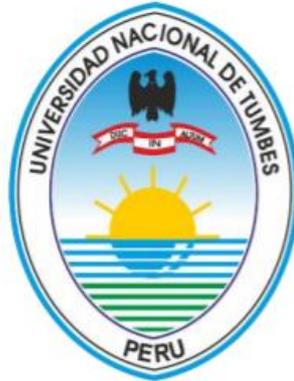


UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUMBES

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS



**Determinación de umbrales de alerta ante inundaciones en
costa norte peruana a partir de simulaciones hidrológicas de
escala nacional, 1981-2023**

TESIS

Para optar el título profesional de Ingeniera Agrícola

PRESENTADO POR:

Bach. Cruz Peña, Dayana del Carmen

TUMBES, 2024

UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUMBES
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS



**Determinación de umbrales de alerta ante inundaciones en costa
norte peruana a partir de simulaciones hidrológicas de escala
nacional, 1981-2023**

Tesis aprobada en forma y estilo por:

Dr. Napoleón Puño Lecarnaque (Presidente)

Código ORCID: 0000-0002-5008-8085

Dr. José Modesto Carrillo Sarango (Secretario)

Código ORCID: 0000-0003-0841-3064

Dr. Luis Jhony Caucha Morales (Vocal 1)

Código ORCID: 0000-0002-4786-9008

Ing. Deciderio Atoche Ortiz (Vocal 2)

Código ORCID: 0000-0002-3300-330X

TUMBES, 2024

UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUMBES
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS



**Determinación de umbrales de alerta ante inundaciones en costa
norte peruana a partir de simulaciones hidrológicas de escala
nacional, 1981-2023**

**Los suscritos declaramos que el proyecto de tesis es original en su
contenido y forma**

Bach. Dayana del Carmen Cruz Peña (Autor)

Código ORCID: 0009-0006-9891-9438

Ing. Deciderio Atoche Ortiz (Asesor)

Código ORCID: 0000-0002-3300-330X

Ing. Mg. Sc. Harold Llauca Soto (Coasesor)

Código ORCID: 0000-0001-7462-2548

TUMBES, 2024

COPIA DE ACTA DE SUSTENTACIÓN



UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUMBES
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
EX FUNDO FISCAL LA CRUZ-CAMPUS UNIVERSITARIO
SECRETARIA ACADÉMICA



ANEXO VIII

"Año del Bicentenario, de la consolidación de nuestra Independencia, y de la conmemoración de las heroicas batallas de Junín y Ayacucho"

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PRESENCIAL

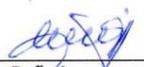
En Tumbes, a los dieciocho días del mes de noviembre de dos mil veinticuatro, siendo las doce horas, con treinta minutos (30), en el ambiente del Aula 01 del Laboratorio de Mecánica de Suelos, Concreto y Asfalto de la Facultad de Ciencias Agrarias, se reunieron el Jurado Calificador, designado mediante Resolución N°065-2023/UNTUMBES-VRACAD-FCA-D, el mismo que fue reestructurado mediante RESOLUCIÓN N°203-2024/UNTUMBES-VRACAD-FCA-D, **Dr. Napoleón Puño Lecarnaqué** (Presidente), **Dr. José M. Carrillo Sarango** (Secretario), **Dr. Luis J. Caucha Morales** (Vocal) reconociendo en la misma resolución además, al **Ing. Deciderio Atoche Ortiz**, como **Asesor**, se procedió a evaluar, calificar y deliberar la sustentación de la tesis, titulado "**Determinación de Umbrales de Alerta ante Inundaciones en la Costa Norte Peruana a Partir de Simulaciones Hidrológicas de Escala Nacional, 1981-2023**", para optar el Título Profesional de INGENIERO AGRÍCOLA, presentado por la **Bach. DAYANA DEL CARMEN CRUZ PEÑA**, Concluida la sustentación y absueltas las preguntas, por parte de la sustentante y después de la deliberación, el jurado según el artículo N° 75 del Reglamento de Tesis para Pregrado y Posgrado de la Universidad Nacional de Tumbes, declara A. PROBADA a la **Bach. DAYANA DEL CARMEN CRUZ PEÑA**, por UNANIMIDAD, con el calificativo SOBRESALIENTE.

Se hace conocer a la sustentante, que deberá levantar las observaciones finales hechas al informe final de tesis, que el jurado le indica.

En consecuencia, queda A. PTO para continuar con los trámites correspondientes a la obtención del título profesional de INGENIERO AGRÍCOLA, de conformidad con lo estipulado en la Ley Universitaria N° 30220, el Estatuto, Reglamento General, Reglamento General de Grados y Títulos y Reglamento de Tesis de la Universidad Nacional de Tumbes.

Siendo las ocho horas y veinte minutos del mismo día, se dio por concluida la ceremonia académica, procediendo a firmar el acta en presencia del público asistente.

Tumbes, 18 noviembre 2024

 Dr. Napoleón Puño Lecarnaqué DNI N° <u>05225904</u> CODIGO ORCID <u>0000-0002-5008-8081</u> Presidente	 Dr. José M. Carrillo Sarango DNI N° <u>00223856</u> CODIGO ORCID <u>0000-0003-0841-3064</u> Secretario
 Dr. Luis J. Caucha Morales DNI N° <u>41378388</u> CODIGO ORCID <u>0000-0002-4786-9003</u> Vocal	 ING. DECIDERIO ATOCHE ORTIZ DNI: <u>00251292</u> CODIGO ORCID: <u>0000-0002-3300-3300</u> VOCAL: <u>RESERVA</u>

C.C. - JURADOS (03) -ASESOR Y(CO)-INTERESADO-ARCHIVO (Decanato)
 S.acad.

Determinación de umbrales de alerta ante inundaciones en costa norte peruana a partir de simulaciones hidrológicas de escala nacional, 1981-2023

por Dayana CRUZ PEÑA



ING. DECIDERIO ATOCHE ORTIZ
ORCID: 0000-0002-3300-330X

Fecha de entrega: 29-nov-2024 12:59p.m. (UTC-0500)

Identificador de la entrega: 2505412571

Nombre del archivo: Informe_de_tesis_final_CRUZ_PEÑA_DAYANA.docx (59.26M)

Total de palabras: 31453

Total de caracteres: 172414

Determinación de umbrales de alerta ante inundaciones en costa norte peruana a partir de simulaciones hidrológicas de escala nacional, 1981-2023

INFORME DE ORIGINALIDAD

13%

INDICE DE SIMILITUD

13%

FUENTES DE INTERNET

4%

PUBLICACIONES

2%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net Fuente de Internet	4%
2	repositorio.untumbes.edu.pe Fuente de Internet	1%
3	zagan.unizar.es Fuente de Internet	1%
4	es.scribd.com Fuente de Internet	1%
5	bdigital.unal.edu.co Fuente de Internet	<1%
6	repositorio.senamhi.gob.pe Fuente de Internet	<1%
7	www.senamhi.gob.pe Fuente de Internet	<1%
8	repositorio.lamolina.edu.pe Fuente de Internet	<1%


ING. DECIDERIO ATOCHE ORTIZ
ORCID: 0000-0002-3300-330X

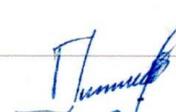
9	oa.upm.es Fuente de Internet		<1 %
10	qdoc.tips Fuente de Internet		<1 %
11	docplayer.es Fuente de Internet		<1 %
12	1library.co Fuente de Internet	ING. DECIDERIO ATOCHE ORTIZ ORCID: 0000-0002-3300-330X	<1 %
13	documentop.com Fuente de Internet		<1 %
14	RUTH KARIME SEDANO CRUZ. "Influencia de la variabilidad climática en la modelación estadística de extremos hidrológicos en el Valle Alto del río Cauca, Colombia.", 'Universitat Politecnica de Valencia', 2017 Fuente de Internet		<1 %
15	Vicente Serrano, Sergio Martin. "Spatial and temporal evolution of droughts in the middle Ebro Valley: Causes and environmental consequences", Proquest, 20111109 Publicación		<1 %
16	www.scielo.org.co Fuente de Internet		<1 %
17	cdn.www.gob.pe Fuente de Internet		<1 %

18	www.corantioquia.gov.co Fuente de Internet	<1 %
19	repositorio.ucv.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
20	repositorio.unap.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
	 ING. DECIDERIO ATOCHE ORTIZ ORCID: 0000-0002-3300-330X	
21	Daniel Francisco Campos Aranda. "Temas recientes del análisis de frecuencias hidrológico", Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2023 Publicación	<1 %
22	repositorio.uncp.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
23	siar.regionlima.gob.pe Fuente de Internet	<1 %
24	andina.pe Fuente de Internet	<1 %
25	pdfslide.tips Fuente de Internet	<1 %
26	Andrés Mora Valencia. "El uso de la distribución g-h en riesgo operativo" El autor agradece las valiosas sugerencias y recomendaciones de los evaluadores anónimos y los comentarios del editor de la revista. Estas contribuciones ayudaron	<1 %

significativamente a mejorar la versión previa de este artículo.", Contaduría y Administración, 2014

Publicación

27	journals.ametsoc.org Fuente de Internet		<1 %
28	repositorio.una.ac.cr Fuente de Internet	ING. DECIDERIO ATOCHE ORTIZ ORCID: 0000-0002-3300-330X	<1 %
29	JESÚS LÓPEZ DE LA CRUZ. "Análisis estadístico y modelación del régimen de las crecidas en ríos de la España peninsular en un contexto no estacionario.", 'Universitat Politècnica de València', 2015 Fuente de Internet		<1 %
30	Submitted to Universidad Pontificia Bolivariana Trabajo del estudiante		<1 %
31	repositorio.unp.edu.pe Fuente de Internet		<1 %
32	academica-e.unavarra.es Fuente de Internet		<1 %
33	samafind.sama.gov.sa Fuente de Internet		<1 %
34	Submitted to Universitat Politècnica de València Trabajo del estudiante		<1 %

35	www.coursehero.com Fuente de Internet	<1 %
36	Ganguly, R.. "Performance evaluation and sensitivity analysis of the general finite line source model for CO concentrations adjacent to motorways: A note", Transportation Research Part D, 200805 Publicación	<1 %
37	Submitted to Universidad Católica de Santa María Trabajo del estudiante	<1 %
38	Submitted to Universidad Tecnológica del Perú Trabajo del estudiante	<1 %
39	www.cazalac.org Fuente de Internet	<1 %
	 ING. DECIDERIO ATOCHE ORTIZ ORCID: 0000-0002-3300-330X	
40	riunet.upv.es Fuente de Internet	<1 %
41	www.dipres.gob.cl Fuente de Internet	<1 %
42	Submitted to Universidad del Valle de Guatemala Trabajo del estudiante	<1 %
43	cicese.repositorioinstitucional.mx Fuente de Internet	<1 %

44	dspace.uah.es Fuente de Internet	<1 %
45	repositorio.inaigem.gob.pe Fuente de Internet	<1 %
46	www.grafiati.com Fuente de Internet	<1 %
47	pdfcookie.com Fuente de Internet	<1 %
48	alicia.concytec.gob.pe Fuente de Internet	<1 %
49	repositorio.uchile.cl Fuente de Internet	<1 %
50	repositorio.una.edu.ni Fuente de Internet	<1 %
 ING. DECIDERIO ATOCHE ORTIZ ORCID: 0000-0002-3300-330X		
51	vdocumento.com Fuente de Internet	<1 %
52	www.agrodrought.ei.udelar.edu.uy Fuente de Internet	<1 %
53	www.tandfonline.com Fuente de Internet	<1 %
54	Jia, Yiming. "Probabilistic and Machine Learning-Based Multi-Hazard Resilience Assessment", Northeastern University, 2024 Publicación	<1 %

55	aiplanetatierra.igme.es Fuente de Internet	<1 %
56	dokumen.pub Fuente de Internet	<1 %
57	medcraveonline.com Fuente de Internet	<1 %
58	scielo.conicyt.cl Fuente de Internet	<1 %
59	www.minem.gob.pe Fuente de Internet	<1 %

Excluir citas Activo

Excluir coincidencias < 15 words

Excluir bibliografía Activo


ING. DECIDERIO ATOCHE ORTIZ
ORCID: 0000-0002-3300-330X

DEDICATORIA

A Dios, quien ha estado a mi lado en cada paso de este arduo camino. En los momentos en que sentía que no podía comprender o avanzar, su sabiduría e inteligencia me guiaron con claridad. Cuando la frustración y el cansancio me abrumaban, fue su amor el que me ofreció el aliento y la fuerza para seguir adelante. He sentido su presencia en cada desafío que enfrenté durante este proceso, y es ese amor el que me ha permitido perseverar y alcanzar esta meta.

A mis padres, William y Haydee, por su amor incondicional y apoyo constante. Mi padre, cuya pasión por mi carrera sigue inspirándome desde el cielo. A mi madre, por su fortaleza y por ser mi modelo de perseverancia. Gracias por estar siempre a mi lado y por creer en mí, incluso cuando yo dudaba.

AGRADECIMIENTOS

Al MSc. Harold Llauca por su constante guía y enseñanza, que fueron cruciales para la culminación de esta tesis. Su apoyo y dedicación han sido fundamentales en cada etapa del proceso, y sin ello, no habría logrado esta meta. Estoy profundamente agradecida por su compromiso y por compartir su valiosa experiencia.

Al Ing. Deciderio Atoche por su disposición al aceptar ser mi asesor, facilitando la continuidad de mi tesis.

A mis abuelos, por su apoyo emocional incondicional y por su firme creencia en mí. A mi hermano, Levinson, por escucharme y por comprender mi pasión por mi carrera.

Finalmente, a mis amigos, que me acompañaron a lo largo de este proceso: a Christian Lluen, por motivarme a comenzar esta etapa; a mi amigo Crhistian, por su apoyo en momentos de incertidumbre y brindarme facilidades para lograr esta meta; a mi amigo Paulo, por compartir y entusiasmarse conmigo durante esta aventura de investigación, visualizando un futuro profesional prometedor; y a mi amiga y confidente, Estrella, por estar a mi lado en los momentos de angustia y brindarme su apoyo incondicional.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA.....	VII
AGRADECIMIENTOS.....	XIV
RESUMEN	XXV
ABSTRACT	XXVI
I. INTRODUCCIÓN.....	27
II. ESTADO DE ARTE.....	30
2.1. Conceptos teóricos.....	30
2.1.1. Unidad hidrográfica	30
2.1.2. Estación hidrométrica.....	30
2.1.3. Caudal	32
2.1.4. Caudal medio diario	32
2.1.5. Caudal medio mensual.....	33
2.1.6. Caudal medio anual	33
2.1.7. Caudal máximo anual.....	33
2.1.8. Simulaciones hidrológicas a escala nacional.....	34
2.1.9. Fenómeno El Niño	35
2.1.10. Crecida de río	36
2.1.11. Inundación fluvial	36
2.1.12. Umbral de alerta de inundación.....	36
2.1.13. Sistema de alerta temprana	37
2.1.14. Producto PISCO_HYD_ARNOVIC	38
2.1.15. Producto SONICS	38
2.1.16. Probabilidad empírica.....	39
2.1.17. Probabilidad teórica	40
2.1.18. Análisis de frecuencias.....	40
2.1.19. Serie de caudales máximos anuales	40
2.1.20. Serie de picos sobre umbral.....	42
2.1.21. Estimación de Parámetros en Distribuciones de Probabilidad.....	44
2.2. Antecedentes.....	47
2.2.1. Estudios a nivel internacional	47

2.2.2.	Estudios a nivel nacional	48
2.2.3.	Estudios a nivel local.....	49
III.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	50
3.1.	Ubicación del área de estudio.....	50
3.2.	Datos	55
3.2.1.	Información hidrológica observada.....	55
3.2.2.	Información hidrológica simulada	59
3.2.3.	Información para validación	60
3.2.4.	Información geográfica espacial	61
3.3.	Materiales y equipos.....	61
3.4.	Programas	62
3.5.	Métodos.....	62
3.5.1.	Evaluación de sesgo de caudales medios diarios	64
3.5.2.	Estadística descriptiva.....	67
3.5.3.	Estacionalidad de serie de caudales	69
3.5.4.	Análisis de frecuencia	70
3.5.5.	Comparación entre los enfoques AM y POT	79
3.5.6.	Validación de Umbrales de alerta de inundación.....	80
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	81
4.1.	Resultados	81
4.1.1.	Evaluación de sesgo de caudales medios diarios	81
4.1.2.	Estadística descriptiva de caudales medio diarios.....	87
4.1.3.	Estacionalidad de serie de caudales	89
4.1.4.	Análisis de frecuencia	93
4.1.5.	Comparación entre los enfoques AM y POT	118
4.1.6.	Validación de umbrales de alerta de inundación	120
4.1.7.	Aplicación de enfoque POT en la costa norte peruana.....	125
4.2.	Discusión.....	130
V.	CONCLUSIONES	133
VI.	RECOMENDACIONES	135
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA	137

ANEXOS 146

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Componentes principales de la Unidad Hidrográfica.....	30
Figura 2. Reglas linmimétricas instaladas en el curso del río.....	31
Figura 3. Medición de caudal en una estación limnigráfica	32
Figura 4. Curva de caudales medios diarios de un año.....	33
Figura 5. Variación de caudal medio mensual en la estación El Tigre en los años 1990-2020	33
Figura 6. Elemento de caudal máximo.....	34
Figura 7. Modelos hidrológicos según el grado de agregación	35
Figura 8. Patrones de anomalía de temperatura superficial del océano pacífico en el año 1997.....	35
Figura 9. Umbrales de alerta de inundación de la Estación El Tigre.	37
Figura 10. Conceptualización de una cuenca con la distribución de estaciones de monitoreo para el SAT	37
Figura 11. Metodología del producto PISCO_HyD_ARNOVIC.....	38
Figura 12. Metodología de SONICS v3.0.....	39
Figura 13. Independencia entre picos de caudal.....	44
Figura 14. Ubicación del área de estudio de costa norte peruana, unidades hidrográficas y tramos de río	52
Figura 15. Ubicación de estaciones hidrométricas en el área de estudio	54
Figura 16. Cobertura de datos de las estaciones hidrométricas de la costa norte peruana	57
Figura 17. Series de caudales medios diarios observados del período 1981-2023	58
Figura 18. Distribución espacial de cobertura de datos de estaciones hidrométricas en las Unidades Hidrográficas (UH).	59
Figura 19. Series de caudales medios diarios simulados del período 1981-2023, obtenidos de PISCO_HyD_ARNOVIC sin corregir con EQM.....	60
Figura 20. Flujograma de metodología para determinar umbrales de alerta de inundaciones en la costa norte peruana	63
Figura 21. Comparación de caudales Observados y Simulados EQM de las Estaciones Hidrométricas CHI, ECI y ETI del periodo 1981-2023.....	81

Figura 22. Comparación de caudales Observados y Simulados EQM de las Estaciones Hidrométricas EAP, HBR, LEN, MLC, PIM, PNA, PPL, PSC y PTU del periodo 1981-2023.....	82
Figura 23. Distribución espacial de métricas estadísticas para la evaluación de sesgo en las estaciones hidrométricas estudiadas.	84
Figura 24. Diagrama de Taylor para evaluar el desempeño de los datos simulados en comparación con los datos observados en las estaciones hidrométricas	86
Figura 25. Heatmap de estacionalidad estandarizado de caudales de las estaciones hidrométricas estudiadas en los años 1981-2020.	89
Figura 26. Variación anual de caudal de las estaciones hidrométricas en el período de 1981 a 2020.....	91
Figura 27. Estacionalidad de serie de caudal medio mensual (1981 – 2020) en las estaciones de estudio, incluyendo valores correspondientes a los años de Fenómeno del Niño: 1982-83, 1997-98 y 2016-17	92
Figura 28. Caudales Medios Diarios y Caudales Máximos Anuales (1981 – 2023) de las estaciones de estudio.....	93
Figura 29. Serie de Caudales Máximos Anuales (1981 – 2023) de las estaciones de estudio para Análisis de Frecuencia	94
Figura 30. Test de Mann-Kendall de la serie de Caudales Máximos Anuales (1981 – 2023) de las estaciones de estudio para Análisis de Frecuencia	96
Figura 31. Distribuciones de Probabilidad en las Series de Caudales Máximos Anuales (1981-2023)	98
Figura 32. Q-Q plot usando GEV para las estaciones de estudio	100
Figura 33. Gráfica de Densidad usando GEV para las estaciones de estudio.	101
Figura 34. Caudal de evento extremo anual y período de retorno en las estaciones de estudio	102
Figura 35. Umbrales de eventos extremos en caudales históricos utilizando el enfoque AM en las estaciones PTU, ETI, ECI, PIM, LEN, EAP, PNA y PSC ...	104
Figura 36. Selección de umbral para aplicar excedente de Mean Residual Life (MRL) de la estación PTU con COMID 9036610	106
Figura 37. Selección de umbral para aplicar excedente de Mean Residual Life (MRL) de la estación ETI con COMID 9037728.	106

Figura 38. Selección de umbral para aplicar excedente de Mean Residual Life (MRL) de la estación PIM con COMID 9039887	107
Figura 39. Selección de umbral para aplicar excedente de Mean Residual Life (MRL) de la estación MLC con COMID 9044146	107
Figura 40. Condición temporal de excedencias en la estación PTU: Agrupación en clústeres para identificar eventos independientes con condición temporal de 5 días	109
Figura 41. Excedencia que cumplen la condición temporal de todas las estaciones de estudio	110
Figura 42. Test de Mann-Kendall de la serie de Picos sobre umbrales (1981 – 2023) de las estaciones de estudio para Análisis de Frecuencia	111
Figura 43. Ajuste de la Distribución de Pareto Generalizada a los Picos sobre Umbrales para las Estaciones PTU (a), PSC (b), ECI (c), ETI (d), LEN (e) y CHI (f).....	114
Figura 44. Umbrales de eventos extremos y período de retorno en las estaciones de estudio. Aplicando el enfoque POT	115
Figura 45. Umbrales de eventos extremos en caudales históricos utilizando el enfoque POT en las estaciones PTU, ETI, ECI, PIM, LEN, EAP, PNA y PSC .	117
Figura 46. Correlación entre los umbrales obtenidos con los enfoques AM y POT en cada estación de estudio.	118
Figura 47. Diferencia entre los umbrales de inundación según el tiempo de retorno para cada estación, comparando el enfoque POT con el enfoque AM	119
Figura 48. Comparación de umbrales de alerta de inundación para 2.33, 5 y 10 años de periodo de retorno de PHISIS - SENAMHI con los extraídos del enfoque POT y el enfoque AM en las estaciones PTU, ETI, ECI, CAB, ALM y PNA	121
Figura 49. Diferencias entre umbrales de alerta de inundación entre POT y PHISIS en las estaciones hidrométricas PTU, ETI, ECI, CAB, ALM y PNA	124
Figura 50. Correlación entre los umbrales de alerta de inundación obtenidos de PHISIS y los umbrales de alerta determinados por el enfoque POT en las estaciones hidrométricas PTU, ETI, ECI, CAB, ALM y PNA.	125
Figura 51. Umbrales de alerta de inundación en los tramos de ríos de la Costa norte peruana para un periodo de retorno de 2.33 años (TR = 2.33) usando el enfoque POT	127

Figura 52. Umbrales de alerta de inundación en los tramos de ríos de la Costa norte peruana para un periodo de retorno de 5 años (TR = 5) usando el enfoque POT	128
Figura 53. Umbrales de alerta de inundación en los tramos de ríos de la Costa norte peruana para un periodo de retorno de 10 años (TR = 10) usando el enfoque POT	129

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Métodos para estimación de parámetros de distribución de probabilidad	45
Tabla 2. Coordenadas en UTM de las Unidades Hidrográficas del área de estudio.....	51
Tabla 3 Principales características de las unidades hidrográficas	52
Tabla 4. COMID de cada estación Hidrométrica en el PISCO HyD ARNOVIC ..	55
Tabla 5 Relación de estaciones hidrométricas de 6 Unidades hidrográficas de la costa norte peruana.....	56
Tabla 6. Umbrales de alerta de inundación recopilados de la plataforma PHISIS - SENAMHI en las estaciones hidrométricas de PTU, ETI, ECI, CAB, ALM y PNA	61
Tabla 7. Materiales.....	61
Tabla 8. Equipos	61
Tabla 9 Programas utilizados para la realización de la tesis	62
Tabla 10 Métricas estadísticas para evaluar el sesgo del modelo simulado	65
Tabla 11. Valores aceptables para la evaluación del sesgo de modelos de simulación	66
Tabla 12. Métricas descriptivas para el análisis de la serie de caudales medio diarios simulados.....	68
Tabla 13. Estandarización de Caudales medios mensuales: Fórmulas e Interpretación de Valores $Q_{estandar}$	69
Tabla 14 Ecuaciones para la evaluación de tendencias utilizando métodos No Paramétricos: Test de Mann-Kendall y Método de Sen.	72
Tabla 15 Distribuciones de probabilidad.....	73
Tabla 16 Métricas estadísticas para la selección de la mejor distribución de probabilidad en el enfoque AM	74
Tabla 17. Resultados de métricas estadísticas en las estaciones hidrométricas	85
Tabla 18. Resultados de estadística descriptiva de caudales simulados corregidos con EQM en cada estación hidrométrica.....	88

Tabla 19. Valores altos y bajos de Caudales Máximos Anuales de las estaciones de estudio.....	95
Tabla 20. Test de Mann-Kendall de la Serie de Caudales Máximos Anuales de las estaciones de estudio	97
Tabla 21. Selección de mejor distribución de probabilidad aplicando K-S test, A-D test y C-S tes	99
Tabla 22. Umbrales de potenciales inundaciones en las estaciones estudiadas obtenidos con el enfoque AM	103
Tabla 23. Umbrales para extraer excedentes de cada estación de estudio	105
Tabla 24. Cantidad de eventos extremos extraídos para el enfoque POT	109
Tabla 25. Test de Mann-Kendall de la Serie de Caudales Máximos Anuales de las estaciones de estudiop	112
Tabla 26. Umbrales de potenciales inundaciones en las estaciones estudiadas obtenidos con el enfoque POT	116
Tabla 27. Métricas estadísticas para la comparación entre umbrales con enfoque POT y AM en las estaciones.....	120
Tabla 28. Resultados de validación de umbrales de inundación determinadas mediante el enfoque POT en estaciones hidrométricas de PTU, ETI, ECI, CAB, ALM y PNA.....	122
Tabla 29. Resultados de validación de umbrales de inundación determinadas mediante el enfoque AM en estaciones hidrométricas de PTU, ETI, ECI, CAB, ALM y PNA.....	122
Tabla 30. Resultado de métricas de validación para los enfoques AM y POT evaluados con los umbrales de PHISIS.....	123

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. COMID de los tramos de ríos de la Costa norte peruana	147
Anexo 2. Heatmap de caudales medios mensuales de las estaciones hidrométricas del período de 1981-2023	148
Anexo 3. Data base de caudal media anual de las estaciones estudiada	149
Anexo 4. Caudales mensuales de los eventos extremos del Fenómeno del niño.	150
Anexo 5. Data base de caudales máximos anuales de 1981-2023.	151
Anexo 6. Parámetros promedio anual (1981-2023) de cada distribución de probabilidad con enfoque AM para las estaciones hidrométricas.	152
Anexo 7. Test de selección de la mejor distribución de probabilidad para cada estación.	154
Anexo 8. Selección de umbral (u) POT con la gráfica Mean Residual Life Plot en cada estación.	156
Anexo 9. Parámetros de la distribución de Pareto Generalizada (gpd) de cada estación estudiada.	158
Anexo 10. Ajuste de la Distribución de Pareto Generalizada a los Picos sobre Umbrales para las Estaciones EAP (g), HBR (h), MLC (i), PIM(j), PNA (k) y PPL (l).	159
Anexo 11. Umbrales de alerta de inundación en los tramos de ríos de la Costa norte peruana para los periodos de retorno de 2.33, 5 y 10 años usando el enfoque POT	160

RESUMEN

La costa norte peruana enfrenta frecuentemente el impacto del Fenómeno de El Niño (FEN), que provoca un incremento de caudales y daños significativos a la vida, propiedad y economía. Para mitigar estos efectos, el monitoreo hidrológico es crucial en un Sistema de Alerta Temprana ante inundaciones en la Gestión de Riesgo de Desastres. Sin embargo, la eficacia de estos sistemas se ve limitada por la escasez de información debido a la reducida red de estaciones hidrométricas en la región. El objetivo de este estudio es determinar umbrales de alerta ante inundaciones fluviales en la costa norte peruana a partir de simulaciones hidrológicas de escala nacional. Se emplean datos de caudales medios diarios (1981-2023) del producto PISCO_HyD_ARNOVIC de SENAMHI y se evalúan series diarias para un análisis de frecuencia mediante los enfoques de pico sobre umbral (POT) y de caudales máximos anuales (AM) para 352 tramos de ríos entre Tumbes, Piura y Lambayeque. Se realiza un análisis comparativo entre los enfoques POT y AM, validando los umbrales con PHISIS de SENAMHI. Los resultados muestran que POT ofrece mayor precisión en la estimación de umbrales de alerta, con un PBIAS de 1.5% y un RMSE de 83.23 m³/s, frente a un PBIAS de -1.7% y un RMSE de 85.68 m³/s del enfoque AM. Los umbrales de alerta incluyen periodos de retorno de 2.33, 5 y 10 años. La distribución Generalizada de Valores Extremos (GEV) fue la más adecuada para AM, según los test de Kolmogorov-Smirnov (KS), Chi-square (CS) y Anderson-Darling (AD). Se concluyó que el estudio ha permitido determinar umbrales de alerta ante inundaciones en la costa norte peruana utilizando caudales simulados del producto PISCO HyD ARNOVIC.

Palabras claves: Inundaciones fluviales, Fenómeno de El Niño, Costa Norte Peruana, Umbrales de Alerta, enfoque POT, enfoque AM.

ABSTRACT

The northern coast of Peru frequently faces the impact of the El Niño Phenomenon (ENP), which causes an increase in river flows and significant damage to life, property, and the economy. To mitigate these effects, hydrological monitoring is crucial in an Early Warning System for flood disaster risk management. However, the effectiveness of these systems is limited by the scarcity of information due to the reduced network of hydrometric stations in the region. The objective of this study is to determine flood warning thresholds for the northern coast of Peru based on national-scale hydrological simulations. Daily mean flow data (1981-2023) from SENAMHI's PISCO_HyD_ARNOVIC product were used, and daily series were evaluated for frequency analysis using the Peak Over Threshold (POT) and Annual Maximum (AM) approaches for 352 river sections between Tumbes, Piura, and Lambayeque. A comparative analysis between the POT and AM approaches was conducted, validating the thresholds with SENAMHI's PHISIS platform. The results show that POT provides greater accuracy in estimating warning thresholds, with a PBIAS of 1.5% and an RMSE of 83.23 m³/s, compared to a PBIAS of -1.7% and an RMSE of 85.68 m³/s for the AM approach. The warning thresholds include return periods of 2.33, 5, and 10 years. The Generalized Extreme Value (GEV) distribution was the most suitable for AM, according to the Kolmogorov-Smirnov (KS), Chi-square (CS), and Anderson-Darling (AD) tests. It was concluded that the study has enabled the determination of flood warning thresholds on the northern coast of Peru using simulated flows from the PISCO HyD ARNOVIC product.

Keywords: River floods, El Niño Phenomenon, Northern Coast of Peru, Alert Thresholds, POT approach, AM approach

I. INTRODUCCIÓN

Las inundaciones fluviales son fenómenos naturales que se originan por el incremento del nivel y caudal de un río por efecto de las intensas precipitaciones, que, al superar los límites de su cauce, las aguas se desplazan hacia las zonas aledañas. Este fenómeno de no ser monitoreado y previsto puede ocasionar severos daños a la vida, la salud, la propiedad y la economía. Existe una creciente preocupación por estos fenómenos debido al incremento de su frecuencia en las últimas décadas (CRED, 2022). Por ejemplo, la OMM (2022) indica que hay cerca de un 40% de probabilidad de que, en los próximos cinco años, la temperatura media global, que ronda entre 14°C y 15°C, supere temporalmente en 1,5°C los niveles actuales, lo que podría intensificar fenómenos climáticos extremos. Un aumento de esta magnitud provocaría un mayor calentamiento de los océanos, lo que podría intensificar fenómenos como El Niño. Este fenómeno suele generar precipitaciones extremas, aumentando el riesgo de inundaciones severas y sus efectos devastadores en diversas regiones del mundo.

En el caso de la costa norte peruana, Metzger y Xuan (2010) describen esta región como especialmente vulnerable a las inundaciones provocadas por el fenómeno El Niño/Oscilación del Sur (ENSO). Como evidencia de esto, Sardon et al. (2022), señalan que los eventos máximos de inundación que ocurrieron durante los periodos 1982/83, 1997/98 y 2016/17 devastaron esta zona. Recientemente, el Fenómeno El Niño Costero 2023-2024 ha sido considerado el más intenso de las últimas dos décadas, mientras que el Fenómeno El Niño Global se ubicó entre los cinco más fuertes registrados desde 1950. Este evento climático extremo afectó a todos los países de la región con días y noches más cálidas de lo habitual (SENAMHI, 2024). Las cuencas de la costa norte en su totalidad tuvieron gran actividad por efecto de lluvias que originaron el incremento de caudales, erosión hídrica, activación de quebradas secas, sedimentación y colmatación de cauces, etc.; contribuyendo así a los desbordes de las aguas en los principales ríos, que a su paso fueron atentando contra la vida de innumerables personas, viviendas, escuelas, puestos de salud, carreteras, agricultura y ganadería.

Durante el evento de Niño Costero en 1982/1983, la costa peruana sufrió inundaciones severas debido a lluvias intensas que aumentaron el caudal de ríos como el Tumbes y Piura, arrasando áreas agrícolas y pobladas (Delavaud, 1985). En 1997/1998, el Niño Costero provocó daños significativos en los sectores agrícola y pesquero, con 142 km de vías y 13,800 hectáreas agrícolas afectadas en Piura, y 71 km de vías y 19,900 hectáreas agrícolas devastadas en Tumbes, además de la pérdida de 5,800 cabezas de ganado (Aceituno, 1998). El Niño Costero de 2017 impactó severamente a la costa peruana, siendo Piura la región más afectada, reportando 41,053 damnificados y 342,023 afectados, además de 16 muertos y 3 desaparecidos (UNICEF, 2017; Red Humanitaria Nacional y OCHA, 2017). Recientemente, el Niño Costero 2023-2024 ha sido el más intenso en dos décadas, con 67,200 damnificados y 391,000 afectados reportados hasta ahora, además de 99 fallecidos y 13 desaparecidos. El impacto también ha afectado a 146,539 viviendas, 55,440 niños en su acceso a la educación, y ha sobrecargado los servicios de protección infantil locales (ONU, 2023).

Muchos países se han enfocado en diseñar estrategias para mitigar los daños ocasionados por inundaciones. CONDESAN (2019) sostiene que con la instrumentación y el monitoreo hidrológico se logra comprender el funcionamiento de una cuenca, por medio de registros continuos del nivel/caudal, precipitación, temperatura, entre otras variables. De esta manera, por medio de la observación y seguimiento de los principales procesos hidrológicos en la cuenca se pueden realizar predicciones de alerta ante potenciales incrementos del nivel y caudal de un río, el cual origina una inundación fluvial. Como mencionan Monreal et al. (2021), el monitoreo hidrológico se ha convertido en una herramienta de gran relevancia, dado que, en muchos casos, con las observaciones y predicciones es posible tomar las medidas anticipatorias necesarias para contrarrestar los impactos negativos que generan las inundaciones fluviales.

Los registros del nivel y caudal en la red de drenaje de las cuencas son condición inicial para estimar la magnitud de las inundaciones fluviales como producto del cambio en la respuesta hidrológica de la cuenca frente a precipitaciones extremas. No obstante, esta labor puede verse limitada por la escasa información hidrométrica (e.g. corto registro de datos con una estadística pobre) y una baja densidad de estaciones hidrométricas en una cuenca hidrográfica (red hidrométrica insuficiente

para monitorear toda la red hídrica de la cuenca). Por ello, la modelación hidrológica busca proporcionar más información en el tiempo y espacio, para así dar mayor soporte a la toma de decisiones ante estos peligros hidrológicos. El monitoreo hidrológico de potenciales incrementos de nivel/caudal e inundaciones fluviales es realizado a partir de la definición de umbrales de alerta fijados para un tramo de río de interés. Estos umbrales corresponden a los límites máximos de nivel/caudal en los cuales podría definirse un evento de crecida del río. Estos umbrales son comúnmente determinados para una estación hidrométrica a partir de sus registros históricos de niveles y caudales máximos; pudiendo ser categorizados en niveles de peligro (e.g. moderado, fuerte o extremo).

Este trabajo busca determinar umbrales de alerta ante potenciales inundaciones en la costa norte peruana a partir del uso de simulaciones hidrológicas a escala nacional. Para esto se emplearán las simulaciones de caudales medios diarios (1981-2023) del producto PISCO_HyD_ARNOVIC de SENAMHI para extraer series de tiempo de caudales máximos basados en el enfoque de picos sobre umbral (POT) para cada uno de los tramos de río comprendidos en el área de estudio. Asimismo, se usarán la metodología del Sistema de Observación de Inundaciones Potenciales del SENAMHI (SONICS, para comparar el desempeño del enfoque POT respecto al enfoque de caudales máximos anuales (AM) utilizado en SONICS. Este trabajo busca explorar también el ajuste de distintas probabilidades de distribución teóricas para estimar caudales máximos a distintos periodos de retorno en cada tramo de río, a fin de determinar umbrales de alerta de inundación en tramos de río sin control hidrométrico. Finalmente, se validaron los umbrales del enfoque POT y AM con los umbrales de la plataforma PHISIS del SENAMHI, obtenidos a partir de una probabilidad empírica.

II. ESTADO DE ARTE

2.1. Conceptos teóricos

2.1.1. Unidad hidrográfica

Es un espacio geográfico, escenario del ciclo hidrológico. Sus componentes principales, como se muestra en la **Figura 1**, son el parteaguas que corresponde a las crestas de elevación topográfica que delimita la unidad hidrográfica; las vertientes de drenaje por donde discurren las aguas captadas por los acuíferos, deshielos, precipitaciones, etc. convergen en un cauce principal que por medio de la corriente terminan en un punto de descarga. El recurso hídrico que brinda la unidad hidrográfica puede abastecer a la población, a la actividad de agricultura, ganadería y ecoturismo (Aguirre, 2011; Aguilar y Iza, 2009) .

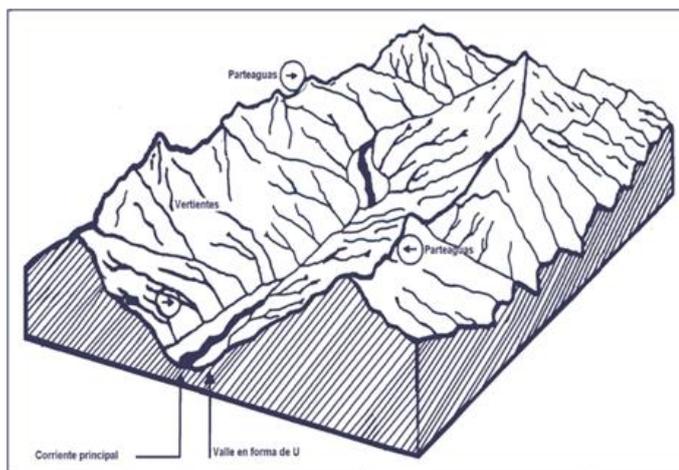


Figura 1. Componentes principales de la Unidad Hidrográfica

Fuente: (Rangel, s. f.)

2.1.2. Estación hidrométrica

Vera (2002) indica que una estación hidrométrica es un lugar de observación directa ubicado en una determinada sección del río donde se realizan una serie de mediciones que permiten determinar el caudal circulante en momento y tiempo determinado.

Según SENAMHI (2022), SENAMHI cuenta con una red sistemática a nivel nacional de estaciones convencional y automáticas cuyo objetivo principal es el monitoreo hidrológico.

a. Red Convencional

Comprende de instrumentos mecánicos y/o digital que requiere de la asistencia de un observador para la medición y/o registro de datos.

Estación hidrológica limnimétrica

La estación limnimétrica recopila datos sobre el nivel del agua utilizando una regla limnimétrica (ver **Figura 2**). Los registros se llevan a cabo en cuatro lecturas diarias durante los períodos de estiaje o caudales mínimos, y ocasionalmente cinco lecturas durante las crecidas o caudales máximos. La última de estas lecturas se considera como la altura máxima alcanzada por el nivel del agua en el cauce del río durante el día.



Figura 2. Reglas limnimétricas instaladas en el curso del río

Fuente: SENAMHI (2022)

Estación hidrológica limnigráfica

Estación dedicada a la observación de nivel de agua. Los instrumentos fundamentales incluyen reglas limnimétricas y un limnógrafo (ver **Figura 3**). El limnógrafo está compuesto por un sensor que detecta variaciones en el nivel del agua y un sistema de registro (mecánico, electrónico o digital) que guarda estos datos con el paso del tiempo.



Figura 3. Medición de caudal en una estación limnigráfica

Fuente: Realizan mediciones para establecer parámetros (Hoy Rojas, 2017)

b. Red Automática

Comprende de sensores digitales que de manera autónoma pueden registrar mediciones en intervalos configurables, según se halla preestablecido.

Estación hidrológica automática

Los sensores en estas estaciones son capaces de medir continuamente las variables hidrológicas sin necesidad de intervención humana. Los datos recogidos son almacenados y, en muchos casos, transmitidos automáticamente a bases de datos centralizadas.

2.1.3. Caudal

El caudal, es definido por Quinones-Marquez y Guzman-Rios (1986), como el volumen del flujo de agua que se transporta a través de una sección transversal por una unidad de tiempo. “Sus unidades en el Sistema Internacional son $[m^3 /s]$ ” Sanz (2016). Agregando, que su medición se realiza a partir de una sección de control o estación hidrométrica.

2.1.4. Caudal medio diario

El caudal medio diario es obtenido promediando los caudales medidos o registrados durante un día (24 horas). Se representan en la curva de caudales medios diarios, cada día de cada año (ver **Figura 4**).

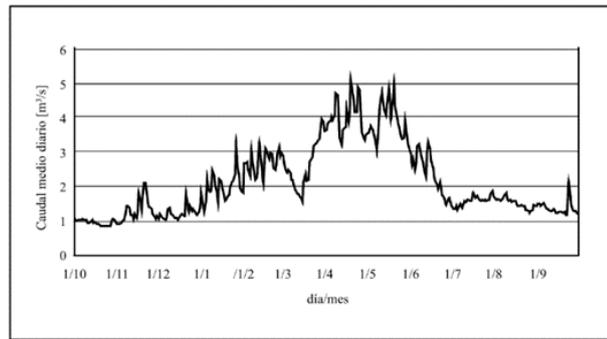


Figura 4. Curva de caudales medios diarios de un año

Fuente: (Sanz, 2016)

2.1.5. Caudal medio mensual

Este indicador se obtiene al promediar los caudales diarios registrados a lo largo del mes. Permite analizar las variaciones (**Figura 5**) en el flujo de agua a lo largo del año, identificar patrones estacionales.

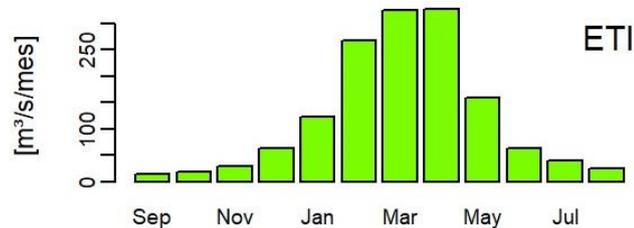


Figura 5. Variación de caudal medio mensual en la estación El Tigre en los años 1990-2020

2.1.6. Caudal medio anual

Este indicador se calcula promediando los caudales medios diarios o mensuales registrados durante todo el año. Se utiliza para comparar diferentes años y detectar tendencias a largo plazo.

2.1.7. Caudal máximo anual

El caudal máximo anual es el pico (aumento de caudal) máxima que se alcanza durante un año. En la **Figura 6** se observa la representación de un pico de caudal con sus respectivos elementos: Caudal Inicial (Q1), Pico de Caudal (Qmax), Duración total del caudal máximo (T) (Ortiz, 2022; Sanz, 2016).

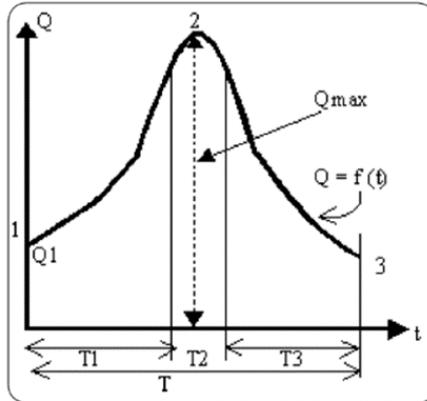


Figura 6. Elemento de caudal máximo

Fuente: (Ortiz, 2022)

2.1.8. Simulaciones hidrológicas a escala nacional

Modelos hidrológicos computacionales que representan el comportamiento del flujo de agua en todo el territorio nacional, permitiendo simulaciones bajo diversos escenarios de condiciones climáticas y cambios en el uso del suelo para evaluar su impacto en el caudal tanto a nivel nacional como regional (Llauca H., 2021).

El modelado hidrológico físico es un enfoque multivariante para estimar el caudal usando datos hidrometeorológicos (lluvia, temperatura, etc.) y datos geomorfológicos (pendiente, tipo de suelo, etc.) (Clark et al., 2015; Diodato et al., 2014).

a) Clasificación de modelos hidrológicos

Los modelos se clasifican en diferentes criterios: según las ecuaciones utilizadas, pueden ser modelos probabilísticos y determinísticos (Ramírez, 2012). Los probabilísticos tratan con ejemplos observados y estructura del azar observada en ciertas series hidrológicas temporales. Y en el caso de los modelos determinísticos, se clasifican según los procesos físicos que simulan, los algoritmos que el modelo emplea para describir dichos procesos y la dependencia de datos del modelo. Adicionalmente, existen tipos de modelos según grado de agregación (ver **Figura 7**), estos pueden ser concentrados o agregados y distribuidos dependiendo del grado de discretización en la descripción de las características de la cuenca (Meijerink et al., 1994).

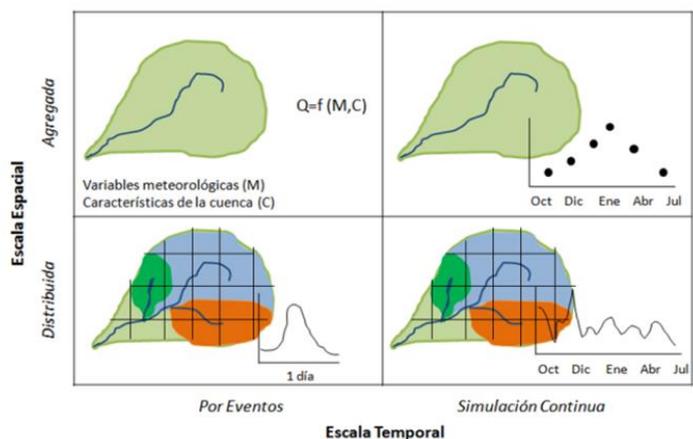


Figura 7. Modelos hidrológicos según el grado de agregación

Fuente: Clasificación de Modelos Hidrológicos según grado de agregación (Ramírez, 2012)

2.1.9. Fenómeno El Niño

El Fenómeno El Niño (FEN) se caracteriza por un calentamiento anómalo de las aguas superficiales del océano Pacífico tropical (ver **Figura 8**) (EM-DATA, 2019; Metzger y Xuan, 2010). Las lluvias intensas asociadas con El Niño pueden superar la capacidad de los ríos para evacuar agua, lo que aumenta el riesgo de inundaciones. Históricamente, eventos extremos vinculados a El Niño han ocurrido en 1982-1983, 1997-1998, 2016-2017. A diferencia del fenómeno global El Niño, el Niño Costero afecta específicamente la costa peruana y ecuatoriana (SENAMHI, 2024).

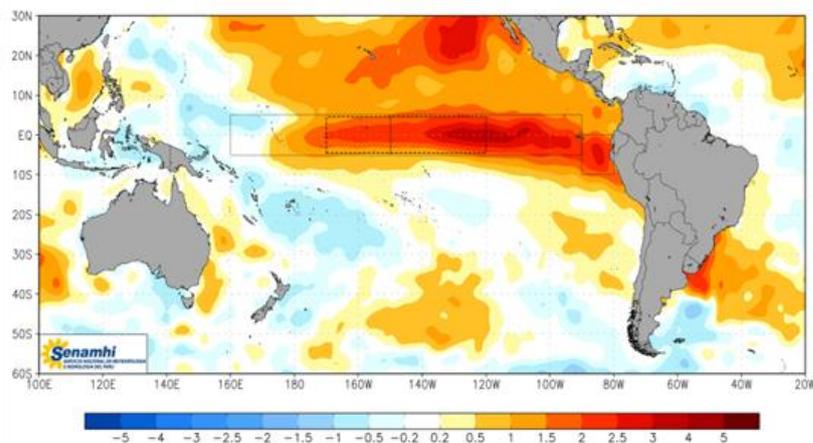


Figura 8. Patrones de anomalía de temperatura superficial del océano pacífico en el año 1997.

Fuente: (SENAMHI, 2014)

2.1.10. Crecida de río

Una crecida de río se define como el rápido aumento del nivel del agua de los ríos o quebradas provocado por precipitaciones intensas, generando un incremento de caudal. Una crecida se da, si el volumen de agua recogida por el cauce del río sobrepasa la capacidad de absorción del terreno o la capacidad de contención del cauce, el agua se desborda y provoca la inundación de las riberas. Entonces, una inundación es una consecuencia de una crecida (MARN, 2011).

2.1.11. Inundación fluvial

Díez et al. (2009) se refiere a Inundación fluvial cuando el origen de las inundaciones es el desbordamiento de corrientes fluviales (ríos, arroyos, torrentes, etc.), por acumulación de la precipitación sin que circule sobre la superficie terrestre (precipitación 'in situ').

2.1.12. Umbral de alerta de inundación

Los umbrales de inundación determinan la severidad de la señal de inundación pronosticada, y su cálculo estadístico se da aplicando un análisis de frecuencia de caudales máximos y ajustado por una distribución de una serie de variables máximas (Zsoter et al., 2020).

SENAMHI ha desarrollado la Plataforma Hidrológica de Información Sistematizada e Integrada (PHISIS) con el propósito principal de ofrecer información dinámica y espacial frente a eventos hidrológicos extremos (ver **Figura 9**). Esta plataforma permite identificar los centros poblados que podrían estar en riesgo, así como el nivel de peligrosidad (umbral de alerta amarillo, naranja y rojo), utilizando datos de las estaciones hidrológicas de la red nacional de monitoreo sistemático del SENAMHI, incluidos los umbrales de inundación registrados en las estaciones disponibles. De esta manera, se fortalece la función del SENAMHI en el monitoreo y la emisión de avisos hidrológicos, como parte del Sistema de Alerta Temprana para peligros hidrometeorológicos. Los periodos de retorno considerados para la alerta temprana son de 2.33, 5 y 10 años (Villaorduña, 2021).

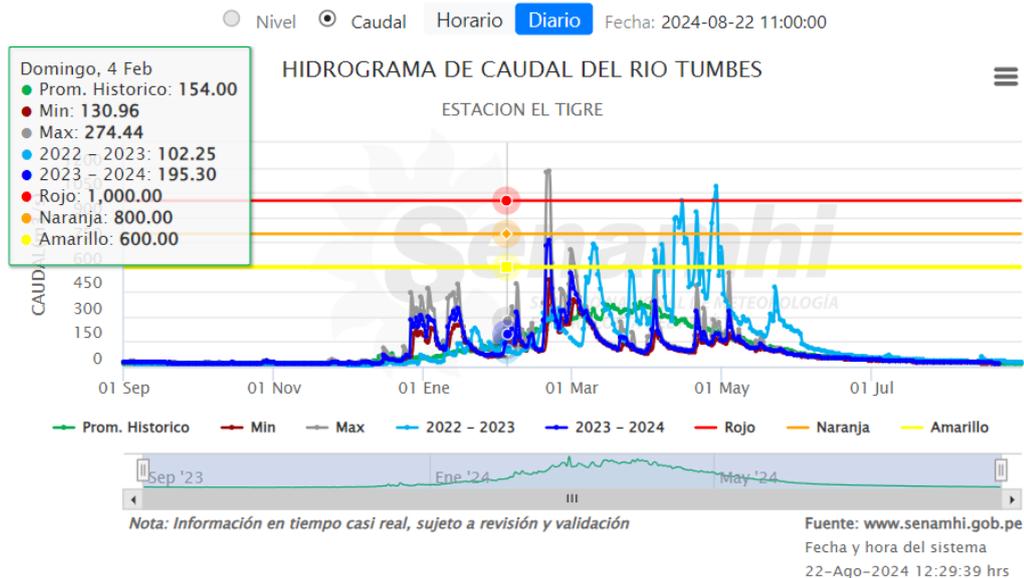


Figura 9. Umbral de alerta de inundación de la Estación El Tigre.

Fuente: Plataforma Hidrológica PHISIS, SENAMHI.

2.1.13. Sistema de alerta temprana

Los sistemas de alerta temprana (SAT) para inundaciones de ríos son herramientas estratégicas para una gestión eficaz del riesgo de desastres en muchas regiones del mundo (Alfieri et al., 2019).

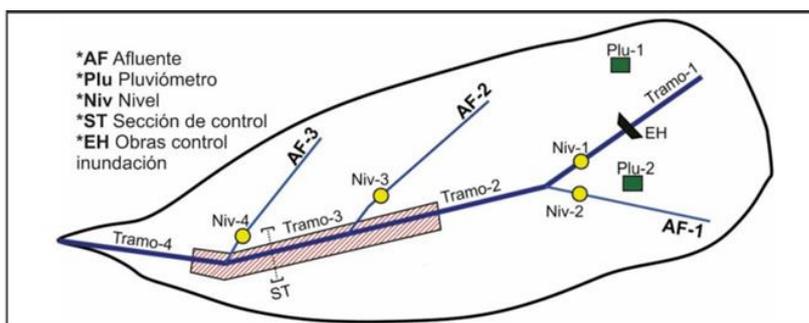


Figura 10. Conceptualización de una cuenca con la distribución de estaciones de monitoreo para el SAT

Fuente: (Castillo et al., 2020).

El primer proceso para el SAT de inundación fluvial, según Castillo et al. (2020), es determinar las zonas críticas o de monitoreo (ver **Figura 10**), para luego evaluar los niveles de agua sobre la sección crítica y determinar, mediante los umbrales de inundación, las zonas de riesgo.

2.1.14. Producto PISCO_HYD_ARNOVIC

Producto PISCO_HyD_ARNOVIC (Llauca et al., 2023) desarrollado por el SENAMHI, utiliza una metodología detallada (ver **Figura 11**). Este producto se basa en el conjunto de datos hidrometeorológicos PISCO (resolución de $0.1^\circ \times 0.1^\circ$) y combina el modelo ARNOVIC con el modelo RAPID. ARNOVIC es un modelo conceptual de lluvia-escorrentía, mientras que RAPID emplea un esquema de enrutamiento basado en matrices para calcular el caudal en miles de tramos fluviales simultáneamente. El marco de modelado hidrológico híbrido (ARNO/VIC+RAPID) se implementa en 43 zonas hidrológicas (con 122 sub-zonas), utilizando parámetros previamente calibrados y validados en 43 estaciones fluviométricas para el período 1981–2020. Las series de caudales simuladas exhiben un desempeño notable a escala diaria ($KGE \geq 0.75$, $NSE_{sqrt} \geq 0.65$, $MARE \leq 1$ y $-25\% \leq PBIAS \leq 25\%$) para cuencas en la costa pacífica y en la transición Andes-Amazonía, y una buena representación ($R \geq 0.75$) de la variabilidad estacional e interanual. Además, el modelo simula caudales diarios en 11,913 subcuencas y tramos fluviales, permitiendo un análisis detallado de los flujos de agua en diversas regiones del país.

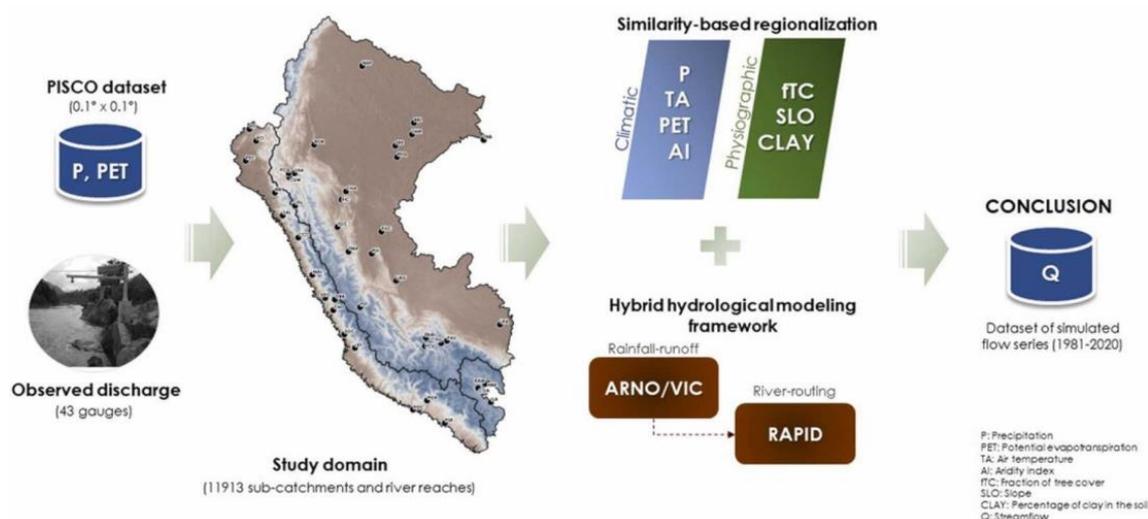


Figura 11. Metodología del producto PISCO_HyD_ARNOVIC

Fuente: (Llauca et al., 2023).

2.1.15. Producto SONICS

El Sistema de Observación de Inundaciones Potenciales del Senamhi (SONICS) está elaborado en base a las salidas de caudales medios diarios simulados del modelo hidrológico acoplado ARNO/VIC + RAPID. (SENAMHI, 2022).

La metodología del producto SONICS_{v3.0} (ver **Figura 12**), que se logró obtener a partir de datos grillados de Precipitación (P) y Evapotranspiración (PET) extraídos del producto PISCO, que con el modelo conceptual ARNO/VIC + RAPID se generó series diarias de caudales a nivel nacional, para luego, realizar el análisis de frecuencia de caudales máximos anuales y determinar los umbrales de caudales en periodos de retorno 2,33; 5 y 10 años (Llauca y León, 2020).

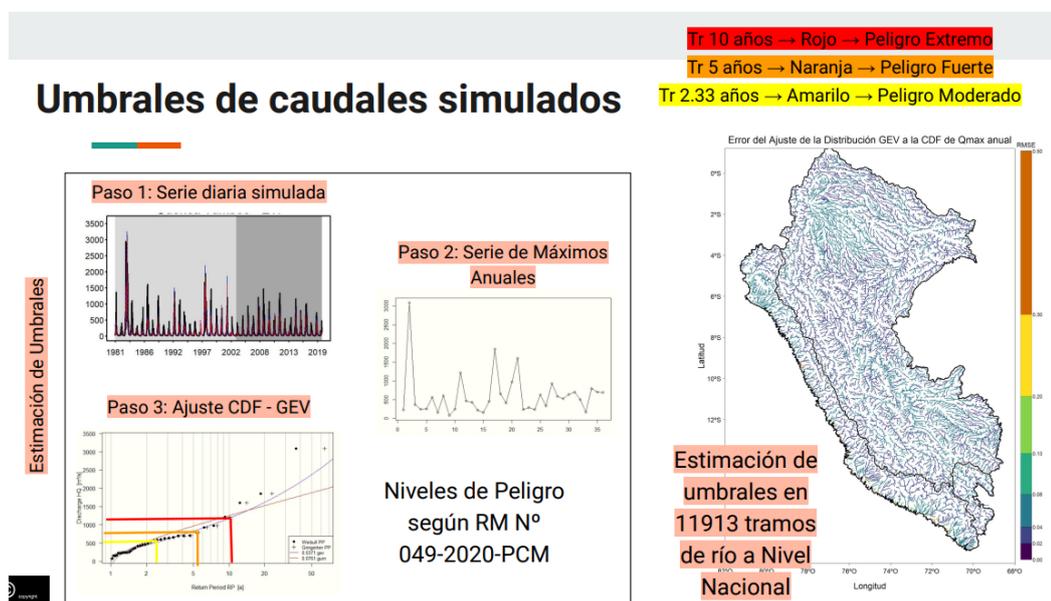


Figura 12. Metodología de SONICS v3.0

2.1.16. Probabilidad empírica

La probabilidad empírica se refiere a la estimación de la probabilidad de un evento basada en la observación de datos reales y su frecuencia relativa. Según, Moore et al. (2014) la probabilidad empírica se calcula dividiendo el número de veces que ocurre un evento específico entre el número total de observaciones realizadas. Esta medida proporciona una estimación práctica de la probabilidad, basada en datos observacionales en lugar de modelos teóricos.

En el contexto de la plataforma PHISIS de SENAMHI, la probabilidad empírica se utiliza para establecer umbrales de alerta de inundación. PHISIS determina estos umbrales analizando datos históricos de eventos de inundación y otros indicadores hidrometeorológicos.

2.1.17. Probabilidad teórica

La probabilidad teórica se define como la probabilidad calculada utilizando principios matemáticos y modelos basados en la estructura subyacente de un experimento o fenómeno. Según, Walpole et al., (2017) la probabilidad teórica se determina mediante el uso de fórmulas matemáticas y distribuciones probabilísticas que describen el comportamiento de los resultados posibles de un experimento idealizado. Esta aproximación se basa en supuestos teóricos sobre el espacio muestral y la probabilidad de los eventos, proporcionando una medida de la probabilidad basada en la teoría y la modelización matemática.

El producto SONICS v3.0 utiliza probabilidad teórica para establecer los umbrales de alerta de inundación. Al basarse en modelos matemáticos y distribuciones probabilísticas.

2.1.18. Análisis de frecuencias

El análisis de frecuencias estima la probabilidad de ocurrencia de eventos históricos o futuros (Mosalve, 1995). La magnitud de un evento extremo está inversamente relacionada con su frecuencia: eventos moderados ocurren con mayor frecuencia, mientras que los eventos extremos son menos comunes (González y Rincón, 2011). Este análisis se puede realizar con caudales máximos instantáneos observados o simulados mediante modelos hidrológicos (León, 2018), y puede enfocarse en series anuales (enfoque de serie máxima anual, AM) o en series de duración parcial (enfoque de picos sobre umbral, POT) (Bezak et al., 2014).

Pan et al., (2022) argumentan que el modelo de picos sobre el umbral (POT) presenta varias ventajas teóricas. En particular, resaltan que el POT es más flexible que el modelo de serie máxima anual (AM) debido a su enfoque en el muestreo de una mayor cantidad de datos de caudales máximos. Este mayor volumen de datos permite que el POT proporcione estimaciones menos sesgadas para inundaciones frecuentes.

2.1.19. Serie de caudales máximos anuales

La serie máxima anual (AM) se define como la muestra de caudales que contiene el pico máximo de inundación de cada año. Es uno de los enfoques más utilizados para el análisis de frecuencia de inundaciones. (Fischer, 2021).

El enfoque de máxima anual consiste en una serie de variables aleatorias independientes con la misma función de distribución “F” y observadas en diferentes intervalos de tiempo (1 año), se busca caracterizar la función de distribución del máximo. Si la distribución de probabilidad de X_i es conocida, se calcula el comportamiento exacto del M_n . Sin embargo, en la práctica, el comportamiento X_i suele ser desconocido, por lo que, calcular el comportamiento exacto de M_n no es posible (Barbería, 2016).

Ecuación para Variable máxima (1)

$$M_n = \max\{X_1, \dots, X_n\}$$

Donde:

$\{X_1, \dots, X_n\}$: Variables aleatorias independientes

M_n : Variable máxima de un intervalo de tiempo

n : Número de variable

Ecuación de Función de distribución

$$P\{M_n \leq x\} = P\{X_1 \leq x, \dots, X_n \leq x\} = P\{X_1 \leq x\} \dots P\{X_n \leq x\} = \{F(x)\}^n \quad (2)$$

Cuando la función de distribución (**F**) es desconocido, es necesario aplicar técnicas estadísticas para estimar la función sustituyendo los valores observados en la ecuación (2) (Barbería, 2016).

La teoría de valores extremos, mostrado en el Teorema de Fisher-Tippett, caracteriza la distribución límite del máximo valor y definiendo la distribución de valor extremo.

a) Distribución valor extremo

Según el teorema de Fisher- Tippett la distribución de valor extremo se aplica a la variable máxima, es decir, es aplicada para el enfoque de Series Anuales Máximos (Barbería, 2016).

La Distribución de Valor Extremo está presente en las siguientes expresiones.

Ecuación de Tipo 0 (VE0) o Distribución Gumbel

$$G_o(z) = \exp \left\{ -\exp \left[-\left(\frac{z-d}{c} \right) \right] \right\} \quad (3)$$

Ecuación de Tipo 1 (VE1) o Distribución de Fréchet

$$G_1(z) = \begin{cases} 0 & \text{si } z \leq 0 \\ \exp \left\{ - \left(\frac{z-d}{c} \right)^{-\alpha} \right\} & \text{si } z > 0 \end{cases} \quad (4)$$

Ecuación de Tipo (VE1) o Distribución de Weibull

$$G_2(z) = \begin{cases} \exp \left\{ - \left(\frac{z-d}{c} \right)^{-\alpha} \right\} & \text{si } z \leq d \\ 1 & \text{si } z > d \end{cases} \quad (5)$$

Donde G_i , $i=0,2$, es una función de distribución no degenerada, d es el parámetro de localización y c es el parámetro de escala.

Estos tres tipos se parametrizan y le dan forma a la siguiente expresión:

Ecuación de Distribución Valor Extremo Generalizada (GEV)

$$G(z; \varepsilon; \sigma; \mu) = \exp \left\{ - \left[1 + \varepsilon \left(\frac{z-\mu}{\sigma} \right)^{\frac{1}{\varepsilon}} \right] \right\} \quad (6)$$

Donde $\left\{ z: 1 + \frac{\varepsilon(z-\mu)}{\sigma} > 0 \right\}$; $-\infty < \mu < \infty$, $\sigma > 0$ y $-\infty < \varepsilon < \infty$, donde μ es un parámetro de localización, σ un parámetro de escala y ε un parámetro de forma.

2.1.20. Serie de picos sobre umbral

La serie picos sobre umbral (POT, por sus siglas en Inglés) es un enfoque dirigido para el análisis de frecuencia, que se define por los valores de caudales que están por encima de un determinado umbral (Barbería, 2016).

La probabilidad condicional de picos sobre umbrales se da por una serie (X_1, X_2, \dots) con distribución F , considerando como pico los X_i que excedan un umbral alto u .

Ecuación de Probabilidad Condicional

$$P\{X > u + y | X > u\} = \frac{1 - F(u + y)}{1 - F(u)} \quad y \geq 0 \quad (7)$$

a) Distribución Pareto generalizada

El enfoque Pico Sobre Umbral para el ajuste de valores extremos utiliza la distribución de probabilidad de Pareto Generalizado (GP) (Pan y Rahman, 2022).

Ecuación de Pareto Generalizada

$$H(x; \varepsilon; \sigma; \mu) = 1 - \left(1 + \frac{\varepsilon(x - \tilde{\mu})}{\tilde{\sigma}}\right)^{-\frac{1}{\varepsilon}} \quad (8)$$

Cuando $\varepsilon \neq 0$ para $x \geq \tilde{\mu}$; cuando $\varepsilon \geq 0$ y $x \leq \tilde{\mu} - \frac{\tilde{\sigma}}{\varepsilon}$;

cuando $\varepsilon < 0$ donde $\tilde{\mu} \in \mathbb{R}$

Donde μ es un parámetro de localización, σ un parámetro de escala y ε un parámetro de forma.

Ecuación de Pareto Generalizada versión estandarizada

$\tilde{\mu} = 0$ y $\tilde{\sigma} = 1$ es:

$$H(x) = 1 - (1 + \varepsilon x)^{-\frac{1}{\varepsilon}} \quad (9)$$

Si $\varepsilon \geq 0$ y $x > 0$

$\varepsilon < 0$ y $0 \leq x \leq -\frac{1}{\varepsilon}$

b) Independencia y selección de umbral

Las principales dificultades en el uso del enfoque POT son asegurar la independencia de las series de datos y elegir un valor de umbral adecuado (Lang et al., 1999).

Para la selección de umbral se basa a partir de criterios, como el de tener un período de separación de mínimo cinco días (USWRC, 1976), como el caso del pico A, B y F (ver **Figura 13**), además, el valor de caudal intermedio entre dos picos consecutivos debe caer por debajo de las tres cuartas partes del menor de estos dos valores de caudal, por lo que entre el pico B y F, los días se empiezan a contar desde el Pico C, sin tomar en cuenta el intervalo de tiempo entre B y C. por lo que entre el pico B y F, los días se empiezan a contar desde el Pico C, sin tomar en cuenta el intervalo de tiempo entre B y C.

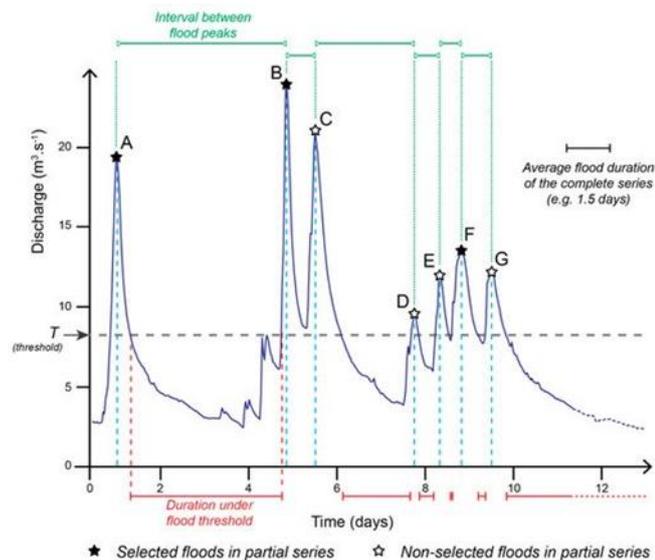


Figura 13. Independencia entre picos de caudal

Fuente: (Van et al., 2020)

2.1.21. Estimación de Parámetros en Distribuciones de Probabilidad

Para la determinación de parámetros en distribuciones de probabilidad aplicadas a eventos extremos, Stedinger et al. (1993) examinan varios métodos (ver **Tabla 1**), incluyendo los L-momentos, la estimación de momentos convencionales (MOM) y el método de máxima verosimilitud (MLE). Aunque los L-momentos (LM) ofrecen ventajas en términos de robustez y simplicidad, los autores destacan que el MLE se posiciona como el método superior debido a su mayor eficiencia estadística y su capacidad para generar estimaciones más precisas y menos sesgadas, especialmente en muestras grandes. Por lo tanto, el MLE es preferido para el análisis de eventos extremos, siempre que se cuente con suficiente información para su aplicación efectiva.

Tabla 1. Métodos para estimación de parámetros de distribución de probabilidad

Método	Descripción	Ventajas	Desventajas	Ejemplo de uso
Método de Máxima Verosimilitud (MLE)	Estima parámetros maximizando la función de verosimilitud basada en los datos observados.	Más preciso para eventos extremos.	Puede ser complejo computacionalmente.	Ajuste de distribuciones de probabilidad a datos extremos
Método de Momentos (MOM)	Estima parámetros igualando los momentos teóricos de la distribución con los momentos muestrales.	No requiere especificar una función de verosimilitud.	Menos eficiente comparado con MLE.	Estimación rápida cuando se dispone de momentos muestrales.
Método de Mínimos Cuadrados (LM)	Estima parámetros minimizando la suma de los cuadrados de las diferencias entre los datos observados y los datos ajustados por el modelo.	Generalmente usado para modelos lineales.	Sensible a valores atípicos.	Ajuste de modelos lineales a datos.

Fuente: Casella y Berger (2002); Cox y Hinkley (1979); Stedinger et al. (1993)

Método de Máxima Verosimilitud (MLE)

Para un conjunto de datos x_1, x_2, \dots, x_n y un modelo con parámetros θ , la función de verosimilitud $L(\theta)$ se define como:

Ecuación de Función de verosimilitud

$$L(\theta) = \prod_{i=1}^n f(x_i; \theta) \quad (10)$$

Donde $f(x_i; \theta)$ es la función de densidad de probabilidad del modelo con parámetros θ . El objetivo del MLE es encontrar el parámetro θ que maximiza la función verosimilitud.

La función de log-verosimilitud, que es más conveniente para la maximización debido a sus propiedades matemáticas, se define como:

Ecuación de Función log-verosimilitud

$$\ell(\theta) = \log L(\theta) = \sum_{i=1}^n \log f(x_i; \theta) \quad (11)$$

Para encontrar el estimador de máxima verosimilitud, se toma la derivada de la función de log-verosimilitud respecto a los parámetros θ , se iguala a cero, y se resuelve para θ :

Ecuación de estimador de máxima verosimilitud

$$\frac{\partial \ell(\theta)}{\partial \theta} = 0 \quad (12)$$

Esta ecuación nos proporciona el estimador θ , que maximiza la función de verosimilitud y, por ende, proporciona la mejor estimación de los parámetros del modelo basado en los datos observados.

2.2. Antecedentes

A continuación, se describe una serie de estudios de definición de umbrales de alerta ante inundaciones a nivel internacional, nacional y local:

2.2.1. Estudios a nivel internacional

Swetapadma y Ojha (2023) llevaron a cabo un análisis comparativo entre los enfoques de series de duración parcial (POT) y máximos anuales (AM) para el análisis de frecuencia de inundaciones. Encontraron que el enfoque POT es más adecuado para capturar eventos extremos más frecuentes en comparación con AM, lo que lo hace más eficiente en regiones con alta variabilidad hidrológica.

Hailu y Takala (2023), los autores evaluaron el desempeño de los modelos para predicción de eventos extremos en la cuenca del Awash, destacando la aplicación de la distribución Generalizada de Valores Extremos (GEV) para el análisis de la frecuencia de dichos eventos.

Pan et al. (2022) señalan que el análisis de frecuencia de inundaciones se basa en el ajuste de distribuciones de probabilidad a datos observados. Proponen dos enfoques: el caudal Máximo Anual (AM) y Picos sobre el Umbral (POT). El enfoque POT se aplica a eventos máximos y se ajusta utilizando una Distribución Generalizada de Pareto (GP) junto con un método automatizado para la detección de umbrales. Por otro lado, el enfoque AM también utiliza la distribución GP y se comparan los cuantiles de inundación estimados por ambos modelos. Los resultados revelan diferencias significativas en las estimaciones de caudales de diseño entre AM y POT, sugiriendo que el enfoque de POT ofrece diversas ventajas teóricas en el análisis de inundaciones.

Kumar et al. (2020) proponen una metodología para la estimación de la magnitud de las inundaciones usando el enfoque POT. Utilizan dos distribuciones de análisis de frecuencia, el método de Gumbel y la distribución de tipo III de Log-Pearson. Se implementó un enfoque POT en determinar un umbral apropiado y asegurar la independencia de los eventos. Se estimó varias magnitudes de inundación de nivel de retorno en base a la serie de tiempo de caudales diarios. El resultado evidencia que las magnitudes de inundación estimadas sobre la base de la muestra POT son más confiables.

Liang et al. (2019) desarrollaron un método automatizado de selección de umbral. Este enfoque se aplicó dentro del análisis POT, el cual se utiliza comúnmente en estudios de fenómenos extremos para determinar eventos que exceden un umbral predefinido. El método propuesto proporciona una selección más precisa de umbrales para modelar datos de series de duración parcial.

Bezak et al. (2014) realizaron una comparación de los resultados AM y POT. Para el enfoque AM se consideraron seis funciones de distribución de uso común y tres técnicas diferentes de estimación de parámetros. Los resultados mostraron un mejor desempeño para el método de la estimación de máxima verosimilitud (MLE) en comparación con los momentos convencionales y L-momentos (ML). En el caso del enfoque AM, la combinación de MLE y log-Pearson tipo 3 dio los mejores resultados entre todos los métodos de estimación de parámetros y distribuciones de probabilidad de todos los casos AM considerados. No obstante, el enfoque POT dio mejores resultados que el método AM, utilizando en este enfoque la distribución de Poisson para modelar el número anual de excedencias.

2.2.2. Estudios a nivel nacional

Llauca (2021), para proporcionar información continua de caudales diarios (1981-2020) y dar soporte a la gestión de riesgo de desastres ante potenciales inundaciones a nivel nacional, emplea un modelo hidrológico conceptual para la transformación precipitación-escorrentía (ARNO/VIC) y un modelo de tránsito hidrológico para simular caudales diarios en toda la red hídrica del Perú.

Villaorduña (2021) evalúa el impacto de diferentes funciones objetivo en la en la determinación de umbrales de alerta ante inundaciones. Para ello utilizó los datos diarios de precipitación y evapotranspiración potencial del conjunto de datos PISCO y un modelo hidrológico conceptual para evaluar 13 diferentes funciones objetivo. Posteriormente se realizó las simulaciones de caudales máximos anuales y se ajustaron 12 distribuciones de probabilidad teóricas a los datos. Finalmente evalúa la influencia de las funciones objetivo con mejor desempeño en el cálculo de umbrales de alerta para periodos de retorno de 2.33, 5 y 10 años.

Cruz (2020), propone un análisis regional de caudales para determinar umbrales de inundación en la región hidrológica VI del Pacífico de Perú, identificando 18 cuencas y 78 subcuencas. Se aplicaron distribuciones teóricas a precipitaciones y caudales

máximos para períodos de retorno de 2 a 200 años, generando hietogramas y modelando caudales. Se establecieron zonas homogéneas y niveles de alerta (amarilla, naranja y roja). El método es aplicable para períodos de retorno de 2 a 500 años en cuencas con al menos una estación y 10 años de registro.

Montesinos (2018) se centra en la estimación de umbrales de inundación en Perú en la región hidrográfica del Pacífico. En su trabajo, se utilizan análisis hidrológicos y caudales extremos (AM) para establecer criterios que mejoren la gestión de riesgos y faciliten la implementación de sistemas de alerta temprana.

2.2.3. Estudios a nivel local

Vidal (2023) destaca la estimación de umbrales de inundación como un componente esencial en la gestión de riesgos relacionados con eventos extremos. Se enfatiza la necesidad de metodologías robustas y el uso de tecnologías avanzadas, como modelos matemáticos. Además, se revisan métodos de estimación basados en datos históricos y se propone una metodología específica para las cuencas de los ríos Chira y Piura, crucial para la gestión de riesgos y desastres.

Garabito (2021), para estimar el caudal máximo en la quebrada Casitas-Bocapán de la cuenca Bocapán del departamento Tumbes, utilizó los datos de precipitación de la estación meteorológica Cañaverl del SENAMHI; luego con el uso de los métodos: Creager, Izkowski, Gumbel y Log Pearson III, obtuvo como resultado la generación de caudales máximos para un periodo de 30 años en un único punto de interés.

León (2018), estimó el desempeño de un modelo hidrológico en la Cuenca del Río Puyango – Tumbes utilizando un enfoque probabilístico. A través de la modelación, obtuvo una serie de caudales máximos instantáneos en la estación hidrométrica El Tigre para el periodo 1970/71 – 2014/15. El análisis de frecuencias mostró que este enfoque, basado en caudales modelados a partir de precipitación diaria desagregada, es aplicable en la zona. La mayor crecida observada en el periodo tuvo un periodo de retorno (TR) de 61 años, y los caudales máximos instantáneos estimados son valiosos para la gestión del riesgo. Se destaca que el análisis de frecuencia produce mejores resultados al utilizar series de duración parcial de diferentes tamaños, no limitándose al número de años de registro.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ubicación del área de estudio

El área de estudio está conformada por la Costa Norte Peruana, que abarca los departamentos de Tumbes, Piura y Lambayeque, con una superficie de 31,611.41 km². Esta región incluye 17 unidades hidrográficas, cuya ubicación geodésica se detalla en la **Tabla 2** y cuya representación gráfica se muestra en la **Figura 14**. El área de estudio se extiende a lo largo de las coordenadas UTM, conforme al Datum WGS84, en 470000 - 670000 ESTE y 9300000 - 96000000 NORTE correspondientes a la zona 17S.

La topografía de la costa norte peruana es variada, con una elevación máxima de 3,812 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.), y se caracteriza por un clima árido y semiárido. Este clima árido y semiárido resalta la importancia de la región para la gestión de recursos hídricos. La información detallada del Modelo Digital de Elevación (DEM) permite un análisis preciso de la dinámica hidrológica, esencial para la planificación y manejo sostenible de los recursos hídricos en la región.

Las unidades hidrográficas de la Costa Norte Peruana, como la Cuenca Zarumilla, la Cuenca Tumbes, la Cuenca Bocapán, la Cuenca Quebrada Seca, la Cuenca Fernández, la Cuenca Pariñas, la Cuenca Chira, la Cuenca Piura y la Cuenca Cascajal, desempeñan un papel crucial en la gestión del agua. Estas unidades son fundamentales para el riego de cultivos y el abastecimiento de agua tanto para usos domésticos como industriales.

Además, la costa norte peruana es propensa a sufrir el fenómeno del Niño, un evento climático que puede tener impactos significativos en la disponibilidad y la gestión del agua. Durante el fenómeno del Niño, la región puede experimentar lluvias excesivas y alteraciones en el régimen hídrico, lo cual subraya aún más la necesidad de una gestión eficaz y sostenible de los recursos hídrico. La capacidad para anticipar y adaptarse a estos eventos es crucial para mitigar sus efectos adversos y asegurar la resiliencia de las comunidades y ecosistemas en la Costa Norte Peruana.

Tabla 2. *Coordenadas en UTM de las Unidades Hidrográficas del área de estudio*

	Unidad Hidrográfica	Departamento	Datum WGS 84	
			Coordenada Central	
			Este	Norte
1	Cuenca Zarumilla*		585092 m	9588821 m
2	Intercuenca 13951*		576884 m	9608150 m
3	Cuenca Tumbes*		563858 m	9573736 m
4	Intercuenca 13939	Tumbes	548551 m	9598272 m
5	Cuenca Bocapán		540320 m	9566182 m
6	Intercuenca 13935		518748 m	9567837 m
7	Cuenca Quebrada Seca		520487 m	9550225 m
8	Cuenca Fernández		515082 m	9534533 m
9	Intercuenca 13931		484406 m	9530083 m
10	Cuenca Pariñas		498696 m	9510304 m
11	Intercuenca 1391		481675 m	9482520 m
12	Cuenca Chira*	Piura	582294 m	9482042 m
13	Intercuenca 1379		495431 m	9428113 m
14	Cuenca Piura*		585800 m	9420755 m
15	Intercuenca 13779		538519 m	9354182 m
16	Intercuenca 137779		578531 m	9316938 m
17	Cuenca Cascajal*	Lambayeque	603575 m	9355058 m

Nota: (*) Unidades Hidrográficas monitoreadas con estaciones hidrométricas.

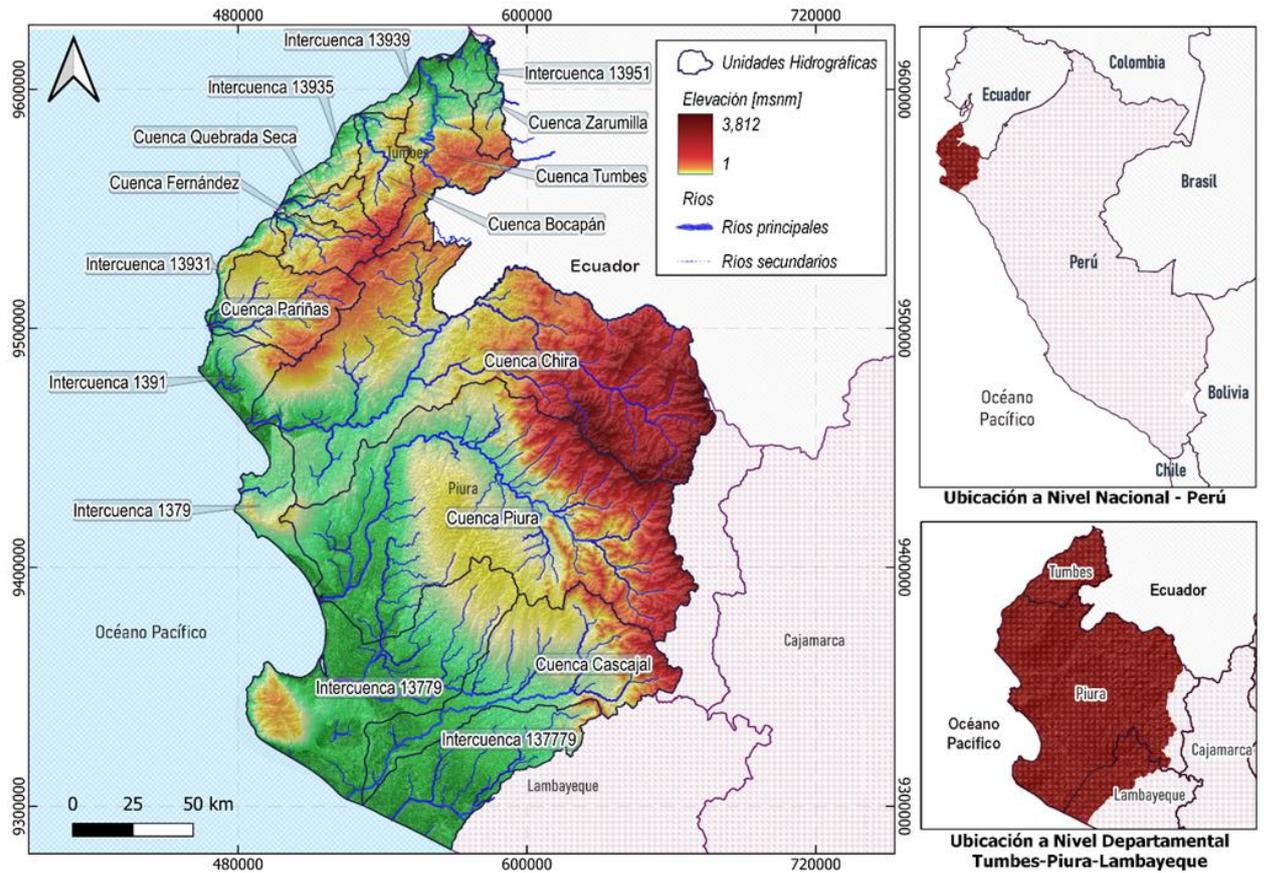


Figura 14. Ubicación del área de estudio de costa norte peruana, unidades hidrográficas y tramos de río

Las unidades hidrográficas son componentes clave en el análisis de recursos hídricos y en la planificación del manejo de cuencas. La **Tabla 3** describe las principales características de estas unidades.

Tabla 3 Principales características de las unidades hidrográficas

	Unidad Hidrográfica	Río	Elevación media [m.s.n.m]	Área [km²]	Perímetro [Km]	Longitud de río [Km]
1	Cuenca Zarumilla*	Río Zarumilla	243.07	373.00	152.61	96.85
2	Intercuenca 13951*	-	36.7	339.69	127.86	-
3	Cuenca Tumbes*	Río Tumbes	351.38	1,806.00	374.18	233.67
4	Intercuenca 13939	-	98.54	91.80	91.80	-

Continuación

5	Cuenca Bocapán	Qda. Bocapán	319.47	900.61	170.91	77.90
6	Intercuenca 13935	-	102.2	447.87	132.41	-
7	Cuenca Quebrada Seca	Qda. Seca	282.38	483.88	142.91	67.35
8	Cuenca Fernández	Río Fernández	417.35	740.27	159.55	67.03
9	Intercuenca 13931	-	141.3	328.31	145.61	-
10	Cuenca Pariñas	Qda. Pariña	333.54	1,704.86	211.06	94.81
11	Intercuenca 1391	-	112.25	791.40	144.43	-
12	Cuenca Chira*	Río Chira	865.94	10,534.76	776.22	388.90
13	Intercuenca 1379	-	72.06	913.27	206.15	-
14	Cuenca Piura*	Río Piura	446.51	872.09	655.44	339.29
15	Intercuenca 13779	-	68.43	4,708.17	496.67	-
16	Intercuenca 137779	-	33.43	2,633.40	284.21	-
17	Cuenca Cascajal*	Río Cascajal	244.99	3,942.36	436.19	182.34

Nota: (*) Unidades Hidrográficas monitoreadas con estaciones hidrométricas.

En el área de estudio, la densidad de estaciones hidrométricas es baja. De las 17 unidades hidrográficas presentes, solo se monitorean las siguientes: Cuenca Zarumilla, Intercuenca 13951, Cuenca Tumbes, Cuenca Chira, Cuenca Piura y Cuenca Cascajal como se muestra en la **Figura 15**. Estas 6 unidades hidrográficas son cubiertas por un total de 20 estaciones hidrométricas que proporcionan datos en el intervalo de tiempo de 1981 a 2024. La baja densidad de estaciones en la costa norte peruana implica que no todas las unidades hidrográficas están adecuadamente monitoreadas, representando un desafío significativo para la gestión precisa y sostenible de los recursos hídricos en esta región.

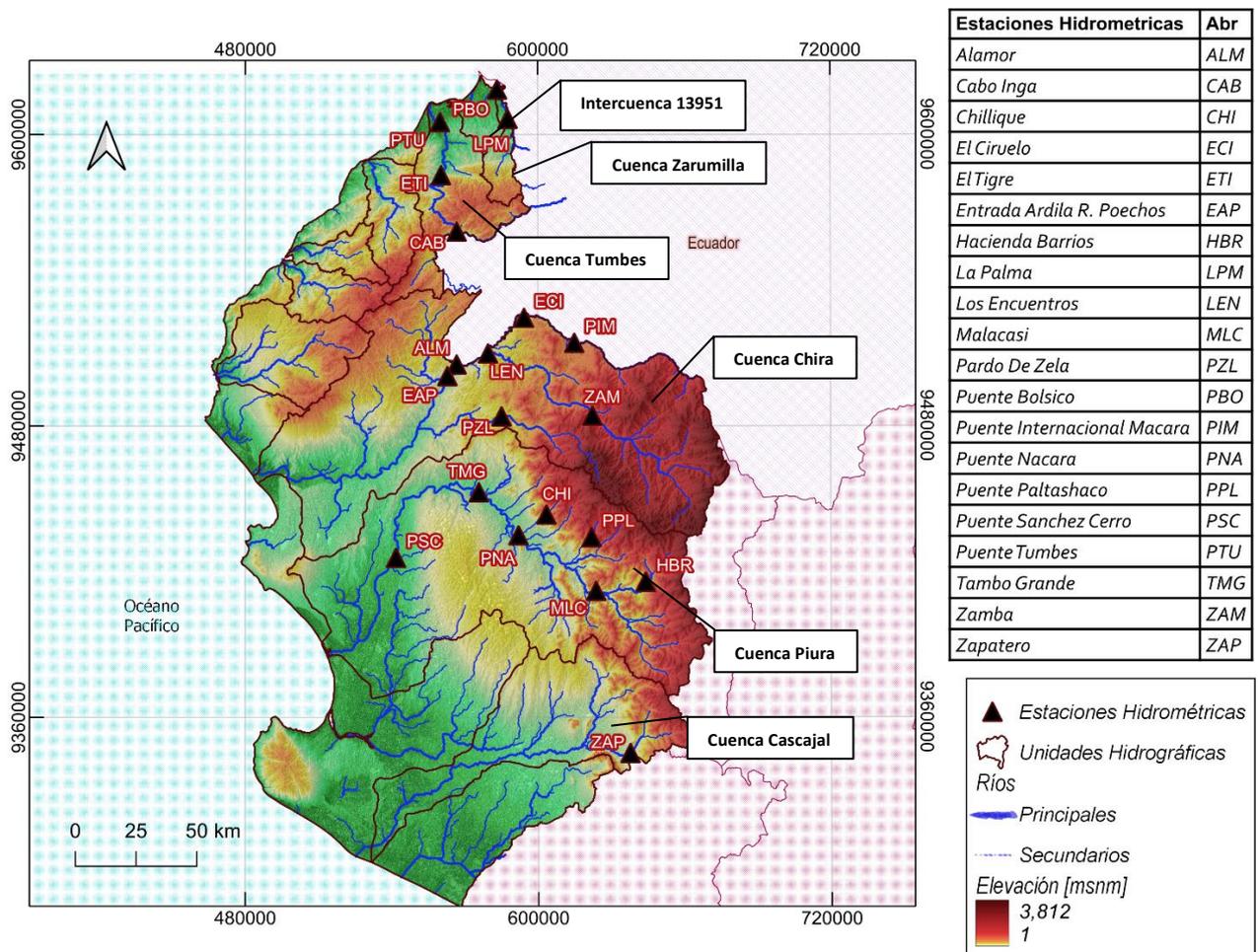


Figura 15. Ubicación de estaciones hidrométricas en el área de estudio

En la **Figura 15** se muestra el mapa detallando los 352 tramos de ríos identificados en el área de estudio, donde cada tramo representa una subcuenca y ha sido identificado mediante un código COMID específico, asignado por el producto PISCO HyD ARNOVIC. Estos códigos COMID son fundamentales para la correcta georreferenciación y análisis hidrológico, ya que permiten un seguimiento preciso y consistente de cada tramo dentro del marco del estudio hidrológico. La lista exhaustiva de estos 352 códigos COMID, que abarca la totalidad de los tramos de ríos evaluados, se encuentra documentada en el **Anexo 1** correspondiente, proporcionando una referencia completa para futuras consultas y validaciones de datos.

El COMID asignado a cada estación hidrométrica corresponde al COMID del tramo de río (tanto principales como secundarios) donde se encuentra ubicada, para más detalle ver la **Tabla 4**. Este vínculo asegura la coherencia en la identificación y el

análisis de datos hidrológicos, permitiendo una integración precisa de las estaciones dentro de su contexto hidrográfico específico.

Tabla 4. COMID de cada estación Hidrométrica en el PISCO HyD ARNOVIC

	Estaciones Hidrométricas	Abr	COMID
1	Alamor	ALM	9040285
2	Cabo Inga	CAB	9038083
3	Chillique	CHI	9043134
4	El Ciruelo	ECI	9039937
5	El Tigre	ETI	9037728
6	Entrada Ardila R. Poechos	EAP	9040511
7	Hacienda Barrios	HBR	9044140
8	La Palma	LPM	9036486
9	Los Encuentros	LEN	9040374
10	Malacasi	MLC	9044146
11	Pardo De Zela	PZL	9041447
12	Puente Bolsico	PBO	9035847
13	Puente Internacional Macara	PIM	9039887
14	Puente Ñacara	PNA	9043133
15	Puente Paltashaco	PPL	9043595
16	Puente Sánchez Cerro	PSC	9043566
17	Puente Tumbes	PTU	9036610
18	Tambo Grande	TMG	9042297
19	Zamba	ZAM	9041504
20	Zapatero	ZAP	9046944

3.2. Datos

3.2.1. Información hidrológica observada

La información observada (in situ) fue recopilada a través del portal del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), y del portal del Observatorio del Agua del Sistema Nacional de Información de Recursos Hídricos (SNIRH-ANA).

Se recopiló información sobre el caudal medio diario de 20 estaciones hidrométricas (ver **Tabla 5**), abarcando el intervalo de tiempo desde el 1 de enero de 1981 hasta el 31 de diciembre de 2023. Los datos provienen de 6 unidades hidrográficas, dado que la densidad de estaciones hidrométricas en la costa norte peruana es baja.

Tabla 5 Relación de estaciones hidrométricas de 6 Unidades hidrográficas de la costa norte peruana

Unidad Hidrográfica	Estación Hidrométrica	Datum WGS 84		Entidad	Tipo	Río
		Este	Norte			
Intercuenca 13951*	PBO	583308	9618634	ANA	C	Zarumilla
Zarumilla*	LPM	587741	9606470	ANA	C	Zarumilla
	PTU	559974	9605385	ANA	C	Tumbes
Tumbes*	ETI	559960	9583277	SENAMHI	C	Tumbes
	CAB	566606	9560059	SENAMHI	A	Tumbes
	ECI	594323	9524659	SENAMHI	C	Chira
	PIM	615395	9514683	ANA	C	Macará
	LEN	579882	9510303	ANA	C	Quiroz
Chira*	ALM	566564	9505893	SENAMHI	C/A	Alamor
	EAP	563232	9500369	SENAMHI	C	Chira
	ZAM	622008	9484823	ANA	C	Quiroz
	PZL	585402	9483766	ANA	C	Chipillico
	TMG	573172	9453932	SENAMHI	C	Piura
	CHI	603094	9443946	SENAMHI	C	Yapatera
Piura*	PNA	591997	9435117	SENAMHI	C	Piura
	PPL	621925	9433967	PECHP	C	Los gallegos

Continuación

	PSC	542113	9426321	SENAMHI	C	Piura
	HBR	644060	9416234	SENAMHI	C	Bigote
	MLC	624103	9411851	ANA	C	Piura
Cascajal*	ZAP	637261	9345486	ANA	C	Cascajal

Nota: Tipo C: Convencional, A: Automática. (*) Unidades Hidrográficas monitoreadas con estaciones hidrométricas.

Los caudales medios diarios observados, extraídos de las estaciones hidrométricas (in situ), presentan lagunas en la serie temporal debido a la falta de datos en ciertos períodos (ver **Figura 16**). Para abordar esta incompletitud y permitir un análisis continuo, se rellenan los datos faltantes con valores NA (Not Available). De manera que la serie temporal mantenga su integridad estructural (ver **Figura 17**), permitiendo la realización de análisis estadísticos, aunque los datos específicos para esos intervalos no estén disponibles. La utilización de NA facilita la identificación y el tratamiento de estos valores ausentes en las fases posteriores de análisis y corrección.

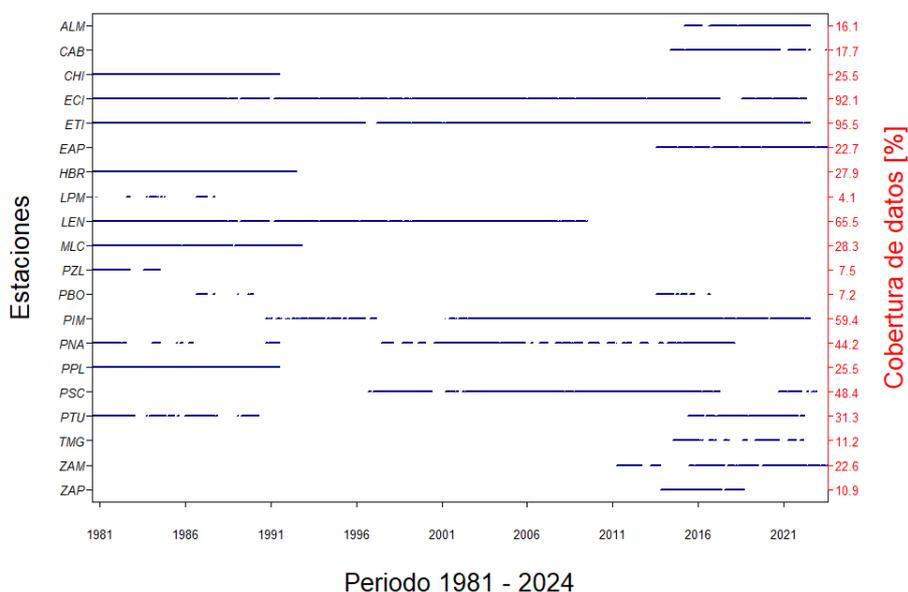


Figura 16. Cobertura de datos de las estaciones hidrométricas de la costa norte peruana

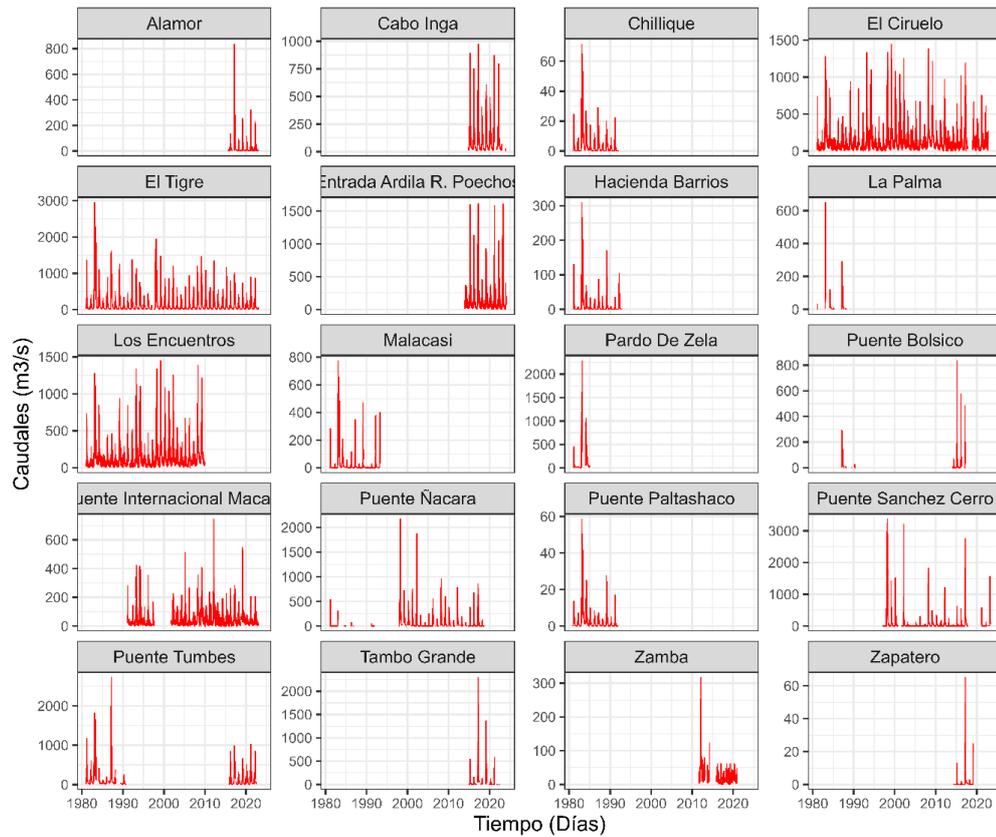


Figura 17. Series de caudales medios diarios observados del período 1981-2023

Se seleccionaron las estaciones hidrométricas con una cobertura de datos superior al 25% para garantizar que haya suficiente información disponible, lo cual es crucial para realizar una corrección precisa del sesgo en los datos simulados y minimizar el margen de error en los resultados.

Las estaciones hidrométricas que tienen mayor del 25% de cobertura de datos son PTU, ETI, EAP, LEN, ECI, PIM, PSC, PNA, CHI, PPL, MLC y HBR. (Ver **Figura 18**).

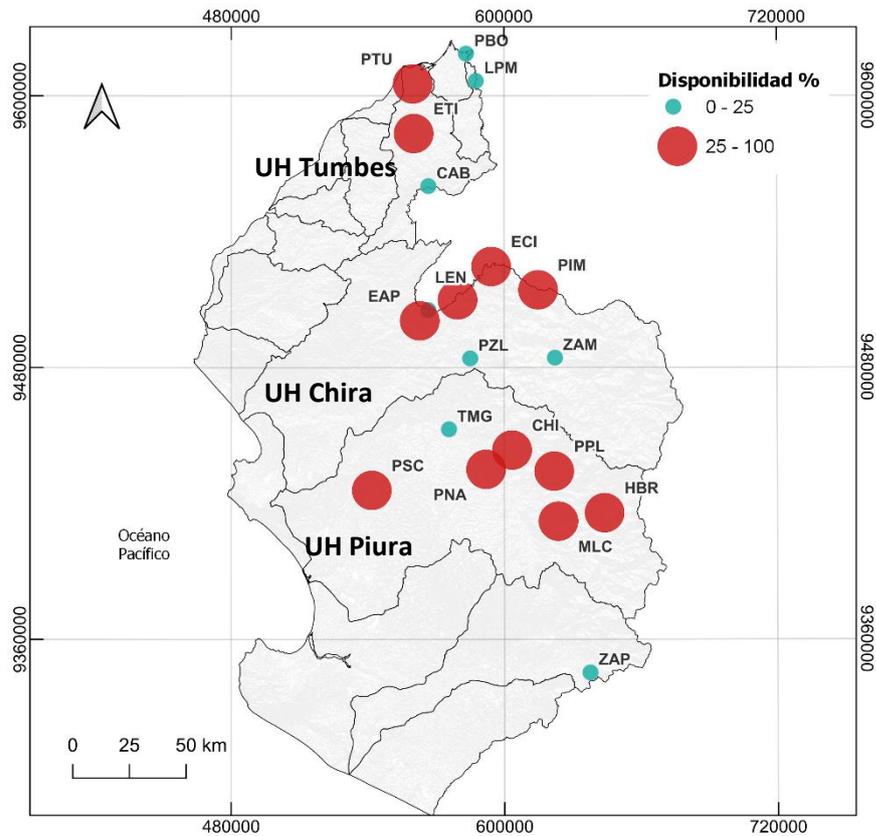


Figura 18. Distribución espacial de cobertura de datos de estaciones hidrométricas en las Unidades Hidrográficas (UH).

3.2.2. Información hidrológica simulada

La información sobre los caudales medios diarios simulados se obtuvo del producto PISCO_HyD_ARNOVIC v1.0 (Llauca et al., 2023), en formato NETCDF. La cobertura temporal del conjunto de datos abarca desde enero de 1981 hasta enero de 2023.

Para cada estación hidrométrica, se identificó el tramo de río cercano en la subcuenca correspondiente, utilizando el COMID establecido por el producto PISCO_HyD_ARNOVIC (Ver **Figura 19**). Los caudales medios diarios simulados son corregidos mediante la aplicación del Mapeo de Cuantil Empírico (EQM) a nivel estacional; agrupando los datos verano (diciembre, enero y febrero), otoño (marzo, abril y mayo), invierno (julio, agosto y setiembre) y primavera (setiembre, octubre y noviembre); para reducir el sesgo. En este proceso, se han ajustado los valores simulados para que se alineen más estrechamente con los datos observados, proporcionando una representación más precisa de las condiciones hidrológicas. La aplicación del EQM permite corregir las discrepancias entre los caudales simulados

y los datos observados, mejorando la calidad y la utilidad de la información para el análisis de frecuencia.

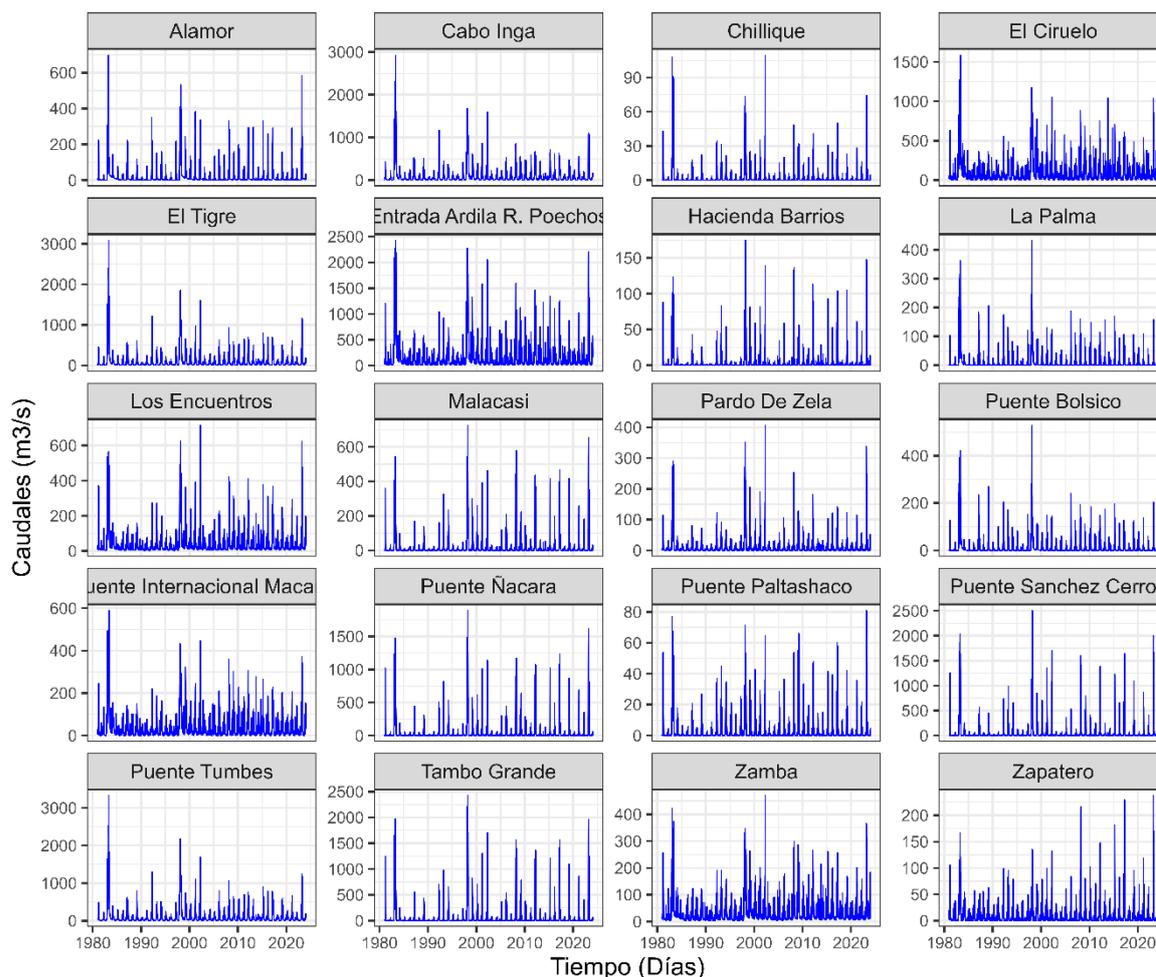


Figura 19. Series de caudales medios diarios simulados del período 1981-2023, obtenidos de PISCO_HyD_ARNOVIC sin corregir con EQM

3.2.3. Información para validación

Se recopilaron los umbrales de alerta de inundación de las estaciones disponibles en la plataforma PHISIS del SENAMHI (para más detalles, ver **Capítulo II:** Umbrales de alerta de inundación). Estos umbrales se obtuvieron con el fin de validar los umbrales de alerta de inundación calculados mediante el enfoque POT.

En la **Tabla 6** se presentan los umbrales de alerta de inundación para cada estación, junto con su correspondiente período de retorno (TR).

Tabla 6. Umbral de alerta de inundación recopilados de la plataforma PHISIS - SENAMHI en las estaciones hidrométricas de PTU, ETI, ECI, CAB, ALM y PNA

TR	PTU	ETI	ECI	CAB	ALM	PNA
2.33	600	600	600	600	205	647
5	800	800	800	800	310	830
10	1000	1000	1000	1000	423	1100

3.2.4. Información geográfica espacial

El Modelo Digital de Elevación (DEM) utilizado para la delimitación del área de estudio se obtuvo de la Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) con una resolución de 30 metros. Este DEM ofrece una representación tridimensional detallada de la superficie terrestre a nivel nacional, cubriendo todo Perú. Sin embargo, para el análisis específico de esta investigación, se descargó únicamente el DEM correspondiente al área de estudio.

3.3. Materiales y equipos

Para el desarrollo de la presente tesis, se utilizaron los materiales y equipos descritos en la **Tabla 7** y **8** correspondientemente.

Tabla 7. Materiales

Materiales	Descripción
Cuaderno de apuntes	Para elaboración de metodología y notas de informaciones obtenidas por web y libros.

Tabla 8. Equipos

Equipo	Detalle
Laptop Gammer Legion	Procesador Intel Core i7 de 11va generación, memoria RAM 16GB +16GB, tarjeta gráfica NVIDIA GeForce RTX 3070 8GB y Disco SSD 1Tera
Disco duro portátil	Almacenamiento 1TB

3.4. Programas

El manejo de la información obtenida para su análisis se realizó mediante los siguientes programas detallados en la **Tabla 9**.

Tabla 9 Programas utilizados para la realización de la tesis

Software	Descripción
Lenguaje de Programación R x64 v4.1.1	Para procesar el modelamiento hidrológico ARNOVIC mediante el paquete airGR y realizar el análisis estadístico.
R Studio	Para evaluar la estacionalidad de estas variables, mediante un script.
Quantum GIS x64 v3.16.13	Para la delimitación de la cuenca y elaboración temática de los mapas para la presentación en la investigación.
Grass (Geographic Resources Analysis Support System)	Herramientas de geoprocreso para datos vectoriales.
Panoply	Como visor de datos netCDF
MS Office	Para la edición, almacenamiento y transmisión de información de redacción.
Sistema operativo Windows 10	Para la administración de archivos y la ejecución de aplicaciones.

3.5. Métodos

El proceso metodológico seguido para determinar los umbrales de alerta de inundaciones en la costa norte peruana se detalla en la **Figura 20**. Este flujograma proporciona una visión clara de cada etapa del proceso, desde la recopilación y procesamiento de datos hasta la validación de los umbrales utilizando plataformas especializadas como PHISIS de SENAMHI, asegurando la robustez y precisión en la estimación de umbrales críticos para la gestión del riesgo de inundaciones.

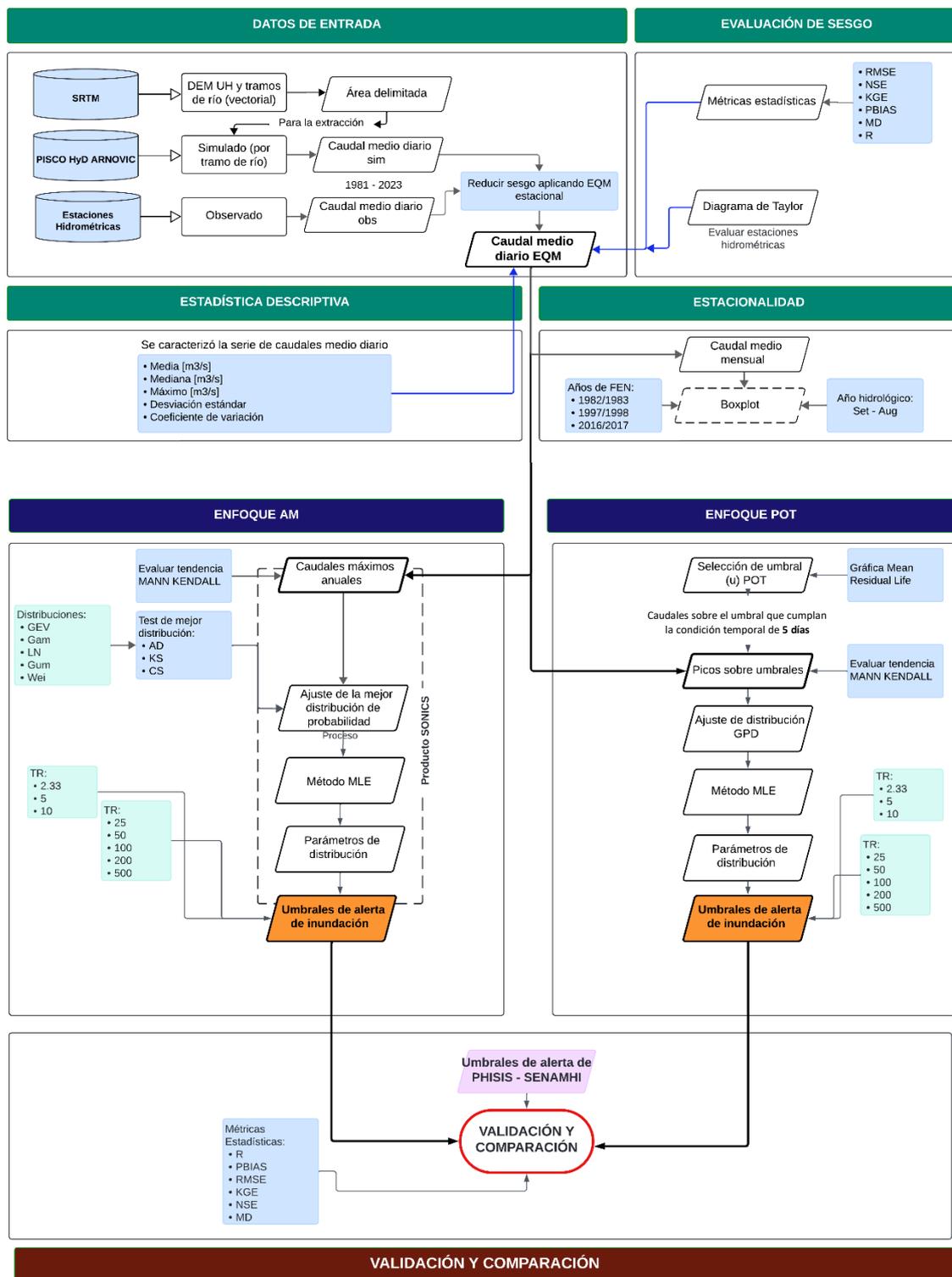


Figura 20. Flujograma de metodología para determinar umbrales de alerta de inundaciones en la costa norte peruana

Nota: Las métricas estadísticas son: Raíz de Error Cuadrático Medio (RMSE), Eficiencia de Nash – Sutcliffe (NSE), Eficiencia de Kling – Gupta (KGE), Índice de Sesgo Porcentual (PBIAS), Coeficiente de Correlación de Pearson (R) y Índice de ajuste modificado (MD). Distribuciones: Gumbel (Gum), L-Normal (LN), Weibull (Wei), Generalizada de Valores Extremos (GEV), Gamma (Gam) y Generalizada de Pareto (GPD). Test para seleccionar mejor distribución: Kolmogorov-Smirnov (KS) test, Chi-square test (CS) test y Anderson-Darling (AD) test. Método de ajuste: Método de máxima verosimilitud (MLE). Periodo de retorno (TR).

3.5.1. Evaluación de sesgo de caudales medios diarios

a) Métricas estadísticas

Se generó un gráfico con el fin de facilitar la comparación visual entre la serie de caudales observados y simulados. Este gráfico permite observar de manera clara cómo la serie de caudales medios diarios, corregida mediante el método de Mapeo de Cuantiles Empíricos (EQM) a nivel estacional, se ajusta con relación a los valores observados.

Se calcularon diversas métricas estadísticas para comparar los resultados con los datos observados. Estas métricas, detalladas en la **Tabla 10**, permiten una evaluación integral del sesgo entre los datos simulados corregidos con EQM y los datos observados de caudales.

Si bien el Coeficiente de Correlación de Pearson (R) es una medida valiosa para evaluar la relación entre las predicciones del modelo y las observaciones, su sensibilidad a valores extremos y su insensibilidad a ciertas diferencias entre las simulaciones y las observaciones hacen recomendable complementarlo con otras métricas más robustas, es fundamental utilizar, además R, la Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), el Índice de Ajuste Modificado (MD), la Eficiencia de Kling-Gupta (KGE), la Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE) y el Índice de Sesgo Porcentual (PBIAS) para lograr una evaluación más completa y precisa del ajuste del modelo (D. N. Moriasi et al., 2007; Legates y McCabe, 1999; Willmott y Matsuura, 2005)

Tabla 10 Métricas estadísticas para evaluar el sesgo del modelo simulado

Métricas Estadísticas	Función	Ecuación	Min, Máx, Óptimo
Coeficiente de Correlación de Pearson (R)	Mide la relación lineal entre los caudales observados y simulados	$R = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \overline{Q_{obs}}) x (Q_{sim,i} - \overline{Q_{sim}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \overline{Q_{obs}})^2 x \sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - \overline{Q_{sim}})^2}}$	$-\infty; +\infty; 1$
Raíz de Error Cuadrático Medio (RMSE)	Indica la magnitud promedio del error.	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Q_{sim,i} - Q_{obs,i})^2}$	$\infty; +\infty; 0$
Eficiencia de Nash – Sutcliffe (NSE)	Mide la eficiencia del modelo en comparación con el simple promedio de los datos observados.	$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \overline{Q_{obs}})^2}$	$-\infty; 1; 1$
Eficiencia de Kling – Gupta (KGE)	Evalúa la precisión de los modelos hidrológicos en la reproducción de las características de caudales observados	$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (c - 1)^2 + (\beta - 1)^2}$	$-\infty; 1; 1$
Índice de Sesgo Porcentual (PBIAS)	Mide la tendencia del modelo a sobreestimar o subestimar los datos observados.	$PBIAS (\%) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - Q_{obs,i}) x 100}{\sum_{i=1}^n Q_{obs,i}}$	$-\infty; +\infty; 0$

Continuación

Índice de ajuste modificado (MD)	Evalúa la calidad del ajuste del modelo teniendo en cuenta ciertos ajustes o modificaciones	$MD = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \overline{Q_{obs}} + Q_{sim,i} - \overline{Q_{obs}})^2}$	0; 1; 1
----------------------------------	---	--	---------

Fuente: D. N. Moriasi et al. (2007), Legates y McCabe (1999), Willmott y Matsuura (2005).

D. N. Moriasi et al. (2007), Legates y McCabe (1999), y Willmott y Matsuura (2005) proporcionan directrices sobre los valores aceptables para evaluar el sesgo entre modelos de simulación y observados mediante diversas métricas estadísticas. Los valores recomendados para cada métrica se muestran en la **Tabla 11**.

Tabla 11. Valores aceptables para la evaluación del sesgo de modelos de simulación

Métrica estadística	Rango de valores aceptables
R	0.7 a 1: Buena correlación 0.5 a 0.7: Correlación moderada <0.5: Baja correlación
RMSE	Valores ideales: Cuanto más bajo, mejor
NSE	1: Ajuste perfecto 0 a 1: Buen ajuste <0: Bajo ajuste
KGE	0.5 a 1: Buena concordancia 0 a 0.5: Concordancia moderada <0: Baja concordancia
PBIAS	±10%: Bajo sesgo (buena) ±20%: Sesgo moderado > ±20%: Alto sesgo (sobrestimación y subestimación)
MD	0.5 a 1: Buen ajuste modificado 0 a 0.5: Ajuste moderado <0: Ajuste deficiente

b) Diagrama de Taylor

Se empleó el Diagrama de Taylor, sugerido por Taylor (2001), para evaluar el desempeño de las estaciones hidrométricas, utilizando esta herramienta gráfica para ofrecer una visión comprensiva de cómo los modelos simulados se comparan con los datos observados. Este diagrama visualiza tres métricas fundamentales: la desviación estándar, la correlación R-Pearson y el sesgo.

El diagrama también incluye un punto de referencia que representa los datos observados, lo que facilita la comparación y la evaluación de la precisión del modelo en relación con estos datos.

Una buena R-Pearson correlación se refleja en un punto cercano al ángulo de 0° , lo que indica una alta capacidad del modelo para capturar la relación lineal entre las simulaciones y las observaciones. Esto sugiere que el modelo tiene una fuerte correlación con los datos observados.

En cuanto a la desviación estándar, la distancia del punto desde el centro del círculo muestra cómo la desviación estándar del modelo se compara con la de los datos observados. Un valor de desviación estándar normalizada cerca de 1 sugiere que el modelo reproduce la variabilidad observada de manera adecuada. Valores inferiores a 1 indican que el modelo puede estar subestimando la variabilidad, mientras que valores mayores a 1 podrían sugerir una sobreestimación.

El sesgo se evalúa observando la proximidad del punto al punto de referencia. Un sesgo bajo, con el punto cerca del centro del círculo, indica que la media de los datos simulados está cercana a la media de los datos observados. En contraste, un sesgo alto, con el punto alejado del centro, muestra una mayor discrepancia entre las medias de las simulaciones y las observaciones.

3.5.2. Estadística descriptiva

En el análisis de caudales diarios simulados de cada estación hidrométrica, cada medida de estadística descriptiva desempeña un papel crucial. La media aritmética ofrece una estimación del caudal promedio, lo que permite entender el caudal típico. La mediana proporciona una visión clara del caudal central, sin verse afectada por valores extremos. El valor máximo es esencial para detectar los eventos de caudal extremo que pueden impactar a la gestión de recursos hídricos. La desviación

estándar ayuda a evaluar la consistencia de los datos y a identificar variaciones significativas alrededor de la media. Finalmente, el coeficiente de variación permite comparar la variabilidad entre diferentes conjuntos de datos, estandarizando la variabilidad en relación con la magnitud promedio del caudal.

La **Tabla 12** presenta las métricas utilizadas para la caracterización detallada de los datos.

Tabla 12. Métricas descriptivas para el análisis de la serie de caudales medio diarios simulados

Métrica	Descripción	Fórmula
Media [m ³ /s]	Valor promedio de los caudales medio diarios registrados.	$\mu = \frac{\sum X_i}{n}$ <p>X_i es valor individual de caudal n es número total de observaciones</p>
Mediana [m ³ /s]	Valor central de los caudales, sin influencia de valores extremos.	-
Máximo [m ³ /s]	Valor máximo registrado de los caudales medios diarios.	-
Desviación Estándar [m ³ /s]	Medida de dispersión de los caudales medio diarios en torno a la media.	$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \mu)^2}{n}}$
Coeficiente de Variación [%]	Relación entre la desviación estándar y la media, indicando variabilidad relativa.	$CV = \left(\frac{\sigma}{\mu}\right) * 100$

Nota: Coeficiente de Variación: Un valor muy alto (>100%) indica que la Desviación Estándar es mayor que la media, lo que sugiere una alta variabilidad. Esto puede ocurrir en regiones con eventos hidrológicos extremos, según Fenta et al. (2017).

3.5.3. Estacionalidad de serie de caudales

Se llevó a cabo un análisis detallado de la variación mensual de los datos de caudales en todas las estaciones hidrométricas mediante la utilización de valores estandarizados. Para estandarizar los datos de caudales ($Q_{\text{estándar}}$), se calcularon primero los valores medios mensuales de caudales para cada mes, utilizando los datos de todos los años de la serie de caudales (1981-2020) según años hidrológicos (setiembre - agosto). Este valor medio mensual se utilizó para calcular la media (μ) y la desviación estándar (σ) de los caudales para cada mes, utilizando la fórmula mostrada en la **Tabla 13**.

Tabla 13. Estandarización de Caudales medios mensuales: Fórmulas e Interpretación de Valores $Q_{\text{estándar}}$

Proceso estadístico	Fórmula	Valores de $Q_{\text{estándar}}$	Interpretación
Estandarización ($Q_{\text{estándar}}$)	$Q_{\text{estándar}} = \frac{x - \mu}{\sigma}$	$Z > 2$ Alto	Caudales mayores que el promedio.
		$2 > Z > -1$ Medio	Caudales cercanos al promedio.
		$-1 > Z$ Bajo	Caudales menores que el promedio.

Fuente: Cody y Smith (1987)

La estandarización de los datos de caudales facilita la observación de su comportamiento en relación con la variabilidad histórica, permitiendo una evaluación más precisa de los patrones estacionales y las variaciones a lo largo del año.

Para complementar el análisis, se graficaron los valores medios anuales de caudales en cada estación, lo que permitió observar la variabilidad a través de los años y detectar posibles tendencias o cambios a lo largo del tiempo.

Adicionalmente, se evaluó la estacionalidad mediante la utilización de un diagrama de caja (boxplot) para los caudales medios mensuales. Este diagrama ofrece una representación visual detallada de la distribución de los datos, destacando tanto la variabilidad. En el diagrama de caja, se identifican los valores atípicos o extremos mediante puntos que se encuentran fuera de los límites de los bigotes (borde superior

de las cajas), permitiendo así una evaluación clara de la dispersión en la serie de caudales.

Comprender la estacionalidad de los caudales es fundamental para realizar un análisis de frecuencia preciso, ya que permite identificar patrones recurrentes y anomalías asociadas a fenómenos climáticos extremos, contribuyendo a una mejor planificación y gestión de recursos hídricos.

3.5.4. Análisis de frecuencia

a) Enfoque máximo anual (AM)

Extracción de caudales máximos anuales

La serie de caudales medios diarios, correspondiente a los caudales simulados corregidos mediante el Método de Ajuste de Cuantiles Empíricos (EQM), se ha seleccionado con base en los años hidrológicos, que inician el 1 de septiembre y concluyen el 31 de agosto del año siguiente. En este análisis, el período abarca desde el 1 de septiembre de 1981 hasta el 31 de agosto de 2023.

Para optimizar la manipulación y el análisis de datos, se realiza un ajuste específico eliminando los días 29 de febrero en los años bisiestos, ya que estos días adicionales podrían introducir sesgos en la serie temporal. Tras este ajuste, se procede a extraer los caudales máximos anuales correspondientes a cada año del período analizado. Esta extracción da lugar a una nueva serie de 42 datos de caudales máximos anuales.

Evaluación de tendencia de caudales máximos anuales

Una tendencia en una serie temporal es un patrón general de cambio que ocurre a lo largo de un período prolongado. En los datos, como los caudales máximos anuales, la tendencia es uno de los elementos clave que se analiza, junto con la oscilación estacional (cambios regulares durante el año). Mientras que la oscilación muestra variaciones estacionales, la tendencia revela la dirección general en la que los datos están evolucionando con el tiempo.

Para evaluar la tendencia en la serie de caudales máximos anuales, se eligió un método no paramétrico, el test de Mann-Kendall, para analizar las tendencias en la serie. Este enfoque, según Hesarkazzazi et al. (2021), es adecuado cuando los datos no se ajustan a una distribución normal o cuando se tienen valores atípicos. Al no

depender de supuestos sobre la forma de los datos, el test de Mann-Kendall puede detectar tendencias generales de manera más robusta en presencia de variaciones.

Para llevar a cabo esta evaluación, se aplicó el test de Mann-Kendall, el cual utiliza el p-valor (una medida estadística que permite evaluar la evidencia en contra de una hipótesis nula) para determinar la significancia de la tendencia observada en los datos. En este análisis, se adoptó un nivel de confianza del 95%, lo que implica que buscamos detectar tendencias con un alto grado de certeza. Específicamente, estamos tratando de asegurarnos de que cualquier tendencia identificada en los caudales no sea simplemente producto de la variabilidad aleatoria, sino que represente un patrón real en la serie temporal.

En términos prácticos, si el **p-valor** obtenido del test de Mann-Kendall es menor al umbral del 5% (o 0.05), se considera que existe una tendencia significativa en los datos de caudales máximos anuales. Por el contrario, si el p-valor es mayor a este umbral, se interpreta que no hay suficiente evidencia para afirmar que existe una tendencia en los datos, lo que sugiere que las variaciones observadas podrían deberse a la variabilidad aleatoria.

Una vez que se ha identificado una tendencia significativa mediante el test de Mann-Kendall, el siguiente paso es cuantificar la magnitud y la dirección de esa tendencia. Para ello, se utiliza el método de Sen (Sen, 1968), que proporciona una estimación robusta de la pendiente de la tendencia.

Si la pendiente calculada por el método de Sen es positiva, esto indica que la tendencia es creciente, lo que significa que los valores de la variable analizada, como los caudales máximos anuales, han mostrado un aumento a lo largo del tiempo.

Por otro lado, si la pendiente es negativa, la tendencia es decreciente, lo que implica que los valores de la variable han disminuido a lo largo del tiempo. En el caso de los caudales máximos, una pendiente negativa indicaría que los valores máximos de caudal han disminuido con el paso de los años.

Cuando no hay una tendencia significativa, se espera que la pendiente Sen se acerque a cero, lo que refuerza la ausencia de una dirección clara en los datos a lo largo del tiempo.

La **Tabla 14** presenta las ecuaciones fundamentales utilizadas en los métodos no paramétricos para la evaluación de tendencias.

Tabla 14 Ecuaciones para la evaluación de tendencias utilizando métodos No Paramétricos: Test de Mann-Kendall y Método de Sen.

Test	Descripción	Ecuación
Test de Mann-Kendall	Determina la tendencia en la serie temporal comparando pares de datos.	$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i)$ $Z = \frac{S - 1}{\sqrt{\text{var}(S)}}$
Pendiente de Sen	Estima la pendiente de la tendencia, indicando si es creciente ($\beta > 0$) o decreciente ($\beta < 0$).	$\beta = \text{mediana} \left(\frac{x_j - x_i}{j - i} \right)$

Fuente: Kendall (1975); Mann (1945); Sen (1968)

Donde, S es la suma de los signos entre las diferencias de los pares de los datos, n es el número de datos en la serie temporal, x_i y x_j son los valores observados en los tiempos i y j , $\text{sgn}(x_j - x_i)$ función signo, Z es el valor que mide la significancia de la tendencia.

Ajuste de distribuciones de probabilidad en el enfoque AM

Se llevó a cabo un ajuste exhaustivo de la serie de caudales máximos anuales a diversas distribuciones de probabilidad, con el objetivo de identificar la distribución que mejor represente los datos extremos. Las distribuciones evaluadas están detalladas en la **Tabla 15**. Este ajuste se realizó utilizando el método de Estimación de Máxima Verosimilitud (MLE), este método es ampliamente reconocido por su eficacia en la estimación de parámetros para eventos extremos, tal como se detalla en la literatura revisada en el **Capítulo II**.

Este proceso se realizó siguiendo las directrices de Tiwari et al., (2017) para el enfoque de series Máximos Anuales (AM), que proporciona un marco robusto para la modelización de eventos extremos. La selección y ajuste de distribuciones son fundamentales para una correcta evaluación de los caudales máximos y para la

predicción precisa de fenómenos extremos en la serie temporal. Además, el ajuste a múltiples distribuciones facilita la comparación de la capacidad predictiva de cada modelo, asegurando que se elija el más adecuado para el análisis de los caudales máximos anuales.

Tabla 15 Distribuciones de probabilidad

Distribuciones	Ecuación
Gumbel (Gum)	$f(x; \mu; \beta) = \frac{1}{\beta} \exp\left(-\frac{x-\mu}{\beta}\right) \exp\left(-\exp\left(-\frac{x-\mu}{\beta}\right)\right)$ <p><i>x es la variable aleatoria, μ es el parámetro de localización, β es el parámetro de escala.</i></p>
L-Normal (LN)	$f(x; \mu; \sigma) = \frac{1}{x \cdot \sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln(x) - \mu)^2}{2\sigma^2}\right)$ <p><i>μ es la media de la distribución, σ es la desviación estándar de la distribución logarítmica normal.</i></p>
Weibull (Wei)	$f(x; \mu; \beta) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta-1} \exp\left(-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^\beta\right)$ <p><i>es el parámetro de forma α es el parámetro de escala.</i></p>
Generalizada de Valores Extremos (GEV)	$f(x; \mu; \sigma; \xi) = \frac{1}{\sigma} \left(1 + \xi \frac{x-\mu}{\sigma}\right)^{-1/(\xi-1)} \exp\left[-\left(1 + \xi \frac{x-\mu}{\sigma}\right)^{-\frac{1}{\xi}}\right]$ <p><i>ξ es el parámetro de forma σ es el parámetro de escala, μ es el parámetro de localización.</i></p>
Gamma (Gam)	$f(x \alpha, \beta) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}}$ <p><i>x es la variable, α es el parámetro de forma, β es el parámetro de escala y $\Gamma(\alpha)$ función gamma</i></p>

Fuente: Tiwari et al., (2017)

Selección de la mejor distribución de probabilidad

Para determinar la distribución de probabilidad más adecuada para cada estación, se aplicaron diversos tests estadísticos, los cuales están detallados en la **Tabla 16**, siguiendo la metodología establecida por Hailu y Takala (2023). Cada test fue utilizado para evaluar qué distribución se ajustaba mejor a los datos de caudales medios diarios simulados en cada estación.

Se seleccionó la distribución que mostró el mejor ajuste en cada test, lo cual se determinó en función del valor más alto obtenido en el test correspondiente. En el caso del test de Kolmogórov-Smirnov (KS), la distribución con el mayor valor del test

fue considerada la mejor. De manera similar, para el test Chi-Cuadrado (CS) y el test de Anderson-Darling (AD), la distribución con el valor más alto en cada uno de estos tests fue seleccionada como la más adecuada, considerada con alto rango (Rank).

En la tabla se presentan las distribuciones seleccionadas para cada estación junto con el valor correspondiente de cada test, indicado entre paréntesis. Además, se elaboró un Porcentaje del mejor Ranking (Highest Rank in %) que clasifica las distribuciones de probabilidad según la frecuencia con la que fueron consideradas la mejor opción en los tests aplicados a todas las estaciones. Este Highest Rank se calculó como el porcentaje de veces que una distribución específica fue identificada como la mejor en comparación con todas las estaciones y tests. La distribución con el mayor porcentaje de mejores resultados se consideró la distribución globalmente más adecuada.

Tabla 16 Métricas estadísticas para la selección de la mejor distribución de probabilidad en el enfoque AM

Test	Ecuación
Kolmogorov-Smirnov (KS) test	$KS = \sum_{i=1}^k \left[\frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \right]$
Chi-square test (CS) test	$CS = \max Fx(x) - fx(x) $
Anderson-Darling (AD) test	$AD = -n - \frac{1}{n} \sum_i^n (2i - 1) [\ln(F(X_i)) + \ln(1 - F(X_{n-i+1}))]$

Fuente: Hailu y Takala (2023)

Después de determinar la mejor distribución de probabilidad global basada en el ranking de las distribuciones evaluadas en todas las estaciones, se procedió a representar visualmente esta distribución para facilitar su comparación con los datos empíricos. La distribución seleccionada, que fue identificada como la más adecuada en función de los resultados de los tests estadísticos, se comparó con los datos de caudales máximos anuales a través de dos tipos de representaciones gráficas.

Primero, se utilizó un gráfico de cuantiles-cuantiles (QQ plot) para evaluar la correspondencia entre la distribución modelo y la distribución empírica de los caudales máximos anuales. El QQ plot permite visualizar cómo se ajusta la

distribución modelo a los datos observados comparando los cuantiles de ambas distribuciones. En este gráfico, una alineación cercana a la línea diagonal sugiere un buen ajuste entre la distribución modelo y los datos empíricos.

En segundo lugar, se empleó una gráfica de densidad para ilustrar la forma de la distribución de los caudales máximos anuales en comparación con la densidad de la distribución modelo. Esta representación ayuda a observar visualmente cómo la distribución modelo se alinea con la distribución empírica, permitiendo una evaluación directa de la similitud entre ambas.

Estas representaciones gráficas proporcionan una herramienta visual adicional para validar la elección de la mejor distribución global, al mostrar de manera clara y comparativa cómo el modelo seleccionado se ajusta a los datos observados de caudales máximos anuales.

Determinación de umbrales de alerta de inundación usando el enfoque AM

Para la determinación de los umbrales de eventos máximos, que corresponden a los caudales máximos anuales, se aplicó el ajuste de la mejor distribución de probabilidad utilizando el método de máxima verosimilitud (MLE).

Se consideraron diversos períodos de retorno para la determinación de los umbrales de alerta de inundación de caudales máximos anuales. Se establecieron umbrales para los períodos de retorno de 2.33, 5 y 10 años, en concordancia con el sistema de alerta para inundaciones descrito en el **Capítulo II**. Estos períodos de retorno son cruciales para la identificación temprana de eventos extremos y la gestión de riesgos asociados.

Además, se incorporaron períodos de retorno extendidos, como 25, 50, 100, 200 y 500 años, según Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2012). Estos períodos de retorno son fundamentales para el diseño de caudales en obras hidráulicas, ya que garantizan que las infraestructuras puedan manejar eventos extremos.

b) Enfoque picos sobre umbrales (POT)

Selección de umbral (u) POT

Para seleccionar el umbral óptimo en el enfoque de Picos sobre Umbrales (POT), se utiliza la gráfica de vida residual media (Mean Residual Life Plot, MRL), siguiendo las recomendaciones de Pan y Rahman (2021). Esta gráfica es una herramienta clave que muestra la relación entre los posibles umbrales y los valores promedio de los excesos que superan dichos umbrales. En la gráfica MRL, se busca identificar el umbral en la región donde la relación entre el umbral y los excesos medios sigue una tendencia aproximadamente lineal.

El proceso de selección del umbral (u) implica observar la gráfica MRL y elegir el umbral justo antes de que se produzcan desviaciones significativas de la linealidad. Este enfoque asegura que el umbral seleccionado sea el más adecuado para capturar el comportamiento de los eventos extremos de manera precisa y representativa, optimizando así la modelización de fenómenos extremos.

Excedencia

La excedencia se calcula con $x_i - u$, donde x_i son los valores de la serie de caudales medio diarios (Caudales simulados ajustados con EQM) y u es el umbral POT predefinido. Esta serie ha sido ajustada para abarcar los años hidrológicos desde el 1 de septiembre de 1981 hasta el 31 de agosto de 2023, excluyendo los días 29 de febrero en los años bisiestos para asegurar consistencia en los datos.

En el análisis de la **independencia entre eventos extremos**, según lo discutido en el **capítulo II**, se considera que un evento es independiente si está separado de otros eventos extremos por al menos 5 días. Por lo tanto, si se identifican dos o más eventos extremos dentro de un intervalo de 5 días, solo se tomará en cuenta el evento con el valor máximo.

Para la extraer de excesos, se ha tenido en cuenta la condición temporal (agrupar los valores de caudales cada 5 días). Los excesos se agrupan en clústeres (elementos agrupados en función de ciertas condiciones) de excedencias según un umbral (u) y una condición temporal diaria. En este contexto, un clúster de excedencias se define como un grupo de observaciones que superan el umbral dentro de una condición

temporal específica. La independencia entre eventos se establece considerando un intervalo de 5 días; es decir, si se detectan múltiples eventos extremos en un período de 5 días, solo se conserva el evento con el valor máximo.

Evaluación de tendencia en excedencias del enfoque POT

La evaluación de la tendencia en la serie de excedencias, empleando el enfoque de Picos sobre Umbrales (POT), seguirá una metodología similar a la utilizada en el análisis de caudales máximos anuales con el enfoque de Máximos Anuales (AM). Se aplicarán métodos no paramétricos robustos para identificar y cuantificar las tendencias en los datos de excedencia, siguiendo el mismo marco metodológico.

Como en el enfoque AM, se utilizará el test de Mann-Kendall para determinar la existencia y significancia de la tendencia en la serie de excedencias. Este test es adecuado para detectar tendencias en datos que no se ajustan a distribuciones normales o que contienen valores atípicos, proporcionando una evaluación robusta sin depender de suposiciones sobre la forma de los datos (Hesarkazzazi et al., 2021). El p-valor del test de Mann-Kendall se empleará para evaluar la significancia de las tendencias, con un nivel de confianza del 95% para asegurar que las tendencias observadas no sean atribuibles a la variabilidad aleatoria.

Para estimar la magnitud y dirección de la tendencia en las excedencias, se utilizará el método de la pendiente de Sen, que proporcionará una estimación robusta de la pendiente de la tendencia. La pendiente ayudará a determinar si la tendencia es creciente o decreciente.

La **Tabla 14** presenta las ecuaciones utilizadas en los métodos no paramétricos para la evaluación de tendencias, incluyendo tanto el test de Mann-Kendall como el método de Sen. Esta tabla servirá como referencia para los cálculos y la interpretación de los resultados en el análisis de tendencias de las excedencias.

Ajuste de probabilidad de distribución en el enfoque POT

Con los datos de excedencia, se seleccionó la Distribución de Pareto Generalizada (GPD) para el ajuste, conforme a las recomendaciones de la literatura revisada en el **Capítulo II**, Sánchez (2008) reafirma esta elección como la más apropiada para el análisis de eventos extremos en el enfoque POT. Para ajustar la GPD, se utilizó el método de Máxima Verosimilitud (MLE), que estima los parámetros del modelo de locación (μ), escala (σ) y forma (ξ) maximizando la probabilidad de observar los datos de excedencia dados estos parámetros. Este ajuste se realizó mediante la función 'fitgpd' del paquete POT en RStudio, especializada en la estimación precisa de modelos GPD.

La distribución GPD, que fue identificada como la más adecuada, se comparó con los datos de caudales de excedencia a través de cuatro tipos de representaciones gráficas.

Primero, se utilizó un gráfico de cuantiles-cuantiles (Q-Q plot) para evaluar la correspondencia entre la distribución modelo y la distribución empírica de los caudales de excedencia. El Q-Q plot permite visualizar cómo se ajusta la distribución GPD a los datos observados comparando los cuantiles de ambas distribuciones. En este gráfico, una alineación cercana a la línea diagonal sugiere un buen ajuste entre la distribución modelo y los datos empíricos.

En segundo lugar, se empleó una gráfica de densidad (Density plot) para ilustrar la forma de la distribución de caudales de excedencia en comparación con la densidad de la distribución GPD. Esta representación ayuda a observar visualmente cómo la distribución modelo se alinea con la distribución empírica, permitiendo una evaluación directa de la similitud entre ambas.

En tercer lugar, se empleó una gráfica de probabilidad (Probability plot) para comparar la distribución de los caudales de excedencia con la distribución de GPD. Esta herramienta permite visualizar cómo las probabilidades empíricas obtenidas de los datos observados se alinean con las probabilidades teóricas de la distribución GPD.

Y finalmente, gráfica de Nivel de retorno (Return Level) permite evaluar el caudal que se espera superar en un periodo de retorno específico. Al comparar estos niveles con

los datos reales, se puede verificar si la distribución de Pareto Generalizada (GPD) predice adecuadamente los eventos extremos, facilitando la interpretación de la frecuencia de caudales extremos y validando el modelo en términos del riesgo asociado a eventos de alto impacto.

Estas representaciones gráficas proporcionan una herramienta visual adicional para validar la distribución de GPD para el enfoque POT, al mostrar de manera clara y comparativa cómo el modelo seleccionado se ajusta a los datos observados de caudales máximos anuales.

Determinación de umbrales de alerta de inundación usando el enfoque POT

Para determinar los umbrales de alerta de inundación de los eventos máximos (caudales sobre umbral, excedencia), Se utilizaron períodos de retorno de 2.33, 5 y 10 años para los umbrales de alerta de inundación, así como períodos extendidos de 25, 50, 100, 200 y 500 años para el diseño de caudales. Estos períodos son fundamentales tanto para la evaluación de riesgos como para el diseño adecuado de infraestructuras hidráulicas, según la literatura recopilada.

Posteriormente, al igual que en la metodología del enfoque AM, se procedió a la representación gráfica de los resultados del ajuste de la GPD. Se mostraron gráficos de Q-Q Plot, densidad y probabilidad para visualizar y comparar la distribución ajustada con los datos empíricos de excedencia. Estas representaciones permiten una evaluación visual detallada de cómo se ajusta el modelo GPD a los datos de caudales excedentes y proporcionan una base sólida para validar la adecuación de la distribución en el contexto del enfoque Picos sobre Umbrales (POT).

3.5.5. Comparación entre los enfoques AM y POT

La comparación entre los umbrales de alerta de inundación obtenidos mediante el enfoque de Máximos Anuales (AM) y el enfoque de Picos Sobre Umbrales (POT) se llevó a cabo utilizando métricas de sesgo como PBIAS, RMSE y R. Estas métricas, en este caso, permiten evaluar la similitud entre los umbrales de caudales generados por ambos enfoques. Al analizar estos valores, se puede determinar el grado de coincidencia entre los umbrales de inundación derivados de AM y POT, proporcionando una visión clara sobre cómo se alinean los resultados de cada método. Esta comparación no se centra en cuál enfoque tiene un mejor rendimiento,

sino en la similitud de los umbrales de alerta de inundación obtenidos por cada método.

3.5.6. Validación de Umbrales de alerta de inundación

Se validaron los umbrales de alerta de inundación obtenidos mediante los enfoques de Picos sobre Umbrales (POT) y Caudales Máximos Anuales (AM) comparándolos con los umbrales proporcionados por la plataforma PHISIS del SENAMHI.

Luego, los umbrales calculados se compararon con los umbrales empíricos de inundación disponibles en la plataforma PHISIS. La validación consistió en evaluar la concordancia entre los umbrales obtenidos con los enfoques POT y AM y los umbrales establecidos por PHISIS, garantizando así la precisión de los umbrales de alerta propuestos. Las métricas estadísticas utilizadas para esta comparación están detalladas en la **Tabla 10**.

Esta comparación se centra en cuál enfoque tiene un mejor rendimiento.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se detallan los resultados obtenidos a partir de la aplicación de la metodología descrita en el **Capítulo III**, así como su interpretación y discusión en el contexto del estudio.

4.1. Resultados

4.1.1. Evaluación de sesgo de caudales medios diarios

En las **Figuras 21 y 22**, se puede observar una clara concordancia entre la serie de caudales observados (representados por la línea roja) y los caudales simulados (representados por la línea azul) a lo largo del tiempo en cada estación hidrométrica. Esta concordancia sugiere que el modelo de simulación ha capturado adecuadamente el comportamiento general de los caudales, lo que valida el enfoque utilizado para corregir los datos simulados. No obstante, se identifican algunas diferencias en los picos máximos de caudal, donde los valores simulados tienden a subestimar o sobrestimar los picos en comparación con los observados.

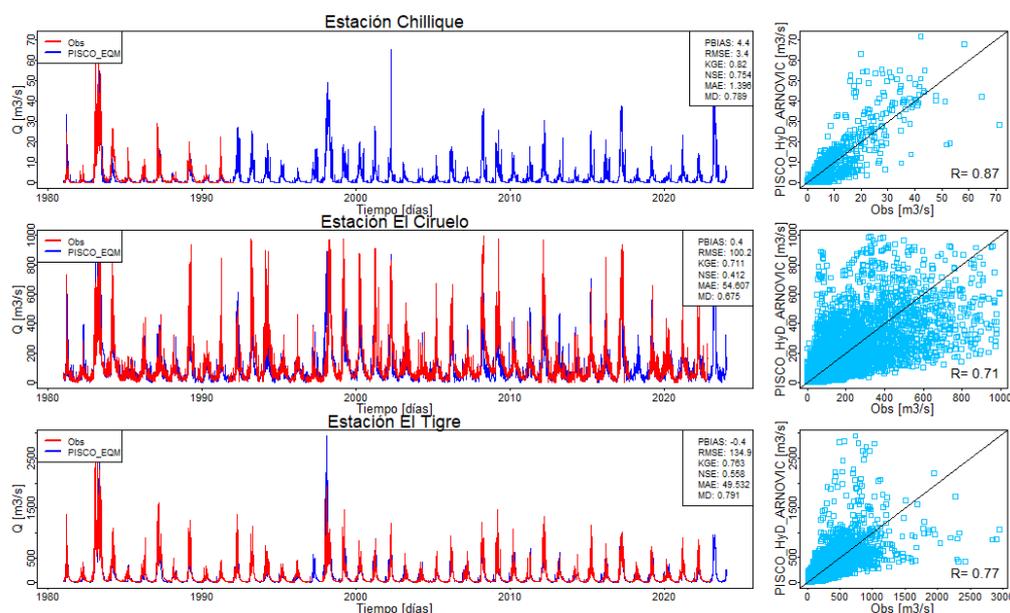


Figura 21. Comparación de caudales Observados y Simulados EQM de las Estaciones Hidrométricas CHI, ECI y ETI del periodo 1981-2023

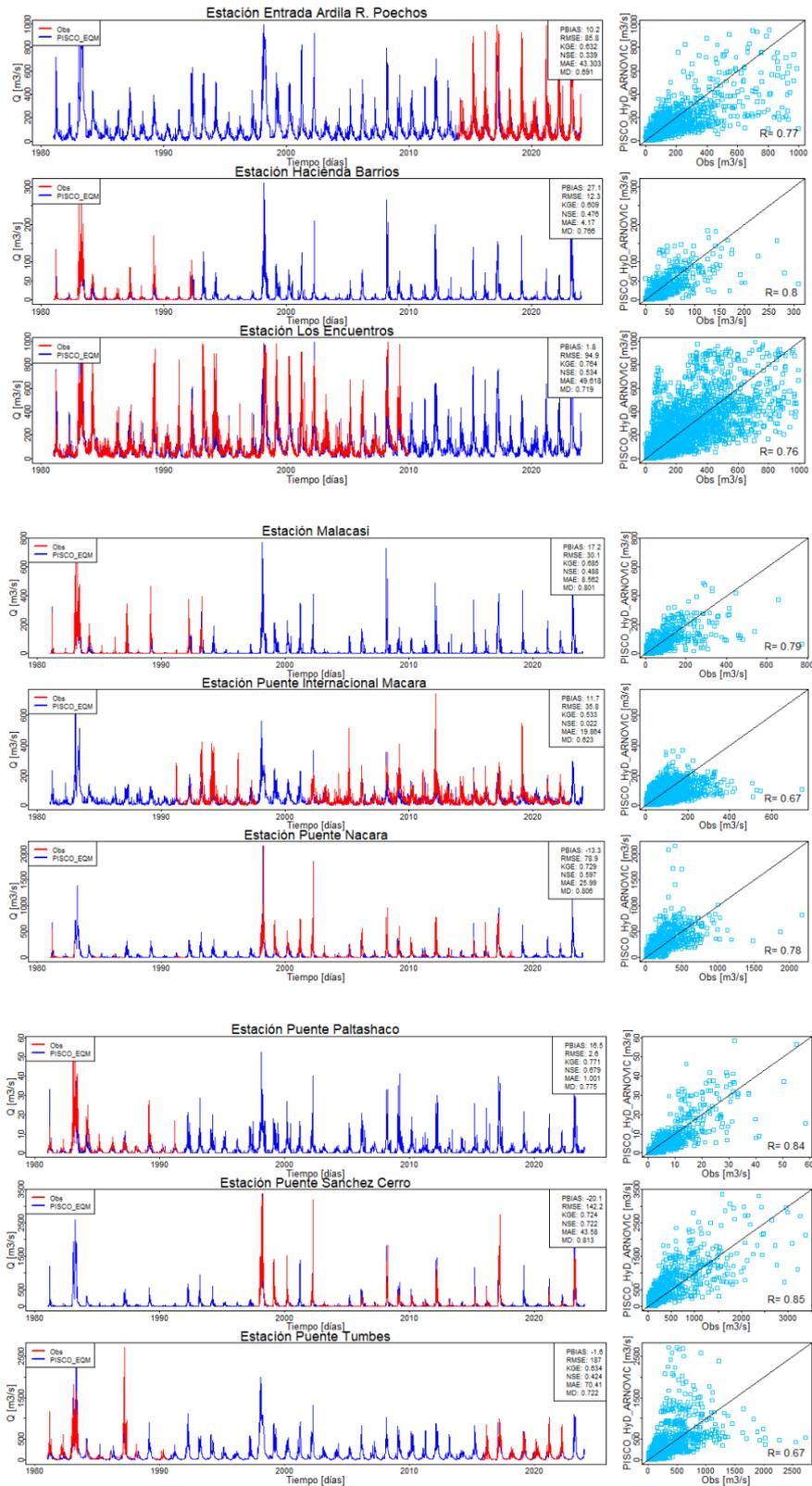


Figura 22. Comparación de caudales Observados y Simulados EQM de las Estaciones Hidrométricas EAP, HBR, LEN, MLC, PIM, PNA, PPL, PSC y PTU del periodo 1981-2023

La siguiente **Figura 23** muestra la distribución geográfica de las estaciones hidrométricas, permitiendo identificar patrones regionales en la métrica evaluada.

El análisis de PBIAS revela diferencias en la unidad hidrográfica de Piura. En esta unidad, una estación hidrométrica muestra una ligera subestimación, cercana al -20%, mientras, que otra presenta una ligera sobreestimación, apenas por encima del 20%. Estos resultados indican que, aunque algunas estaciones en Piura se encuentran cerca del umbral de aceptabilidad, otras se desvían más significativamente. Por otro lado, las unidades hidrográficas de Chira y Tumbes tienen valores dentro de los rangos de sesgo moderado y bajo, sugiriendo un desempeño más consistente y aceptable.

En términos de RMSE, las estaciones hidrométricas en la unidad hidrográfica de Piura presentan los valores más bajos, lo que indica que tiene el menor promedio de error en sus predicciones. La unidad hidrográfica de Chira muestra valores intermedios en comparación con las demás unidades, mientras que Tumbes exhibe los valores más altos. Esto sugiere que en Tumbes existen mayores discrepancias entre los datos observados y los datos simulados, lo que se traduce en un mayor promedio de error en las predicciones para esta unidad.

En términos de KGE, todas las estaciones hidrométricas de las tres unidades hidrográficas presentan valores aceptables, con una buena concordancia ($KGE > 0.5$). Sin embargo, las estaciones hidrométricas de la unidad hidrográfica de Piura destacan con los valores más altos.

En cuanto al NSE, todas las estaciones hidrométricas de las tres unidades hidrográficas presentan valores aceptables, indicando un buen ajuste ($0 < NSE < 1$). En particular, en la unidad hidrográfica de Piura, las estaciones PSC, CHI y PPL muestran los valores más altos, lo que sugiere que tienen el mejor ajuste.

En cuanto al MD, todas las estaciones hidrométricas de las tres unidades hidrográficas muestran valores aceptables, con buen ajuste modificado ($0.5 < MD < 1$), con las estaciones de Piura destacando por sus valores más altos.

El R-Pearson muestra valores aceptables en las estaciones hidrométricas de las tres unidades hidrográficas, con correlaciones que varían de moderadas a buenas (R-

Pearson > 0.5). La mayor correlación se observa en Piura, lo que sugiere una fuerte relación lineal en esta unidad.

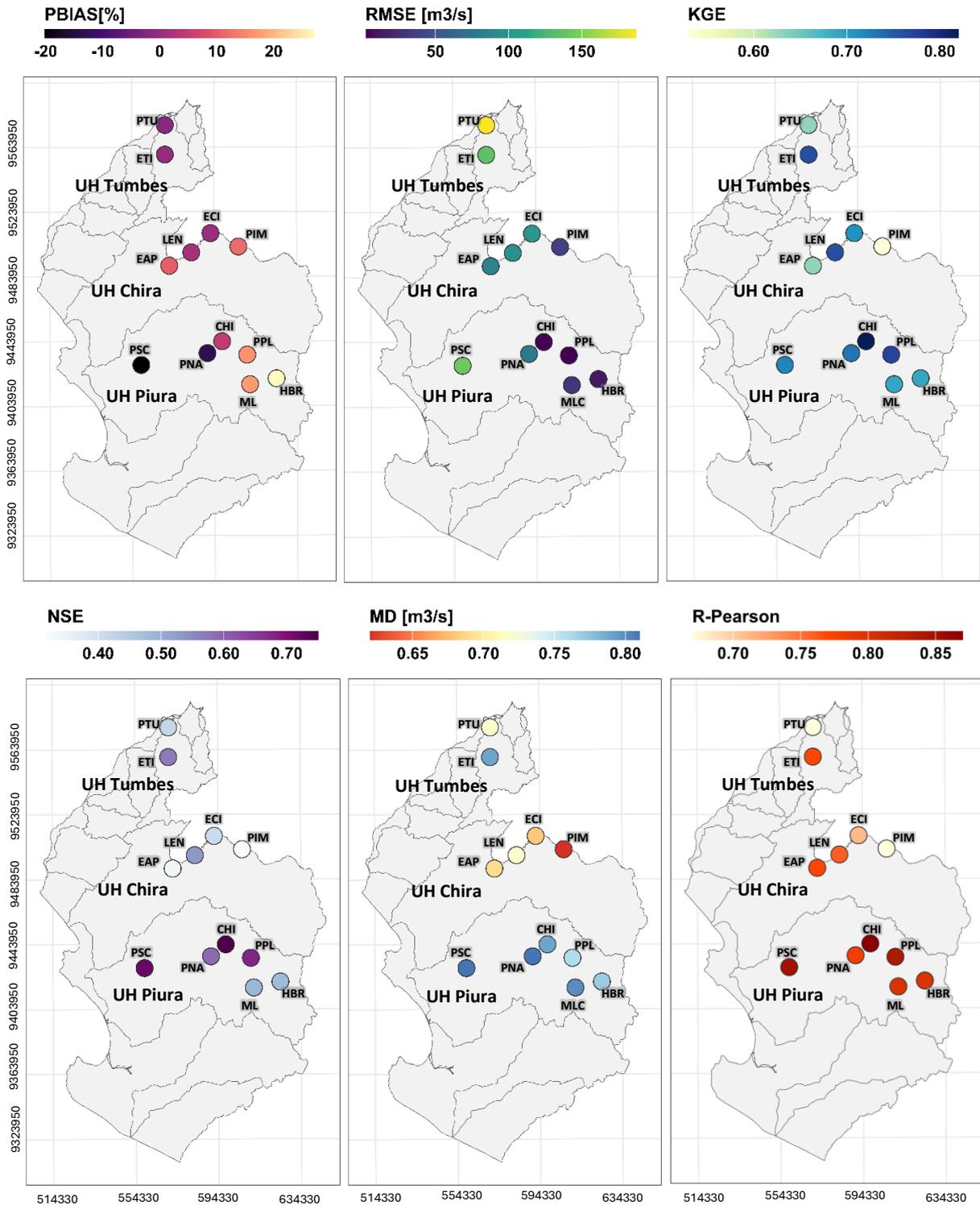


Figura 23. Distribución espacial de métricas estadísticas para la evaluación de sesgo en las estaciones hidrométricas estudiadas.

La **Tabla 17** resume los resultados de los valores de las métricas estadísticas para las estaciones hidrométricas estudiadas. En general, el modelo presenta un desempeño aceptable en todas las estaciones. Las estaciones ETI (con un KGE de 0.76, NSE de 0.57, y R-Pearson de 0.77), CHI (con un RMSE de 3.4 m³/s, KGE de 0.82, NSE de 0.75, y R-Pearson de 0.87), PNA (con un PBIAS de -13.3% y NSE de 0.59) y PPL (con un RMSE de 2.6 m³/s, KGE de 0.77, y R-Pearson de 0.84) destacan por sus métricas superiores en varias categorías, mostrando el mejor ajuste y desempeño global en términos de precisión y concordancia.

Tabla 17. Resultados de métricas estadísticas en las estaciones hidrométricas

UH	ESTACIONES	MÉTRICAS ESTADÍSTICAS					
		PBIAS [%]	RMSE [m ³ /s]	KGE	NSE	MD [m ³ /s]	R
Tumbes	PTU	-1.6	187.0	0.63	0.42	0.72	0.67
	ETI	-0.4	134.9	0.76	0.57	0.79	0.77
Chira	ECI	0.4	100.2	0.71	0.41	0.68	0.71
	PIM	11.7	35.8	0.53	0.32	0.62	0.67
	LEN	1.8	94.9	0.76	0.53	0.72	0.76
	EAP	10.2	85.8	0.63	0.34	0.69	0.77
Piura	CHI	4.4	3.4	0.82	0.75	0.79	0.87
	PNA	-13.3	78.9	0.73	0.59	0.81	0.78
	PPL	16.2	2.6	0.77	0.68	0.76	0.84
	PSC	-20.1	142.2	0.72	0.72	0.81	0.85
	HBR	27.1	12.3	0.69	0.48	0.77	0.80
	MLC	17.2	30.1	0.69	0.49	0.80	0.80

En el análisis del Diagrama de Taylor (ver **Figura 24**), para las estaciones hidrométricas se observa que la correlación R-Pearson varía entre 0.6 y 0.9, lo que indica una buena relación lineal entre las simulaciones y las observaciones.

Los valores de desviación estándar normalizada están entre 0.5 y 1, sugiriendo que el modelo ajusta razonablemente bien la variabilidad observada en los datos.

La proximidad de los puntos de las estaciones hidrométricas a la línea de referencia (que comienza en el círculo blanco) indica que el modelo tiene un sesgo bajo, lo que significa que la media de los datos simulados es bastante cercana a la media de los datos observados, señalando una buena precisión en términos de las estimaciones centrales del modelo.

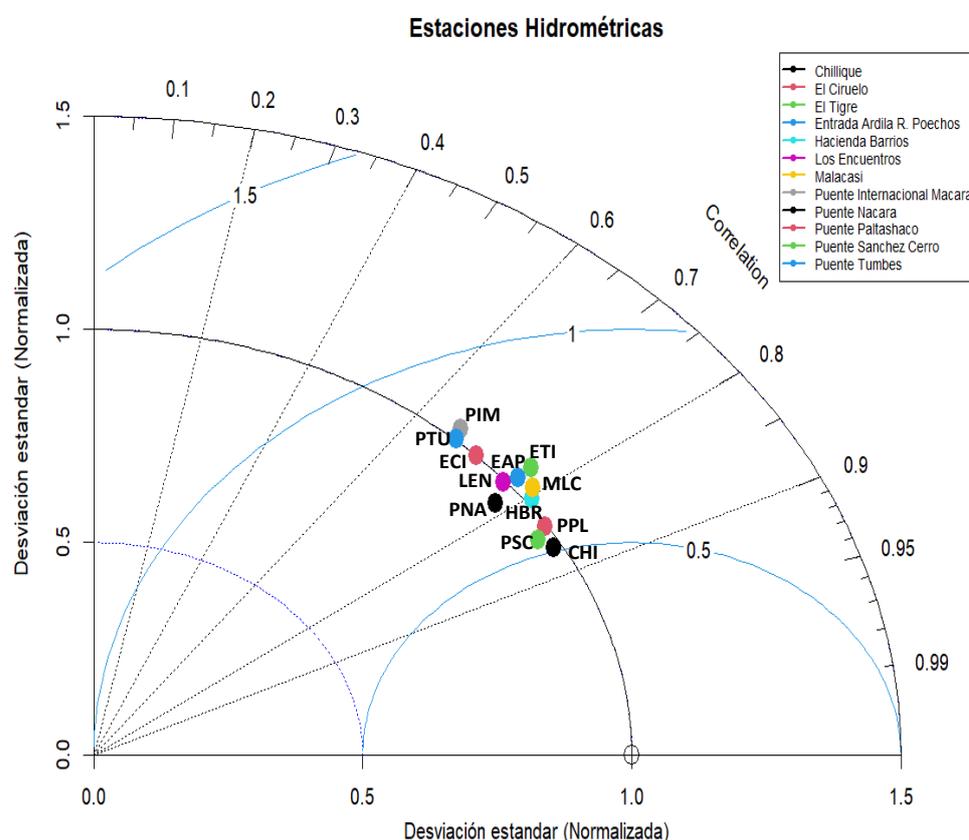


Figura 24. Diagrama de Taylor para evaluar el desempeño de los datos simulados en comparación con los datos observados en las estaciones hidrométricas

4.1.2. Estadística descriptiva de caudales medio diarios

La **Tabla 18** presenta un análisis detallado de la serie de caudales pisco EQM para las estaciones. Cada métrica proporciona información crucial sobre el comportamiento de los caudales en las estaciones evaluadas.

La media aritmética del caudal varía significativamente entre las estaciones hidrométricas. Las estaciones PTU y ETI tienen las medias más altas (121.85 y 121.92 m³/s, respectivamente), lo que indica que, en promedio, estos caudales son mucho mayores que en las otras estaciones. En contraste, las estaciones CHI, PPL, y MLC tienen las medias más bajas (2.99, 2.23, y 15.99 m³/s, respectivamente), lo que sugiere caudales promedio significativamente menores.

Las estaciones con mediana más alta son ECI, LEN, y ETI (61.10, 62.40, y 44.50 m³/s, respectivamente). La mediana es considerablemente baja en las estaciones CHI, PPL, y MLC (0.60, 0.50, y 0.60 m³/s, respectivamente), indicando que la mayoría de los caudales en estas estaciones están mucho más cerca de cero en comparación con las demás estaciones.

PSC tiene el valor máximo más alto (3367.00 m³/s), seguido por ETI (2950.30 m³/s) y PTU (2718.90 m³/s), lo que indica que estos lugares experimentan eventos extremos de caudal mucho más significativos que las demás estaciones. Las estaciones CHI y PPL tienen los valores máximos más bajos (71.40 y 58.50 m³/s, respectivamente), lo que sugiere menos eventos extremos de caudal en comparación con las estaciones que tienen valores más altos.

La desviación estándar (DS) varía ampliamente, reflejando la variabilidad en los caudales. PSC tiene la desviación estándar más alta (231.83 m³/s), indicando una alta variabilidad en los caudales alrededor de la media. En contraste, CHI y PPL tienen las desviaciones estándar más bajas (5.99 y 4.54 m³/s, respectivamente), sugiriendo que los caudales en estas estaciones son más consistentes.

El coeficiente de variación (CV) también revela información sobre la variabilidad relativa de los caudales. Todas las estaciones hidrométricas tienen un valor muy alto (>100%) indicando que la desviación estándar es mayor que la media, lo que sugiere una alta variabilidad en los caudales. Este patrón puede ocurrir en regiones con eventos hidrológicos extremos, como se menciona en la metodología del **Capítulo III**.

Las estaciones con valores elevados de CV, como MLC (316%) y PNA (272%), reflejan una gran variabilidad relativa en comparación con su caudal promedio, indicando que estas estaciones experimentan fluctuaciones significativas en sus caudales.

Tabla 18. Resultados de estadística descriptiva de caudales simulados corregidos con EQM en cada estación hidrométrica

Estaciones	Media [m³/s]	Mediana [m³/s]	Máx [m³/s]	DS [m³/s]	CV [%]
PTU	121.85	48.10	2718.90	208.67	171
ETI	121.92	44.50	2950.30	205.72	169
ECI	106.13	61.10	993.50	133.45	126
PIM	37.65	21.30	744.00	48.72	129
LEN	109.03	62.40	993.50	137.33	126
EAP	102.47	56.20	997.80	137.87	135
CHI	2.99	0.60	71.40	5.99	200
PNA	39.65	1.20	2165.00	107.77	272
PPL	2.23	0.50	58.50	4.54	204
PSC	66.34	0.50	3367.00	231.83	349
HBR	8.07	1.00	309.20	20.77	257
MLC	15.99	0.60	773.00	50.56	316

Nota: La serie de caudales medios diarios, correspondiente al período del 01/09/1981 al 31/08/2023, fue caracterizada con un total de 15,340 datos.

4.1.3. Estacionalidad de serie de caudales

A partir de los caudales medios mensuales de las estaciones hidrométricas (ver **Anexo 2**), se calcularon los valores estandarizados de caudal. Estos valores estandarizados abarcan un rango de -1 a 2.5.

En la **Figura 25** se observa que varias estaciones hidrométricas muestran valores estandarizados de caudal próximos y superiores a 2 durante el mes de marzo. Estos valores elevados, según el **Capítulo III**, indican que los caudales en marzo son significativamente mayores en comparación con el promedio histórico mensual.

El hecho de que los valores estandarizados sean tan altos en marzo sugiere que este mes experimenta caudales excepcionales, lo que podría estar relacionado con eventos estacionales.

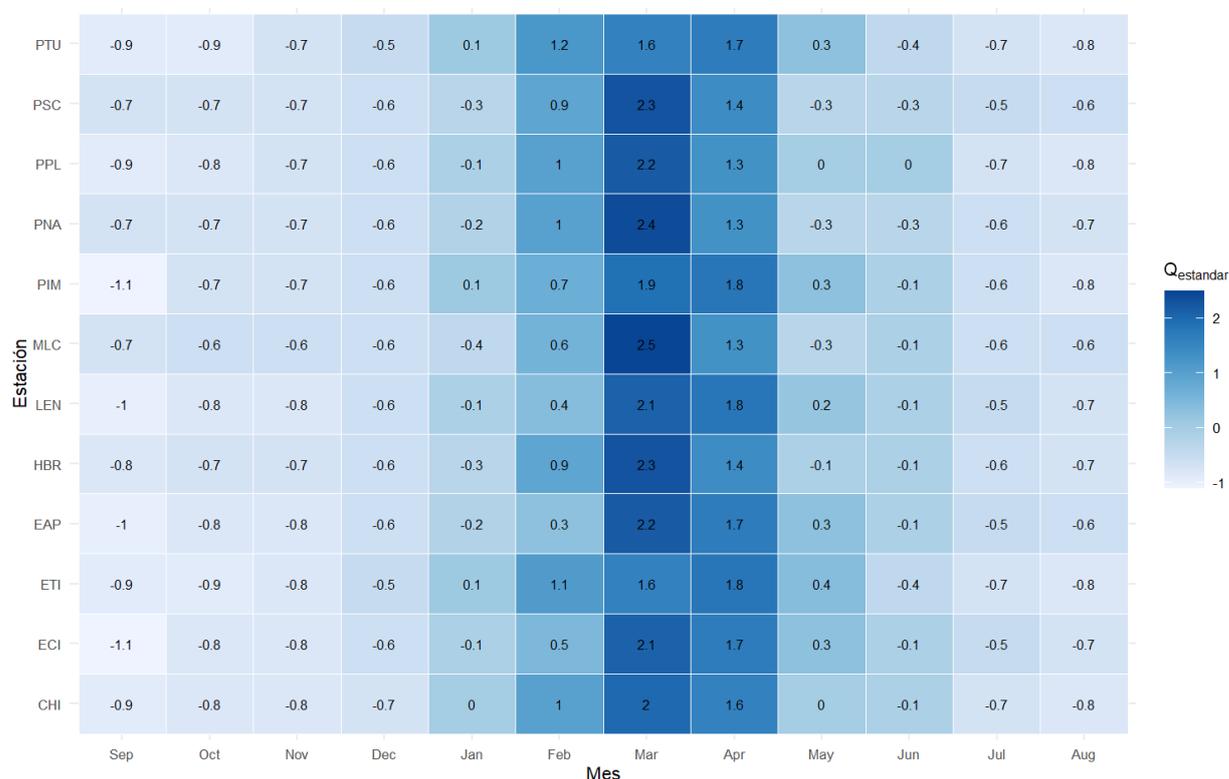


Figura 25. Heatmap de estacionalidad estandarizado de caudales de las estaciones hidrométricas estudiadas en los años 1981-2020.

La **Figura 26** ilustra la serie temporal de caudal medio anual para el periodo de 1981 a 2020 en las estaciones hidrométricas analizadas. Este análisis revela que los caudales medios anuales presentan notables picos durante los años en que se ha registrado el Fenómeno El Niño, específicamente en los eventos de 1982/83, 1997/98 y 2016/17. Estos picos destacan la influencia significativa de este fenómeno climático en los caudales anuales, reflejando un incremento considerable en el flujo de agua durante estos periodos.

El análisis de los valores medios anuales de caudal muestra una variabilidad significativa entre las estaciones. Las estaciones ETI y PTU, ubicadas en la unidad hidrográfica de Tumbes, destacan con los valores más altos de caudal medio anual, alcanzando 1478.4 m³/s/año y 1479.0 m³/s/año, respectivamente. Estas estaciones son seguidas por LEN, EAP y ECI, que también presentan valores elevados de caudal medio anual, aunque ligeramente inferiores a los de ETI y PTU.

En contraste, las estaciones PPL y CHI presentan los valores más bajos de caudal medio anual, con 26.7 m³/s/año y 35.5 m³/s/año, respectivamente. Estos valores bajos sugieren una menor capacidad de flujo en comparación con las estaciones de caudal más alto, lo que podría estar relacionado con diferencias en la cuenca hidrográfica, la disponibilidad de agua o la influencia de eventos climáticos extremos.

Los datos completos del caudal medio anual de cada estación, desglosados por año, están detallados en el **Anexo 3**. Este anexo proporciona una visión exhaustiva de las fluctuaciones interanuales y permite un análisis más profundo de las tendencias a lo largo del tiempo.

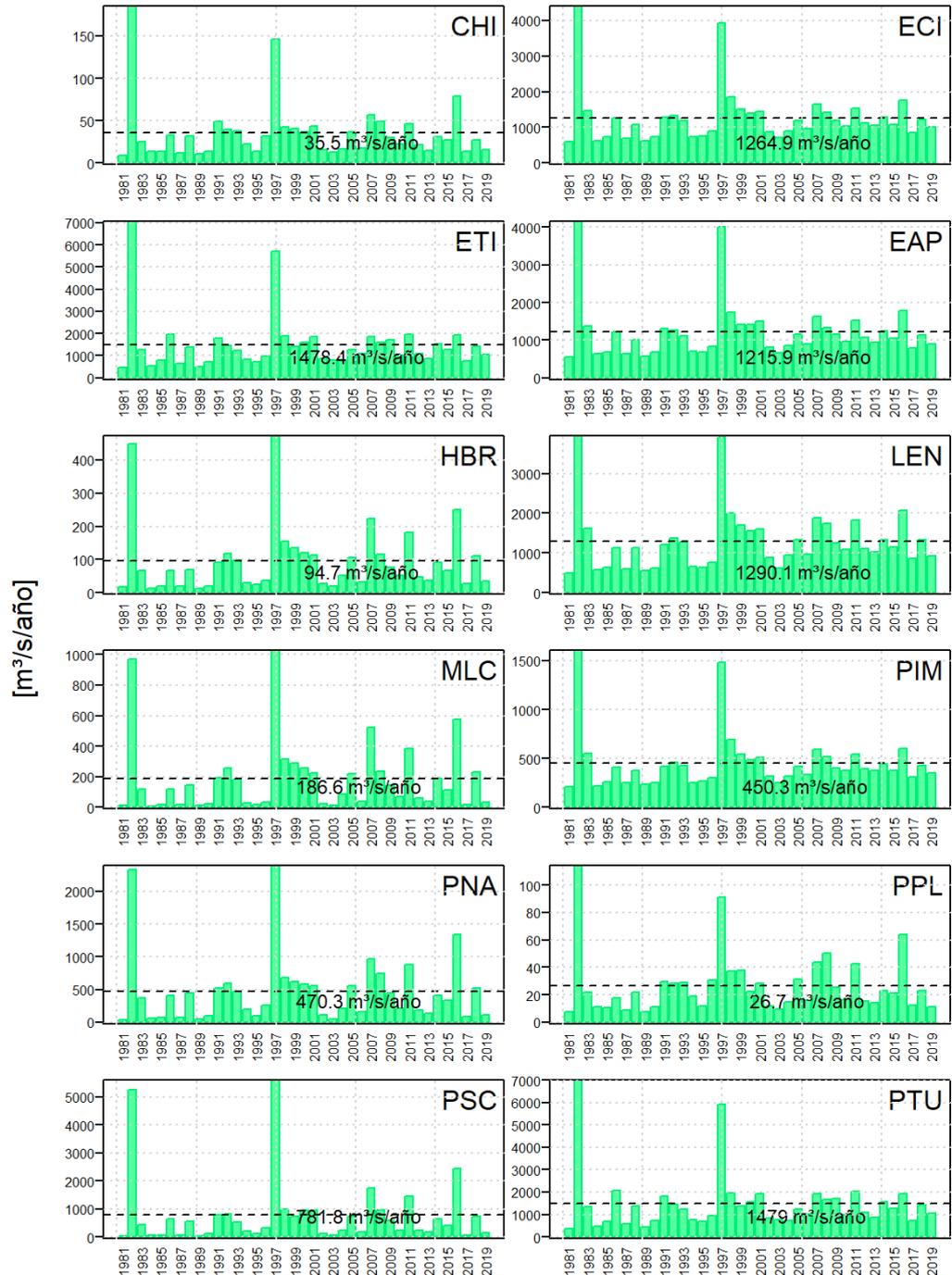


Figura 26. Variación anual de caudal de las estaciones hidrométricas en el período de 1981 a 2020.

En la **Figura 27**, el diagrama de caja (boxplot) muestra que los valores atípicos (extremos) de caudales están claramente vinculados a los eventos significativos del Fenómeno El Niño de 1982/83, 1997/98 y 2016/17. Los eventos de 1982/83 y 1997/98 presentan los picos más extremos de caudal, evidenciando un impacto más

pronunciado en comparación con los valores normales. Estos picos reflejan cómo el Fenómeno El Niño puede provocar aumentos notables en el flujo de agua. Para una visión detallada de los caudales mensuales durante estos eventos extremos, consulte el **Anexo 4**, que ofrece un desglose completo de la variabilidad observada.

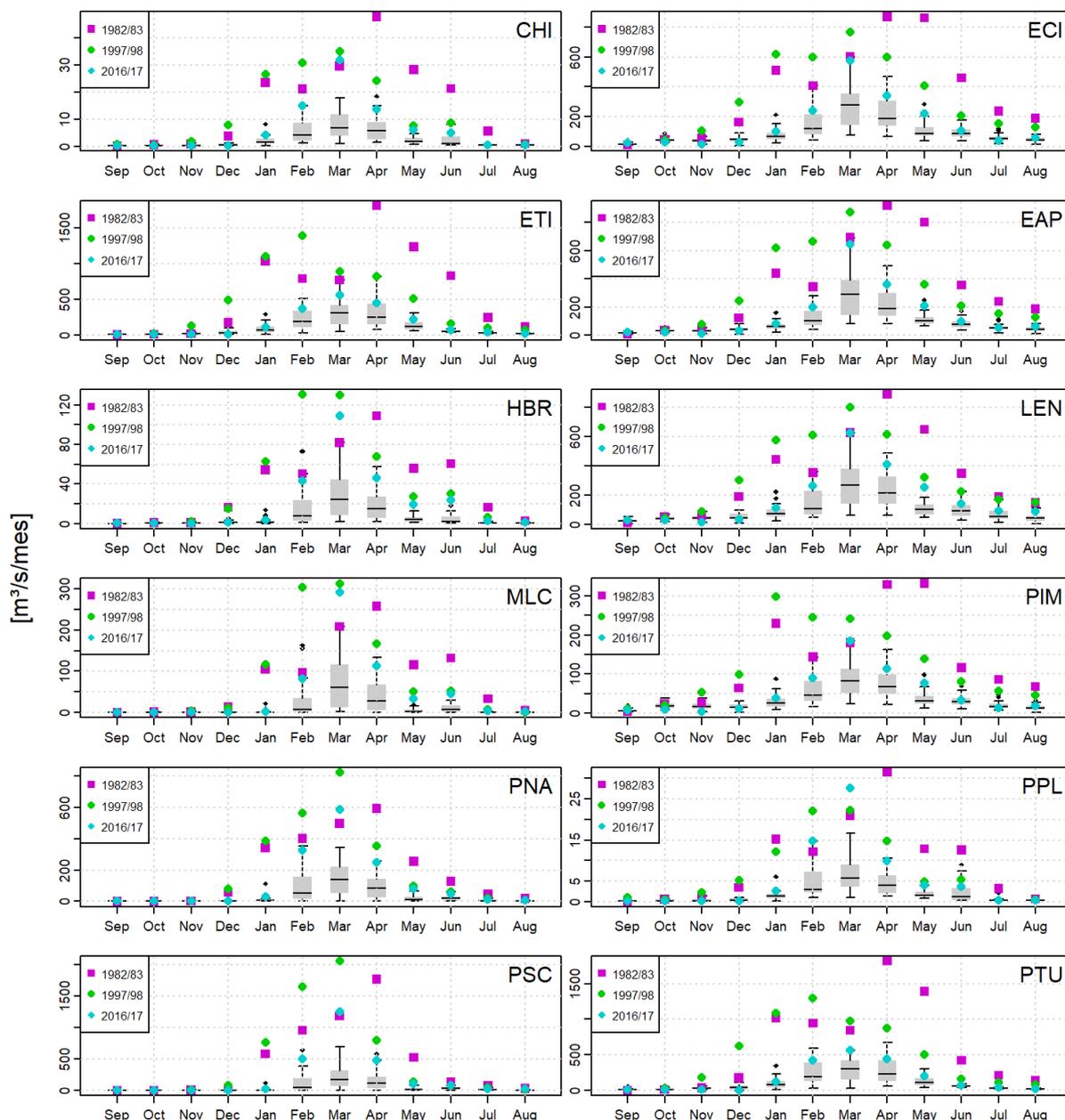


Figura 27. Estacionalidad de serie de caudal medio mensual (1981 – 2020) en las estaciones de estudio, incluyendo valores correspondientes a los años de Fenómeno del Niño: 1982-83, 1997-98 y 2016-17

4.1.4. Análisis de frecuencia

a) Enfoque máximo anual (AM)

Extracción de caudales máximos anuales

La **Figura 28** ilustra la serie de caudales medios diarios ajustados mediante el Método de Ajuste de Cuantiles Empíricos (EQM) para el período comprendido entre el 1 de septiembre de 1981 y el 31 de agosto de 2023. En la figura, se destacan los caudales máximos anuales registrados con puntos rojos, cada uno representando el caudal máximo de cada año dentro de este intervalo de tiempo.

El análisis de estos 42 puntos rojos, correspondientes a 42 años de datos, permite observar la variabilidad y las tendencias en los caudales máximos a lo largo del tiempo.

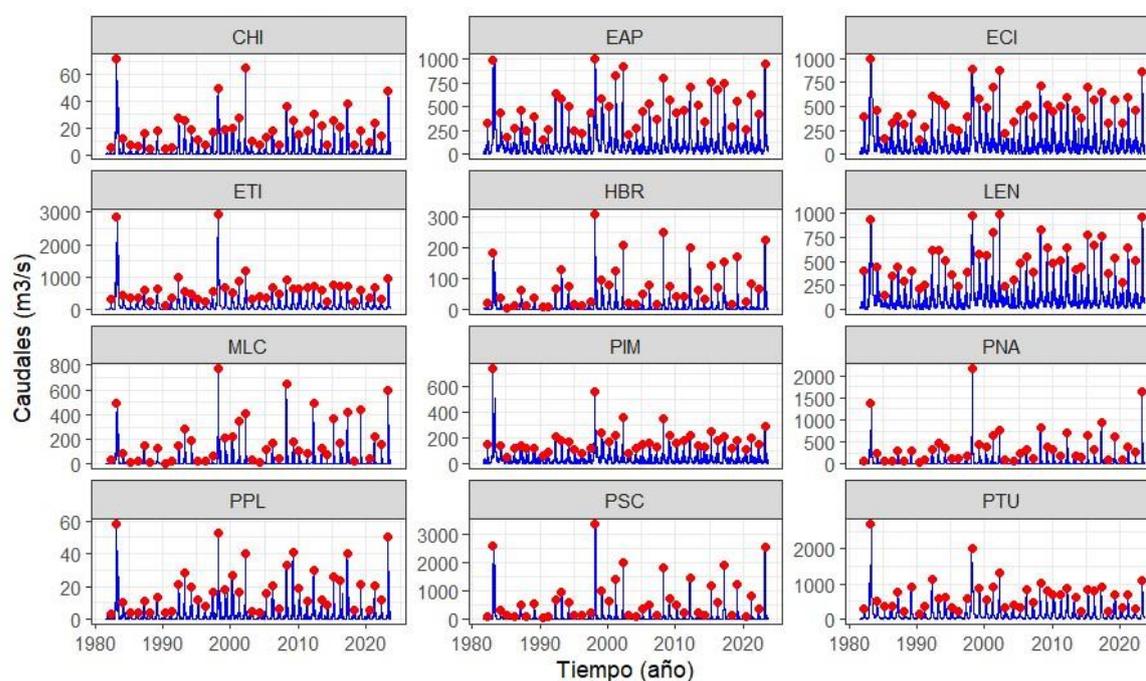


Figura 28. Caudales Medios Diarios y Caudales Máximos Anuales (1981 – 2023) de las estaciones de estudio

De la base de datos (ver **Anexo 5**) creada a partir de la extracción de caudales máximos anuales se representa en la **Figura 29** presenta una serie de caudales máximos anuales. En esta serie, cada punto representa el caudal máximo registrado en cada uno de los 42 años de estudio.

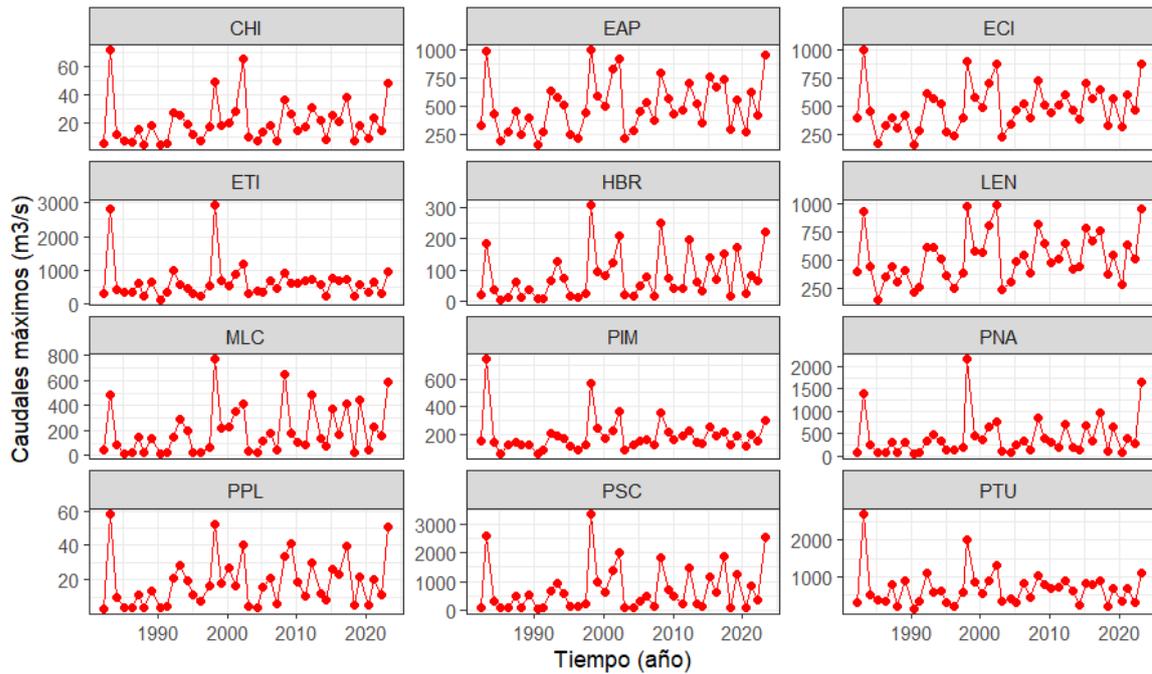


Figura 29. Serie de Caudales Máximos Anuales (1981 – 2023) de las estaciones de estudio para Análisis de Frecuencia

La **Tabla 19** de caudales máximos anuales proporciona una visión detallada de la variabilidad y los extremos en los caudales para cada estación hidrométrica. Los valores extremos destacan la capacidad de las estaciones para manejar grandes caudales, y los eventos registrados en años como 1983 y 1998, que coinciden con fenómenos de El Niño, subrayan la influencia significativa de estos fenómenos en los caudales. La alta variabilidad observada entre las estaciones, desde el máximo de 3367.00 m³/s en PSC hasta el mínimo de 3.30 m³/s en PPL, refleja diferencias en las características de las cuencas y sus respuestas a eventos extremos. Esta información es esencial para una gestión eficaz de recursos hídricos y para la planificación frente a futuros eventos extremos, especialmente en el contexto de posibles cambios climáticos.

Tabla 19. Valores altos y bajos de Caudales Máximos Anuales de las estaciones de estudio

Estaciones	Valor alto de caudales máximos		Valor bajo de caudales máximos	
	Caudal [m ³ /s]	Año	Caudal [m ³ /s]	Año
CHI	71.40	29/01/1983	4.100	01/06/1990
ECI	993.50	23/05/1983	151.90	06/04/1990
ETI	2950.30	10/02/1998	135.00	01/05/1990
EAP	997.80	25/02/1998	152.00	06/04/1990
HBR	309.20	25/02/1998	4.60	08/03/1985
LEN	993.50	10/04/1998	144.60	09/03/1985
MLC	773.00	25/02/1998	8.900	28/03/1990
PIM	744.00	30/01/1983	56.20	14/05/1985
PNA	2165.00	13/03/1998	36.60	28/03/1990
PPL	58.50	29/01/1983	3.30	05/05/2008
PSC	3367.00	15/03/1998	51.80	04/06/1990
PTU	2718.90	28/04/1983	139.10	16/02/1990

Evaluación de tendencia de caudales máximos anuales

La **Figura 30** muestra la serie de caudales máximos anuales, sin evidenciar una tendencia significativa a lo largo del tiempo. Las líneas roja y verde no presentan una pendiente sostenida, ya sea creciente o decreciente. Aunque en algunas estaciones se observa un aumento en los caudales, hacia el final se percibe una ligera disminución. Los caudales presentan una alta variabilidad interanual, alternando entre valores extremadamente altos y bajos, lo que sugiere la ausencia de un patrón claro de aumento o disminución en el tiempo.

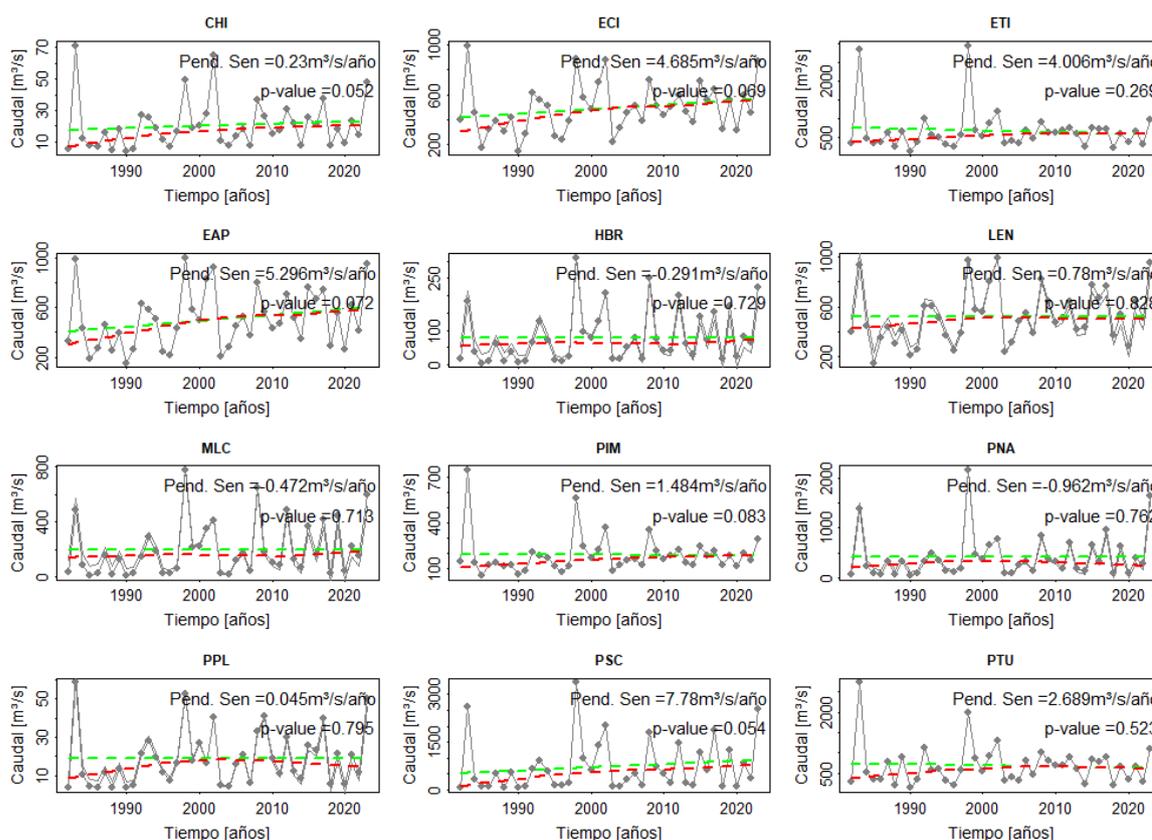


Figura 30. Test de Mann-Kendall de la serie de Caudales Máximos Anuales (1981 – 2023) de las estaciones de estudio para Análisis de Frecuencia

La **Tabla 20** ofrece una visión detallada de los resultados del test de Mann-Kendall, revelando que los valores p para todas las estaciones hidrométricas superan el umbral de 0.05. De acuerdo con lo establecido en el **Capítulo III**, cuando el valor p es mayor a 0.05, no se considera que haya una tendencia significativa. Esto sugiere que las fluctuaciones observadas en los caudales máximos anuales podrían ser producto de la variabilidad en los datos más que de una tendencia real.

En el caso particular de las estaciones CHI (valor $p = 0.052$) y PSC (valor $p = 0.054$), los valores p están ligeramente por encima del umbral de significancia de 0.05. Aunque no son estadísticamente significativas, estas estaciones muestran una leve inclinación hacia una tendencia creciente, como lo indica la pendiente de Sen. En CHI, la pendiente es positiva con una magnitud de $0.230 \text{ m}^3/\text{s}/\text{año}$, mientras que en PSC la pendiente es considerablemente más pronunciada, con un aumento de $7.78 \text{ m}^3/\text{s}/\text{año}$. Aunque estas tendencias no cumplen con el criterio de significancia estadística, su magnitud sugiere que podrían ser importantes desde un punto de vista hidrológico, y podrían requerir un análisis más detallado o seguimiento en el futuro.

Tabla 20. Test de Mann-Kendall de la Serie de Caudales Máximos Anuales de las estaciones de estudio

Estaciones	Pend. Sen [m³/s/año]	Valor p
CHI	0.230	0.052
ECI	4.685	0.069
ETI	4.006	0.269
EAP	5.296	0.072
HBR	0.291	0.729
LEN	0.780	0.828
MLC	0.472	0.713
PIM	1.484	0.083
PNA	-0.962	0.762
PPL	0.045	0.795
PSC	7.780	0.054
PTU	2.689	0.523

Los resultados del test de Mann-Kendall indican que la ausencia de una tendencia significativa sugiere que los datos no siguen una distribución normal. Por lo tanto, se

deben ajustar a distribuciones de probabilidad adecuadas para series sin tendencia. Además, para modelar eventos extremos, se recomienda utilizar el método de Estimación de Máxima Verosimilitud (MLE), según la literatura (ver **Capítulo II**).

Ajuste de distribuciones de probabilidad en el enfoque AM

La **Figura 31** presenta las distribuciones de probabilidad ajustadas a las series de caudales máximos anuales en cada estación hidrométrica. Las distribuciones aplicadas son GEV, Gamma (Gam), Gumbel (Gum), L-Normal (LN) y Weibull (Wei). Visualmente, se observa que, aunque la mayoría de las distribuciones tienden a coincidir en muchas estaciones, la distribución Gumbel se diferencia notablemente en las estaciones HBR, MLC, PNA y PSC.

Estas diferencias sugieren que la distribución Gumbel puede no estar capturando adecuadamente el comportamiento extremo de los caudales en estas estaciones

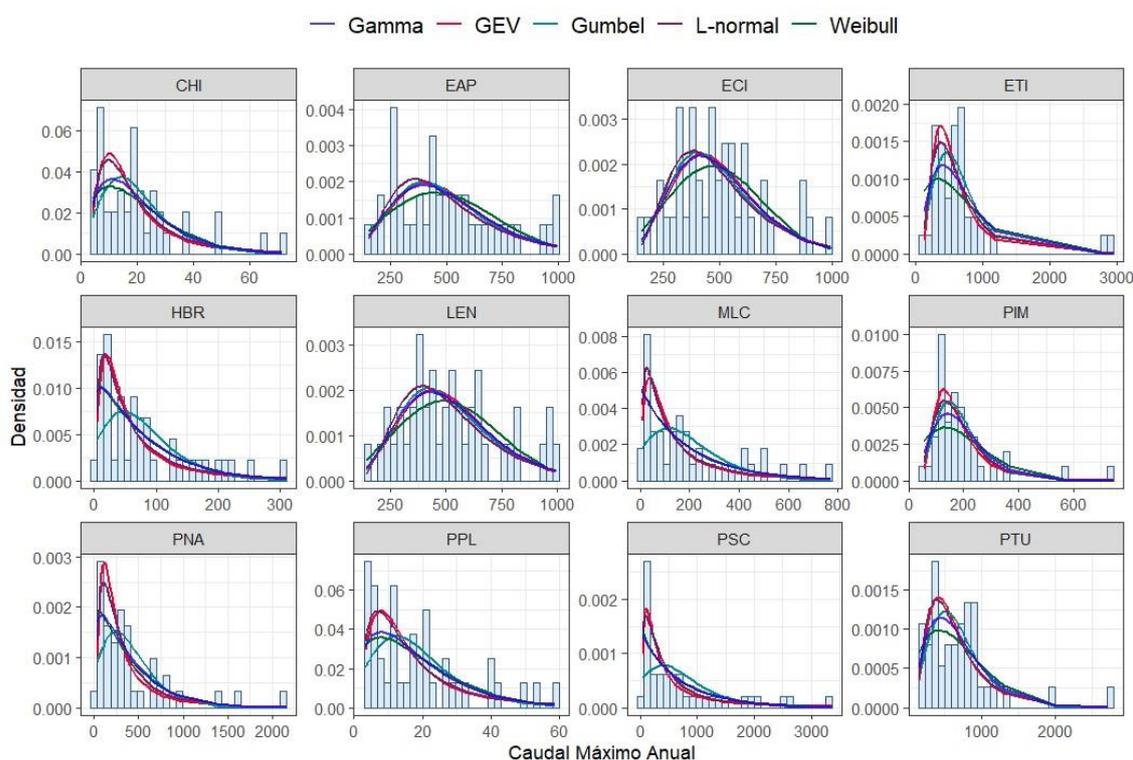


Figura 31. Distribuciones de Probabilidad en las Series de Caudales Máximos Anuales (1981-2023)

En el **Anexo 6** se presentan tablas detalladas que muestran los valores estimados de los parámetros para cada distribución en cada estación, calculados mediante el método de Estimación de Máxima Verosimilitud (MLE).

Selección de la mejor distribución de probabilidad

Se evaluaron las diferentes distribuciones de probabilidad para cada estación utilizando tres pruebas estadísticas: Kolmogorov-Smirnov (K-S test), Anderson-Darling (A-D test) y Chi-Square (C-S test). La Tabla 21 presenta los resultados detallados de estas pruebas para cada estación, destacando la distribución que mostró el mejor ajuste según cada test. Los valores obtenidos en cada prueba están indicados entre paréntesis. El **Anexo 7** presenta los resultados de los test en cada distribución de probabilidad para cada estación.

Tabla 21. Selección de mejor distribución de probabilidad aplicando K-S test, A-D test y C-S tes

Estaciones	K-S test	A-D test	C-S test	Rank
CHI	Wei (0.095)	LN (0.324)	GEV (6.000)	Wei
ECI	Gam (0.052)	GEV (0.139)	GUM (1.649)	Gam
ETI	GEV (0.102)	GEV (0.496)	GEV (6.428)	GEV
EAP	Wei (0.082)	GEV (0.262)	GEV (2.142)	GEV
HBR	Wei (0.092)	Wei (0.240)	GEV (4.714)	Wei
LEN	GUM (0.052)	Gam (0.144)	GEV (1.714)	GUM
MLC	Wei (0.099)	Gam (0.419)	Wei (7.714)	Wei
PIM	GEV (0.106)	GEV (0.412)	GUM (9.256)	GEV
PNA	LN (0.093)	LN (0.362)	GEV (4.714)	LN
PPL	Wei (0.091)	Gam (0.433)	Gam (4.714)	Gam
PSC	Wei (0.129)	LN (0.731)	LN (12.857)	LN
PTU	LN (0.091)	GEV (0.496)	GEV (6.857)	GEV
Highest Rank in %	Wei (50%)	GEV (42%)	GEV (58%)	GEV(33%)

Para Kolmogorov-Smirnov test (K-S test), la distribución Weibull (Wei) mostró el mejor ajuste en el 50% de los casos.

Anderson-Darling test (A-D test), la distribución GEV se destacó en el 42% de los casos.

Chi-Square test (C-S test), la distribución GEV mostró el mejor ajuste en el 58% de los casos.

La distribución GEV fue la más frecuente en los rankings del A-D test y el C-S test, mientras que la distribución Weibull mostró un buen ajuste en el K-S test.

El gráfico Q-Q (ver **Figura 32**) compara la distribución GEV con los valores empíricos de caudales máximos anuales es una manera eficaz de validar si GEV es la mejor distribución para los datos.

En general, los gráficos Q-Q muestran que los puntos tienden a alinearse con la línea diagonal, lo que indica un buen ajuste de la distribución GEV a los datos empíricos. Sin embargo, para las estaciones HBR, MLC y PSC, se observa una ligera dispersión de los puntos respecto a la línea, lo que sugiere algunas desviaciones del ajuste en estas estaciones.

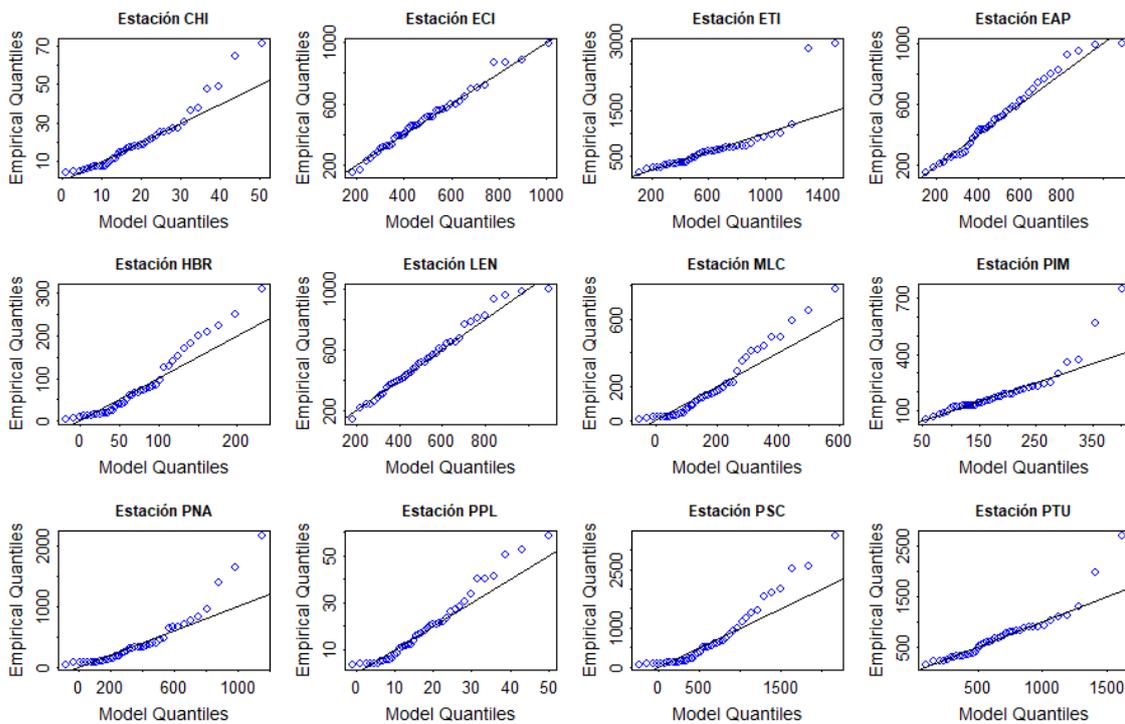


Figura 32. Q-Q plot usando GEV para las estaciones de estudio

En la **Figura 33**, que muestra la gráfica de densidad, se observa que la distribución Generalizada de Valores Extremos (GEV) se ajusta de manera efectiva a la distribución empírica de los caudales máximos anuales para todas las estaciones estudiadas. La gráfica revela que la forma de la distribución GEV coincide de manera precisa con la distribución observada en los datos. Las diferencias entre ambas distribuciones son mínimas, lo que indica que GEV es una representación adecuada y confiable para modelar los caudales máximos anuales en las estaciones analizadas.

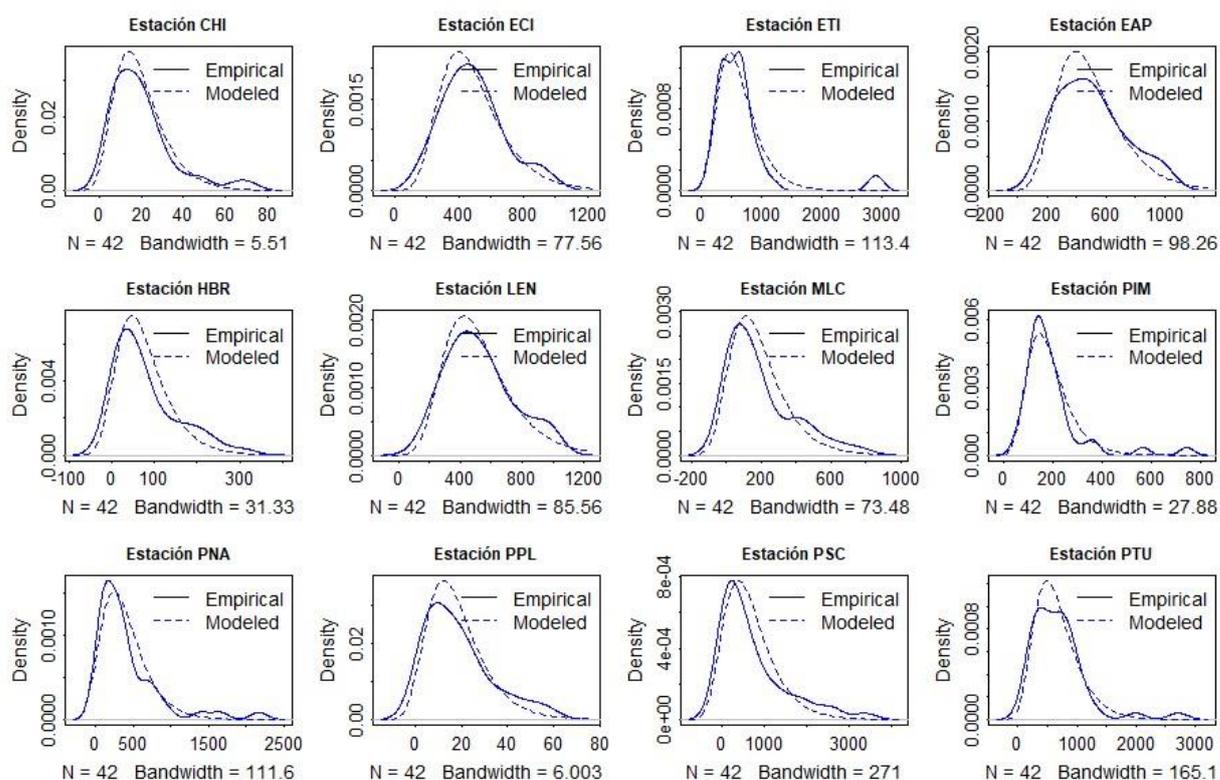


Figura 33. Gráfica de Densidad usando GEV para las estaciones de estudio

Determinación de umbrales de alerta de inundación usando el enfoque AM

Se han extraído los umbrales de caudales extremos para una serie de períodos de retorno (TR). Los períodos de retorno son 2.33, 5 y 10 años, de acuerdo con la metodología (**Capítulo III**) considerados para los umbrales de alerta de inundación. Además, se obtuvieron los umbrales de los períodos de retorno de 25, 50, 100, 200 y 500 años para el diseño de caudales. Estos umbrales representan los caudales esperados para eventos con la probabilidad de ocurrir una vez en el intervalo de años correspondiente (ver **Figura 34**).

Para cada estación y cada período de retorno, se ha estimado el umbral de caudal extremo utilizando el modelo GEV. Estos resultados se almacenan en la matriz u, donde cada fila corresponde a un período de retorno y cada columna corresponde a una estación hidrométrica (ver **Tabla 22**).

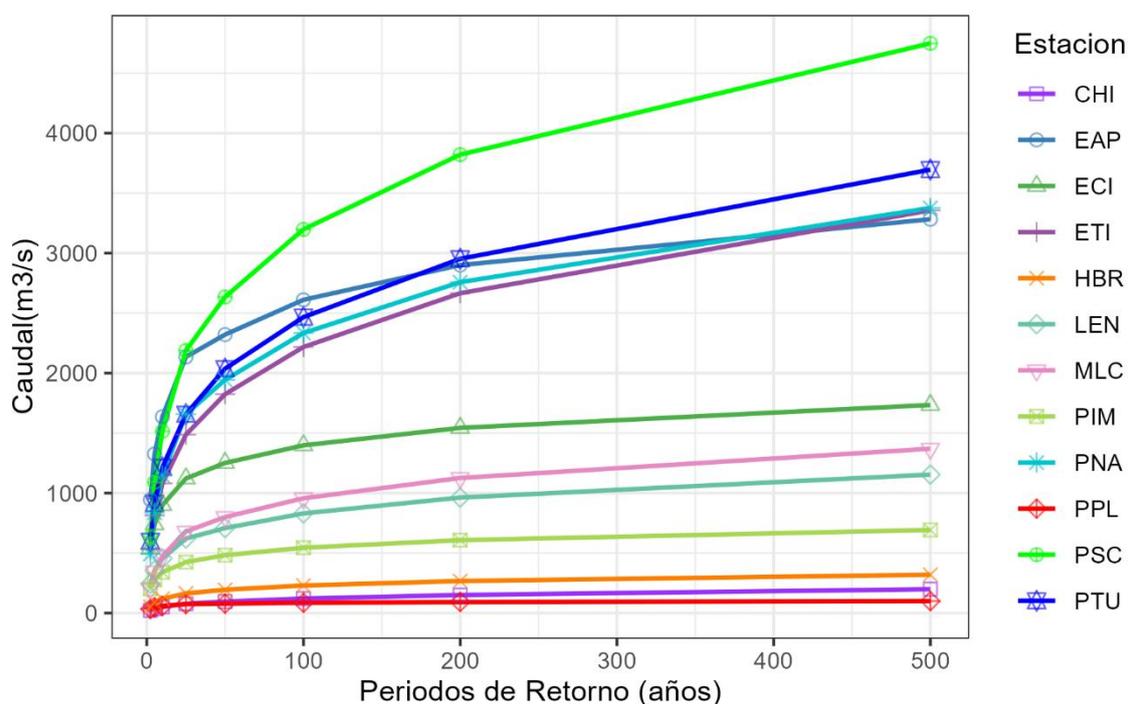


Figura 34. Caudal de evento extremo anual y período de retorno en las estaciones de estudio

Las estaciones PSC, PTU, EAP, ETI y PNA muestran los caudales máximos más altos, superando los 3000 m³/s para periodos de retorno largos (500 años).

Las estaciones como ECI, LEN y MLC presentan caudales máximos que varían entre 1000 y 3000 m³/s para periodos de retorno similares.

En la **Figura 35** se muestran los umbrales de eventos extremos en caudales históricos para las estaciones PTU, ETI, ECI, PIM, LEN, EAP, PNA y PSC. Los análisis indican que PTU y ETI tienen los umbrales más altos, lo que sugiere que estas estaciones experimentan eventos extremos de caudal más intensos en comparación con las demás estaciones. Por otro lado, ECI y PIM presentan umbrales más bajos, lo que podría reflejar una menor magnitud de eventos extremos en esas áreas.

Tabla 22. Umbrales de potenciales inundaciones en las estaciones estudiadas obtenidos con el enfoque AM

TR	PTU	ETI	ECI	PIM	LEN	EAP	CHI	PNA	PPL	PSC	HBR	MLC
2.33	597.9	533.5	540.3	202.4	243.5	945.2	21.6	491.4	33.9	630.7	51.6	202.6
5	913.9	813	739.3	277.4	355	1325.8	36.3	835.6	48.1	1090.4	87.3	346.5
10	1213.5	1080.3	900.3	340	455	1636.2	51.1	1146.8	58.5	1514.7	118.4	475.3
25	1657.2	1486.9	1121.4	424.5	620.8	2134.2	77.6	1657.6	74.8	2188.9	163.5	679.2
50	2036.6	1824.4	1251.1	482.2	708	2320.8	95.5	1944	78.1	2634.6	194.1	800.2
100	2466.4	2217.5	1397.9	544.3	830.4	2610.8	120.5	2333.9	85.3	3197.9	229.4	956.8
200	2952.5	2665.6	1543.4	607.3	962.5	2900.2	150.3	2757.7	91.8	3820.8	266.7	1125.6
500	3695.9	3356.5	1734	692.4	1153.9	3282.4	198.6	3376.5	99.5	4748.6	319.4	1369.6

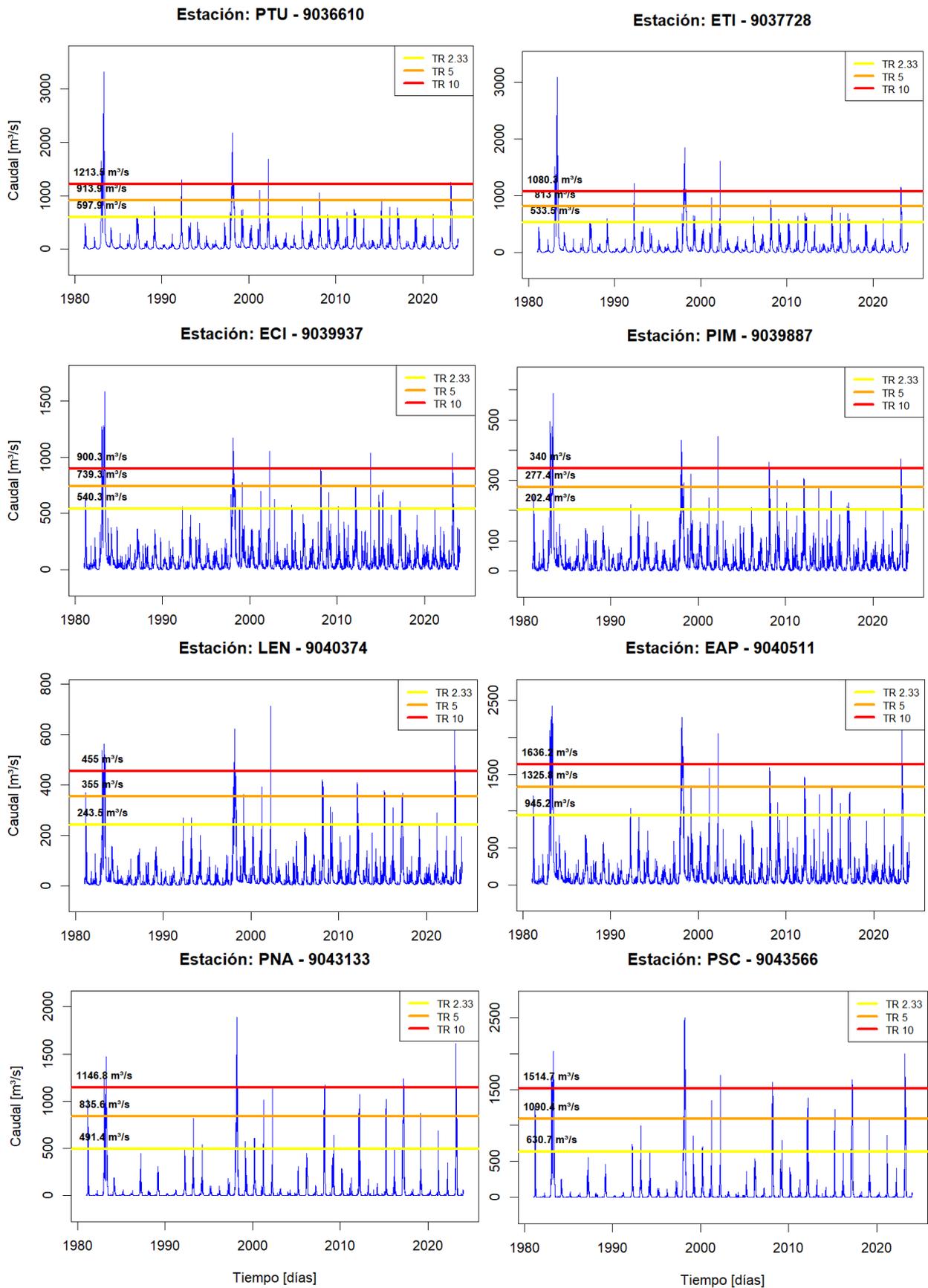


Figura 35. Umbral de eventos extremos en caudales históricos utilizando el enfoque AM en las estaciones PTU, ETI, ECI, PIM, LEN, EAP, PNA y PSC

b) Enfoque picos sobre umbrales (POT)

Selección de umbral (u) POT

Se aplicó el enfoque Mean Residual Life (MRL) para identificar los umbrales de caudal óptimos que permiten la extracción de excedentes en las series temporales de las diferentes estaciones de estudio. Los umbrales seleccionados se muestran en la **Tabla 23**.

Tabla 23. Umbrales para extraer excedentes de cada estación de estudio

Estación	COMID	Umbral (u) POT
PTU	9036610	223
ETI	9037728	150
ECI	9039937	150
PIM	9039887	82
LEN	9040374	123
EAP	9040511	376
CHI	9043134	8
PNA	9043133	182
PPL	9043595	10
PSC	9043566	150
HBR	9044140	17
MLC	9044146	71

La **Figura 36** muestra que el MRL se estabiliza y sigue un patrón lineal alrededor de un umbral de 223 m³/s en la estación PTU. Esto sugiere que este es un umbral adecuado para modelar los eventos extremos de caudal en esta estación.

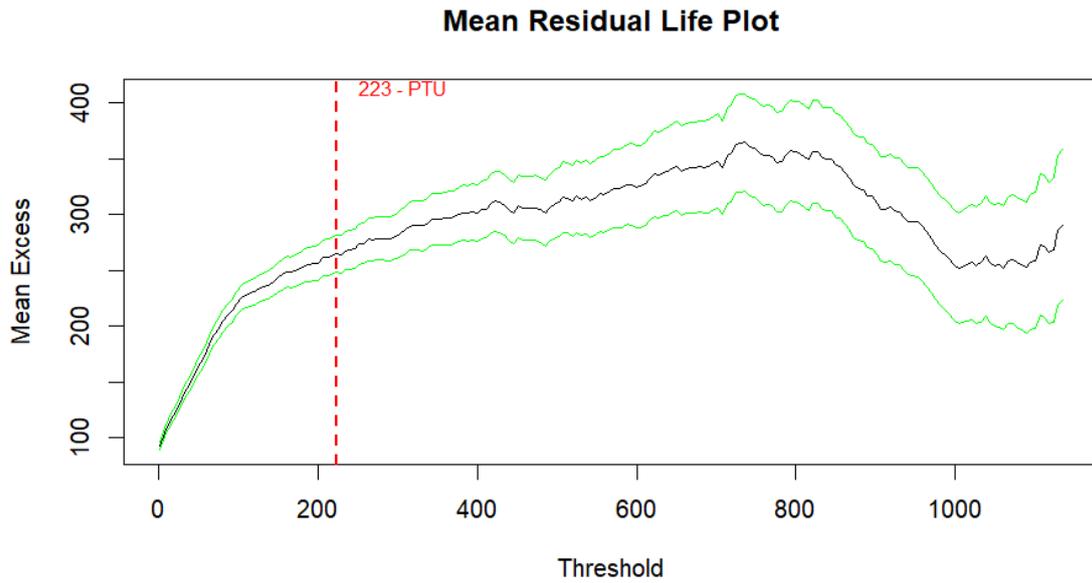


Figura 36. Selección de umbral para aplicar excedente de Mean Residual Life (MRL) de la estación PTU con COMID 9036610

La **Figura 37** de MRL para ETI muestra que un umbral de 150 m³/s es donde el comportamiento del MRL se estabiliza. Esto sugiere que 150 m³/s es un umbral apropiado para analizar los eventos extremos en esta estación.

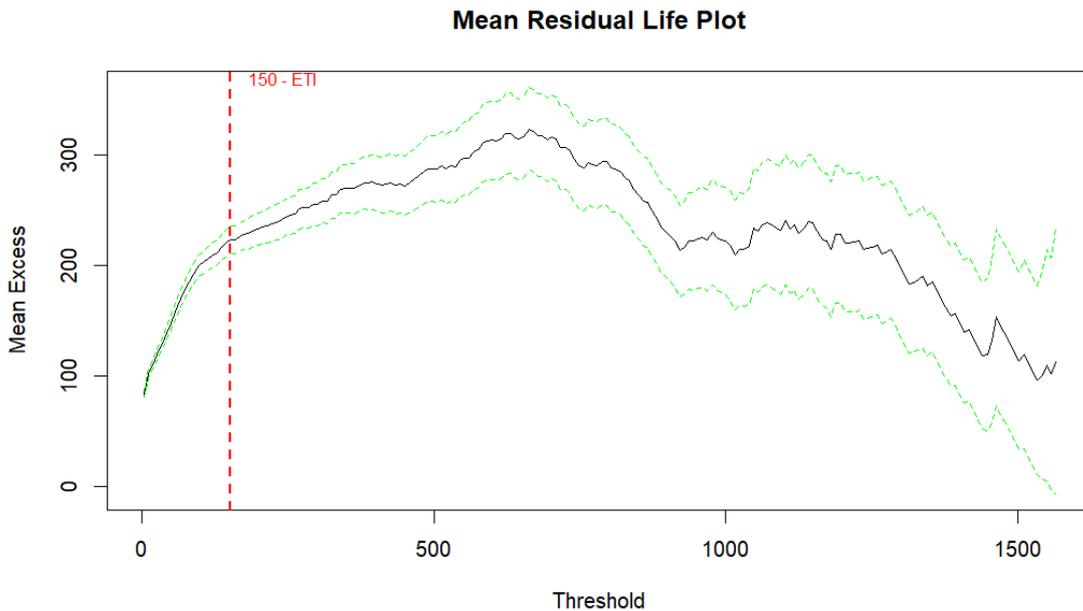


Figura 37. Selección de umbral para aplicar excedente de Mean Residual Life (MRL) de la estación ETI con COMID 9037728.

La **Figura 38** de MRL de PIM muestra un umbral adecuado alrededor de 82 m³/s, donde el comportamiento del MRL es aproximadamente lineal, sugiriendo que este umbral es apropiado para el modelado.

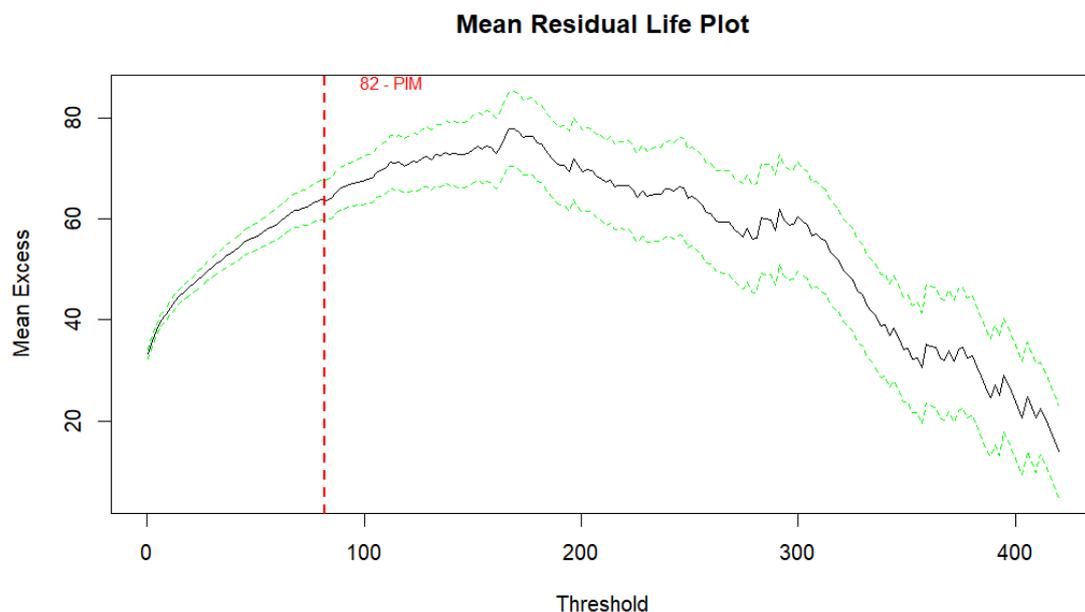


Figura 38. Selección de umbral para aplicar excedente de Mean Residual Life (MRL) de la estación PIM con COMID 9039887

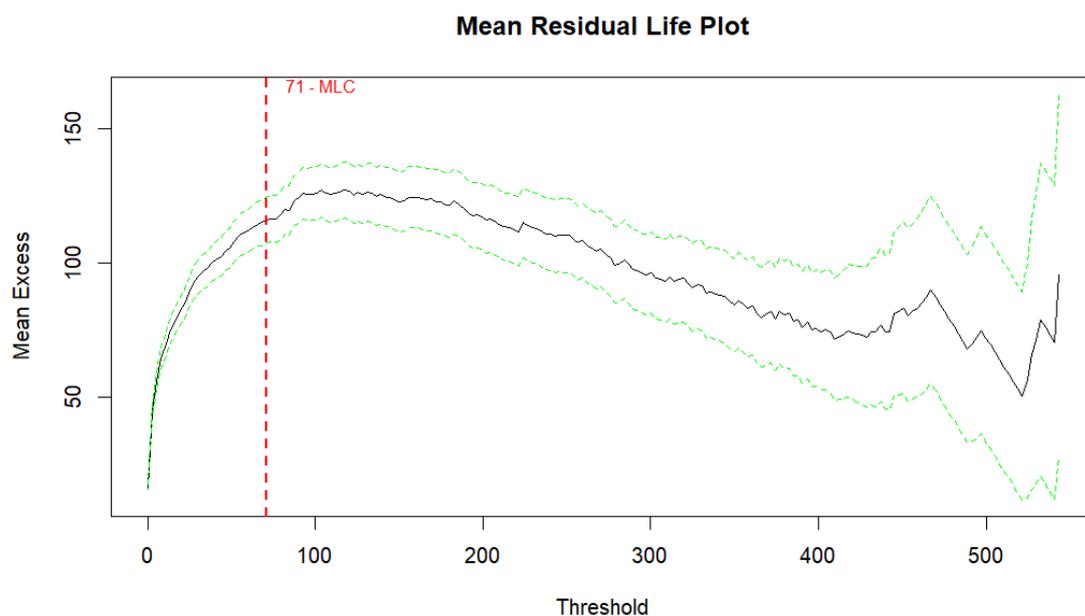


Figura 39. Selección de umbral para aplicar excedente de Mean Residual Life (MRL) de la estación MLC con COMID 9044146

La **Figura 39** de MRL para MLC muestra que un umbral de 71 m³/s es un punto donde el MRL se estabiliza, indicando un buen umbral para el análisis de caudales extremos.

Las gráficas correspondientes a las demás estaciones estudiadas se presentan en el **Anexo 8**.

Excedencia

Este análisis se basa en un total de 15,330 datos diarios de caudal, abarcando el período desde el 1 de septiembre de 1981 hasta el 31 de agosto de 2023.

En la **Tabla 24** se presentan los umbrales (u) POT para eventos extremos en las estaciones hidrométricas. Esta tabla también muestra la cantidad de datos que exceden estos umbrales (d-u) y la cantidad de datos de excedencia (e) que cumple con la condición temporal de 5 días (tim.cond), como se detalla en la literatura del **Capítulo II**.

Además, la **Figura 40** muestra la agrupación (Clúster) de estos eventos extremos, facilitando la visualización de cómo los datos se distribuyen con relación a la condición temporal.

Se observa que el número de datos de caudales extremos (e) utilizados para ajustar la distribución de probabilidad es superior al número de caudales máximos anuales considerados en el enfoque de Máximos Anuales (AM), que utiliza 42 datos por estación.

Cada estación presenta una cantidad variable de excedencias debido a la variabilidad en los caudales extremos. Esto se debe a que algunas cuencas tienen caudales extremos más bajos, lo que afecta el umbral (u) y, en consecuencia, la cantidad de excedencias observadas.

Tabla 24. Cantidad de eventos extremos extraídos para el enfoque POT

Estación	u	Cantidad de datos			
		d	d-u	tim.cond	e
PTU	> 223	15330	1383	5	81
ETI	>150	15330	2219	5	91
ECI	>150	15330	1538	5	114
PIM	>82	15330	1610	5	138
LEN	>123	15330	979	5	77
EAP	>376	15330	1451	5	95
CHI	>8	15330	1073	5	83
PNA	>182	15330	927	5	57
PPL	>10	15330	1308	5	108
PSC	>150	15330	1334	5	66
HBR	>17	15330	1002	5	61
MLC	>71	15330	956	5	65

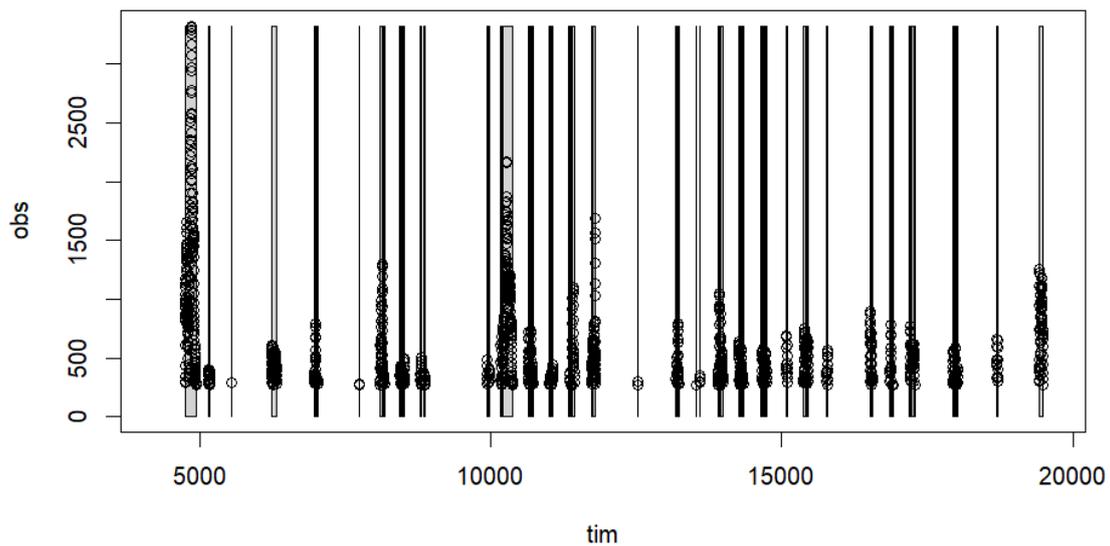


Figura 40. Condición temporal de excedencias en la estación PTU: Agrupación en clústeres para identificar eventos independientes con condición temporal de 5 días

En la **Figura 41** se muestran los caudales de excedencia (representados por puntos rojos) en la serie histórica de caudales medios diarios para cada estación hidrométrica. A simple vista, se puede observar que las estaciones PIM y ECI presentan una mayor cantidad de excedencias en comparación con las demás estaciones.

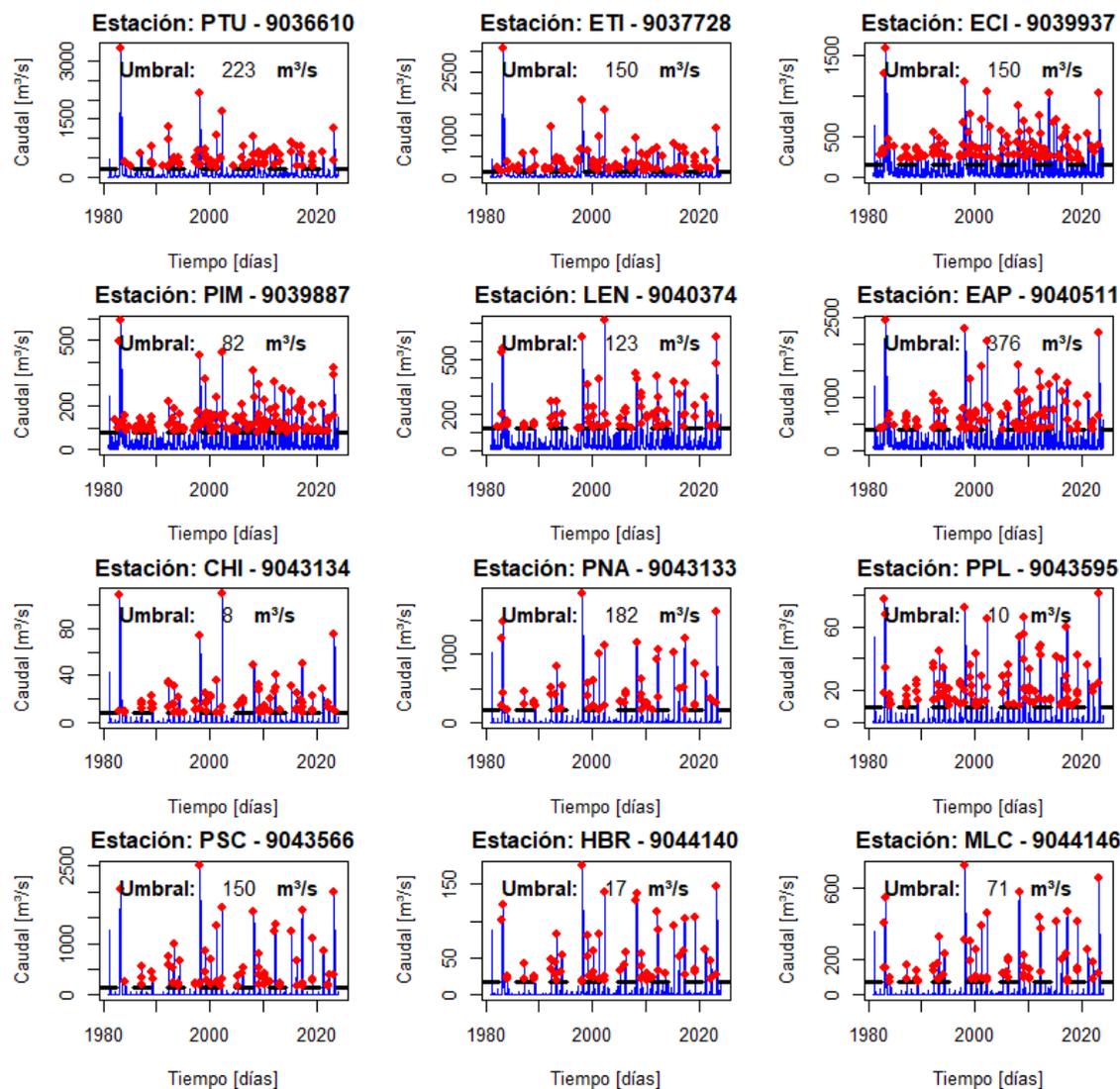


Figura 41. Excedencia que cumplen la condición temporal de todas las estaciones de estudio

Evaluación de tendencia en excedencias del enfoque POT

En la **Figura 42** se muestra la serie temporal de caudales de excedencia con el enfoque POT. En la mayoría de las estaciones no se observa una tendencia clara en los caudales extremos. Las líneas rosadas y azules no presentan una pendiente consistente ni paralela, lo que refleja fluctuaciones irregulares en los caudales a lo largo del tiempo, sin un patrón uniforme creciente o decreciente.

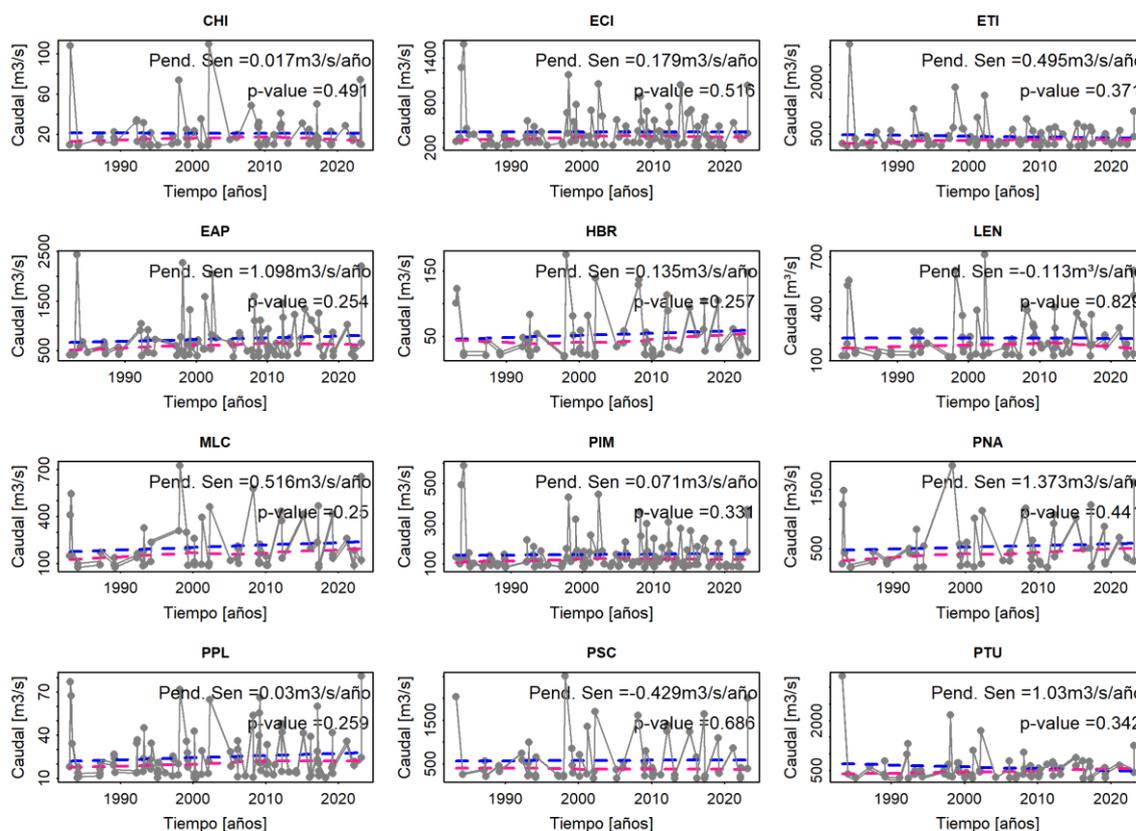


Figura 42. Test de Mann-Kendall de la serie de Picos sobre umbrales (1981 – 2023) de las estaciones de estudio para Análisis de Frecuencia

La **Tabla 25** proporciona un análisis detallado de los resultados del test de Mann-Kendall, mostrando que los valores p para todas las estaciones hidrométricas superan el umbral de 0.05. Según lo establecido en el **Capítulo III**, un valor p mayor a 0.05 indica que no hay una tendencia significativa en los datos. Esto sugiere que las fluctuaciones observadas en los caudales de excedencia del enfoque POT podrían ser atribuibles a la variabilidad inherente en los datos de caudales.

Dado que no se detecta una tendencia significativa, los valores de la pendiente Sen entre todas las estaciones oscilan en -0.4 a 1.4. En general, cuando no hay una tendencia significativa, se espera que la pendiente se acerque a cero, lo que refuerza la ausencia de una dirección clara en los datos a lo largo del tiempo.

En este caso los resultados de valor p son mayores en comparación con los obtenidos mediante el enfoque AM. En ambos enfoques no hay tendencia significativa en sus datos de caudales.

No hay tendencia significativa en los datos, lo que sugiere que no siguen una distribución normal. Por lo tanto, es necesario ajustar los datos a la distribución adecuada para series sin tendencia y usar el método de Estimación de Máxima Verosimilitud (MLE) para modelar eventos extremos.

Tabla 25. Test de Mann-Kendall de la Serie de Caudales Máximos Anuales de las estaciones de estudiop

Estaciones	Pend. Sen [m3/s/año]	Valor p
CHI	0.017	0.491
ECI	0.179	0.516
ETI	0.495	0.371
EAP	1.098	0.254
HBR	0.135	0.257
LEN	-0.113	0.829
MLC	0.516	0.25
PIM	0.071	0.331
PNA	1.373	0.441
PPL	0.03	0.259
PSC	-0.429	0.686
PTU	1.033	0.342

Ajuste de probabilidad de distribución en el enfoque POT

Se aplicó la Distribución de Pareto Generalizada (**GPD**) para el análisis de los datos de caudales, dado que esta distribución es ampliamente reconocida como la distribución que se ajusta más a este enfoque (ver **Capítulo II**) para modelar eventos extremos. Esta elección se justifica por su capacidad para describir con precisión la cola de distribución de eventos raros y extremos, un aspecto crítico en el análisis de fenómenos de alta magnitud y baja frecuencia. Los parámetros promedio estimados de la GPD para cada estación, incluyendo loc (ubicación), scale (escala) y shape (forma), se presentan en el **Anexo 9**, y fueron obtenidos mediante el método de máxima verosimilitud (MLE).

Los gráficos cuantiles-cuantiles (Q-Q plots), Densidad (Density plot), Probabilidad (Probability plot) y Nivel de retorno (Return Level plot), mostrados en la **Figura 43**, compara la distribución GPD con los valores empíricos de caudales excedentes, es una manera eficaz de validar la distribución GPD.

En general, los gráficos Q-Q muestran que los puntos tienden a alinearse con la línea diagonal en los caudales menores. Sin embargo, a medida que aumentan los cuantiles de caudales, la dispersión de los puntos aumenta. Esto indica que la distribución GPD se ajusta bien a los caudales menores, pero el ajuste se vuelve menos preciso en los valores extremos más altos.

Los gráficos Density revelan un buen ajuste de la distribución en la cola de la distribución de caudales de excedencia. Esto sugiere que GPD captura adecuadamente la variabilidad y el comportamiento de los caudales extremos.

Los gráficos Probability muestran en su mayoría un buen ajuste, con los puntos alineándose estrechamente a la línea teórica. Sin embargo, en la gráfica (b), correspondiente a la estación PSC, se observa una mayor dispersión en el centro de los valores.

Los gráficos Return Level muestran un buen ajuste, indicando que los retornos indicando que los niveles de caudal esperados para diferentes periodos de retorno se alinean adecuadamente con las predicciones del modelo de distribución GPD.

Los gráficos correspondientes a las demás estaciones se encuentran en los **Anexo 10**.

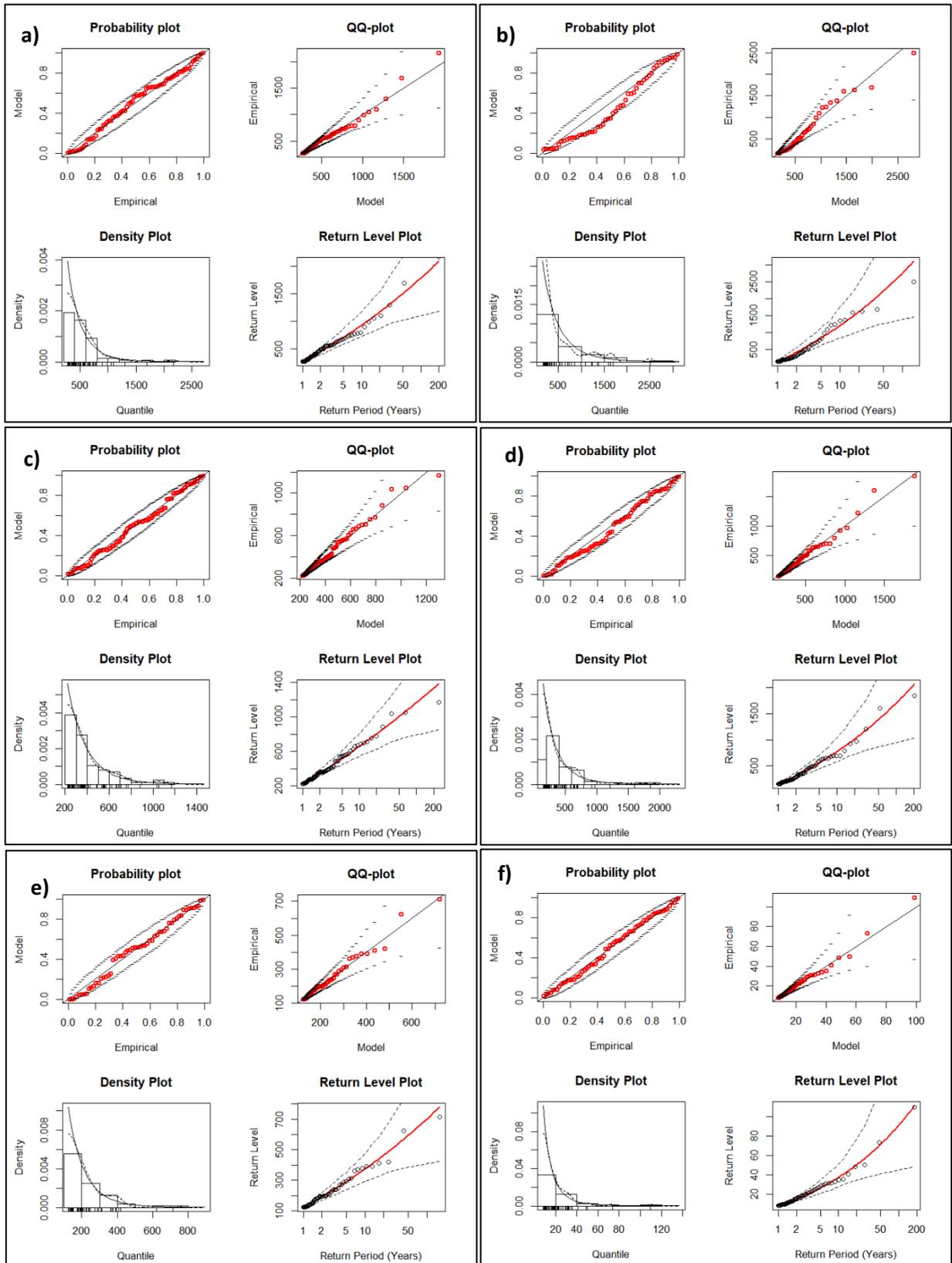


Figura 43. Ajuste de la Distribución de Pareto Generalizada a los Picos sobre Umbrales para las Estaciones PTU (a), PSC (b), ECI (c), ETI (d), LEN (e) y CHI (f)

Determinación de umbrales de inundación aplicando el enfoque POT

Se han extraído los umbrales de caudales extremos para una serie de períodos de retorno (TR). Los períodos de retorno son 2.33, 5 y 10 años, de acuerdo con la metodología (**Capítulo III**) considerados para los umbrales de alerta de inundación. Además, se obtuvieron los umbrales de los períodos de retorno de 25, 50, 100, 200 y 500 años para diseño de caudales. Estos umbrales representan los caudales esperados para eventos con la probabilidad de ocurrir una vez en el intervalo de años correspondiente (ver **Figura 44**).

Para cada estación y cada período de retorno, se ha estimado el umbral de caudal extremo utilizando el modelo GPD. Estos resultados se almacenan en la matriz u , donde cada fila corresponde a un período de retorno y cada columna corresponde a una estación hidrométrica (ver **Tabla 27**).

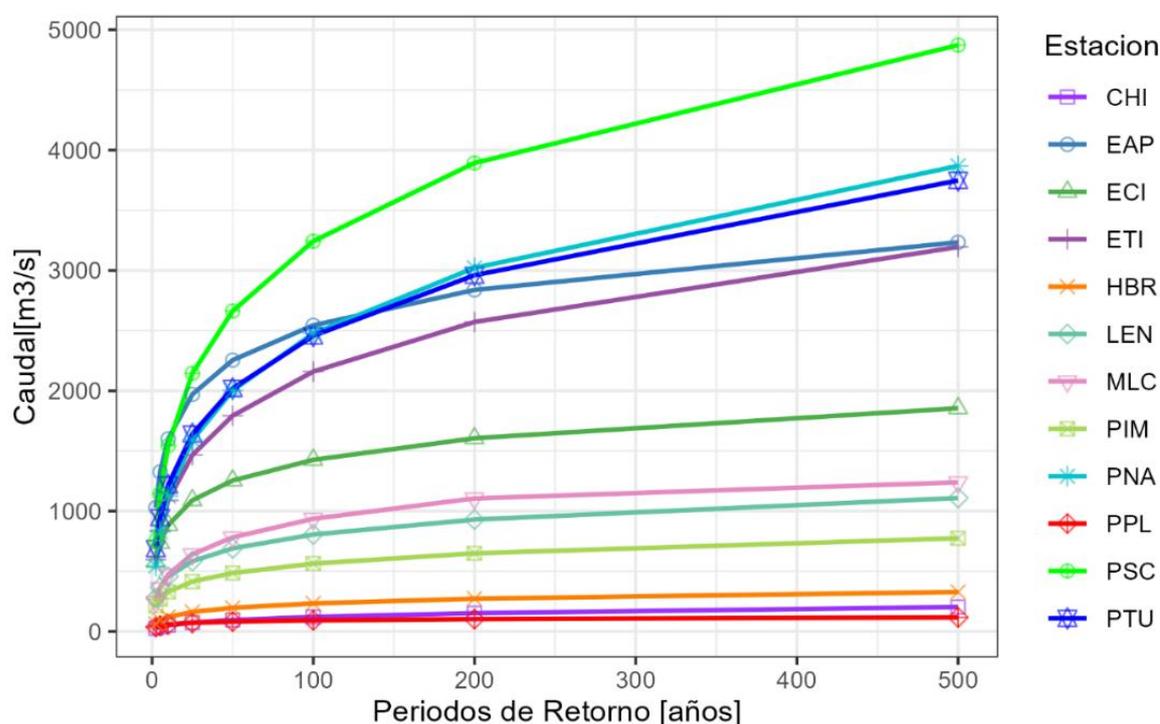


Figura 44. Umbrales de eventos extremos y período de retorno en las estaciones de estudio. Aplicando el enfoque POT

Las estaciones PSC, PNA, PTU, EAP y ETI y muestran los caudales extremos más altos, superando los 3000 m³/s para periodos de retorno largos (TR = 500 años).

Las estaciones como ECI, LEN y MLC presentan caudales máximos que varían entre 1000 y 3000 m³/s para periodos de retorno similares.

En la **Figura 45**, se presentan los umbrales de eventos extremos en caudales históricos utilizando el enfoque POT para las estaciones PTU, ETI, ECI, PIM, LEN, EAP, PNA, y PSC. Los análisis indican que las estaciones PTU y ETI tienen los umbrales más altos, lo que sugiere que estas estaciones son más susceptibles a experimentar eventos extremos de caudal de mayor intensidad. En contraste, las estaciones ECI y PIM muestran umbrales más bajos, lo que podría reflejar una menor magnitud de eventos extremos en esas áreas.

Tabla 26. Umbrales de potenciales inundaciones en las estaciones estudiadas obtenidos con el enfoque POT

TR	PTU	ETI	ECI	PIM	LEN	EAP	CHI	PNA	PPL	PSC	HBR	MLC
2.33	688.2	596.5	578.60	213.3	276.6	1028.1	26.3	544	37	755.6	62.6	246
5	945.6	839.7	739.16	271.4	366.9	1325.7	38.4	827.9	48.2	1145.4	92	360.1
10	1217	1089.1	957.57	329.3	455.8	1600.3	51.8	1126.3	58.3	1543.9	120.8	474
25	1641.1	1466.5	1090.1	414.4	584.4	1970	74.1	1590.2	71.8	2144.8	162.2	641.5
50	2019.7	1793.1	1254.5	485.8	690.7	2254.9	95.2	2002.6	82.1	2663	196.2	782.3
100	2456.5	2159.8	1426.2	563.9	805.6	2544.2	120.7	2476.6	92.4	3243.2	232.7	936.5
200	2960.6	2571.8	1605.7	649.3	929.7	2838.2	151.8	3021.5	102.8	3893	272	1105.5
500	3748	3195.2	1855.2	774.8	1109.3	3234	203.2	3868.9	116.6	4872.9	328.3	1239.3

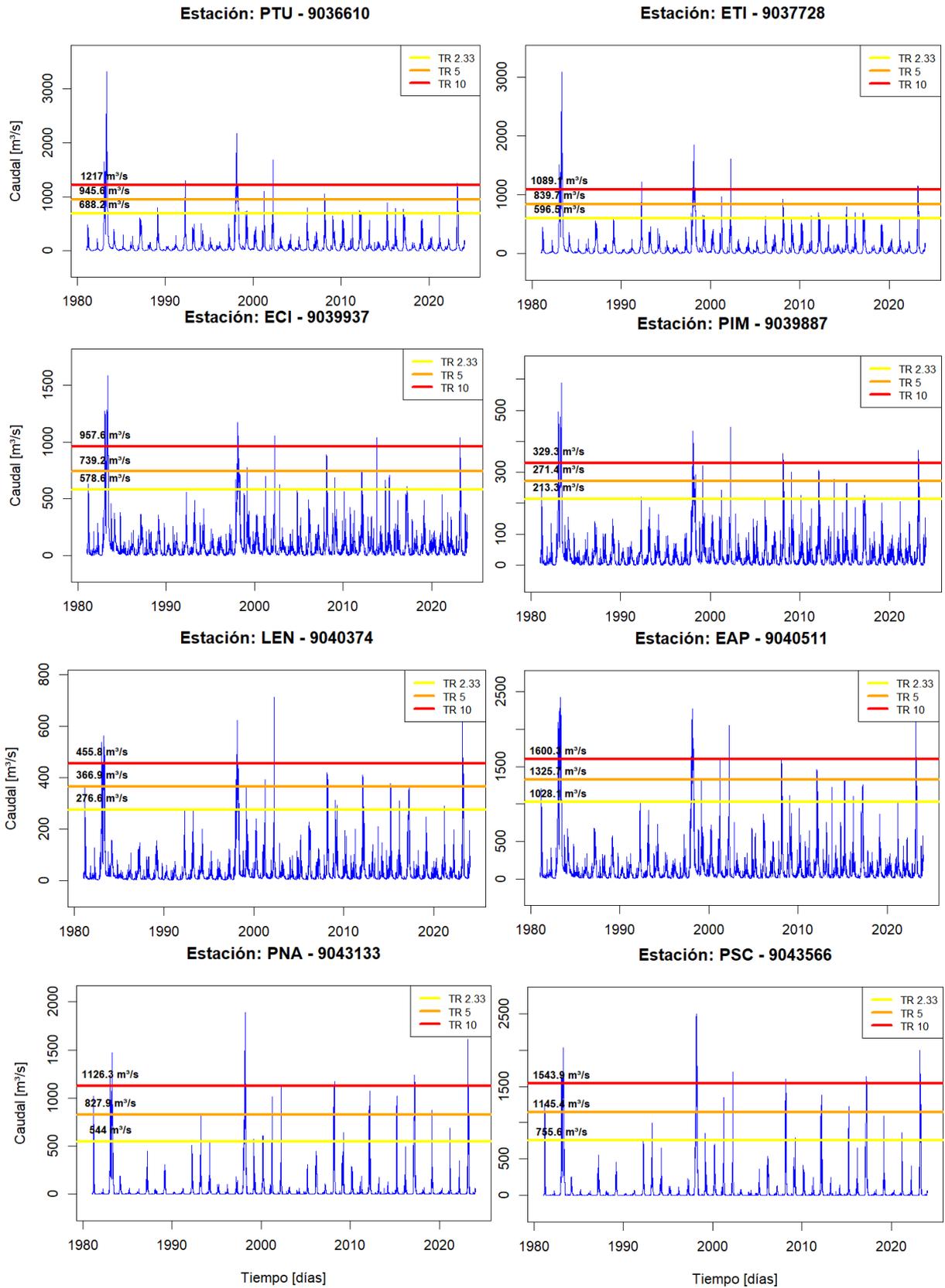


Figura 45. Umbral de eventos extremos en caudales históricos utilizando el enfoque POT en las estaciones PTU, ETI, ECI, PIM, LEN, EAP, PNA y PSC

4.1.5. Comparación entre los enfoques AM y POT

En la **Figura 46**, se muestra la correlación entre los umbrales de alerta de inundación calculados mediante el enfoque de Máximos Anuales (AM) y el enfoque de Picos Sobre Umbrales (POT) donde los valores oscilan entre 0.93 y 0.98. Esta alta correlación indica una relación muy fuerte y positiva entre los umbrales obtenidos por ambos métodos. Es decir, los umbrales de alerta de inundación generados por AM y POT se comportan de manera muy similar y tienden a moverse en la misma dirección.

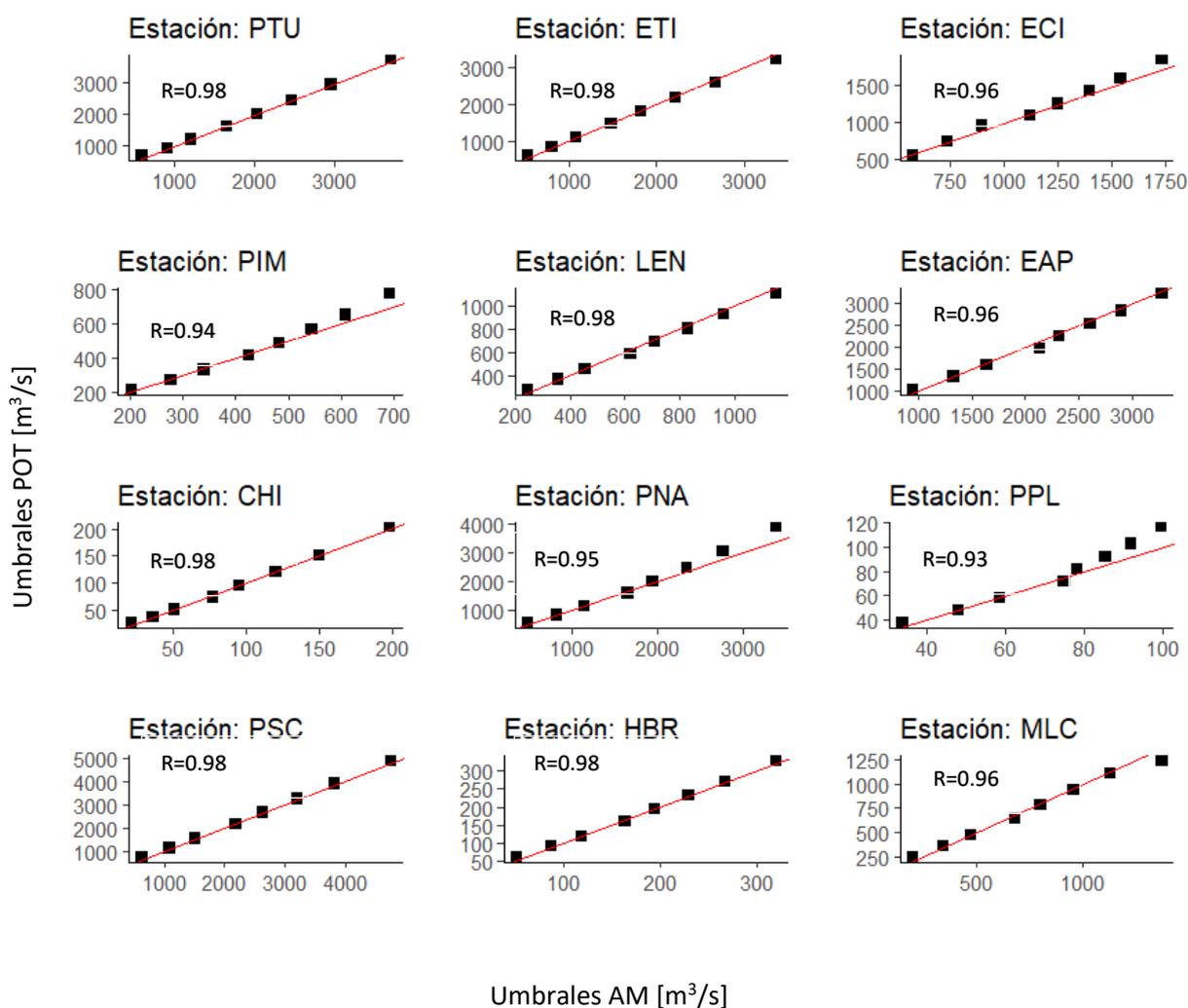


Figura 46. Correlación entre los umbrales obtenidos con los enfoques AM y POT en cada estación de estudio.

La **Figura 47** muestra la comparación de los umbrales de inundación obtenidos con los enfoques POT y AM para cada estación, según el tiempo de retorno. Para las estaciones MLC, PIM, PNA y PPL, se observa una separación significativa entre las curvas de umbrales de los dos enfoques a medida que aumenta el periodo de retorno, indicando diferencias en la magnitud de los umbrales de inundación estimados. En cambio, para las demás estaciones, las curvas de ambos enfoques están más ajustadas y alineadas, sugiriendo que ambos métodos proporcionan resultados similares en cuanto a los umbrales de inundación para diferentes tiempos de retorno.

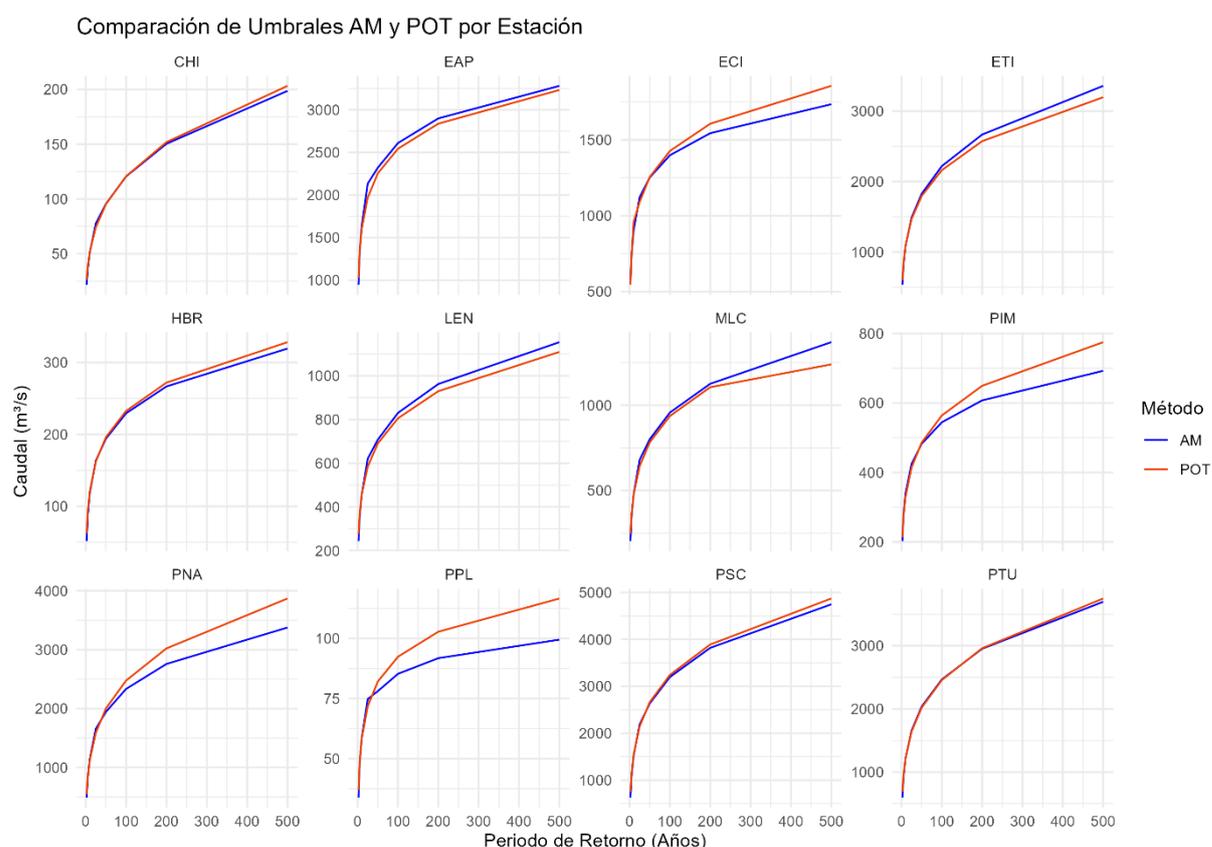


Figura 47. Diferencia entre los umbrales de inundación según el tiempo de retorno para cada estación, comparando el enfoque POT con el enfoque AM

En la **Tabla 28** de métricas de estadísticas, en este caso para comprar la similitud de umbrales entre el enfoque AM y POT, se presentan los valores de PBIAS y RMSE para cada estación analizada.

El PBIAS varía de -6.4% a 2.9%, lo que indica un buen ajuste entre ambos enfoques y refuerza su similitud en los resultados de los umbrales de alerta de inundación.

En el análisis del RMSE, se observa que las mayores discrepancias entre los enfoques se presentan en las estaciones PNA (RMSE = 207) y PPL (RMSE = 87). Estas diferencias sugieren que los umbrales de inundación estimados por los enfoques POT y AM presentan una variabilidad considerable en estas estaciones.

Tabla 27. Métricas estadísticas para la comparación entre umbrales con enfoque POT y AM en las estaciones

Estaciones	PBIAS [%]	RMSE
PTU	-0.9	39.7
ETI	1.9	74.4
ECI	-2.2	55.7
PIM	-3.6	34.1
LEN	2.1	28.6
EAP	2.1	79.1
CHI	-1.3	2.80
PNA	-5.9	207.0
PPL	-6.4	87.3
PSC	-2.1	7.89
HBR	-2.5	5.84
MLC	2.9	52.0

4.1.6. Validación de umbrales de alerta de inundación

La **Figura 48** ilustra la comparación entre los umbrales de inundación determinados por la plataforma PHISIS, el enfoque AM y el enfoque POT para los períodos de retorno de alerta de inundación (2.33, 5 y 10 años) en las estaciones hidrométricas disponibles en PHISIS-SENAMHI. En la estación hidrométrica PTU, las líneas de umbral de inundación obtenidas con los métodos POT y PHISIS están bastante cerca una de la otra. Aunque no se cruzan, esto indica que las diferencias entre los umbrales estimados por PHISIS y POT son relativamente pequeñas.

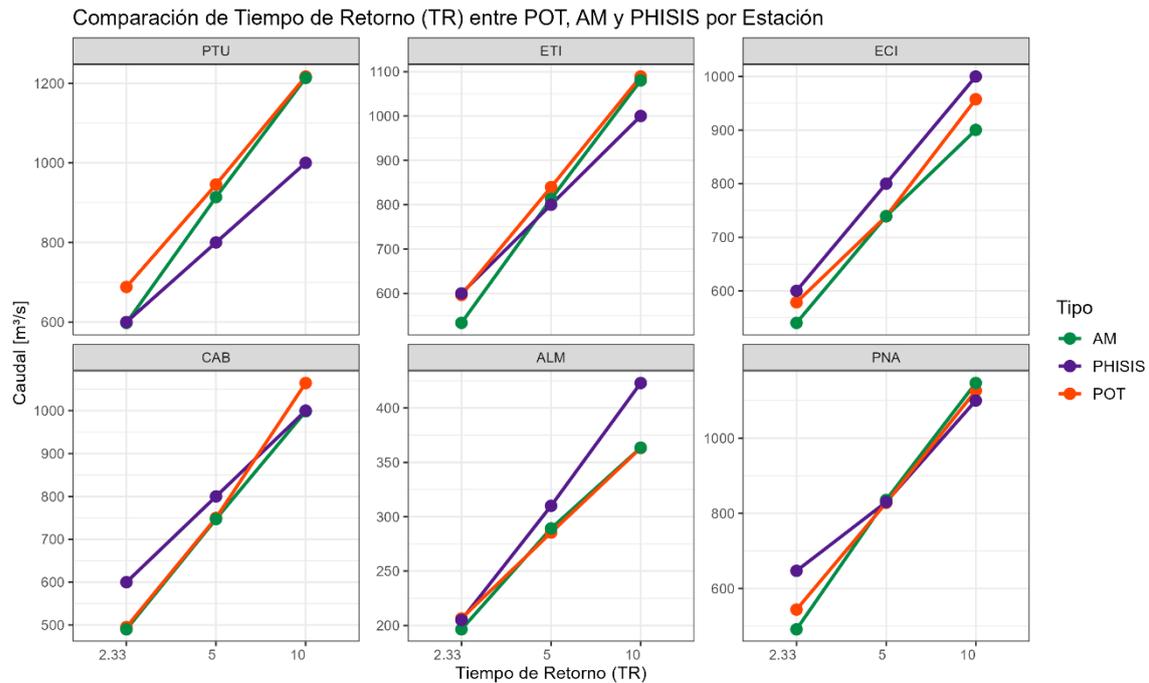


Figura 48. Comparación de umbrales de alerta de inundación para 2.33, 5 y 10 años de periodo de retorno de PHISIS - SENAMHI con los extraídos del enfoque POT y el enfoque AM en las estaciones PTU, ETI, ECI, CAB, ALM y PNA

En la **Tabla 28** se presentan los resultados de las métricas estadísticas utilizadas para validar los umbrales de inundación determinados mediante el enfoque POT en las estaciones PTU, ETI, ECI, CAB y ALM. Los resultados muestran un buen ajuste en todas las estaciones. No obstante, la estación PTU presenta un PBIAS de 18.8, lo que indica un sesgo moderado, ya que supera el 10%. A pesar de esto, los resultados de las demás métricas sugieren un ajuste satisfactorio en esta estación.

En la **Tabla 29** se presentan los resultados de las métricas estadísticas utilizadas para validar los umbrales de inundación determinados mediante el enfoque AM en las estaciones PTU, ETI, ECI, CAB y ALM. Al igual que en el enfoque POT, todas las estaciones muestran un buen ajuste. La estación PTU presenta un PBIAS de 13.6, que supera ligeramente el 10%, indicando que el PBIAS en esta estación es mejor con el enfoque AM en comparación con el enfoque POT. Sin embargo, en las métricas de KGE y NSE, el enfoque POT muestra un mejor desempeño.

En general, el enfoque POT muestra mejores resultados de validación en la mayoría de las estaciones en comparación con el enfoque AM.

Tabla 28. Resultados de validación de umbrales de inundación determinadas mediante el enfoque POT en estaciones hidrométricas de PTU, ETI, ECI, CAB, ALM y PNA

MÉTRICAS ESTADÍSTICAS - ENFOQUE POT						
ESTACIONES	PBIAS [%]	RMSE [m ³ /s]	KGE	NSE	MD [m ³ /s]	R
PTU	18.8	159	0.63	0.67	0.58	0.98
ETI	5.2	56.4	0.76	0.67	0.86	0.99
ECI	-5.2	44.6	0.93	0.69	0.85	0.99
CAB	-3.8	76.7	0.57	0.45	0.79	0.99
ALM	-8.8	37.3	0.71	0.61	0.79	0.99
PNA	-3.1	61.4	0.72	0.73	0.88	0.99

Tabla 29. Resultados de validación de umbrales de inundación determinadas mediante el enfoque AM en estaciones hidrométricas de PTU, ETI, ECI, CAB, ALM y PNA

MÉTRICAS ESTADÍSTICAS - ENFOQUE AM						
ESTACIONES	PBIAS [%]	RMSE [m ³ /s]	KGE	NSE	MD [m ³ /s]	R
PTU	13.6	140	0.44	0.60	0.71	0.98
ETI	1.1	60.7	0.63	0.61	0.83	0.98
ECI	-9.2	75.7	0.86	0.45	0.73	0.99
CAB	-6.8	70.4	0.72	0.59	0.83	0.99
ALM	-9.5	36.7	0.75	0.60	0.78	0.99
PNA	-4	93.9	0.56	0.57	0.82	0.98

La **Tabla 30** presenta los resultados de las métricas estadísticas de validación para los enfoques AM y POT, comparados con los umbrales de alerta de inundación de PHISIS-SENAMHI. Ambos enfoques demuestran ser aceptables, ya que muestran un sesgo bajo (con PBIAS entre -1.7 y 1.5, lo cual está dentro del intervalo aceptable de $\pm 10\%$), una buena correlación de Pearson (0.96 para AM y 0.97 para POT, ambos superiores a 0.7), y valores de KGE, NSE y MD aceptables (mayores a 0.5).

Sin embargo, el enfoque POT tiene algunas ligeras ventajas. Específicamente, POT presenta un RMSE ligeramente inferior (83.23 frente a AM), un MD ligeramente mayor (0.86), y un valor de R de 0.97. Además, el PBIAS de POT es ligeramente mejor (1.5) en comparación con AM. Estos resultados sugieren que, aunque ambos enfoques son válidos, el enfoque POT podría ofrecer una precisión y ajuste ligeramente superiores para los umbrales de alerta de inundación evaluados.

En esta evaluación, se han validado los umbrales de retorno de 2.33, 5 y 10 años, que son los períodos de retorno utilizados por la plataforma PHISIS para alertas de inundación. Estos períodos son importantes para los sistemas de alerta de inundación, ya que ayudan a identificar eventos extremos y gestionar riesgos.

Tabla 30. Resultado de métricas de validación para los enfoques AM y POT evaluados con los umbrales de PHISIS

MÉTRICAS ESTADÍSTICAS						
ENFOQUES	PBIAS	RMSE	KGE	NSE	MD	R
	[%]	[m ³ /s]			[m ³ /s]	
POT	1.5	83.23	0.82	0.69	0.86	0.97
AM	-1.7	85.68	0.81	0.68	0.85	0.96

La **Figura 49** ilustra las diferencias entre los umbrales de alerta de inundación de POT y PHISIS. Las diferencias están representadas por barras que muestran si el umbral de alerta de inundación de POT es mayor o menor que el de PHISIS en cada estación y período de retorno.

La estación con mayor diferencia es PTU. En la estación hidrométrica PTU, las barras indican que los umbrales de inundación calculados por el enfoque POT son mayores que los obtenidos por PHISIS para los diferentes períodos de retorno.

En la **Figura 50** se observa la correlación entre los umbrales de alerta de inundación obtenidos de PHISIS y los umbrales de alerta determinados por el enfoque POT, con un coeficiente de correlación de Pearson (R) de 0.97. Este alto valor de correlación sugiere una fuerte concordancia entre ambos métodos, indicando que los umbrales estimados son muy similares, a pesar de las diferencias en las metodologías empleadas. Estos resultados refuerzan la fiabilidad de los umbrales obtenidos por el enfoque POT para la gestión del riesgo de inundaciones.

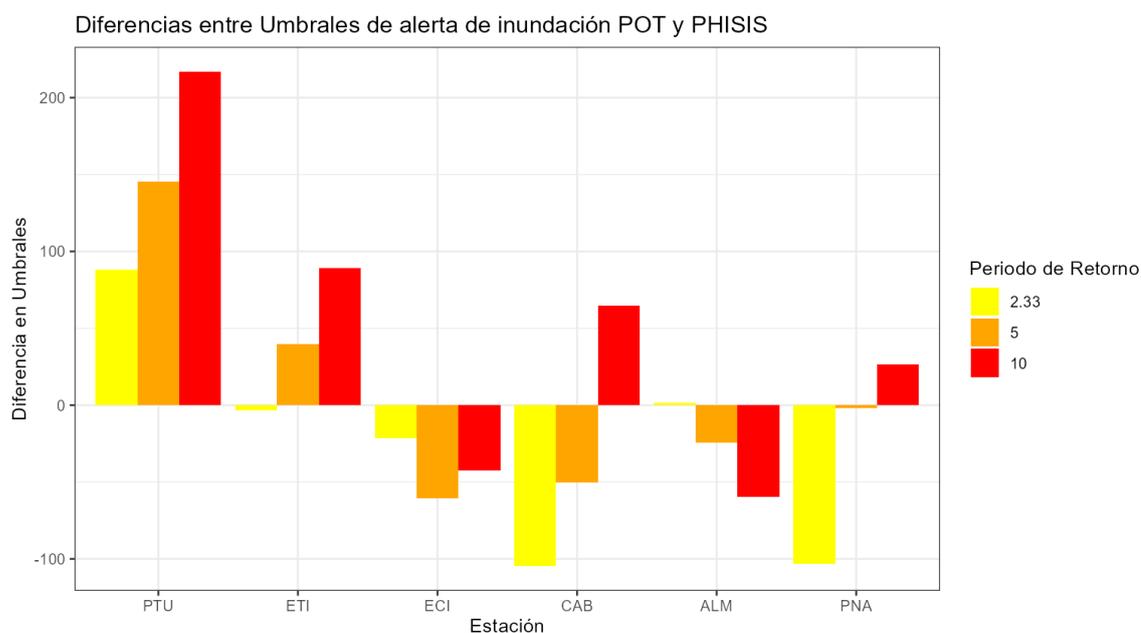


Figura 49. Diferencias entre umbrales de alerta de inundación entre POT y PHISIS en las estaciones hidrométricas PTU, ETI, ECI, CAB, ALM y PNA

que podrían ocurrir en un horizonte temporal moderado, considerando eventos menos frecuentes, pero más significativos.

Finalmente, la **Figura 53** muestra los umbrales de alerta de inundación para un periodo de retorno de 10 años ($TR = 10$). Esta figura proporciona los umbrales de alerta para un periodo de retorno más largo, ofreciendo información sobre las inundaciones raras, pero de alta magnitud que podrían ocurrir en un intervalo de diez años.

Cada una de estas figuras ilustra los umbrales específicos para los tramos de ríos identificados con el código COMID, facilitando así la evaluación de riesgos de inundación en función del periodo de retorno considerado.

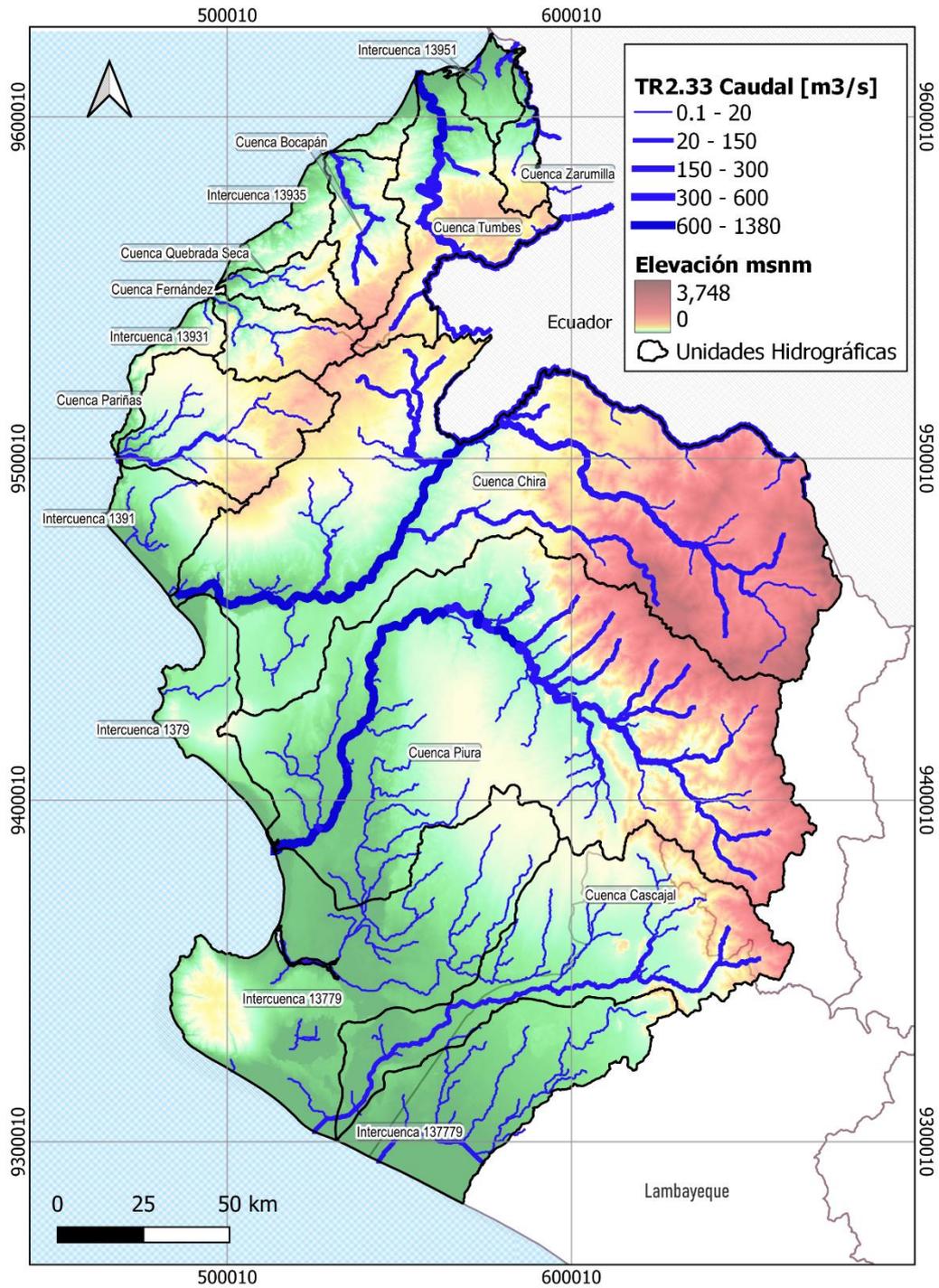


Figura 51. Umbral de alerta de inundación en los tramos de ríos de la Costa norte peruana para un periodo de retorno de 2.33 años ($TR = 2.33$) usando el enfoque POT

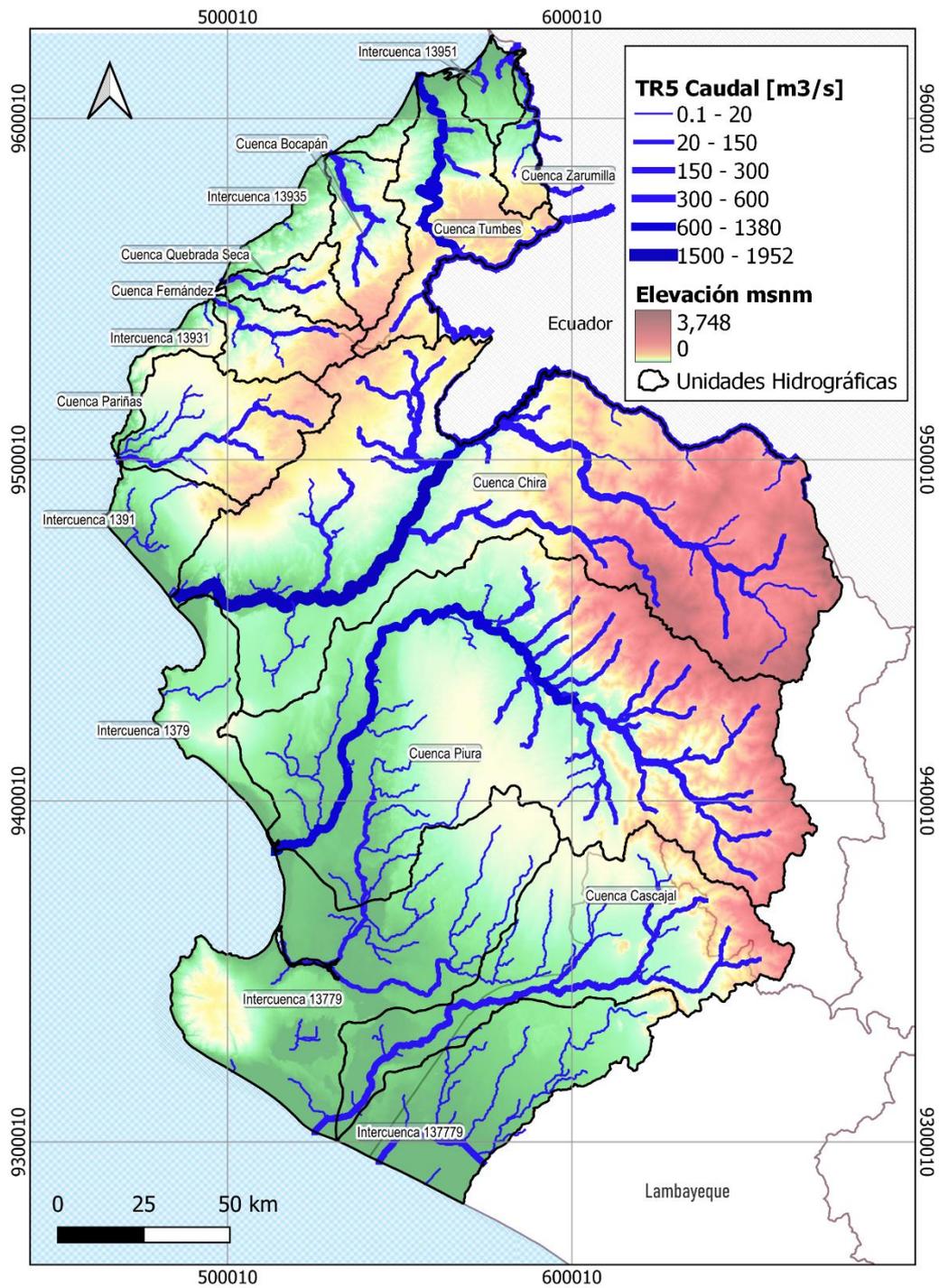


Figura 52. Umbrales de alerta de inundación en los tramos de ríos de la Costa norte peruana para un periodo de retorno de 5 años ($TR = 5$) usando el enfoque POT

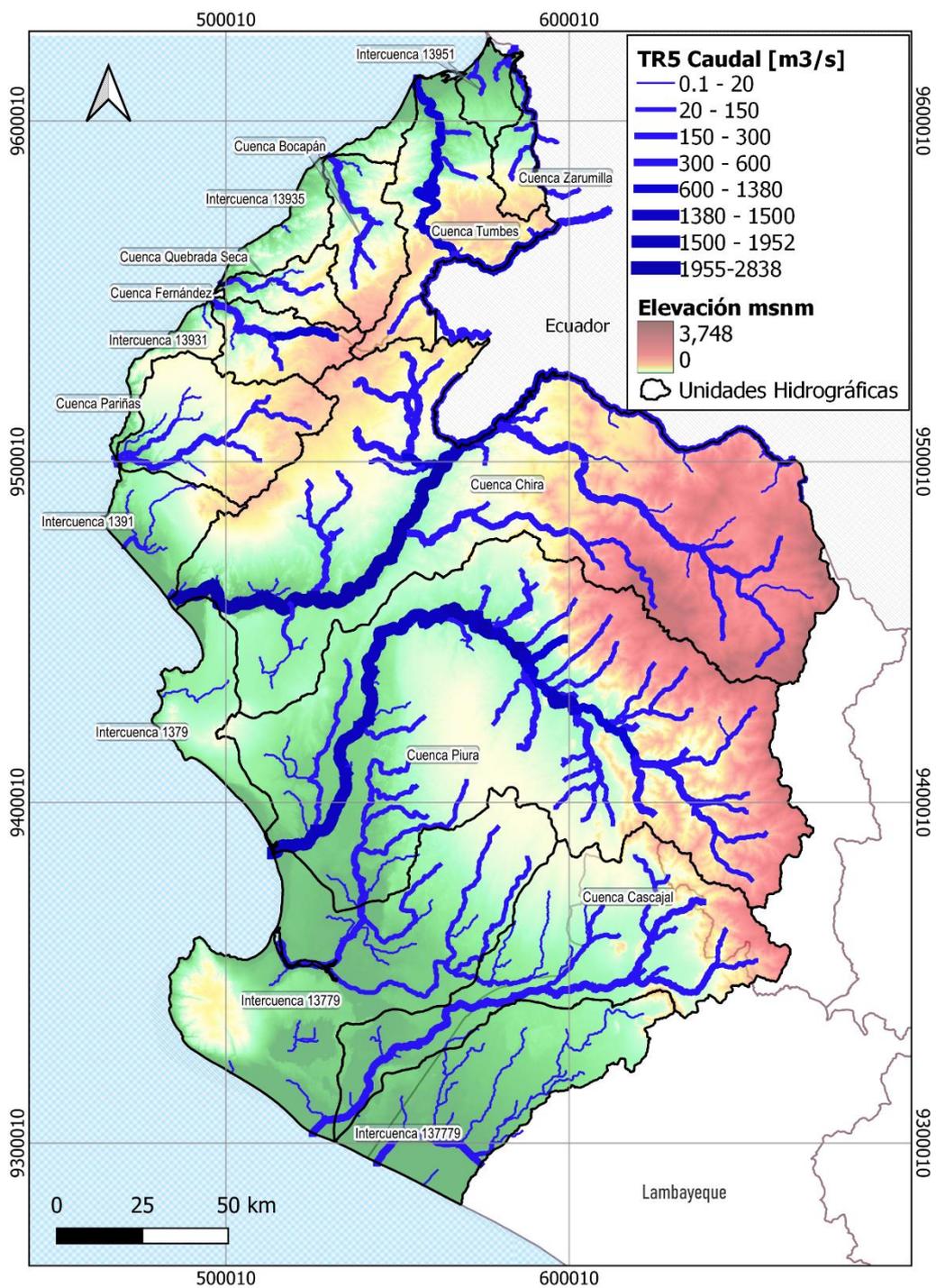


Figura 53. Umbral de alerta de inundación en los tramos de ríos de la Costa norte peruana para un periodo de retorno de 10 años (TR = 10) usando el enfoque POT

4.2. Discusión

La baja densidad de estaciones hidrométricas y la limitada disponibilidad de datos en la costa norte peruana presentan desafíos significativos para evaluar y gestionar los recursos hídricos. Actualmente, solo seis de las diecisiete unidades hidrográficas en la región están siendo monitoreadas, lo que resulta en una cobertura incompleta que limita el estudio y manejo efectivo de los flujos de agua. Tiruye et al. (2024) y Mishra et al. (2024) destacan que la escasez de estaciones meteorológicas dificulta el monitoreo y modelado de eventos extremos, como las inundaciones. Para abordar estos problemas, se recomienda ampliar la red de estaciones hidrométricas y utilizar tecnologías avanzadas, como modelos de simulación, para obtener una visión más completa de la situación. En este contexto, se ha optado por utilizar caudales simulados del producto PISCO HyD ARNOVIC, el cual ha sido aplicado en diversas investigaciones realizadas por SENAMHI.

La aplicación de caudales de PISCO HyD ARNOVIC en esta investigación fue la determinación de umbrales de alerta de inundación, no solo para las cuencas y subcuencas donde se encuentran las estaciones hidrométricas de la red de SENAMHI, sino también para tramos de ríos en subcuencas no monitoreadas. En total, se identificaron 352 tramos de ríos, cada uno correspondiente a una subcuenca específica en el área de estudio. Esta ampliación del análisis a subcuencas no monitoreadas es crucial para mejorar la preparación y respuesta ante eventos de inundación en la costa norte peruana.

Para la determinación de alerta de inundación hay dos enfoques: el enfoque de Picos Sobre Umbrales (POT) y el enfoque de Máximos Anuales (AM), como lo afirman Pan et al. (2022), Bezak et al. (2014) y Cunnane (1973). El enfoque AM, adoptado por SENAMHI para determinar umbrales de alerta en el producto SONICS, se basa en el análisis de caudales máximos anuales. Este método utiliza menos datos, enfocándose en los caudales extremos anuales para la estimación de umbrales. En contraste, el enfoque POT utiliza una mayor cantidad de datos, al basarse en eventos de caudales extremos sobre umbrales (u) específicos, lo que proporciona una mayor precisión en la estimación de eventos extremos. El enfoque POT demuestra ser más eficaz que AM cuando se cuenta con al menos 1.65 caudales por año, según los estudios de Cunnane (1973) y Tavares & Da Silva (1983). Estos estudios sugieren que un umbral (u) POT bajo puede ser más adecuado en tales condiciones. En la

estación PNA (muestra de 1982-2023, correspondiente a 42 años), el enfoque POT presenta mejores resultados a pesar de que el promedio de caudales sobre el umbral es inferior a 1.65 caudales por año (con 57 datos que indican un promedio de 1.35 caudales por año). Los resultados son los siguientes: para el enfoque POT en la estación PNA, se obtienen un PBIAS de -3.1, RMSE de 61.4, KGE de 0.72, NSE de 0.73, MD de 0.88 y R de 0.99. En contraste, con el enfoque AM, los valores son PBIAS de -4.0, RMSE de 93.9, KGE de 0.56, NSE de 0.57, MD de 0.82 y R de 0.98.

El enfoque POT, se caracteriza por su complejidad debido a la necesidad de seleccionar un umbral (u) POT adecuado, lo que lo diferencia del enfoque AM. La elección del umbral en el POT es fundamental para obtener resultados precisos en el análisis de eventos extremos. Langousis et al. (2016) y Pan et al. (2022) destacan que el método del Mean Residual Life Plot (MRLP) es una herramienta prometedora para la detección de umbrales.

Para evaluar la precisión de los enfoques, se compararon los umbrales obtenidos con el POT y el AM con los umbrales de alerta proporcionados por la plataforma PHISIS de SENAMHI. Los resultados muestran que el enfoque POT presenta ventajas en precisión: tiene un RMSE ligeramente menor (83.23 frente a AM), un MD ligeramente superior (0.86), y un valor de correlación R de 0.97. Además, el PBIAS de POT (1.5%) es ligeramente mejor en comparación con el AM, sugiriendo una mayor precisión en la estimación de los umbrales de alerta de inundación. Este hallazgo es consistente con estudios previos, Bezak et al., (2014b); Pan y Rahman (2022) y, Swetapadma y Ojha (2023) también encontraron que el enfoque POT superaba al AM en precisión para la estimación de umbrales de alerta.

La validación se centró en los umbrales de retorno de 2.33, 5 y 10 años, utilizados por la plataforma PHISIS para alertas de inundación. Aunque los períodos de 25, 50, 100, 200 y 500 años no se validaron directamente en este estudio, su validez se infiere del hecho de que el enfoque AM ha sido previamente validado por SENAMHI en el producto SONICS.

Coles (2001) y Kahal Musakkal et al. (2017), han demostrado que la distribución Generalizada de Valores Extremos (GEV) es la más adecuada para el enfoque AM. En este estudio, se confirmó que la GEV es la distribución más apropiada para el enfoque AM mediante los tests propuestos por Hailu y Takala (2023). Estos tests

evidencian que la GEV supera a otras distribuciones, como la Weibull, L-Normal, Gumbel y Gamma, en las pruebas estadísticas (Kolmogorov-Smirnov, Anderson-Darling y Chi-Cuadrado) (**Tabla 21**). La GEV resulta ser especialmente adecuada para modelar caudales máximos anuales.

La distribución Generalizada de Pareto (GPD) se ajusta mejor a los datos que superan un umbral (u), en el enfoque POT (Liang et al., 2019; Northrop y Jonathan, 2011). Este ajuste con la GPD confirmó su idoneidad para modelar los eventos extremos en el enfoque POT.

El test de Mann-Kendall (Kendall, 1975; Mann, 1945) aplicado a ambos enfoques mostró que no hay tendencias significativas en los caudales máximos anuales como en los caudales de excedencia, con valores p superiores a 0.05 en todas las estaciones, indicando que no existe un patrón definido en los caudales a lo largo del tiempo con un 95% de confianza.

La estacionalidad también juega un papel importante. Se identificaron valores atípicos en la serie de caudales medios mensuales, coincidiendo con eventos del fenómeno de El Niño. Los picos de caudal se observaron durante los períodos de 1982/1983, 1997/1998 y 2016/2017, con los meses de febrero, marzo y abril mostrando los valores de mayor magnitud. Este comportamiento estacional se reflejó en las estadísticas descriptivas, donde el Coeficiente de Variación en la serie de caudales medios diarios superó el 100% en todas las estaciones, indicando una alta variabilidad y la influencia significativa de eventos estacionales extremos. Esta situación es frecuente en regiones propensas a eventos hidrológicos extremos, como señalan Fenta et al. (2017).

A pesar de las limitaciones, la metodología empleada ha demostrado ser robusta y adaptable a las condiciones locales. El enfoque POT ha mostrado ser ligeramente más preciso para la determinación de umbrales de alerta de inundación en comparación con el enfoque AM. La elección de la distribución GEV para el enfoque AM y la GPD para el enfoque POT se justifica por su capacidad para modelar eventos extremos de manera efectiva. La utilización del método de máxima verosimilitud (MLE) para la estimación de parámetros en distribuciones de eventos extremos ha sido fundamental (Kahal Musakkal et al., 2017; Stedinger et al., 1993).

V. CONCLUSIONES

En este capítulo se detallan las conclusiones alcanzadas en función de los objetivos planteados de la determinación de umbrales de alerta ante inundaciones en la costa norte peruana. Este estudio ha utilizado simulaciones hidrológicas a escala nacional para el período 1981-2023.

- i. El estudio ha permitido determinar umbrales de alerta ante inundaciones en la costa norte peruana mediante simulaciones hidrológicas a escala nacional para el período 1981-2023, utilizando caudales simulados del producto PISCO HyD ARNOVIC. Se han obtenido umbrales de alerta de inundación para los periodos de retorno de 2.33, 5 y 10 años utilizando dos enfoques de Pico sobre Umbral (POT) y el enfoque de Caudales Máximos Anuales (AM). Esta metodología basada en caudales simulados ha demostrado ser viable para trabajos en hidrología, permitiendo la obtención de umbrales para 352 tramos de ríos y cubriendo extensamente el área de la costa norte peruana.
- ii. La evaluación comparativa entre el enfoque de Pico sobre Umbral (POT) y el enfoque de Caudales Máximos Anuales (AM) para la determinación de umbrales de alerta ante inundaciones en la costa norte peruana durante el período 1981-2023 ha revelado que ambos enfoques son efectivos para este objetivo. Al validar ambos enfoques con los umbrales de inundación determinados por la plataforma PHISIS, se observa que ambos métodos son aceptables en términos de precisión. Sin embargo, el enfoque POT presenta algunas ventajas ligeras. En particular, el POT muestra un RMSE ligeramente inferior (83.23 frente a AM), un Índice de Ajuste Modificado (MD) ligeramente superior (0.86), y un valor de correlación (R) de 0.97. Además, el PBIAS del POT es ligeramente mejor (1.5) en comparación con el AM. Estos resultados sugieren que, aunque ambos enfoques son válidos,

el enfoque POT podría ofrecer una precisión y ajuste ligeramente superiores para los umbrales de alerta de inundación evaluados.

- iii. La identificación de las distribuciones de probabilidad teóricas más adecuadas para estimar umbrales de inundación en la costa norte peruana durante el período 1981-2023 ha sido clave para mejorar la precisión en la determinación de dichos umbrales. La revisión de la literatura reveló que, para el enfoque de Pico sobre Umbral (POT), la Distribución Generalizada de Pareto fue la más eficaz. Los resultados demostraron que esta distribución ofreció un rendimiento superior al determinar umbrales de inundación más precisos que los obtenidos mediante el enfoque de Caudales Máximos Anuales (AM). En contraste, para el enfoque AM, la Distribución Generalizada de Valores Extremos (GEV) fue identificada como la más adecuada, según los resultados de los tests estadísticos, incluyendo Kolmogorov-Smirnov, Anderson-Darling y Chi-Square que respaldan esta conclusión.

VI. RECOMENDACIONES

En este capítulo se presentan recomendaciones para futuras investigaciones, basadas en los hallazgos de este estudio. Estas sugerencias buscan optimizar la precisión en la determinación de umbrales de alerta ante inundaciones y mejorar la gestión de riesgos en la costa norte peruana.

- i. Para mejorar la precisión en la determinación de umbrales de alerta ante inundaciones y aumentar la efectividad de las simulaciones hidrológicas, se recomienda complementar las simulaciones hidrológicas con datos observados de caudales para mejorar la precisión de los umbrales de alerta obtenidos. Esto contribuirá a una mejor representación de las condiciones hidrológicas reales y permitirá ajustes más finos en los umbrales estimados. Se sugiere, además, implementar un programa de monitoreo continuo y revisión periódica de los umbrales de alerta para ajustarlos en función de cambios climáticos, nuevas observaciones y mejoras en las simulaciones hidrológicas. Esto permitirá mantener la eficacia de los umbrales de alerta a lo largo del tiempo. Y para mejorar la infraestructura de monitoreo hidrológico en la región, como la instalación de más estaciones de medición, para asegurar una mejor calibración de los modelos y obtener datos más detallados. En particular, la tesis demuestra una utilidad significativa al proporcionar métodos y modelos para estimar información hidrológica en áreas donde actualmente no existen estaciones de medición ni datos disponibles. Este enfoque es crucial para la gestión del riesgo de inundaciones en regiones remotas o menos monitorizadas, ya que permite la estimación de periodos de retorno y otros parámetros hidrológicos clave a partir de simulaciones. De este modo, la tesis llena un vacío importante en el conocimiento y la planificación hidrológica regional, ofreciendo herramientas valiosas para la mitigación de desastres y la protección de comunidades vulnerables.

- ii. Dado que el enfoque de Pico sobre Umbral (POT) ha mostrado un rendimiento superior en términos de precisión y ajuste, se recomienda priorizar su aplicación en estudios futuros para la determinación de umbrales de alerta ante inundaciones. Este enfoque podría optimizar la precisión de las estimaciones en áreas críticas de inundación. Se sugiere continuar perfeccionando el enfoque POT, en particular en la selección del umbral (u), explorando métodos estadísticos adicionales que permitan identificar el umbral óptimo con mayor precisión. Asimismo, se recomienda aplicar el enfoque POT en diversas áreas geográficas y a diferentes escalas espaciales, con el fin de validar su eficacia más allá de la costa norte peruana y así generalizar sus beneficios en la determinación de umbrales de inundación a nivel nacional.

- iii. Realizar análisis comparativos adicionales de umbrales de alerta ante inundaciones determinadas con diferentes distribuciones teóricas, en el enfoque AM, que podrían ser relevantes para la estimación de umbrales de inundación, como la Distribución Log-Normal o la Distribución de Weibull. Estos análisis ayudarán a confirmar la robustez de las distribuciones actualmente seleccionadas y a identificar posibles alternativas que podrían mejorar la precisión.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA

- Aceituno, P. (1998). El fenómeno El Niño 1997-1998. *Bulletin de l'Institut français d'études andines*, 27(3). <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=12627309>
- Aguilar, G., & Iza, A. (2009). Gobernanza de aguas compartidas: Aspectos jurídicos e institucionales. *UICN*. <https://www.iucn.org/es/resources/publicacion/gobernanza-de-aguas-compartidas-aspectos-juridicos-e-institucionales-0>
- Aguirre, M. (2011). La cuenca hidrográfica en la gestión integrada de los recursos hídricos. *Redesma*, 5(1). http://www.siagua.org/sites/default/files/documentos/documentos/cuencas_m_aguirre.pdf
- Alfieri, L., Zsoter, E., Harrigan, S., Aga Hirpa, F., Lavaysse, C., Prudhomme, C., & Salamon, P. (2019). Range-dependent thresholds for global flood early warning. *Journal of Hydrology* X, 4, 100034. <https://doi.org/10.1016/j.hydroa.2019.100034>
- Barbería, A. (2016). *Procesos de Poisson para la modelización de sucesos extremos* [Trabajo Fin de Grado, Universidad Zaragoza, Facultad de Ciencias]. <https://zaguan.unizar.es/record/59083?ln=es>
- Bezak, N., Brilly, M., & Šraj, M. (2014a). Comparison between the peaks-over-threshold method and the annual maximum method for flood frequency analysis. *Hydrological Sciences Journal*, 59(5), 959-977. <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.831174>
- Bezak, N., Brilly, M., & Šraj, M. (2014b). Comparison between the peaks-over-threshold method and the annual maximum method for flood frequency analysis. *Hydrological Sciences Journal*, 59(5), 959-977. <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.831174>
- Casella, G., & Berger, R. L. (2002). *Statistical inference* (2. ed). Duxbury.
- Castillo, A., Chang, P., Vélez, J., Zambrano, J., & Mejía, F. (2020a). *Conceptualización de la cuenca de la quebrada Manizales con la distribución de las estaciones de monitoreo para e I SAT. [Esquema]. Umbrales de precipitación basados en intensidad para crecidas torrenciales en la quebrada*

- Manizales, Colombia.
<https://revistas.eia.edu.co/index.php/reveia/article/view/1302/1270>
- Castillo, A., Chang, P., Vélez, J., Zambrano, J., & Mejía, F. (2020b). Umbrales de precipitación basados en intensidad para crecidas torrenciales en la quebrada Manizales, Colombia. *Revista EIA*, 17(33).
<https://doi.org/10.24050/reia.v17i33.1302>
- Clark, M. P., Nijssen, B., Lundquist, J. D., Kavetski, D., Rupp, D. E., Woods, R. A., Freer, J. E., Gutmann, E. D., Wood, A. W., & Brekke, L. D. (2015). A unified approach for process-based hydrologic modeling: 1. Modeling concept. *Water Resources Research*, 51(4), 2498-2514.
<https://doi.org/10.1002/2015WR017200>
- Cody, R. P., & Smith, J. K. (1987). *Applied statistics and the SAS programming language* (2nd ed). North-Holland.
- Coles, S. (2001). *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values*. Springer London. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-3675-0>
- CONDESAN, Z. (2019). *Red internacional de socios locales y académicos de la iMHEA se reunieron en Cusco para compartir avances y desafíos del monitoreo hidrológico en la región andina*.
<https://condesan.org/2019/02/06/red-internacional-socios-locales-academicos-la-imhea-se-reunieron-cusco-compartir-avances-desafios-del-monitoreo-hidrologico-la-region-andina/>
- Cox, D. R., & Hinkley, D. V. (1979). *Theoretical Statistics* (0 ed.). Chapman and Hall/CRC. <https://doi.org/10.1201/b14832>
- CRED. (2022). *Disasters Year in Review 2021* (Reporte 6; p. 1). Centre for Research on the Epidemiology of Disasters.
<https://cred.be/sites/default/files/CredCrunch66.pdf>
- Cruz, J. (2020). *Análisis regional de caudales para determinar umbrales de inundación en la región hidrológica VI del pacífico del Perú* [Universidad Señor de Sipán]. <https://hdl.handle.net/20.500.12802/8067>
- Cunnane, C. (1973). A particular comparison of annual maxima and partial duration series methods of flood frequency prediction. *Journal of Hydrology*, 18(3-4), 257-271. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(73\)90051-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(73)90051-6)
- D. N. Moriasi, J. G. Arnold, M. W. Van Liew, R. L. Bingner, R. D. Harmel, & T. L. Veith. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy

- in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900.
<https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- Delavaud, C. (1985). Sobre las Inundaciones Catastróficas Del Norte Del Perú El Niño: Mitos y Realidades. *Revista Geográfica*, 101, 133-139.
<http://www.jstor.org/stable/40992489>.
- Díez, A., Llorente, M., Ballesteros, J. A., & Ruiz, V. (2009). Fundamentos conceptuales y didácticos: Riesgo por avenidas e inundaciones fluviales. *Enseñanza de las Ciencias*, 173.
- Diodato, N., Guerriero, L., Fiorillo, F., Esposito, L., Revellino, P., Grelle, G., & Guadagno, F. M. (2014). Predicting Monthly Spring Discharges Using a Simple Statistical Model. *Water Resources Management*, 28(4), 969-978.
<https://doi.org/10.1007/s11269-014-0527-0>
- EM-DATA. (2019, junio). *EM-DATA The Emergency Events Database*.
<https://www.emdat.be/>
- Fenta, A. A., Yasuda, H., Shimizu, K., & Haregeweyn, N. (2017). Response of streamflow to climate variability and changes in human activities in the semiarid highlands of northern Ethiopia. *Regional Environmental Change*, 17(4), 1229-1240. <https://doi.org/10.1007/s10113-017-1103-y>
- Fischer, S. (2021). *Comparison of annual maximum series and flood-type-differentiated mixture models of partial duration series* (arXiv:2111.13393). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2111.13393>
- Garabito, A. (2021). *Estimación del caudal máximo en cuencas secas para diseño de defensa ribereña—Caso quebrada Casitas-Bocapán Tumbes-2020* [Universidad Nacional de Tumbes]. <https://repositorio.untumbes.edu.pe/handle/20.500.12874/repositorio.untumbes.edu.pe/handle/20.500.12874/2492>
- González, S. B. G., & Rincón, H. (2011). Metodología para el ajuste de modelos de valor extremo Tipo I (Gumbel) y Log Pearson Tipo III, para series de valores máximos. *Universidad Santo Tomás*, 2(1).
<http://revistas.ustatunja.edu.co/index.php/ingeniomagno/article/view/41>
- Hailu, S., & Takala, D. (2023). Evaluation of CMIP6 model performance and extreme precipitation prediction in the Awash basin. *Heliyon*, 9(11), e21578.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21578>

- Hesarkazzazi, S., Arabzadeh, R., Hajibabaei, M., Rauch, W., Kjeldsen, T. R., Prodocimi, I., Castellarin, A., & Sitzenfrei, R. (2021). Stationary vs non-stationary modelling of flood frequency distribution across northwest England. *Hydrological Sciences Journal*, 66(4), 729-744. <https://doi.org/10.1080/02626667.2021.1884685>
- Kahal Musakkal, N. F., Chin, S. N., Ghazali, K., & Gabda, D. (2017). A penalized likelihood approach to model the annual maximum flow with small sample sizes. *Malaysian Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 13(4), 563-566. <https://doi.org/10.11113/mjfas.v0n0.620>
- Kendall, M. G. (1975). *Rank correlation methods* (4th ed., 2d impression). Griffin; WorldCat.
- Kumar, M., Sharif, M., & Ahmed, S. (2020). Flood estimation at Hathnikund Barrage, River Yamuna, India using the Peak-Over-Threshold method. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 26(3), 291-300. <https://doi.org/10.1080/09715010.2018.1485119>
- Lang, M., Ouarda, T. B. M. J., & Bobée, B. (1999). Towards operational guidelines for over-threshold modeling. *Journal of Hydrology*, 225(3), 103-117. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(99\)00167-5](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(99)00167-5)
- Langousis, A., Mamalakis, A., Puliga, M., & Deidda, R. (2016). Threshold detection for the generalized Pareto distribution: Review of representative methods and application to the NOAA NCDC daily rainfall database. *Water Resources Research*, 52(4), 2659-2681. <https://doi.org/10.1002/2015WR018502>
- Legates, D. R., & McCabe, G. J. (1999). Evaluating the use of “goodness-of-fit” Measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research*, 35(1), 233-241. <https://doi.org/10.1029/1998WR900018>
- León, K. (2018). *Análisis de riesgo en la cuenca baja Puyango-Tumbes, Perú, durante eventos El Niño extremo* [Postgrado, Universidad de Chile]. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/168215>
- Liang, B., Shao, Z., Li, H., Shao, M., & Lee, D. (2019). An automated threshold selection method based on the characteristic of extrapolated significant wave heights. *Coastal Engineering*, 144, 22-32. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2018.12.001>
- Llauca, H. (2021a). Estudio de modelamiento hidrológico a paso diario a nivel nacional para el monitoreo de potenciales inundaciones. Estudio Final.

- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú - SENAMHI.*
<https://doi.org/10.4211/hs.7046f3efa5db4cb78296fa06d833d721>
- Llauca, H. (2021b). *Series de tiempo de la precipitación (PR) y el caudal (QR) diario simulado para la subcuenca y tramo de río con COMID=9074427. [Gráfica]. Lectura de datos del producto PISCO_HyD_ARNOVIC v1.0.*
- Llauca, H., & León, K. (2020). *Sistema de Observación de Inundaciones Potenciales del Senamhi (SONICS).* 17.
- Llauca, H., Leon, K., & Lavado-Casimiro, W. (2023). Construction of a daily streamflow dataset for Peru using a similarity-based regionalization approach and a hybrid hydrological modeling framework. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 47, 101381. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101381>
- Mann, H. B. (1945). Nonparametric Tests Against Trend. *Econometrica*, 13(3), 245. <https://doi.org/10.2307/1907187>
- MARN. (2011). *Serie "Aprendamos a protegernos" Las Crecidas e Inundaciones* (Fundación Maquilishuatl, Ed.; Vol. 24). <https://docplayer.es/48406543-Las-crecidas-e-inundaciones.html>
- Meijerink, A. M. J., De Brouwer, J. A. M., Mannaerts, C. M., & Valenzuela, C. R. (1994). Introduction to the use of geographic information systems for practical hydrology. *International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation*, 23.
- Metzger, L., & Xuan, Y. (2010). Sistema de alerta de inundaciones en tiempo casi real usando percepción remota para el río Tumbes en Perú. *Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú- SENAMHI.*
<http://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/1048>
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2012). *Manual de hidrología, hidráulica y drenaje* [Manual].
http://transparencia.mtc.gob.pe/idm_docs/normas_legales/1_0_2950.pdf
- Mishra, B. K., Kobayashi, K., Murata, A., Fukui, S., & Suzuki, K. (2024). Hydrologic modeling and flood-frequency analysis under climate change scenario. *Modeling Earth Systems and Environment*, 10(4), 5621-5633. <https://doi.org/10.1007/s40808-024-02082-4>
- Monreal, D. S., Athie, G., & Enzástiga, M. L. R. (2021). Importancia de un monitoreo hidrográfico a largo plazo. *UVserva*, 12, Article 12. <https://doi.org/10.25009/uvs.vi12.2696>

- Montesinos, C. A. (2018). Estimación de Umbrales de Inundación en la Región Hidrográfica del Pacífico. *SENAMHI*. <https://hdl.handle.net/20.500.12542/241>
- Moore, D. S., McCabe, G. P., & Craig, B. A. (2014). *Introduction to the Practice of Statistics*. W. H. Freeman. https://books.google.com.pe/books?id=pX1_AwAAQBAJ
- Mosalve, G. (1995). *Hidrología en la ingeniería*. Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Northrop, P. J., & Jonathan, P. (2011). Threshold modelling of spatially dependent non-stationary extremes with application to hurricane-induced wave heights. *Environmetrics*, 22(7), 799-809. <https://doi.org/10.1002/env.1106>
- OMM. (2022, mayo 18). *Cuatro indicadores clave del cambio climático batieron récords en 2021* [Corporativo]. <https://public.wmo.int/es/media/comunicados-de-prensa/cuatro-indicadores-clave-del-cambio-clim%C3%A1tico-batieron-r%C3%A9cords-en-2021>
- ONU. (2023). *Las inundaciones causadas por El Niño costero en Perú ya han afectado a 400.000 personas* [Noticias]. <https://news.un.org/es/story/2023/05/1520492>
- Ortiz, R. (2022a). *Pequeñas centrales hidroeléctricas* (2.^a ed.). Ediciones de la U.
- Ortiz, R. (2022b). *Representación total de un caudal máximo [imagen]. Pequeñas centrales hidroeléctricas*. https://books.google.com.pe/books?id=oANcEAAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=Pequeñas+centrales+hidroeléctricas+ediciones+de+la+U&hl=es&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q=Pequeñas%20centrales%20hidroeléctricas%20ediciones%20de%20la%20U&f=false
- Pan, X., & Rahman, A. (2021). *Comparison of Annual Maximum and Peaks Over Threshold Methods with Automated Threshold Selection in Flood Frequency Analysis: A Case Study for Australia*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-216479/v1>
- Pan, X., & Rahman, A. (2022). Comparison of annual maximum and peaks-over-threshold methods with automated threshold selection in flood frequency analysis: A case study for Australia. *Natural Hazards*, 111(2). <https://doi.org/10.1007/s11069-021-05092-y>
- Pan, X., Rahman, A., Haddad, K., & Ouarda, T. B. M. J. (2022). Peaks-over-threshold model in flood frequency analysis: A scoping review. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. <https://doi.org/10.1007/s00477-022-02174-6>

- Quinones-Marquez, F., & Guzman-Rios, S. (1986). Determinacion de caudal y tecnicas de muestreo en agua superficial. En *Open-File Report* (85-89). Departamento del Interior de los Estados Unidos, U.S. Geological Survey,. <https://doi.org/10.3133/ofr8589>
- Ramírez, L. (2012a). *Análisis de la implementación de un modelo hidrológico distribuido con información estándar en España* [Tesis de máster, Universidad Politécnica de Valencia]. <http://hdl.handle.net/10251/27255>
- Ramírez, L. (2012b). *Clasificación de Modelos Hidrológicos según grado de agregación. [Representación Gráfica]. Análisis de la Implementación de un Modelo Distribuido con Información Estándar en España.* https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/27255/Tesina_LMRS.pdf?sequence=1
- Rangel, C. (s. f.). *Partes de la cuenca [imagen]*. Recuperado 17 de septiembre de 2022, de [//fr.educaplay.com/ressources-pedagogiques/2285605-partes_de_la_cuenca.html](http://fr.educaplay.com/ressources-pedagogiques/2285605-partes_de_la_cuenca.html)
- Red Humanitaria Nacional, & OCHA. (2017). *Perú: Temporada de Lluvias - Reporte de Situación No. 10 (al 10 de mayo 2017) - Peru | ReliefWeb.* <https://reliefweb.int/report/peru/temporada-de-lluvias-reporte-de-situacion-no-10-al-10-de-mayo-2017>
- Sánchez, R. (2008). Estimación bayesiana en la familia Pareto generalizada. *Revista de Matemática: Teoría y Aplicaciones*, 15(1), 71-82. <https://doi.org/10.15517/rmta.v15i1.289>
- Sanz, J. (2016). *Energía hidroeléctrica (Serie Energías renovables)* (2.ª ed.). <https://puz.unizar.es/909-energia-hidroelectrica-serie-energias-renovables.html>
- Sanz, J., & Bludszuweit, H. (2016). *Curva de caudales medios diarios de un año tipo (en este caso: Promedio de 17 años) [Gráfica]*. *Energía Hidroeléctricas: Serie Energía Renovable.* <https://books.google.com.pe/books?id=Q5BfDgAAQBAJ&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false>
- Sardon, H., Lavado-Casimiro, W., & Felipe, O. (2022). Inventario de datos de eventos de inundaciones del Perú, estudio final. *Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú - SENAMHI.* <http://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/1786>

- Sen, P. K. (1968). Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1379-1389. <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>
- SENAMHI. (2014). *El Fenómeno El Niño en el Perú*. https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2014/07/Dossier-El-Niño-Final_web.pdf.
- SENAMHI. (2024). *El Niño Costero 2023-2024 fue el más intenso de los últimos 20 años en el Oeste de Sudamérica* [Noticias]. <https://www.gob.pe/institucion/senamhi/noticias/944204-el-nino-costero-2023-2024-fue-el-mas-intenso-de-los-ultimos-20-anos-en-el-oeste-de-sudamerica>
- SENAMHI, P. (2022). *Sistema de Observación de Inundaciones Potenciales del Senamhi (SONICS)—(Producto Experimental)*. <https://www.senamhi.gob.pe/?p=observacion-de-inundaciones>
- Stedinger, J. R., Vogel, R. M., & Foufoula-Georgia, E. (1993). Frequency Analysis of Extreme Events. Chapter 18. En *Handbook of Hydrology* (In Maidment, D.R, p. 18.1-18.66).
- Swetapadma, S., & Ojha, C. S. P. (2023). A comparison between partial duration series and annual maximum series modeling for flood frequency analysis. En *Developments in Environmental Science* (Vol. 14, pp. 173-192). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-18640-0.00007-9>
- Tavares, L. V., & Da Silva, J. E. (1983). Partial duration series method revisited. *Journal of Hydrology*, 64(1-4), 1-14. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(83\)90056-2](https://doi.org/10.1016/0022-1694(83)90056-2)
- Taylor, K. E. (2001). Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D7), 7183-7192. <https://doi.org/10.1029/2000JD900719>
- Tiruye, A., Ditthakit, P., Linh, N. T. T., Wipulanusat, W., Weesakul, U., & Thongkao, S. (2024). Comparing WaPOR and ERA5-Land: Innovative Estimations of Precipitation and Evapotranspiration in the Tana Basin, Ethiopia. *Earth Systems and Environment*. <https://doi.org/10.1007/s41748-024-00446-5>
- Tiwari, H., Rai, S. Pd., Sharma, N., & Kumar, D. (2017). Computational approaches for annual maximum river flow series. *Ain Shams Engineering Journal*, 8(1), 51-58. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2015.07.016>
- UNICEF. (2017, diciembre 31). *Peru Humanitarian Situation Report, December 2017—Peru* | *ReliefWeb* [Gubernamental].

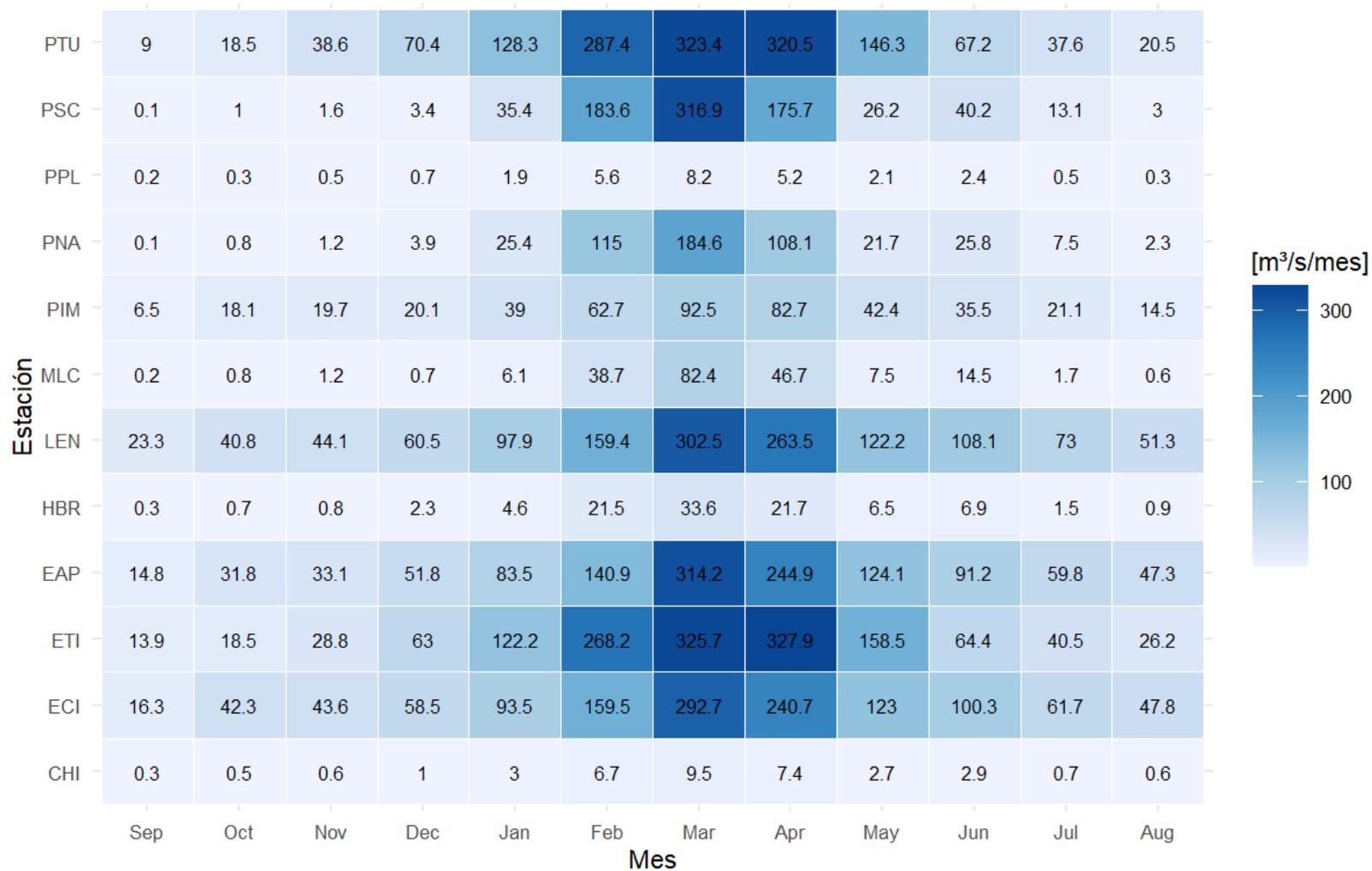
- <https://reliefweb.int/report/peru/unicef-peru-humanitarian-situation-report-december-2017>
- USWRC, (US Water Resources Council). (1976). *Guidelines for determining flood flow frequency*.
- Van, J., Houbrechts, G., Peeters, A., & Petit, F. (2020). Principle of selection of peaks over threshold (POT) in partial series. [Gráfica]. Return Period of Characteristic Discharges from the Comparison between Partial Duration and Annual Series, Application to the Walloon Rivers (Belgium). *Water*. <https://www.mdpi.com/2073-4441/12/3/792>
- Vera, L. (2002). *Análisis de aforo de la Estación Hidrométrica Obrajillo—Período 2000-2001* [Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/Tesis/Ingenie/Vera_H_L/indice.htm
- Vidal, J. (2023). *Informe Técnico: Estimación de Umbrales de Inundación en las cuencas del Chira y Piura*. [Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú – SENAMHI].
- Villaorduña, L. (2021). *Evaluación de estrategias de calibración de modelos hidrológicos y su influencia en la determinación de umbrales de alerta ante inundaciones en la cuenca Chancay Lambayeque*. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). Dirección de Hidrología (DHI).
- Walpole, R. E., Myers, R. H., Myers, S. L., & Ye, K. (Eds.). (2017). *Probability & statistics for engineers & scientists: MyStatLab update* (Ninth edition). Pearson.
- Willmott, C. J., & Matsuura, K. (2005). Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Climate Research*, 30(1), 79-82. JSTOR. <http://www.jstor.org/stable/24869236>
- Zsoter, E., Prudhomme, C., Stephens, E., Pappenberger, F., & Cloke, H. (2020). Using ensemble reforecasts to generate flood thresholds for improved global flood forecasting. *Journal of Flood Risk Management*, 13(4). <https://doi.org/10.1111/jfr3.12658>

ANEXOS

Anexo 1. COMID de los tramos de ríos de la Costa norte peruana

COMID de los 352 tramos de río de la Costa norte peruana															
9035847	9036034	9036059	9036092	9036235	9036486	9036594	9036610	9036651	9036652	9036748	9036751	9036793	9036893	9036924	9036986
9037119	9037156	9037171	9037404	9037520	9037553	9037560	9037644	9037688	9037720	9037728	9037755	9037826	9037858	9037866	9037875
9037876	9037879	9038009	9038015	9038083	9038113	9038114	9038200	9038242	9038245	9038345	9038415	9038455	9038478	9038510	9038528
9038889	9038915	9038946	9039016	9039017	9039042	9039137	9039361	9039410	9039568	9039569	9039725	9039726	9039782	9039808	9039887
9039888	9039937	9039961	9039962	9039963	9039992	9039993	9040023	9040030	9040036	9040053	9040177	9040178	9040179	9040195	9040285
9040286	9040299	9040305	9040319	9040352	9040353	9040374	9040383	9040392	9040394	9040399	9040404	9040410	9040421	9040449	9040452
9040462	9040501	9040510	9040511	9040526	9040558	9040570	9040598	9040628	9040683	9040739	9040812	9040917	9041027	9041051	9041070
9041131	9041144	9041234	9041235	9041307	9041379	9041416	9041421	9041436	9041437	9041447	9041462	9041465	9041484	9041485	9041486
9041487	9041488	9041503	9041504	9041513	9041514	9041554	9041698	9041714	9041807	9041819	9041820	9041926	9042001	9042002	9042025
9042026	9042055	9042056	9042057	9042064	9042065	9042073	9042077	9042078	9042117	9042127	9042159	9042188	9042197	9042266	9042274
9042292	9042297	9042396	9042413	9042504	9042505	9042563	9042596	9042599	9042669	9042675	9042686	9042687	9042691	9042775	9042847
9042882	9042929	9042974	9042990	9042991	9043015	9043062	9043131	9043132	9043133	9043134	9043192	9043205	9043206	9043288	9043315
9043339	9043340	9043362	9043465	9043487	9043565	9043566	9043571	9043595	9043596	9043598	9043609	9043619	9043620	9043627	9043664
9043711	9043722	9043806	9043814	9043815	9043937	9043963	9044052	9044069	9044080	9044084	9044085	9044098	9044099	9044134	9044140
9044145	9044146	9044147	9044259	9044260	9044261	9044296	9044313	9044323	9044331	9044352	9044353	9044389	9044555	9044568	9044601
9044612	9044631	9044667	9044701	9044714	9044729	9044741	9044809	9044847	9044850	9044851	9044904	9044918	9044919	9044986	9044987
9045060	9045134	9045195	9045207	9045536	9045605	9045606	9045898	9045899	9045963	9045964	9046020	9046021	9046022	9046191	9046224
9046225	9046229	9046230	9046247	9046248	9046279	9046280	9046288	9046289	9046303	9046304	9046314	9046354	9046434	9046566	9046573
9046574	9046579	9046583	9046584	9046585	9046597	9046605	9046645	9046646	9046711	9046718	9046719	9046722	9046736	9046737	9046743
9046744	9046789	9046825	9046828	9046841	9046844	9046856	9046891	9046905	9046944	9046980	9046991	9047500	9047510	9047536	9047537
9047546	9047624	9047681	9047701	9047723	9047729	9047887	9047909	9047910	9047917	9047924	9048133	9048153	9048273	9048274	9048339
9048359	9048360	9048417	9048469	9048470	9048524	9048525	9048612	9048616	9048632	9048633	9048672	9048673	9048744	9048749	9048752

Anexo 2. Heatmap de caudales medios mensuales de las estaciones hidrométricas del período de 1981-2023



Anexo 3. Data base de caudal media anual de las estaciones estudiada

dates	CHI	ECI	ETI	EAP	HBR	LEN	MLC	PIM	PNA	PPL	PSC	PTU
1981	9.36	595.65	473.16	555.88	17.69	488.33	14.01	211.90	33.51	7.75	29.71	376.88
1982	185.15	4400.98	7084.30	4166.95	449.48	3957.55	969.93	1604.44	2339.33	114.47	5258.50	7005.16
1983	25.24	1462.22	1263.34	1377.74	65.60	1615.74	116.90	547.67	370.99	21.99	450.61	1334.43
1984	13.59	624.62	533.11	630.66	12.76	574.57	9.69	220.12	58.11	10.92	66.02	476.15
1985	13.35	740.46	779.75	681.89	19.72	632.84	20.14	260.68	74.04	10.27	73.93	707.15
1986	32.99	1257.46	1972.52	1217.51	66.88	1119.08	117.79	407.67	413.74	17.36	635.78	2075.41
1987	11.53	680.67	660.71	638.55	20.49	593.97	17.37	249.95	74.35	8.93	64.63	593.43
1988	32.26	1089.11	1367.35	1007.29	67.59	1122.74	143.91	379.69	446.28	21.89	554.20	1389.91
1989	10.96	624.92	503.40	577.19	13.56	545.72	11.42	235.08	41.18	7.69	43.35	447.39
1990	13.88	735.12	739.62	678.10	19.66	614.40	21.55	255.84	93.97	11.33	108.20	719.54
1991	49.03	1291.54	1800.12	1300.08	91.80	1205.07	193.30	414.91	520.24	29.56	788.47	1834.39
1992	39.43	1334.92	1473.59	1266.66	118.08	1370.25	257.15	456.68	593.39	28.19	818.17	1445.66
1993	37.70	1187.69	1241.02	1113.68	98.16	1265.25	183.07	426.27	465.60	28.62	538.47	1225.21
1994	22.23	732.68	816.97	699.95	29.38	662.54	30.25	254.81	197.72	18.64	214.83	770.59
1995	13.96	753.99	716.46	687.23	23.48	640.20	19.70	268.00	98.16	11.80	112.44	709.53
1996	32.42	896.75	965.23	833.03	35.94	757.78	33.65	303.78	262.42	30.43	329.77	931.13
1997	146.28	3938.73	5723.66	4005.06	473.60	3923.88	1026.27	1484.33	2401.66	91.41	5608.25	5928.66
1998	42.41	1843.32	1892.71	1737.95	154.87	2013.55	314.77	691.99	683.78	36.95	1001.74	1972.13
1999	40.31	1511.60	1432.11	1425.74	134.63	1693.93	288.37	545.45	617.24	37.80	741.93	1398.21
2000	36.93	1400.35	1593.33	1427.16	120.41	1561.83	258.86	486.02	585.34	22.21	950.17	1569.55
2001	43.01	1442.26	1852.70	1496.53	113.34	1606.81	227.18	507.03	553.76	28.47	957.21	1930.95
2002	15.39	872.70	862.53	816.97	27.57	872.86	25.48	321.02	107.75	11.61	120.19	856.85
2003	12.64	721.50	791.76	670.42	19.52	620.21	10.89	250.60	52.51	9.13	56.24	765.62
2004	16.86	888.46	765.21	847.83	50.78	948.64	88.17	322.16	210.32	14.67	224.64	726.98
2005	36.86	1198.18	1262.79	1163.64	105.40	1337.82	221.67	415.18	552.42	31.54	734.60	1251.46
2006	17.87	957.04	1074.36	901.74	32.08	969.64	37.04	336.71	153.11	16.14	166.05	1027.93
2007	56.53	1638.23	1852.40	1641.86	222.19	1881.24	520.81	590.52	961.48	43.83	1756.11	1919.41
2008	49.47	1412.78	1595.74	1328.75	115.66	1747.51	236.17	520.87	740.26	50.23	967.68	1656.91
2009	29.84	1181.65	1696.07	1153.63	76.82	1254.97	144.78	398.51	438.64	25.43	583.93	1713.60
2010	22.04	1035.27	1033.97	954.34	52.43	1078.75	72.20	377.88	213.65	16.58	245.47	1000.46
2011	46.23	1528.25	1973.24	1516.21	182.64	1818.90	387.11	541.33	878.80	42.54	1460.28	2023.52
2012	21.25	1121.70	1100.71	1064.94	45.78	1115.53	62.22	390.57	185.69	15.04	228.78	1096.41
2013	14.51	1063.96	853.08	948.91	38.11	1020.15	39.77	374.12	134.96	14.07	165.59	858.71
2014	31.00	1288.32	1520.29	1253.65	90.27	1340.86	190.64	445.45	410.90	23.14	636.38	1563.79
2015	27.45	1067.96	1275.88	1043.84	65.57	1156.52	113.71	379.27	332.92	21.39	422.52	1278.30
2016	78.78	1757.44	1915.53	1777.48	251.02	2080.92	574.66	601.05	1341.35	63.69	2445.38	1911.09
2017	13.59	844.74	742.58	787.56	27.05	861.07	16.75	307.63	80.82	12.34	72.91	712.87
2018	27.61	1207.39	1405.19	1126.89	109.38	1329.75	228.32	426.01	513.51	22.93	720.45	1431.39
2019	15.60	1000.31	1052.37	896.19	34.08	913.41	32.16	352.25	107.98	11.28	136.21	1044.63
PROMEDIO	35.53	1264.90	1478.43	1215.89	94.71	1290.12	186.61	450.34	470.30	26.72	781.79	1479.01

Anexo 4. Caudales mensuales de los eventos extremos del Fenómeno del niño.

Estación	Set	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Aug	Año
PTU	2.47	13.44	33.89	175.90	1014.04	942.88	843.36	1815.82	1392.41	421.07	212.43	137.45	1982/1983
PSC	0.00	0.87	1.70	34.82	574.32	950.55	1178.17	1766.43	523.13	130.43	71.14	26.94	
PPL	0.13	0.60	1.22	3.51	15.19	12.17	20.84	31.43	12.82	12.61	3.22	0.74	
PNA	0.05	0.94	1.83	56.68	342.12	401.70	497.82	591.70	254.44	127.60	47.19	17.26	
PIM	4.03	23.51	27.47	63.95	229.82	143.75	180.42	329.08	332.25	116.11	86.38	67.65	
MLC	0.12	0.73	1.21	14.03	103.85	97.71	208.71	257.65	115.25	132.35	32.99	5.31	
LEN	7.50	51.70	58.61	190.47	443.60	352.50	627.94	889.57	649.46	349.26	188.28	148.65	
HBR	0.25	0.87	0.86	16.36	54.31	50.44	81.95	108.74	55.84	60.45	16.46	2.95	
ETI	9.57	16.17	25.58	179.27	1034.99	791.21	773.44	1813.11	1237.80	831.16	250.44	121.56	
ECI	8.71	48.45	55.21	161.83	510.05	405.58	599.14	868.20	861.17	459.01	235.57	188.06	
EAP	5.06	36.04	40.26	121.72	437.23	341.93	691.00	917.31	798.80	356.05	237.05	184.50	
CHI	0.35	0.70	0.97	3.90	23.68	21.22	29.76	47.91	28.35	21.37	5.76	1.16	
PTU	14.51	28.54	180.43	624.87	1088.90	1297.19	970.51	869.97	501.08	165.70	109.71	77.23	
PSC	0.58	0.71	6.94	80.82	760.89	1647.96	2050.77	789.29	139.59	81.81	38.49	10.40	
PPL	1.09	0.56	2.33	5.17	12.21	22.12	22.26	14.67	4.81	5.35	0.30	0.54	
PNA	0.97	0.86	3.63	79.17	385.11	564.94	823.28	353.49	98.92	63.10	22.17	6.01	
PIM	10.36	20.70	52.62	98.07	297.95	244.63	241.42	198.36	138.32	79.80	56.85	45.24	
MLC	0.43	0.65	2.83	10.03	117.28	303.62	313.28	166.89	50.47	52.05	7.81	0.94	
LEN	26.66	40.95	86.87	303.53	577.43	608.65	802.69	616.69	322.52	221.37	167.43	149.09	
HBR	0.60	0.74	1.78	14.81	62.43	130.42	129.81	67.45	27.69	30.27	6.54	1.08	
ETI	16.79	23.46	129.54	496.02	1099.03	1393.01	891.66	824.73	508.02	164.12	100.82	76.47	
ECI	22.74	44.60	105.04	296.79	617.14	595.34	764.63	597.40	407.73	206.01	154.86	126.44	
EAP	18.41	33.28	76.76	241.28	616.21	662.08	869.56	636.62	360.15	209.84	153.63	127.22	
CHI	0.92	0.70	1.98	7.91	26.69	30.82	35.13	24.39	7.63	8.80	0.60	0.71	
PTU	8.51	10.32	9.93	5.01	116.77	423.38	559.11	444.61	204.71	74.40	35.97	18.35	2016/2017
PSC	0.26	0.00	0.01	0.00	21.28	495.33	1247.78	476.75	97.15	74.32	16.93	15.54	
PPL	0.27	0.10	0.10	0.19	2.55	14.74	27.64	9.91	4.02	3.58	0.30	0.30	
PNA	0.45	0.00	0.07	0.00	31.18	327.76	584.98	249.18	78.61	50.03	10.52	8.58	
PIM	8.06	9.77	4.58	10.77	39.37	88.99	185.46	113.57	77.25	33.53	12.00	17.69	
MLC	0.39	0.16	0.19	0.08	2.69	81.82	292.26	113.30	33.56	45.59	3.38	1.22	
LEN	28.26	27.77	13.77	33.88	108.81	262.18	626.08	409.88	250.83	142.60	92.06	84.81	
HBR	0.49	0.33	0.28	1.02	3.81	43.49	108.80	46.02	19.24	23.62	2.47	1.45	
ETI	13.80	14.78	14.67	10.85	116.16	376.82	562.46	451.77	220.40	70.83	38.93	24.07	
ECI	21.17	27.78	13.97	29.24	97.90	238.00	572.02	338.70	219.48	103.34	37.58	58.27	
EAP	18.77	23.18	10.82	28.90	83.19	196.65	641.74	357.44	207.56	97.03	51.54	60.66	
CHI	0.33	0.30	0.30	0.39	4.17	15.04	31.95	13.82	6.21	5.06	0.60	0.60	

Anexo 5. Data base de caudales máximos anuales de 1981-2023.

Año	CHI	ECI	ETI	EAP	HBR	LEN	MLC	PIM	PNA	PPL	PSC	PTU
1981	5	399	335.9	328.4	19.4	395	38.8	150.4	74	3.3	87.7	292.5
1982	71.4	993.5	2839.6	987.7	183.2	933.7	488.4	744	1388.1	58.5	2591.4	2718.9
1983	11.7	454.6	450.9	432.1	38.2	445	89.8	142.5	234	10.2	323.6	516.7
1984	7.3	172.1	355	185.8	4.6	144.6	10	56.2	79.7	4	109.5	367.8
1985	6.5	327.6	372.8	269.6	11	347.4	23.4	124.7	72.3	3.7	91.4	347.2
1986	15.7	389.7	607.8	458	60.9	436	151.4	140.9	313	11.3	505.7	777.3
1987	4.8	308.7	247.6	252.4	12.7	299.8	18.8	120.2	70.2	3.6	70.8	214
1988	17.7	418.5	648.6	391.6	38.8	407.1	131.8	126.4	315.4	13.5	553.6	899.7
1989	4.1	151.9	135	152	6.4	213.4	8.9	64.2	36.6	3.8	51.8	139.1
1990	5.5	286	356.9	268.1	9.5	254.1	24.3	90.6	84.3	4.8	100.4	357.6
1991	27.3	612.6	987.6	631.7	66.3	609.2	146.6	209.2	332	21.1	669.2	1120.3
1992	25.4	560.4	570.6	580.7	127.4	609.3	286.5	188.6	478.8	28.4	933.5	582.5
1993	18.9	514.8	485	507.5	72.6	512.8	192.9	173.3	346.3	19.8	602.1	605.7
1994	11.3	271.8	310.6	249.5	15.1	365.6	27.5	115.3	131.8	11.4	134.6	312.2
1995	7.1	241.3	246.1	217.7	11.2	242.9	23.8	83.4	121.2	7.5	129.9	220.5
1996	16.8	391.3	562.3	435.8	24.6	385.2	63.8	121.9	183.7	16.6	208.9	575
1997	49.1	890.3	2950.3	997.8	309.2	977	773	564.6	2165	52.5	3367	1991.9
1998	18.5	576.5	696.1	584.5	94.5	573.5	214	244.9	458.1	17.9	999.6	872.3
1999	20.1	484	536.7	501.7	80	561.1	225.6	171.4	375.5	26.8	640	541.5
2000	27.6	698.8	874.1	822.5	124.9	807.2	349.7	229	656.2	16.3	1389.8	912.4
2001	64.8	872.8	1188	923.7	208.6	993.5	412	367.1	772.8	40.2	2005.3	1307.6
2002	10.2	225.4	329.6	210.4	18.6	238.9	31.3	86.5	98.8	5	112.1	326.7
2003	7.4	336.5	410.4	279.1	16.1	308.8	19.2	125.3	83.7	4	99.3	401.1
2004	13.6	458.7	342.1	447.3	50.8	485.4	120.6	156.3	250.7	15.8	335.2	324.3
2005	17.8	516.1	680.9	526.8	79.3	546.3	173.7	165.9	322.9	20.8	513.7	820.6
2006	7.6	391.6	460.1	374.3	16.5	388.3	44.6	129	127.9	6	141.7	456
2007	36.3	719.1	909.6	798.7	249.7	821.6	650.1	354.2	836.4	33.3	1808.4	1022.9
2008	25.9	512.2	633.1	564.8	75.6	644	181.1	219.1	382.4	41.1	718.8	803.3
2009	14.7	441.4	618.3	432	41.9	476.6	107.1	161.9	319.5	18.9	511.5	687.1
2010	17.5	505.9	687.7	466.3	40.5	513.9	87.2	185.8	187.1	10.8	223.3	708.8
2011	30.7	595.8	732.4	702.9	198.8	644.8	488.8	226.4	712.2	30.2	1456	888.3
2012	21.9	465.9	601.2	518.7	60.1	419.4	133.5	143.6	181.8	12.1	221	618.7
2013	7.7	379	255	348	32.5	436.4	73.5	130.2	142.6	8.3	148.9	232.5
2014	25.1	704	761.4	762.8	139.3	779.3	368.7	249.6	663.5	25.9	1167.4	832.5
2015	21.2	560.8	717.5	671.9	71	669.8	166.4	188	329.2	23.3	604.6	794.5
2016	37.6	646.9	727	740.1	153.6	763.4	415.4	214.6	953.3	39.9	1889.6	894.7
2017	7.5	326.1	230.3	287.7	17.7	369.8	24.5	127.6	95.7	5.3	109.6	211.6
2018	17.8	563.6	591.1	550.5	171	539.3	439.7	188.4	635.5	21.4	1236.2	678.3
2019	8.9	320.5	368	268	23.4	283.9	45	118.4	86.3	5.3	101.4	342.1
2020	23.4	597.5	667.5	622.3	82.7	638.7	225.4	199.4	397.6	20.5	828.3	678.3
2021	14.5	459.4	312.6	417	65.7	510.6	158.2	155.4	274.5	11.7	368.4	292.9
2022	47.6	867	965.8	949.8	222.7	957	592.2	297.7	1648.6	50.4	2525.2	1097.4

Anexo 6. Parámetros promedio anual (1981-2023) de cada distribución de probabilidad con enfoque AM para las estaciones hidrométricas.

Anexo 6. a) Parámetros promedio anual (1981-2023) de cada estación de la distribución GEV.

Estación	CMA	Location	Scale	Shape
CHI	20.27	12.23	7.94	0.36
ECI	490.70	407.17	165.92	-0.09
ETI	660.93	433.24	223.18	0.29
EAP	502.81	400.25	186.85	-0.03
HBR	79.68	33.36	32.50	0.67
LEN	522.60	427.08	183.83	-0.08
MLC	196.36	74.69	80.89	0.76
PIM	191.72	138.13	60.42	0.22
PNA	414.74	179.81	152.96	0.67
PPL	18.70	10.38	8.018	0.41
PSC	730.63	285.23	332.16	1.15
PTU	685.36	462.22	266.45	0.23

Anexo 6. b) Parámetros promedio anual (1981-2023) de cada estación de la distribución Gumbel.

Estación	CMA	Location	Scale
CHI	20.27	13.98	9.76
ECI	490.70	400.46	162.29
ETI	660.93	472.92	271.27
EAP	502.81	395.79	184.80
HBR	79.68	47.53	49.05
LEN	522.61	420.95	179.97
MLC	196.36	113.51	126.48
PIM	191.72	146.30	68.21
PNA	414.74	245.47	242.49
PPL	18.70	12.38	10.04
PSC	730.63	398.47	471.19
PTU	685.36	494.61	299.16

Anexo 6. c) Parámetros promedio anual (1981-2023) de cada estación de la distribución Weibull.

Estación	CMA	Location	Scale
CHI	20.27	1.46	22.57
ECI	490.70	2.71	552.40
ETI	660.93	1.44	738.41
EAP	502.81	2.38	569.28
HBR	79.68	1.07	81.80
LEN	522.61	2.60	589.80
MLC	196.36	0.99	195.06
PIM	191.72	1.73	216.99
PNA	414.74	1.07	427.84
PPL	18.70	1.36	20.51
PSC	730.63	0.94	710.13
PTU	685.36	1.59	770.47

Anexo 6. d) Parámetros promedio anual (1981-2023) de cada estación de la distribución L-Normal.

Estación	CMA	meanlog	sdlog
CHI	20.27	2.76	0.71
ECI	490.70	6.11	0.42
ETI	660.93	6.29	0.59
EAP	502.81	6.11	0.48
HBR	79.68	3.88	1.07
LEN	522.61	6.17	0.44
MLC	196.36	4.70	1.20
PIM	191.72	5.12	0.50
PNA	414.7	5.58	0.95
PPL	18.70	2.61	0.83
PSC	730.63	5.99	1.15
PTU	685.36	6.33	0.62

Anexo 6. e) Parámetros promedio anual (1981-2023) de cada estación de la distribución Gamma.

Estación	CMA	shape	rate	Density gamma
CHI	20.27	2.16	0.106	0.0261
ECI	470.82	6.17	0.015	0.0021
ETI	660.93	2.63	0.004	0.0009
EAP	502.81	4.77	0.009	0.0012
HBR	79.68	1.14	0.014	0.0062
LEN	522.61	5.66	0.011	0.0014
MLC	196.36	0.99	0.005	0.0026
PIM	191.72	3.74	0.019	0.0035
PNA	414.74	1.25	0.003	0.0012
PPL	18.70	1.74	0.093	0.0261
PSC	730.63	0.96	0.001	0.0007
PTU	685.36	2.72	0.004	0.0008

Anexo 7. Test de selección de la mejor distribución de probabilidad para cada estación.

Anexo 7. a) Test de Kolmogorov-Smirnov (KS) en las distribuciones de probabilidad para cada estación.

Estaciones	Gev	Gumbel	Weibull	L-Normal	Gamma
CHI	0.111	0.112	0.095	0.103	0.099
ECI	0.054	0.059	0.078	0.077	0.052
ETI	0.102	0.128	0.185	0.116	0.163
EAP	0.097	0.096	0.082	0.085	0.092
HBR	0.119	0.130	0.092	0.102	0.098
LEN	0.060	0.052	0.071	0.061	0.054
MLC	0.120	0.130	0.099	0.108	0.102
PIM	0.106	0.106	0.167	0.113	0.134
PNA	0.131	0.128	0.111	0.093	0.113
PPL	0.114	0.111	0.091	0.107	0.102
PSC	0.162	0.170	0.129	0.134	0.139
PTU	0.102	0.116	0.127	0.091	0.100

Nota: La mejor distribución tiene el menor valor de TEST ks.

Anexo 7. b) Test de Chi-square (CS) en las distribuciones de probabilidad para cada estación.

Estaciones	Gev	Gumbel	Weibull	L-Normal	Gamma
CHI	6.000	16.919	6.857	7.285	8.571
ECI	2.571	1.649	2.143	3.428	3.857
ETI	6.428	10.867	17.142	8.571	11.143
EAP	2.142	12.100	3.857	3.00	3.428
HBR	4.714	29.769	6.857	5.571	6.428
LEN	1.714	5.324	3.857	4.285	3.428
MLC	11.571	51.549	7.714	8.571	7.714
PIM	12.000	9.256	15.000	11.571	12.429
PNA	4.714	34.597	13.714	10.285	18.857
PPL	6.857	58.033	4.714	7.714	4.714
PSC	12.428	85.149	15.428	12.857	15.428
PTU	6.857	9.994	9.428	12.000	7.714

Nota: La mejor distribución tiene el menor valor de TEST CS.

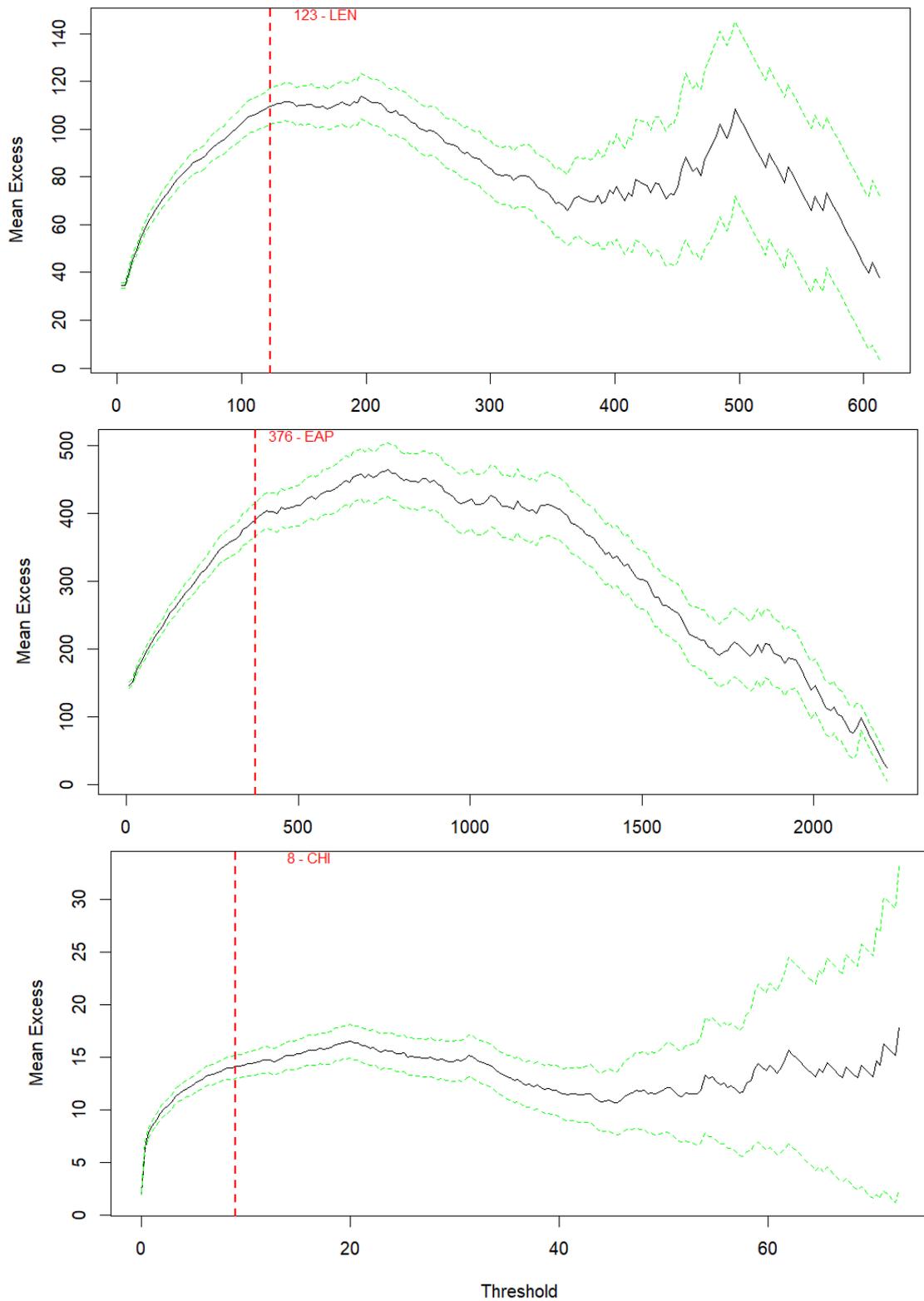
Anexo 7. c) Test de Anderson-Darling (AD) en las distribuciones de probabilidad para cada estación.

Estaciones	Gev	Gumbel	Weibull	L-Normal	Gamma
CHI	0.430	0.671	0.611	0.324	0.438
ECI	0.139	0.163	0.313	0.265	0.150
ETI	0.496	1.031	1.890	0.657	1.366
EAP	0.262	0.284	0.339	0.301	0.228
HBR	0.607	1.340	0.24	0.404	0.411
LEN	0.158	0.146	0.336	0.200	0.144
MLC	0.872	1.340	0.417	0.621	0.419
PIM	0.412	0.808	1.898	0.937	1.232
PNA	0.529	1.451	0.709	0.362	0.669
PPL	0.693	0.768	0.465	0.579	0.433
PSC	0.989	1.964	0.814	0.731	0.829
PTU	0.496	0.543	0.697	0.439	0.490

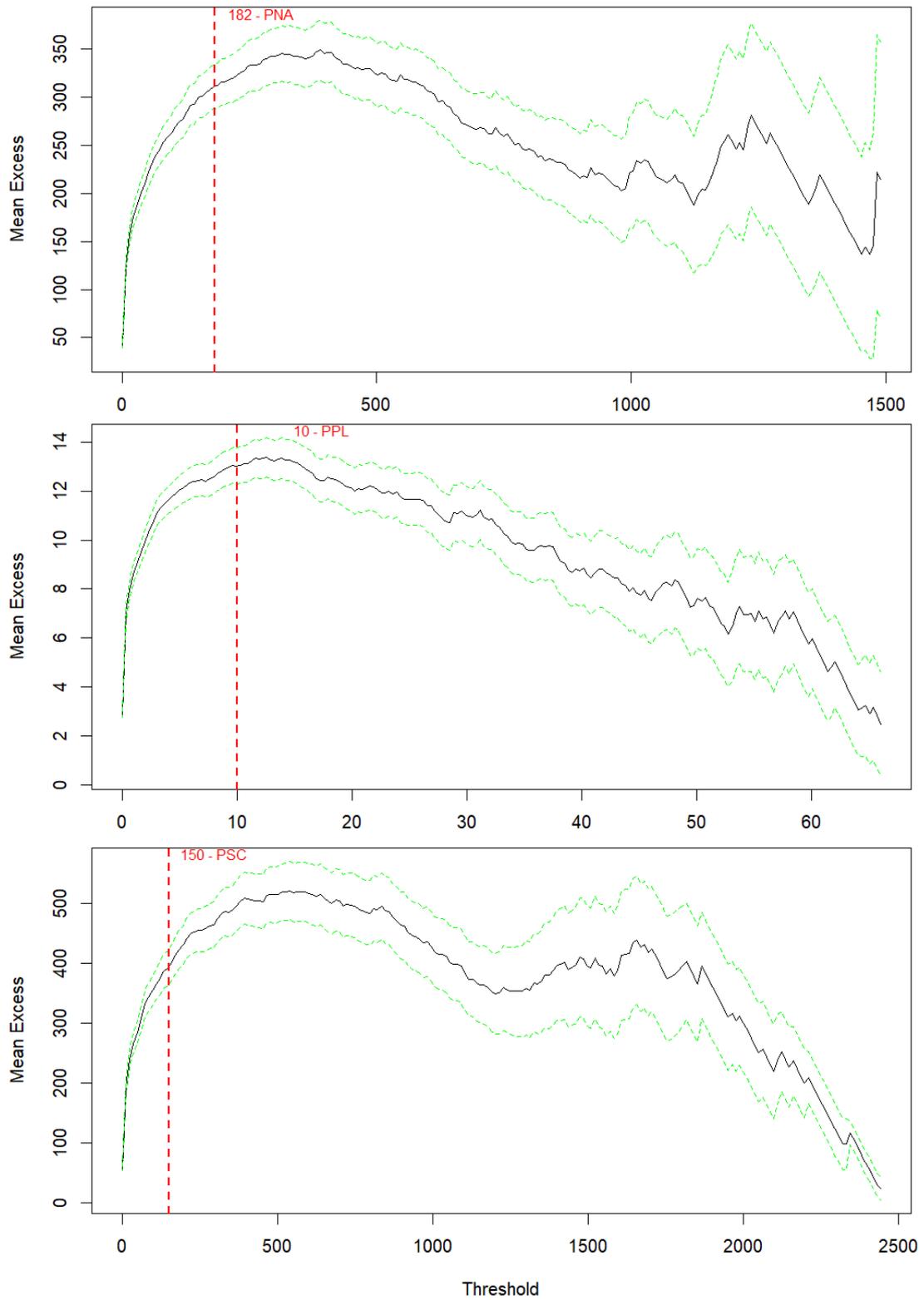
Nota: La mejor distribución tiene el menor valor de TEST AD.

Anexo 8. Selección de umbral (u) POT con la gráfica Mean Residual Life Plot en cada estación.

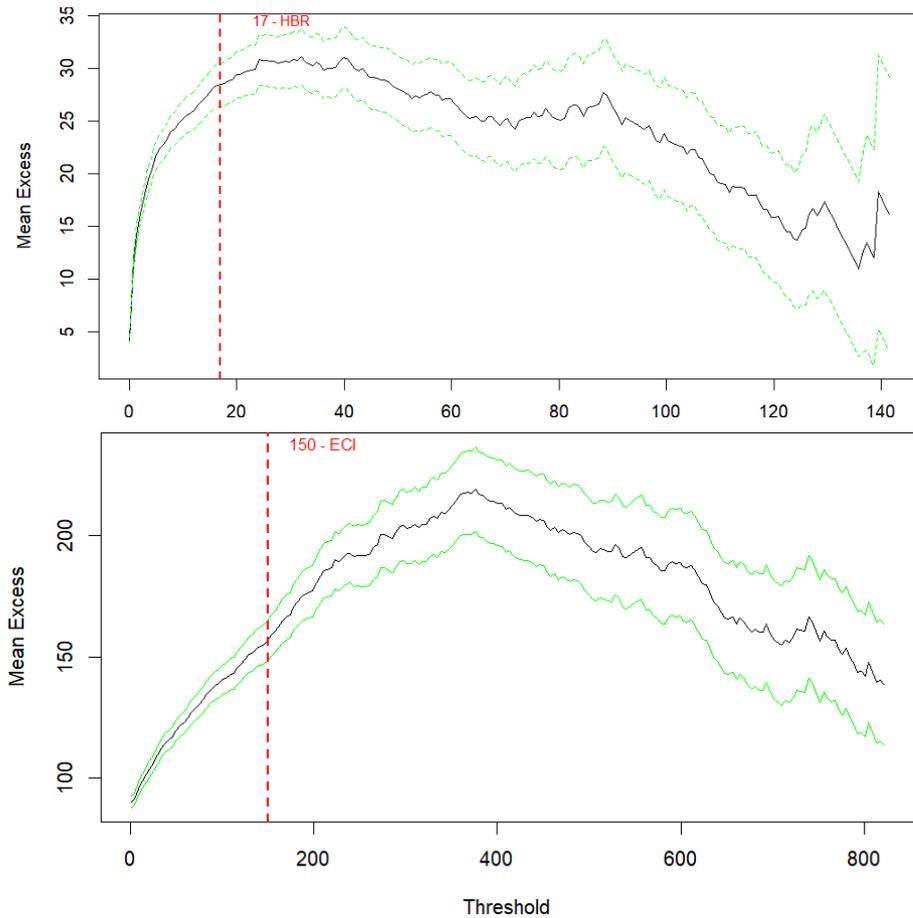
Anexo 8. a) Selección de umbral con Mean Residual Life Plot para la estación LEN (9040374), EAP (9040511) y CHI (9043134).



Anexo 8. b) Selección de umbral con Mean Residual Life Plot para la estación PNA (9043133), PPL (9043595) y PSC (9043566).



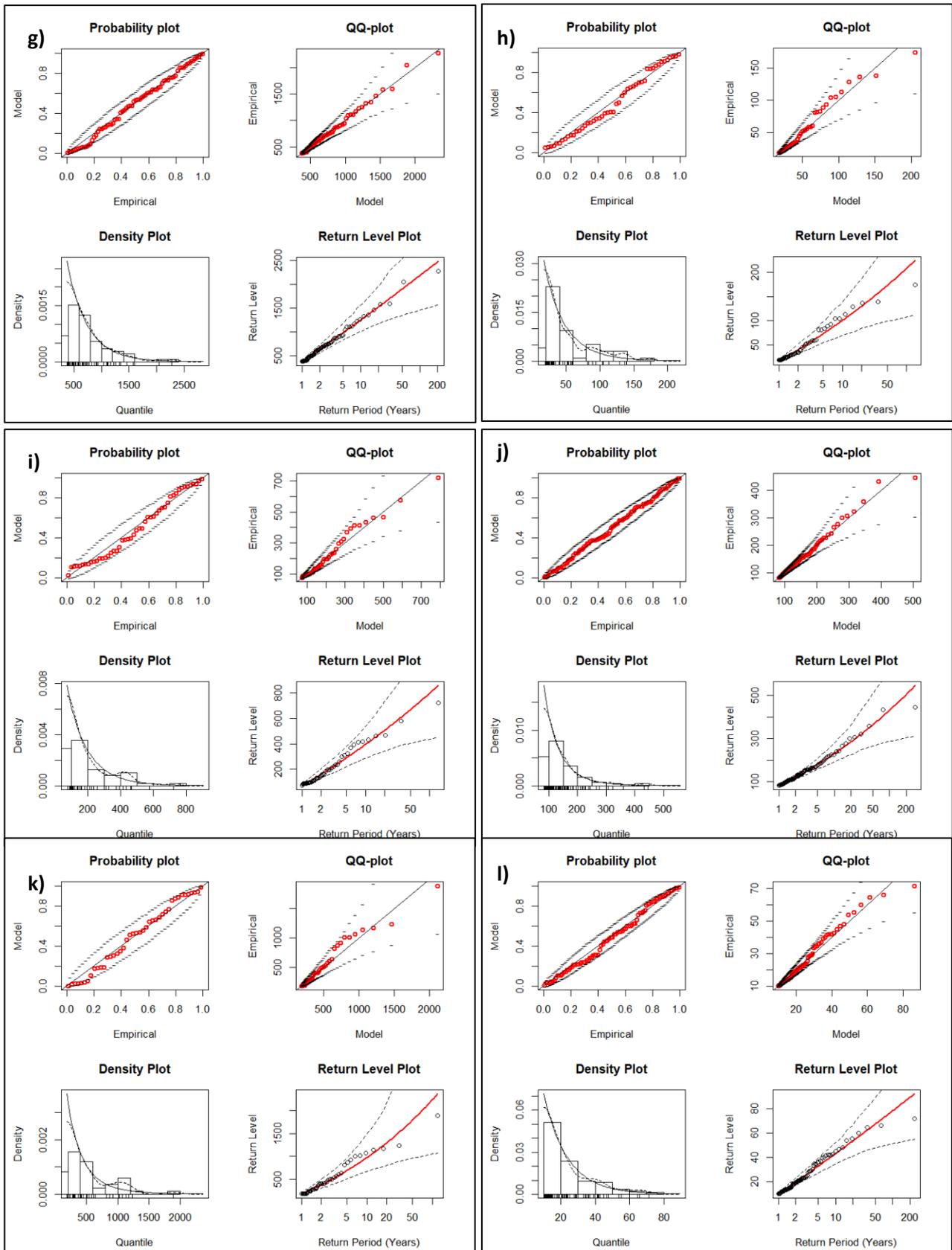
Anexo 8. c) Selección de umbral con Mean Residual Life Plot para la estación HBR (9044140) y ECI (9039937).



Anexo 9. Parámetros de la distribución de Pareto Generalizada (gpd) de cada estación estudiada.

Estaciones	Loc	scale	shape
PTU	269	254.084	0.108
ETI	150	223.780	0.168
ECI	219	177.124	0.063
PIM	82	55.316	0.129
LEN	123	96.168	0.111
EAP	376	371.456	0.023
CHI	8	9.057	0.279
PNA	182	271.222	0.201
PPL	10	14.409	0.006
PSC	150	380.499	0.163
HBR	17	32.346	0.103
MLC	71	127.600	0.089

Anexo 10. Ajuste de la Distribución de Pareto Generalizada a los Picos sobre Umbral para las Estaciones EAP (g), HBR (h), MLC (i), PIM(j), PNA (k) y PPL (l).



Anexo 11. *Umbral de alerta de inundación en los tramos de ríos de la Costa norte peruana para los periodos de retorno de 2.33, 5 y 10 años usando el enfoque POT*

COMID	TR2.33	TR5	TR10
9035847	144.76	192.03	238.18
9036034	26.11	36.30	47.16
9036059	10.89	15.41	20.36
9036092	26.91	37.02	47.67
9036235	15.94	21.77	27.83
9036486	119.79	158.60	196.30
9036594	30.68	40.45	50.21
9036610	688.20	945.60	1217.00
9036651	30.23	40.25	50.18
9036652	68.95	93.67	118.89
9036748	7.99	11.44	15.19
9036751	31.92	44.15	57.28
9036793	34.24	47.30	60.73
9036893	9.01	12.94	17.28
9036924	631.36	895.51	1184.62
9036986	112.33	171.46	241.41
9037119	4.94	9.20	15.81
9037156	63.17	86.56	111.25
9037171	10.48	15.45	21.16
9037404	18.13	26.05	34.83
9037520	113.19	171.76	240.38
9037553	2.74	5.90	11.42
9037560	237.96	363.96	532.88
9037644	253.30	385.80	559.90
9037688	104.80	159.81	225.32
9037720	24.55	36.05	49.47
9037728	596.50	839.70	1089.10
9037755	22.74	31.54	41.02
9037826	1.81	3.89	7.59
9037858	272.30	410.76	586.18
9037866	8.03	12.73	18.65
9037875	7.73	12.99	20.21
9037876	278.82	420.95	600.19
9037879	20.06	28.14	36.72
9038009	9.75	14.90	21.18
9038015	81.52	124.99	176.94
9038083	495.32	749.92	1064.62
9038113	305.61	512.63	821.74
9038114	7.52	11.85	17.25
9038200	27.14	39.99	54.67
9038242	285.45	440.32	640.78
9038245	382.45	500.33	648.38
9038345	3.02	6.89	14.30
9038415	50.60	75.89	105.65
9038455	21.72	32.82	45.72

Continuación

COMID	TR2.33	TR5	TR10
9038478	17.03	37.46	74.87
9038510	12.82	28.44	57.63
9038528	219.29	322.16	441.77
9038889	0.54	1.15	2.22
9038915	18.94	86.73	352.83
9038946	70.99	102.50	137.45
9039016	17.10	80.57	335.36
9039017	6.29	69.87	624.37
9039042	118.21	166.16	217.46
9039137	1.21	3.01	6.84
9039361	7.43	17.44	37.15
9039410	339.79	468.21	618.22
9039568	70.92	114.16	170.64
9039569	43.74	78.91	131.99
9039725	0.50	1.17	2.50
9039726	0.79	2.27	5.93
9039782	5.82	14.68	33.59
9039808	227.71	288.64	347.61
9039887	213.30	271.40	329.30
9039888	7.48	10.41	13.49
9039937	578.60	739.16	957.57
9039961	1.35	3.65	8.98
9039962	1.48	4.73	13.82
9039963	28.14	49.05	67.85
9039992	70.64	121.06	192.04
9039993	123.44	215.84	350.01
9040023	5.06	7.54	10.28
9040030	584.59	789.78	1015.90
9040036	10.44	24.26	50.43
9040053	5.39	7.39	9.60
9040177	16.88	44.23	105.21
9040178	56.40	108.62	194.00
9040179	135.84	207.81	295.73
9040195	813.40	1113.06	1449.52
9040285	192.62	306.36	452.06
9040286	820.44	1147.03	1527.89
9040299	205.61	260.38	314.40
9040305	197.09	248.44	298.64
9040319	185.30	233.13	279.75
9040352	0.63	1.42	2.90
9040353	3.07	9.87	29.03
9040374	276.60	366.90	455.80
9040383	4.74	6.15	7.57
9040392	226.09	381.31	597.68
9040394	26.82	77.08	200.89
9040399	3.66	11.66	33.99

Continuación

COMID	TR2.33	TR5	TR10
9040404	102.48	133.79	166.93
9040410	4.64	49.28	419.42
9040421	8.30	29.80	94.95
9040449	174.67	220.80	266.69
9040452	10.83	25.19	52.55
9040462	164.57	209.64	255.59
9040501	243.66	421.62	675.23
9040510	260.49	469.01	783.33
9040511	1028.10	1325.70	1600.30
9040526	28.39	85.98	237.68
9040558	5.33	7.73	10.35
9040570	7.27	9.30	11.21
9040598	8.79	25.76	66.76
9040628	1.86	5.48	14.40
9040683	61.75	77.69	94.16
9040739	38.66	49.07	60.00
9040812	8.94	11.40	13.80
9040917	22.36	27.44	32.40
9041027	230.31	317.49	419.81
9041051	5.55	6.73	7.73
9041070	8.40	22.16	51.97
9041131	4.90	16.42	49.01
9041144	1.34	4.30	12.33
9041234	6.68	22.79	69.38
9041235	8.58	27.23	77.90
9041307	1230.18	1681.78	2151.63
9041379	0.95	2.51	5.99
9041416	116.27	203.87	338.46
9041421	113.71	193.78	311.73
9041436	16.28	55.60	172.53
9041437	2.06	7.65	25.24
9041447	95.82	155.25	238.32
9041462	1.89	5.63	15.21
9041465	4.23	11.53	28.27
9041484	3.26	9.38	24.28
9041485	2.41	6.68	16.64
9041486	1.64	4.66	11.95
9041487	179.76	223.70	266.76
9041488	6.77	7.94	8.91
9041503	0.73	1.96	4.74
9041504	199.65	254.45	309.88
9041513	173.77	216.35	257.89
9041514	13.67	17.76	21.70
9041554	0.76	2.22	5.77
9041698	159.26	197.59	234.93
9041714	15.94	24.98	36.13

Continuación

COMID	TR2.33	TR5	TR10
9041807	3.66	4.88	6.14
9041819	126.34	156.45	186.64
9041820	88.34	108.66	128.66
9041926	0.50	1.27	2.89
9042001	12.93	27.84	54.53
9042002	9.15	17.71	27.15
9042025	0.60	1.57	3.65
9042026	1.46	4.33	11.43
9042055	0.74	2.15	5.59
9042056	1366.95	1947.03	2582.10
9042057	6.74	8.52	10.47
9042064	20.37	68.76	209.00
9042065	36.62	48.11	61.04
9042073	2.04	6.37	17.77
9042077	1376.35	1945.99	2554.92
9042078	0.69	2.17	6.01
9042117	1316.29	1851.10	2423.31
9042127	1365.08	1929.99	2535.94
9042159	55.16	68.48	81.11
9042188	1378.81	1951.38	2564.43
9042197	1371.54	1941.49	2553.85
9042266	20.76	58.53	150.21
9042274	2.24	27.27	267.35
9042292	5.35	14.86	37.78
9042297	471.80	1139.52	2532.23
9042396	4.14	8.91	17.36
9042413	722.54	1103.05	1514.30
9042504	458.58	1094.17	2405.11
9042505	24.62	71.89	188.81
9042563	31.87	46.26	63.05
9042596	3.49	15.30	59.62
9042599	1.10	4.74	17.98
9042669	1.97	8.19	29.80
9042675	646.85	1004.05	1399.61
9042686	0.70	2.68	8.96
9042687	21.85	39.35	55.78
9042691	1.54	5.59	18.04
9042775	415.76	979.57	2129.17
9042847	5.73	66.26	617.97
9042882	15.40	19.98	25.37
9042929	402.67	907.87	1881.85
9042974	0.91	3.13	9.54
9042990	700.51	1097.60	1531.72
9042991	0.70	2.62	8.63
9043015	0.45	1.34	3.51
9043062	16.21	68.21	253.95

Continuación

COMID	TR2.33	TR5	TR10
9043131	770.93	1163.96	1556.22
9043132	0.95	3.52	11.51
9043133	544.00	827.90	1126.30
9043134	26.30	38.40	51.80
9043192	0.33	0.81	1.74
9043205	539.38	807.70	1093.80
9043206	29.52	53.78	89.48
9043288	515.78	785.65	1070.07
9043315	4.75	57.59	554.84
9043339	0.94	2.64	6.67
9043340	0.37	1.09	2.83
9043362	0.28	0.61	1.15
9043465	321.02	726.90	1518.12
9043487	26.17	35.83	45.44
9043565	20.98	32.84	47.34
9043566	755.60	1145.40	1543.90
9043571	1.20	5.18	19.44
9043595	37.00	48.20	58.30
9043596	48.57	74.33	104.70
9043598	46.83	154.96	452.77
9043609	6.90	29.06	108.69
9043619	277.10	593.97	1177.91
9043620	80.38	120.89	167.37
9043627	5.00	22.14	86.85
9043664	723.67	1136.00	1583.37
9043711	2.87	29.06	237.85
9043722	174.55	452.20	1087.21
9043806	1.15	5.56	23.42
9043814	8.74	13.61	19.65
9043815	14.35	22.33	32.66
9043937	7.41	37.00	163.75
9043963	37.85	144.21	485.66
9044052	29.07	96.60	283.02
9044069	3.74	33.44	243.92
9044080	167.97	420.34	976.21
9044084	0.34	0.95	2.33
9044085	1.82	7.32	25.79
9044098	3.29	11.34	34.33
9044099	8.04	30.88	105.49
9044134	0.54	1.84	5.61
9044140	62.60	92.00	120.80
9044145	3.39	13.30	46.47
9044146	246.00	360.10	474.00
9044147	41.57	124.03	339.77
9044259	727.49	1143.31	1595.02
9044260	0.57	1.87	5.45

Continuación

COMID	TR2.33	TR5	TR10
9044261	1.76	7.47	27.86
9044296	0.41	1.18	3.05
9044313	0.27	0.66	1.41
9044323	24.34	75.19	205.05
9044331	4.49	15.42	46.97
9044352	0.69	2.23	6.40
9044353	2.19	8.43	28.38
9044389	9.22	35.95	123.78
9044555	2.73	10.94	38.85
9044568	2.41	8.84	28.83
9044601	104.04	215.90	414.86
9044612	15.24	27.47	45.76
9044631	83.68	162.22	290.69
9044667	3.44	14.18	52.05
9044701	72.44	135.30	232.44
9044714	12.77	24.19	42.61
9044729	4.67	46.96	383.69
9044741	1.70	15.20	111.58
9044809	6.16	24.12	83.94
9044847	7.89	22.51	56.13
9044850	5.29	22.47	85.06
9044851	2.59	8.00	22.22
9044904	72.06	123.07	193.57
9044918	3.10	11.77	39.27
9044919	722.39	1140.08	1598.08
9044986	0.31	0.97	2.69
9044987	469.96	1203.55	2838.03
9045060	38.97	60.16	85.97
9045134	8.35	31.11	103.82
9045195	736.62	1158.71	1617.02
9045207	4.97	19.02	65.09
9045536	27.73	49.24	81.19
9045605	6.53	19.63	52.69
9045606	1.61	11.95	74.07
9045898	0.25	0.67	1.60
9045899	14.18	49.11	151.86
9045963	14.12	51.47	168.05
9045964	1.54	4.27	10.71
9046020	15.49	56.20	183.07
9046021	2.50	9.20	30.82
9046022	0.96	3.01	8.50
9046191	18.76	73.16	257.37
9046224	12.64	41.54	121.16
9046225	3.62	30.94	218.81
9046229	2.27	7.01	19.15
9046230	2.52	7.57	20.13

Continuación

COMID	TR2.33	TR5	TR10
9046247	3.66	12.00	35.17
9046248	1.85	5.06	12.46
9046279	17.03	76.34	300.01
9046280	5.43	13.82	32.72
9046288	0.24	0.68	1.66
9046289	19.18	74.92	264.08
9046303	4.66	15.06	43.14
9046304	3.66	9.45	21.93
9046314	3.61	13.01	42.39
9046354	0.56	1.53	3.81
9046434	0.28	0.73	1.75
9046566	0.24	0.56	1.16
9046573	33.93	126.62	430.57
9046574	42.85	56.41	69.93
9046579	5.22	19.40	65.31
9046583	34.09	122.98	403.46
9046584	19.50	76.15	268.53
9046585	1.02	2.58	5.82
9046597	0.80	2.10	5.05
9046605	40.71	53.22	65.97
9046645	10.29	27.55	66.09
9046646	4.59	12.66	31.58
9046711	2.26	5.99	14.22
9046718	2.38	5.95	13.38
9046719	9.43	23.37	51.37
9046722	1.02	3.07	8.40
9046736	2.73	8.17	22.60
9046737	4.59	12.74	32.81
9046743	24.44	83.31	255.06
9046744	102.46	145.56	195.19
9046789	1.88	4.82	11.08
9046825	97.90	137.21	181.91
9046828	4.37	11.80	28.77
9046841	0.18	0.45	0.97
9046844	6.69	18.17	44.51
9046856	0.86	2.27	5.34
9046891	12.33	31.45	71.56
9046905	138.99	246.99	415.20
9046944	88.98	125.66	168.89
9046980	141.12	245.60	402.34
9046991	16.36	47.19	123.40
9047500	0.29	0.72	1.58
9047510	0.19	0.40	0.77
9047536	0.52	1.34	3.08
9047537	1.92	4.71	10.48
9047546	0.33	0.85	1.93

Continuación

COMID	TR2.33	TR5	TR10
9047624	2.31	5.80	13.21
9047681	132.72	263.07	499.78
9047701	0.18	0.36	0.64
9047723	0.55	1.29	2.70
9047729	133.23	261.14	489.48
9047887	0.10	0.22	0.40
9047909	0.44	1.11	2.47
9047910	0.21	0.54	1.19
9047917	2.92	7.01	15.07
9047924	0.19	0.48	1.09
9048133	3.09	7.58	16.73
9048153	0.32	0.86	2.06
9048273	0.69	1.95	5.02
9048274	0.13	0.29	0.55
9048339	133.57	264.62	502.16
9048359	0.31	0.71	1.46
9048360	133.66	264.74	502.25
9048417	0.10	0.20	0.32
9048469	0.33	0.78	1.67
9048470	134.77	261.74	484.74
9048524	0.11	0.25	0.49
9048525	3.36	8.47	19.21
9048612	0.21	0.54	1.26
9048616	0.11	0.21	0.37
9048632	134.77	263.67	492.58
9048633	0.30	0.68	1.37
9048672	141.55	231.96	365.12
9048673	0.83	2.30	5.74
9048744	3.52	8.67	19.16
9048749	0.29	0.76	1.74
9048752	0.12	0.28	0.57
9048755	139.92	224.94	346.70
9048767	139.97	223.06	340.55
9048768	0.47	1.43	3.84
9048916	140.03	219.90	330.30
9048917	3.78	9.62	21.94
9048998	142.18	230.69	358.85
9049178	134.86	205.38	298.90
9049304	0.09	0.21	0.43
9047470	0.13	0.33	0.72
9047471	0.18	0.50	1.23
9047492	0.21	0.57	1.33
9047508	0.29	0.84	2.20
9047509	0.57	1.53	3.74
9047524	0.33	0.90	2.21
9047571	0.79	2.40	6.64
9047632	0.23	0.64	1.65