas de la cuenca.

b) Temperatura máxima

Las temperaturas máximas medias anuales presentan una variación longitudinal de oeste a este, diferenciando claramente los sectores costero y andino. En conjunto, el régimen térmico de la cuenca registra valores máximos promedio comprendidos entre 19,0 °C y 30,0 °C, siendo los mayores valores característicos de la cuenca baja y los menores propios de las zonas de mayor altitud.

3.2. Recolección y compilación de datos:

3.2.1 Información Cartográfica:

La cartografía utilizada para el trazado limítrofe de la cuenca del río Chancay–Lambayeque fue derivada de repertorios digitales y planos oficiales. Se recurrió a insumos disponibles en la plataforma GEO GPS Perú, desde la cual se extrajo información topográfica de interés como curvas de nivel, entramado hídrico y cotas altitudinales, imprescindibles para la auscultación espacial de la cuenca.

De igual modo, se consultaron mapas nacionales oficiales que incorporan demarcaciones político-administrativas a escalas departamental, provincial y distrital, además de divisorias hidrográficas de las principales cuencas del país. Para el ámbito analizado se consideró un mosaico de empalme, el plano de subcuencas del Perú y las cartas nacionales designadas como 13-E, 13-F, 14-D, 14-E y 14-F, correspondientes al ámbito hidrográfico Chancay–Lambayeque.

3.2.2 Información pluviométrica

Los registros pluviométricos empleados en esta investigación fueron acopiados primordialmente de entidades estatales especializadas, entre las que sobresale el SENAMHI. Los valores de precipitación provienen de estaciones pluviométricas situadas en los sectores superior e intermedio de la cuenca del río Chancay–Lambayeque.

El análisis pluviométrico se desarrolló a partir de registros diarios de precipitación, considerando estaciones que cuentan con series históricas continuas de aproximadamente 30 años. La disponibilidad y continuidad de los datos en cada estación influyó directamente en los resultados obtenidos, constituyendo un insumo fundamental para la evaluación hidrológica y la posterior modelación de caudales.

Tabla 8: Estaciones pluviométricas consideradas

ESTACIONES PLUVIOMETRICAS CUENCA CHANCAY- LAMBAYEQUE								
n°	Nombre de estacion	Data Inicio	Data Fin	Tipo	Distrito	Latitud	Longitud	Altitud
1	Huambos	1993	2022	Convencional	Huambos	6° 27' 13.23"	78° 57' 47.34"	2258 m.s.n.m
2	Santa Cruz	1993	2022	Convencional	Santa Cruz	6° 37' 59.64"	78° 56' 51.41"	2002 m.s.n.m
3	Chancay Baños	1993	2022	Convencional	Chancay Baños	6°34'30"	78°52'2"	1677 m.s.n.m
4	Llama	1993	2022	Convencional	Llama	6°30'51,95"	79°1'21,43"	2096 m.s.n.m
5	Quilcate	1993	2022	Convencional	Catiluc	6°49'21,89"	78°44'38,40"	3076 m.s.n.m
6	Chotano-Lajas	1993	2022	Convencional	Lajas	6°33'35"	78°44'54"	2163 m.s.n.m
7	Udima	1993	2022	Convencional	Catache	6° 48' 53.08"	79° 5' 37.56"	2466 m.s.n.m

Fuente: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI).

3.2.3 Información hidrométrica.

Los datos hidrométricos considerados en la presente indagación provienen de las estaciones Racarrumi y Túnel Chotano, emplazadas dentro del perímetro hidrográfico de la cuenca del río Chancay–Lambayeque.

La información relativa a la estación Racarrumi fue recabada a partir de los archivos del SENAMHI, en tanto que los registros correspondientes a la estación Túnel Chotano fueron proporcionados por el Proyecto Especial Olmos Tinajones (PEOT).

Ambas estaciones suministran insumos esenciales para la configuración del patrón hidrológico de la cuenca y resultan cruciales en los procesos de ajuste y corroboración de los modelos hidrológicos aplicados. La ubicación geoespacial de dichas estaciones se consigna en la Tabla correspondiente.

Tabla 9: Estaciones hidrométricas consideradas

ESTACIONES HIDROMETRICAS CUENCA CHANCAY- LAMBAYEQUE								
n°	Nombre de estacion	Data Inicio	Data Fin	Tipo	Distrito	Latitud	Longitud	Altitud
1	Tunel Chotano	1993	2022	Hidrologica	Lajas	6°33'35"	78°44'28"	2148.2 m.s.n.m.
2	Racarumi	1993	2022	Hidrologica	Llama	6°38'1"	79°19'1"	255 m.s.n.m.

Fuente: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI).

Para la presente investigación, la modelación hidrológica se realizó considerando dos escenarios, definidos en función del aporte del Túnel Chotano a la cuenca Chancay–Lambayeque en sus tramos alto y medio. Esta diferenciación permite evaluar la influencia de dicho trasvase en la generación de caudales durante eventos de avenida máxima.

- **Escenario 1:** Simulación sin considerar el aporte del Túnel Chotano durante la avenida máxima.
- **Escenario 2:** Simulación incorporando el aporte del Túnel Chotano durante la avenida máxima.

La comparación de ambos escenarios permite analizar el impacto del trasvase sobre la respuesta hidrológica de la cuenca

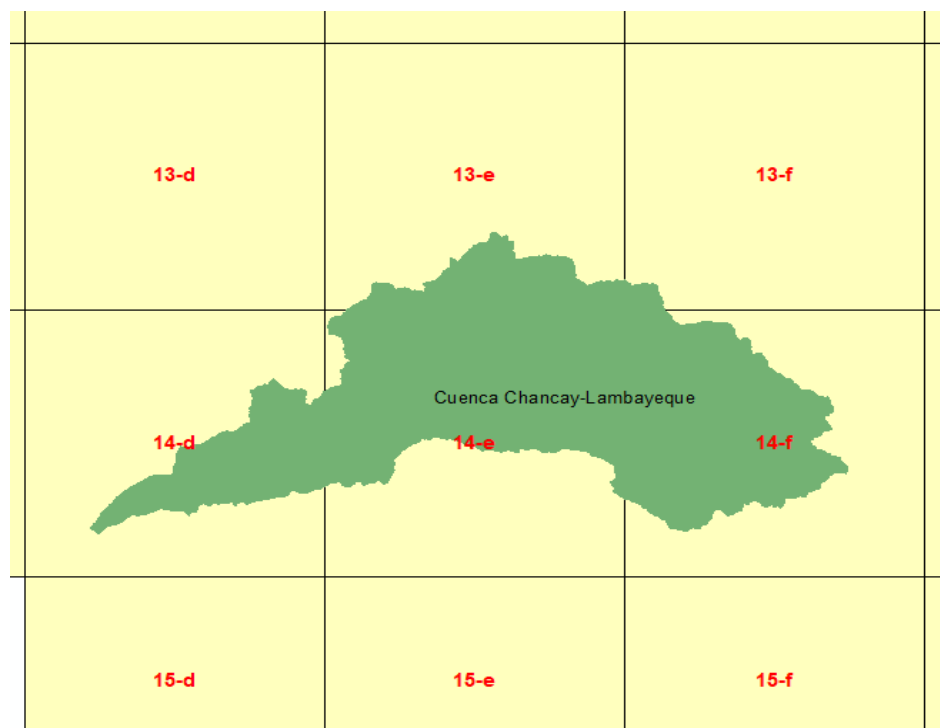
CAPITULO IV: CALCULOS Y PROCESAMIENTOS DE DATOS

4.1. Parámetros geomorfológicos:

4.1.1. Delimitación de la cuenca en estudio:

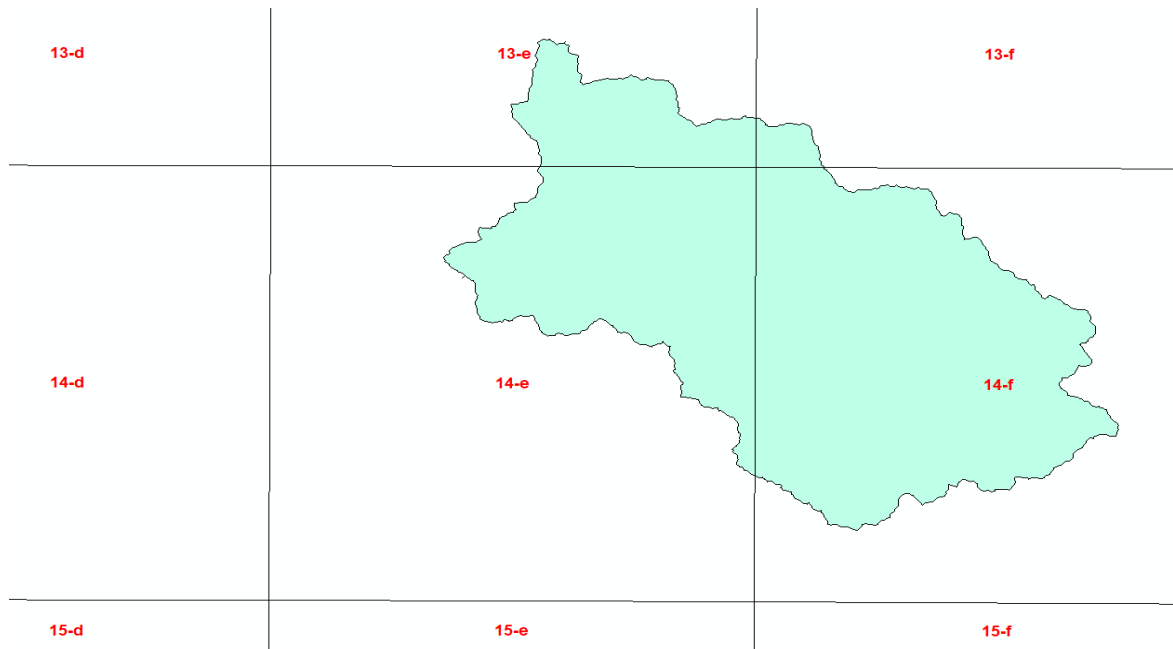
La delimitación de la cuenca Chancay–Lambayeque se realizó utilizando el software ArcGIS, herramienta empleada para el análisis y procesamiento de información geoespacial. Para este procedimiento se utilizó información cartográfica digital, a partir de la cual se definieron los límites hidrográficos de la cuenca. El proceso fue desarrollado en el entorno ArcGIS versión 10.3, cuyos resultados se presentan en la Figura N.º 8.

Figura N° 09: Delimitación de la Cuenca Chancay-Lambayeque



Fuente: Elaboración propia usando Software ArcGIS 10.3

Figura N° 10: Delimitación de la Cuenca Chancay-Lambayeque, parte Alta y Media



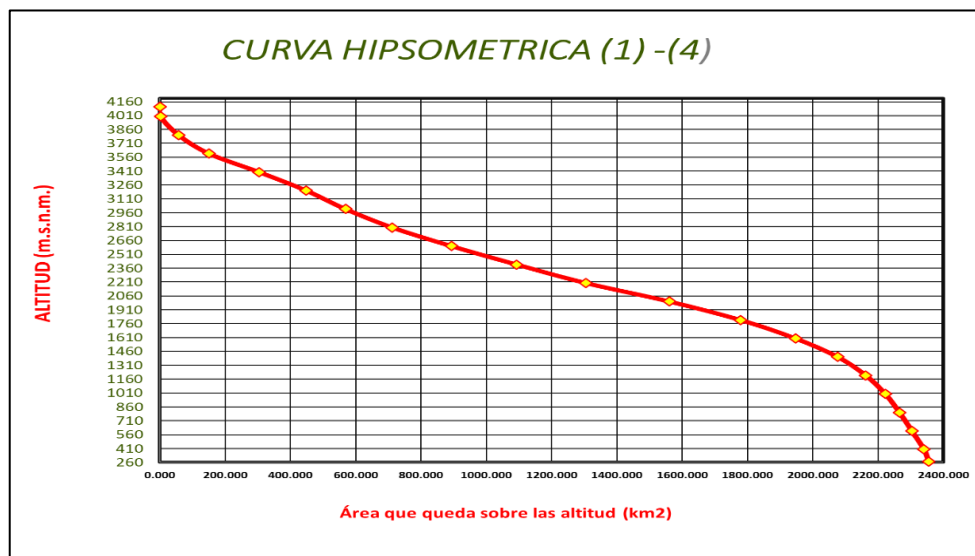
Fuente: Elaboración propia usando Software ArcGIS 10.3

4.1.2. Caracterización Geomorfológica de la cuenca.

La cuenca hidrográfica es una unidad natural donde la interacción entre factores geológicos, edáficos e hidrológicos condiciona el comportamiento del escurrimiento. Por ello, el análisis geomorfológico permite comprender la respuesta hidrológica de la cuenca.

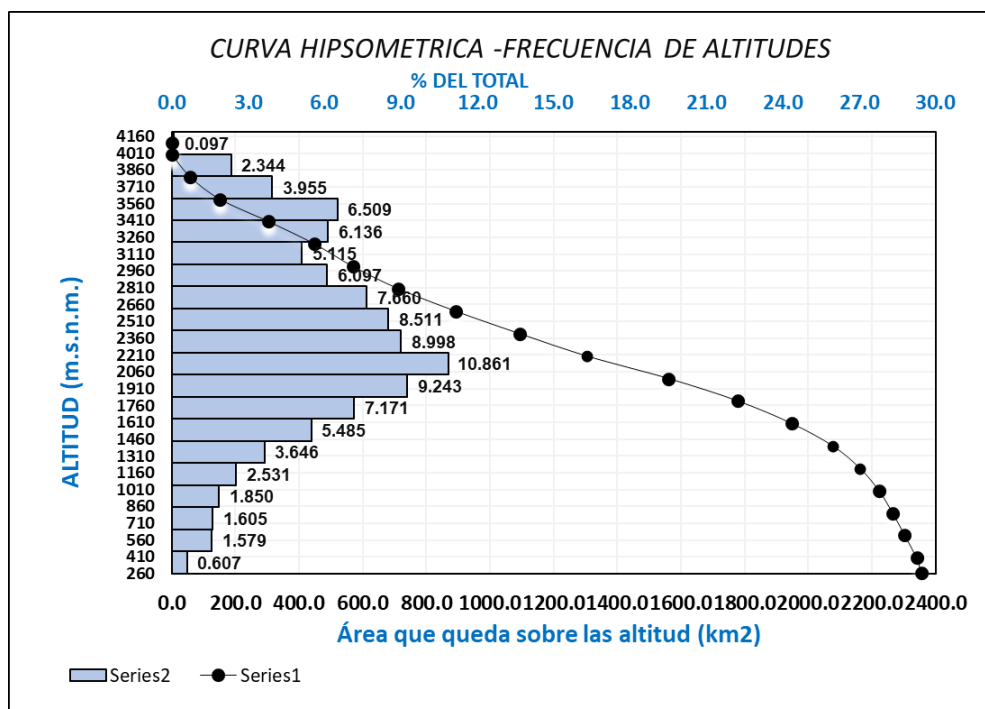
Los parámetros morfológicos y fisiográficos de la cuenca Chancay–Lambayeque, en su parte alta y media, fueron obtenidos mediante el procesamiento de información geoespacial en ArcGIS 10.3, con apoyo de hojas de cálculo. Los resultados se presentan de forma resumida en la Tabla 10 y de manera detallada en el Anexo N.º 02, junto con las curvas hipsométricas correspondientes.

Figura N° 11: Curva Hipsométrica de la parte alta y media de la Cuenca Chancay-Lambayeque



Fuente: Elaboración propia usando Software ArcGIS 10.3

Figura N° 12: Curva Hipsométrica y Frecuencia de altitudes de la parte alta y media de la Cuenca Chancay-Lambayeque



Fuente: Elaboración propia usando Software ArcGIS 10.3

Tabla 10: Características geomorfológicas de la parte alta y media de la Cuenca Chancay-Lambayeque

PARAMETRO	DESCRIPCIÓN	CUENCA PARTE ALTA y MEDIA CHANCAY- LAMBAYEQUE	UNIDAD
PARAMETRO DE FORMA			
A	ÁREA	2,362.71	Km ²
P	PERIMETRO	730.02	Km
Kc	Coefficiente Compacidad	1.60	-
PARAMETRO DE RELIEVE			
Hmax	Altitud máxima	4107	m.sn.m
Hmin	Altitud mínima	269	m.sn.m
Hmed	Altitud media	2355	m.sn.m
Hmf	Altitud frecuente	2200	m.sn.m
S	Pendiente	39.21	%

PARAMETRO DE LA RED HIDROGRÁFICA			
L	Longitud del cauce principal	117.89	Km
I	Longitud de la red hídrica	973.17	Km
S	Pendiente promedio	3.23%	%
n	Orden de río	5	-

Fuente: Elaboración propia.

4.2. Análisis de estaciones Pluviométricas.

4.2.1. Registro histórico.

Las estaciones pluviométricas consignadas en la Tabla 11 disponen de series históricas con una longitud promedio de aproximadamente 30 años, correspondientes al período comprendido entre 1993 y 2022, lo que garantiza una base de datos adecuada para el análisis hidrológico realizado.

Tabla 11: Registro histórico de precipitaciones

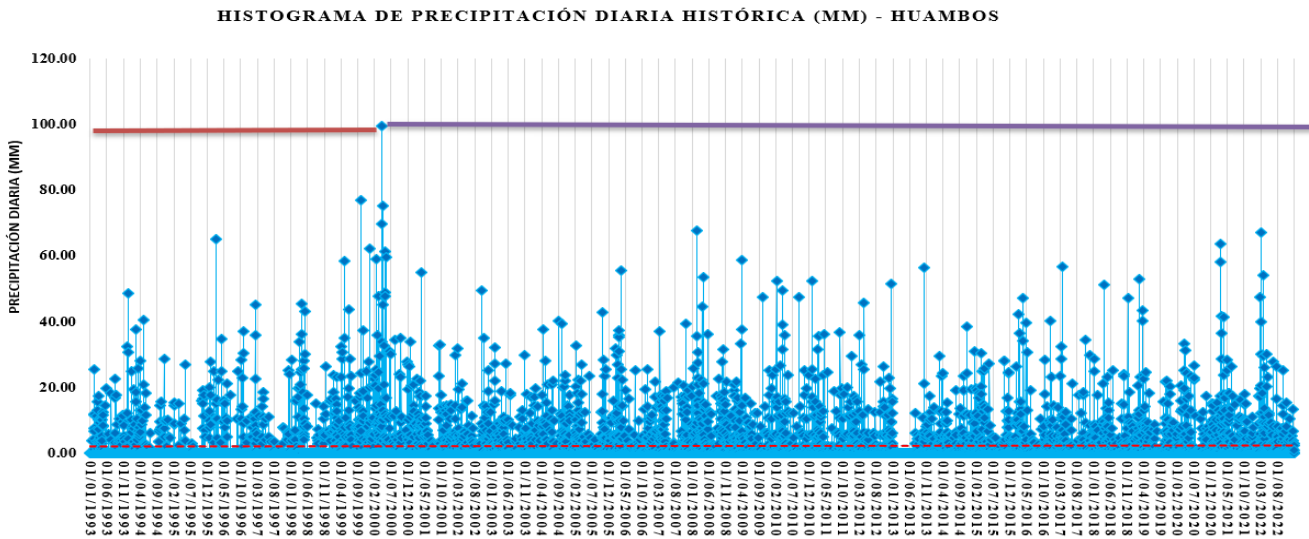
ESTACION	DISTRITO	ALTITUD	PERIODO DE REGISTRO																													
			1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Chancay Baños	Chancay Baños	1677																														
Chotano Lajas	Lajas	2148																														
Huambos	Huambos	2263																														
Llama	Llama	2096																												S/D	S/D	
Quilcate	Catilluc	3082																														
Santa Cruz	Santa Cruz	2002																							S/D							
Udima	Catache	2466																														

Fuente: Elaboración propia.

4.2.2. Análisis de Consistencia de Datos.

Una vez recopilados los registros de precipitación diaria, estos serán evaluados conforme al procedimiento descrito en el ítem 2.4.1, con el fin de verificar su consistencia temporal y estadística. En los casos en que se identifiquen inconsistencias en los datos, se aplicarán los métodos de corrección correspondientes, garantizando así la confiabilidad de la información utilizada en el análisis hidrológico.

Figura N° 13: Análisis de Saltos mediante Histogramas.



Fuente: Elaboración propia.

4.2.3. Evaluación y cuantificación

A partir del análisis de los histogramas de precipitación (ver Anexo N.º 2), se procedió a evaluar la consistencia de los registros de cada estación pluviométrica. Para ello, se analizaron posibles tendencias, cambios en la media, diferencias de medias entre distintos periodos y el grado de aleatoriedad de la precipitación, con el objetivo de identificar comportamientos anómalos que pudieran afectar la confiabilidad de los datos.

Tabla 12: Análisis de consistencia de la Estación Huambos

DATOS DUDOSOS Periodos Muestrales		DATOS CONFIABLES Periodos Muestrales	
Entre los años 01/01/1993 – 18/04/2000		Entre los años 19/04/2000- 31/12/2022	
Tamaño de la muestra (n1)=	2665	Tamaño de la muestra (n2)=	8292
Media de la muestra $\bar{X}_1$ =	2.11	Media de la muestra $\bar{X}_2$ =	2.29
Desviación Stand. (S1)=	6.80	Desviación Stand. (S2)=	6.12
Grados de Libertad (GL1)=	2664	Grados de Libertad (GL2)=	8291
RESULTADOS			
PRUEBA “T” DE STUDENT			
Desviación estándar ponderada:			6.29
Desviación de las diferencias de los promedios:			0.14
Cálculo del T, calculado (t_c) según:			1.29
Cálculo del valor critico de t, tabular T_t :			1.96
Grados de Libertad:			10955.00
CONCLUSION			
$ t_c = 1.29 < t_t = 1.9602$		HOMOGENEIDAD OK	
PRUEBA “F” DE FISHER			
Cálculo de F, Calculado (F_c) según:			1.24
Cálculo del F tabular (valor critico de F_t) F_t :			1.0528
CONCLUSION			
$ F_c = 1.24 > F_t = 1.0528$		NO HOMOGENEIDAD (CORREGIR LA PRECIPITACION)	

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 12 presenta el caso representativo de la estación Huambos, donde se identificó un cambio significativo en la serie alrededor del año 2000. Comportamientos similares fueron detectados en las estaciones Llama, Santa Cruz, Quilcate, Chotano-Lajas y Udimá. En contraste,

la estación Chancay Baños mostró una serie homogénea en todo el periodo de análisis. El detalle del análisis individual por estación se resume en la Tabla 13.

4.2.4. Corrección de datos:

Tal como se determinó que 6 estaciones no son homogéneas, por lo que se procede a corregir tal como se indicó en el ítem 2.4.1.1 en el apartado f) corrección de datos, donde se representa en la tabla 13:

Tabla 13: Corrección de datos no homogéneos

Estación	Homogeneidad	Período del Salto	Datos a corregir
Chotaño-Lajas	✗ No homogénea	1993 - 1998	$1.1098*(X_i) - 0.0067$
Huambos	✗ No homogénea	1993 - 2000	$0.899*(X_i) + 0.3928$
Llama	✗ No homogénea	1993 - 2000	$1.094*(X_i) + 0.11$
Quilcate	✗ No homogénea	2009 - 2022	$0.975*(X_i) + 0.2528$
Santa Cruz	✗ No homogénea	2000 - 2022	$1.3414*(X_i) - 0.3015$
Udima	✗ No homogénea	1993 - 2000	$0.5617*(X_i) + 0.6896$
Chancay Baños	☒ Homogénea	-	-

Fuente: Elaboración propia.

Tal como se indica en la columna “Datos a corregir”, la variable X_i corresponde a los valores diarios de precipitación ajustados para aquellas estaciones pluviométricas que presentaron saltos estadísticos significativos durante el período identificado como salto. En contraste, la estación Chancay Baños conservó su serie original, debido a que no se evidenciaron alteraciones sistemáticas a lo largo de todo el período de análisis.

4.2.5. Completación de datos

Una vez corregidos los registros diarios mediante las pruebas de T-Student y Fisher, se verificó que las series pluviométricas no presentaban valores atípicos ni inconsistencias, considerándose confiables para el análisis. Posteriormente, la completación de datos faltantes se realizó mediante el método de regresión lineal múltiple, empleando estaciones de referencia con registros completos.

Para cada estación con información incompleta, se evaluó su relación con tres estaciones base, seleccionándose aquella que mostró el mayor coeficiente de correlación lineal, con el fin de estimar los valores ausentes de manera más representativa.

La Tabla 14 presenta las estaciones completadas, las estaciones de referencia utilizadas y los coeficientes de correlación obtenidos, lo que respalda la confiabilidad de los datos completados.

Tabla 14: *Completación de datos faltantes por método de regresión lineal*

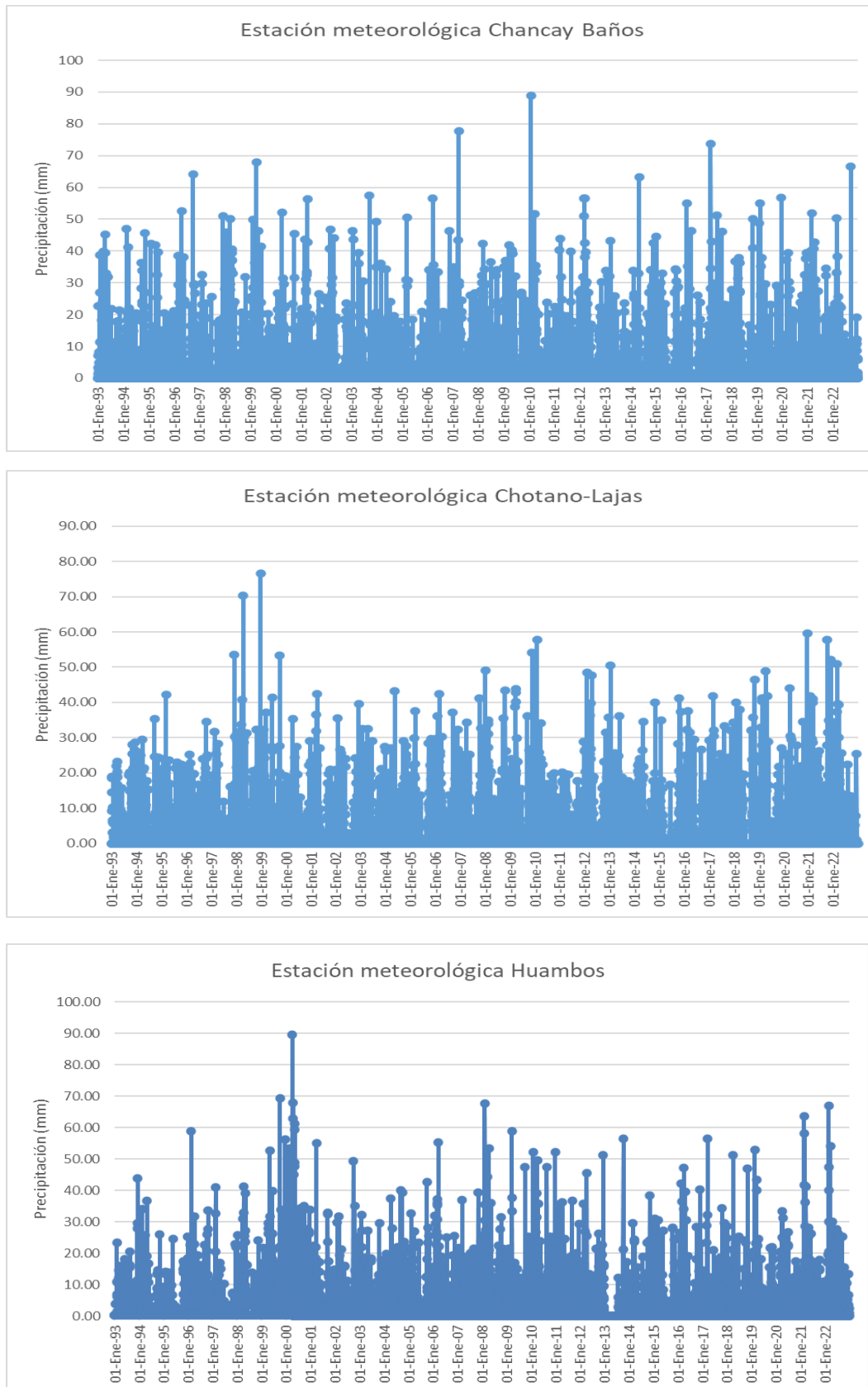
ESTACION DE REFERENCIA	COEFICIENTE DE CORRELACION	ESTACIÓN A COMPLETAR	CONCLUSIÓN
HUAMBOS	0.022	LLAMA	Los datos diarios faltantes de la estación Llama, serán completados con la estación Chotano-Lajas
CHOTANO-LAJAS	0.163		
QUILCATE	0.110		
UDIMA	0.437	SANTA CRUZ	Los datos diarios faltantes de la estación Santa Cruz, serán completados con la estación Udimá
QUILCATE	0.191		
CHOTANO-LAJAS	0.334		

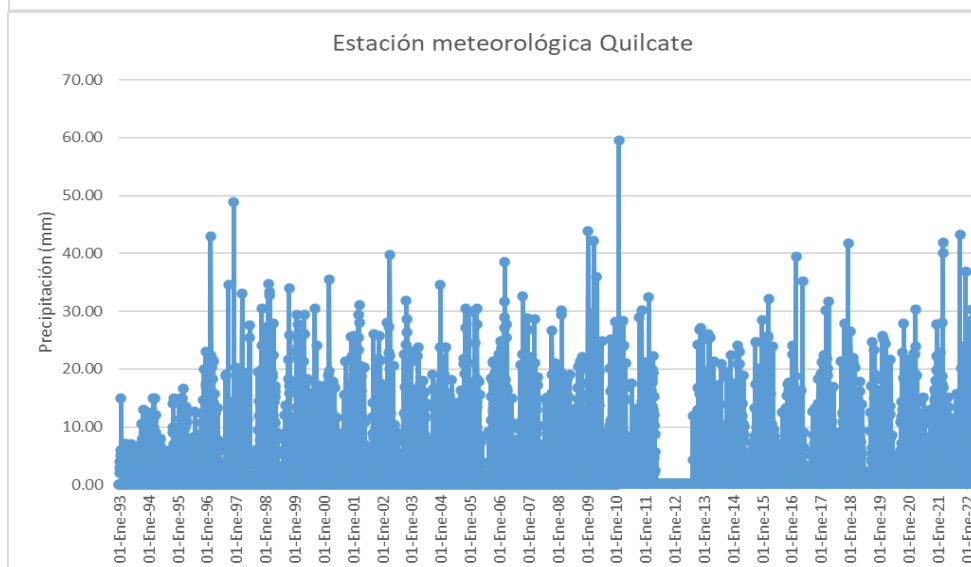
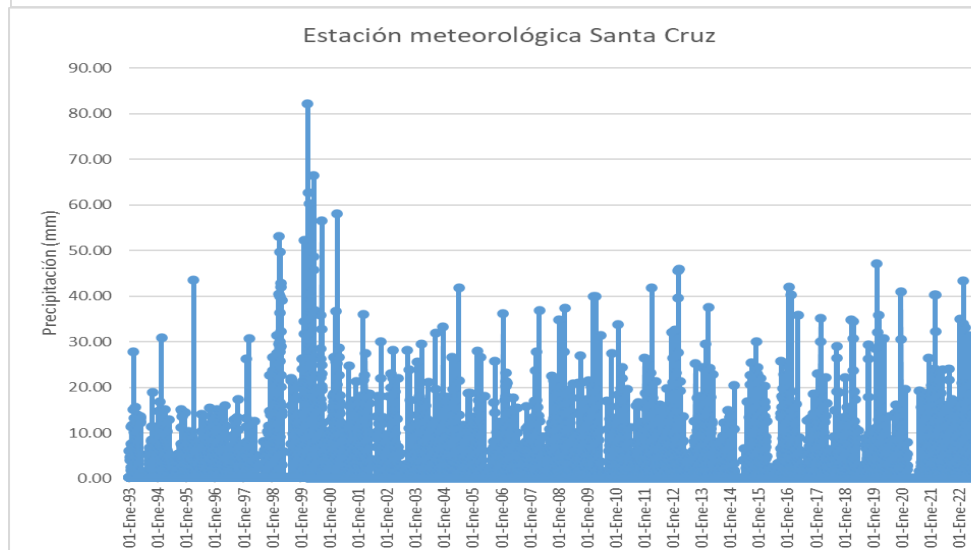
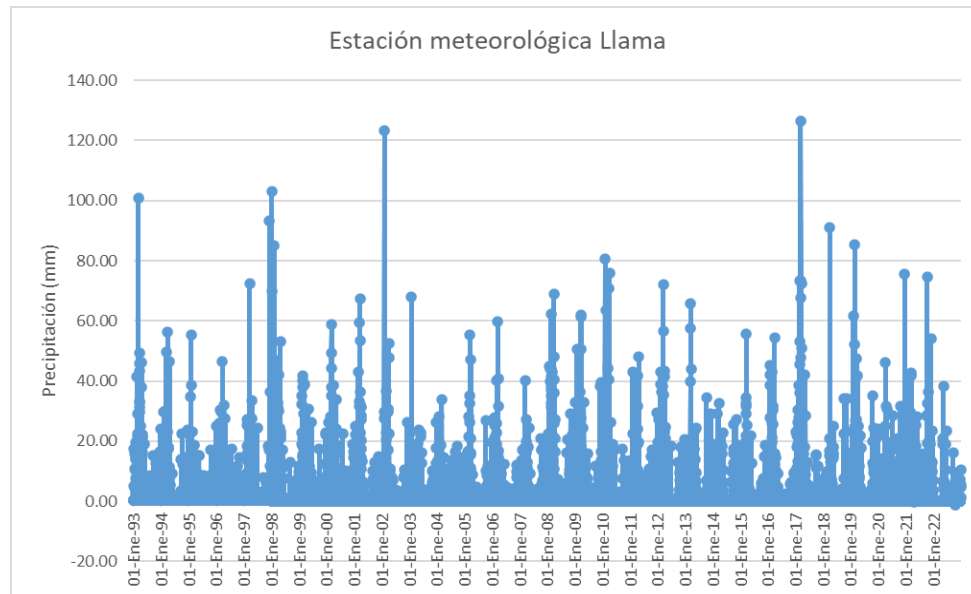
Fuente: Elaboración propia.

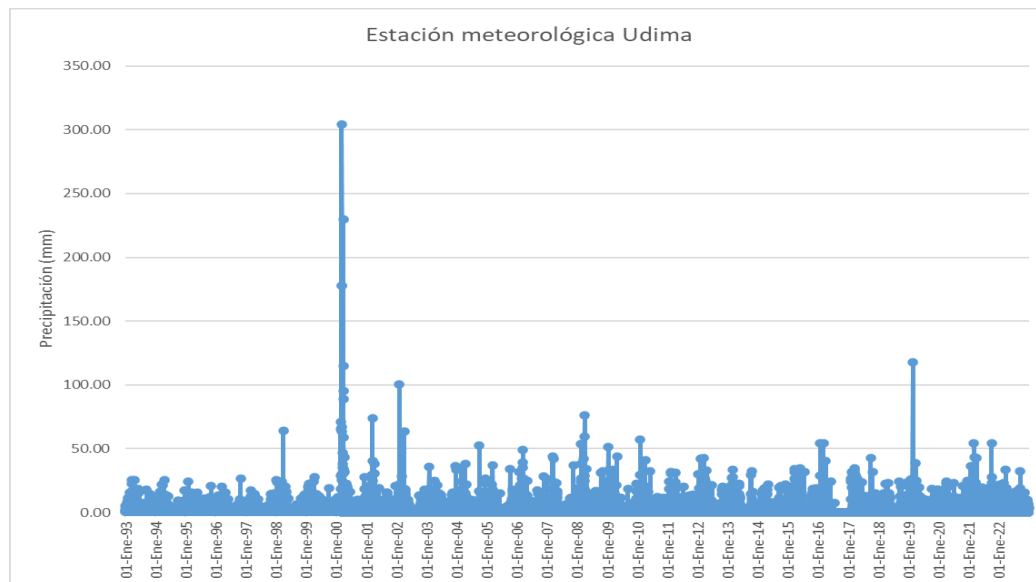
4.2.6. Registro completado de la precipitación diaria

Luego de aplicar los procesos de control de calidad, homogeneización y completación de datos, se obtuvieron las series finales de precipitación diaria, las cuales se muestran en la Figura 14. Estos registros constituyen la base de datos definitiva empleada para el modelamiento hidrológico en el software RS Minerve.

Figura N° 14: Registro histórico de precipitación diaria.







Fuente: Elaboración propia.

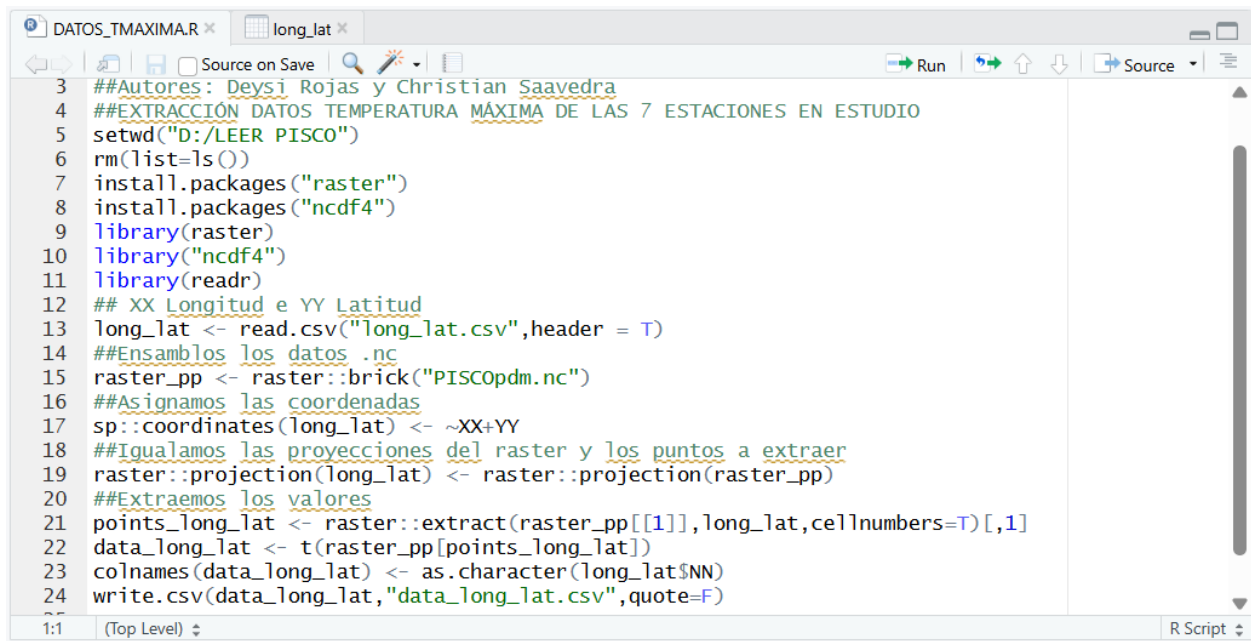
4.3. Análisis de la temperatura diaria.

4.3.1. Fuente de la información.

Los datos de temperatura máxima y mínima diaria fueron obtenidos del conjunto de datos PISCO-SENAMHI (Peruvian Interpolated data of SENAMHI's Climatological Observations), seleccionado por su cobertura temporal continua, consistencia espacial y por estar basado en la interpolación de registros observados del SENAMHI.

El procesamiento de la información se realizó mediante el software RStudio, empleando los paquetes raster, ncdf4 y readr para la descarga, lectura y organización de los datos. En la Figura 15 se presenta el flujo de procesamiento de la temperatura diaria a partir del dataset PISCO-SENAMHI.

Figura N° 15: Procesamiento de datos de temperatura en Rstudio.



```
3 ##Autores: Deysi Rojas y Christian Saavedra
4 ##EXTRACCIÓN DATOS TEMPERATURA MÁXIMA DE LAS 7 ESTACIONES EN ESTUDIO
5 setwd("D:/LEER PISCO")
6 rm(list=ls())
7 install.packages("raster")
8 install.packages("ncdf4")
9 library(raster)
10 library("ncdf4")
11 library(readr)
12 ## XX Longitud e YY Latitud
13 long_lat <- read.csv("long_lat.csv",header = T)
14 ##Ensamblamos los datos .nc
15 raster_pp <- raster::brick("PISCOpdm.nc")
16 ##Asignamos las coordenadas
17 sp::coordinates(long_lat) <- ~XX+YY
18 ##Igualamos las proyecciones del raster y los puntos a extraer
19 raster::projection(long_lat) <- raster::projection(raster_pp)
20 ##Extraemos los valores
21 points_long_lat <- raster::extract(raster_pp[[1]],long_lat,cellnumbers=T)[,1]
22 data_long_lat <- t(raster_pp[points_long_lat])
23 colnames(data_long_lat) <- as.character(long_lat$NN)
24 write.csv(data_long_lat,"data_long_lat.csv",quote=F)
```

Fuente: Elaboración propia.

4.3.2. Procesamiento de datos.

A partir de los valores diarios de temperatura máxima (Tmax) y mínima (Tmin), se calculó la temperatura media diaria (Tmed) para cada estación virtual utilizada en el modelamiento hidrológico, mediante la expresión promedio correspondiente

$$T_{med} = \frac{T_{max} + T_{min}}{2}$$

El uso de la temperatura media diaria responde a un requerimiento técnico del software RS Minerve, el cual emplea exclusivamente esta variable en los métodos de estimación de la evapotranspiración potencial disponibles (Oudin, Turc y McGuinness). En consecuencia, el modelo no admite el ingreso independiente de temperaturas máximas o mínimas. No se realizaron pruebas estadísticas de consistencia (como t-Student o Fisher), debido a que los datos provienen del producto PISCO-SENAMHI, el cual presenta alta homogeneidad y estabilidad climática, al haber sido generado mediante procesos de interpolación y corrección basados estaciones de control.

Asimismo, en el presente estudio la temperatura cumple un rol auxiliar, limitado al cálculo de la evapotranspiración potencial, y no constituye una variable principal de calibración o validación hidrológica.

El registro final de la temperatura media diaria se presenta en el Anexo 3.

4.4. Análisis de estaciones Hidrométricas.

4.4.1. Registro histórico.

Las estaciones hidrométricas presentadas en la Tabla 15 disponen de un registro histórico continuo de 30 años, correspondiente al período comprendido entre 1993 y 2022, el cual constituye la base de información utilizada para el análisis hidrológico desarrollado en la presente investigación.

Tabla 15: Registro histórico de las Estaciones Hidrométricas

ESTACIÓN	ALTITUD	PERIODO DE REGISTRO																													
		1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
TUNEL CHOTANO	2148.2																														
RACARRUMI	255																														

4.4.2. Análisis de Consistencia de Datos.

El análisis de consistencia de los datos diarios de caudal se efectuó siguiendo el mismo procedimiento aplicado a las series de precipitación, descrito en la Sección 4.2.2. Dicho análisis incluyó la evaluación gráfica de las series, la aplicación de pruebas de homogeneidad (t de Student y Fisher), así como la identificación de valores atípicos, considerando las estaciones Racarrumi y Túnel Chotano.

Figura N° 16: Análisis de Saltos mediante Histogramas, E. Racarrumi

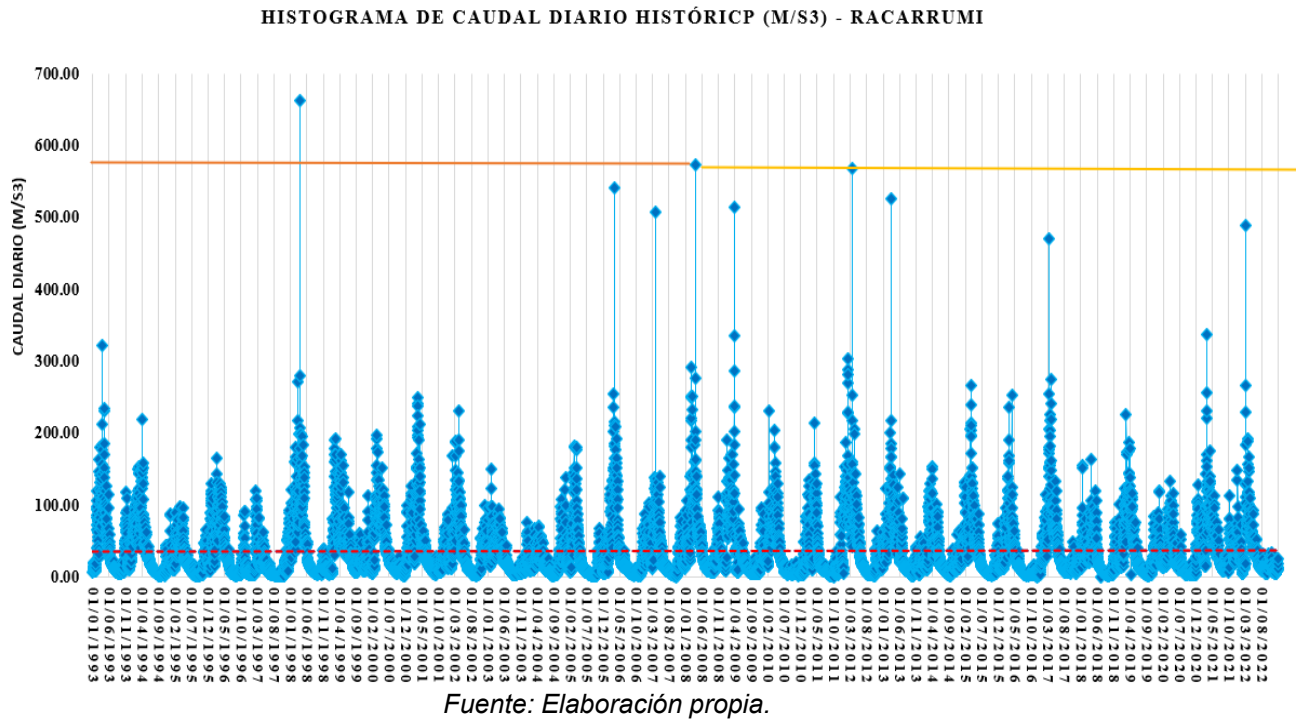
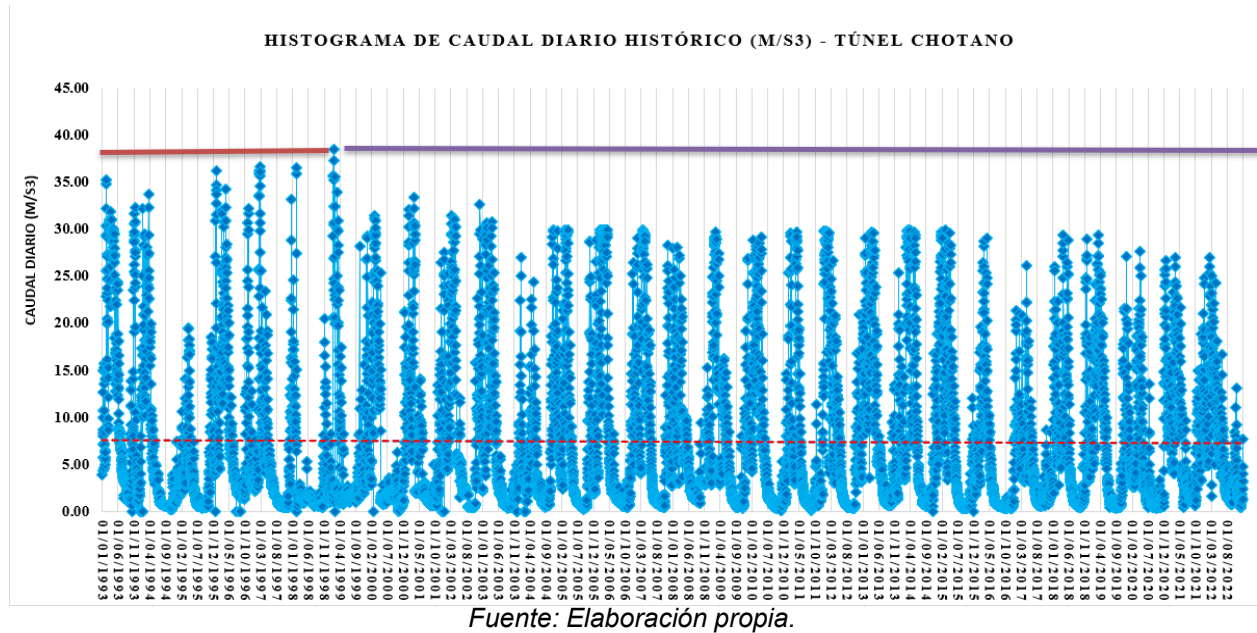


Figura N° 17: Análisis de Saltos mediante Histogramas, E. Túnel Chotano



4.4.3. Evaluación y cuantificación

Se evaluó la consistencia de los registros diarios de caudal en cada estación hidrométrica, analizando la presencia de tendencias, cambios en la media, diferencias de media entre distintos periodos y la aleatoriedad de la serie. Los resultados obtenidos de estas evaluaciones se presentan en las Tablas 16 y 17.

Tabla 16: Análisis de consistencia de la Estación Racarrumi

DATOS DUDOSOS Periodos Muestrales		DATOS CONFIABLES Periodos Muestrales	
Entre los años 01/01/1993 – 02/04/2008		Entre los años 03/04/2008- 31/12/2022	
Tamaño de la muestra (n1)=	5571	Tamaño de la muestra (n2)=	5386
Media de la muestra $\bar{X}_1$ =	36.56	Media de la muestra $\bar{X}_2$ =	37.71
Desviación Stand. (S1)=	42.26	Desviación Stand. (S2)=	42.48
Grados de Libertad (GL1)=	5570	Grados de Libertad (GL2)=	5385
RESULTADOS			
PRUEBA “T” DE STUDENT			
Desviación estándar ponderada:			42.36
Desviación de las diferencias de los promedios:			0.81
Cálculo del T, calculado (tc) según:			1.42
Cálculo del valor critico de t, tabular Tt:			1.96
Grados de Libertad:			10955.00
CONCLUSION			
$ t_c = 1.42 < t_t = 1.9602$		HOMOGENEIDAD OK	
PRUEBA “F” DE FISHER			
Cálculo de F, Calculado (Fc) según:			1.01
Cálculo del F tabular (valor critico de Ft) Ft:			1.0455
CONCLUSION			
$ F_c = 1.01 < F_t = 1.0455$		HOMOGENEIDAD OK	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 17: Análisis de consistencia de la Estación Túnel Chotano

DATOS DUDOSOS Periodos Muestrales		DATOS CONFIABLES Periodos Muestrales	
Entre los años 01/01/1993 – 29/01/1999		Entre los años 30/01/1999- 31/12/2022	
Tamaño de la muestra (n1)=	2220	Tamaño de la muestra (n2)=	8737
Media de la muestra $\bar{X}_1$ =	7.18	Media de la muestra $\bar{X}_2$ =	7.53
Desviación Stand. (S1)=	8.45	Desviación Stand. (S2)=	7.96
Grados de Libertad (GL1)=	2219	Grados de Libertad (GL2)=	8736
RESULTADOS			
PRUEBA “T” DE STUDENT			
Desviación estándar ponderada:			8.06
Desviación de las diferencias de los promedios:			0.19
Cálculo del T, calculado (tc) según:			1.83
Cálculo del valor critico de t, tabular Tt:			1.96
Grados de Libertad:			10955.00
CONCLUSION			
$ t_c = 1.83 < t_t = 1.9602$		HOMOGENEIDAD OK	
PRUEBA “F” DE FISHER			
Cálculo de F, Calculado (Fc) según:			1.13
Cálculo del F tabular (valor critico de Ft) Ft:			1.0563
CONCLUSION			
$ F_c = 1.13 > F_t = 1.0563$		NO HOMOGENEIDAD (CORREGIR LA PRECIPITACION)	

Fuente: Elaboración propia.

Tal como se aprecia en las Tablas 16 y 17, el análisis de consistencia aplicado a las estaciones hidrométricas Racarrumi y Túnel Chotano muestra comportamientos diferenciados. La estación Racarrumi presenta resultados homogéneos en todas las pruebas evaluadas, lo que permite concluir que sus registros diarios de caudal son consistentes y confiables.

En contraste, la estación Túnel Chotano evidencia falta de homogeneidad en la desviación estándar, situación que se confirma mediante la aplicación de la prueba de Fisher, cuyos resultados indican no homogeneidad de la serie. En consecuencia, se determina que los datos de caudal de la estación Túnel Chotano no son consistentes, por lo que se hace necesaria su corrección antes de ser utilizados en el proceso de modelamiento hidrológico.

4.4.4. Corrección de datos:

De acuerdo con los resultados del análisis de consistencia, se determinó que la estación hidrométrica Túnel Chotano presenta falta de homogeneidad en su serie de caudales diarios. En consecuencia, se procedió a la corrección de los datos siguiendo el procedimiento descrito en el ítem 2.4.1.1, apartado f) Corrección de datos.

En la Tabla 18 se resumen los períodos afectados y las ecuaciones de corrección utilizadas.

Tabla 18: Corrección de datos diarios de la Estaciones Hidrométricas

Estación	Homogeneidad	Período del Salto	Datos a corregir
Racarrumi	☒ Homogénea	1993 - 2008	-
Túnel Chotano	☒ No homogénea	1993 - 1999	$0.9424*(X_i)+0.7643$

Fuente: Elaboración propia.

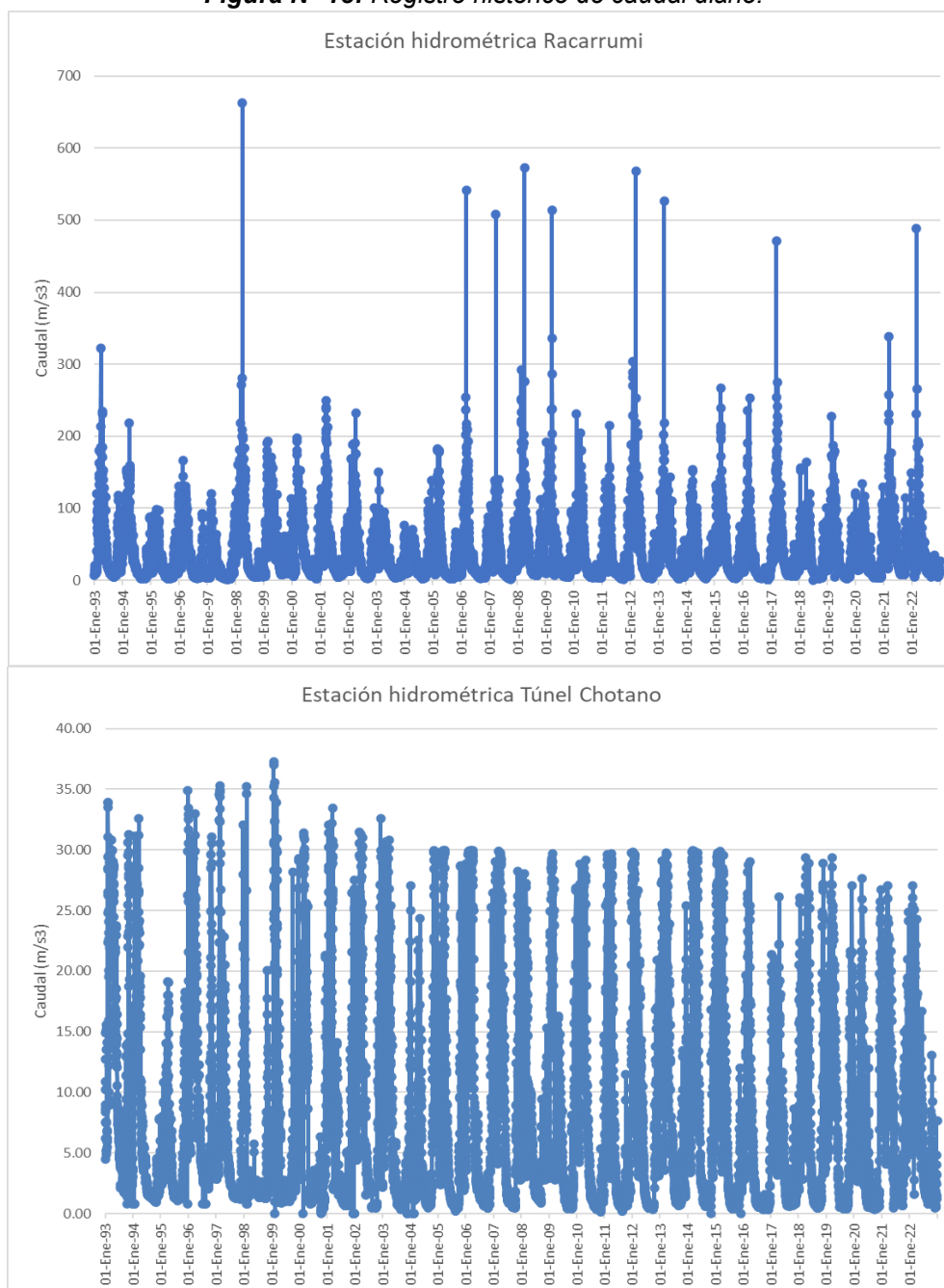
De manera similar al procedimiento aplicado para la precipitación, los valores diarios de caudal correspondientes a los períodos con saltos estadísticos significativos fueron ajustados mediante factores de corrección. En este contexto, X_i representa los valores originales de caudal diario a corregir. Esta etapa permitió homogenizar la serie hidrométrica y garantizar su confiabilidad para las etapas posteriores del análisis.

4.4.5. Completación de datos

Una vez aplicada la corrección correspondiente, se obtuvo una serie continua y completa de caudales diarios para ambas estaciones hidrométricas. Dado que no se identificaron datos faltantes, no fue necesario aplicar métodos adicionales de completación. Con la serie ya corregida y depurada, se procedió a la verificación de la presencia de datos dudosos o atípicos en los registros de caudales máximos, etapa previa al análisis de frecuencia y determinación de los períodos de retorno.

La Figura 18 muestra el comportamiento temporal de los caudales diarios correspondientes a las estaciones Racarrumi y Túnel Chotano, los cuales constituyen la base hidrológica para el análisis de eventos extremos.

Figura N° 18: Registro histórico de caudal diario.



Fuente: Elaboración propia.

4.4.6. Prueba de datos dudosos.

La prueba de consistencia de caudales máximos anuales se realizó en las estaciones Racarrumi y Túnel Chotano, siendo esta última incluida por su aporte de trasvase en la cuenca en estudio. Los resultados indican que los registros históricos de la estación Racarrumi no presentan valores dudosos, ya que todos los caudales máximos anuales se encuentran dentro de los límites superior e inferior esperados.

Tabla 19: Prueba de datos dudosos en las estaciones en estudio.

ESTACIÓN	REGISTRO HISTÓRICO (30 AÑOS)		PRUEBA DE DATOS DUDOSOS		EVALUACIÓN
	Caudal Máx. Mensual (m3/s)	Caudal Mín. Mensual (m3/s)	Q.Máx. Mensual Perm. (m3/s)	Q.Min. Mensual Perm. (m3/s)	
RACARRUMI	662.20	119.66	1034.90	68.90	Todos los datos cumplen
TUNEL CHOTANO	38.44	26.14	40.30	23.90	Todos los datos cumplen

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, tras la aplicación de los análisis de consistencia, la corrección de los registros inconsistentes y la verificación de la ausencia de valores dudosos (Tabla N° 19), se presentan los caudales máximos anuales de las estaciones Racarrumi y Túnel Chotano (Tabla 20). Estos registros constituyen la base para la estimación de los caudales asociados a los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500 y 1000 años, mediante la aplicación de métodos probabilísticos estadísticos

Tabla 20: Registro de caudales máximos de la Estación Racarrumi y Túnel Chotano.

AÑOS DISPONIBLES	REGISTRO DE LA ESTACIÓN RACARRUMI	REGISTRO DE LA ESTACIÓN TÚNEL CHOTANO
	CAUDAL MAXIMO m3/s	CAUDAL MAXIMO m3/s
1993	322.230	35.20
1994	218.65	33.76
1995	130.12	36.21
1996	166.05	34.20
1997	119.66	36.64
1998	662.20	36.57
1999	193.16	38.44
2000	197.72	31.39
2001	249.05	33.43
2002	231.88	32.59
2003	149.95	30.84
2004	138.36	29.95
2005	182.55	29.95
2006	541.39	29.97
2007	508.20	29.90
2008	572.90	28.03
2009	513.88	29.67
2010	230.45	29.13
2011	214.39	29.76
2012	568.16	29.83
2013	526.45	29.74
2014	153.17	29.92
2015	267.20	29.87
2016	253.38	29.02
2017	470.55	26.14
2018	164.40	35.40
2019	226.86	29.34
2020	156.87	27.63
2021	374.65	27.03
2022	488.63	27.04
PROMEDIO	306.44	31.22
MAX	662.20	38.44
MIN	119.66	26.14

Fuente: Elaboración propia

4.5. Proyección de caudales

4.5.1 Proyección de caudales estación Racarrumi

La serie de caudales máximos anuales de la estación Racarrumi, una vez validada y comprobada la ausencia de valores dudosos, fue utilizada para el análisis de frecuencia mediante la aplicación de diversos métodos estadísticos (Nash, Lebediev, Gumbel y Log-Pearson III) y probabilísticos (Log-normal, Log-normal de dos parámetros, Gamma de tres parámetros, Log-Pearson y Log-Gumbel).

Los procedimientos desarrollados para la aplicación de cada método se describen detalladamente en el Anexo 6, de acuerdo con la metodología propuesta por Villón, M. (Hidrología).

En las Tablas 21 y 22 se presentan los caudales estimados para los distintos periodos de retorno, obtenidos a partir de ambos enfoques, mientras que sus correspondientes representaciones gráficas se muestran en las Figuras 19 y 20, respectivamente.

Tabla 21: Proyección de caudales máximos con los métodos Estadísticos, Estación Racarrumi

T (años)	GUMBEL Qd (m3/s)	NASH Qd (m3/s)	LEVEDIED Qd (m3/s)	LOG PEARSON III Qd (m3/s)
2	369.37	343.34	265.50	259.97
5	528.37	505.20	447.96	412.50
10	741.58	615.01	572.22	533.54
25	878.77	756.21	737.16	710.59
50	982.55	862.32	850.31	860.93
100	1086.33	968.50	965.83	1027.91
200	1190.11	1074.95	1078.95	1213.70
500	1327.30	1216.13	1278.23	1475.32
1000	1431.08	1323.24	1351.38	1730.20

Fuente: Elaboración propia

Figura N° 19: Proyección de caudales máximos con los métodos estadísticos, Estación Racarrumi.
Fuente: Elaboración propia

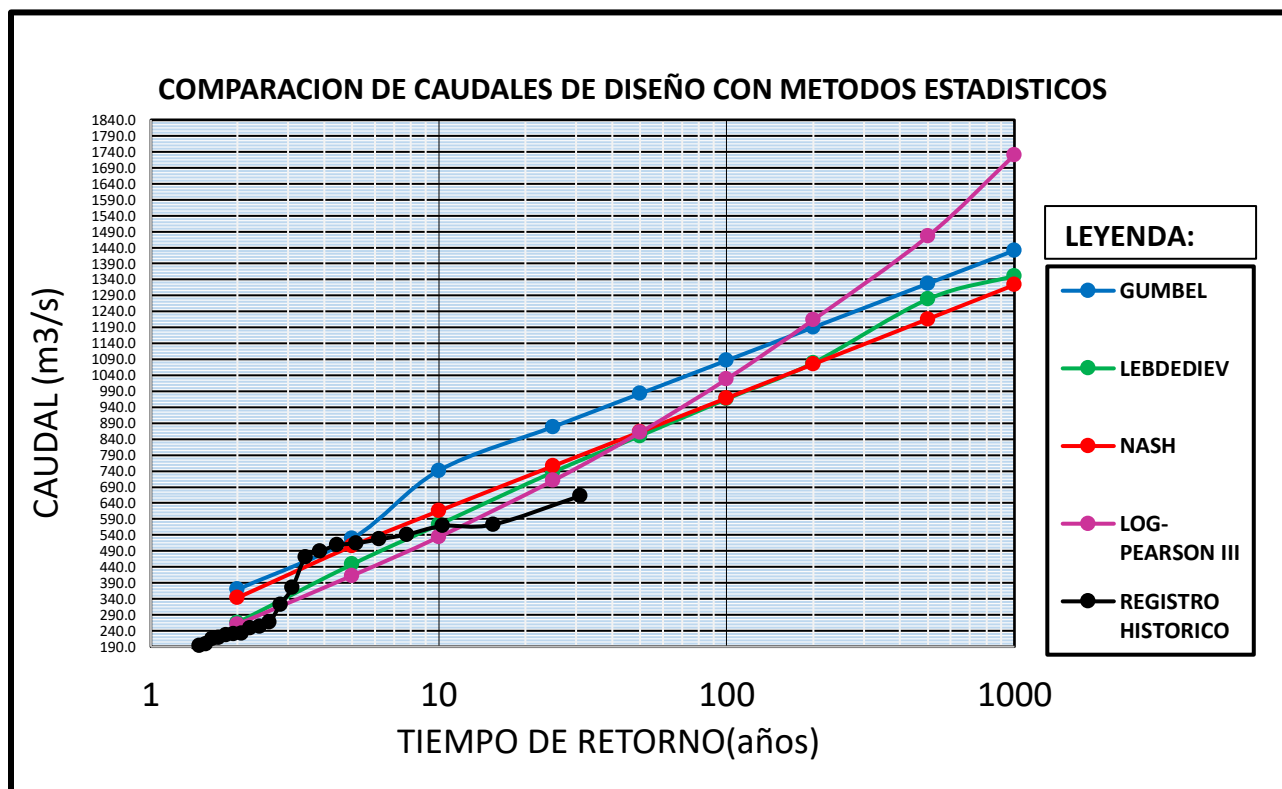
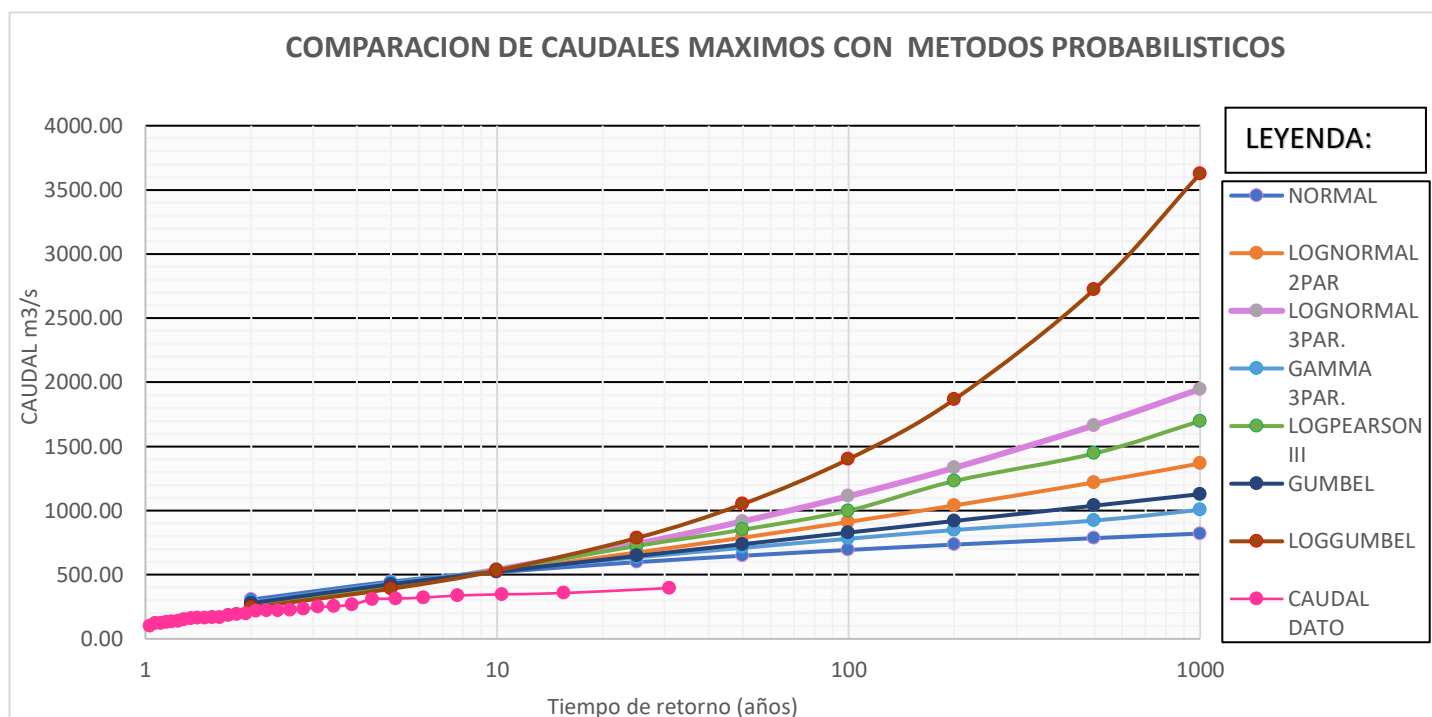


Tabla 22: Proyección de caudales máximos con los métodos Probabilísticos, Estación Racarrumi.

TR (AÑOS)	NORMAL	LOGNORMAL 2 P.	LOGNORMAL 3 P.	GAMMA 3P.	LOG- PEARSON III	GUMBEL	LOG- GUMBEL
	Qd (m3/s)	Qd (m3/s)	Qd(m3/s)	Qd(m3/s)	Qd(m3/s)	Qd(m3/s)	Qd(m3/s)
2	306.44	267.09	250.59	286.45	253.34	279.08	244.88
5	446.50	416.34	406.94	436.34	407.38	426.26	390.64
10	519.65	525.34	539.72	529.61	537.03	523.71	532.20
25	597.89	673.47	741.27	635.37	724.44	646.83	786.61
50	648.08	789.17	916.33	709.81	851.14	738.17	1051.09
100	693.43	912.14	1113.07	780.26	1000.00	828.84	1401.49
200	734.96	1040.43	1333.43	849.05	1230.27	919.18	1866.74
500	785.16	1220.08	1664.41	922.66	1445.44	1038.36	2724.77
1000	821.07	1367.34	1947.47	1005.94	1698.24	1128.43	3626.31

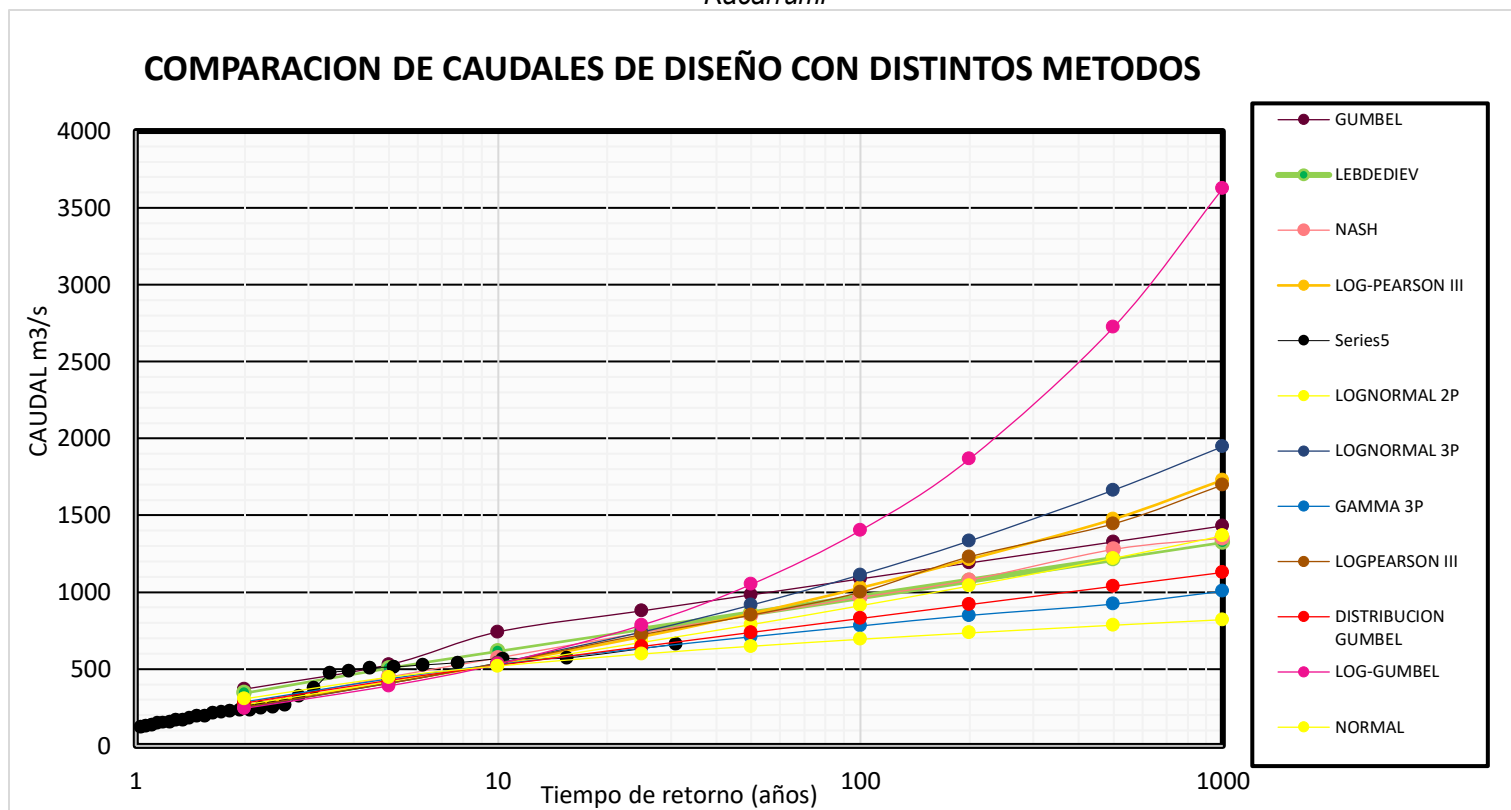
Fuente: Elaboración propia

Figura N° 20: Proyección de caudales máximos con los métodos probabilísticos, E. Racarrumi



Posteriormente, con el propósito de identificar la distribución que mejor representa el comportamiento de los registros históricos, se integraron los resultados de ambos enfoques en una única gráfica comparativa, presentada en la Figura 21.

Figura N° 21: Proyección de caudales máximos con los métodos probabilísticos y estadísticos, E. Racarrumi



Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la Figura 21, el análisis gráfico permite identificar la distribución que reproduce con mayor precisión el comportamiento de los caudales máximos observados. En este caso, la distribución Log Normal de tres parámetros, correspondiente al enfoque probabilístico, presenta el mejor ajuste al registro histórico, por lo que fue seleccionada para la estimación de los caudales máximos asociados a los diferentes periodos de retorno.

Los resultados finales obtenidos mediante la distribución seleccionada se presentan en la Tabla 23, donde se consignan los caudales máximos estimados para cada periodo de retorno analizado.

Tabla 23: Proyección de caudales máximos mediante el método Log Normal 3 Parámetros, E. Racarrumi.

T (años)	Log Normal 3 Parámetros Qd (m3/s)
2	250.59
5	406.94
10	539.72
25	741.27
50	916.33
100	1113.07
200	1333.43
500	1664.41
1000	1947.47

Fuente: Elaboración propia

4.5.2. Proyección de caudales estación Túnel Chotano

De manera análoga a lo desarrollado en el ítem 4.5.1 para la estación Racarrumi, se aplicó el mismo procedimiento metodológico en el presente análisis. Como resultado, se obtuvo la gráfica comparativa de los distintos métodos estadísticos y probabilísticos, cuyo desarrollo se detalla en el Anexo 6. A partir de dicha comparación, se presenta la proyección de caudales de la estación Túnel Chotano, identificándose al método de Gumbel como el que mejor representa el comportamiento de los registros.

Tabla 24: Proyección de caudales máximos mediante el método Gumbel, E. Túnel Chotano.

T (años)	GUMBEL Qd (m3/s)
2	32.4
5	35.5
10	39.7
25	42.4
50	44.4
100	46.4
200	48.5
500	51.1
1000	53.2

Fuente: Elaboración propia.

El tiempo de concentración es un parámetro clave en la modelación hidrológica, ya que representa el tiempo que tarda el escurrimiento superficial generado en el punto más alejado de una subcuenca en alcanzar su salida. En el software RS Minerve, este parámetro se incorpora mediante el Lag Time, permitiendo una mejor representación de la respuesta hidrológica frente a los eventos de precipitación.

Para el presente estudio, la cuenca Chancay media-alta fue dividida en nueve subcuencas, con el objetivo de capturar la variabilidad espacial de los procesos hidrológicos y facilitar la calibración de los modelos. El cálculo del tiempo de concentración se detalla en el Anexo 4, donde se evaluaron distintos métodos empíricos, seleccionándose finalmente el método de Témez por su adecuada adaptación a las características fisiográficas de la cuenca, tales como la pendiente media, la longitud y la morfología del cauce principal.

Los tiempos de concentración obtenidos para cada subcuenca se presentan en la Tabla 25.

Tabla 25: Tiempo de concentración por método Témez

N°	SUBCUENCA	AREA (KM2)	TC FINAL (Horas)	TLAG (HORAS)	TLAG (MINUTOS)	S (M/M)
1	SC1	132.2013	6.92	4.15	249.03	0.03
2	SC2	140.6279	4.37	2.62	157.21	0.02
3	SC3	313.3568	7.56	4.53	272.04	0.02
4	SC4	58.779683	4.39	2.63	157.91	0.06
5	SC5	355.6495	7.37	4.42	265.42	0.04
6	SC6	201.0934	1.72	1.03	61.91	0.06
7	SC7	256.3471	5.56	3.34	200.30	0.02
8	SC8	536.2753	4.91	2.94	176.61	0.03
9	SC9	368.3745	2.82	1.69	101.62	0.01

Fuente: Elaboración propia

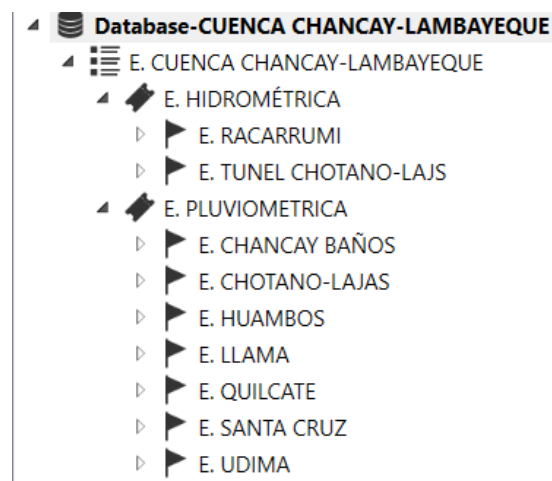
4.7. Construcción del modelo hidrológico en Rs Minerve

4.7.1. Construcción de la base de datos

La primera fase del proceso corresponde a la construcción de la base de datos, la cual integra la información hidrometeorológica necesaria para el modelamiento, específicamente temperatura, evapotranspiración y caudal.

En la Figura 22 se presenta la estructura de dicha base de datos para la cuenca en estudio, donde se muestran las estaciones consideradas y los parámetros asociados a cada una de ellas.

Figura N° 22: Estructura de los datos a utilizar en el programa Rs-Minerve

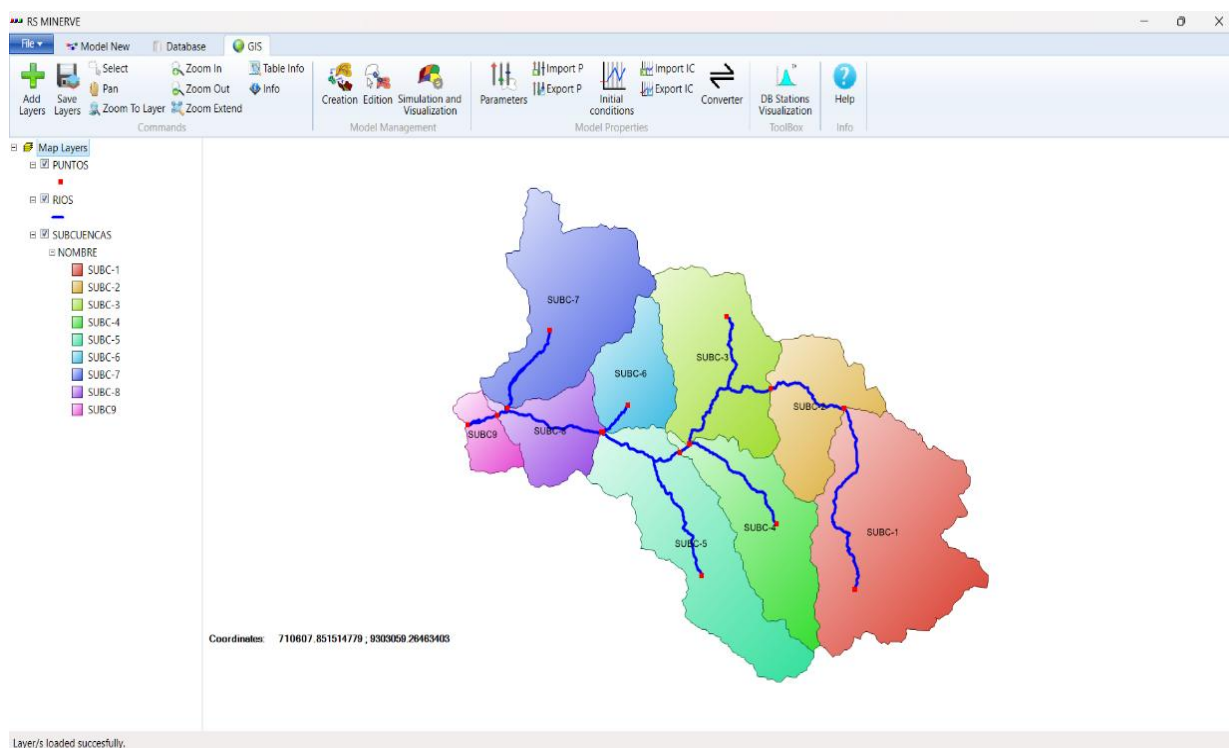


Fuente: Elaboración propia

4.7.2. Construcción del modelo hidrológico en el apartado GIS

Para la construcción del modelo hidrológico se dividió la cuenca en nueve subcuencas. La información espacial de cada una fue procesada en el software ArcGIS, donde se generaron y almacenaron las capas correspondientes. Posteriormente, dichas capas fueron exportadas al programa RS Minerve mediante el módulo RS-GIS, tal como se muestra en la Figura 23.

Figura N° 23: Componentes necesarios para el modelamiento hidrológico



Fuente: Elaboración propia

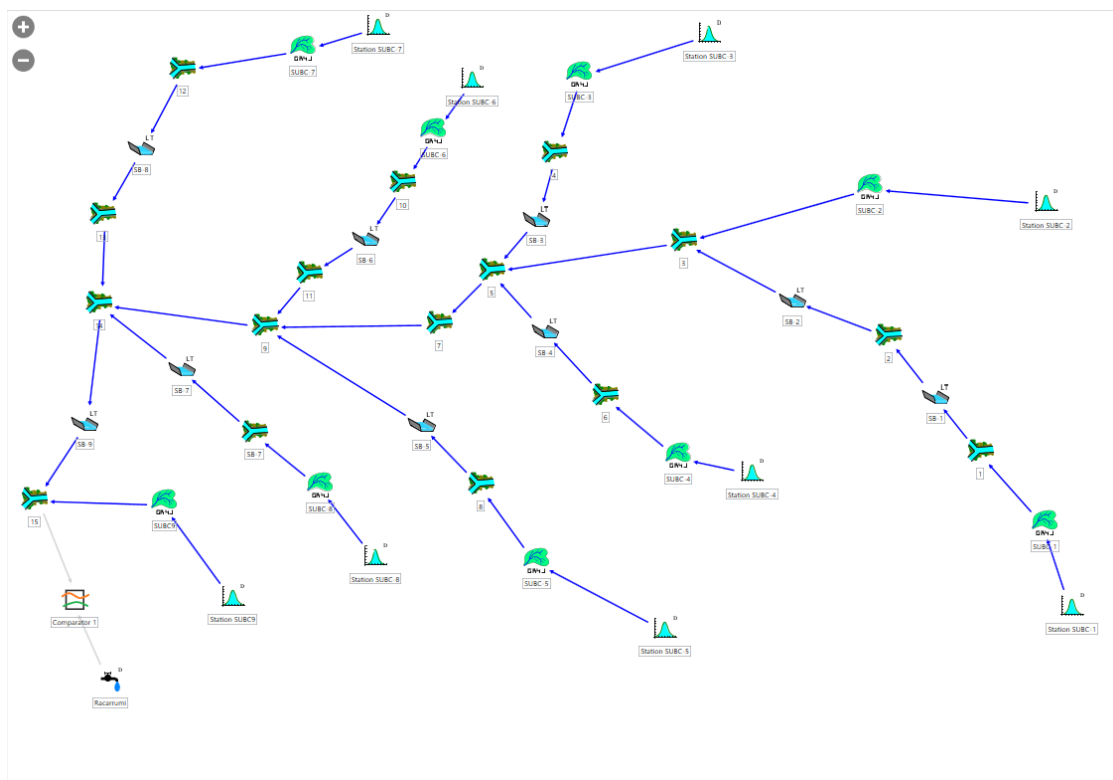
A partir de los elementos generados en el módulo RS-GIS del software RS Minerve, se configuraron los objetos hidrológicos correspondientes a los modelos GR4J, SACRAMENTO, HBV y SOCONT empleados en el estudio.

Con base en la información geométrica de la cuenca (longitud de cauces y delimitación de subcuencas), el programa asignó automáticamente un modelo hidrológico y una estación virtual en el centroide de cada subcuenca. Esta disposición permite la distribución espacial de la precipitación mediante el método de interpolación de Shepard, estimando su variabilidad dentro del área de estudio.

Asimismo, se definió el tránsito de flujo en los cauces principales considerando su longitud y pendiente, y se incorporaron nodos de confluencia para integrar los aportes provenientes de las subcuencas hasta la salida de la cuenca. Para la validación del modelo, se añadió una fuente asociada a la estación hidrométrica Racarrumi, junto con un comparador para contrastar los caudales simulados con los observados. De manera adicional, se incorporó una fuente correspondiente al trasvase del Túnel Chotano, considerada únicamente en el escenario con aporte externo.

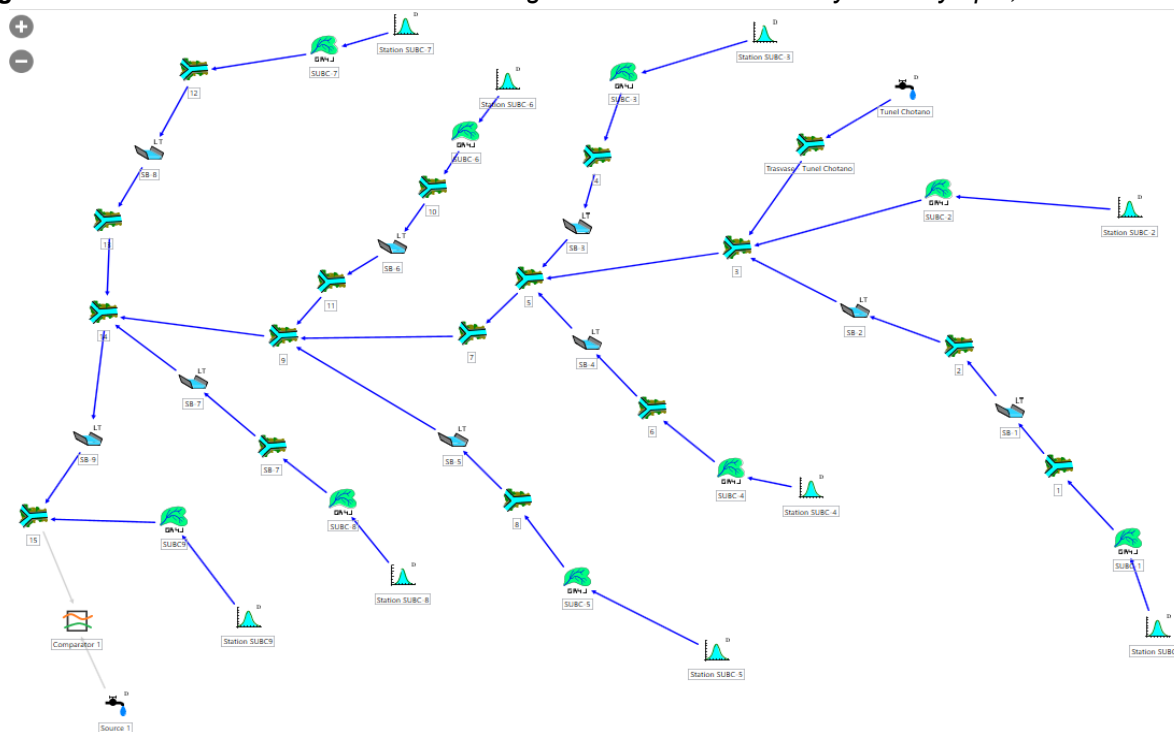
La configuración del modelo hidrológico para el escenario con trasvase se presenta en la Figura 24, mientras que en la Figura 25 se muestra el escenario sin el aporte del Túnel Chotano, permitiendo evaluar la respuesta hidrológica de la cuenca bajo ambas condiciones.

Figura N° 24: Construcción del modelo hidrológico de la cuenca Chancay-Lambayeque, Escenario 1



Fuente: Elaboración propia

Figura N° 25: Construcción del modelo hidrológico de la cuenca Chancay-Lambayeque, Escenario 2



Fuente: Elaboración propia

4.8. Simulación del modelamiento hidrológico en Rs Minerve, Escenario 1.

Como se planteó inicialmente, se llevó a cabo el modelamiento de la cuenca en el software RS Minerve, sin considerar el aporte del Túnel Chotano, con el objetivo de determinar qué modelos hidrológicos resultan factibles y cuáles no son recomendables para la cuenca en estudio.

Para ello, se realizaron los procesos de calibración y validación de los modelos GR4J, SOCONT, SACRAMENTO y HBV, utilizando series de datos diarios correspondientes al período 1993–2022. La calibración se efectuó para los años 1993–2007, mientras que la validación se realizó entre 2008–2022, combinando ajustes manuales (método de prueba y error) y ajustes automáticos mediante el algoritmo SCE–UA. En todos los casos, el número de iteraciones osciló entre 1000 y 4000, logrando que los principales indicadores estadísticos se mantuvieran dentro

de rangos aceptables ($NSE > 0.50$, $KGE > 0.60$, $Pearson > 0.70$), lo que confirma que los modelos representan adecuadamente el comportamiento hidrológico de la cuenca.

Los resultados específicos obtenidos para cada modelo se presentan a continuación.

4.8.1. Modelo GR4J:

4.8.1.1. Calibración y validación del modelo GR4J:

El modelo GR4J fue calibrado para el periodo 1993–2007 y validado entre 2008–2022, empleando datos diarios y el algoritmo de optimización SCE–UA.

Los resultados obtenidos evidencian un desempeño satisfactorio, alcanzando un Nash (NSE) de 0.60 y un Kling–Gupta Efficiency (KGE) de 0.66, lo que indica un ajuste adecuado entre los caudales simulados y observados. Asimismo, el coeficiente de correlación de Pearson (0.83) y los valores de Bias Score (0.84) y RRMSE (0.71) se encuentran dentro de los rangos aceptables, confirmando la estabilidad del modelo frente a datos no utilizados en la calibración.

En general, el modelo GR4J reproduce de manera coherente la dinámica hidrológica de la cuenca, con una leve subestimación de los caudales máximos, pero manteniendo una buena representación del volumen total.

Los principales indicadores estadísticos se resumen en la Tabla 26.

Tabla 26: Comparación de los indicadores estadísticos del modelo GR4J.

PARAMETROS ESTADISTICOS	CALIBRACIÓN (ENERO 1993 A DICIEMBRE 2007)	VALIDACIÓN (ENERO 2008 A DICIEMBRE 2022)	VALORES IDEALES
Nash	0.4855	0.6007	1
Nash-In	0.7977	0.7588	
Pearson	0.7353	0.8294	1
Kling-Grupta Efficiency	0.6253	0.6626	1
BS	0.8931	0.8412	0
RRMSE	0.8185	0.7197	0
RVB	-0.2464	-0.2849	0
NPE	-0.1952	-0.2139	0

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 27 se presenta los parámetros obtenidos de la calibración.

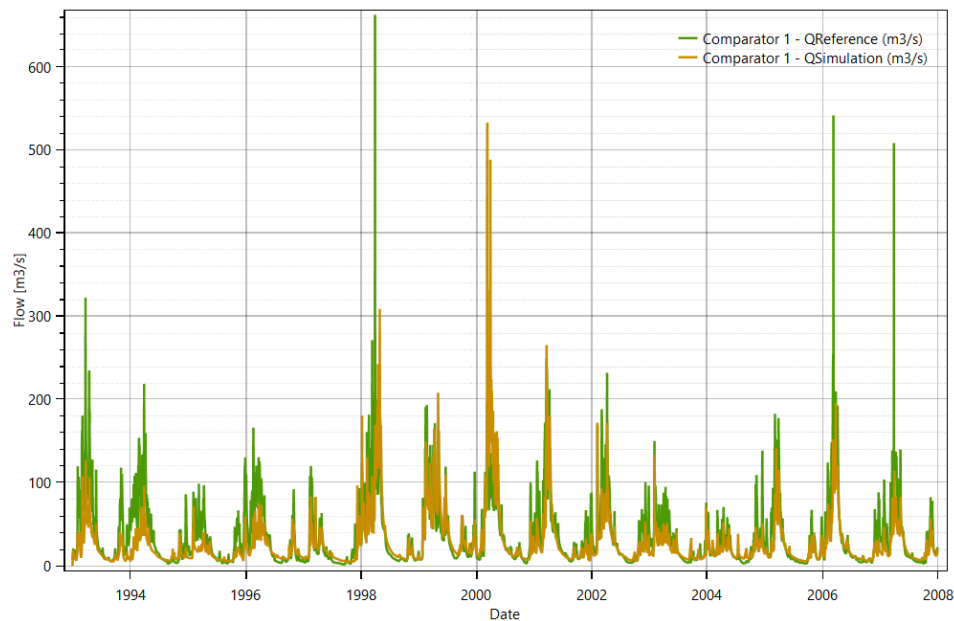
Tabla 27: Parámetros del modelo GR4J, calibrado para la cuenca en estudio

PARÁMETROS	UNIDADES	VALOR	RANGO
X1	m	0.010	0.01 a 1.2
X2	m	0	-0.005 a 0.003
X3	m	0.489	0.01 a 0.5
X4	D	0.172	-0.5 a 1

Fuente: Elaboración propia

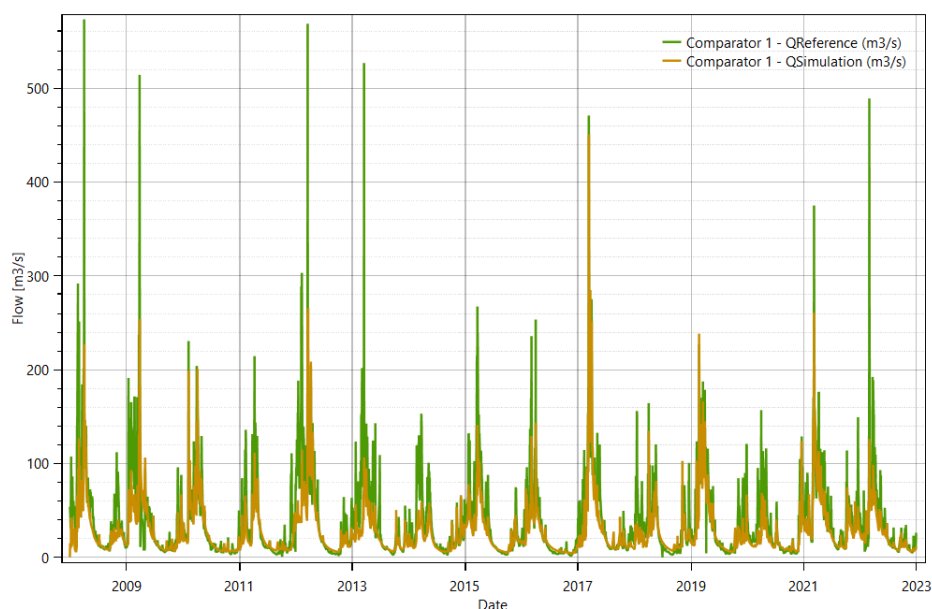
En la figura 26.a y 26.b correspondiente al modelo GR4J al proceso de calibración y validación respectivamente, se aprecia una simetría entre los valores simulados y los referenciales. Las descargas máximas referenciales tienden a ser mayores que las descargas máximas simuladas en algunos periodos analizados.

Figura N° 26.a: Caudales observados y simulados de la cuenca con el modelo GR4J, calibrados



Fuente: Elaboración propia

Figura N° 26.b: Caudales observados y simulados de la cuenca con el modelo GR4J, validados.



Fuente: Elaboración propia

4.8.2. Modelo SOCONT

4.8.2.1. Calibración y validación del modelo SOCONT:

El modelo SOCONT fue calibrado en el periodo 1993–2007 y validado entre 2008–2022, utilizando datos diarios y el algoritmo de optimización SCE–UA.

Durante la calibración, el modelo alcanzó un Nash (NSE) de 0.55 y un Kling–Gupta Efficiency (KGE) de 0.59, evidenciando un comportamiento satisfactorio en la simulación de caudales. Los valores de Bias Score (0.95) y RRMSE (0.76) indican un equilibrio adecuado entre sobrestimación y subestimación.

En el proceso de validación, el desempeño se mantuvo estable, con un NSE = 0.59 y un KGE = 0.60, confirmando la capacidad del modelo para reproducir los patrones hidrológicos observados en el periodo de prueba. Asimismo, el coeficiente de correlación de Pearson (0.77) refleja una buena relación lineal entre los caudales observados y simulados.

En general, el modelo SOCONT demostró un ajuste consistente y realista, representando de forma adecuada los picos de caudal y el comportamiento base del flujo, por lo que puede considerarse un modelo confiable para la simulación hidrológica de la cuenca en estudio.

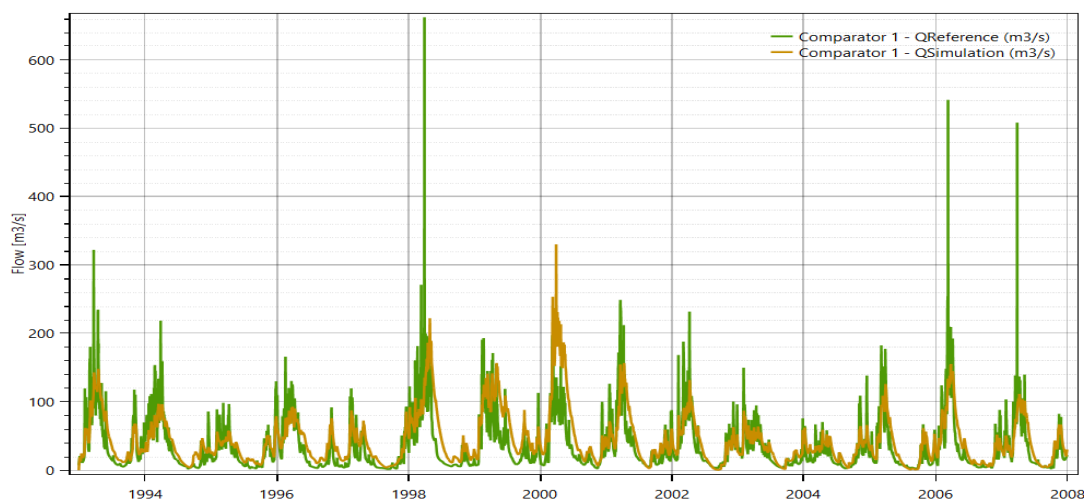
Los indicadores estadísticos obtenidos se resumen en la Tabla 28, mientras que en la Figura 27a y 27b se presenta la comparación de caudales simulados y observados para los periodos de calibración y validación, respectivamente.

Tabla 28: Comparación de los indicadores estadísticos del modelo SOCONT.

PARAMETROS ESTADISTICOS	CALIBRACIÓN (ENERO 1993 A DICIEMBRE 2007)	VALIDACIÓN (ENERO 2008 A DICIEMBRE 2022)	VALORES IDEALES
Nash	0.5509	0.5938	1
Nash-In	0.7175	0.6933	
Pearson	0.7777	0.7783	1
Kling-Grupta Efficiency	0.5995	0.6023	1
BS	0.9528	0.9846	0
RRMSE	0.7647	0.7259	0
RVB	0.2174	0.1243	0
NPE	-0.5013	-0.6116	0

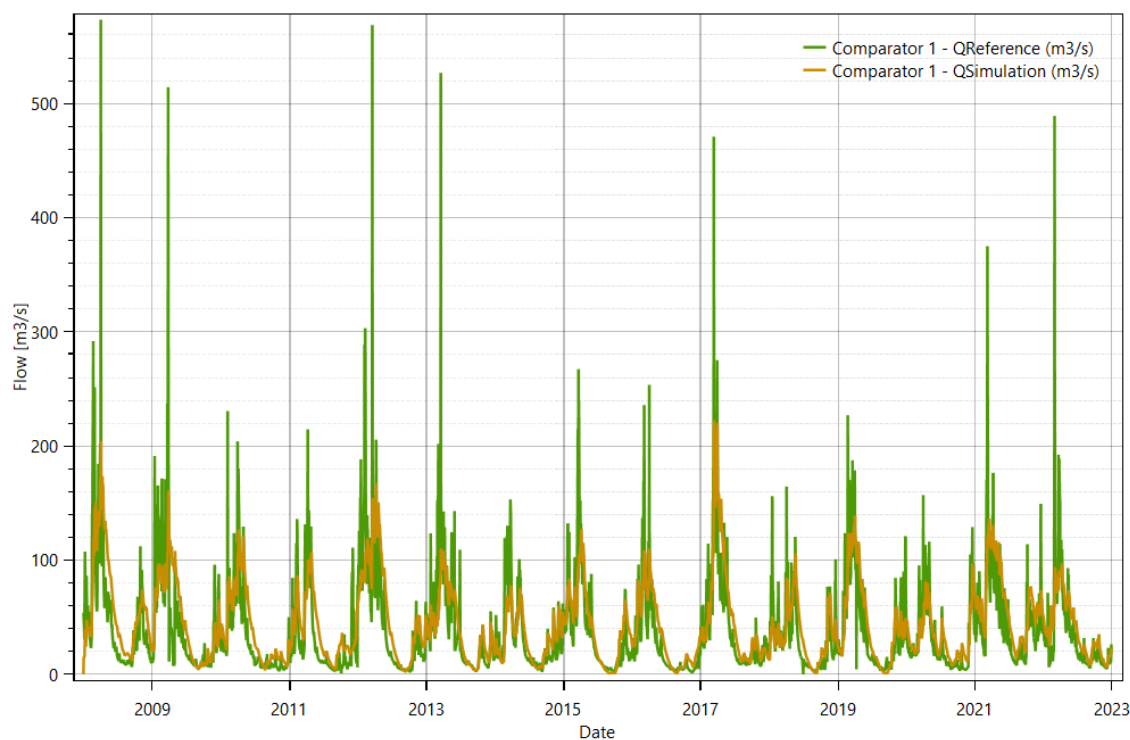
Fuente: Elaboración propia

Figura N° 27.a: Caudal observados y simulados de la cuenca con modelo SOCONT, calibrados



Fuente: Elaboración propia

Figura N° 27.b: Caudal observados y simulados de la cuenca con modelo SOCONT, validados



Fuente: Elaboración propia

La Tabla 28 presenta un resumen de cada de los parámetros obtenidos del modelo hidrológico para la cuenca del río Chancay-Lambayeque.

Tabla 28: Parámetros del modelo SOCONT, calibrado para la cuenca en estudio

PARÁMETROS	UNIDADES	VALOR	RANGO
Asn	mm/°C/d	11.8914	0.5 a 20
AsnInt	mm/°C/d	3.66619	0 a 4
AsnPh	d	250.564	1 a 365
ThetaCri	-	0.1	0.1
Bp	d/mm	0.0125	0.0125
Tcp1	°C	0.31825	0
Tcp2	°C	4.2474	4
Tcf	°C	0.73799	0
HGR3Max	M	1.17541	0 a 2
KGR3	1/s	0.0007	0.00025 a 0.1
Kr	M1/3/s	56.6585	0.1 a 90

Fuente: Elaboración propia

4.8.3. Modelo SACRAMENTO

4.8.3.1. Calibración y validación del modelo SACRAMENTO:

El modelo SACRAMENTO fue calibrado utilizando datos diarios correspondientes al periodo 1993–2007, y posteriormente validado entre los años 2008–2022, empleando el algoritmo de optimización SCE–UA.

Durante la fase de calibración, el modelo alcanzó un Nash (NSE) de 0.55 y un Kling–Gupta Efficiency (KGE) de 0.60, lo que indica un ajuste aceptable entre los caudales simulados y observados. Asimismo, el coeficiente de correlación de Pearson (0.84) evidenció una buena correspondencia lineal, mientras que el Bias Score (0.67) y el RRMSE (0.76) reflejaron una ligera tendencia a la subestimación de los caudales máximos.

En la etapa de validación, los valores obtenidos se mantuvieron dentro del rango aceptable (NSE = 0.50, KGE = 0.55, Pearson = 0.87), aunque se observó una leve disminución en la eficiencia del modelo, atribuida principalmente a la sensibilidad del SACRAMENTO frente a las condiciones iniciales de humedad y almacenamiento subterráneo.

En general, el modelo SACRAMENTO demostró un comportamiento estable y coherente, reproduciendo adecuadamente la respuesta hidrológica de la cuenca, con ligeras diferencias en la magnitud de los caudales altos.

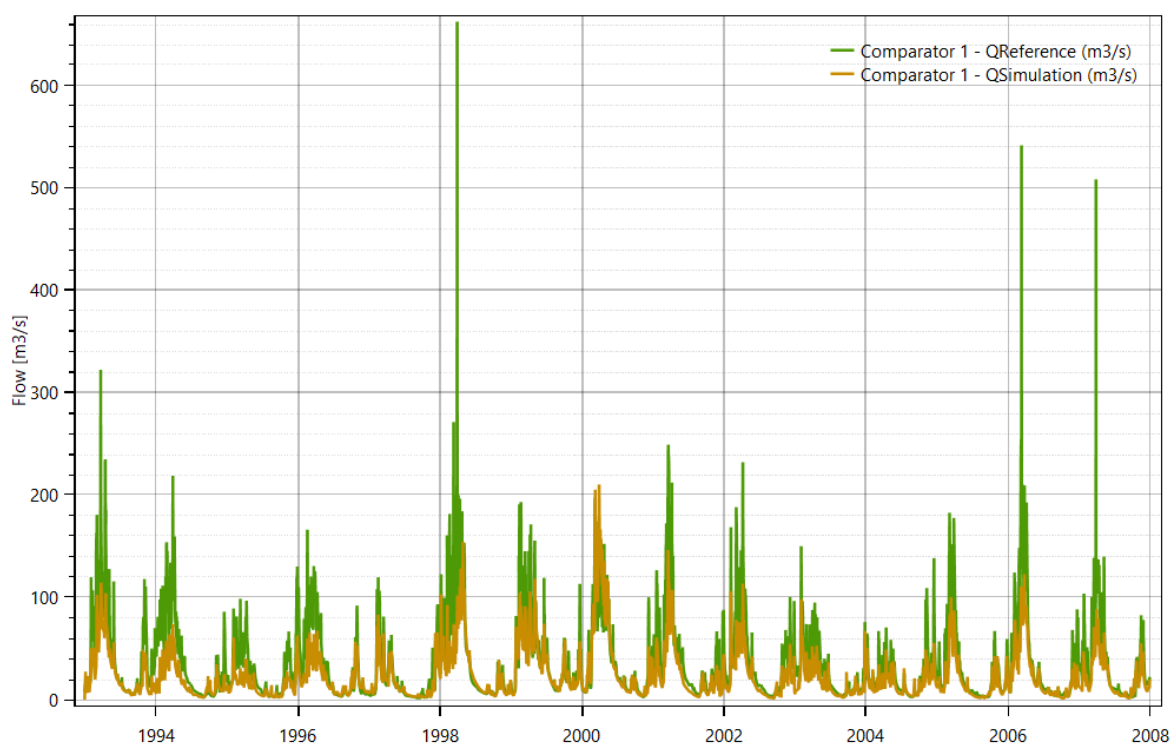
Los resultados de los indicadores estadísticos se presentan en la Tabla 30, mientras que las comparaciones entre los caudales observados y simulados se muestran en las Figuras 28a y 28b, correspondientes a los periodos de calibración y validación, respectivamente.

Tabla 30: Comparación de los indicadores estadísticos del modelo SACRAMENTO.

PARAMETROS ESTADÍSTICOS	CALIBRACIÓN (ENERO 1993 A DICIEMBRE 2007)	VALIDACIÓN (ENERO 2008 A DICIEMBRE 2022)	VALORES IDEALES
Nash	0.5516	0.5063	1
Nash-In	0.7816	0.6542	
Pearson	0.8429	0.8704	1
Kling-Gupta Efficiency	0.6015	0.5549	1
BS	0.6795	0.5292	0
RRMSE	0.7641	0.8003	0
RVB	-0.3615	-0.4069	0
NPE	-0.6825	0.6858	0

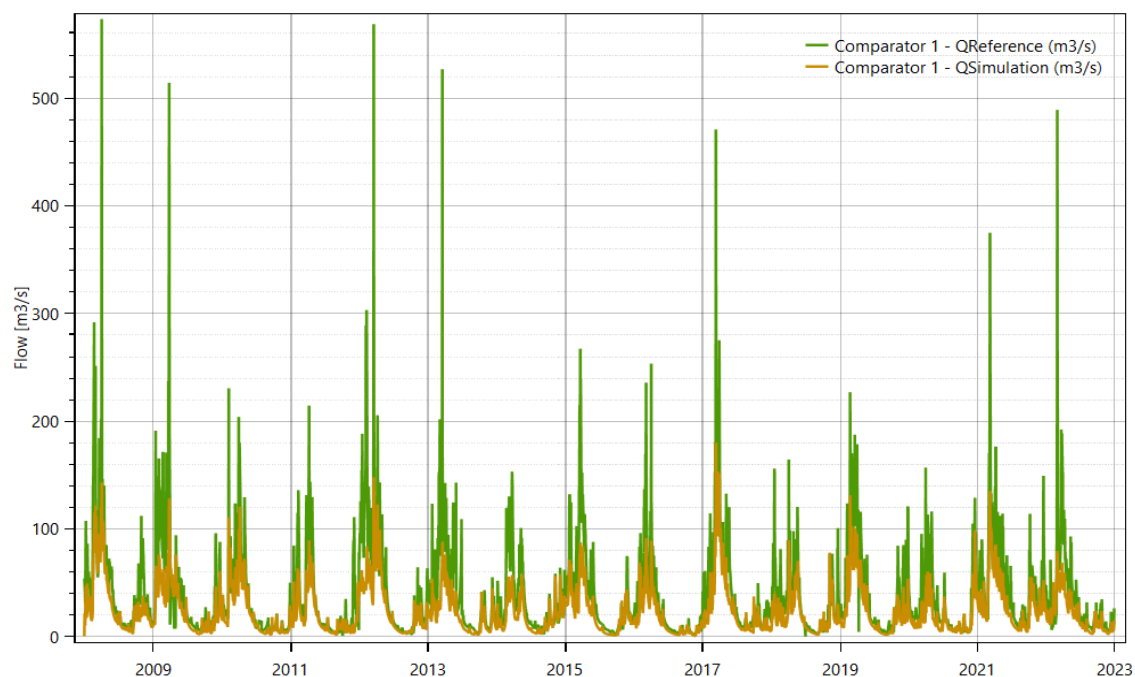
Fuente: Elaboración propia

Figura N° 28.a: Caudal observados y simulados de la cuenca con modelo SACRAMENTO, calibrados.



Fuente: Elaboración propia

Figura N° 28.b: Caudal observados y simulados de la cuenca con modelo SACRAMENTO, validados.



Fuente: Elaboración propia

La Tabla 31 presenta un resumen de cada de los parámetros obtenidos del modelo hidrológico para la cuenca del río Chancay-Lambayeque.

Tabla 31: Parámetros del modelo SACRAMENTO, calibrado para la cuenca en estudio.

PARÁMETROS	UNIDADES	VALOR	RANGO
Adimp	-	0.0411	0 a 0.2
Pctim	-	0.0499	0 a 0.05
Riva	-	0.000001	0 a 0.2
UztwMax	m	0.010001	0.01 a 0.15
UzfwMax	m	0.0465	0.005 a 0.10
Uzk	°1/d	0.4650	0.10 a 0.75
Zperc	-	189.4589	10 a 350
Rexp	-	1.63845	1 a 4
Pfree	-	0.59999	0 a 0.6
LztwMax	m	0.26664	0.05 a 0.40
LztpMax	m	0.54787	0.03 a 0.80
LzfsMax	m	0.20045	0.001 a 0.40
Rserv	-	0.34048	0 a 1
Lzpk	1/d	0.02351	0.001 a 0.03
Lzsk	1/d	0.01214	0.02 a 0.3

Fuente: Elaboración propia

4.8.4. Modelo HBV

4.8.4.1. Calibración y validación del modelo HBV:

El modelo HBV fue calibrado para el periodo 1993–2007 y validado entre 2008–2022, utilizando el algoritmo de optimización SCE–UA. Este modelo presentó los mejores resultados entre los evaluados, alcanzando un desempeño sobresaliente tanto en la etapa de calibración como en la de validación.

Durante la calibración, se obtuvo un Nash–Sutcliffe Efficiency (NSE) de 0.66 y un Kling–Gupta Efficiency (KGE) de 0.82, lo que indica una excelente capacidad del modelo para reproducir los caudales observados. Asimismo, el coeficiente de correlación de Pearson (0.82) y el Bias Score (0.99) muestran un ajuste casi perfecto, con errores relativos mínimos (RRMSE = 0.66) y un balance adecuado del volumen simulado (RVB = –0.02).

En la fase de validación, el modelo mantuvo su estabilidad y capacidad predictiva, con un NSE = 0.74, KGE = 0.80 y Pearson = 0.86, evidenciando que el HBV puede representar de forma robusta el comportamiento hidrológico de la cuenca bajo diferentes condiciones hidrometeorológicas.

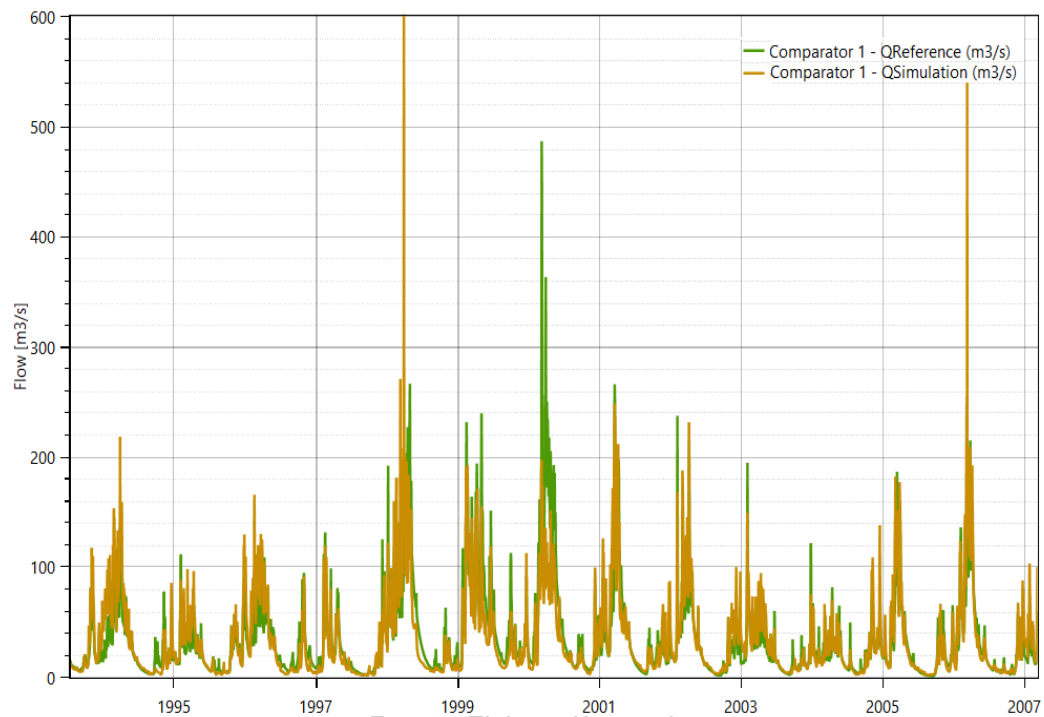
En general, el modelo HBV mostró el mejor desempeño global, reproduciendo de manera consistente tanto los caudales altos como los bajos, y manteniendo un adecuado equilibrio entre eficiencia y estabilidad numérica. Por estas razones, se considera el modelo más representativo para el Escenario 2 (sin trasvase). Los resultados de los indicadores estadísticos se presentan en la Tabla 32, mientras que la comparación entre los caudales simulados y observados se muestra en las Figuras 29a y 29b, correspondientes a las etapas de calibración y validación, respectivamente.

Tabla 32: Comparación de los indicadores estadísticos del modelo HBV.

PARAMETROS ESTADÍSTICOS	CALIBRACIÓN (ENERO 1993 A DICIEMBRE 2007)	VALIDACIÓN (ENERO 2008 A DICIEMBRE 2022)	VALORES IDEALES
Nash	0.6632	0.7465	1
Nash-In	0.8825	0.8071	
Pearson	0.8295	0.8668	1
Kling-Gupta Efficiency	0.8292	0.8304	1
BS	0.9999	0.9928	1
RRMSE	0.6623	0.5735	0
RVB	-0.0029	-0.0785	0
NPE	-0.2644	-0.2820	0

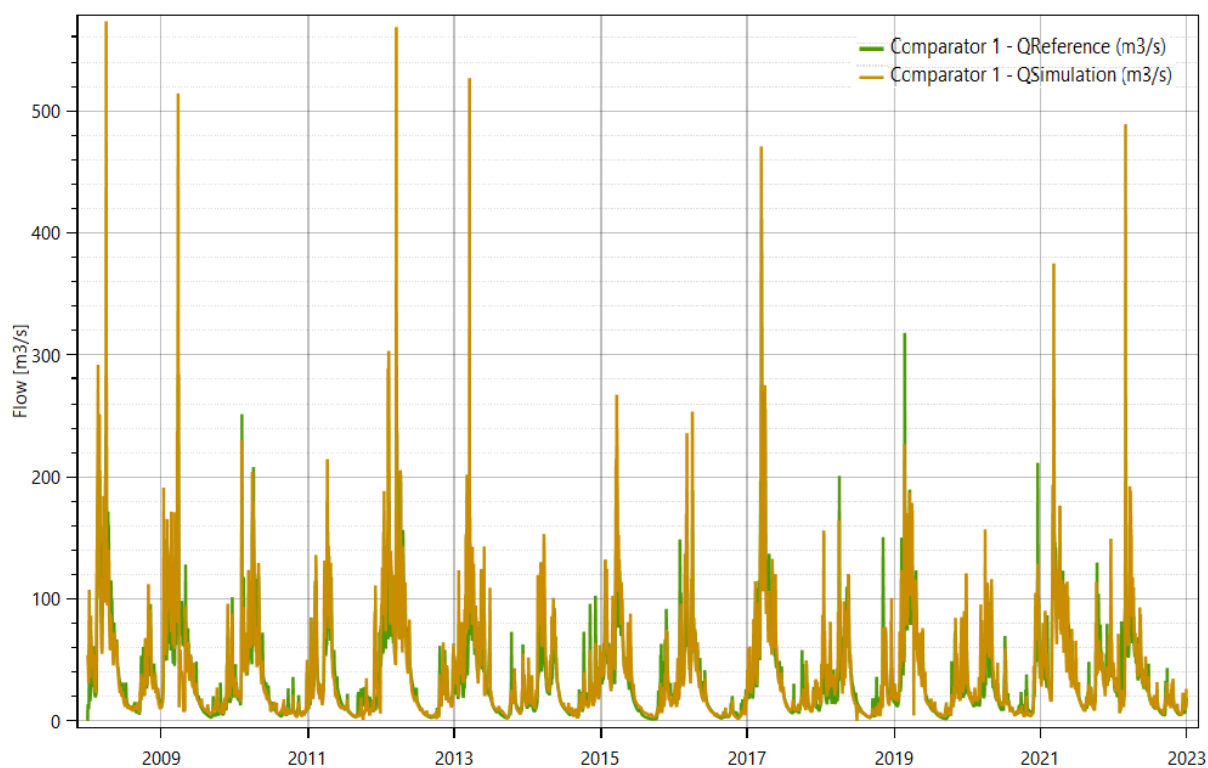
Fuente: Elaboración propia

Figura N° 29.a: Caudal observados y simulados de la cuenca con modelo HVB, calibrado



Fuente: Elaboración propia

Figura N° 29.b: Caudal observados y simulados de la cuenca con modelo HVB, validados



Fuente: Elaboración propia

Tabla 33: Parámetros del modelo HVB, calibrado para la cuenca en estudio

PARÁMETROS	UNIDADES	VALOR	RANGO
CFMax	mm/°C/día	9.4011	0.5 a 20
CFR	-	0.4019	0.05
CWH	-	0.1062	0.1
TT	°C	1.3731	0 a 3
TTInt	°C	1.7392	0 a 3
TTSM	°C	0	0
Beta	-	1.0156	1 a 5
FC	m	0.0609	0.050 a 0.65
PWP	-	0.8757	0.030 a 1
SUMax	m	0.07945	0 a 0.10
Kr	1/d	0.3651	0.05 a 0.50
Ku	1/d	0.3927	0.001 a 0.40
KI	1/d	0.0289	0 a 0.15
Kperc	1/d	0.6979	0 a 0.8

Fuente: Elaboración propia

4.8.5. Caudales Máximos obtenidos por los modelos hidrológicos del Rs Minerve, Escenario 1

Luego, se determinaron los valores máximos anuales de la data de caudales diarios simulados para el escenario 1, los cuales se muestran en la Tabla 34.

Tabla 34: Caudales máximos anuales obtenidos por cada modelo, escenario 1, sin trasvase.

CAUDALES MÁXIMOS (M3/S)				
AÑO	GR4J	SOCONT	SACRAMENTO	HBV
1993	96.34	120.76	84.30	163.49
1994	78.28	79.28	55.99	114.84
1995	61.03	49.68	50.19	95.86
1996	54.10	66.79	42.55	85.26
1997	85.14	57.39	53.78	106.19
1998	306.65	220.28	152.39	248.23
1999	204.23	155.52	113.69	224.80
2000	503.56	312.26	192.25	432.17
2001	236.65	154.40	117.69	221.19
2002	147.91	101.71	83.09	206.23
2003	103.48	57.53	68.54	155.31
2004	35.36	40.31	28.95	56.97
2005	118.41	97.49	77.45	154.72
2006	166.31	125.46	93.07	173.42
2007	84.80	84.76	58.84	122.07
2008	272.71	196.21	133.59	256.86
2009	250.90	158.04	125.58	260.64
2010	188.57	98.61	100.22	221.02
2011	82.28	88.93	60.44	142.59
2012	260.37	155.09	129.15	257.71
2013	87.45	88.64	66.06	150.18
2014	51.06	49.33	42.83	81.59
2015	135.02	100.84	81.41	172.01
2016	130.55	89.42	76.17	157.13
2017	443.89	216.66	173.56	379.77
2018	114.93	78.60	69.52	162.64
2019	214.69	116.55	107.85	275.07
2020	98.61	72.42	74.30	174.87
2021	255.55	117.25	130.08	238.78
2022	122.94	82.44	76.37	176.84

Fuente: Elaboración propia

4.9. Simulación del modelamiento hidrológico en Rs Minerve, Escenario 2.

En el Escenario 2 se realizó la simulación hidrológica considerando el aporte del Túnel Chotano, es decir, con trasvase. Para este escenario, se conservaron los parámetros de calibración obtenidos en el Escenario 1 (sin trasvase), dado que estos representan de manera adecuada la dinámica natural de la cuenca. Por lo tanto, no fue necesario realizar un nuevo proceso de calibración, aplicándose directamente los parámetros ajustados para cada modelo hidrológico (GR4J, SOCONT, SACRAMENTO y HBV).

Este enfoque permite evaluar el efecto del trasvase sobre el régimen de caudales, respetando la consistencia de los parámetros hidrológicos previamente calibrados. De esta manera, es posible analizar cómo la incorporación del aporte externo modifica los caudales máximos anuales sin alterar la representación natural de la cuenca.

Cabe destacar que, a diferencia de otros programas hidrológicos, RS Minerve permite simular y analizar los caudales máximos anuales a nivel de subcuenca, brindando una evaluación espacial más detallada y facilitando la identificación de los efectos locales del trasvase.

Los caudales máximos anuales simulados se presentan en la Tabla 35, y a partir de estos se calcularon los caudales asociados a distintos períodos de retorno, utilizando los métodos estadísticos descritos en el capítulo anterior. Finalmente, los resultados del Escenario 2 fueron comparados con los del Escenario 1 y con los caudales observados en la estación hidrométrica Racarrumi, con el fin de cuantificar y evaluar el impacto hidrológico del trasvase en la cuenca.

Los resultados específicos obtenidos para cada modelo para el escenario 2 se describen a continuación.

Tabla 35: Caudales máximos anuales obtenidos por cada modelo, escenario 2.

CAUDALES MÁXIMOS ANUALES (M3/S)				
AÑO	GR4J	SOCONT	SACRAMENTO	HBV
1993	126.28	148.25	114.24	193.36
1994	96.01	98.77	73.72	132.57
1995	71.65	79.04	62.83	106.48
1996	75.77	92.92	67.34	110.24
1997	96.63	87.53	82.85	124.03
1998	308.70	222.33	154.44	611.30
1999	207.97	156.83	118.16	226.11
2000	532.92	330.25	210.23	283.94
2001	265.21	156.73	146.24	249.74
2002	171.78	131.87	113.39	228.44
2003	133.14	87.22	98.20	185.00
2004	52.01	67.80	55.51	83.66
2005	140.99	127.39	100.03	174.34
2006	195.81	155.30	122.58	203.25
2007	114.28	111.70	88.32	149.68
2008	283.01	206.51	143.94	267.16
2009	253.85	160.99	128.56	505.79
2010	200.68	127.03	120.59	241.14
2011	111.52	107.28	89.31	170.72
2012	265.79	167.18	147.89	273.41
2013	106.44	110.70	87.49	171.92
2014	66.40	78.09	59.20	98.20
2015	141.17	127.27	87.57	177.27
2016	143.56	110.06	91.59	180.27
2017	450.33	222.52	180.01	586.22
2018	134.85	106.13	89.45	190.84
2019	238.28	139.09	131.45	301.00
2020	124.16	97.01	98.88	199.46
2021	260.71	136.25	135.24	243.85
2022	126.16	97.06	79.60	178.60

Fuente: Elaboración propia

CAPITULO V: RESULTADOS

5.1. Resultados de caudales máximos generados

En el capítulo previo se procesaron los datos recopilados en la investigación, lo cual facilitó la determinación de los parámetros requeridos para estimar los caudales máximos simulados de cada uno de los modelos hidrológicos del software Rs Minerve, siendo estos modelos el GR4J, SOCONT, SACRAMENTO y HBV. Estos resultados se obtuvieron mediante tres herramientas clave.

1. Modelamiento hidrológico en el software Rs Minerve respecto a los modelos GR4J, SOCONT, SACRAMENTO y HBV.
2. Hojas de cálculo de Excel, donde sirvió de ayuda para poder calcular las proyecciones de caudales máximos.
3. Se desarrollo los dos escenarios, lo cual se planteó en el ítem 3.2.3, en los cuales se indica que en el escenario 1 no se considerara el aporte de caudal del túnel chotano, y en el escenario 2 se considerara el aporte del túnel chotano.

5.1.1. Resultados de caudales máximos generados para el Escenario 1:

A continuación, se presentan los resultados de los caudales máximos generados por los modelos hidrológicos evaluados. En primer lugar, se describen las proyecciones de caudales máximos obtenidas para cada una de las subcuencas modeladas (Tabla 36), considerando los resultados individuales de los modelos GR4J, SOCONT, SACRAMENTO y HBV.

Tabla 36: Comparativa de caudales máximos en el escenario 1, sin aporte del túnel chotano, por cada subcuenca.

		Caudales máximos (m3/s) en la Subcuenca 1								
MODELOS EN ESTUDIO (m3/s)	Tr (años)	2	5	10	25	50	100	200	500	1000
	GR4J	25.06	40.93	53.21	70.60	84.86	100.21	116.73	140.51	160.08
	SOCONT	19.78	27.47	34.15	44.94	55.10	67.45	82.51	107.64	131.60
	SACRAMENTO	14.98	20.45	25.13	32.61	39.56	47.92	58.01	74.65	90.31
	HBV	32.20	48.47	62.20	82.95	100.90	121.02	143.49	177.15	205.87

		Caudales máximos (m3/s) en la Subcuenca 2								
MODELOS EN ESTUDIO (m3/s)	Tr (años)	2	5	10	25	50	100	200	500	1000
	GR4J	40.11	45.41	48.79	52.93	55.94	58.90	61.84	65.72	68.66
	SOCONT	39.66	44.84	48.65	53.91	58.18	62.76	67.68	74.76	80.59
	SACRAMENTO	37.36	40.25	44.13	46.63	48.51	50.40	52.29	54.79	56.68
	HBV	44.01	48.43	54.35	58.16	61.04	63.92	66.80	70.61	73.49

		Caudales máximos (m3/s) en la Subcuenca 3								
MODELOS EN ESTUDIO (m3/s)	Tr (años)	2	5	10	25	50	100	200	500	1000
	GR4J	16.15	26.50	33.93	43.87	51.65	59.73	68.16	79.89	89.25
	SOCONT	11.05	16.41	21.33	29.71	37.98	48.47	61.81	85.17	108.52
	SACRAMENTO	9.43	13.51	17.14	23.16	28.95	36.13	45.06	60.30	75.14
	HBV	19.15	28.61	35.73	45.61	53.57	62.02	71.02	83.80	94.20

		Caudales máximos (m3/s) en la Subcuenca 4								
MODELOS EN ESTUDIO (m3/s)	Tr (años)	2	5	10	25	50	100	200	500	1000
	GR4J	11.57	22.05	31.61	46.90	60.78	76.91	96.52	124.41	149.85
	SOCONT	9.02	13.99	18.72	27.03	35.50	46.53	60.93	86.96	113.78
	SACRAMENTO	7.60	11.64	15.43	22.05	28.73	37.36	48.54	68.56	89.00
	HBV	15.01	27.74	40.36	61.91	82.54	107.50	137.38	185.61	229.63

		Caudales máximos (m3/s) en la Subcuenca 5									
		Tr (años)	2	5	10	25	50	100	200	500	1000
MODELOS EN ESTUDIO	(m3/s)	GR4J	16.28	40.15	66.64	115.96	166.64	231.37	312.80	451.32	583.98
		SOCONT	13.61	24.64	36.51	60.02	86.77	125.10	180.13	291.40	419.14
		SACRAMENTO	12.18	17.38	22.00	29.62	36.94	45.99	57.22	76.32	94.89
		HBV	13.95	56.60	107.68	188.85	256.63	327.96	401.70	501.34	577.02

		Caudales máximos (m3/s) en la Subcuenca 6									
		Tr (años)	2	5	10	25	50	100	200	500	1000
MODELOS EN ESTUDIO	(m3/s)	GR4J	13.51	24.64	33.80	47.36	58.90	71.68	85.79	106.67	124.29
		SOCONT	6.78	11.30	15.84	24.27	33.31	45.61	62.38	94.29	128.84
		SACRAMENTO	6.74	10.49	14.06	20.35	26.78	35.16	46.13	65.99	86.49
		HBV	13.54	26.28	37.99	56.88	74.13	94.26	117.60	153.96	186.13

		Caudales máximos (m3/s) en la Subcuenca 7									
		Tr (años)	2	5	10	25	50	100	200	500	1000
MODELOS EN ESTUDIO	(m3/s)	GR4J	44.60	83.31	115.55	163.79	205.20	251.30	302.52	378.78	443.47
		SOCONT	19.55	33.83	48.64	76.97	108.18	151.66	212.36	331.10	463.17
		SACRAMENTO	16.45	28.65	41.37	65.82	92.89	130.75	183.83	288.14	404.69
		HBV	40.96	75.15	103.61	146.14	182.62	223.23	268.31	335.40	392.29

		Caudales máximos (m3/s) en la Subcuenca 8									
		Tr (años)	2	5	10	25	50	100	200	500	1000
MODELOS EN ESTUDIO	(m3/s)	GR4J	10.04	17.96	24.25	33.35	40.94	49.21	58.21	71.34	82.26
		SOCONT	5.75	9.39	13.00	19.61	26.60	36.00	48.67	72.44	97.85
		SACRAMENTO	5.44	8.34	11.06	15.82	20.63	26.84	34.89	49.32	64.06
		HBV	11.32	19.59	26.45	36.68	45.45	55.20	66.02	82.10	95.73

		Caudales máximos (m3/s) en la Subcuenca 9									
		Tr (años)	2	5	10	25	50	100	200	500	1000
MODELOS EN ESTUDIO (m3/s)	GR4J	4.24	7.78	10.66	14.92	18.53	22.51	26.89	33.36	38.81	
	SOCONT	2.50	4.14	5.77	8.78	11.98	16.32	22.21	33.35	45.34	
	SACRAMENTO	2.35	3.64	4.85	6.99	9.15	11.97	15.63	22.24	29.03	
	HBV	4.84	9.14	13.09	19.45	25.25	32.00	39.83	52.00	62.76	

Fuente: Elaboración propia

Posteriormente, en la Tabla N° 37 se detallan las proyecciones consolidadas de caudal máximo en el punto de aforo Racarrumi, correspondientes al Escenario 1 (sin aporte del Túnel Chotano), donde se comparan los resultados de los distintos modelos hidrológicos.

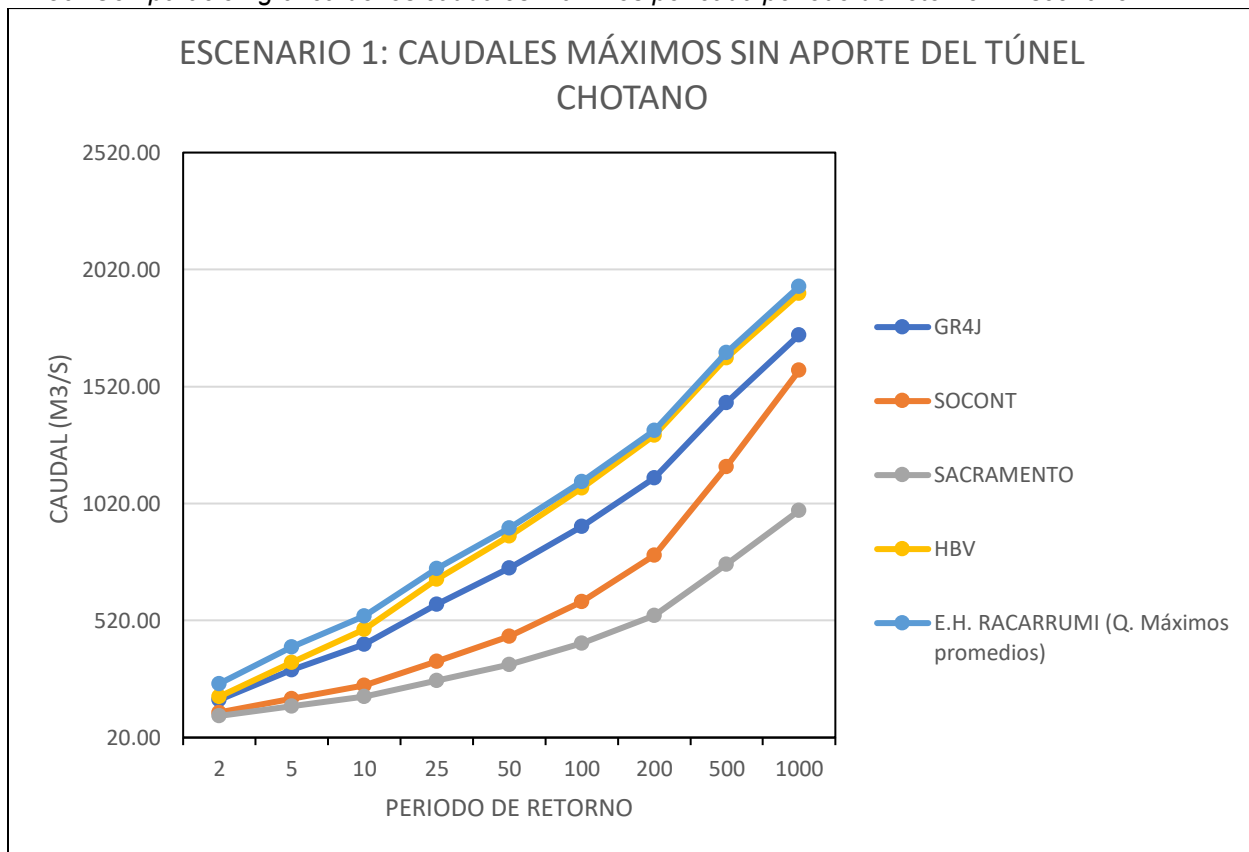
Finalmente, la Figura N° 30 muestra la representación gráfica comparativa de los caudales máximos proyectados para los diferentes periodos de retorno (2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500 y 1000 años), lo que permite visualizar el comportamiento de cada modelo frente al registro observado y determinar cuál reproduce de manera más realista el comportamiento hidrológico de la cuenca.

Tabla 37: Comparativa de caudales máximos en el escenario 1 (Sin aporte del Túnel Chotano)

		Caudales máximos (m3/s) en la estación hidrométrica Racarrumi ESCENARIO 1									
		Tr (años)	2	5	10	25	50	100	200	500	1000
MODELOS EN ESTUDIO (m3/s)	GR4J	181.56	308.73	418.44	589.68	743.44	921.82	1129.46	1452.00	1740.65	
	SOCONT	127.70	186.02	242.60	345.22	453.60	599.91	798.68	1177.11	1588.84	
	SACRAMENTO	112.51	154.34	195.18	263.04	332.14	422.53	541.59	760.29	990.30	
	HBV	194.98	340.01	481.46	696.63	882.13	1087.11	1312.15	1641.97	1917.12	
ESTACIÓN HIDROMÉTRICA RACARRUMI (m3/s)	E.H. RACARRUMI (Q. Máximos promedios)	250.59	406.94	539.72	741.27	916.33	1113.07	1333.43	1664.41	1947.47	

Fuente: Elaboración propia

Figura N° 30: Comparación gráfica de los caudales máximos por cada periodo de retorno – Escenario 1



Fuente: Elaboración propia

5.1.1. Resultados de caudales máximos generados para el Escenario 2:

A continuación, se presentan los resultados de los caudales máximos generados por los modelos hidrológicos. En primer lugar, se detallan las proyecciones de caudal máximo para cada una de las subcuencas obtenidas mediante los modelos GR4J, SOCONT, SACRAMENTO y HBV.

Tabla 38: Comparativa de caudales máximos en el escenario 2, con aporte del túnel chotano, por cada subcuenca

		Caudales máximos (m3/s) en la Subcuenca 1								
MODELOS EN ESTUDIO (m3/s)	Tr (años)	2	5	10	25	50	100	200	500	1000
	GR4J	25.06	40.93	53.21	70.60	84.86	100.21	116.73	140.51	160.08
	SOCONT	19.78	27.47	34.15	44.94	55.10	67.45	82.51	107.64	131.60
	SACRAMENTO	14.98	20.45	25.13	32.61	39.56	47.92	58.01	74.65	90.31
	HBV	32.20	48.47	62.20	82.95	100.90	121.02	143.49	177.15	205.87

		Caudales máximos (m3/s) en la Subcuenca 2								
MODELOS EN ESTUDIO (m3/s)	Tr (años)	2	5	10	25	50	100	200	500	1000
	GR4J	72.56	80.96	88.49	95.31	100.34	105.33	110.29	116.85	121.81
	SOCONT	70.50	75.84	83.02	87.63	91.12	94.61	98.10	102.72	106.21
	SACRAMENTO	69.80	75.80	83.83	89.01	92.92	96.83	100.74	105.92	109.83
	HBV	76.46	83.97	94.05	100.54	105.44	110.35	115.25	121.74	126.64

		Caudales máximos (m3/s) en la Subcuenca 3								
MODELOS EN ESTUDIO (m3/s)	Tr (años)	2	5	10	25	50	100	200	500	1000
	GR4J	16.15	26.50	33.93	43.87	51.65	59.73	68.16	79.89	89.25
	SOCONT	11.05	16.41	21.33	29.71	37.98	48.47	61.81	85.17	108.52
	SACRAMENTO	9.43	13.51	17.14	23.16	28.95	36.13	45.06	60.30	75.14
	HBV	19.15	28.61	35.73	45.61	53.57	62.02	71.02	83.80	94.20

		Caudales máximos (m3/s) en la Subcuenca 4								
MODELOS EN ESTUDIO (m3/s)	Tr (años)	2	5	10	25	50	100	200	500	1000
	GR4J	11.57	22.05	31.61	46.90	60.78	76.91	96.52	124.41	149.85
	SOCONT	9.02	13.99	18.72	27.03	35.50	46.53	60.93	86.96	113.78
	SACRAMENTO	7.60	11.64	15.43	22.05	28.73	37.36	48.54	68.56	89.00
	HBV	15.01	27.74	40.36	61.91	82.54	107.50	137.38	185.61	229.63

		Caudales máximos (m3/s) en la Subcuenca 5								
		Tr (años)	2	5	10	25	50	100	200	500
MODELOS EN ESTUDIO (m3/s)	GR4J	16.28	40.15	66.64	115.96	166.64	231.37	312.80	451.32	583.98
	SOCONT	13.61	24.64	36.51	60.02	86.77	125.10	180.13	291.40	419.14
	SACRAMENTO	12.18	17.38	22.00	29.62	36.94	45.99	57.22	76.32	94.89
	HBV	13.95	56.60	107.68	188.85	256.63	327.96	401.70	501.34	577.02

		Caudales máximos (m3/s) en la Subcuenca 6								
		Tr (años)	2	5	10	25	50	100	200	500
MODELOS EN ESTUDIO (m3/s)	GR4J	13.51	24.64	33.80	47.36	58.90	71.68	85.79	106.67	124.29
	SOCONT	6.78	11.30	15.84	24.27	33.31	45.61	62.38	94.29	128.84
	SACRAMENTO	6.74	10.49	14.06	20.35	26.78	35.16	46.13	65.99	86.49
	HBV	13.54	26.28	37.99	56.88	74.13	94.26	117.60	153.96	186.13

		Caudales máximos (m3/s) en la Subcuenca 7								
		Tr (años)	2	5	10	25	50	100	200	500
MODELOS EN ESTUDIO (m3/s)	GR4J	44.60	83.31	115.55	163.79	205.20	251.30	302.52	378.78	443.47
	SOCONT	19.55	33.83	48.64	76.97	108.18	151.66	212.36	331.10	463.17
	SACRAMENTO	16.45	28.65	41.37	65.82	92.89	130.75	183.83	288.14	404.69
	HBV	40.96	75.15	103.61	146.14	182.62	223.23	268.31	335.40	392.29

		Caudales máximos (m3/s) en la Subcuenca 8								
		Tr (años)	2	5	10	25	50	100	200	500
MODELOS EN ESTUDIO (m3/s)	GR4J	10.04	17.96	24.25	33.35	40.94	49.21	58.21	71.34	82.26
	SOCONT	5.75	9.39	13.00	19.61	26.60	36.00	48.67	72.44	97.85
	SACRAMENTO	5.44	8.34	11.06	15.82	20.63	26.84	34.89	49.32	64.06
	HBV	11.32	19.59	26.45	36.68	45.45	55.20	66.02	82.10	95.73

		Caudales máximos (m3/s) en la Subcuenca 9								
		Tr (años)	2	5	10	25	50	100	200	500
MODELOS EN ESTUDIO (m3/s)	GR4J	4.24	7.78	10.66	14.92	18.53	22.51	26.89	33.36	38.81
	SOCONT	2.50	4.14	5.77	8.78	11.98	16.32	22.21	33.35	45.34
	SACRAMENTO	2.35	3.64	4.85	6.99	9.15	11.97	15.63	22.24	29.03
	HBV	4.84	9.14	13.09	19.45	25.25	32.00	39.83	52.00	62.76

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 39 se presenta el resumen de los resultados obtenidos en el punto de aforo principal, donde se contrastan los caudales proyectados para el Escenario 2, que incorpora el aporte del Túnel Chotano, con los caudales observados y los simulados por cada uno de los modelos hidrológicos implementados en RS Minerve.

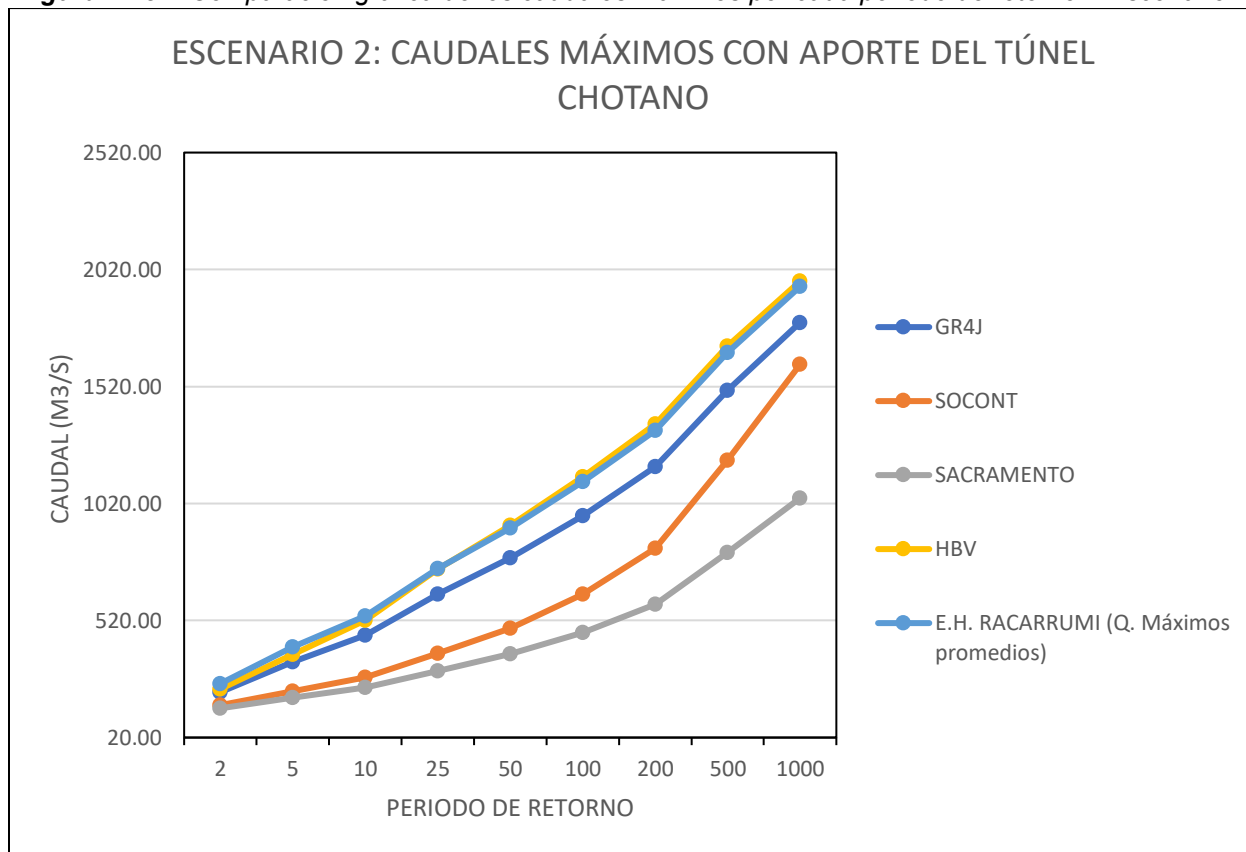
Por su parte, la Figura 31 muestra la comparación de los caudales máximos estimados para periodos de retorno de 2 a 1000 años, permitiendo identificar la tendencia general, las diferencias entre los modelos evaluados y su grado de ajuste respecto a los registros observados.

Tabla 39: Comparativa de caudales máximos en el escenario 2, con aporte del Túnel Chotano

		Caudales máximos (m3/s) en la estación hidrométrica Racarrumi ESCENARIO 2									
		Tr (años)	2	5	10	25	50	100	200	500	1000
MODELOS EN ESTUDIO (m3/s)	GR4J	214.01	344.28	458.14	632.06	787.84	968.25	1177.91	1503.13	1793.80	
	SOCONT	158.53	217.02	276.97	378.94	486.53	631.76	829.11	1205.07	1614.45	
	SACRAMENTO	144.96	189.88	234.88	305.42	376.54	468.96	590.04	811.42	1043.45	
	HBV	227.43	375.55	521.16	739.01	926.53	1133.54	1360.60	1693.10	1970.27	
ESTACIÓN HIDROMÉTRICA RACARRUMI (m3/s)	E.H. RACARRUMI (Q. Máximos promedios)	250.59	406.94	539.72	741.27	916.33	1113.07	1333.43	1664.41	1947.47	

Fuente: Elaboración propia

Figura N° 31: Comparación gráfica de los caudales máximos por cada periodo de retorno – Escenario 2



Fuente: Elaboración propia

En este escenario, la configuración de las subcuencas se mantiene igual a la del Escenario 1; sin embargo, se observa un aumento de manera significativa de los caudales únicamente en la Subcuenca 2, debido a que esta zona es la que directamente se ve influenciada por el trasvase proveniente del Túnel Chotano. Este aumento confirma la sensibilidad del modelo ante el aporte de externos, reproduciendo de forma coherente el comportamiento natural de la cuenca.

Como se puede apreciar el trasvase no altera de manera significativa los caudales máximos de crecida, porque su aporte es pequeño frente a los eventos extremos naturales de lluvia, representando de manera correcta los modelos hidrológicos ofrecidos por el programa Rs Minerve.

5.1. Discusión de Resultados:

Una vez presentado los caudales máximos generados podemos determinar qué modelo es más eficiente a usar en nuestra cuenca Chancay-Lambayeque, pero antes de eso, indicaremos acerca de los modelos válidos y no válidos como es el caso del SACRAMENTO que se explicó en el título 4.8.3 donde se tenía índices muy bajos

5.1.1. Validación de modelos hidrológicos:

Tal como se determinó en el título 2.9 como se hará la validación se presentará un cuadro resumen de dicha validación de cada modelo:

Tabla 40: Validación de los modelos

Índice	Excelente	Bueno/Satisfactorio	Aceptable	No satisfactorio
Nash-Sutcliffe (NSE)	> 0.75	0.65 - 0.75	0.50 - 0.64	< 0.50
Nash-In	> 0.75	0.65 - 0.75	0.50 - 0.64	< 0.50
Kling-Gupta (KGE)	> 0.80	0.70 - 0.80	0.50 - 0.69	< 0.50
Pearson	$\pm < 5\%$	$\pm 5\% - \pm 10\%$	$\pm 10\% - \pm 20\%$	$> \pm 20\%$

Fuente: Elaboración propia

Tabla 41: Evaluación de la validación de los modelos.

Modelo	NASH	NASH-LN	PEARSON	KGE	Evaluación general
GR4J	0.60 (Aceptable)	0.76 (Excelente)	0.82 (Excelente)	0.66 (Bueno)	Buen ajuste global , adecuada correlación y buena representación de los picos; su estimación para T = 1000 años (1793.80 m ³ /s) es cercana al valor observado (1947 m ³ /s).
SOCONT	0.59 (Aceptable)	0.69 (Bueno)	0.78 (Bueno)	0.60 (Aceptable)	Comportamiento estable , adecuada representación del flujo base; subestima picos, lo cual se refleja en un Q1000 de 1614.41 m ³ /s.
SACRAMENTO	0.50 (Aceptable)	0.65 (Bueno)	0.87 (Excelente)	0.50 (Aceptable)	Modelo sensible a la calibración ; presenta mayor dispersión y subestima caudales extremos, con un Q1000 bajo (1043.45 m ³ /s).
HBV	0.75 (Excelente)	0.81 (Excelente)	0.87 (Excelente)	0.83 (Excelente)	Mejor desempeño global , reproduce adecuadamente tanto caudales altos como bajos; su Q1000 (1970.27 m ³ /s) es el más cercano al extremo observado (1947 m ³ /s).

Fuente: Elaboración propia

Del análisis comparativo de la tabla 41, de los cuatro modelos implementados en el software RS Minerve, se determinó que el modelo HBV presentó el mejor desempeño general, con valores de NSE = 0.75 y KGE = 0.81, logrando reproducir de manera consistente los caudales observados tanto en el escenario 1 sin trasvase como el aporte del trasvase (escenario 2).

El modelo GR4J alcanzó resultados satisfactorios y puede considerarse como alternativa complementaria para simulaciones generales. El modelo SOCONT presentó un desempeño aceptable, aunque con limitaciones para la estimación de caudales extremos, por lo que su uso se recomienda solo para análisis de régimen hídrico y balance, sin em. Finalmente, el modelo SACRAMENTO fue descartado debido a su baja capacidad para reproducir adecuadamente los caudales máximos y su alta sensibilidad a la calibración.

CAPITULO VI: CONCLUSIONES

1. La cuenca del río Chancay-Lambayeque parte media alta se dividió en 9 subcuencas y para el análisis, se utilizaron datos de precipitación diaria y temperatura promedio diaria registrados por siete estaciones meteorológicas y dos estaciones hidrométricas, Racarrumi y Túnel Chotano, donde se evaluó en dos escenarios; el primero, sin considerar el trasvase de Túnel Chotano y el segundo considerando dicho trasvase, durante el periodo enero de 1993 hasta diciembre de 2022.
2. Se realizó la simulación lluvia-escorrentía en la estación hidrológica Racarrumi en los dos escenarios mencionados anteriormente, utilizando los modelos hidrológicos disponibles en la plataforma RS-Minerve: GR4J, SOCONT, SACRAMETNO y HBV. Estas simulaciones permitieron efectuar un análisis de sensibilidad de parámetros para la calibración y la evaluación de la eficiencia del modelo; asimismo, se analizaron las características geomorfológicas de la parte alta y media de la cuenca en estudio.
3. Del estudio comparativo de los cuatro modelos implementados en el Software RS-Minerve, se concluye :
 - ✓ El modelo HBV presentó el mejor desempeño hidrológico entre los modelos evaluados, mostrando los valores más altos en los índices estadísticos (NSE, KGE y Pearson) tanto en la calibración como en la validación. Esto demuestra su mayor capacidad para reproducir el comportamiento del caudal observado en la estación de aforo Racarrumi, siendo el modelo más confiable para representar el régimen hidrológico de la cuenca Chancay–Lambayeque.

- ✓ El modelo GR4J obtuvo un desempeño aceptable y estable, con indicadores dentro del rango satisfactorio, aunque tendió a sobrestimar los caudales máximos en los periodos de retorno. Puede considerarse como una alternativa complementaria para simulaciones generales.
 - ✓ Los modelos SOCONT y SACRAMENTO presentaron limitaciones en la simulación del caudal, mostrando desviaciones más altas respecto al caudal observado. Por tanto, no se recomienda su aplicación directa en estudios futuros sin una recalibración exhaustiva.
4. El análisis de los escenarios sin y con trasvase evidenció que la presencia del Túnel Chotano influye de forma moderada en los caudales máximos simulados. También se observa que los valores de los caudales máximos simulados se aproximan más a los caudales máximos anuales registrados en la estación Racarrumi, a medida que aumentan los periodos de retorno.
 5. El software RS Minerve demostró una notable versatilidad técnica, permitiendo integrar en una sola plataforma la delimitación de subcuencas, la simulación de procesos hidrológicos diarios, la calibración y validación automática, y el cálculo del tránsito de flujo. A diferencia de otros programas como HEC–HMS, RS Minerve permite obtener caudales diarios por cada subcuenca, facilitando la planificación hidráulica y el diseño de infraestructuras menores (canales, derivaciones, o estructuras de control).

6. RS Minerve también ofrece la posibilidad de vincular la modelación hidrológica con estructuras hidráulicas, como presas, centrales hidroeléctricas o sistemas de almacenamiento, dentro del mismo entorno de trabajo. Esto reduce la dependencia de programas adicionales, optimizando tiempo y precisión en la simulación de escenarios integrados.

CAPITULO VIII: RECOMENDACIONES

1. Se recomienda priorizar el uso del modelo HBV para futuras simulaciones hidrológicas en la cuenca Chancay–Lambayeque o en cuencas de comportamiento similar, por su mayor estabilidad y capacidad predictiva demostrada.
2. Se sugiere emplear el modelo GR4J como herramienta de comparación o análisis de sensibilidad, especialmente en estudios enfocados en eventos extremos o escenarios de cambio climático, donde su tendencia a sobrestimar puede ser útil para evaluar condiciones críticas. Evitar el uso directo de los modelos SOCONT y SACRAMENTO sin una recalibración más detallada o sin contar con una base de datos más densa, ya que presentaron menor desempeño estadístico en la modelación actual.
3. Se recomienda mantener actualizada la base de datos hidrometeorológica, especialmente los registros diarios de precipitación y caudal, a fin de mejorar la precisión del modelo y permitir su validación continua en escenarios con y sin trasvase.
4. Se sugiere fortalecer el uso del software RS Minerve en instituciones académicas y también en instituciones de la gestión del agua, como el caso del ANA (Autoridad Nacional del Agua), por su capacidad para integrar procesos hidrológicos e hidráulicos en una sola plataforma, reduciendo errores y simplificando el análisis espacial.
5. Ampliar futuros trabajos hacia la modelación hidrodinámica y análisis de escenarios de cambio climático utilizando RS Minerve, con el fin de evaluar el impacto de la variabilidad climática sobre la disponibilidad de recursos hídricos en la cuenca.

6. Aprovechar la funcionalidad de RS Minerve para el diseño de proyectos hidráulicos integrados, como presas, embalses o centrales hidroeléctricas, dado que el programa permite simular tanto el comportamiento natural del sistema hidrológico como su respuesta ante obras de regulación o derivación.

REFERENCIA

1. Taner M.Ü., Hunink J.E., Contreras, S., Hajar A., Hamed R., Morales D., Wasti A., Ray, P. (2019). El Marco del Árbol de Decisión: Aplicación a la Cuenca de Chancay-Lambayeque, Peru. Informe final. Deltares, FutureWater, INSIDEO and University of Cincinnati para el Banco Mundial.
2. Rincon, L. (2019). Aplicación de Los Modelos Lluvia-Escorrentía GR2M y GR4J en la Cuenca del Rio Guali para la Gestión de Los Recursos Hídricos. Universidad Santo Tomas.
3. Astorayme, M., Garcia, J., Suarez, W., Huggel, C., Molina, W. (2015). Modelización hidrológica con un enfoque semidistribuido en la cuenca del río Chillón, Perú. Revista Peruana Geo-Atmosférica RPGA. https://web2.senamhi.gob.pe/rpga/pdf/2015_vol04/paper8.pdf
4. Coras, N. (2019). Modelación hidrológica para la generación de caudales diarios en la subcuenca Shullcas. Universidad Nacional Agraria La Molina
5. Perrin, C., Michael, C. y Andreassian, V. (2003) Mejora de un modelo parsimonioso para simulaciones de flujo de corrientes. Revista de Hidrología, 279, 275-289. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00225-7](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00225-7)
6. Autoridad Nacional del Agua. (s.f.). Informacion Institucional. <https://www.gob.pe/institucion/ana/institucional>.

7. Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (s.f.). Capítulo VII de los Órganos Desconcentrados. Autoridad Nacional del Agua. <https://www.ana.gob.pe/organizacion-funciones/reglamento-de-organizacion-de-funciones/capitulo-vii.aspx>.
8. Buguña, N. (2019). Aplicación de modelos hidrológicos para la estimación de caudales mensuales en la sub cuenca del río Bigote. Universidad de Piura.
9. Araque, M., Vascones, M., Mancheno, A., Álvarez, C., Prehn, C., Cevallos, C., Ortiz, L. (2019). Cuenca Hidrográficas (1.^a ed.). Universidad Politécnica Salesiana.
10. Quillatupa, Y., Cardenas, E., (2016). Relación precipitación, infiltración y escorrentía para la época de lluvia en la microcuenca Yanango-Chanchamayo. Universidad Nacional del Centro del Perú.
11. Chow, V., Maidment, D., Mays, L. (1994). Hidrología aplicada (1.^a ed.). McGraw Hill.
12. Breña, A., Jacobo, M. (2006). Principios y Fundamentos de la Hidrología Superficial (1.^a ed.). Universidad Autónoma Metropolitana. <https://casadelibrosabiertos.uam.mx/gpd-principios-y-fundamentos-de-hidrologia-superficial.html>.
13. López, J. (2020). Modelación hidrológica utilizando el software Rs Minerve en la subcuenca del río Villalobos enfocado a la gestión de riesgo. Universidad de San Carlos de Guatemala
14. Moriasi et al., 2007; Knoben et al., 2019

15. Avellaneda Córdova, A. del P., & Montalvo Esquives, K. M. (2019). Análisis comparativo de los métodos racional modificado Témez, hidrogramas unitarios SCS, Clark y Snyder en la obtención de caudales máximos para las subcuencas Cañad y Alto Chancay-Lambayeque – cuenca Chancay-Lambayeque, Tesis de bachiller para optar el título profesional de Ingeniero Civil, Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo

CAPITULO X: ANEXOS

ANEXO N° 01: DATOS GEOMORFOLOGICOS DE LA CUENCA EN ESTUDIO

A). PARAMETROS DE FORMA:

- Área de la cuenca : 2,354.09 Km²
- Perímetro de la cuenca : 277.19 Km
- Longitud de la cuenca : 79.91 Km
- Ancho de la cuenca : 30.61 Km
- Factor de Forma : 0.398
- Coeficiente de Compacidad:

$$K_c = 0.28 \cdot P / \sqrt{A}$$

$$K_c = 1.60$$

- Relación de elongación:

$$R_e = 1.128 \cdot \sqrt{A} / L_{\text{cuenca}}$$

$$R_e = 0.71$$

- Orden de cauce de los ríos:

ORDEN	COLOR	LONGITUD KM	%ORDEN
PRIMERO	ANARANJADO	479.157	49.237
SEGUNDO	ROSADO	278.074	28.574
TERCER	VERDE	83.81	8.612
CUARTO	AZUL	84.648	8.698
QUINTO	MARRON	47.485	4.879
TOTAL		973.174	100.000

ORDEN	N° CORRIENTES	RELACION DE BIFURCACIÓN
PRIMERO	229	2.00877
SEGUNDO	114	
TERCERO	39	2.92308
CUARTO	43	1.10256
QUINTO	32	0.81250
TOTAL	457	6.84691

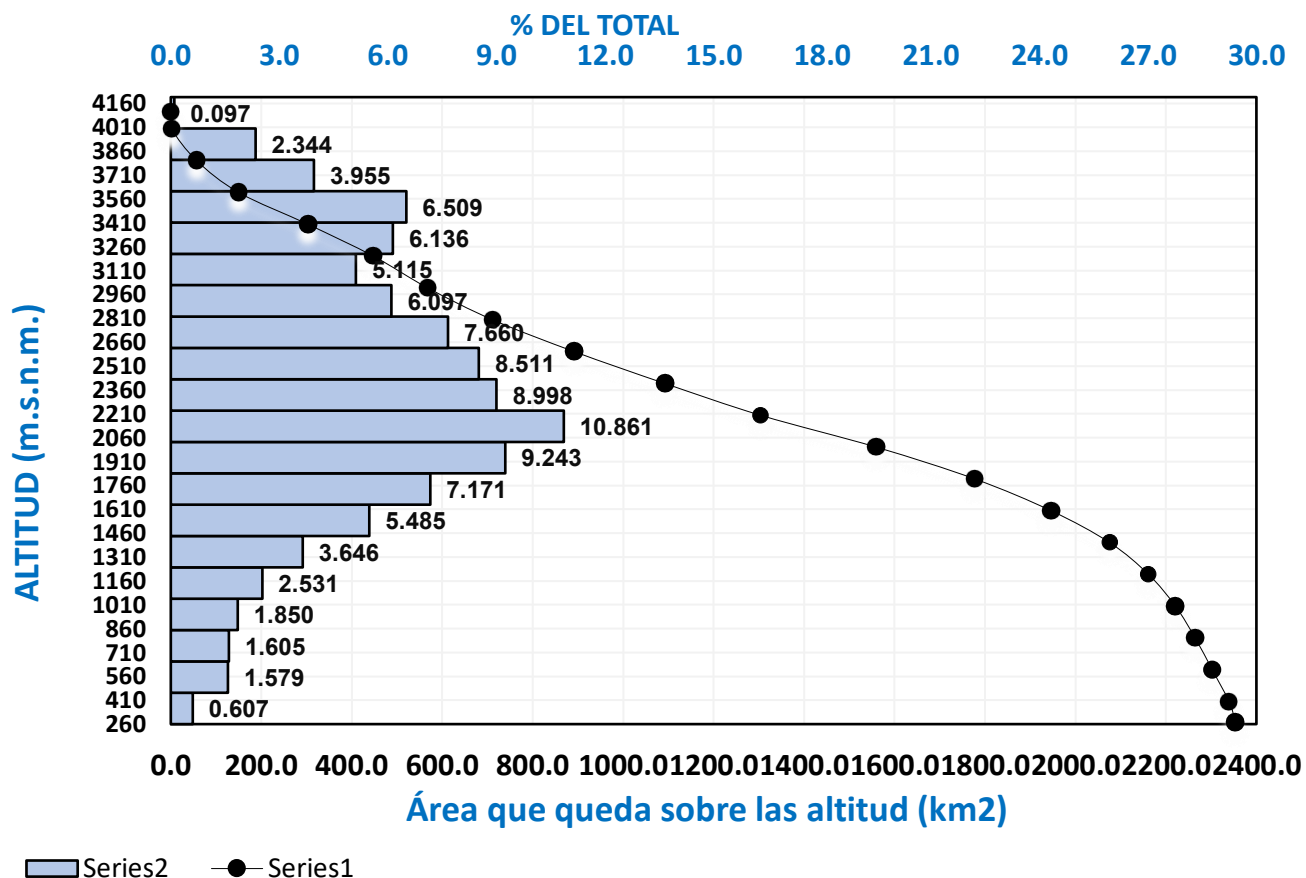
- Longitud del cauce principal: 117.89 Km

B). PARAMETROS DE RELIEVE:

- Curva hipsométrica y frecuencia de altitudes:

ALTITUD (msnm) (1)	AREAS PARCIALES (Km2) (2)	AREAS ACUMULADAS (km2) (3)	AREAS QUE QUEDAN SOBRE LAS ALTITUDES (km2) (4)= AT-(3)	% DEL TOTAL (5)= [(2)/AT]X100	% DEL TOTAL QUE QUEDA SOBRE LA ALTITUD (6)=[(4)/AT]X100
PTO MAS BAJO					
269	0.00000	0.000	2354.090	0.000	100.000
400	14.29000	14.290	2339.800	0.607	99.393
600	37.16000	51.450	2302.640	1.579	97.814
800	37.79000	89.240	2264.850	1.605	96.209
1000	43.55000	132.790	2221.300	1.850	94.359
1200	59.58000	192.370	2161.720	2.531	91.828
1400	85.83000	278.200	2075.890	3.646	88.182
1600	129.12000	407.320	1946.770	5.485	82.697
1800	168.82000	576.140	1777.950	7.171	75.526
2000	217.59000	793.730	1560.360	9.243	66.283
2200	255.67000	1049.400	1304.690	10.861	55.422
2400	211.83000	1261.230	1092.860	8.998	46.424
2600	200.36000	1461.590	892.500	8.511	37.913
2800	180.33000	1641.920	712.170	7.660	30.252
3000	143.54000	1785.460	568.630	6.097	24.155
3200	120.40000	1905.860	448.230	5.115	19.040
3400	144.45000	2050.310	303.780	6.136	12.904
3600	153.23000	2203.540	150.550	6.509	6.395
3800	93.10000	2296.640	57.450	3.955	2.440
4000	55.17000	2351.810	2.280	2.344	0.097
4107	2.28000	2362.71	0.000	0.097	0.000
	2362.71			100.000	

CURVA HIPSONOMETRICA -FRECUENCIA DE ALTITUDES



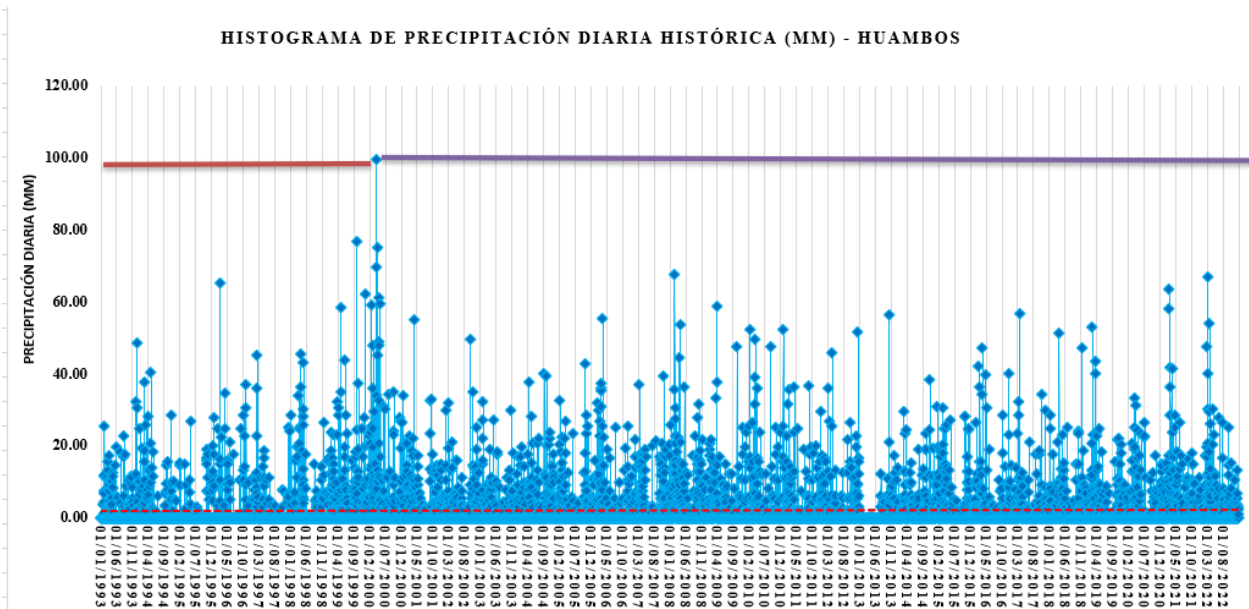
- Elevación media de la cuenca: 2354.84 m.s.n.m
- Pendiente media de la cuenca:

N°	RANGO PENDIENTE		PROMEDIO	NUMERO DE OCURRENCIA	PROMEDIO X OCURRENCIA
	INFERIOR	SUPERIOR			
1	0	2	1.0	2775.423	2775.423
2	2	4	3.0	2236.346	6709.038
3	4	8	6.0	5946.071	35676.426
4	8	15	11.5	14610.315	168018.6225
5	15	25	20.0	33212.181	664243.62
6	25	50	37.5	120749.85	4528119.375
7	50	75	62.5	42614.265	2663391.563
8	75	100	87.5	13264.549	1160648.038
				235409	9229582.105
PENDIENTE MEDIA DE LA CUENCA:					39.207

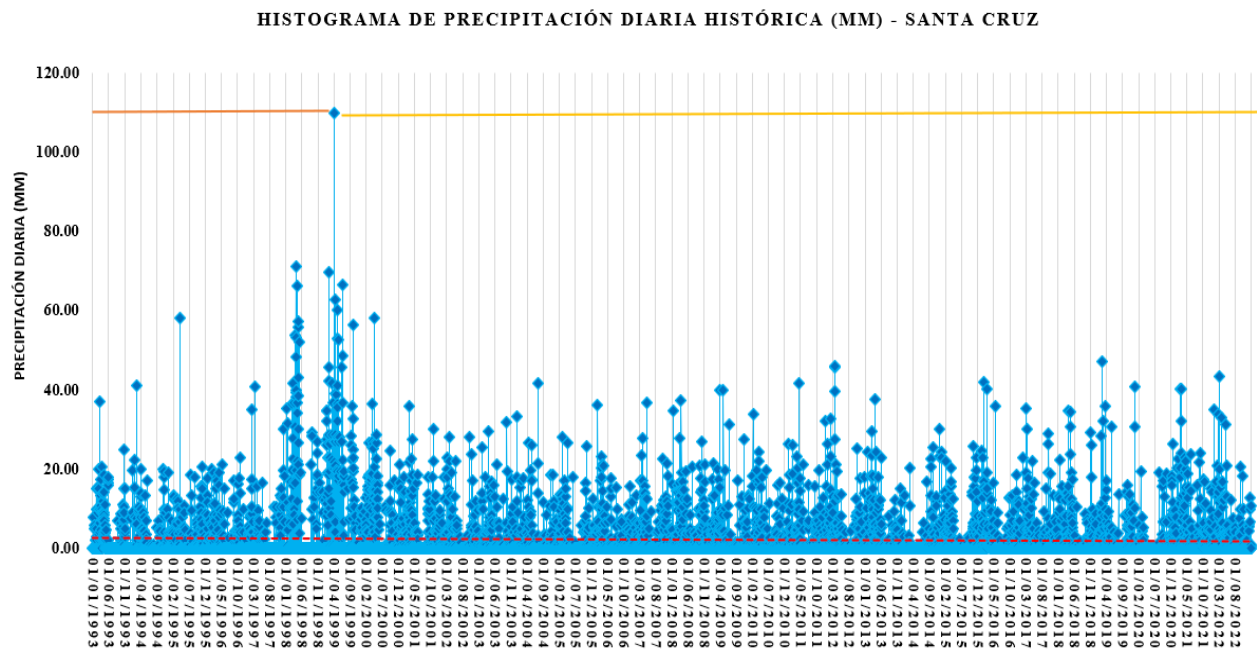
ANEXO N° 02: ANALISIS DE CONSISTENCIA DE DATOS

A) HISTOGRAMAS DE ANALISIS DE SALTO (ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS):

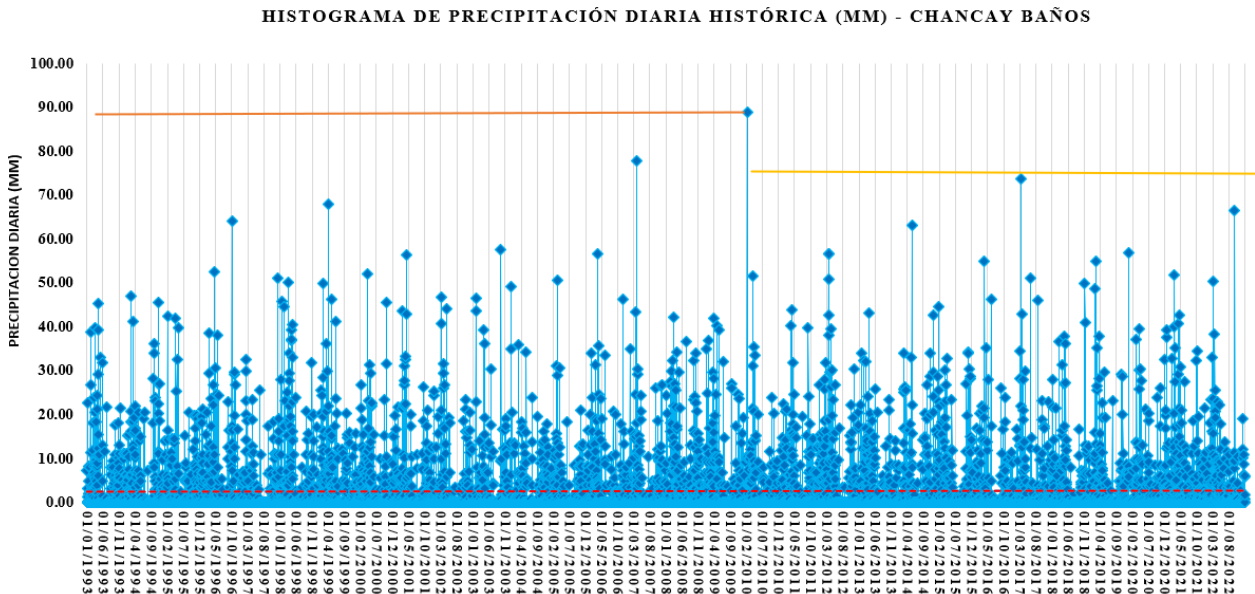
- Estación Huambos



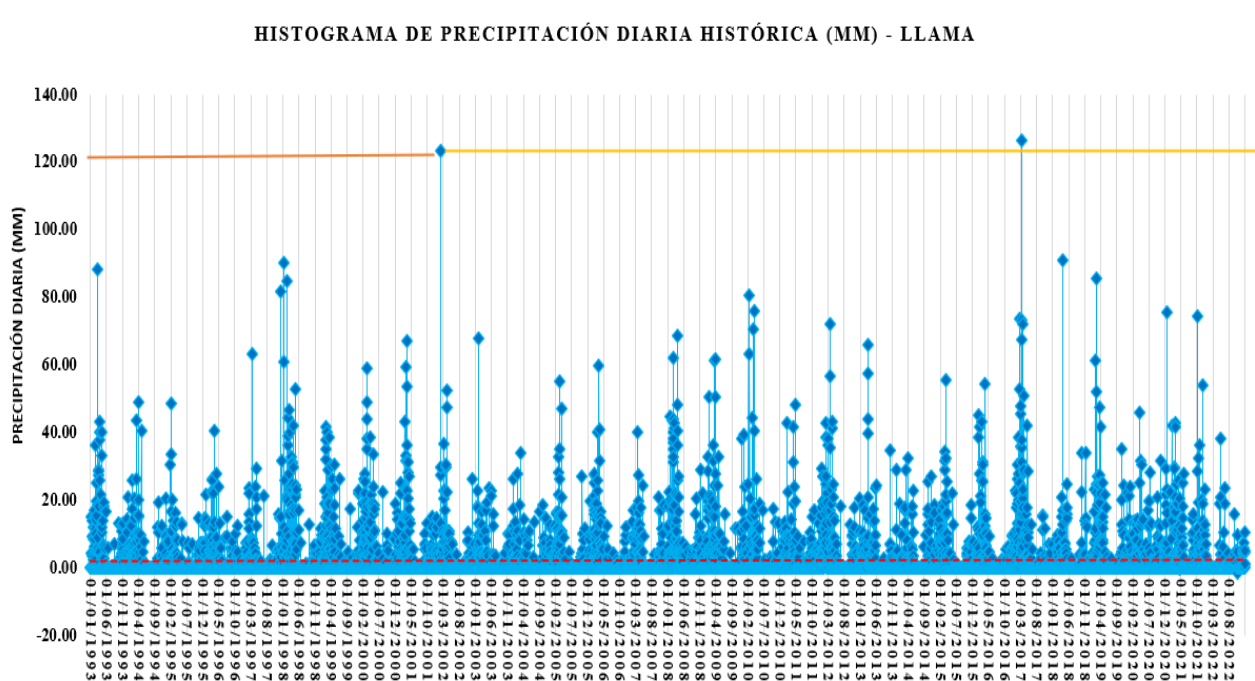
- Estación Santa Cruz



- Estación Chancay Baños

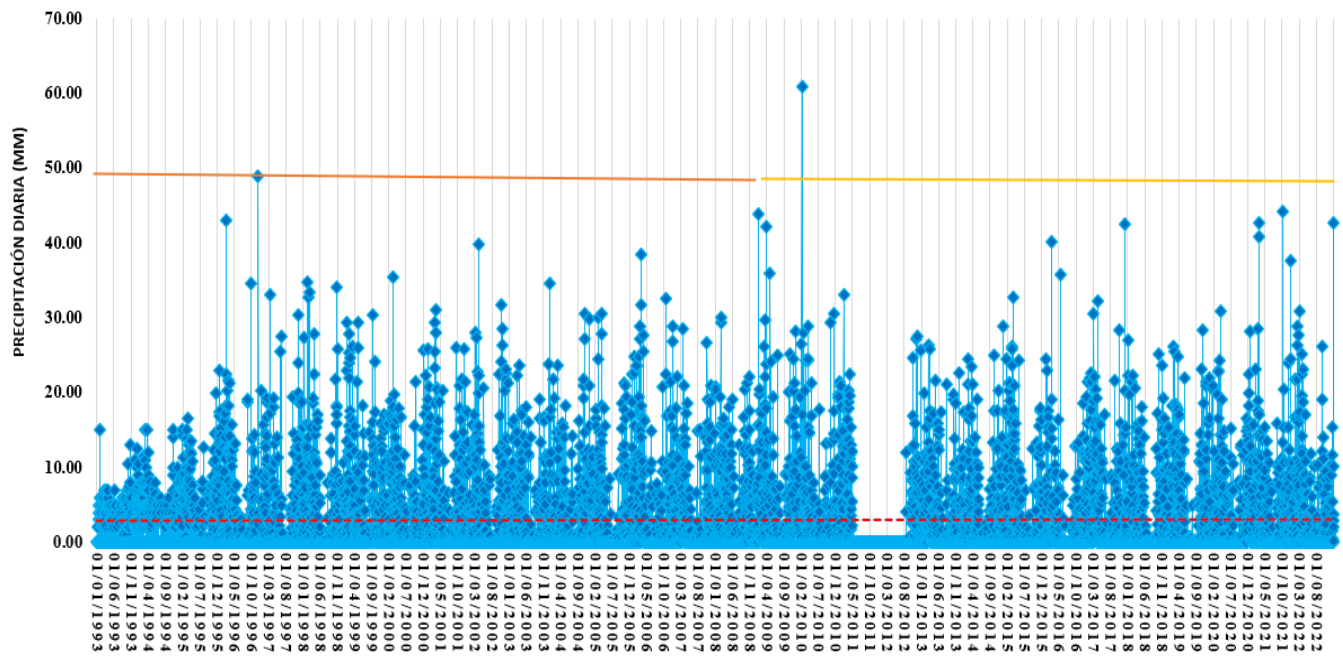


- Estación Llama



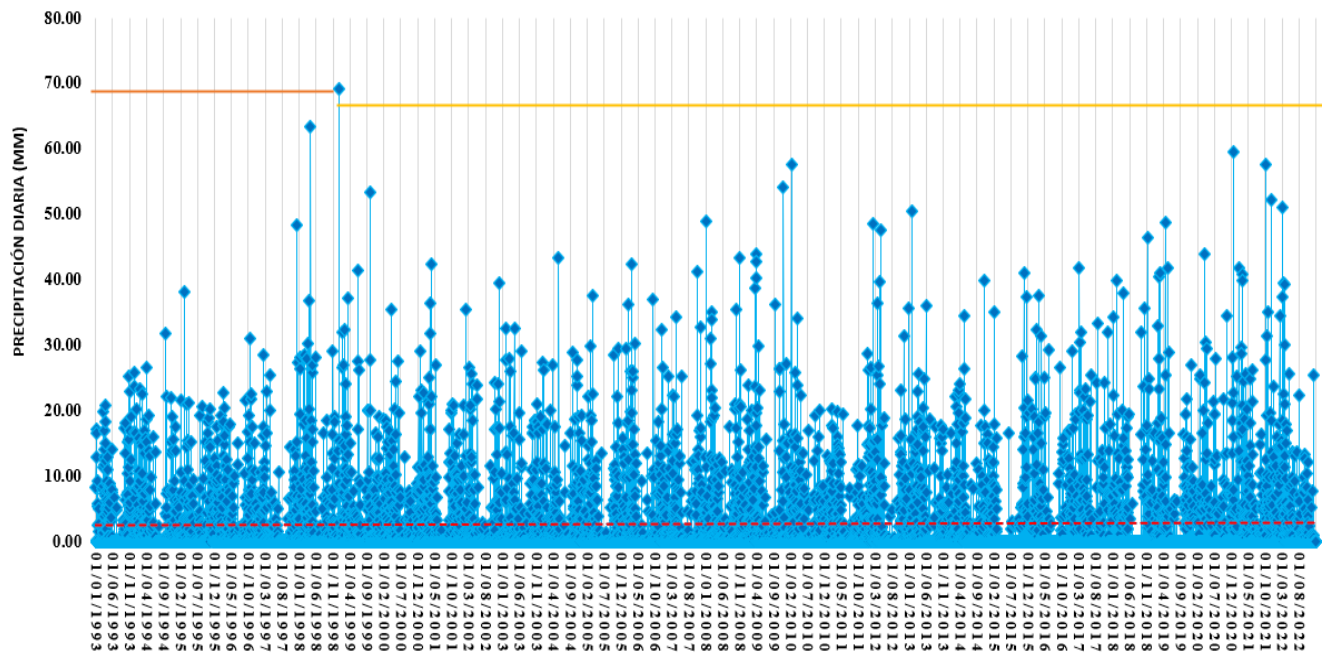
- Estación Quilcate

HISTOGRAMA DE PRECIPITACIÓN DIARIA HISTÓRICA (MM) - QUILCATE



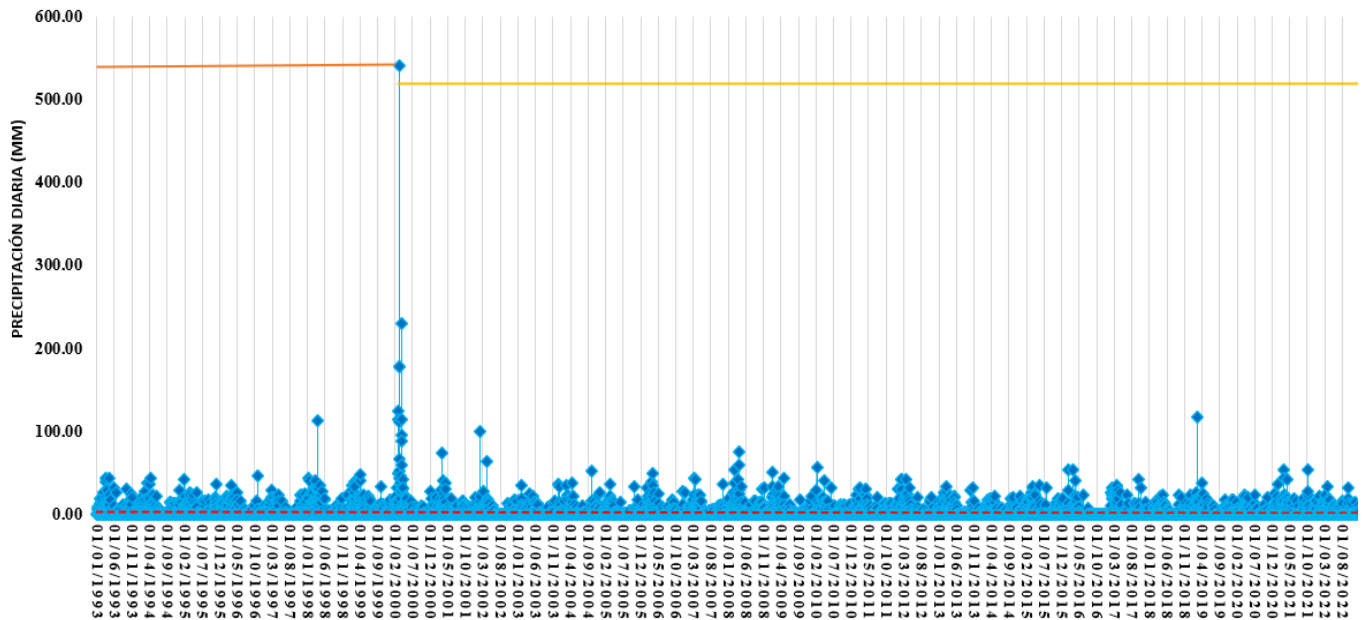
- Estación Chotano-Lajas

HISTOGRAMA DE PRECIPITACIÓN DIARIA HISTÓRICA (MM) - CHOTANO-LAJAS



- Estación Udima

HISTOGRAMA DE PRECIPITACIÓN DIARIA HISTÓRICA (MM) - UDIMA



B) Análisis de consistencia (ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS):

- Análisis consistencia, estación Huambos

DATOS DUDOSOS Periodos Muestrales		DATOS CONFIABLES Periodos Muestrales	
Entre los años 01/01/1993 – 18/04/2000		Entre los años 19/04/2000- 31/12/2022	
Tamaño de la muestra (n1) =	2665	Tamaño de la muestra (n2) =	8292
Media de la muestra $\bar{X}_1$ =	2.11	Media de la muestra $\bar{X}_2$ =	2.29
Desviación Stand. (S1) =	6.80	Desviación Stand. (S2) =	6.12
Grados de Libertad (GL1) =	2664	Grados de Libertad (GL2) =	8291
RESULTADOS			
PRUEBA “T” DE STUDENT			
Desviación estándar ponderada:			6.29
Desviación de las diferencias de los promedios:			0.14
Cálculo del T, calculado (tc) según:			1.29
Cálculo del valor critico de t, tabular Tt:			1.96
Grados de Libertad:			10955.00
CONCLUSION			
$ t_c = 1.29 < t_t = 1.9602$		HOMOGENEIDAD OK	
PRUEBA “F” DE FISHER			
Cálculo de F, Calculado (Fc) según:			1.24

Cálculo del F tabular (valor crítico de Ft) Ft:	1.0528
CONCLUSION	
$ F_c = 1.24 > F_t = 1.0528$	NO HOMOGENEIDAD (CORREGIR LA PRECIPITACION)

➤ Análisis consistencia, estación Santa Cruz

DATOS DUDOSOS Periodos Muestrales		DATOS CONFIABLES Periodos Muestrales	
Entre los años 01/01/1993 – 04/04/1999		Entre los años 05/04/1999- 31/12/2022	
Tamaño de la muestra (n1) =	2285	Tamaño de la muestra (n2) =	8672
Media de la muestra $\bar{X}_1$ =	2.50	Media de la muestra $\bar{X}_2$ =	2.09
Desviación Stand. (S1) =	7.35	Desviación Stand. (S2) =	5.48
Grados de Libertad (GL1) =	2284	Grados de Libertad (GL2) =	8671
RESULTADOS			
PRUEBA “T” DE STUDENT			
Desviación estándar ponderada:			5.91
Desviación de las diferencias de los promedios:			0.14
Cálculo del T, calculado (tc) según:			2.96
Cálculo del valor critico de t, tabular Tt:			1.96
Grados de Libertad:			10955.00
CONCLUSION			
$ t_c = 2.96 > t_t = 1.9602$		NO HOMOGENEIDAD (CORREGIR LA PRECIPITACION)	
PRUEBA “F” DE FISHER			
Cálculo de F, Calculado (Fc) según:			1.80
Cálculo del F tabular (valor critico de Ft) Ft:			1.0557
CONCLUSION			
$ F_c = 1.80 > F_t = 1.0557$		NO HOMOGENEIDAD (CORREGIR LA PRECIPITACION)	

➤ Análisis consistencia, estación Chancay Baños

DATOS DUDOSOS Periodos Muestrales		DATOS CONFIABLES Periodos Muestrales	
Entre los años 01/01/1993 – 06/01/2010		Entre los años 07/01/2010- 31/12/2022	
Tamaño de la muestra (n1) =	6246	Tamaño de la muestra (n2) =	4711
Media de la muestra $\bar{X}_1$ =	2.53	Media de la muestra $\bar{X}_2$ =	2.64
Desviación Stand. (S1) =	6.74	Desviación Stand. (S2) =	6.82
Grados de Libertad (GL1) =	6245	Grados de Libertad (GL2) =	4710
RESULTADOS			
PRUEBA “T” DE STUDENT			

Desviación estándar ponderada:	6.78
Desviación de las diferencias de los promedios:	0.13
Cálculo del T, calculado (t_c) según:	0.82
Cálculo del valor crítico de t, tabular T_t :	1.96
Grados de Libertad:	10955.00
CONCLUSION	
$ t_c = 0.82 < t_t = 1.9602$ HOMOGENEIDAD OK	
PRUEBA "F" DE FISHER	
Cálculo de F, Calculado (F_c) según:	1.02
Cálculo del F tabular (valor crítico de F_t) F_t :	1.046
CONCLUSION	
$ F_c = 1.02 < F_t = 1.046$ HOMOGENEIDAD OK	

➤ Análisis consistencia, estación Llama

DATOS DUDOSOS Periodos Muestrales		DATOS CONFIABLES Periodos Muestrales	
Entre los años 01/01/1993 – 07/01/1998		Entre los años 08/01/1998- 31/12/2022	
Tamaño de la muestra (n1) =	1833	Tamaño de la muestra (n2) =	9124
Media de la muestra $\bar{X}_1$ =	2.05	Media de la muestra $\bar{X}_2$ =	2.59
Desviación Stand. (S1) =	6.64	Desviación Stand. (S2) =	7.55
Grados de Libertad (GL1) =	1832	Grados de Libertad (GL2) =	9123
RESULTADOS			
PRUEBA “T” DE STUDENT			
Desviación estándar ponderada:			7.41
Desviación de las diferencias de los promedios:			0.19
Cálculo del T, calculado (tc) según:			2.85
Cálculo del valor critico de t, tabular Tt:			1.96
Grados de Libertad:			10955.00
CONCLUSION			
$ t_c = 2.85 > t_t = 1.9602$		NO HOMOGENEIDAD (CORREGIR LA PRECIPITACION)	
PRUEBA “F” DE FISHER			
Cálculo de F, Calculado (Fc) según:			1.30
Cálculo del F tabular (valor critico de Ft) Ft:			1.0607
CONCLUSION			
$ F_c = 1.30 > F_t = 1.0607$		NO HOMOGENEIDAD (CORREGIR LA PRECIPITACION)	

➤ Análisis consistencia, estación Quilcate

DATOS DUDOSOS Periodos Muestrales		DATOS CONFIABLES Periodos Muestrales	
Entre los años 01/01/1993 – 13/01/2009		Entre los años 14/01/2009- 31/12/2022	
Tamaño de la muestra (n1) =	5857	Tamaño de la muestra (n2) =	5100
Media de la muestra $\bar{X}1$ =	3.08	Media de la muestra $\bar{X}2$ =	2.89
Desviación Stand. (S1) =	5.43	Desviación Stand. (S2) =	5.57
Grados de Libertad (GL1) =	5856	Grados de Libertad (GL2) =	5099
RESULTADOS			
PRUEBA “T” DE STUDENT			
Desviación estándar ponderada:			5.49
Desviación de las diferencias de los promedios:			0.11
Cálculo del T, calculado (tc) según:			1.72
Cálculo del valor critico de t, tabular Tt:			1.96
Grados de Libertad:			10955.00
CONCLUSION			
$ t_c = 1.72 < t_t = 1.9602$ HOMOGENEIDAD OK			
PRUEBA “F” DE FISHER			
Cálculo de F, Calculado (Fc) según:			1.05
Cálculo del F tabular (valor critico de Ft) Ft:			1.0456
CONCLUSION			
$ F_c = 1.05 > F_t = 1.0456$ NO HOMOGENEIDAD (CORREGIR LA PRECIPITACION)			

➤ Análisis consistencia, estación Chotano-Lajas

DATOS DUDOSOS Periodos Muestrales		DATOS CONFIABLES Periodos Muestrales	
Entre los años 01/01/1993 – 13/01/2009		Entre los años 14/01/2009- 31/12/2022	
Tamaño de la muestra (n1) =	5857	Tamaño de la muestra (n2) =	5100
Media de la muestra $\bar{X}1$ =	3.08	Media de la muestra $\bar{X}2$ =	2.89
Desviación Stand. (S1) =	5.43	Desviación Stand. (S2) =	5.57
Grados de Libertad (GL1) =	5856	Grados de Libertad (GL2) =	5099
RESULTADOS			
PRUEBA “T” DE STUDENT			
Desviación estándar ponderada:			5.49
Desviación de las diferencias de los promedios:			0.11
Cálculo del T, calculado (tc) según:			1.72
Cálculo del valor critico de t, tabular Tt:			1.96
Grados de Libertad:			10955.00

CONCLUSION	
$ t_c = 1.72 < t_t = 1.9602$	HOMOGENEIDAD OK
PRUEBA "F" DE FISHER	
Cálculo de F, Calculado (Fc) según:	1.05
Cálculo del F tabular (valor critico de Ft) Ft:	1.0456
CONCLUSION	
$ F_c = 1.05 > F_t = 1.0456$	NO HOMOGENEIDAD (CORREGIR LA PRECIPITACION)

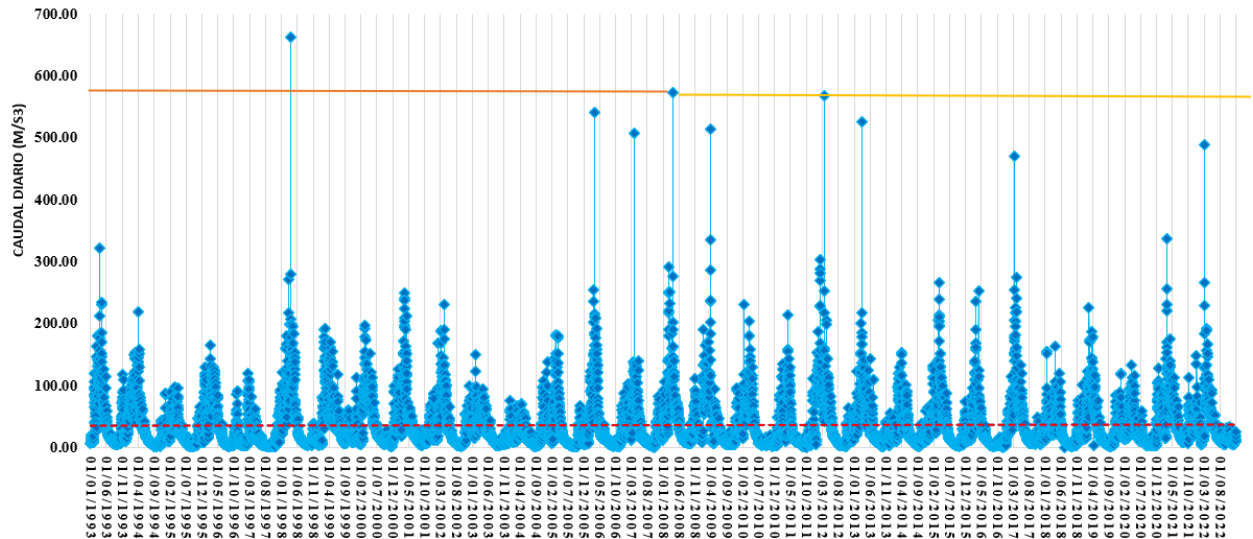
➤ Análisis consistencia, estación Udimá

DATOS DUDOSOS Periodos Muestrales		DATOS CONFIABLES Periodos Muestrales	
Entre los años 01/01/1993 – 08/03/2000		Entre los años 09/03/2000- 31/12/2022	
Tamaño de la muestra (n1) =	2624	Tamaño de la muestra (n2) =	8333
Media de la muestra $\bar{X}_1$ =	3.19	Media de la muestra $\bar{X}_2$ =	2.48
Desviación Stand. (S1) =	13.07	Desviación Stand. (S2) =	7.34
Grados de Libertad (GL1) =	2623	Grados de Libertad (GL2) =	8332
RESULTADOS			
PRUEBA “T” DE STUDENT			
Desviación estándar ponderada:			9.05
Desviación de las diferencias de los promedios:			0.20
Cálculo del T, calculado (tc) según:			3.50
Cálculo del valor critico de t, tabular Tt:			1.96
Grados de Libertad:			10955.00
CONCLUSION			
$ t_c = 3.50 > t_t = 1.9602$		NO HOMOGENEIDAD (CORREGIR LA PRECIPITACION)	
PRUEBA “F” DE FISHER			
Cálculo de F, Calculado (Fc) según:			3.17
Cálculo del F tabular (valor critico de Ft) Ft:			1.053
CONCLUSION			
$ F_c = 3.17 > F_t = 1.053$		NO HOMOGENEIDAD (CORREGIR LA PRECIPITACION)	

C) Histogramas de salto (ESTACIONES HIDROMÉTRICAS):

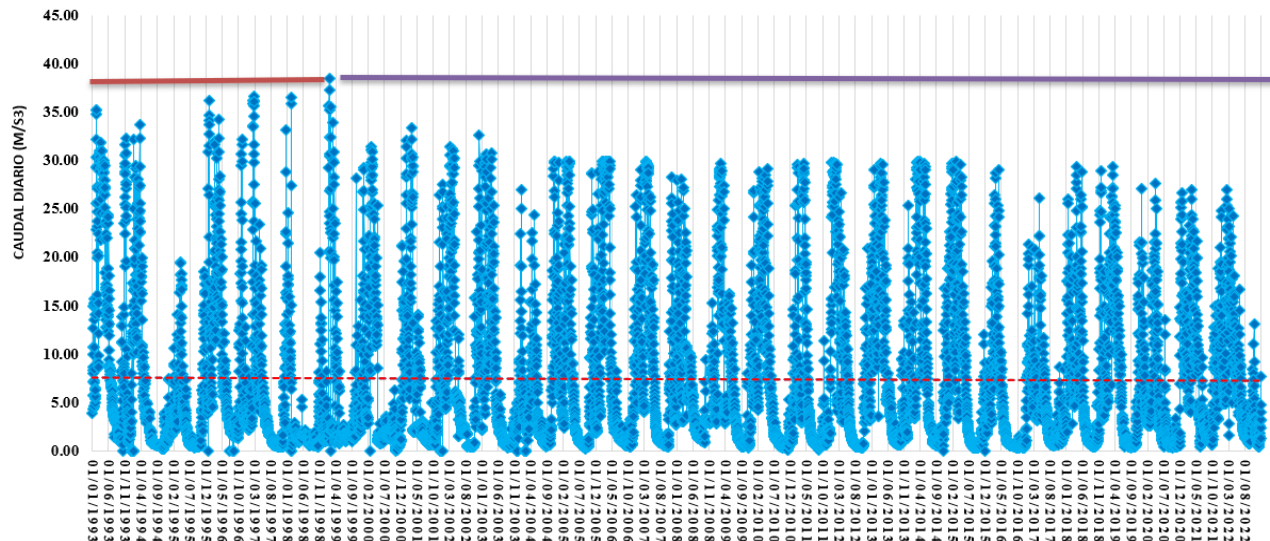
➤ Análisis salto, estación Racarrumi

HISTOGRAMA DE CAUDAL DIARIO HISTÓRICO (M³/S) - RACARRUMI



➤ Análisis salto, estación Túnel Chotano

HISTOGRAMA DE CAUDAL DIARIO HISTÓRICO (M³/S) - TÚNEL CHOTANO



D) Análisis de consistencia (ESTACIONES HIDROMÉTRICAS):

➤ Análisis consistencia, estación Racarrumi

DATOS DUDOSOS Periodos Muestrales		DATOS CONFIABLES Periodos Muestrales	
Entre los años 01/01/1993 – 02/04/2008		Entre los años 03/04/2008- 31/12/2022	
Tamaño de la muestra (n1) =	5571	Tamaño de la muestra (n2) =	5386
Media de la muestra $\bar{X}_1$ =	36.56	Media de la muestra $\bar{X}_2$ =	37.71
Desviación Stand. (S1) =	42.26	Desviación Stand. (S2) =	42.48
Grados de Libertad (GL1) =	5570	Grados de Libertad (GL2) =	5385
RESULTADOS			
PRUEBA “T” DE STUDENT			
Desviación estándar ponderada:			42.36
Desviación de las diferencias de los promedios:			0.81
Cálculo del T, calculado (tc) según:			1.42
Cálculo del valor critico de t, tabular Tt:			1.96
Grados de Libertad:			10955.00
CONCLUSION			
$ t_c = 1.42 < t_t = 1.9602$ HOMOGENEIDAD OK			
PRUEBA “F” DE FISHER			
Cálculo de F, Calculado (Fc) según:			1.01
Cálculo del F tabular (valor critico de Ft) Ft:			1.0455
CONCLUSION			
$ F_c = 1.01 < F_t = 1.0455$ HOMOGENEIDAD OK			

➤ Análisis consistencia, estación Túnel Chotano

DATOS DUDOSOS Periodos Muestrales		DATOS CONFIABLES Periodos Muestrales	
Entre los años 01/01/1993 – 29/01/1999		Entre los años 30/01/1999- 31/12/2022	
Tamaño de la muestra (n1) =	2220	Tamaño de la muestra (n2) =	8737
Media de la muestra $\bar{X}_1$ =	7.18	Media de la muestra $\bar{X}_2$ =	7.53
Desviación Stand. (S1) =	8.45	Desviación Stand. (S2) =	7.96
Grados de Libertad (GL1) =	2219	Grados de Libertad (GL2) =	8736
RESULTADOS			
PRUEBA “T” DE STUDENT			
Desviación estándar ponderada:			8.06
Desviación de las diferencias de los promedios:			0.19
Cálculo del T, calculado (tc) según:			1.83
Cálculo del valor critico de t, tabular Tt:			1.96

Grados de Libertad:	10955.00
CONCLUSION	
$ t_c = 1.83 < t_t = 1.9602$	HOMOGENEIDAD OK
PRUEBA “F” DE FISHER	
Cálculo de F, Calculado (Fc) según:	1.13
Cálculo del F tabular (valor critico de Ft) Ft:	1.0563
CONCLUSION	
$ F_c = 1.13 > F_t = 1.0563$	NO HOMOGENEIDAD (CORREGIR LA PRECIPITACION)

Ahora se corregirá los datos inconsistentes donde tenemos lo siguientes cuadros:

➤ Análisis de datos corregidos, estación Huambos:

DATOS DUDOSOS Periodos Muestrales		DATOS CONFIABLES Periodos Muestrales	
Entre los años 01/01/1993 – 18/04/2000		Entre los años 19/04/2000- 31/12/2022	
Tamaño de la muestra (n1) =	2665	Tamaño de la muestra (n2) =	8292
Media de la muestra $\bar{X}1$ =	2.29	Media de la muestra $\bar{X}2$ =	2.29
Desviación Stand. (S1) =	6.12	Desviación Stand. (S2) =	6.12
Grados de Libertad (GL1) =	2664	Grados de Libertad (GL2) =	8291
RESULTADOS			
PRUEBA “T” DE STUDENT			
Desviación estándar ponderada:			6.12
Desviación de las diferencias de los promedios:			0.14
Cálculo del T, calculado (tc) según:			0.00
Cálculo del valor critico de t, tabular Tt:			1.96
Grados de Libertad:			10955.00
CONCLUSION			
$ t_c = 0.00$		$t_t = 1.9602$ HOMOGENEIDAD OK	
PRUEBA “F” DE FISHER			
Cálculo de F, Calculado (Fc) según:			1.00
Cálculo del F tabular (valor critico de Ft) Ft:			1.0528
CONCLUSION			
$ F_c = 1.00$		$F_t = 1.0528$ HOMOGENEIDAD OK	

➤ Análisis de datos corregidos, estación Santa Cruz:

DATOS DUDOSOS Periodos Muestrales		DATOS CONFIABLES Periodos Muestrales	
Entre los años 01/01/1993 – 04/04/1999		Entre los años 05/04/1999- 31/12/2022	
Tamaño de la muestra (n_1) =	2285	Tamaño de la muestra (n_2) =	8672
Media de la muestra $\bar{X}_1$ =	2.10	Media de la muestra $\bar{X}_2$ =	2.09
Desviación Stand. (S_1) =	5.49	Desviación Stand. (S_2) =	5.48
Grados de Libertad (GL_1) =	2284	Grados de Libertad (GL_2) =	8671
RESULTADOS			
PRUEBA “T” DE STUDENT			
Desviación estándar ponderada:			5.48
Desviación de las diferencias de los promedios:			0.13
Cálculo del T, calculado (t_c) según:			0.07
Cálculo del valor critico de t, tabular T_t :			1.96
Grados de Libertad:			10955.00
CONCLUSION			
$ t_c = 0.07 < t_t = 1.9602$ HOMOGENEIDAD OK			
PRUEBA “F” DE FISHER			
Cálculo de F, Calculado (F_c) según:			1.00
Cálculo del F tabular (valor critico de F_t) F_t :			1.0557
CONCLUSION			
$ F_c = 1.00 < F_t = 1.0557$ HOMOGENEIDAD OK			

➤ Análisis de datos corregidos, estación Llama:

DATOS DUDOSOS Periodos Muestrales		DATOS CONFIABLES Periodos Muestrales	
Entre los años 01/01/1993 – 07/01/1998		Entre los años 08/01/1998- 31/12/2022	
Tamaño de la muestra (n_1) =	1833	Tamaño de la muestra (n_2) =	9124
Media de la muestra $\bar{X}_1$ =	2.59	Media de la muestra $\bar{X}_2$ =	2.59
Desviación Stand. (S_1) =	7.55	Desviación Stand. (S_2) =	7.55
Grados de Libertad (GL_1) =	1832	Grados de Libertad (GL_2) =	9123
RESULTADOS			
PRUEBA “T” DE STUDENT			
Desviación estándar ponderada:			7.55
Desviación de las diferencias de los promedios:			0.19
Cálculo del T, calculado (t_c) según:			0.00
Cálculo del valor critico de t, tabular T_t :			1.96
Grados de Libertad:			10955.00
CONCLUSION			

$ t_c = 0.00 < t_t = 1.9602$		HOMOGENEIDAD OK
PRUEBA “F” DE FISHER		
Cálculo de F, Calculado (Fc) según:		1.00
Cálculo del F tabular (valor critico de Ft) Ft:		1.0607
CONCLUSION		
$ F_c = 1.00 < F_t = 1.0607$		HOMOGENEIDAD OK

➤ Análisis de datos corregidos, estación Quilcate:

DATOS DUDOSOS Periodos Muestrales		DATOS CONFIABLES Periodos Muestrales	
Entre los años 01/01/1993 – 13/01/2009		Entre los años 14/01/2009- 31/12/2022	
Tamaño de la muestra (n1) =	58.57	Tamaño de la muestra (n2) =	5100
Media de la muestra $\bar{X}1$ =	3.08	Media de la muestra $\bar{X}2$ =	3.06
Desviación Stand. (S1) =	5.43	Desviación Stand. (S2) =	5.44
Grados de Libertad (GL1) =	5856	Grados de Libertad (GL2) =	5099
RESULTADOS			
PRUEBA “T” DE STUDENT			
Desviación estándar ponderada:			5.43
Desviación de las diferencias de los promedios:			0.10
Cálculo del T, calculado (tc) según:			0.11
Cálculo del valor critico de t, tabular Tt:			1.96
Grados de Libertad:			10955.00
CONCLUSION			
$ t_c = 0.11 < t_t = 1.9602$		HOMOGENEIDAD OK	
PRUEBA “F” DE FISHER			
Cálculo de F, Calculado (Fc) según:			1.00
Cálculo del F tabular (valor critico de Ft) Ft:			1.0456
CONCLUSION			
$ F_c = 1.00 < F_t = 1.0456$		HOMOGENEIDAD OK	

➤ Análisis de datos corregidos, estación Udimá

DATOS DUDOSOS Periodos Muestrales		DATOS CONFIABLES Periodos Muestrales	
Entre los años 01/01/1993 – 07/01/1998		Entre los años 08/01/1998- 31/12/2022	
Tamaño de la muestra (n1) =	1833	Tamaño de la muestra (n2) =	9124
Media de la muestra $\bar{X}1$ =	2.59	Media de la muestra $\bar{X}2$ =	2.59

Desviación Stand. (S1) =	7.55	Desviación Stand. (S2) =	7.55
Grados de Libertad (GL1) =	1832	Grados de Libertad (GL2) =	9123
RESULTADOS			
PRUEBA “T” DE STUDENT			
Desviación estándar ponderada:	7.55		
Desviación de las diferencias de los promedios:	0.19		
Cálculo del T, calculado (tc) según:	0.00		
Cálculo del valor critico de t, tabular Tt:	1.96		
Grados de Libertad:	10955.00		
CONCLUSION			
$ t_c = 0.00 < t_t = 1.9602$ HOMOGENEIDAD OK			
PRUEBA “F” DE FISHER			
Cálculo de F, Calculado (Fc) según:	1.00		
Calculo del F tabular (valor critico de Ft) Ft:	1.0607		
CONCLUSION			
$ F_c = 1.00 < F_t = 1.0607$ HOMOGENEIDAD OK			

➤ Análisis de datos corregidos, estación Chotano-Lajas

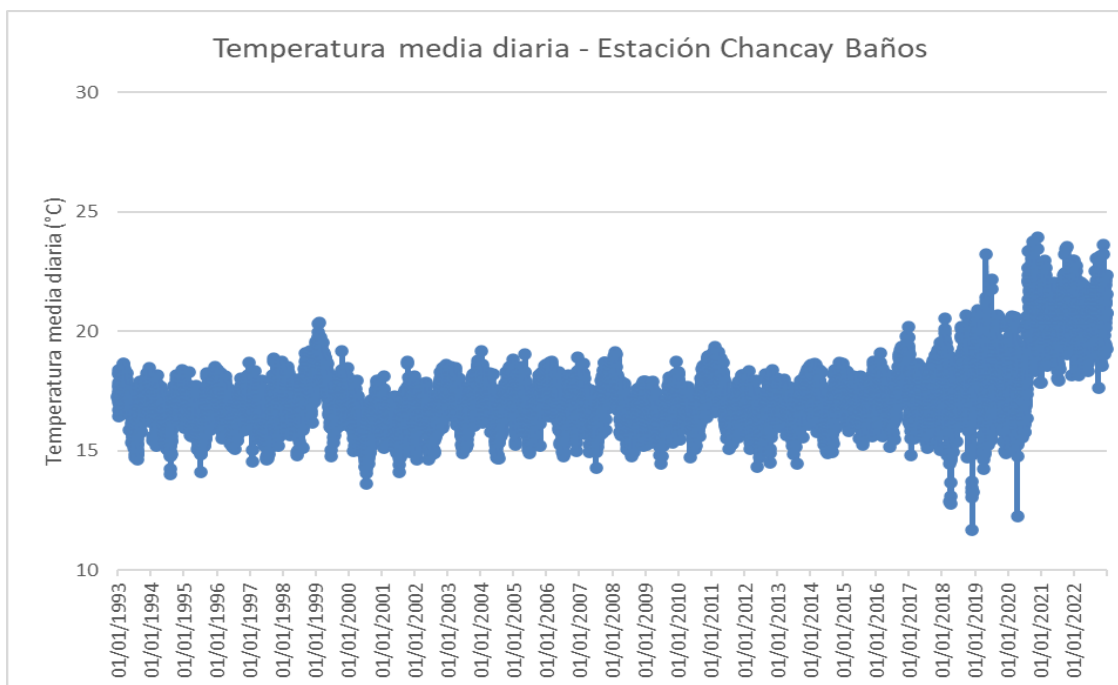
DATOS DUDOSOS Periodos Muestrales		DATOS CONFIABLES Periodos Muestrales	
Entre los años 01/01/1993 – 27/12/1998		Entre los años 28/12/1998- 31/12/2022	
Tamaño de la muestra (n1) =	2187	Tamaño de la muestra (n2) =	8770
Media de la muestra $\bar{X}_1$ =	2.75	Media de la muestra $\bar{X}_2$ =	2.75
Desviación Stand. (S1) =	6.17	Desviación Stand. (S2) =	6.17
Grados de Libertad (GL1) =	2186	Grados de Libertad (GL2) =	8769
RESULTADOS			
PRUEBA “T” DE STUDENT			
Desviación estándar ponderada:			6.17
Desviación de las diferencias de los promedios:			0.15
Cálculo del T, calculado (tc) según:			0.06
Cálculo del valor critico de t, tabular Tt:			1.96
Grados de Libertad:			10955.00
CONCLUSION			
$ t_c = 0.06 < t_t = 1.9602$		HOMOGENEIDAD OK	
PRUEBA “F” DE FISHER			
Cálculo de F, Calculado (Fc) según:			1.00
Cálculo del F tabular (valor critico de Ft) Ft:			1.0566
CONCLUSION			
$ F_c = 1.00 < F_t = 1.0566$		HOMOGENEIDAD OK	

➤ Análisis de datos corregidos, estación Túnel Chotano

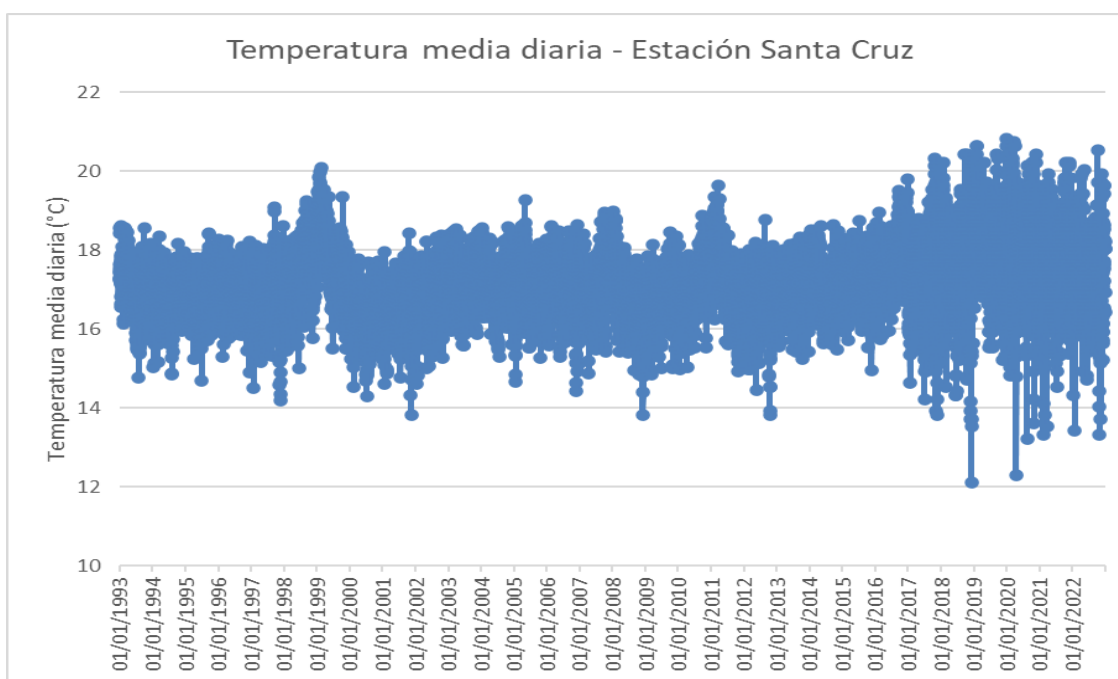
DATOS DUDOSOS Periodos Muestrales		DATOS CONFIABLES Periodos Muestrales	
Entre los años 01/01/1993 – 29/01/1999		Entre los años 30/01/1999- 31/12/2022	
Tamaño de la muestra (n1) =	2220	Tamaño de la muestra (n2) =	8737
Media de la muestra $\bar{X}1$ =	7.53	Media de la muestra $\bar{X}2$ =	7.53
Desviación Stand. (S1) =	7.96	Desviación Stand. (S2) =	7.96
Grados de Libertad (GL1) =	2219	Grados de Libertad (GL2) =	8736
RESULTADOS			
PRUEBA “T” DE STUDENT			
Desviación estándar ponderada:			7.96
Desviación de las diferencias de los promedios:			0.19
Cálculo del T, calculado (tc) según:			0.00
Cálculo del valor critico de t, tabular Tt:			1.96
Grados de Libertad:			10955.00
CONCLUSION			
$ t_c = 0.00 < t_t = 1.9602$		HOMOGENEIDAD OK	
PRUEBA “F” DE FISHER			
Cálculo de F, Calculado (Fc) según:			1.00
Cálculo del F tabular (valor critico de Ft) Ft:			1.0563
CONCLUSION			
$ F_c = 1.00 < F_t = 1.0563$		HOMOGENEIDAD OK	

ANEXO N° 03: DATOS DIARIOS DE TEMPERATURA

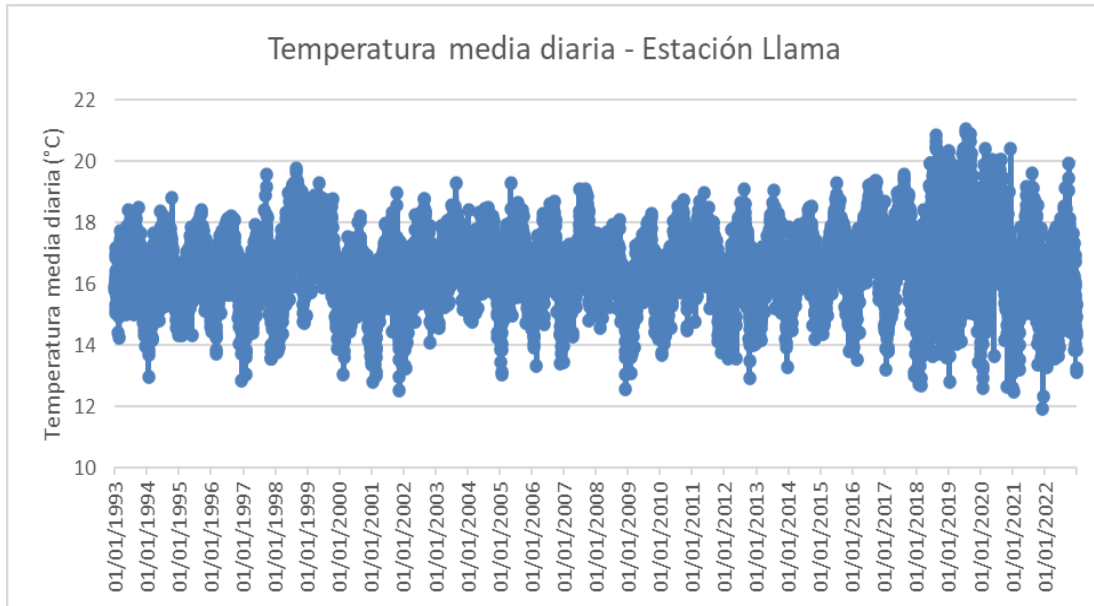
- Estación Chancay Baños:



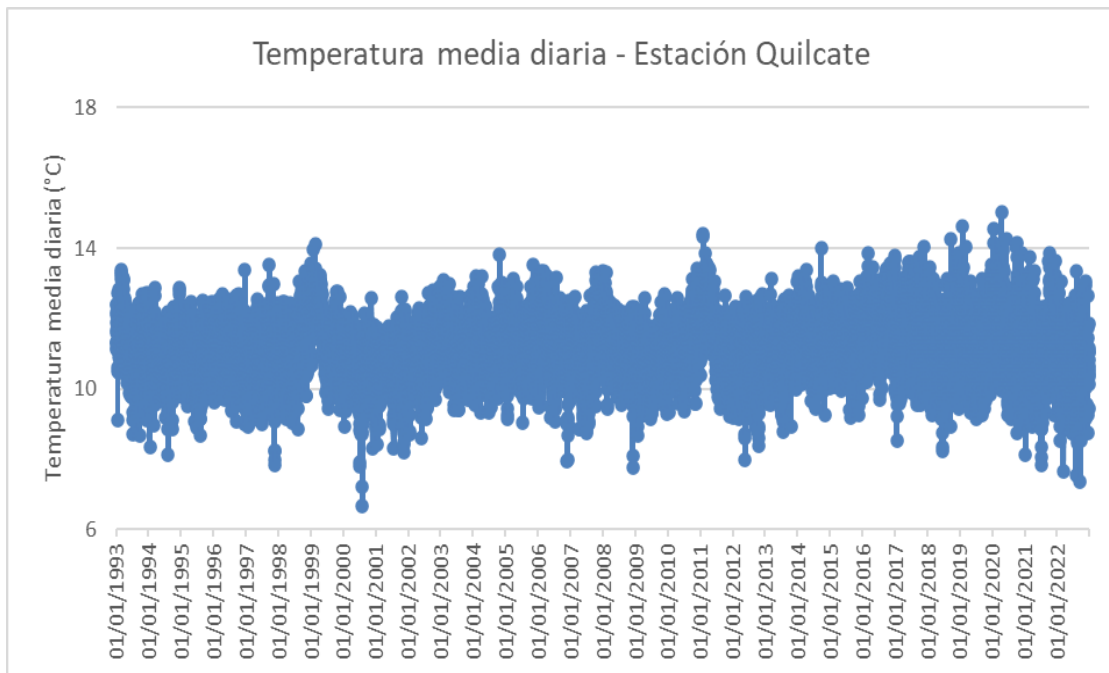
- Estación Santa Cruz:



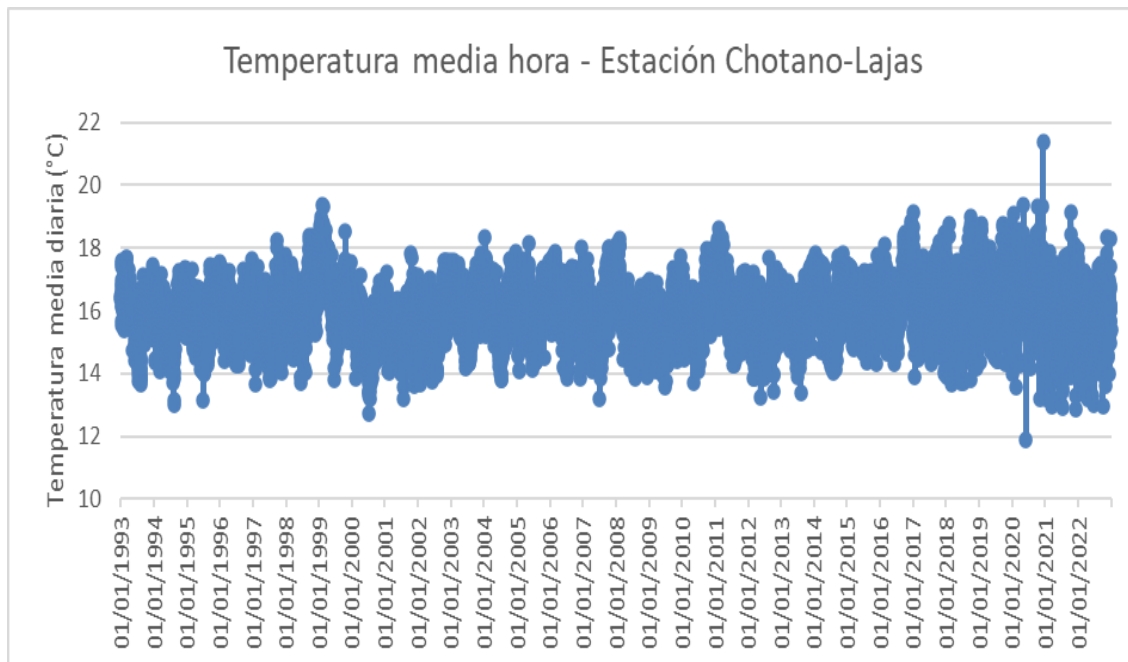
- Estación Llama:



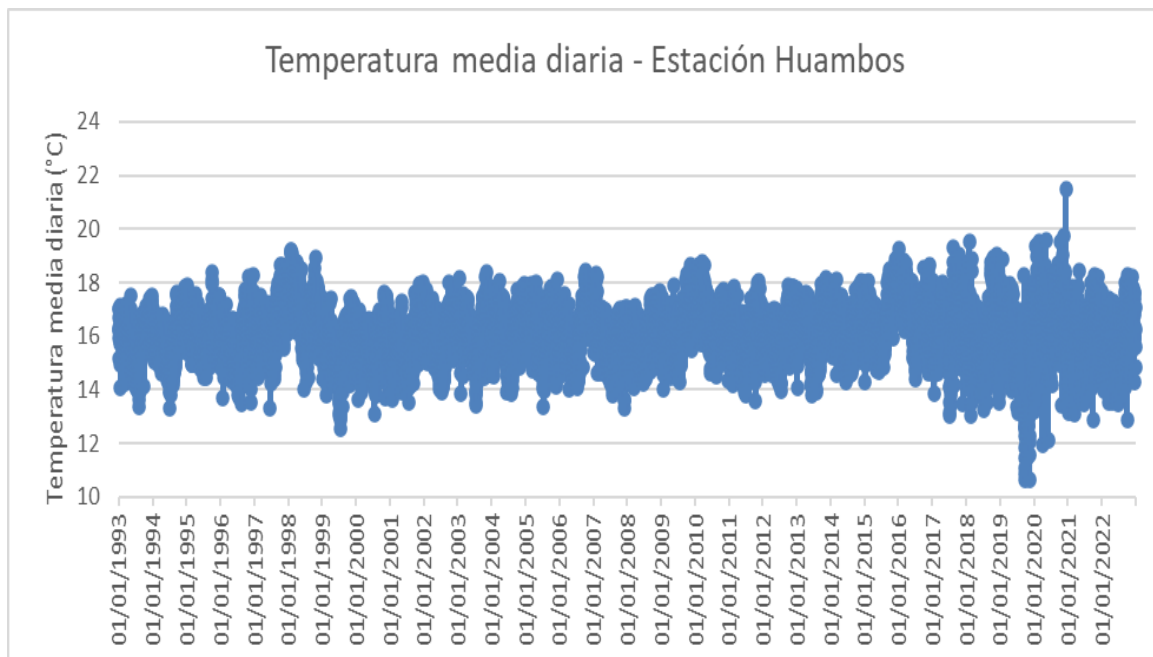
- Estación Quilcate:



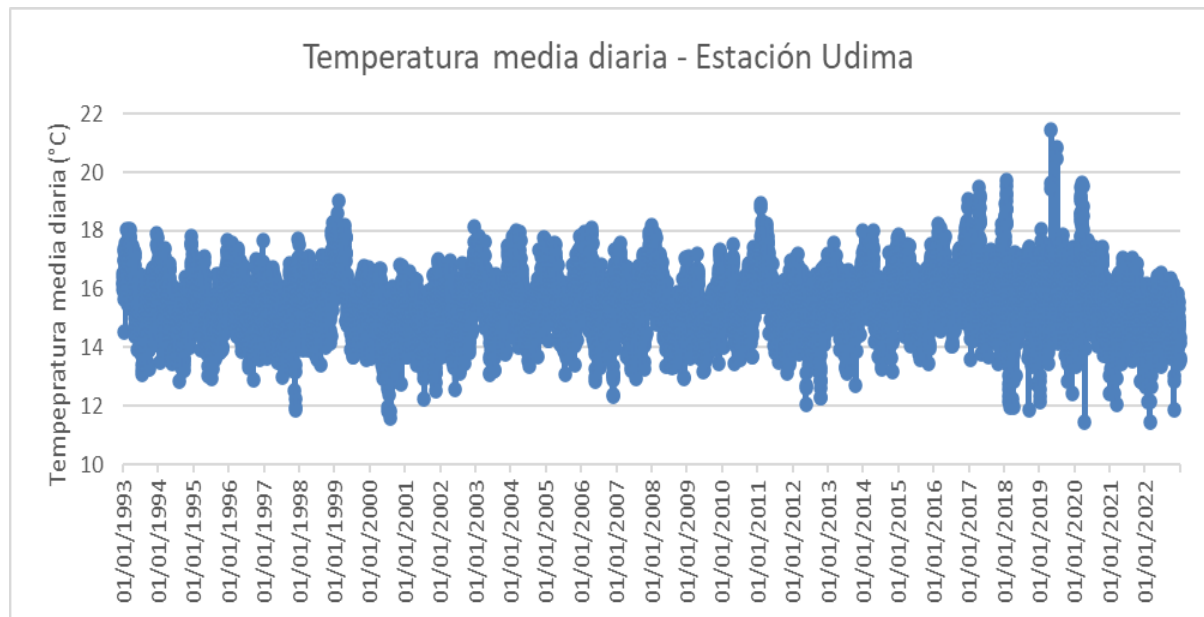
- Estación Chotano-Lajas:



- Estación Huambos:



- Estación Udima:



ANEXO N° 04: TIEMPO DE CONCETRACIÓN POR CADA SUBCUENCA

CÁLCULO DEL TIEMPO DE CONCENTRACIÓN SUBCUENCA 1

Longitud de máximo recorrido del cauce (L) en Km	29.27 Km	Área de la cuenca (A) en Km²	536.28 Km²
Diferencia de elevación del cauce principal (H) en m	1003.97 m	Pendiente del perfil de la corriente (S) en m/m	0.03430 m/m
Número de Curva	78.10 CN		

METODO DE PASSINI	METODO AUSTRALIANO	MÉTODO DE GIANDOTTI
$t_c = 0.085 \times \left(\frac{A^{0.3} L^{0.5}}{S^{0.5}} \right)$	$t_c = \frac{58L}{A^{0.1} S^{0.2}}$	$t_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{0.8\sqrt{H}}$
TIEMPO DE CONCENTRACIÓN CALCULADO (Tc) 8.33 horas	TIEMPO DE CONCENTRACIÓN CALCULADO (Tc) 7.44 horas	TIEMPO DE CONCENTRACIÓN CALCULADO (Tc) 5.39 horas
Se recomienda aplicar a cuencas que presentan una pendiente suave. Luino et al. (2009) han usado tal ecuación en estudios de inundaciones y afirman que fue publicado en el trabajo de Passini (1914).	En base a estudios realizados en el año 1977 en Australia. Se obtiene el tiempo de concentración en minutos.	Se utiliza mucho en Europa, sobre todo en Italia en la zona del centro y el norte. Su uso es recomendado para cuencas rurales montañosas con áreas entre 170 Km² - 70 000 Km²
MÉTODO DE TEMEZ	MÉTODO DE JOHNSTONE CROSS	MÉTODO DE VEN TE CHOW
$t_c = 0.28 \times \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.76}$	$t_c = 2.6 \times \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.5}$	$t_c = 0.213 \times \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.64}$
TIEMPO DE CONCENTRACIÓN CALCULADO (Tc) 6.92 horas	TIEMPO DE CONCENTRACIÓN CALCULADO (Tc) 5.81 horas	TIEMPO DE CONCENTRACIÓN CALCULADO (Tc) 5.44 horas
Su aplicación se ve limitada por el rango adecuado de uso que está entre 1 Km² - 3 000 Km². Según los registros de sus usuarios y de la aplicación de la misma no hay limitaciones por el tipo de terreno o su morfología.	Desarrollada para cuencas con áreas entre 25 y 1 624 millas cuadradas (64.7 Km² y 4206.1 km²).	Utilizada en cuencas rurales de los Estados Unidos con áreas entre 0,01 Km - 18,5 Km² y pendientes entre 0,51% < S < 9 %.

CÁLCULO DEL TIEMPO DE CONCENTRACIÓN SUBCUENCA 2

Longitud de máximo recorrido del cauce (L) en Km	13.06 Km	Área de la cuenca (A) en Km²	201.09 Km²
Diferencia de elevación del cauce principal (H) en m	199.77 m	Pendiente del perfil de la corriente (S) en m/m	0.02 m/m
Número de Curva	80.00 CN		

METODO DE PASSINI	METODO AUSTRALIANO	MÉTODO DE GIANDOTTI
$t_c = 0.085 \times \left(\frac{A^{0.3} L^{0.5}}{S^{0.5}} \right)$	$t_c = \frac{58L}{A^{0.1} S^{0.2}}$	$t_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{0.8\sqrt{H}}$
TIEMPO DE CONCENTRACIÓN CALCULADO (Tc) 7.29 horas	TIEMPO DE CONCENTRACIÓN CALCULADO (Tc) 4.30 horas	TIEMPO DE CONCENTRACIÓN CALCULADO (Tc) 6.75 horas
Se recomienda aplicar a cuencas que presentan una pendiente suave. Luino et al. (2009) han usado tal ecuación en estudios de inundaciones y afirman que fue publicado en el trabajo de Passini (1914).	En base a estudios realizados en el año 1977 en Australia. Se obtiene el tiempo de concentración en minutos.	Se utiliza mucho en Europa, sobre todo en Italia en la zona del centro y el norte. Su uso es recomendado para cuencas rurales montañosas con áreas entre 170 Km² - 70 000 Km²
MÉTODO DE TEMEZ	MÉTODO DE JOHNSTONE CROSS	MÉTODO DE VEN TE CHOW
$t_c = 0.28 \times \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.76}$	$t_c = 2.6 \times \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.5}$	$t_c = 0.213 \times \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.64}$
TIEMPO DE CONCENTRACIÓN CALCULADO (Tc) 4.37 horas	TIEMPO DE CONCENTRACIÓN CALCULADO (Tc) 4.75 horas	TIEMPO DE CONCENTRACIÓN CALCULADO (Tc) 4.20 horas
Su aplicación se ve limitada por el rango adecuado de uso que está entre 1 Km² - 3 000 Km². Según los registros de sus usuarios y de la aplicación de la misma no hay limitaciones por el tipo de terreno o su morfología.	Desarrollada para cuencas con áreas entre 25 y 1 624 millas cuadradas (64.7 Km² y 4206.1 km²).	Utilizada en cuencas rurales de los Estados Unidos con áreas entre 0,01 Km - 18,5 Km² y pendientes entre 0,51% < S < 9 %.

CÁLCULO DEL TIEMPO DE CONCENTRACIÓN SUBCUENCA 3

Longitud de máximo recorrido del cauce (L) en Km	29.80 Km	Área de la cuenca (A) en Km ²	313.36 Km ²
Diferencia de elevación del cauce principal (H) en m	689.11 m	Pendiente del perfil de la corriente (S) en m/m	0.02 m/m
Número de Curva	78.75 CN		

METODO DE PASSINI	METODO AUSTRALIANO	MÉTODO DE GIANDOTTI
$t_c = 0.085 \times \left(\frac{A^{0.3} L^{0.5}}{S^{0.5}} \right)$	$t_c = \frac{58L}{A^{0.1} S^{0.2}}$	$t_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{0.8\sqrt{H}}$
TIEMPO DE CONCENTRACIÓN CALCULADO (Tc) 8.68 horas	TIEMPO DE CONCENTRACIÓN CALCULADO (Tc) 8.65 horas	TIEMPO DE CONCENTRACIÓN CALCULADO (Tc) 5.50 horas
Se recomienda aplicar a cuencas que presentan una pendiente suave. Luino et al. (2009) han usado tal ecuación en estudios de inundaciones y afirman que fue publicado en el trabajo de Passini (1914).	En base a estudios realizados en el año 1977 en Australia. Se obtiene el tiempo de concentración en minutos.	Se utiliza mucho en Europa, sobre todo en Italia en la zona del centro y el norte. Su uso es recomendado para cuencas rurales montañosas con áreas entre 170 Km ² - 70 000 Km ²
MÉTODO DE TEMEZ	MÉTODO DE JOHNSTONE CROSS	MÉTODO DE VEN TE CHOW
$t_c = 0.28 \times \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.76}$	$t_c = 2.6 \times \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.5}$	$t_c = 0.213 \times \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.64}$
TIEMPO DE CONCENTRACIÓN CALCULADO (Tc) 7.56 horas	TIEMPO DE CONCENTRACIÓN CALCULADO (Tc) 6.47 horas	TIEMPO DE CONCENTRACIÓN CALCULADO (Tc) 6.24 horas
Su aplicación se ve limitada por el rango adecuado de uso que está entre 1 Km ² - 3 000 Km ² . Según los registros de sus usuarios y de la aplicación de la misma no hay limitaciones por el tipo de terreno o su morfología.	Desarrollada para cuencas con áreas entre 25 y 1 624 millas cuadradas (64.7 Km ² y 4206.1 km ²).	Utilizada en cuencas rurales de los Estados Unidos con áreas entre 0,01 Km - 18,5 Km ² y pendientes entre 0,51% < S < 9 %.

CÁLCULO DEL TIEMPO DE CONCENTRACIÓN SUBCUENCA 4

Longitud de máximo recorrido del cauce (L) en Km	18.11 Km	Área de la cuenca (A) en Km ²	256.35 Km ²
Diferencia de elevación del cauce principal (H) en m	1000.26 m	Pendiente del perfil de la corriente (S) en m/m	0.06 m/m
Número de Curva	78.65 CN		

METODO DE PASSINI	METODO AUSTRALIANO	MÉTOD DE GIANDOTTI
$t_c = 0.085 \times \left(\frac{A^{0.3} L^{0.5}}{S^{0.5}} \right)$	$t_c = \frac{58L}{A^{0.1} S^{0.2}}$	$t_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{0.8\sqrt{H}}$
TIEMPO DE CONCENTRACIÓN CALCULADO (Tc) 4.55 horas	TIEMPO DE CONCENTRACIÓN CALCULADO (Tc) 4.51 horas	TIEMPO DE CONCENTRACIÓN CALCULADO (Tc) 3.60 horas
Se recomienda aplicar a cuencas que presentan una pendiente suave. Luino et al. (2009) han usado tal ecuación en estudios de inundaciones y afirman que fue publicado en el trabajo de Passini (1914).	En base a estudios realizados en el año 1977 en Australia. Se obtiene el tiempo de concentración en minutos.	Se utiliza mucho en Europa, sobre todo en Italia en la zona del centro y el norte. Su uso es recomendado para cuencas rurales montañosas con áreas entre 170 Km ² - 70 000 Km ²
MÉTOD DE TEMEZ	MÉTOD DE JOHNSTONE CROSS	MÉTOD DE VEN TE CHOW
$t_c = 0.28 \times \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.76}$	$t_c = 2.6 \times \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.5}$	$t_c = 0.213 \times \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.64}$
TIEMPO DE CONCENTRACIÓN CALCULADO (Tc) 4.39 horas	TIEMPO DE CONCENTRACIÓN CALCULADO (Tc) 4.06 horas	TIEMPO DE CONCENTRACIÓN CALCULADO (Tc) 3.43 horas
Su aplicación se ve limitada por el rango adecuado de uso que está entre 1 Km ² - 3 000 Km ² . Según los registros de sus usuarios y de la aplicación de la misma no hay limitaciones por el tipo de terreno o su morfología.	Desarrollada para cuencas con áreas entre 25 y 1 624 millas cuadradas (64.7 Km ² y 4206.1 km ²).	Utilizada en cuencas rurales de los Estados Unidos con áreas entre 0,01 Km - 18,5 Km ² y pendientes entre 0,51% < S < 9 %.

CÁLCULO DEL TIEMPO DE CONCENTRACIÓN SUBCUENCA 5

Longitud de máximo recorrido del cauce (L) en Km	33.70 Km	Área de la cuenca (A) en Km ²	368.37 Km ²
Diferencia de elevación del cauce principal (H) en m	1452.14 m	Pendiente del perfil de la corriente (S) en m/m	0.04 m/m
Número de Curva	79.60 CN		

METODO DE PASSINI	METODO AUSTRALIANO	MÉTOD0 DE GIANDOTTI
$t_c = 0.085 \times \left(\frac{A^{0.3} L^{0.5}}{S^{0.5}} \right)$	$t_c = \frac{58L}{A^{0.1} S^{0.2}}$	$t_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{0.8\sqrt{H}}$
TIEMPO DE CONCENTRACIÓN CALCULADO (Tc) 6.92 horas	TIEMPO DE CONCENTRACIÓN CALCULADO (Tc) 8.50 horas	TIEMPO DE CONCENTRACIÓN CALCULADO (Tc) 4.18 horas
Se recomienda aplicar a cuencas que presentan una pendiente suave. Luino et al. (2009) han usado tal ecuación en estudios de inundaciones y afirman que fue publicado en el trabajo de Passini (1914).	En base a estudios realizados en el año 1977 en Australia. Se obtiene el tiempo de concentración en minutos.	Se utiliza mucho en Europa, sobre todo en Italia en la zona del centro y el norte. Su uso es recomendado para cuencas rurales montañosas con áreas entre 170 Km ² - 70 000 Km ²
MÉTOD0 DE TEMEZ	MÉTOD0 DE JOHNSTONE CROSS	MÉTOD0 DE VEN TE CHOW
$t_c = 0.28 \times \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.76}$	$t_c = 2.6 \times \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.5}$	$t_c = 0.213 \times \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.64}$
TIEMPO DE CONCENTRACIÓN CALCULADO (Tc) 7.37 horas	TIEMPO DE CONCENTRACIÓN CALCULADO (Tc) 5.89 horas	TIEMPO DE CONCENTRACIÓN CALCULADO (Tc) 5.53 horas
Su aplicación se ve limitada por el rango adecuado de uso que está entre 1 Km ² - 3 000 Km ² . Según los registros de sus usuarios y de la aplicación de la misma no hay limitaciones por el tipo de terreno o su morfología.	Desarrollada para cuencas con áreas entre 25 y 1 624 millas cuadradas (64.7 Km ² y 4206.1 km ²).	Utilizada en cuencas rurales de los Estados Unidos con áreas entre 0,01 Km - 18,5 Km ² y pendientes entre 0,51% < S < 9 %.

CÁLCULO DEL TIEMPO DE CONCENTRACIÓN SUBCUENCA 6

Longitud de máximo recorrido del cauce (L) en Km	5.44 Km	Área de la cuenca (A) en Km ²	140.63 Km ²
Diferencia de elevación del cauce principal (H) en m	336.99 m	Pendiente del perfil de la corriente (S) en m/m	0.06 m/m
Número de Curva	79.30 CN		

METODO DE PASSINI	METODO AUSTRALIANO	MÉTODO DE GIANDOTTI
$t_c = 0.085 \times \left(\frac{A^{0.3} L^{0.5}}{S^{0.5}} \right)$	$t_c = \frac{58L}{A^{0.1} S^{0.2}}$	$t_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{0.8\sqrt{H}}$
TIEMPO DE CONCENTRACIÓN CALCULADO (Tc) 2.50 horas	TIEMPO DE CONCENTRACIÓN CALCULADO (Tc) 1.40 horas	TIEMPO DE CONCENTRACIÓN CALCULADO (Tc) 3.79 horas
Se recomienda aplicar a cuencas que presentan una pendiente suave. Luino et al. (2009) han usado tal ecuación en estudios de inundaciones y afirman que fue publicado en el trabajo de Passini (1914).	En base a estudios realizados en el año 1977 en Australia. Se obtiene el tiempo de concentración en minutos.	Se utiliza mucho en Europa, sobre todo en Italia en la zona del centro y el norte. Su uso es recomendado para cuencas rurales montañosas con áreas entre 170 Km ² - 70 000 Km ²
MÉTODO DE TEMEZ	MÉTODO DE JOHNSTONE CROSS	MÉTODO DE VEN TE CHOW
$t_c = 0.28 \times \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.76}$	$t_c = 2.6 \times \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.5}$	$t_c = 0.213 \times \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.64}$
TIEMPO DE CONCENTRACIÓN CALCULADO (Tc) 1.72 horas	TIEMPO DE CONCENTRACIÓN CALCULADO (Tc) 2.16 horas	TIEMPO DE CONCENTRACIÓN CALCULADO (Tc) 1.53 horas
Su aplicación se ve limitada por el rango adecuado de uso que está entre 1 Km ² - 3 000 Km ² . Según los registros de sus usuarios y de la aplicación de la misma no hay limitaciones por el tipo de terreno o su morfología.	Desarrollada para cuencas con áreas entre 25 y 1 624 millas cuadradas (64.7 Km ² y 4206.1 km ²).	Utilizada en cuencas rurales de los Estados Unidos con áreas entre 0,01 Km - 18,5 Km ² y pendientes entre 0,51% < S < 9 %.

CÁLCULO DEL TIEMPO DE CONCENTRACIÓN SUBCUENCA 7

Longitud de máximo recorrido del cauce (L) en Km	19.12 Km	Área de la cuenca (A) en Km ²	355.65 Km ²
Diferencia de elevación del cauce principal (H) en m	375.23 m	Pendiente del perfil de la corriente (S) en m/m	0.02 m/m
Número de Curva	71.10 CN		

METODO DE PASSINI	METODO AUSTRALIANO	MÉTODO DE GIANDOTTI
$t_c = 0.085 \times \left(\frac{A^{0.3} L^{0.5}}{S^{0.5}} \right)$	$t_c = \frac{58L}{A^{0.1} S^{0.2}}$	$t_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{0.8\sqrt{H}}$
TIEMPO DE CONCENTRACIÓN CALCULADO (Tc) 8.56 horas	TIEMPO DE CONCENTRACIÓN CALCULADO (Tc) 5.66 horas	TIEMPO DE CONCENTRACIÓN CALCULADO (Tc) 6.72 horas
Se recomienda aplicar a cuencas que presentan una pendiente suave. Luino et al. (2009) han usado tal ecuación en estudios de inundaciones y afirman que fue publicado en el trabajo de Passini (1914).	En base a estudios realizados en el año 1977 en Australia. Se obtiene el tiempo de concentración en minutos.	Se utiliza mucho en Europa, sobre todo en Italia en la zona del centro y el norte. Su uso es recomendado para cuencas rurales montañosas con áreas entre 170 Km ² - 70 000 Km ²
MÉTODO DE TEMEZ	MÉTODO DE JOHNSTONE CROSS	MÉTODO DE VEN TE CHOW
$t_c = 0.28 \times \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.76}$	$t_c = 2.6 \times \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.5}$	$t_c = 0.213 \times \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.64}$
TIEMPO DE CONCENTRACIÓN CALCULADO (Tc) 5.56 horas	TIEMPO DE CONCENTRACIÓN CALCULADO (Tc) 5.40 horas	TIEMPO DE CONCENTRACIÓN CALCULADO (Tc) 4.95 horas
Su aplicación se ve limitada por el rango adecuado de uso que está entre 1 Km ² - 3 000 Km ² . Según los registros de sus usuarios y de la aplicación de la misma no hay limitaciones por el tipo de terreno o su morfología.	Desarrollada para cuencas con áreas entre 25 y 1 624 millas cuadradas (64.7 Km ² y 4206.1 km ²).	Utilizada en cuencas rurales de los Estados Unidos con áreas entre 0,01 Km - 18,5 Km ² y pendientes entre 0,51% < S < 9 %.

CÁLCULO DEL TIEMPO DE CONCENTRACIÓN SUBCUENCA 8

Longitud de máximo recorrido del cauce (L) en Km	17.76 Km	Área de la cuenca (A) en Km ²	132.20 Km ²
Diferencia de elevación del cauce principal (H) en m	503.82 m	Pendiente del perfil de la corriente (S) en m/m	0.03 m/m
Número de Curva	60.00 CN		

METODO DE PASSINI	METODO AUSTRALIANO	MÉTODO DE GIANDOTTI
$t_c = 0.085 \times \left(\frac{A^{0.3} L^{0.5}}{S^{0.5}} \right)$	$t_c = \frac{58L}{A^{0.1} S^{0.2}}$	$t_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{0.8\sqrt{H}}$
TIEMPO DE CONCENTRACIÓN CALCULADO (Tc) 5.18 horas	TIEMPO DE CONCENTRACIÓN CALCULADO (Tc) 5.40 horas	TIEMPO DE CONCENTRACIÓN CALCULADO (Tc) 4.04 horas
Se recomienda aplicar a cuencas que presentan una pendiente suave. Luino et al. (2009) han usado tal ecuación en estudios de inundaciones y afirman que fue publicado en el trabajo de Passini (1914).	En base a estudios realizados en el año 1977 en Australia. Se obtiene el tiempo de concentración en minutos.	Se utiliza mucho en Europa, sobre todo en Italia en la zona del centro y el norte. Su uso es recomendado para cuencas rurales montañosas con áreas entre 170 Km ² - 70 000 Km ²
MÉTODO DE TEMEZ	MÉTODO DE JOHNSTONE CROSS	MÉTODO DE VEN TE CHOW
$t_c = 0.28 \times \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.76}$	$t_c = 2.6 \times \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.5}$	$t_c = 0.213 \times \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.64}$
TIEMPO DE CONCENTRACIÓN CALCULADO (Tc) 4.91 horas	TIEMPO DE CONCENTRACIÓN CALCULADO (Tc) 4.75 horas	TIEMPO DE CONCENTRACIÓN CALCULADO (Tc) 4.20 horas
Su aplicación se ve limitada por el rango adecuado de uso que está entre 1 Km ² - 3 000 Km ² . Según los registros de sus usuarios y de la aplicación de la misma no hay limitaciones por el tipo de terreno o su morfología.	Desarrollada para cuencas con áreas entre 25 y 1 624 millas cuadradas (64.7 Km ² y 4206.1 km ²).	Utilizada en cuencas rurales de los Estados Unidos con áreas entre 0,01 Km - 18,5 Km ² y pendientes entre 0,51% < S < 9 %.

CÁLCULO DEL TIEMPO DE CONCENTRACIÓN SUBCUENCA 9

Longitud de máximo recorrido del cauce (L) en Km	6.16 Km	Área de la cuenca (A) en Km²	58.78 Km²
Diferencia de elevación del cauce principal (H) en m	46.38 m	Pendiente del perfil de la corriente (S) en m/m	0.01 m/m
Número de Curva	54.15 CN		

METODO DE PASSINI	METODO AUSTRALIANO	MÉTODO DE GIANDOTTI
$t_c = 0.085 \times \left(\frac{A^{0.3} L^{0.5}}{S^{0.5}} \right)$	$t_c = \frac{58L}{A^{0.1} S^{0.2}}$	$t_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{0.8\sqrt{H}}$
TIEMPO DE CONCENTRACIÓN CALCULADO (Tc) 5.74 horas	TIEMPO DE CONCENTRACIÓN CALCULADO (Tc) 2.65 horas	TIEMPO DE CONCENTRACIÓN CALCULADO (Tc) 7.32 horas
Se recomienda aplicar a cuencas que presentan una pendiente suave. Luino et al. (2009) han usado tal ecuación en estudios de inundaciones y afirman que fue publicado en el trabajo de Passini (1914).	En base a estudios realizados en el año 1977 en Australia. Se obtiene el tiempo de concentración en minutos.	Se utiliza mucho en Europa, sobre todo en Italia en la zona del centro y el norte. Su uso es recomendado para cuencas rurales montañosas con áreas entre 170 Km² - 70 000 Km²
MÉTODO DE TEMEZ	MÉTODO DE JOHNSTONE CROSS	MÉTODO DE VEN TE CHOW
$t_c = 0.28 \times \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.76}$	$t_c = 2.6 \times \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.5}$	$t_c = 0.213 \times \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.64}$
TIEMPO DE CONCENTRACIÓN CALCULADO (Tc) 2.82 horas	TIEMPO DE CONCENTRACIÓN CALCULADO (Tc) 3.90 horas	TIEMPO DE CONCENTRACIÓN CALCULADO (Tc) 3.26 horas
Su aplicación se ve limitada por el rango adecuado de uso que está entre 1 Km² - 3 000 Km². Según los registros de sus usuarios y de la aplicación de la misma no hay limitaciones por el tipo de terreno o su morfología.	Desarrollada para cuencas con áreas entre 25 y 1 624 millas cuadradas (64.7 Km² y 4206.1 km²).	Utilizada en cuencas rurales de los Estados Unidos con áreas entre 0,01 Km - 18,5 Km² y pendientes entre 0,51% < S < 9 %.

Tiempo concentración en horas por cada método de cada subcuenca.

N°	SUBCUENCA	AREA (km2)	PASSINI	AUSTRALIANO	GIANDOTTI	TEMEZ	JOHNSTONE CROSS	VEN TE CHOW
1	SC1	536.2753	8.328	7.442	5.386	6.917	5.813	5.440
2	SC2	201.0934	7.293	4.305	6.749	4.367	4.751	4.202
3	SC3	313.3568	8.678	8.650	5.500	7.557	6.472	6.242
4	SC4	256.3471	4.553	4.506	3.605	4.386	4.058	3.435
5	SC5	368.3745	6.925	8.500	4.177	7.373	5.891	5.534
6	SC6	140.6279	2.502	1.404	3.785	1.720	2.160	1.533
7	SC7	355.6495	8.565	5.663	6.718	5.564	5.401	4.952
8	SC8	132.2013	5.179	5.396	4.045	4.906	4.748	4.199
9	SC9	58.77968 3	5.737	2.646	7.325	2.823	3.896	3.260

Resultados de los tiempos de concentración por el mejor metodo: TEMEZ

N°	SUBCUENCA	AREA (km2)	TC FINAL (Horas)	TLAG (Horas)	TLAG (minutos)	S(m/m)
1	SC1	536.2753	6.917	4.15	249.03	0.03
2	SC2	201.0934	4.367	2.62	157.21	0.02
3	SC3	313.3568	7.557	4.53	272.04	0.02
4	SC4	256.3471	4.386	2.63	157.91	0.06
5	SC5	368.3745	7.373	4.42	265.42	0.04
6	SC6	140.6279	1.720	1.03	61.91	0.06
7	SC7	355.6495	5.564	3.34	200.30	0.02
8	SC8	132.2013	4.906	2.94	176.61	0.03
9	SC9	58.779683	2.823	1.69	101.62	0.01

ANEXO N° 05: CAUDALES MÁXIMOS SIMULADOS DE LOS MODELOS HIDROLÓGICOS

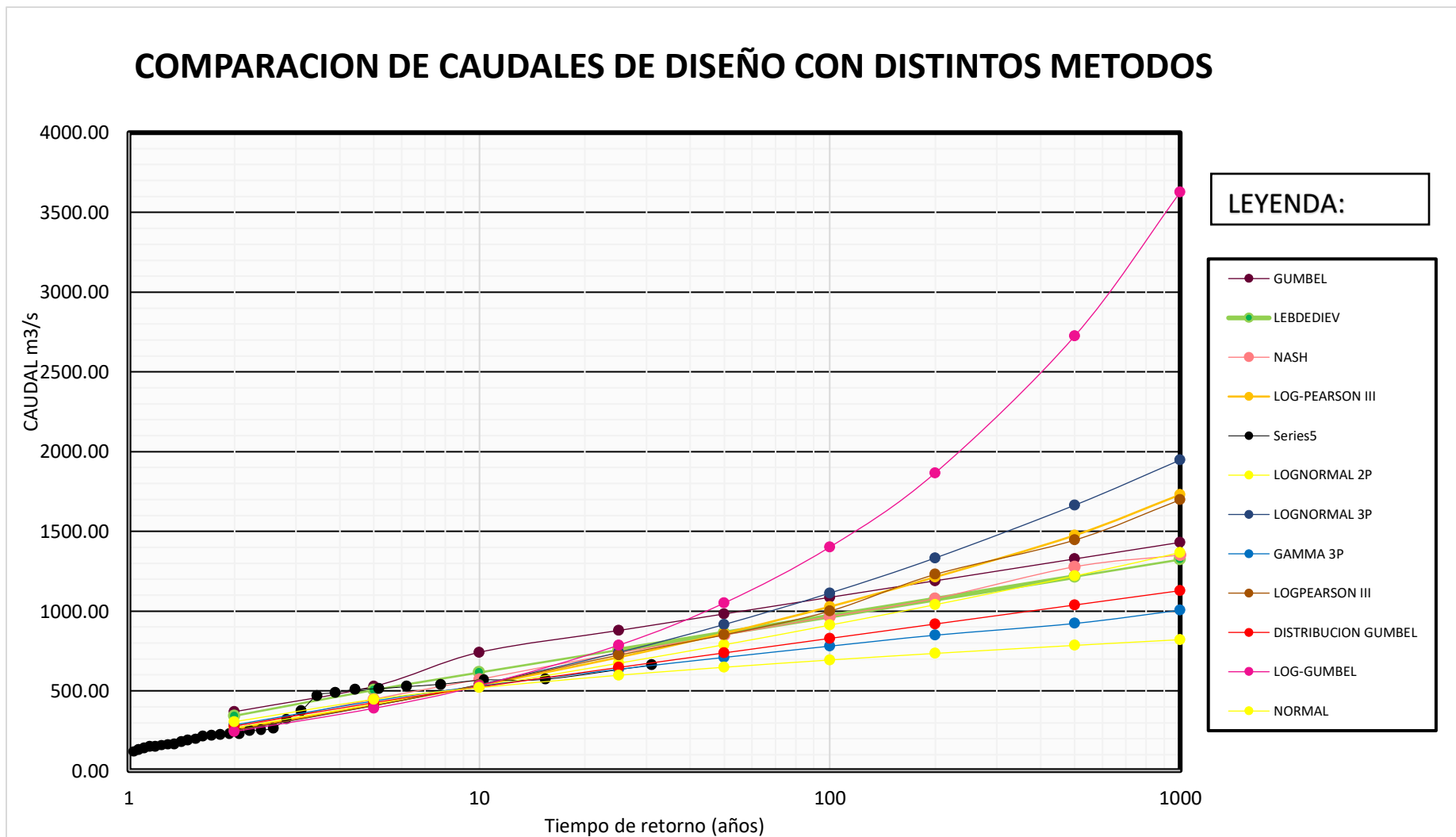
CAUDALES MÁXIMOS ANUALES (m3/s)									
ESCENARIO 1: SIN TRANSVASE					ESCENARIO 2: CON TRANSVASE				
AÑO	GR4J	SOCONT	SACRAMENTO	HBV	AÑO	GR4J	SOCONT	SACRAMENTO	HBV
1993	96.34	120.76	84.30	163.49	1993	126.28	148.25	114.24	193.36
1994	78.28	79.28	55.99	114.84	1994	96.01	98.77	73.72	132.57
1995	61.03	49.68	50.19	95.86	1995	71.65	79.04	62.83	106.48
1996	54.10	66.79	42.55	85.26	1996	75.77	92.92	67.34	110.24
1997	85.14	57.39	53.78	106.19	1997	96.63	87.53	82.85	124.03
1998	306.65	220.28	152.39	590.85	1998	308.70	222.33	154.44	611.30
1999	204.23	155.52	113.69	224.80	1999	207.97	156.83	118.16	226.11
2000	503.56	312.26	192.25	207.15	2000	532.92	330.25	210.23	283.94
2001	236.65	154.40	117.69	221.19	2001	265.21	156.73	146.24	249.74
2002	147.91	101.71	83.09	206.23	2002	171.78	131.87	113.39	228.44
2003	103.48	57.53	68.54	155.31	2003	133.14	87.22	98.20	185.00
2004	35.36	40.31	28.95	56.97	2004	52.01	67.80	55.51	83.66
2005	118.41	97.49	77.45	154.72	2005	140.99	127.39	100.03	174.34
2006	166.31	125.46	93.07	173.42	2006	195.81	155.30	122.58	203.25
2007	84.80	84.76	58.84	122.07	2007	114.28	111.70	88.32	149.68
2008	272.71	196.21	133.59	256.86	2008	283.01	206.51	143.94	267.16
2009	250.90	158.04	125.58	300.64	2009	253.85	160.99	128.56	505.79
2010	188.57	98.61	100.22	221.02	2010	200.68	127.03	120.59	241.14
2011	82.28	88.93	60.44	142.59	2011	111.52	107.28	89.31	170.72
2012	260.37	155.09	129.15	257.71	2012	265.79	167.18	147.89	273.41
2013	87.45	88.64	66.06	150.18	2013	106.44	110.70	87.49	171.92
2014	51.06	49.33	42.83	81.59	2014	66.40	78.09	59.20	98.20
2015	135.02	100.84	81.41	172.01	2015	141.17	127.27	87.57	177.27
2016	130.55	157.13	76.17	157.13	2016	143.56	110.06	91.59	180.27
2017	443.89	379.77	173.56	479.85	2017	450.33	222.52	180.01	586.22
2018	114.93	78.60	69.52	162.64	2018	134.85	106.13	89.45	190.84
2019	214.69	116.55	107.85	275.07	2019	238.28	139.09	131.45	301.00
2020	98.61	72.42	74.30	174.87	2020	124.16	97.01	98.88	199.46
2021	255.55	117.25	130.08	238.78	2021	260.71	136.25	135.24	243.85
2022	122.94	82.44	76.37	176.84	2022	126.16	97.06	79.60	178.60

ANEXO N° 06: CAUDAL PERIODO DE RETORNO

ANEXO 6.1. Estación Racaarrumi:

MÉTODO TR(AÑOS)	METODOS PROBABILISTICOS							METODOS ESTADISTICOS			
	NORMAL	LOGNORMAL 2P	LOGNORMAL 3P	GAMMA 3P	LOG- PEARSON III	GUMBEL	LOG- GUMBEL	GUMBEL	LEVEDIEV	NASH	LOG- PEARSON III
	Qd (m3/s)	Qd (m3/s)	Qd (m3/s)	Qd (m3/s)	Qd (m3/s)	Qd (m3/s)	Qd (m3/s)	Qd (m3/s)	Qd (m3/s)	Qd (m3/s)	Qd (m3/s)
2	306.44	267.09	250.59	286.45	253.34	279.08	244.88	369.37	265.50	343.34	259.97
5	446.50	416.34	406.94	436.34	407.38	426.26	390.64	528.37	447.96	505.20	412.50
10	519.65	525.34	539.72	529.61	537.03	523.71	532.20	741.58	572.22	615.01	533.54
25	597.89	673.47	741.27	635.37	724.44	646.83	786.61	878.77	737.16	756.21	710.59
50	648.08	789.17	916.33	709.81	851.14	738.17	1051.09	982.55	850.31	862.32	860.93
100	693.43	912.14	1113.07	780.26	1000.00	828.84	1401.49	1086.33	965.83	968.50	1027.91
200	734.96	1040.43	1333.43	849.05	1230.27	919.18	1866.74	1190.11	1078.95	1074.95	1213.70
500	785.16	1220.08	1664.41	922.66	1445.44	1038.36	2724.77	1327.30	1278.23	1216.13	1475.32
1000	821.07	1367.34	1947.47	1005.94	1698.24	1128.43	3626.31	1431.08	1351.38	1323.24	1730.20

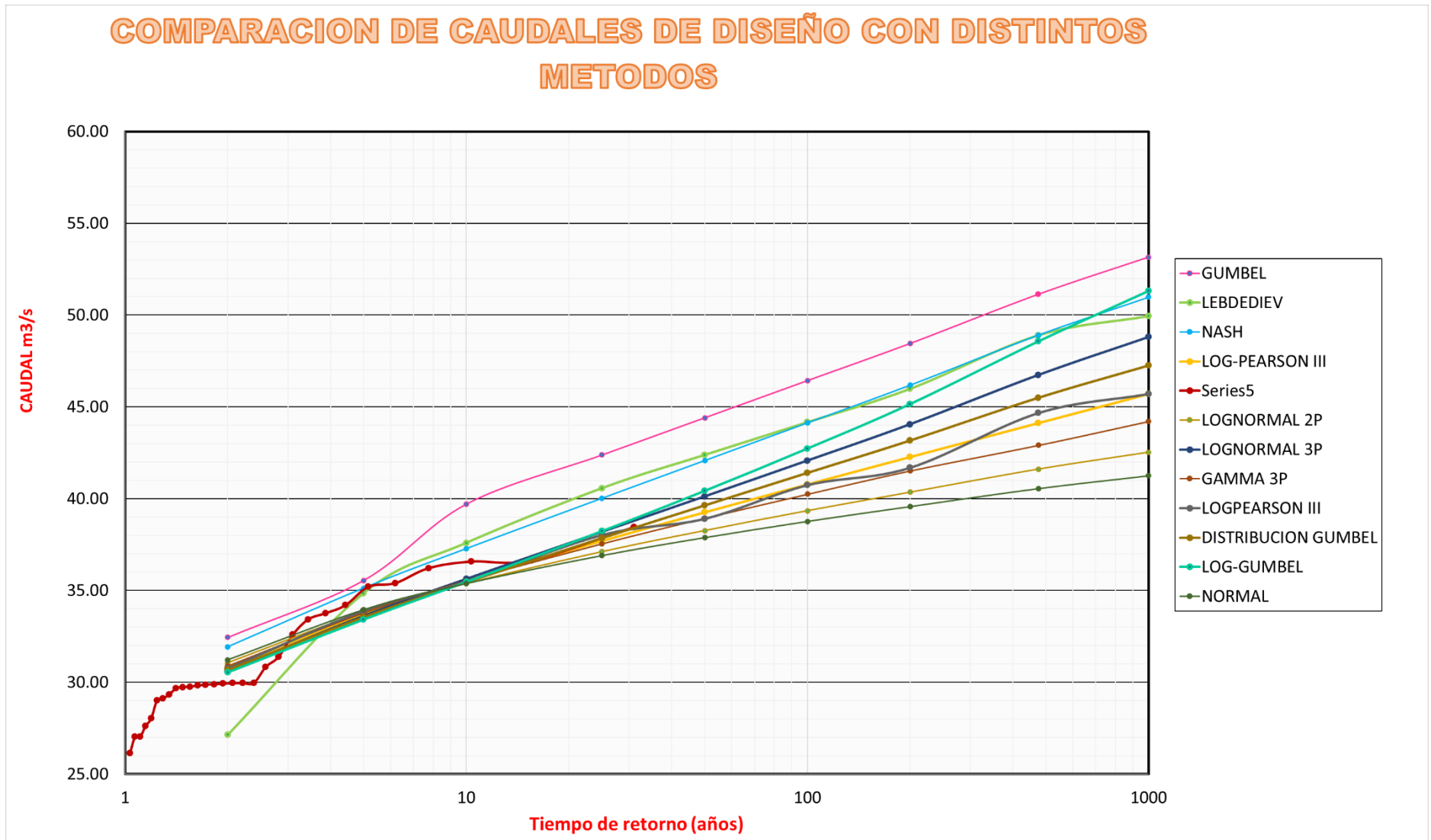
- Gráfica comparativa de los caudales de diseño con diferentes métodos:



ANEXO 6.2. Estación Túnel Chotano:

METODO TR(AÑOS)	METODOS PROBABILISTICOS							METODOS ESTADISTICOS			
	NORMAL	LOGNORMAL 2P	LOGNORMAL 3P	GAMMA 3P	LOG- PEARSON III	GUMBEL	LOG- GUMBEL	GUMBEL	LEVEDIEV	NASH	LOG- PEARSON III
	Qd (m3/s)	Qd (m3/s)	Qd (m3/s)	Qd (m3/s)	Qd (m3/s)	Qd (m3/s)	Qd (m3/s)	Qd (m3/s)	Qd (m3/s)	Qd (m3/s)	Qd (m3/s)
2	31.22	31.06	30.61	30.89	30.75	30.68	30.55	32.45	27.13	31.93	30.81
5	33.95	33.83	33.61	33.78	33.88	33.56	33.42	35.55	34.85	35.13	33.72
10	35.38	35.38	35.62	35.54	35.48	35.46	35.47	39.70	37.59	37.28	35.53
25	36.90	37.11	38.19	37.55	38.02	37.86	38.24	42.38	40.57	40.02	37.70
50	37.88	38.26	40.12	38.94	38.90	39.64	40.43	44.40	42.38	42.08	39.26
100	38.77	39.34	42.07	40.25	40.74	41.41	42.73	46.43	44.16	44.13	40.78
200	39.58	40.35	44.05	41.52	41.69	43.17	45.16	48.45	45.98	46.19	42.27
500	40.55	41.61	46.73	42.91	44.67	45.49	48.57	51.13	48.89	48.91	44.12
1000	41.26	42.53	48.80	44.21	45.71	47.25	51.31	53.15	49.94	50.98	45.70

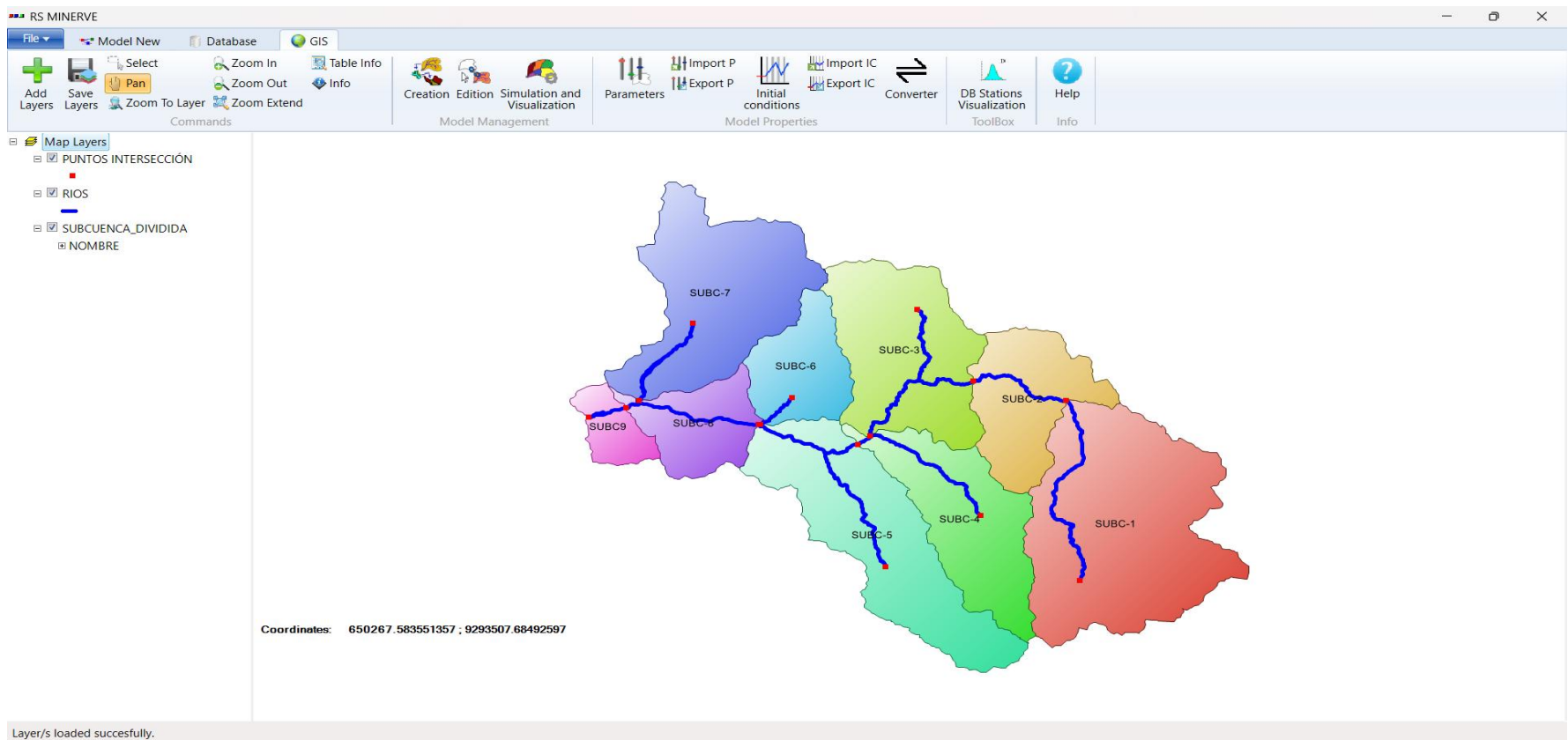
- Gráfica comparativa de los caudales de diseño con diferentes métodos:



ANEXO N° 07: PROCESAMIENTO EN EL SOFTWARE RS MINERVE

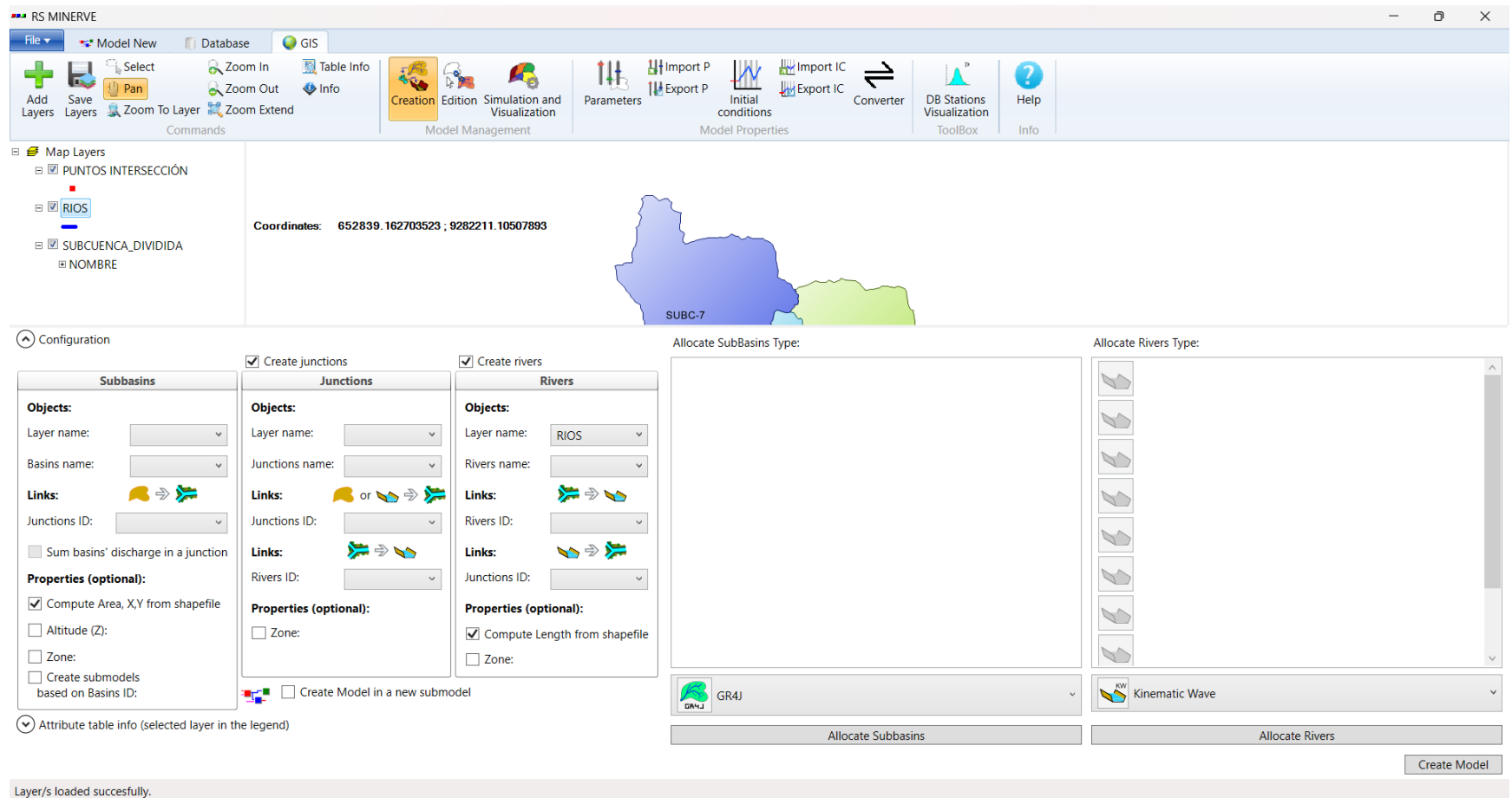
A continuación, se detallan los pasos a seguir.

- a) **PASO 1:** En el programa Rs Minerve, en la ventana GIS, seleccionamos Add Layers, y colocamos las capas en shapafile, que elaboramos del ArcGis, y lo exportamos al Rs Minerve, teniendo como resultado lo que se muestra a continuación.



b) **PASO 2:** Luego en el icono creation, agregamos la información obtenida en el ArcGis, donde se estaría agregando el Área de cada subcuenca, así como la longitud de caucel río, como se muestra a continuación:

Agregamos en cada sub cuenca el modelo a realizar, en este caso el GR4J



Agregamos en cada sub cuenca el modelo a realizar, en este caso el GR4J

RS MINERVE

File Model New Database GIS

Commands: Add Layers, Save Layers, Select, Pan, Zoom In, Zoom Out, Zoom To Layer, Zoom Extend, Table Info, Info

Model Management: Creation, Edition, Simulation and Visualization

Model Properties: Parameters, Import P, Export P, Initial conditions, Import IC, Export IC, Converter

ToolBox: DB Stations Visualization, Help

Map Layers:

- Map Layers
 - PUNTOS INTERSECCIÓN
 - RIOS
 - SUBCUENCA_DIVIDIDA
 - NOMBRE

Coordinates: 652839.162703523 ; 9282211.10507893

SUBC-7

Configuration

☒ Create junctions

Subbasins

Objects:

Layer name: SUBCUENCA_DIVIDIDA

Basins name: NOMBRE

Links:

Junctions ID: INTERSECCI

☐ Sum basins' discharge in a junction

Properties (optional):

☒ Compute Area, X,Y from shapefile

☐ Altitude (Z):

☐ Zone:

☐ Create submodels based on Basins ID:

☐ Create Model in a new submodel

☒ Create rivers

Junctions

Objects:

Layer name: PUNTOS INTERSECCIÓN

Junctions name: Id

Links:

Junctions ID: Id

Rivers ID: RIOS

Properties (optional):

☐ Zone:

Rivers

Objects:

Layer name: RIOS

Rivers name: NAME

Links:

Rivers ID: NAME

Junctions ID: INTERSECCI

Properties (optional):

☒ Compute Length from shapefile

☐ Zone:

Allocate SubBasins Type:

SUBC-7, SUBC-6, SUBC-3, SUBC9, SUBC-8, SUBC-2, SUBC-4, SUBC-1

GR4J

Allocate Subbasins

Allocate Rivers Type:

SB-3, SB-5, SB-1, SB-4, SB-2, SB-8, SB-9, SB-7

Kinematic Wave

Allocate Rivers

Create Model

Layer/s loaded successfully.

Se obtiene una estación virtual por cada sub cuenca, listo para el modelamiento en el software Rs Minerve.

ESCENARIO 1: Sin Aporte Túnel Chotano

RS MINERVE

File Model GR4J - CUENCA C... Database Database-CUEN... GIS

Open New Save Save as Import Export Background Save as image Back Select Connections Transitions Delete Copy Paste Parameters Import P Export P Initial conditions Import IC Export IC Converter Open Import Export Add Layers Show Object Selection and plots Expert Plugins Edit Help

Model Editing tools Model Properties Database GIS Modules Settings Help

Hydrology

River

Standard

Infrastructure

Data source

Name	Group	Date
Station	E. CUENCA CHANCAY-LAMBAYEQUE	E. P...
Source	E. CUENCA CHANCAY-LAMBAYEQUE	E. H...

Solver

Start: 01/01/1993 00:00:00

End: 31/12/2022 00:00:00

Simulation time step: 1 hour

Recording time step: 1 day

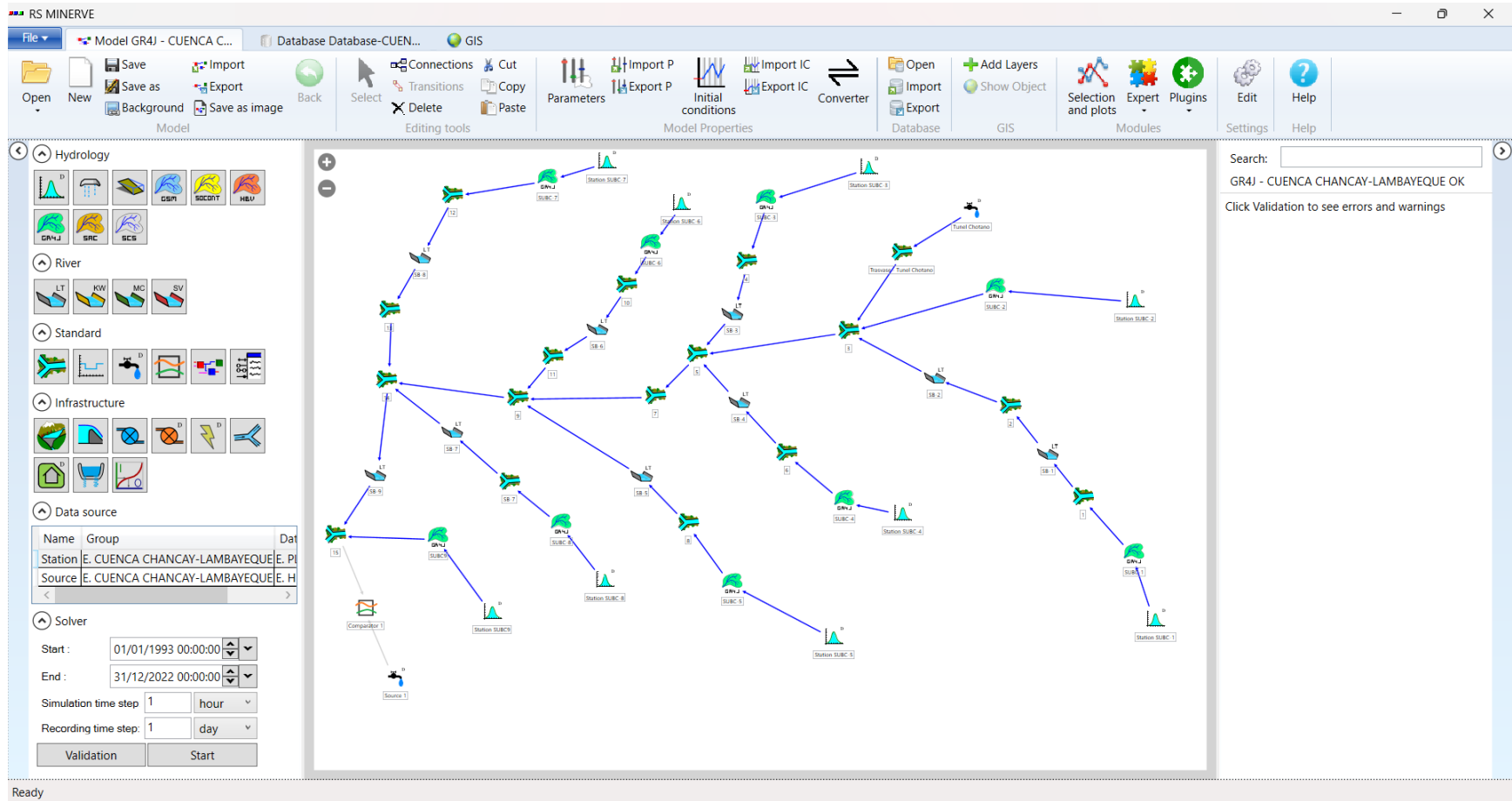
Validation Start

Search: GR4J - CUENCA CHANCAY-LAMBAYEQUE OK

Click Validation to see errors and warnings

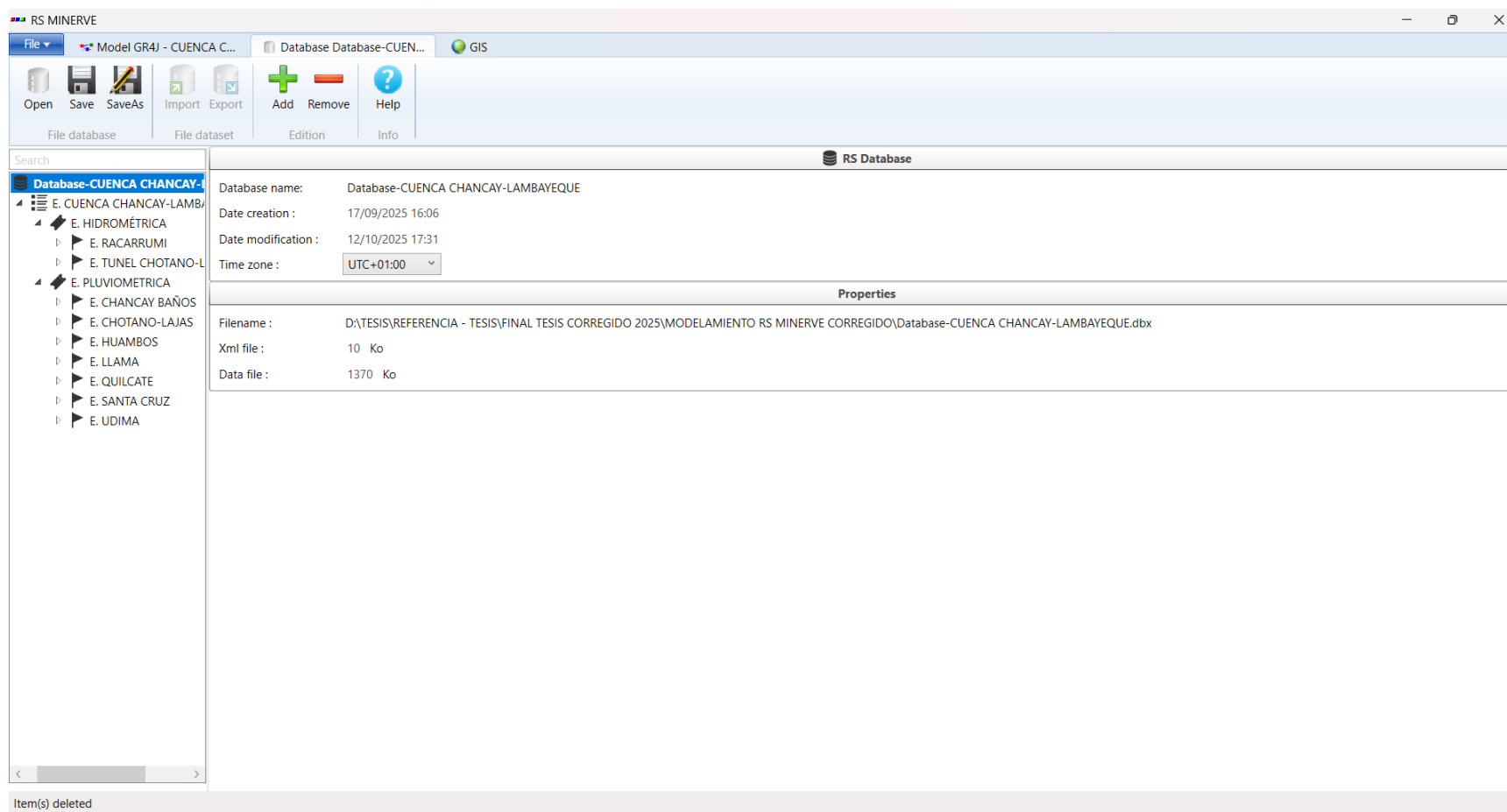
Item(s) deleted

ESCENARIO 2: Con aporte del Túnel Chotano

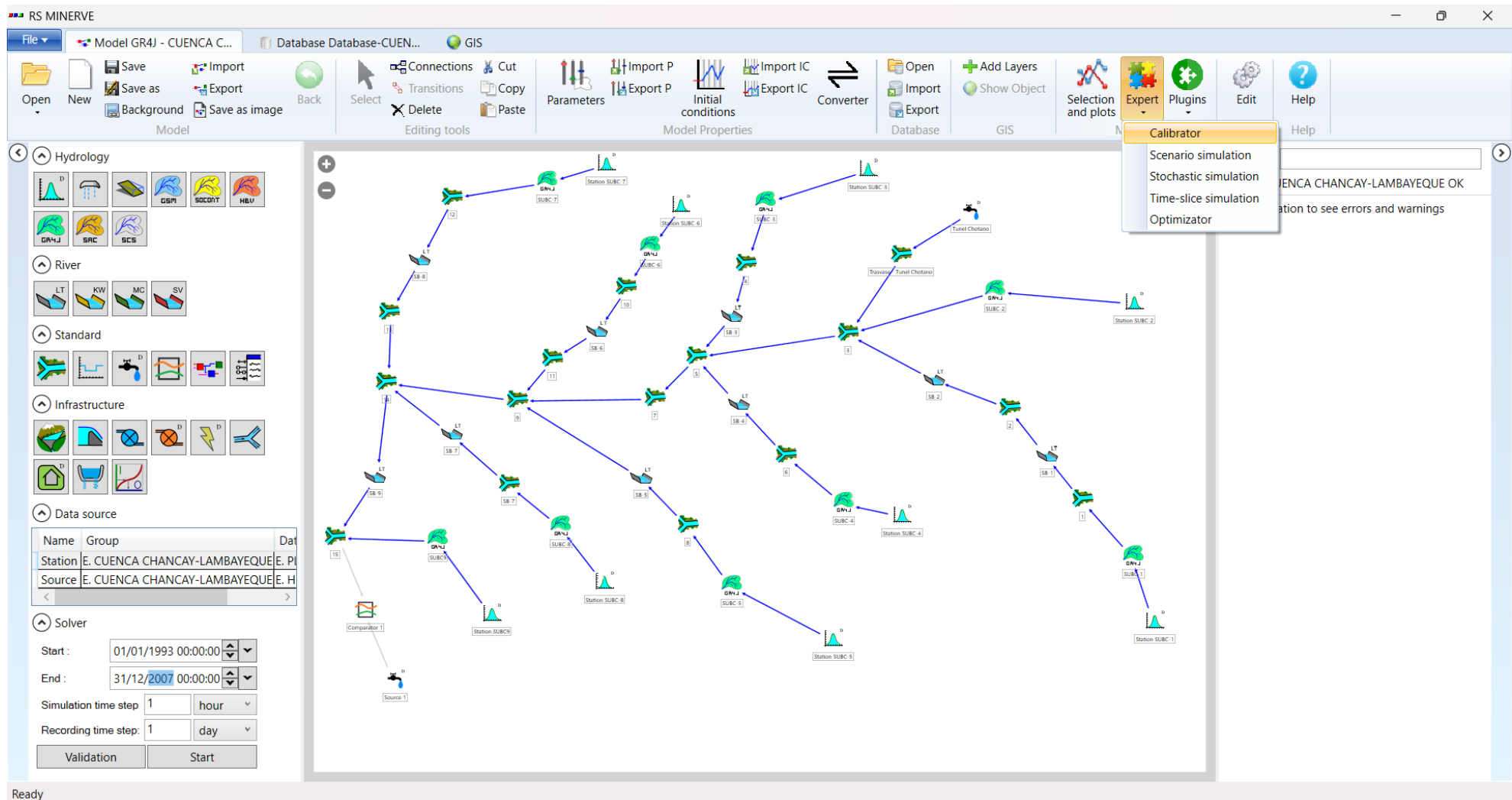


ANEXO N° 06.1: PROCEDIMIENTO PARA MODELAMIENTO HIDROLOGICO EN EL PROGRAMA RS MINERVE.

PASO 1: En la ventana Database, se procederá agregar la información de las estaciones pluviométricas e hidrométricas



PASO 2: Luego, en el icono expert, se selecciona calibrator, para proceder a calibrar los datos agregados de cada estación pluviométricas y compararlos con la estación hidrométricas Racarrumi en cada escenario.



PASO 3: Ahora, se comienza a colocar el límite correcto en los parámetros del modelo hidrológico, para iniciar la calibración.

RS MINERVE

File Model Cuenca Chancay ~... Database DATOS ESCENA... GIS Calibrator X

Import Export Export All Calibration configuration Model Parameters Info

Import Parameters Import Parameters Export Parameters Export Parameters Help

Calibration Configuration

Name	Order
✓ New Calibration	

Selection

Object types

Comparator

HBV

Lag-Time

V-Station

Zones Id

A

Comparators

Comparator 1

Models

Type	Name	Parent model	Zone
HBV	SUBC-8	Cuenca Chancay - HBV 2	A
HBV	SUBC-4	Cuenca Chancay - HBV 2	A
HBV	SUBC-9	Cuenca Chancay - HBV 2	A
HBV	SUBC-3	Cuenca Chancay - HBV 2	A
HBV	SUBC-2	Cuenca Chancay - HBV 2	A
HBV	SUBC-7	Cuenca Chancay - HBV 2	A

Parameters

☐ Select All All selected Initial Values (IV): ☐ From Model ☐ Defined ☐ Random

Model	[x]	Name	Min	Max	IV From Model	Defined IV	Random IV	Units
HBV	☐	A	-	-				m2
HBV	☒	CFMax	0.5	20	☒			mm/°C/d
HBV	☒	CFR	0.05	0.5	☐	☒ 0.05		-
HBV	☒	CWH	0.08	0.12	☐	☒ 0.1		-
HBV	☒	TT	0	3	☒	☐		°C
HBV	☒	TTInt	0	3	☒	☐		°C
HBV	☒	TTSM	0	1	☐	☒ 0		°C
HBV	☒	Beta	1	5	☒	☐		-
HBV	☒	FC	0.05	0.65	☒	☐		m

Objective Function (OF)

Total Weight for the Objective Function

3

Indicators

Indicators	Weight
Nash	1
Nash-In	0
Pearson Correlation Coeff	1

Hydrologic parameters optimization

Solver

Algorithm parameters

Start :

01/01/1993 00:00:00

End :

01/12/2007 00:00:00

Simulation time step: 1 day

Start

Summary results

Process

Initial Values

Best Solution

Graphic results

OF Progress Current Solution Best Solution

Evolution of the OF

Simulation completed in 0 seconds

PASO 4: Luego se agrega el peso 1 a Nash, Pearson Correlation Coeff y KGE, y al resto cero, siendo la función objetivo ideal de un peso igual a 4.

RS MINERVE

File Model Cuenca Chancay -... Database DATOS ESCENA... GIS Calibrator X

Import Export Export All Import Parameters Export Parameters Help

Calibration configuration Model Parameters Info

Calibration Configuration

Name	Order
✓ New Calibration	

Selection

Object types: Comparator, HBV, Lag-Time, V-Station

Zones Id: A

Comparators

Comparator 1

Models

Type	Name	Parent model	Zone
HBV	SUBC-8	Cuenca Chancay - HBV 2	A
HBV	SUBC-4	Cuenca Chancay - HBV 2	A
HBV	SUBC-9	Cuenca Chancay - HBV 2	A
HBV	SUBC-3	Cuenca Chancay - HBV 2	A
HBV	SUBC-2	Cuenca Chancay - HBV 2	A
HBV	SUBC-7	Cuenca Chancay - HBV 2	A

Parameters

☐ Select All All selected Initial Values (IV): ☐ From Model ☐ Defined ☐ Random

Model	[x]	Name	Min	Max	IV From Model	Defined IV	Random IV	Units
HBV	☐	A	-	-	☒	-	☐	m2
HBV	☒	CFMax	0.5	20	☒	-	☐	mm/°C/d
HBV	☒	CFR	0.05	0.5	☐	0.05	☐	-
HBV	☒	CWH	0.08	0.12	☐	0.1	☐	-
HBV	☒	TT	0	3	☒	-	☐	°C
HBV	☒	TTint	0	3	☒	-	☐	°C
HBV	☒	TTSM	0	1	☐	0	☐	°C
HBV	☒	Beta	1	5	☐	-	☐	-
HBV	☒	FC	0.05	0.65	☒	-	☐	m
HBV	☒	PMP	0.03	1	☒	-	☐	-

Objective Function (OF)

Total Weight for the Objective Function: 3

Indicators	Weight
Nash	1
Nash-In	0
Pearson Correlation Coeff	1

Solver Algorithm parameters

Start: 01/01/1993 00:00:00

End: 01/12/2007 00:00:00

Simulation time step: 1 day

Start

Summary results

Process

Initial Values

Best Solution

Graphic results

OF Progress Current Solution Best Solution

Evolution of the OF

Objective Function [-]

Iteration

Initial value Values Current value

PASO 5: Ahora como ultimo paso se coloca la fecha donde se va a calibrar, y posteriormente se hace click en start, para que comience el programa a calibrarse.

The screenshot displays the RS MINERVE software interface with the following components:

- File Menu:** Import, Export, Export All, Import Parameters, Export Parameters, Help.
- Calibration Configuration:** A table with columns 'Name' and 'Order'. It contains one entry: 'New Calibration' with a green checkmark in the 'Name' column.
- Comparators:** A section labeled 'Comparator 1'.
- Models:** A table listing models with columns: Type, Name, Parent model, Zone.

Type	Name	Parent model	Zone
HBV	SUBC-8	Cuenca Chancay - HBV 2	A
HBV	SUBC-4	Cuenca Chancay - HBV 2	A
HBV	SUBC-9	Cuenca Chancay - HBV 2	A
HBV	SUBC-3	Cuenca Chancay - HBV 2	A
HBV	SUBC-2	Cuenca Chancay - HBV 2	A
HBV	SUBC-7	Cuenca Chancay - HBV 2	A
- Parameters:** A table with columns: Model, [x], Name, Min, Max, IV From Model, Defined IV, Random IV, Units.

Model	[x]	Name	Min	Max	IV From Model	Defined IV	Random IV	Units
HBV	☐	A	-	-	☒	☐	☐	m2
HBV	☒	CFMax	0.5	20	☒	☐	☐	mm/°C/d
HBV	☒	CFR	0.05	0.5	☐	☒	☐	-
HBV	☒	CWH	0.08	0.12	☐	☒	☐	-
HBV	☒	TT	0	3	☒	☐	☐	°C
HBV	☒	TTInt	0	3	☒	☐	☐	°C
HBV	☒	TTSM	0	1	☐	☒	☐	°C
HBV	☒	Beta	1	5	☒	☐	☐	-
HBV	☒	FC	0.05	0.65	☒	☐	☐	m
HBV	☒	DWP	0.02	1	☒	☐	☐	-
- Selection:** Object types (Comparator, HBV, Lag-Time, V-Station) and Zones Id (A).
- Objective Function (OF):** Total Weight for the Objective Function: 3. Indicators table:

Indicators	Weight
Nash	1
Nash-In	0
Pearson Correlation Coeff	1
- Hydrologic parameters optimization:** Solver: Algorithm parameters. Start: 01/01/1993 00:00:00. End: 01/12/2007 00:00:00. Simulation time step: 1 day. A red box highlights this section.
- Summary results:** Process, Initial Values, Best Solution.
- Graphic results:** Evolution of the OF. A line graph showing Objective Function [-] vs Iteration (0 to 100). The graph shows three lines: Initial value (green), Values (yellow), and Current value (red). The Current value line is at the bottom, indicating a low objective function value.

PASO 6: Una vez calibrado, se procederá a validar el modelo para posteriormente comparar los indicadores estadísticos obtenidos.

The screenshot displays the RS MINERVE software interface. The main window shows a complex hydrological model diagram with various components like 'Station SUBC 1', 'Station SUBC 2', 'Station SUBC 3', 'Station SUBC 4', 'Station SUBC 5', 'Station SUBC 6', 'Station SUBC 7', 'Station SUBC 8', 'Station SUBC 9', 'Station SUBC 10', 'Station SUBC 11', 'Station SUBC 12', 'Station SUBC 13', 'Station SUBC 14', 'Station SUBC 15', 'Station SUBC 16', 'Station SUBC 17', 'Station SUBC 18', 'Station SUBC 19', 'Station SUBC 20', 'Station SUBC 21', 'Station SUBC 22', 'Station SUBC 23', 'Station SUBC 24', 'Station SUBC 25', 'Station SUBC 26', 'Station SUBC 27', 'Station SUBC 28', 'Station SUBC 29', 'Station SUBC 30', 'Station SUBC 31', 'Station SUBC 32', 'Station SUBC 33', 'Station SUBC 34', 'Station SUBC 35', 'Station SUBC 36', 'Station SUBC 37', 'Station SUBC 38', 'Station SUBC 39', 'Station SUBC 40', 'Station SUBC 41', 'Station SUBC 42', 'Station SUBC 43', 'Station SUBC 44', 'Station SUBC 45', 'Station SUBC 46', 'Station SUBC 47', 'Station SUBC 48', 'Station SUBC 49', 'Station SUBC 50', 'Station SUBC 51', 'Station SUBC 52', 'Station SUBC 53', 'Station SUBC 54', 'Station SUBC 55', 'Station SUBC 56', 'Station SUBC 57', 'Station SUBC 58', 'Station SUBC 59', 'Station SUBC 60', 'Station SUBC 61', 'Station SUBC 62', 'Station SUBC 63', 'Station SUBC 64', 'Station SUBC 65', 'Station SUBC 66', 'Station SUBC 67', 'Station SUBC 68', 'Station SUBC 69', 'Station SUBC 70', 'Station SUBC 71', 'Station SUBC 72', 'Station SUBC 73', 'Station SUBC 74', 'Station SUBC 75', 'Station SUBC 76', 'Station SUBC 77', 'Station SUBC 78', 'Station SUBC 79', 'Station SUBC 80', 'Station SUBC 81', 'Station SUBC 82', 'Station SUBC 83', 'Station SUBC 84', 'Station SUBC 85', 'Station SUBC 86', 'Station SUBC 87', 'Station SUBC 88', 'Station SUBC 89', 'Station SUBC 90', 'Station SUBC 91', 'Station SUBC 92', 'Station SUBC 93', 'Station SUBC 94', 'Station SUBC 95', 'Station SUBC 96', 'Station SUBC 97', 'Station SUBC 98', 'Station SUBC 99', 'Station SUBC 100'. The left sidebar contains a 'Hydrology' section with icons for 'GR4J', 'SRC', 'SCS', 'River', 'Standard', 'Infrastructure', and 'Data source'. The 'Data source' section shows a table with columns 'Name', 'Group', and 'Date'. The 'Solver' section is highlighted with a red box and contains the following settings:

Name	Group	Date
Station	E. CUENCA CHANCAY-LAMBAYEQUE	E. P...
Source	E. CUENCA CHANCAY-LAMBAYEQUE	E. H...

Solver

Start: 01/01/2008 00:00:00
End: 31/12/2022 00:00:00
Simulation time step: 1 hour
Recording time step: 1 day
Validation Start

The right sidebar contains a search bar and a message: 'GR4J - CUENCA CHANCAY-LAMBAYEQUE OK. Click Validation to see errors and warnings.'

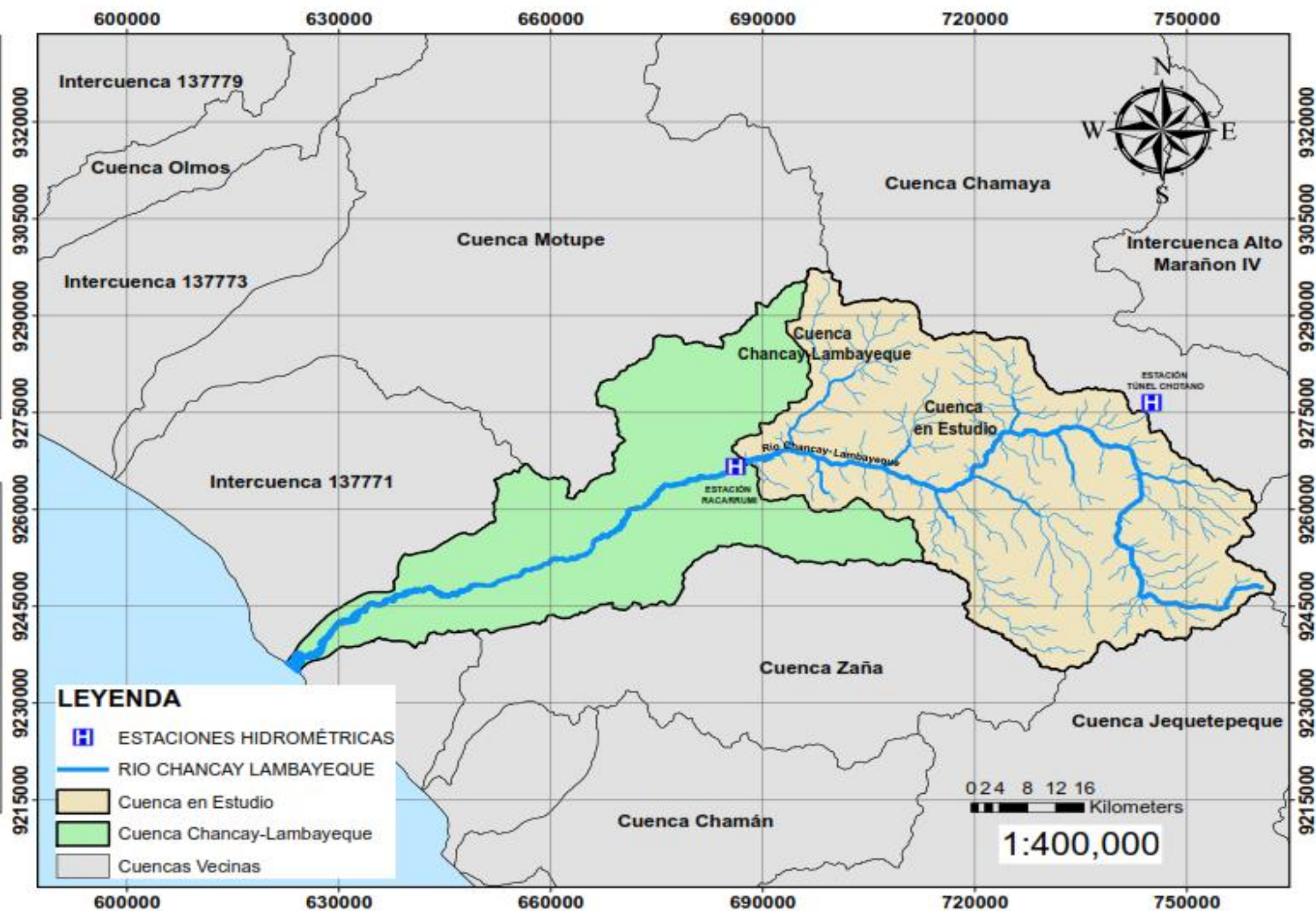
ANEXO N° 08: MAPAS



MAPA DEL PERÚ



MAPA REGIONAL



LEYENDA

- ESTACIONES HIDROMÉTRICAS
- RIO CHANCAY LAMBAYEQUE
- Cuenca en Estudio
- Cuenca Chancay-Lambayeque
- Cuencas Vecinas

IMAGEN	TESIS	PLANO	SIG			LÁMINA
			BACH. DEYSI MARILYN ROJAS NUÑEZ	BACH. CHRISTIAN JORDAN SAAVEDRA SÁNCHEZ	ASESOR: DR. ING. JOSE DEL CARMEN ARBULU RAMOS	
	ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS MODELOS GR4J, HBV, SACRAMENTO, SOCONT PARA LA EVALUACIÓN HIDROLÓGICA DE LA CUENCA CHANCAY-LAMBAYEQUE, UTILIZANDO EL SOFTWARE RS MINERVE	PLANO DE DELIMITACIÓN HIDROGRÁFICA	FECHA:	NOVIEMBRE 2025	ESC: 1:400,000	N° 01

690000

720000

750000



MAPA DEL PERÚ



MAPA REGIONAL

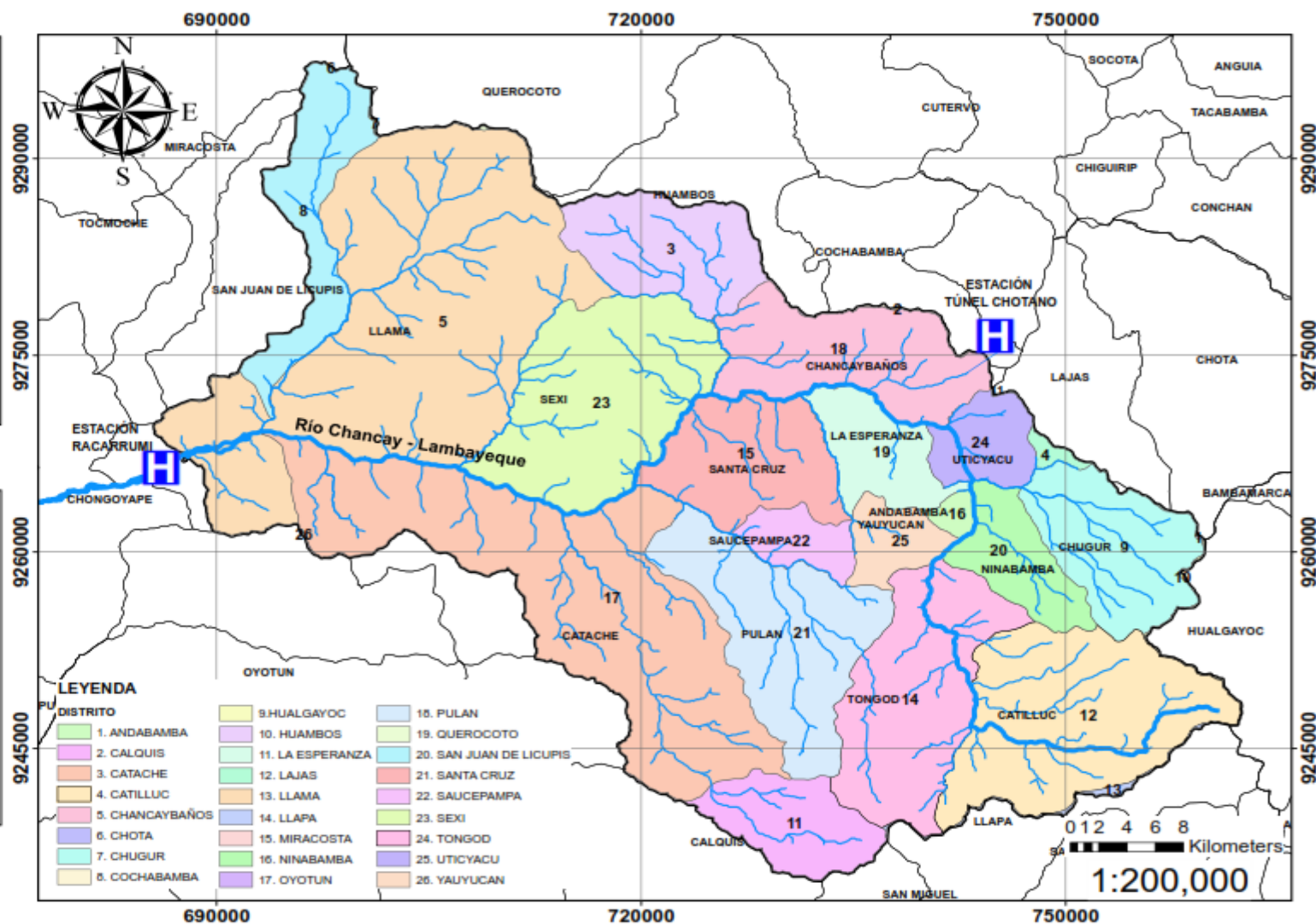


IMAGEN	TESIS	PLANO	SIG			LAMINA
			BACH. DEYSI MARILYN ROJAS NUÑEZ	BACH. CHRISTIAN JORDAN SAAVEDRA SANCHEZ	ASESOR: DR. ING. JOSE DEL CARMEN ARBULU RAMOS	
	ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS MODELOS GR4J, HBV, SACRAMENTO, SOCONT PARA LA EVALUACIÓN HIDROLÓGICA DE LA CUENCA CHANCAY-LAMBAYEQUE, UTILIZANDO EL SOFTWARE RS MINERVE	MAPA DELIMITACIÓN POLÍTICA	FECHA:	NOVIEMBRE 2025	ESC: 1:200,000	N° 2

