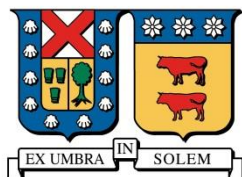


UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES
SANTIAGO – CHILE



**Metodologías de Adaptación al Cambio Climático para Obras
Hidráulicas de Depósitos de Relaves en Chile**

Memoria de titulación presentada por
Jessica Andrea Gómez Orellana

Como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Civil

Profesor Guía
Christian Moreno G.

Profesor Co-referente
Pedro Kamann C.

Julio 2019

Agradecimientos

Extiendo mis más sinceros agradecimientos a los profesores que formaron parte de la comisión revisora. Gracias a todos sus aportes y comentarios, esta memoria posee fundamentos sólidos y objetivos claros. En especial a mi profesor guía Christian Moreno por su enorme dedicación, interés y profesionalismo en el trabajo realizado.

Además, quisiera agradecer a todas aquellas personas de JRI Ingeniería que contribuyeron con información acerca de diferentes temas en los cuales se desarrollan dentro de la empresa. En especial a mi jefe Sebastián Rayo, por su genuino interés en mis logros y apoyo en este largo trayecto, y en general a mis compañeros del área hidráulica, los cuales a través de su experiencia aportaron con diferentes puntos de vista y me entregaron un gran feedback de lo realizado.

Finalmente, me gustaría agradecer a mis familiares y amigos su apoyo incondicional y por entender tantas veces en las cuales no pude estar presente. A mi hermano Francisco Gómez y a mi pololo Sebastián Bisquertt por este último año en el que se convirtieron en mis dos mayores pilares.

A mi Eli que me cuida desde el cielo. Gracias por tanto amor, dedicación y entrega por tus niñitos.
Este logro es para ti.

Resumen

El clima está cambiando. Se están presenciando fenómenos climáticos extremos de gran magnitud como huracanes, lluvias intensas, temperaturas extremas, entre otros, y estos generan el riesgo de colapso en las estructuras perjudicando la seguridad de las personas y contribuyendo a la pérdida de vidas humanas en los casos más severos. La responsabilidad de este cambio climático se le atribuye a la actividad antropogénica ya que provoca el aumento en la concentración de gases efecto invernadero en la atmósfera.

En estos últimos años se han realizado muchos estudios acerca del cambio climático y sus efectos en los climas y sistemas hidrológicos, los cuales revelan el interés de la comunidad científica en este tema. En particular, el estudio de los efectos del cambio climático en las estructuras hidráulicas dentro de depósitos de relaves es el fin de esta memoria de título, debido a que estas obras mineras son vulnerables a los fenómenos extremos y el colapso del depósito de relaves puede provocar la pérdida de vidas humanas.

Primero, se presentan las grandes fallas mundiales en depósitos de relaves y obras evacuadoras de crecidas en embalses de agua y con esto, se analizan los factores críticos de diseño y operación de cada una de las obras hidráulicas más comunes ubicadas dentro de los depósitos de relaves de la gran minería chilena, y se crea un esquema de efectos del cambio climático en estas obras.

Posteriormente, se utiliza el modelo de cambio climático NEX GDDP proporcionado por la NASA para estimar las precipitaciones futuras en cuatro cuencas aportantes a diferentes depósitos de relaves en Chile, en particular se utilizan dos proyecciones climáticas futuras EM2G y ESM2M, y dos escenarios representativos de concentración de gases de efecto invernadero, RCP4.5 y RCP8.5. Las cuencas analizadas corresponden a la cuenca del Estero Alhué afluente al depósito de relaves Carén, la cuenca Salar de Michincha afluente al depósito de relaves Pampa Pabellón, la cuenca del Estero Pupío afluente al depósito de relaves Mauro y la cuenca del Río Choapa afluente al depósito de relaves Quillayes.

Para lo anterior, se seleccionan las estaciones pertenecientes a la DGA que describen el comportamiento de las cuencas afluentes a los cuatro depósitos de relave mencionados. Luego, se escoge la proyección que más se ajuste a las precipitaciones históricas de las estaciones, y se ajustan los modelos de proyecciones climáticas a través de la comparación entre las precipitaciones históricas observadas por la DGA y las precipitaciones proporcionadas por la línea base de las proyecciones hasta el año 2005. Finalmente se analiza el cambio en las precipitaciones según la proyección de las precipitaciones hacia el año 2100 de los dos escenarios RCP4.5 y RCP8.5 en las cuatro cuencas analizadas.

Se obtiene que, para la cuenca del Estero Alhué las precipitaciones futuras aumentarán de acuerdo a los periodos de retorno de diseño de las obras hidráulicas y la crecida máxima probable (CMP). En la cuenca Salar de Michincha se observa que las precipitaciones disminuirán en su totalidad, pero sin seguir un patrón particular. En la cuenca del Estero Pupío las precipitaciones aumentarán a medida que la concentración de gases efecto invernadero crece. Finalmente, en la cuenca del Río Choapa ocurre algo particular, para las precipitaciones asociadas a bajos periodo de retorno, las precipitaciones disminuirán (para T=10 años) o aumentarán en menor medida de acuerdo al aumento en las concentraciones de gases efecto invernadero en la atmósfera, sin embargo, para las precipitaciones de altos periodos de retorno y PMP, la precipitación aumentará para el escenario más crítico RCP8.5.

También, se calcula la respuesta hidrológica de la cuenca del Estero Alhué a las precipitaciones actuales y futuras, y se analiza el efecto del cambio climático en las crecidas y con esto en las obras hidráulicas correspondientes al depósito de relaves. Resulta que las crecidas se comportarán de la misma manera que las precipitaciones futuras, por ende, en el depósito de relaves Carén se genera el

panorama más crítico debido a su aumento. El volumen asociado a la crecida de la cuenca afluyente a Carén aumentará del orden del 22% para el escenario RCP4.5, en cambio para el escenario RCP8.5 crecerá en un 60% del volumen de la crecida actual.

Para el depósito de relaves Carén, la revancha proporciona el volumen suficiente para almacenar las crecidas futuras en ambos escenarios, por lo tanto, se verifica que no se producirá overtopping de los relaves hacia aguas abajo de los muros de contención.

Finalmente, de acuerdo con lo observado en las proyecciones de precipitaciones futuras, y sus respectivas crecidas y volúmenes asociados, se sugieren medidas de adaptación al cambio climático para obras que se verán afectas al aumento de los caudales afluentes a ellas.

Abstract

The climate is changing. Extreme weather events of great magnitude have been witnessed, such as hurricanes, intense rains, extreme temperatures, among others, and these generate the risk of collapse in the structures, damaging the safety of people and contributing to the loss of human lives in the most severe cases. The responsibility for this climate change is attributed to anthropogenic activity as it causes an increase in the concentration of greenhouse gases in the atmosphere.

In recent years there have been many studies on climate change and its effects on climate and hydrological systems, which reveal the interest of the scientific community in this issue. In particular, the study of the effects of climate change on hydraulic structures within tailings deposits is the end of this title report, due to the fact that these mining works are vulnerable to extreme events and the collapse of the tailings deposit can cause the loss of human lives.

First, there are major global faults in tailings deposits and flood evacuation works in water reservoirs, and with this, the critical design and operation factors of each of the most common hydraulic works located within the tailings deposits are analyzed. of the great Chilean mining industry, and a vulnerability diagram of these works is created.

Subsequently, the climate change model NEX GDDP provided by NASA is used to estimate future rainfall in four basins contributing to different tailings deposits in Chile, in particular two future climate projections EM2G and ESM2M are used, and two representative concentration scenarios of greenhouse gases, RCP4.5 and RCP8.5. The basins analyzed correspond to the Estero Alhué basin tributary to the Carén tailings deposit, the Salar de Michincha basin tributary to the Pampa Pabellón tailings deposit, the Estero Pupío basin affluent to the Mauro tailings deposit and the Choapa River basin tributary to the deposit of tailings Quillayes.

For this, the stations belonging to the DGA that describe the behavior of the tributary basins to the four mentioned tailings deposits are selected. Then, the projection that best fits the historical rainfall of the stations is chosen, and the climate projection models are adjusted through the comparison between the historical precipitations observed by the DGA and the rainfall provided by the baseline of the projections. until the year 2050. Finally, the change in rainfall is analyzed according to the projection of rainfall towards the year 2100 of the two scenarios RCP4.5 and RCP8.5 in the four basins analyzed.

It is obtained that, for the Estero Alhué basin, future rainfall will increase according to the design return periods of the hydraulic works and the probable maximum flood (CMP). In the Salar de Michincha basin it is observed that the precipitations will diminish in their totality, but without following a particular pattern. In the Estero Pupío basin, rainfall will increase as the concentration of greenhouse gases increases. Finally, something particular occurs in the Choapa River basin, for precipitation associated with a low return period, rainfall will decrease (for $T = 10$ years) or increase to a lesser extent according to the increase in greenhouse gas concentrations in the atmosphere. However, for precipitation of high return periods and PMP, precipitation will increase for the most critical scenario RCP8.5.

Also, the hydrological response of the Estero Alhué basin to current and future rainfall is calculated, and the effect of climate change on floods is analyzed and with this in the hydraulic works

corresponding to the tailings deposit. It turns out that the floods will behave in the same way as future rainfall, therefore, in the deposit of tailings Carén generates the most critical scenario due to its increase. The volume associated to the flood of the tributary basin to Carén will increase in the order of 22% for the scenario RCP4.5, however for the scenario RCP8.5 it will grow in a 60% of the volume of the current flood.

For the Carén tailings deposit, the freeboard provides sufficient volume to store the future floods in both scenarios, therefore, it is verified that there will be no overtopping of the tailings downstream of the retaining walls.

Finally, according to what is observed in the projections of future rainfall, and their respective floods and associated volumes, measures of adaptation to climate change are suggested for works that will be affected by the increase of the tributary flows to them.

Glosario

Isoterma cero: altura que limita precipitaciones pluviales de nivales.

Estación fluviométrica: estación de medida de caudales en cauces.

Estación pluviométrica: estación de medida de precipitaciones en cuencas.

Escorrentía directa: agua que fluye sobre la litósfera hacia cauces o depósitos de agua.

Régimen pluviométrico: comportamiento de lluvias en alguna cuenca en particular.

Modelo estocástico: teoría estadística cuya evolución en el tiempo es aleatoria. Utilizado para representar las precipitaciones en el tiempo.

Nivel freático: nivel de contacto entre el agua y la atmósfera. Es la cota de los puntos en que el agua de poros tiene presión manométrica igual a cero.

Antropogénico: conjunto de efectos producidos por actividad humana.

Permafrost: terreno (suelo o roca, junto con hielo y la materia orgánica que contienen) que permanece a un máximo de 0 ° C durante al menos dos años consecutivos.

Criósfera: denota todas las regiones situadas encima y debajo de la superficie terrestre y oceánica en las que el agua se halla en estado sólido, como en los hielos marinos, los hielos lacustres, los hielos fluviales, la capa de nieve, los glaciares y los mantos de hielo, así como el terreno congelado (incluido el permafrost).

Forzamiento Radioactivo: variación del flujo radiativo en la tropopausa debido a una variación del causante externo del cambio climático

Relave: deshecho de operaciones mineras, el cual se compone de partículas sólidas disueltas en agua.

Hidrociclón: equipo de clasificación de partículas que utiliza la fuerza centrífuga para acelerar y separar la fase sólida de la líquida de relave espesado mediante impulsión por flujo de agua.

Siglas

DGA: Dirección General de Aguas. Organismo del Estado de Chile

GEI: gases efecto invernadero.

RCP: Representative Concentration Pathways. Miden forzamiento radiativo total en el mundo.

IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change.

UNFCCC: United Nations Framework Convention on Climate Change.

PMP y CMP: precipitación máxima probable y crecida máxima probable. Máxima precipitación (o caudal) que puede ocurrir.

Índice de contenidos

AGRADECIMIENTOS	i
DEDICATORIA	ii
RESUMEN	iii
ABSTRACT	v
GLOSARIO	vii
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 MOTIVACIÓN.....	1
1.2 OBJETIVOS.....	2
1.2.1 <i>Objetivo General</i>	2
1.2.2 <i>Objetivos Específicos</i>	2
1.3 PLAN DE TRABAJO.....	2
2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL PLANETA.....	4
2.2 MODELOS CLIMÁTICOS.....	9
<i>Modelo climático NEX GDDP</i>	11
2.3 ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO.....	13
<i>Formato de los Datos</i>	17
2.4 IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN OBRAS HIDRÁULICAS DE DEPÓSITOS DE RELAVES.....	19
2.4.1 <i>Contexto mundial</i>	19
2.4.2 <i>Contexto latinoamericano y nacional</i>	23
2.5 COMENTARIOS Y RESULTADOS DEL CAPÍTULO.....	25
<i>RESULTADO DE LA REVISION- ANALISIS RESPECTO DE LA MODELACION</i>	26
3 MARCO TEÓRICO	27
3.1 HIDROLOGÍA CLÁSICA.....	27
3.1.1 <i>Precipitaciones máximas diarias anuales</i>	28
3.1.2 <i>Crecidas de diseño</i>	29
3.2 DEPÓSITOS DE RELAVES.....	31
3.2.1 <i>Contextualización Legal Chilena</i>	33
3.2.2 <i>Diseño de Obras de Evacuación de Crecidas dentro de Depósitos de Relaves</i>	35
3.2.2.1 Depósito de Relaves.....	35
3.2.2.2 Vertedero de seguridad.....	35
3.2.2.3 Obra de conducción luego del vertedero.....	44
3.2.2.4 Rápido de descarga.....	46
3.2.2.5 Obras de disipación de energía.....	48
3.2.2.6 Canal de Desvío y Contorno.....	52
3.2.2.7 Obras de Saneamiento.....	54
4 METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE VULNERABILIDADES Y RIESGOS DE OBRAS HIDRÁULICAS DENTRO DE DEPÓSITOS DE RELAVES	62
4.1 GRANDES FALLAS HISTÓRICAS DENTRO DE LOS DEPÓSITOS DE RELAVES Y EMBALSES DE AGUA.....	62
4.1.1 <i>Tranque Mina Cadia, Australia</i>	62
4.1.2 <i>Samarco, Brasil</i>	63
4.1.3 <i>Mina Mount Polley, Canadá</i>	63
4.1.4 <i>Tranque el Cobre, Mina el Soldado, Chile</i>	64

4.1.5	<i>Embalse, Laos</i>	65
4.1.6	<i>Embalse Oroville, USA</i>	65
4.2	FACTORES CRÍTICOS DE OBRAS HIDRÁULICAS DENTRO DE DEPÓSITOS DE RELAVES.....	66
4.2.1	<i>Depósito de relaves</i>	66
4.2.2	<i>Canaletas y Tuberías de Relaves</i>	67
4.2.3	<i>Cajones Receptores, Distribuidores y/o de Bombeo de Relaves</i>	68
4.2.4	<i>Canal de Desvío y Contorno</i>	68
4.2.5	<i>Obras de Saneamiento</i>	68
4.2.5.1	<i>Alcantarillas</i>	69
4.2.5.2	<i>Drenaje de la Plataforma</i>	69
4.2.5.3	<i>Drenaje Subterráneo</i>	70
4.2.6	<i>Vertedero de seguridad</i>	70
4.2.7	<i>Canal colector luego del vertedero</i>	71
4.2.8	<i>Rápido de descarga</i>	73
4.2.9	<i>Obras de Disipación de Energía</i>	75
4.3	FALLAS QUE PUEDEN EXPERIMENTAR LAS OBRAS HIDRÁULICAS DENTRO DE LOS DEPÓSITOS DE RELAVES DEBIDO AL CAMBIO CLIMÁTICO.....	75
4.4	EVALUACIÓN DE VULNERABILIDADES EN OBRAS HIDRÁULICAS ASOCIADAS AL CAMBIO CLIMÁTICO	

78

5 EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS PRECIPITACIONES DE CUATRO DEPÓSITOS DE RELAVES..... 80

5.1	CUENCA ESTERO ALHUÉ.....	80
5.1.1	<i>Área Pluvial Aportante</i>	81
5.1.2	<i>Distribución espacial y temporal de precipitación DGA</i>	81
5.1.3	<i>Proyección Precipitaciones futuras considerando Cambio Climático</i>	84
5.1.3.1	<i>Barrera Loncha</i>	85
5.1.3.2	<i>Villa Alhué</i>	85
5.1.3.3	<i>Rapel</i>	86
5.1.3.4	<i>Corrección de Modelos Hidrológicos</i>	87
5.1.3.5	<i>Precipitaciones Futuras</i>	90
5.1.4	<i>Comparación de situación actual y futura</i>	93
5.2	CUENCA SALAR DE MICHINCHA.....	94
5.2.1	<i>Área Pluvial Aportante</i>	95
5.2.2	<i>Distribución espacial y temporal de precipitación DGA</i>	96
5.2.3	<i>Proyección Precipitaciones futuras considerando Cambio Climático</i>	97
5.2.3.1	<i>Corrección de Modelos Hidrológicos</i>	98
5.2.3.2	<i>Precipitaciones Futuras</i>	100
5.2.4	<i>Comparación de situación actual y futura</i>	101
5.3	CUENCA ESTERO PUPÍO.....	102
5.3.1	<i>Área Pluvial Aportante</i>	103
5.3.2	<i>Distribución espacial y temporal de precipitación DGA</i>	103
5.3.3	<i>Proyección Precipitaciones futuras considerando Cambio Climático</i>	106
5.3.3.1	<i>Caimanes</i>	106
5.3.3.2	<i>Culimo</i>	107
5.3.3.3	<i>Limahuida</i>	108
5.3.3.4	<i>Salamanca</i>	109
5.3.3.5	<i>Corrección de Modelos Hidrológicos</i>	110
5.3.3.6	<i>Precipitaciones Futuras</i>	115
5.3.4	<i>Comparación de situación actual y futura</i>	117

5.4	CUENCA CHOAPA	119
5.4.1	Área Pluvial Aportante.....	120
5.4.2	Distribución espacial y temporal de precipitación DGA.....	120
5.4.3	Proyección Precipitaciones futuras considerando Cambio Climático.....	123
5.4.3.1	Cuncumén	123
5.4.3.2	La Tranquilla.....	124
5.4.3.3	Corrección de Modelos Hidrológicos.....	125
5.4.3.4	Precipitaciones Futuras	128
5.4.4	Comparación de situación actual y futura.	129
5.5	ANÁLISIS	130
6	EFFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL DEPÓSITO DE RELAVES CARÉN	132
6.1	ANTECEDENTES	132
6.1.1	Muros.....	132
6.1.2	Sistema Evacuador de Crecidas y Aguas Claras.....	133
6.1.3	Caminos y Atravesos	135
6.2	MORFOLOGÍA DE LA CUENCA APORTANTE.....	138
6.3	CRECIDA.....	140
6.3.1	Caudal de Crecida.....	143
6.3.2	Volumen de Crecida	145
6.4	ANÁLISIS DE RESULTADOS EN LAS OBRAS HIDRÁULICAS.....	145
7	MEDIDAS DE ADAPTACIÓN DE OBRAS HIDRÁULICAS EN DEPÓSITOS DE RELAVES	150
	METODOLOGÍA PROPUESTA	152
8	CONCLUSIONES, COMENTARIOS Y RECOMENDACIONES	153
8.1	COMENTARIOS SOBRE MODELOS CONSIDERANDO CAMBIO CLIMÁTICO	153
8.2	COMENTARIOS SOBRE CRECIDAS	153
8.3	COMENTARIOS SOBRE METODOLOGÍA.....	153
8.4	COMENTARIOS SOBRE METODOLOGÍAS DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO PARA OBRAS HIDRÁULICAS.....	154
8.5	RECOMENDACIONES PARA OBRAS HIDRÁULICAS	154
9	BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS	155

Índice de Figuras

Figura 1-1: Plan de acción de los servicios de infraestructura al cambio climático (MOP y MMA, 2017).	1
Figura 2-1: Registro de temperatura media superficial mundial. Para las anomalías decenales, se muestran intervalos de confianza del 90% del conjunto de datos HadCRUT4. En color gris se muestra la incertidumbre de las temperaturas media (IPCC, 2013).	5
Figura 2-2: Cambio en el contenido calorífico medio global en la superficie oceánica. Las incertidumbres de los conjuntos de datos se muestran en el sombreado de cada color (IPCC, 2013).	6
Figura 2-3: Cambio en precipitación anual entre 1901-2010 (izquierda) y 1951-2010(derecha) (IPCC, 2013).	6
Figura 2-4: Superficie del hielo marino Ártico en verano. Las incertidumbres de los conjuntos de datos se muestran en el sombreado de cada color (IPCC, 2013).....	7

Figura 2-5: Superficie de manto de nieve del hemisferio norte en primavera (IPCC, 2013).....	8
Figura 2-6: Aumento en el nivel medio global del mar. Incertidumbre sombreada. Las incertidumbres de los conjuntos de datos se muestran en el sombreado de cada color (IPCC, 2013).....	8
Figura 2-7: Esquema de cuadrícula tridimensional mundial (IPCC, 2018).	10
Figura 2-8: Reducción de escala (Centro de Cambio Global US, 2012).....	11
Figura 2-9: Error relativo de cada variable, según cada modelo CMIP5 (IPCC, 2013).....	12
Figura 2-10: Escenarios declarados en el Informe Especial de Escenarios de Emisiones del IPCC (IPCC, 2000).	14
Figura 2-11: Escenarios de RCP (Trayectoria de Concentración Representativa) y SRES (Informe especial sobre escenarios de emisiones). IPCC, 2000.	17
Figura 2-12: Esquema de almacenamiento de variables en el formato Net CDF (ArcGis, 2018). ...	18
Figura 2-13: Orden de los datos dentro de una capa raster (QGIS, 2018).	18
Figura 3-1: Esquema de vertedero Morning Glory (USBR, 1987).	36
Figura 3-2: Control de coronamiento en un vertedero Morning Glory (USBR, 1987).	37
Figura 3-3: Elementos del perfil de la forma de la napa para una cresta circular (USBR, 1987).	37
Figura 3-4: Relación del coeficiente de descarga con H_0/R_s para valores de profundidad de aproximación entre $0,3R_s$ y $2R_s$ (USBR, 1987).	38
Figura 3-5: Relaciones entre H_sH_0 con H_0R_s para crestas de vertederos circulares (USBR, 1987).	39
Figura 3-6: Control de orificio o tubo (USBR, 1987).	39
Figura 3-7: Comparación de perfiles de vertedero Morning Glory para diversas condiciones de flujo (USBR, 1987).....	40
Figura 3-8: Flujo de túnel a boca llena (USBR, 1987).....	41
Figura 3-9: Esquema de vertedero de pared delgada (Mery M., 2013).....	42
Figura 3-10: Geometría de vertedero de tipo Ogee (USCE, 1977)	43
Figura 3-11: Esquema de vertedero de tipo Ogee (Mery M., 2013).	44
Figura 3-12: Perfil longitudinal de canal colector (Mery M., 2013).....	45
Figura 3-13: Perfil longitudinal de rápido de descarga (Mery M., 2013).	47
Figura 3-14: Curvas verticales en un rápido de descarga (Mery M., 2013).....	48
Figura 3-15: Componentes del resalto hidráulico (Mery M., 2013).....	48
Figura 3-16: Proporciones recomendadas para tanque disipador Tipo II USBR (USBR, 1984)	49
Figura 3-17: Estanque Tipo III USBR (USBR, 1984).	50
Figura 3-18: Altura de los bloques y umbral final para estanque Tipo III USBR (USBR, 1984).....	50
Figura 3-19: Propiedades para estanque Tipo IV USBR (USBR, 1978).	51
Figura 3-20: Resalto antes de la grada de subida (Mery M., 2013).	51
Figura 3-21: Sección típica de canal con albañilería de piedra y base de hormigón (Mery M., 2013).	52
Figura 3-22: Peralte del nivel de agua, debido a una curva en el canal (Mery M., 2013).....	54
Figura 3-23: Perfil longitudinal de una alcantarilla (Mery M., 2013).....	55
Figura 3-24: Clasificación de tubos y cajones (MOP, 2018).	57
Figura 3-25: Capacidad hidráulica de cunetas y canales triangulares (MOP, 2018).....	60
Figura 4-1: Colapso de muro en Depósito de Relaves Mina Cadia, Australia (The Sidney Morning Herald, 2018).	62

Figura 4-2: Efectos de la erosión interna en el talud aguas abajo del Dique 1 (Fundão Tailings Dam Review Panel, 2016).....	63
Figura 4-3: Colapso de muro de contención del Depósito de Relaves de la Mina Mount Polley (Mount Polley Review Panel, 2015).	64
Figura 4-4: Bomberos sacando cadáver de entre los relaves (Ercilla, 1965).	65
Figura 4-5: Daños ocasionados en el vertedero principal y de emergencia de la Presa Oroville, tras las importantes precipitaciones (El País, 2017).....	66
Figura 4-6: Pendiente crítica producida en el canal colector (Mery M., 2013).....	72
Figura 4-7: Casos de afluencia a canal colector. (a) Lámina sobre el vertedero totalmente ahogada por el escurrimiento en el canal colector y napa superficial. (b) Lámina sobre el vertedero en el límite de ahogamiento y napa sumergida por el fondo del canal colector. (c) Lámina libre sobre el vertedero no afectada por escurrimiento en el canal. (d) Lámina líquida que cae sobre el escurrimiento en el canal colector (Mery M., 2013).	72
Figura 4-8: Criterios de forma y pendiente para Flujo Slug (Mery M., 2013).....	74
Figura 4-9: Criterio para Flujo Slug (Mery M., 2013).	74
Figura 4-10: Esquema de efectos del cambio climático en las obras hidráulicas dentro de depósitos de relaves en Chile (Fuente: Elaboración propia).	77
Figura 5-1: Ubicación del Depósito de Relaves Carén (Fuente: Elaboración propia).	80
Figura 5-2: Ubicación del área pluvial aportante al Depósito de Relaves y estaciones meteorológicas de la DGA para el análisis de frecuencia (Fuente: Elaboración propia).	81
Figura 5-3: Gradiente pluviométrico y ecuación de la línea de tendencia (Fuente: Elaboración propia).	83
Figura 5-4: Comparación de precipitaciones de la DGA y modelos ESM2G y ESM2M (Fuente: Elaboración propia).....	85
Figura 5-5: Comparación de precipitaciones de la DGA y modelos ESM2G y ESM2M (Fuente: Elaboración propia).....	86
Figura 5-6: Comparación de precipitaciones de la DGA y modelos ESM2G y ESM2M (Fuente: Elaboración propia).....	87
Figura 5-7: Comparación de las precipitaciones del análisis de frecuencia en la estación Barrera Loncha de cada modelo con las precipitaciones del análisis de frecuencia de la DGA (Fuente: Elaboración propia).....	88
Figura 5-8: Comparación de las precipitaciones del análisis de frecuencia en la estación Villa Alhué de cada modelo con las precipitaciones del análisis de frecuencia de la DGA (Fuente: Elaboración propia).	88
Figura 5-9: Comparación de las precipitaciones del análisis de frecuencia en la estación Rapel de cada modelo con las precipitaciones del análisis de frecuencia de la DGA (Fuente: Elaboración propia).	89
Figura 5-10: Gradiente pluviométrico para T=10 años y ecuación de la línea de tendencia para RCP 4.5 (Fuente: Elaboración propia).....	91
Figura 5-11: Gradiente pluviométrico para T=10 años y ecuación de la línea de tendencia para RCP 8.5 (Fuente: Elaboración propia).....	92
Figura 5-12: Ubicación Depósito de Relaves Pampa Pabellón (Fuente: Elaboración propia).	94
Figura 5-13: Ubicación del área pluvial aportante al depósito de relaves y estaciones meteorológicas de la DGA para el análisis de frecuencia (Fuente: Elaboración propia).	95

Figura 5-14: Comparación de precipitaciones de la DGA y modelos ESM2G y ESM2M (Fuente: Elaboración propia).....	97
Figura 5-15: Comparación de las precipitaciones del análisis de frecuencia en la estación Ujina de cada modelo con las precipitaciones del análisis de frecuencia de la DGA (Fuente: Elaboración propia).	98
Figura 5-16: Ubicación Depósito de Relaves Mauro (Fuente: Elaboración propia).	102
Figura 5-17: Ubicación del área pluvial aportante al depósito de relaves y estaciones meteorológicas de la DGA para el análisis de frecuencia (Fuente: Elaboración propia).	103
Figura 5-18: Gradiente pluviométrico y ecuación de la línea de tendencia (Fuente: Elaboración propia).	105
Figura 5-19: Comparación de precipitaciones de la DGA y modelos ESM2G y ESM2M (Fuente: Elaboración propia).....	107
Figura 5-20: Comparación de precipitaciones de la DGA y modelos ESM2G y ESM2M (Fuente: Elaboración propia).....	108
Figura 5-21: Comparación de precipitaciones de la DGA y modelos ESM2G y ESM2M (Fuente: Elaboración propia).....	109
Figura 5-22: Comparación de precipitaciones de la DGA y modelos ESM2G y ESM2M (Fuente: Elaboración propia).....	110
Figura 5-23: Comparación de las precipitaciones del análisis de frecuencia en la estación Caimanes de cada proyección con las precipitaciones del análisis de frecuencia de la DGA (Fuente: Elaboración propia).....	111
Figura 5-24: Comparación de las precipitaciones del análisis de frecuencia en la estación Culimo de cada proyección con las precipitaciones del análisis de frecuencia de la DGA (Fuente: Elaboración propia).....	112
Figura 5-25: Comparación de las precipitaciones del análisis de frecuencia en la estación Limahuida de cada proyección con las precipitaciones del análisis de frecuencia de la DGA (Fuente: Elaboración propia).....	112
Figura 5-26: Comparación de las precipitaciones del análisis de frecuencia en la estación Salamanca de cada proyección con las precipitaciones del análisis de frecuencia de la DGA (Fuente: Elaboración propia).....	113
Figura 5-27: Gradiente pluviométrico y ecuación de la línea de tendencia para RCP 4.5 (Fuente: Elaboración propia).....	116
Figura 5-28: Gradiente pluviométrico y ecuación de la línea de tendencia para RCP 8.5 (Fuente: Elaboración propia).....	116
Figura 5-29: Ubicación Depósito de Relaves Quillayes (Fuente: Elaboración propia).	119
Figura 5-30: Ubicación del área pluvial aportante al depósito de relaves y estaciones meteorológicas de la DGA para el análisis de frecuencia (Fuente: Elaboración propia).	120
Figura 5-31: Gradiente pluviométrico y ecuación de la línea de tendencia (Fuente: Elaboración propia).	122
Figura 5-32: Comparación de precipitaciones de la DGA y modelos ESM2G y ESM2M (Fuente: Elaboración propia).....	124
Figura 5-33: Comparación de precipitaciones de la DGA y proyecciones ESM2G y ESM2M (Fuente: Elaboración propia).....	125

Figura 5-34: Comparación de las precipitaciones del análisis de frecuencia en la estación Cuncumén de cada proyección con las precipitaciones del análisis de frecuencia de la DGA (Fuente: Elaboración propia).....	126
Figura 5-35: Comparación de las precipitaciones del análisis de frecuencia en la estación La Tranquilla de cada proyección con las precipitaciones del análisis de frecuencia de la DGA (Fuente: Elaboración propia).....	126
Figura 6-1: Vista talud aguas arriba del muro principal del Depósito de Relaves Carén (DGA, 2011).	133
Figura 6-2: Vista del vertedero Morning Glory (DGA, 2011)......	135
Figura 6-3: Ubicación caminos proyecto “Ajustes de Aspectos Constructivos en Proyecto Peraltamiento Embalse Carén, Séptima Etapa” (CODELCO, 2017).	136
Figura 6-4: Obras de arte par Camino Tramo B (CODELCO, 2017).	136
Figura 6-5: Sección tipo contrafoso proyectado (CODELCO, 2017).	137
Figura 6-6: Vista de la información entregada por Global Mapper (Fuente: Elaboración propia).	139
Figura 6-7: Curvas de nivel cada 10 [m] calculadas con el programa Qgis (Fuente: Elaboración propia).	139
Figura 6-8: HUS corregido y discretizado a 1 hora (Fuente: Elaboración propia).....	142
Figura 6-9: Hidrograma de crecida obtenido de las precipitaciones de la línea base (Fuente: Elaboración propia).....	143
Figura 6-10: Hidrograma de crecidas obtenido de las proyecciones de precipitación con escenario RCP4.5 (Fuente: Elaboración propia).	144
Figura 6-11: Hidrograma de crecidas obtenido de las proyecciones de precipitación con escenario RCP8.5 (Fuente: Elaboración propia).	144
Figura 6-12: Análisis de frecuencia resultante de las precipitaciones históricas en Depósito de Relaves Carén (Fuente: Elaboración propia).	146
Figura 6-13: Análisis de frecuencia resultante del escenario RCP4.5 en el depósito de Relaves Carén (Fuente: Elaboración propia).....	146
Figura 6-14: Análisis de frecuencia resultante del escenario RCP8.5 en el depósito de Relaves Carén (Fuente: Elaboración propia).....	147
Figura 6-15: Relación entre volumen de crecida y periodo de retorno en la Cuenca Carén (Fuente: Elaboración propia).....	148
Figura 7-1: Metodología para análisis de efectos del cambio climático y planteamiento de medidas de adaptación (Fuente: Elaboración propia).....	152
Figura 7-2: Metodología propuesta para determinar precipitaciones futuras en una cuenca determinada (Fuente: Elaboración propia).	152

Índice de Tablas

Tabla 2-1: CGM desarrollados en CMIP5 utilizados en el conjunto de datos del modelo NEX-GDDP (NASA, 2015)	12
Tabla 2-2: variables otorgadas por los modelos climáticos y escenarios de cambio climático (NASA, 2015).	13
Tabla 3-1: Crecidas de diseño para obras de evacuación según el Decreto 50 (MOP, 2015).	33

Tabla 3-2: Periodos de retorno de diseño y verificación para obras de modificación de cauces naturales (DGA, 2016).	34
Tabla 3-3: Periodos de retorno para diseño (MOP, 2018).	35
Tabla 3-4: Valores para el coeficiente de rugosidad de Manning (Chow, 1994).	53
Tabla 3-5: Coeficientes de regresión para alcantarillas con control de entrada (MOP, 2018).	56
Tabla 3-6: Carga hidráulica de diseño a la entrada de alcantarillas (MOP, 2018).	57
Tabla 3-7: Normas para drenaje de la plataforma (MOP, 2018).	58
Tabla 3-8: Velocidades máximas admisibles en canales no revestidos (MOP, 2018).	58
Tabla 3-9: Velocidades máximas admisibles en contrafosos y cunetas revestidas (MOP, 2018).	59
Tabla 5-1: Características de las estaciones DGA analizadas (Fuente: Elaboración propia).	82
Tabla 5-2: Resultados análisis de frecuencia para cada estación (Fuente: Elaboración propia).	82
Tabla 5-3: Precipitaciones representativas de la cuenca aportante al depósito de relaves en mm (Fuente: Elaboración propia).	83
Tabla 5-4: Variables que intervienen en el cálculo de la Precipitación Máxima Probable y sus valores dependiendo del método (Fuente: Elaboración propia).	84
Tabla 5-5: Valores RMSE de precipitaciones de los modelos ESM2G y ESM2M en estación Barrera Loncha (Fuente: Elaboración propia).	85
Tabla 5-6: Valores RMSE de precipitaciones de los modelos ESM2G y ESM2M en estación Villa Alhué (Fuente: Elaboración propia).	86
Tabla 5-7: Valores RMSE de precipitaciones de los modelos ESM2G y ESM2M en estación Rapel (Fuente: Elaboración propia).	87
Tabla 5-8: Factores de reducción aplicables a las precipitaciones futuras de la proyección ESM2G (Fuente: Elaboración propia).	89
Tabla 5-9: Variables que intervienen en el cálculo de la Precipitación Máxima Probable de la proyección ESM2G y sus valores dependiendo del método (Fuente: Elaboración propia).	90
Tabla 5-10: Precipitaciones en mm para las tres estaciones con RCP4.5 y RCP 8.5 estimadas por el análisis de frecuencia (Fuente: Elaboración propia).	91
Tabla 5-11: Precipitaciones representativas de la cuenca aportante al depósito de relaves para cada RCP en mm (Fuente: Elaboración propia).	92
Tabla 5-12: Precipitación Máxima Probable futura dependiendo del método y RCP (Fuente: Elaboración propia).	92
Tabla 5-13: Precipitaciones (mm) de la línea base y de las proyecciones futuras, para cada estación de la DGA (Fuente: Elaboración propia).	93
Tabla 5-14: Precipitaciones (mm) de la línea base y las proyectadas a futuro, para la cota media de la cuenca (Fuente: Elaboración propia).	93
Tabla 5-15: Resultados análisis de frecuencia para la estación Ujina de la DGA (Fuente: Elaboración propia).	96
Tabla 5-16: Variables que intervienen en el cálculo de la Precipitación Máxima Probable y sus valores dependiendo del método (Fuente: Elaboración propia).	97
Tabla 5-17: Valores RMSE de precipitaciones de los modelos ESM2G y ESM2M en estación Ujina (Fuente: Elaboración propia).	98
Tabla 5-18: Factores de amplificación aplicables a las precipitaciones futuras de la proyección ESM2G (Fuente: Elaboración propia).	99

Tabla 5-19: Variables que intervienen en el cálculo de la Precipitación Máxima Probable de la proyección ESM2G y sus valores dependiendo del método (Fuente: Elaboración propia).	99
Tabla 5-20: Precipitaciones en mm para la estación Ujina con RCP4.5 y RCP 8.5 estimadas por el análisis de frecuencia (Fuente: Elaboración propia).	100
Tabla 5-21: Precipitación Máxima Probable futura dependiendo del método y RCP (Fuente: Elaboración propia).	100
Tabla 5-22: Precipitación Máxima Probable para cada estación de la cuenca aportante al depósito de relaves (Fuente: Elaboración propia).	100
Tabla 5-23: Precipitaciones de la línea base y de las proyecciones futuras, para cada estación de la DGA (Fuente: Elaboración propia).	101
Tabla 5-24: Características de las estaciones DGA analizadas (Fuente: Elaboración propia).	104
Tabla 5-25: Resultados análisis de frecuencia para cada estación (Fuente: Elaboración propia). ..	104
Tabla 5-26: Precipitaciones representativas de la cuenca aportante al depósito de relaves (Fuente: Elaboración propia).	105
Tabla 5-27: Variables que intervienen en el cálculo de la Precipitación Máxima Probable y sus valores dependiendo del método (Fuente: Elaboración propia).	106
Tabla 5-28: Valores RMSE de precipitaciones de los modelos ESM2G y ESM2M en estación Caimanes (Fuente: Elaboración propia).	107
Tabla 5-29: Valores RMSE de precipitaciones de los modelos ESM2G y ESM2M en estación Culimo (Fuente: Elaboración propia).	108
Tabla 5-30: Valores RMSE de precipitaciones de los modelos ESM2G y ESM2M en estación Limahuida (Fuente: Elaboración propia).	109
Tabla 5-31: Valores RMSE de precipitaciones de los modelos ESM2G y ESM2M en estación Salamanca (Fuente: Elaboración propia).	110
Tabla 5-32: Factores aplicables a las precipitaciones futuras de la proyección ESM2M (Fuente: Elaboración propia).	113
Tabla 5-33: Variables que intervienen en el cálculo de la Precipitación Máxima Probable de la proyección ESM2G y sus valores dependiendo del método (Fuente: Elaboración propia).	114
Tabla 5-34: Precipitaciones en mm para las cuatro estaciones con RCP4.5 y RCP 8.5 estimadas por el análisis de frecuencia (Fuente: Elaboración propia).	115
Tabla 5-35: Precipitaciones en mm representativas de la cuenca aportante al depósito de relaves para cada RCP (Fuente: Elaboración propia).	117
Tabla 5-36: Precipitación Máxima Probable futura dependiendo del método y RCP (Fuente: Elaboración propia).	117
Tabla 5-37: Precipitaciones de la línea base y de las proyecciones futuras, para cada estación de la DGA (Fuente: Elaboración propia).	117
Tabla 5-38: Precipitaciones de la línea base y las proyectadas a futuro, para la cota media de la cuenca (Fuente: Elaboración propia).	118
Tabla 5-39: Características de las estaciones DGA analizadas (Fuente: Elaboración propia).	121
Tabla 5-40: Resultados análisis de frecuencia para cada estación (Fuente: Elaboración propia). ..	121
Tabla 5-41: Precipitaciones representativas de la cuenca aportante al depósito de relaves (Fuente: Elaboración propia).	122
Tabla 5-42: Variables que intervienen en el cálculo de la Precipitación Máxima Probable y sus valores dependiendo del método (Fuente: Elaboración propia).	122

Tabla 5-43: Valores RMSE de precipitaciones de los modelos ESM2G y ESM2M en estación Cuncumén (Fuente: Elaboración propia).	124
Tabla 5-44: Valores RMSE de precipitaciones de los modelos ESM2G y ESM2M en estación La Tranquilla (Fuente: Elaboración propia).	125
Tabla 5-45: Factores aplicables a las precipitaciones futuras de la proyección ESM2M (Fuente: Elaboración propia).	127
Tabla 5-46: Variables que intervienen en el cálculo de la Precipitación Máxima Probable de la proyección ESM2G y sus valores dependiendo del método (Fuente: Elaboración propia).	127
Tabla 5-47: Precipitaciones en mm para las tres estaciones con RCP4.5 y RCP 8.5 estimadas por el análisis de frecuencia (Fuente: Elaboración propia).	128
Tabla 5-48: Precipitaciones en mm representativas de la cuenca aportante al depósito de relaves para cada RCP (Fuente: Elaboración propia).	128
Tabla 5-49: Precipitación Máxima Probable futura dependiendo del método y RCP (Fuente: Elaboración propia).	129
Tabla 5-50: Precipitaciones de la línea base y de las proyecciones futuras, para cada estación de la DGA (Fuente: Elaboración propia).	129
Tabla 5-51: Precipitaciones de la línea base y las proyectadas a futuro, para la cota media de la cuenca (Fuente: Elaboración propia).	129
Tabla 5-52: Aumento porcentual con respecto a la situación base, en las precipitaciones máximas diarias de la cota media de la cuenca afluyente al depósito de relaves Carén [%] (Fuente: Elaboración propia).	130
Tabla 5-53: Reducción porcentual con respecto a la situación base, en las precipitaciones máximas diarias de la cota media de la cuenca afluyente al depósito de relaves Pampa Pabellón [%] (Fuente: Elaboración propia).	130
Tabla 5-54: Cambio porcentual con respecto a la situación base, en las precipitaciones máximas diarias de la cota media de la cuenca afluyente al depósito de relaves Mauro [%] (Fuente: Elaboración propia).	131
Tabla 5-55: Reducción porcentual con respecto a la situación base, en las precipitaciones máximas diarias de la cota media de la cuenca afluyente del depósito de relaves Quillayes [%] (Fuente: Elaboración propia).	131
Tabla 6-1: Detalle entre las etapas séptima a duodécima del peraltamiento del muro principal. ...	133
Tabla 6-2: Característica de obras de evacuación de emergencia (DGA, 2011).	134
Tabla 6-3: Características de canal de entrega a cauce natural (DGA, 2011).	135
Tabla 6-4: Parámetros morfológicos de la cuenca aportante al depósito de relaves (Fuente: Elaboración propia).	140
Tabla 6-5: Parámetros para HUS Linsley (Fuente: Elaboración propia).	140
Tabla 6-6: Método de la curva número compuesta (Fuente: Elaboración propia).	141
Tabla 6-7: Hidrograma adimensional utilizado (Stöwhas Borghetti, 2016).	141
Tabla 6-8: HUS discretizado en 1 [h] (Fuente: Elaboración propia).	142
Tabla 6-9: Caudales máximos de crecidas en periodos histórico, proyección RCP4.5 y RCP8.5 (Fuente: Elaboración propia).	143
Tabla 6-10: Volúmenes de diferentes crecidas de datos de la línea base, escenario RCP4.5 y escenario RCP8.5 (Fuente: Elaboración propia).	145

Tabla 6-11: Precipitaciones para el diseño y verificación de atravesos de caminos (Fuente: Elaboración propia).....	147
Tabla 6-12 Cambio en los periodos de retorno para el vertedero Morning Glory (Fuente: Elaboración propia).....	148
Tabla 6-13: Volúmenes de capacidad del Depósito de Relaves Carén (Fuente: Elaboración propia).	149

1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo, se comienza contextualizando el tema de memoria y se plantea la problemática existente que provoca el estudio de la vulnerabilidad de las obras hidráulicas dentro de los depósitos de relaves en Chile y la realización de una metodología de adaptación de estas obras frente a los diversos efectos del cambio climático sobre ellas.

Luego se presentan los objetivos generales y específicos de esta memoria de título y el plan de trabajo a seguir en el desarrollo de este documento, para cumplir cada uno de los objetivos específicos planteados.

1.1 Motivación

Para nadie es desconocido el cambio climático que está enfrentando el planeta. Durante los últimos años, este tema ha sido el foco en convenciones mundiales y aspectos gubernamentales, como la conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, realizada del 4 al 9 de septiembre del 2018 en Bangkok. Chile no es la excepción, y en el 2012 se crea el Ministerio del Medio Ambiente (MMA), el cual actualmente consta con una división de cambio climático responsable de promover políticas y formular los planes, programas y planes de acción en esta materia (MMA, 2018).

Entre las obras civiles, las obras hidráulicas son directamente impactadas por este cambio climático tanto en los caudales de diseño por el aumento en la magnitud de eventos extremos, como en el gran arrastre de sedimentos y aluviones producto de precipitaciones con isoterma cero alta.

En este marco, los efectos del cambio climático en las obras civiles son cada vez más relevantes y se ha transformado en objeto de análisis de diversos documentos de relevancia nacional. Ejemplo de esto, en diciembre del 2017, el Ministerio de Obras Públicas (MOP) y el MMA publica el Plan de Adaptación y Mitigación de los Servicios de Infraestructura al Cambio Climático (MOP y MMA, 2017), el cual constituye un marco de referencia que sienta directrices sobre la adaptación de infraestructura, en su diseño y ejecución, a los fenómenos hidrometeorológicos debidos al cambio climático. Si bien el texto menciona un plan de acción como se muestra en la Figura 1-1 en el cual sugiere medidas de acción para adaptar las obras al cambio climático, estas medidas son generales para todo tipo de obras y no especifican cambios concretos en su diseño.

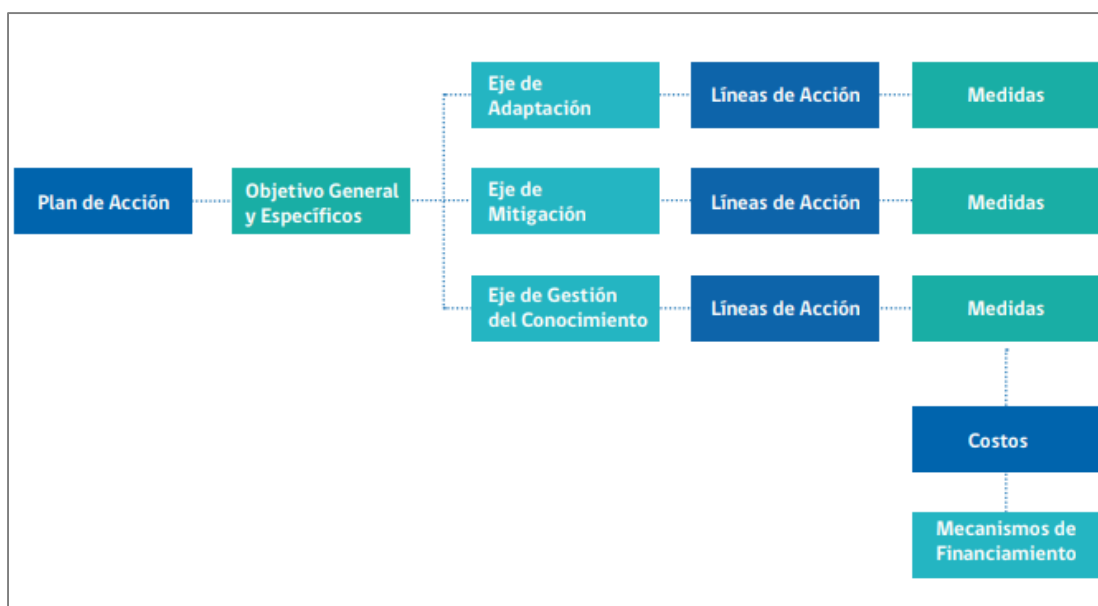


Figura 1-1: Plan de acción de los servicios de infraestructura al cambio climático (MOP y MMA, 2017).

En las faenas mineras, existen diversos tipos de obras hidráulicas, como lo son los depósitos de relaves, los embalses de agua, las obras de arte, el cruce de canaletas, la conducción por cañería a larga distancia de pulpa y agua, obras de captación de agua fresca, entre otras. Estas faenas tienen un tiempo de operación dependiente del tiempo de explotación del mineral, y en particular los depósitos de relaves poseen una extensa vida útil. Más aún, una vez que estas obras dejan de funcionar y son abandonadas, los depósitos de relaves siguen conteniendo el volumen del relave y los caudales de agua afluentes a él, por lo tanto, las obras hidráulicas pertenecientes a depósitos de relaves se ven afectadas directamente por el cambio climático que se proyecta aún mayor para este siglo y se hace necesario un estudio para analizar de qué manera las impacta y estimar medidas de adaptación para estas obras.

Existen estudios realizados sobre cambio climático y su efecto en la seguridad hidrológica de obras hidráulicas (Raddatz Delgado, 2011) o en eventos extremos, sumado a la vulnerabilidad de algunas obras hidráulicas de Chile (Lagos Zúñiga M. A., 2012), pero no se dispone de estudios que vinculen el cambio climático a las obras hidráulicas de depósitos de relaves de faenas mineras chilenas.

1.2 Objetivos

A continuación, se presentan los objetivos generales de esta memoria de título. Luego, se mencionan los objetivos específicos que permitirán llevar a cabo el objetivo general y posteriormente, se define la metodología de trabajo para cumplir con los objetivos específicos señalados.

1.2.1 Objetivo General

El objetivo general de este trabajo de título es proponer una metodología de evaluación de vulnerabilidades y medidas de adaptación al cambio climático, para obras hidráulicas características de depósitos de relaves de la Gran Minería Chilena.

1.2.2 Objetivos Específicos

Los objetivos específicos de esta memoria de título son los siguientes:

1. Caracterizar las obras hidráulicas de evacuación de crecidas de depósitos de relaves afectas a eventos extremos producto del cambio climático.
2. Evaluar la alteración de las precipitaciones debido al efecto del cambio climático, en cuatro cuencas aportantes a depósitos de relaves ubicados en distintas zonas dentro de Chile.
3. Modelar la respuesta hidrológica a la proyección de las precipitaciones futuras en una de las cuatro cuencas mencionadas en el punto anterior.
4. Proporcionar una metodología para el análisis del impacto del cambio climático en los depósitos de relaves y sus obras hidráulicas, junto con una metodología de adaptación a estos cambios.

1.3 Plan de Trabajo

Se presentan las actividades relacionadas a cada objetivo específico.

1. Se realiza un catastro de las principales fallas en las obras hidráulicas de depósitos de relaves. Luego, se estiman sus factores críticos de diseño y operación mediante el análisis de las causas de sus fallas.
Además del análisis de vulnerabilidades, se realiza una metodología general de evaluación de riesgos de las obras hidráulicas dentro de depósitos de relaves cumpliendo con la primera parte del objetivo general.
2. Para cada cuenca analizada se descargan y analizan las precipitaciones históricas de la DGA, y los datos de la línea base de las proyecciones de cambio climático. Luego, se calculan los factores de cambio para las precipitaciones asociadas a cada periodo de retorno y para la precipitación máxima probable, que corregirán las precipitaciones futuras.

Se descargan las proyecciones de cambio climático de los escenarios de trayectorias de concentración representativas RCP4.5 y RCP8.5 y se realiza el análisis de frecuencia a las precipitaciones históricas y proyectadas.

Finalmente, se analiza el cambio en las precipitaciones en cada cuenca por efecto del cambio climático.

3. Se define la morfología de la cuenca y se aplica el Hidrograma Unitario Sintético tipo Linsley a las precipitaciones históricas y proyectadas, estimando el cambio en las crecidas extremas. Luego, se evalúa el impacto del cambio climático en las obras hidráulicas consideradas, para finalmente proponer medidas de adaptación para ellas frente a este fenómeno.

2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En este capítulo, se presenta el estado del arte a nivel nacional y mundial de los tópicos que forman las bases para analizar el impacto del cambio climático en obras hidráulicas dentro de depósitos de relave en Chile.

Se comienza presentando los efectos del cambio climático observados en los últimos años, en los parámetros de interés para el desarrollo de este trabajo dentro de la atmósfera, océanos y litósfera. Luego, se presentan los diferentes escenarios de cambio climático proyectados que han sido desarrollados por el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC). Finalmente, se analizan los escenarios y se escogen los que se utilizarán en el desarrollo de este documento.

2.1 Efectos del Cambio Climático en el Planeta

Los cambios en el sistema climático mundial son atribuidos principalmente a la actividad antropogénica, en especial a emisiones de gases invernadero, y se reflejan en la atmósfera, los océanos, la criósfera y la litósfera. Las observaciones realizadas por el quinto informe del IPCC, muestran alteraciones significativas desde la década de 1950 sin precedentes en los últimos decenios y milenios. Ha aumentado la temperatura de la atmósfera y océanos, los volúmenes de hielo y nieve han disminuido, el nivel del mar ha aumentado. Todo lo anterior coincide con el aumento de la contaminación de gases de efecto invernadero.

A continuación, se presentan los cambios en cada parámetro a nivel mundial:

💧 Temperatura

Los datos de temperatura de la superficie terrestre y oceánica han aumentado en casi toda la Tierra. La Figura 2-1 muestra el aumento significativo del promedio mundial de la temperatura superficial terrestre y oceánica combinadas.

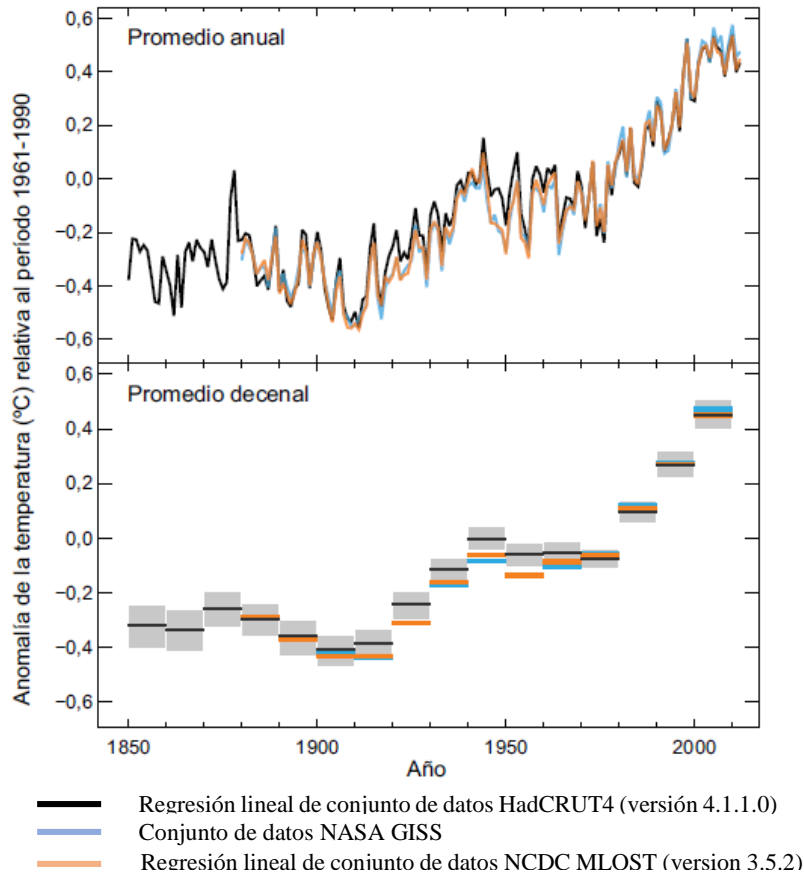


Figura 2-1: Registro de temperatura media superficial mundial. Para las anomalías decenales, se muestran intervalos de confianza del 90% del conjunto de datos HadCRUT4. En color gris se muestra la incertidumbre de las temperaturas media (IPCC, 2013).

En la Figura 2-1 se observa que la temperatura media global en la superficie posee gran variabilidad, ya sea a nivel interanual o inter decenal. Se debe tener especial cuidado en la extensión para el análisis de estos datos, ya que, si se escoge una data corta, será más sensible que una selección más amplia de temperaturas en el tiempo.

Existe gran variabilidad geográfica del cambio en la temperatura superficial de la Tierra. Se debe tener en cuenta el aumento de la temperatura oceánica, ya que representa en gran parte el incremento en la energía almacenada en el sistema climático como lo muestra la Figura 2-2 siguiente:

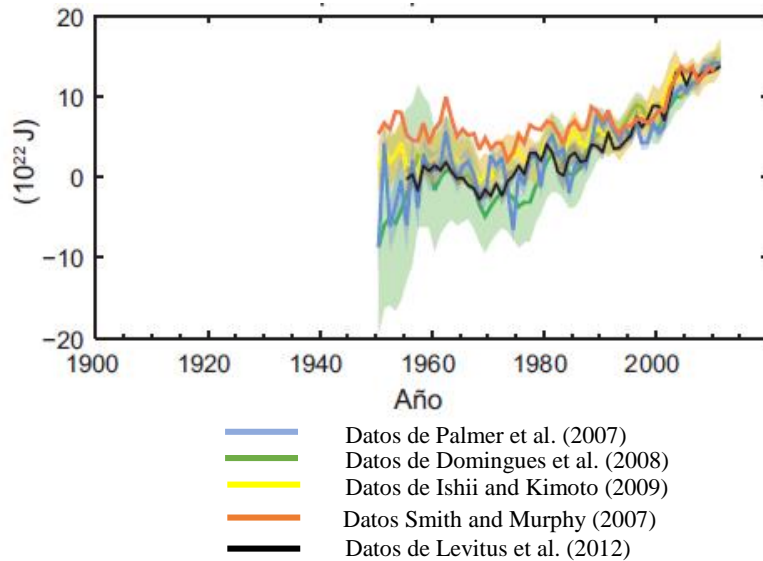


Figura 2-2: Cambio en el contenido calorífico medio global en la superficie oceánica. Las incertidumbres de los conjuntos de datos se muestran en el sombreado de cada color (IPCC, 2013).

Ejemplo de lo anterior es lo que se observa en la Figura 2-2. Los océanos en su gran mayoría han aumentado su temperatura superficial en los últimos 100 años, sin embargo, existe una disminución de ella en un porcentaje del océano Atlántico.

◆ Precipitaciones

La variabilidad regional en los cambios de precipitaciones es notable. En el lado izquierdo de la Figura 2-3 se observan cambios paulatinos por decenio, mientras que en el lado derecho (1951-2010) se muestran aumentos y disminuciones significativas de las precipitaciones por decenio dependientes del lugar geográfico que se analice.

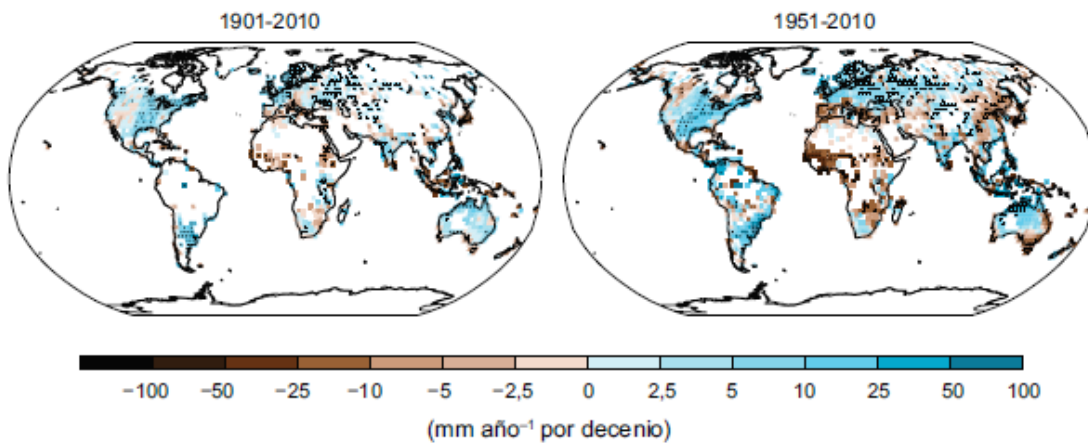


Figura 2-3: Cambio en precipitación anual entre 1901-2010 (izquierda) y 1951-2010(derecha) (IPCC, 2013).

En los últimos 50 años se han observado cambios en los eventos extremos a nivel mundial.

◆ Hielo y nieve

Como consecuencia del calentamiento global observado anteriormente, el ritmo en la pérdida de hielo en los glaciares de todo el mundo y del manto de hielo en Groenlandia ha aumentado considerablemente desde la década del noventa. Así mismo, el ritmo de pérdida en el manto de hielo de la Antártida, especialmente el ubicado en la zona Norte de la península antártica y en el mar de Amundsen, ha aumentado desde el 2002.

Por otro lado, la superficie media anual del hielo marino en el Ártico, así como la superficie de hielo marino permanente ha disminuido cada vez más a través de los decenios. La primera, ha sido más rápida en verano y su disminución en esta estación a través de los años se muestra en la Figura 2-4:

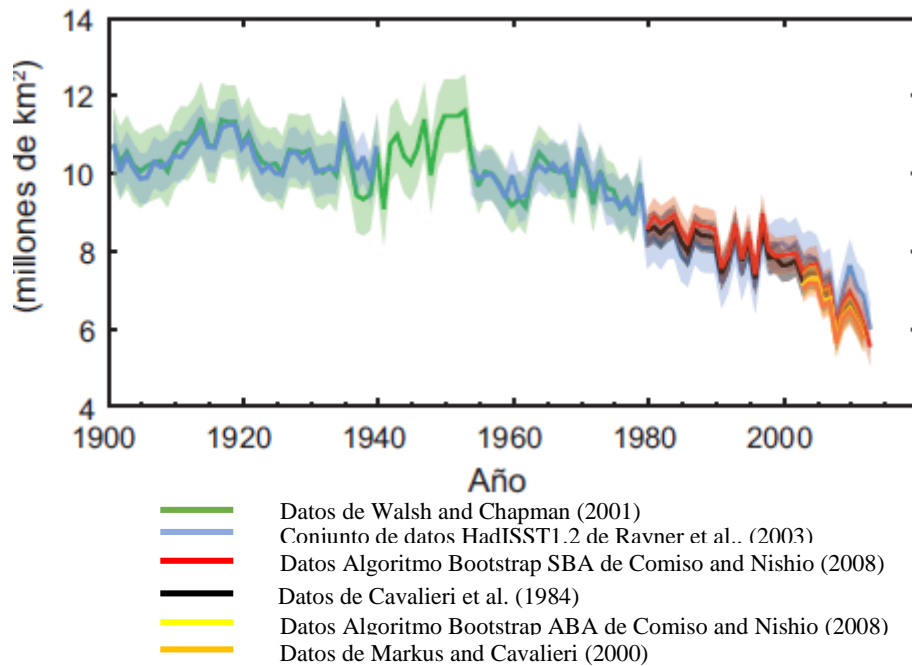


Figura 2-4: Superficie del hielo marino Ártico en verano. Las incertidumbres de los conjuntos de datos se muestran en el sombreado de cada color (IPCC, 2013).

Por otro lado, el manto de nieve del hemisferio norte también ha disminuido desde mediados del siglo XX y desde la década del 70 se han observado disminuciones mensuales significativas en primavera y verano, sin aumentos significativos.

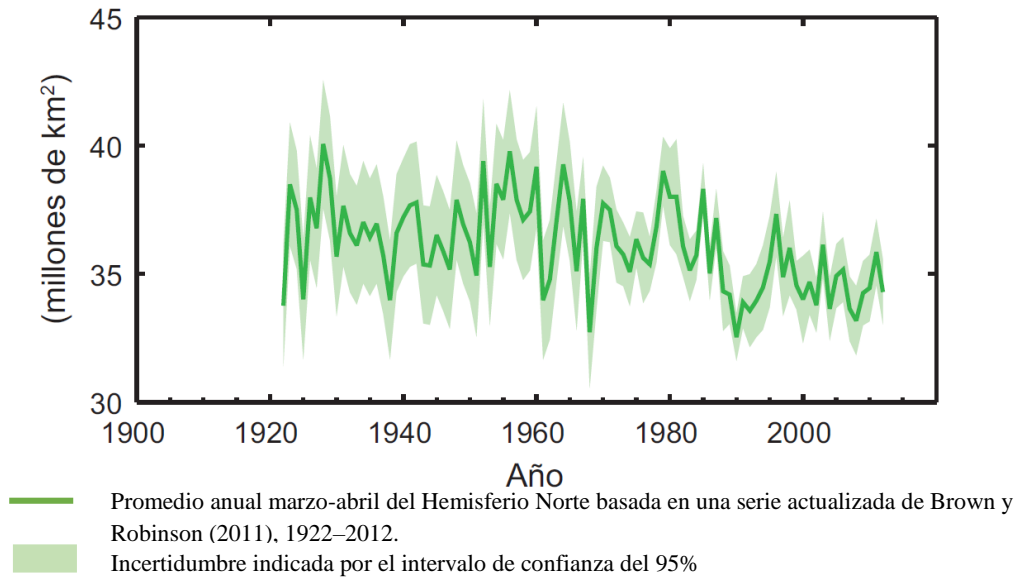


Figura 2-5: Superficie de manto de nieve del hemisferio norte en primavera (IPCC, 2013).

Finalmente, tanto la superficie como el grosor del permafrost ha disminuido desde la década del 80 debido a su calentamiento, observando un aumento de hasta 3°C en partes del Norte de Alaska y 2°C en partes del Norte de Rusia.

● Océanos

Por consecuencia de la disminución de glaciares, hielos, polos y nieves, debido al calentamiento superficial de la superficie terrestre, el nivel medio del mar, mostrado en la Figura 2-6, ha aumentado desde mediados del siglo XIX y su ritmo de elevación es significativamente superior a la media de los dos milenios anteriores.

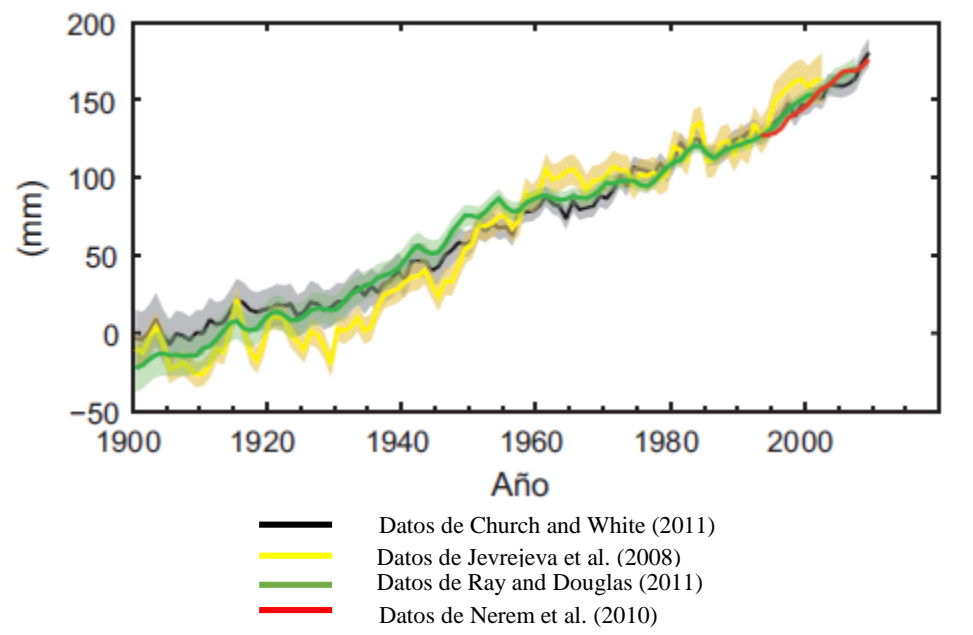


Figura 2-6: Aumento en el nivel medio global del mar. Incertidumbre sombreada. Las incertidumbres de los conjuntos de datos se muestran en el sombreado de cada color (IPCC, 2013).

La tasa de aumento en el nivel medio del mar entre la década del 90 a la fecha ha llegado casi al doble que la registrada desde comienzos del siglo XX. Esto coincide con la expansión térmica del océano debido al calentamiento global, la disminución en los glaciares, del manto de hielo en Groenlandia y la Antártida y finalmente con el cambio en el almacenamiento terrestre de agua.

2.2 Modelos Climáticos

Los modelos climáticos son herramientas que permiten predecir numéricamente la respuesta de sistemas climáticos (basada en sus propiedades físicas, químicas y biológicas de sus componentes, en sus interacciones y en sus procesos de retroalimentación) a diversas perturbaciones y son capaces de realizar predicciones climáticas decenales y centenares en base a estacionales (IPCC, 2013).

Los modelos de circulación general (GCMs por sus siglas en inglés), son un tipo de modelamiento climático basado en modelos numéricos los cuales entregan procesos físicos que ocurren en la atmósfera, océanos, criósfera y litósfera. Simulan la respuesta del sistema climático mundial al aumento de las concentraciones de GEI (IPCC, 2018).

La aplicación de modelos climáticos avanzados requiere de alto costo computacional como computación avanzada de alto rendimiento, es por esto que se realizan ciertas restricciones adicionales a la capacidad computacional (IPCC, 2013):

◆ Resolución espacial finita

Esto implica que los efectos de ciertos procesos deben representarse mediante parametrizaciones. Las implementaciones numéricas permiten la elección del espaciado de cuadrícula y el paso del tiempo, denominado “resolución del modelo”. Una resolución de modelo más alta generalmente conduce a modelos matemáticamente más precisos (no necesariamente simulaciones más confiables), lo que provoca mayores costos computacionales.

◆ Procesos y componentes del modelo

Teniendo en cuenta que el sistema climático contiene muchos procesos, se deben plantear los que se incluirán o dejarán fuera del modelo considerando que la importancia relativa de cada proceso varía con la escala de tiempo de interés y que un aumento en la complejidad del modelo conduce a un aumento en el costo computacional.

La simulación climática de los GCMs es entregada en cuadrículas tridimensionales a nivel mundial, abarcando las diferentes áreas del planeta y alturas en la atmósfera como se muestra en la Figura 2-7. Estas cuadrículas, tienen generalmente una resolución horizontal de entre 250 y 600 km y la atmósfera se encuentra dividida en 10 a 20 capas verticales de 1 km y en particular sobre los océanos hasta 30 capas verticales (IPCC, 2018).

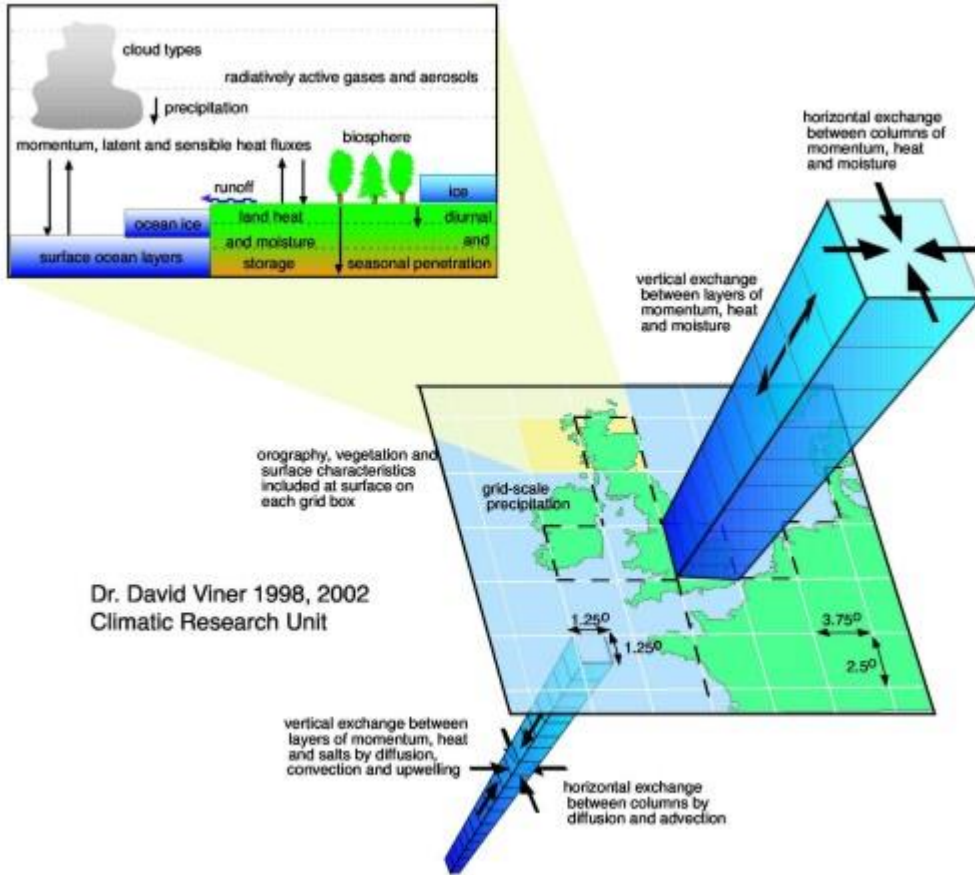


Figura 2-7: Esquema de cuadrícula tridimensional mundial (IPCC, 2018).

◆ Variadas simulaciones con uno o diferentes modelos

Debido a las incertidumbres en la formulación del modelo y el estado inicial, cualquier simulación individual representa solo una de las vías posibles que podría seguir el sistema climático. Para permitir una cierta evaluación de estas incertidumbres es necesario realizar más de una simulación lo que provoca un aumento en el costo computacional.

A pesar de que los GCM (Modelos de Circulación General por sus siglas en inglés) representan el fenómeno a nivel mundial, muchos procesos físicos, como los relacionados con las nubes, ocurren a escalas más pequeñas que las entregadas por las cuadrículas y no pueden modelarse adecuadamente. Por lo anterior se hace necesario escalar el modelo mundial a regional o local proporcionando estimaciones geográficas y físicamente consistentes del cambio climático a una menor escala como se grafica en la Figura 2-8.

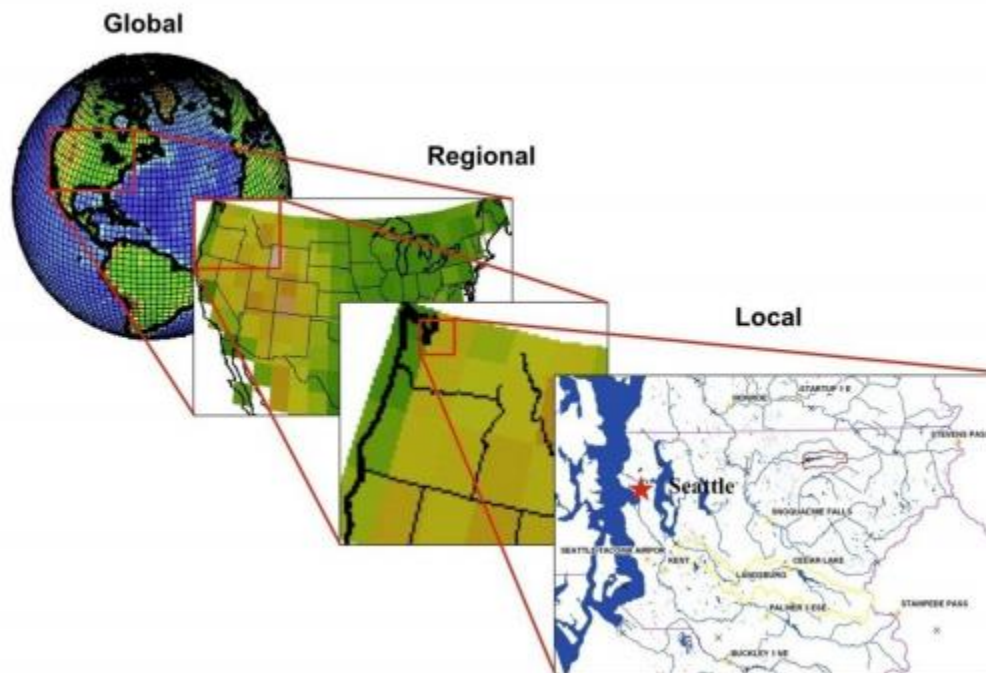


Figura 2-8: Reducción de escala (Centro de Cambio Global US, 2012).

Existen dos formas de realizar esta reducción de escala, el método dinámico y el método estadístico. El primero anida un modelo climático regional (RCM por sus siglas en inglés) dentro del propio GCM, por lo tanto, simula el clima basado en la problemática computacional del GCM, pero a una escala regional, donde sus bordes están forzados por el modelo global. El segundo aplica relaciones estadísticas entre el clima local observado y valores obtenidos de los GCM (FICLIMA).

Sin embargo, existen modelos que incluyen escenarios del cambio climático y que entregan precipitaciones futuras que se encuentran a escala reducida. A continuación, en el Acápite 0 se presenta el modelo climático a utilizar.

Modelo climático NEX GDDP

Este modelo es creado por la plataforma de colaboración entre científicos, *NASA Earth Exchange* (NEX), que investiga la ciencia de los sistemas de la Tierra y el cambio global a través del centro de investigación Ames donde existen instalaciones informáticas de última generación de la división de supercomputación avanzada de la NASA (NAS por sus siglas en inglés) en las cuales se analizan datos satelitales y climáticos (NASA, 2018).

El conjunto de datos del modelo entrega proyecciones mundiales reducidos a escala diaria (GDDP por sus siglas en inglés) de escenarios climáticos derivados de la ejecución de GCM realizadas bajo la Quinta Fase del Proyecto de Intercomparación del Modelo Acoplado (CMIP5) y en apoyo al Quinto Informe (AR5) de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) (NASA, 2015).

Para la producción de 42 escenarios climáticos se ocuparon dos escenarios de emisión de gases efecto invernadero, las rutas de concentración representativas RCP4.5 y RCP8.5 en conjunto con 21 modelos de escenarios climáticos, mostrados en la Tabla 2-1, producidos y distribuidos bajo CMIP5:

Tabla 2-1: CGM desarrollados en CMIP5 utilizados en el conjunto de datos del modelo NEX-GDDP (NASA, 2015)

ACCESS1-0	CSIRO-MK3-6-0	MIROC-ESM
BCC-CSM1-1	GFDL-CM3	MIROC-ESM-CHEM
BNU-ESM	GFDL-ESM2G	MIROC5
CanESM2	GFDL-ESM2M	MPI-ESM-LR
CCSM4	INMCM4	MPI-ESM-MR
CESM1-BGC	IPSL-CM5A-LR	MRI-CGCM3
CNRM-CM5	IPSL-CM5A-MR	NorESM1-M

El conjunto de datos otorgado por NEX-GDDP incluye los 21 modelos de la Tabla 2-1 aplicados para un análisis histórico retrospectivo desde el año 1950 al 2005 (línea base) y proyecciones de 42 modelos de cambio climático, proporcionado por los modelos antes señalados a los cuales se les aplica ambos escenarios RCP, dentro de los cuales se analizan prospectivamente los modelos desde el año 2006 al 2100. A las proyecciones climáticas retrospectivas y prospectivas de datos se les aplica un algoritmo de reducción de escala estadística. Estas reducciones de escala son efectuadas mediante el método de Desagregación Espacial de Corrección de Sesgo (BCSD por sus siglas en inglés) el cual genera celdas espaciales sobre el planeta de aproximadamente 25 km x 25 km (NASA, 2015).

Se utilizan los modelos de proyección ESM2G y ESM2M debido a que son las proyecciones que menos errores presentan en los datos de precipitación.

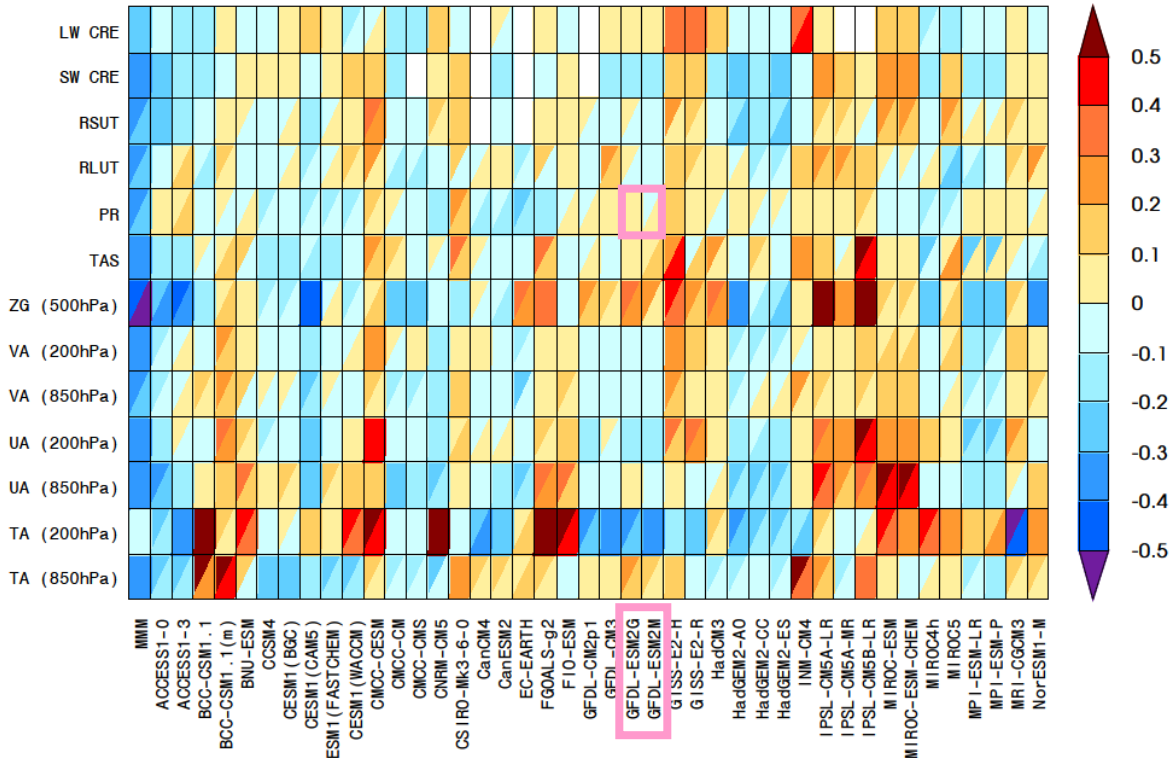


Figura 2-9: Error relativo de cada variable, según cada modelo CMIP5 (IPCC, 2013).

En la Figura 2-9 se muestran los errores relativos, calculados según la normalización del RMSE (error cuadrático medio por sus siglas en inglés) de cada variable, por la media de los errores de todos los modelos considerados en el CMIP5. En la evaluación de los modelos climáticos (IPCC, 2013), la media de los multi modelos concuerda más favorablemente con las observaciones, en comparación con un modelo individual. Esto ha sido reconocido ampliamente en los casos de temperatura y precipitaciones. Debido a lo anterior, se considera utilizar los modelos GFDL-ESM2G y GFDL-ESM2M para la proyección de las precipitaciones, ya que cuentan con un error relativo menor.

Las proyecciones climáticas reducidas a escala espacial entregan valores diarios de dos variables, temperatura y precipitación, las cuales se detallan en la Tabla 2-2:

Tabla 2-2: variables otorgadas por los modelos climáticos y escenarios de cambio climático (NASA, 2015).

Símbolo de Variable	Significado	Unidad
pr	Promedio de tasa de precipitación diaria	$\frac{Kg}{m^2s}$
tasmin	Temperatura mínima diaria del aire cercano a la superficie	°K
tasmax	Temperatura máxima diaria del aire cercano a la superficie	°K

2.3 Escenarios de Cambio Climático

Los escenarios ayudan al análisis del cambio climático, ya sea para la creación de modelos del clima, para la evaluación de los impactos o para análisis de iniciativas de adaptación y de mitigación.

Como se menciona anteriormente, los efectos observados tanto en la atmósfera, océanos y litósfera son el resultado principalmente de acciones antropogénicas, entonces para proyectar los efectos del cambio climático, se debe proyectar la fuente de este fenómeno, es decir, los niveles de contaminación por gases efecto invernadero (GEI). Así, para proyectar el cambio climático, se realiza la simulación de modelos climáticos basados en escenarios futuros de emisión de contaminantes.

Los Modelos de Evaluación Integrada (IAM por sus siglas en inglés), combinan las leyes de la naturaleza y el comportamiento humano adicionando patrones de desarrollo socioeconómico, tecnológicos y biofísico a las emisiones de contaminantes.

En el contexto del tercer informe de evaluación del IPCC, AR3, en 1996 se realiza el Informe Especial de Escenarios de Emisiones (SRES por sus siglas en inglés) en el cual se decide desarrollar nuevos escenarios de emisiones de GEI. En este, se crean cuatro líneas evolutivas cualitativas como se muestra en la Figura 2-10, cada una representa una tendencia demográfica, social, económica, tecnológica y medioambiental. Se generan 40 escenarios, cada uno es una interpretación cuantitativa de una de las líneas evolutivas.

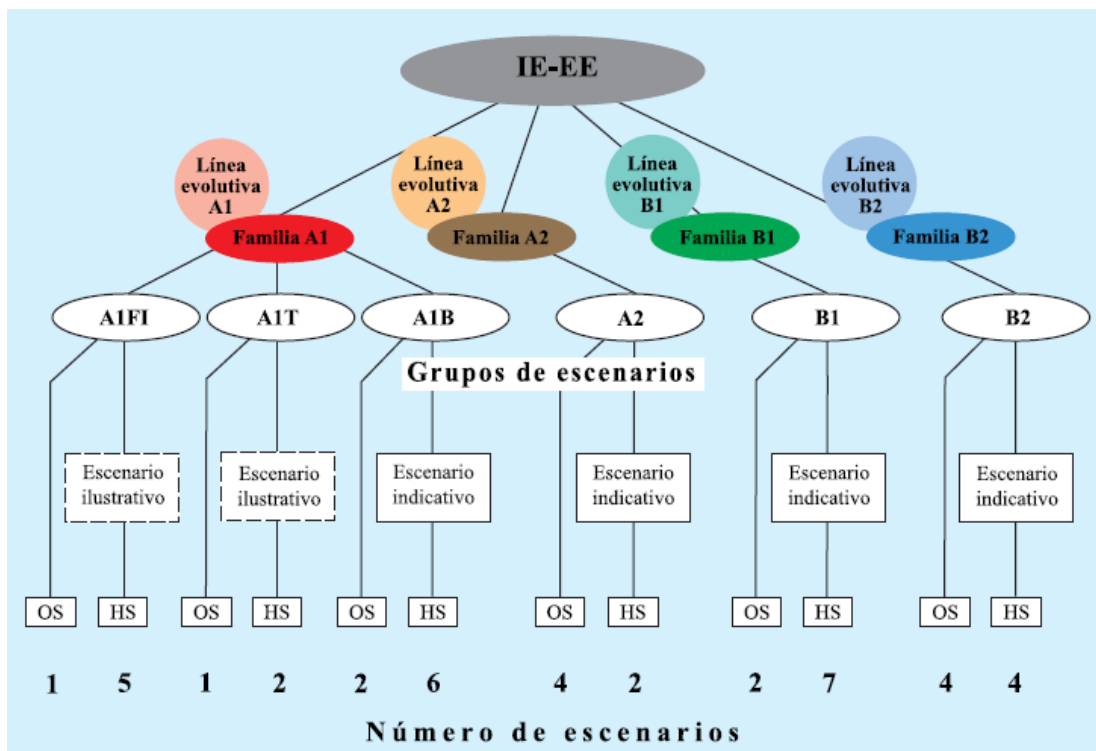


Figura 2-10: Escenarios declarados en el Informe Especial de Escenarios de Emisiones del IPCC (IPCC, 2000).

El conjunto de escenarios que pertenecen a la misma línea evolutiva se denominan familia de escenarios. Como se muestra en la Figura 2-10, se desprenden de las líneas evolutivas las familias A1, A2, B1, B2. De cada familia se desprende uno o más grupos, por ejemplo, de la familia A1 se desglosan 3 grupos que caracterizan el desarrollo tecnológico de energía. A1FI utiliza en gran parte combustibles de origen fósil, en el grupo A1T prevalecen los combustibles de origen no fósil y el grupo A1B considera una utilización equilibrada de todo tipo de fuentes de energía. Dentro de los grupos, existen escenarios armonizados (HS por sus siglas en inglés) que comparten supuestos sobre demografía, energía final y producto interno bruto y otro conjunto de escenarios no armonizados los cuales toman en consideración incertidumbres y fuerzas determinantes.

Se presentan las principales características de cada familia de escenarios:

A1

- ◆ Población mundial alcanza valor máximo a mediados del siglo y va disminuyendo posteriormente.
- ◆ Rápido crecimiento económico.
- ◆ Rápida introducción de tecnologías nuevas y más eficientes.
- ◆ Sus características más importantes son la convergencia entre regiones, la creación de capacidad y el aumento de las interacciones culturales y sociales, acompañadas de una notable reducción de las diferencias regionales en cuanto a ingresos por habitante.

A2

- ◆ Las pautas de fertilidad en el conjunto de las regiones convergen muy lentamente, con lo que se obtiene una población mundial en continuo crecimiento.
- ◆ El desarrollo económico está orientado básicamente a las regiones, y el crecimiento económico por habitante.
- ◆ El cambio tecnológico está más fragmentado y son más lentos que en otras líneas evolutivas.

- ◆ Representa un mundo muy heterogéneo. Sus principales características son su autosuficiencia y la conservación de las identidades locales.

B1

- ◆ La población mundial alcanza un máximo hacia mediados del siglo y desciende posteriormente, como la línea A1.
- ◆ Rápidos cambios de las estructuras económicas orientados a una economía de servicios y de información.
- ◆ Utilización menos intensiva de los materiales y de la introducción de tecnologías limpias con un aprovechamiento eficaz de los recursos.
- ◆ Representa un mundo convergente. En esta familia predominan las soluciones de orden mundial encaminadas a la sostenibilidad económica, social y medioambiental, así como a una mayor igualdad, pero en ausencia de iniciativas adicionales en relación con el clima.

B2

- ◆ Población aumenta progresivamente a un ritmo menor que en A2.
- ◆ Niveles de desarrollo económico intermedios.
- ◆ Cambio tecnológico menos rápido y más diverso que en las líneas evolutivas B1 y A1.
- ◆ Predominan las soluciones locales a la sostenibilidad económica, social y medioambiental. Orientado también a la protección del medio ambiente y a la igualdad social, se centra en los niveles local y regional principalmente.

Por otro lado, las trayectorias de concentración representativas (RCP) son 4 escenarios que nacen en el contexto de preparación para el quinto informe de evaluación del IPCC, AR5, por el quinto proyecto de intercomparación de modelo acoplado (CMIP5 por sus siglas en inglés) en el año 2008.

Los RCP miden la variación del flujo radiativo en la tropopausa, llamada Forzamiento Radiactivo Total (FR) en $[W/m^2]$, producto de emisiones acumulativas de GEI. Se nombran de acuerdo con el forzamiento radiactivo proyectado al año 2100 y fueron creados para facilitar el mapeo climático, sin representar específicamente un pronóstico de emisiones ni de cambio climático.

Las emisiones antropógenas de GEI dependen principalmente de 7 factores (IPCC, 2014):

1. Tamaño de la población
2. Actividad económica
3. Estilo de vida
4. Uso de la energía
5. Uso de suelo
6. Tecnología
7. Política climática.

Por lo anterior, se presentan las características de los factores de cada trayectoria de concentración representativa:

RCP 2.6

- ◆ Ruta de emisión es representativa de escenarios con niveles muy bajos de concentración de gases de efecto invernadero.
- ◆ Se presentan cantidades medias de áreas agrícola como tierras para cultivo y pasto.
- ◆ Se presentan cantidades medias a bajas de contaminación del aire.
- ◆ Se requiere gran cambio en las políticas climáticas y acciones acordadas en los próximos años en todos los países, tanto en desarrollo como desarrollados.
- ◆ Las emisiones mundiales de CO_2 alcanzan su punto máximo en 2020 y disminuyen a alrededor de cero para el año 2080.

- ◆ Tiene un Peak de 3,1 [W/m^2] a mediados de siglo y luego comienza a descender lentamente llegando a 2,6 [W/m^2] en 2100, debido a la reducción sustancial de GEI en el tiempo.
- ◆ Desarrollado por equipo de modelado de IMAGE de la Agencia de Evaluación Ambiental de los Países Bajos.

RCP 4.5

- ◆ Se presentan mitigaciones de emisiones de GEI medias a bajas, manteniéndose la línea base de emisiones muy baja.
- ◆ Se presentan cantidades muy bajas de áreas agrícola como tierras para cultivo y pasto.
- ◆ Se presentan cantidades medias de contaminación del aire.
- ◆ Las emisiones de CO_2 alcanzan su punto máximo a de mediados de siglo, disminuyendo en 30 años siguientes y alcanzando estabilidad.
- ◆ Escenario de estabilización del forzamiento radiactivo total, mediante empleo de tecnología y estrategias para reducir emisiones GEI. Estabilización a los 4.5 [W/m^2] después del 2100, sin trayectoria de sobreimpulso.
- ◆ Desarrollado por equipo de modelado de MiniCAM del Instituto de Investigación del Cambio Global del Laboratorio Nacional del Pacífico Noroeste (JGCRI por sus siglas en inglés).

RCP 6

- ◆ Se presentan mitigaciones de emisiones de GEI altas, manteniéndose cantidades medias de la línea base de emisiones.
- ◆ Se presentan cantidades medias de tierras para cultivo y bajas de pasto.
- ◆ Se presentan cantidades medias de contaminación del aire.
- ◆ Las emisiones de CO_2 aumentan considerablemente hasta el 2060. Luego disminuyen drásticamente, manteniéndose muy por encima de los niveles actuales.
- ◆ Escenario de estabilización del forzamiento radiactivo total, mediante mediante el empleo de una gama de tecnologías y estrategias para reducir las emisiones de GEI. Estabilización a los 6 [W/m^2] después del 2100, sin trayectoria de sobreimpulso
- ◆ Desarrollado por el equipo de modelo integral Asia Pacífico (AIM por sus siglas en inglés) en el Instituto Nacional de Estudios Ambientales (NIES por sus siglas en inglés), Japón.

RCP 8.5

- ◆ Se presentan cantidades altas de la línea base de emisiones de GEI.
- ◆ Se presentan cantidades medias de áreas agrícolas como tierras para cultivo y pasto.
- ◆ Se presentan cantidades medias a altas de contaminación del aire
- ◆ Es el peor escenario para las emisiones de CO_2 , ya que aumentan en grandes proporciones estabilizándose en el 2100.
- ◆ Aumento de las emisiones de GEI a lo largo del tiempo. Representativas de los escenarios que conducen a niveles altos de concentración de gases de efecto invernadero. Aumento de la trayectoria de forzamiento radioactivo a 8,5 [W/m^2] en el 2100.
- ◆ Desarrollado por el equipo de modelado MESSAGE y el Marco de Evaluación Integrado IIASA en el Instituto Internacional para el Análisis de Sistemas Aplicados (IIASA), Austria.

En la Figura 2-11 se muestra el forzamiento radioactivo proyectado de todos los escenarios anteriormente señalados. Notar que los grupos de escenarios de SRES son proyectados hasta el año 2100, mientras que los RCP si bien los modelos están orientados hacia un FR determinado en el año 2100, se proyectan hasta el año 2300. La prolongación de los escenarios RCP luego del año 2100 se realiza utilizando suposiciones simples sobre las concentraciones de GEI y aerosoles más allá de 2100

(como la estabilización o la disminución constante), por lo tanto, son hipotéticos y no corresponden a un resultado de un IAM que asuma consideraciones socioeconómicas más allá de 2100.

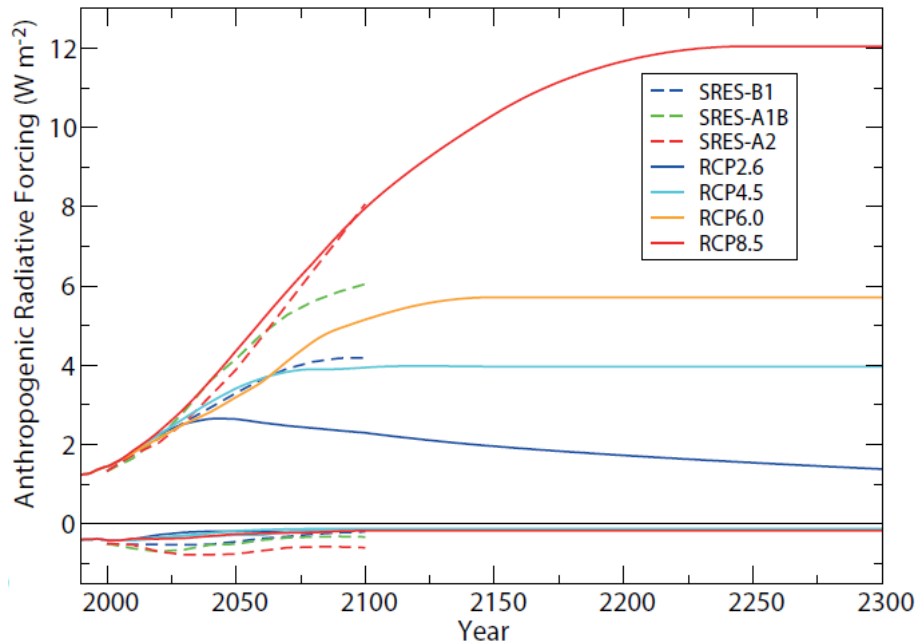


Figura 2-11: Escenarios de RCP (Trayectoria de Concentración Representativa) y SRES (Informe especial sobre escenarios de emisiones). IPCC, 2000.

Las RCPs incluyen un escenario de mitigación estricto (RCP2.6), dos escenarios intermedios (RCP4.5 y RCP6), y un escenario (RCP8.5) con niveles elevados de emisiones de GEI. Los dos escenarios mayores no exigen esfuerzos adicionales para limitar sus emisiones de GEI.

El RCP2.6 tiene por objetivo mantener el calentamiento global a menos de 2°C por encima de las temperaturas preindustriales, para esto, se deben limitar las emisiones acumuladas de CO₂ a 2900 GtCO₂ aproximadamente, pero hasta el año 2011 ya se habían emitido unas 1900 GtCO₂ (IPCC, 2013), por lo que analizar esta trayectoria de concentración representativa no constituye un escenario existente al 2100.

Se observa en la Figura 2-11 que el FR del escenario A2 es muy similar al del RCP 8.5 y que el FR de B1 se acerca a la proyección del RCP 4.5.

Formato de los Datos

Los archivos que contienen las precipitaciones diarias (pr) están en formato NetCDF o “.nc” (*Network Common Data Form*). Este formato permite almacenar conjuntos de datos. En este caso, los archivos entregados son conjuntos formados por precipitaciones diarias dependientes de la ubicación, por lo tanto, se tienen conjuntos unidimensionales dependientes sólo del tiempo o datos de tipo tridimensional, coordenadas (x,y) por su ubicación en el espacio y dependientes del tiempo como se muestra en la Figura 2-12.

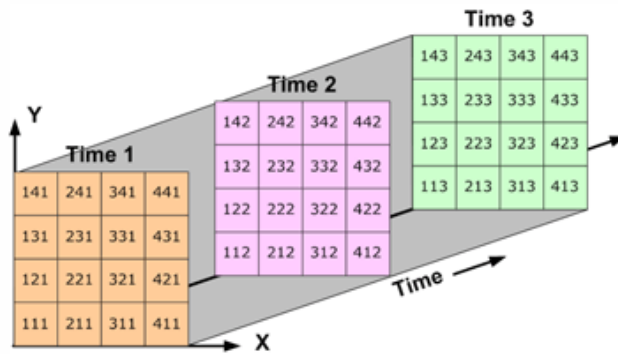


Figura 2-12: Esquema de almacenamiento de variables en el formato Net CDF (ArcGis, 2018).

Se deben cargar los archivos con formato NetCDF como capas raster.

Como se muestra en la Figura 2-13, las capas de tipo raster se componen de celdas o pixeles representando un valor y ordenadas por una matriz en filas y columnas.

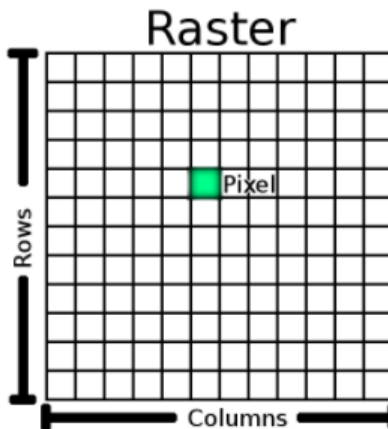


Figura 2-13: Orden de los datos dentro de una capa raster (QGIS, 2018).

En este caso, las celdas representan regiones geográficas y los valores de cada celda, las precipitaciones diarias.

2.4 Impacto del Cambio Climático en obras hidráulicas de depósitos de Relaves

Se realiza una investigación para representar el estado del arte acerca del tema escogido. Se encuentran diversos artículos, papers, publicaciones en seminarios y conferencias, entre otros, los cuales se refieren a la vulnerabilidad y/o el impacto del cambio climático en cuencas y embalses específicos. Se presentan los resultados de la investigación a nivel internacional y nacional.

2.4.1 Contexto mundial

Existen organizaciones internacionales y nacionales que dictan parámetros de diseño, seguridad operacional, sostenibilidad, entre otros, orientados a depósitos de relaves y presas.

El Consejo Internacional de Minería y Metales (ICMM por sus siglas en inglés) es una de estas organizaciones internacionales que tiene como miembros, compañías mineras que operan en diferentes países de las cuales recopilan información. Luego, realizan su evaluación y crean informes guías que representan los estándares de la organización y entregan recomendaciones. Esta organización publica un informe (ICMM, 2013) en donde menciona los efectos del cambio climático en la industria minera.

En primer lugar, este informe describe la importancia de comprender los impactos del cambio climático y desarrollar estrategias de adaptación para el sector de la minería. Menciona que existen características de este sector que incrementan el impacto del cambio climático, por ejemplo, que sus operaciones dependen de grandes activos fijos de larga vida útil de diseño y sensibles al clima los cuales, si no se considera el cambio climático desde el principio, el diseño y planificación no serán resilientes y aumentará el riesgo en la operación. Por otro lado, las mineras operan en geografías y climas muy desafiantes, generalmente aisladas, donde es mucho más difícil recuperarse de las irrupciones ocasionadas por el clima. Finalmente menciona, que el sector de la minería depende en gran medida del agua y la energía para sus procesos los cuales son altamente sensibles al clima.

En segundo lugar, analiza los impactos climáticos relevantes y menciona que Chile posee dos áreas donde las operaciones mineras se ubican principalmente y que el cambio climático dejará expuestas a riesgo. Por un lado, están las regiones del norte de Chile como Antofagasta y Atacama, que ya enfrentan un estrés hídrico extremadamente alto y se prevé que enfrentarán condiciones que son al menos dos veces más severas en el futuro. Por otro lado, está la zona sur de Chile propensa a volverse más húmeda en el futuro y tener períodos de mucha agua, por ejemplo, altos caudales debido a episodios de fuertes lluvias, deshielo estacional e inundaciones. Esta zona en particular es donde las obras experimentan mayores riesgos asociados a eventos extremos que puedan requerir cambios en la capacidad de almacenamiento de relaves o afectar la estabilidad de terraplenes y tranques de relaves los cuales dependen de factores como la geometría de la pendiente, fuerzas en la base del muro, propiedades de los materiales y ubicación de la cota freática. Para el periodo de cierre y posterior a él, las empresas tienen la obligación a largo plazo de mantener los relaves y las estructuras de almacenamiento de desechos, por lo cual estas estructuras deben estar diseñadas para soportar eventos que probablemente ocurran solo una vez cada varios miles de años y pueden no funcionar como se planeó en un clima más húmedo en el futuro.

Luego, el informe menciona que las compañías mineras pueden evaluar los riesgos y las oportunidades asociados con esos impactos. Ejemplos de evaluaciones mencionadas son:

- Evaluar la necesidad y la disponibilidad de **proyecciones climáticas**. Considerar el nivel de detalle e incertidumbre asociado con los datos climáticos.
- Llevar a cabo evaluaciones de riesgos de las **vulnerabilidades actuales y futuras del cambio climático**, su probabilidad y consecuencias. Se debe priorizar los riesgos y considerar su relevancia para otros riesgos y oportunidades no climáticos.

- ◆ Evaluar la **adecuación de las instalaciones existentes** y los criterios de diseño operacional, la magnitud del riesgo y el costo de implementar los cambios. Se debe dar prioridad a las áreas donde el costo de modificar los criterios de diseño existentes se justifica mediante la prevención o mitigación de riesgos de gran magnitud.
- ◆ Incorporar las consideraciones del cambio climático en los procedimientos existentes de **gestión de riesgos y preparación para emergencias**. Se debe integrar el riesgo climático y las oportunidades en la planificación empresarial.

A diferencia de los riesgos potenciales, los cambios en el clima futuro también pueden presentar oportunidades para las empresas del sector de la minería, como las siguientes:

- ◆ Temperaturas más altas y una temporada libre de hielo más prolongada pueden **augmentar el acceso** a nuevas reservas y permitir una temporada de operaciones más prolongada en las áreas del norte.
- ◆ Las empresas geográficamente diversificadas y preparadas para los impactos potenciales del cambio climático en el futuro pueden tener la capacidad de aprovechar los cambios o impactos en los competidores para aumentar la cuota de mercado.

En tercer lugar, el informe examina las opciones disponibles de las compañías mineras para adaptarse a los impactos del cambio climático. Las acciones que menciona para eliminar o evitar riesgos son:

- ◆ **Reforzar los activos para resistir** las condiciones climáticas futuras (por ejemplo, temperaturas más altas, episodios de fuertes lluvias).
- ◆ **Modificar las normas de diseño** de ingeniería, **los criterios** de diseño y las especificaciones del contrato para dar cuenta de un clima cambiante (por ejemplo, una mayor capacidad en el agua y depósitos de almacenamiento de residuos).
- ◆ **Reubicar o elevar activos y operaciones fuera de áreas de alto riesgo** (por ejemplo, llanuras de inundación).
- ◆ **Aumentar la frecuencia de mantenimiento y monitoreo** de activos sensibles a los efectos del clima.

Tomando en cuenta lo anterior, agregado a que el sector minero tiene mucha experiencia en la identificación y gestión de riesgos ya que enfrentan requisitos normativos estrictos, impactos de fenómenos meteorológicos extremos, escasez de agua y la necesidad de mantener los más altos estándares de salud y seguridad, se concluye finalmente en este informe que un clima cambiante es un factor estresante adicional que puede agravar los riesgos actuales que se manejan en el sector de la minería, o crear nuevas oportunidades.

Otra organización internacional es la Comisión Internacional de Grandes Presas (ICOLD por sus siglas en inglés) la cual el 2008 crea su comité técnico sobre cambio climático como apoyo a la comunidad internacional de represas. Este comité técnico en la 78ª reunión ejecutiva, celebrada en Hanoi, Vietnam en mayo de 2010, decide el programa del 24º Congreso y emite a partir de esto, la preimpresión de su boletín técnico número 169, presentándolo finalmente en el 2016 en la Conferencia Internacional del Agua y el Clima en Rabat, Marruecos.

En este boletín (ICOLD, 2010) se indica que el impacto del cambio climático en la seguridad de presas depende de los efectos de la precipitación, la evaporación, la acumulación de nieve y su derretimiento de forma local. Por ejemplo, menciona que surgirán inundaciones extremas en las latitudes más altas y sequías en las latitudes más bajas por lo que, los efectos del cambio climático deben analizarse localmente en los estudios específicos del terreno. Indica que se deben aplicar soluciones para este efecto a embalses existentes y futuros, resultantes del análisis cualitativo de

predicciones futuras ya que la variabilidad de los resultados es elevada y genera incertidumbre en la magnitud de cambios futuros.

Según el boletín, en algunas regiones las crecidas extremas serán de mayor magnitud, por lo tanto, la capacidad de almacenamiento temporal disponible y de obras de desbordamiento no serán adecuadas impactando en la seguridad de la presa y produciendo la falla. Debido a lo anterior, ICOLD propone soluciones posibles al efecto del cambio climático en represas que le brinden protección estableciendo un mayor almacenamiento de crecidas y aumentando la capacidad de descarga. Estas soluciones son:

- ◆ Actualizar las normas de diseño de crecidas para contemplar el cambio climático.
- ◆ Revisiones periódicas de diseño y seguridad de la represa, mayor inversión en profesionales capacitados y dedicados a esta labor.
- ◆ Agrupamiento de múltiples represas en un mismo sistema fluvial para entregar mayor flexibilidad y capacidad de control del caudal afluente.
- ◆ Utilizar escenarios de cambio climático para análisis de sensibilidad y mediante este, aumentar flexibilidad del depósito y generar medidas preventivas como las siguientes:
 - ◆ Efectuar modificaciones a los vertederos, por ejemplo, aumentar su longitud.
 - ◆ Generar vertederos auxiliares adicionales o vertederos tipo fusible para satisfacer necesidad en crecidas mayores y anormales.
 - ◆ Ensanchamiento y/o aumento en la altura de canales de descarga de vertederos
 - ◆ Elevación del coronamiento del muro

Las medidas de diseño adicionales junto con las nuevas metodologías mencionadas anteriormente deben incluirse en la planificación y toma de decisiones de necesidades futuras y permiten que la seguridad de las represas en respuesta al cambio climático sea más manejable. Sin embargo, ICOLD propone que el verdadero desafío está en encontrar nuevas formas de pensar y hacer las cosas más que de encontrar soluciones técnicas.

Se presentan a continuación la revisión de publicaciones internacionales que hacen referencia a diversos impactos del cambio climático en embalses de agua:

- ◆ En el artículo *“Dam Rehabilitation Assessment Using the Delphi-AHP Method for Adapting to Climate Change”* (Ji-Hyeok, Tae-Hyung, Jong-Suk, & Young-Il, 2017), los autores presentan la evaluación de la rehabilitación de embalses antiguos y medidas de eficiencia de rendimiento y mantenimiento para mejorar la operación de ellos ante el cambio climático. Se realizan dos encuestas a un panel de expertos para determinar la importancia de los elementos de evaluación, donde los ítems relacionados con la seguridad hidrológica se evaluaron como los más importantes. Lo anterior, seguido por el impacto del cambio climático en las secciones del embalse, factores ambientales, factores económicos, y factores de política social. Luego de ajustar la encuesta y ponderar el grado de experiencia del panel mediante el proceso de jerarquía analítica (AHP por sus siglas en inglés) Delphi, el valor de peso para la seguridad hidrológica aumentó y los cuatro elementos principales restantes no registraron diferencias. Los ítems de seguridad hidrológica que obtuvieron mayor importancia fueron desbordamiento y aseguramiento del resguardo, seguridad estructural contra CMP y nivel de peligro aguas abajo.
- ◆ Otra investigación sobre el efecto del cambio climático en embalses es el artículo *“Impact of Climate Change on Flood Frequency of the Trian Reservoir in Vietnam Using RCMS”* (Dong, Jayakumar, & Agilan, 2017), en el cual los autores estudian el impacto del cambio climático en los eventos de crecidas del embalse Trian, Vietnam a través de las series de valores extremos POT (Peaks sobre el umbral por sus siglas en inglés) mediante el ajuste de distribuciones

estocásticas sobre modelos regionales de escenarios de cambio climático (RCM) reduciendo estadísticamente su escala aplicando un generador climático (WG por sus siglas en inglés) de la estación de investigación Long Ashton (LARS por sus siglas en inglés). Los resultados de cinco RCM y un GCM muestran que las magnitudes de las crecidas aumentan significativamente en el período futuro (2020-2045) para tres estaciones en la cuenca Trian. En específico, el caudal asociado al periodo de retorno de 100 años del embalse Trian aumenta hasta 32,34% en uno de los escenarios futuros.

Se encontró una serie de artículos acerca de investigaciones sobre el impacto del cambio climático en la operación y el desempeño del almacenamiento de embalses, cuyo objetivo es proporcionar agua para riego y/o generar electricidad. En estos artículos, el cambio climático impacta principalmente en el flujo de entrada a los embalses.

- ◆ En el artículo de investigación “*Evaluating the variability in surface water reservoir planning characteristics during climate change impacts assessment*” (Soundharajan, Adeloje, & Remesan, 2016), los autores caracterizan las incertidumbres de las variaciones inducidas por el cambio climático en los requisitos de almacenamiento y de desempeño (confiabilidad, resistencia, vulnerabilidad y sostenibilidad) del embalse Pong, India. La diferencia entre este artículo y el enfoque tradicional de los estudios del impacto del cambio climático es que el primero provee un rango de impactos o de su incertidumbre mientras que los tradicionales, consideran datos específicos de la hidrología actual y futura, por lo tanto, se relacionan con el impacto promedio y no entregan un conjunto de posibles datos hidrológicos actuales y futuros. Otra diferencia que constituye este artículo es que se realizan modelaciones estocásticas en series de escurrimiento directamente, diferenciándose del estudio de Peel, Srikanthan, McMahon, & Karoly (2014) en el cual los modelos estocásticos se aplican a los datos de entrada (precipitación y temperatura) del modelo forzado de precipitación-escurrimiento. Finalmente, simula el efecto del cambio climático perturbando los datos de línea base con un factor delta, a diferencia de la mayoría que incluye este efecto a través de GCM o RCM. Los resultados muestran que las reducciones en las precipitaciones provocan que el flujo de entrada al embalse disminuya y viceversa. Sin embargo, la fusión de la nieve y glaciares estacionales del Himalaya, debido al aumento de temperaturas, anula algunos de los impactos en la reducción del flujo de entrada debido a la reducción de la precipitación. En cuanto a la incertidumbre en las variaciones provocadas por el cambio climático las mayores se encuentran en la capacidad requerida y la vulnerabilidad del embalse.
- ◆ Otro estudio sobre la operación de embalses es “*Climate Change Impact on Reservoir Operation: Ukai Reservoir as a Case Study*” (Nigam & Yadav, 2015), en el cual los autores verifican mediante variados métodos estadísticos y análisis de tendencias que el flujo de entrada al embalse Ukai, India tendrá una tendencia creciente debido al efecto del cambio climático en las precipitaciones, temperaturas y humedad. Esto conlleva a la modificación en la política de operación del embalse, por una que optimice la utilización de recursos hídricos disponibles. Se presenta *Fuzzy Logic* como modelo de operación del embalse confiable, preciso y práctico.

2.4.2 Contexto latinoamericano y nacional

Por otro lado, existen estudios latinos y nacionales sobre este tema. Por ejemplo, artículos científicos publicados en revistas como la Revista Iberoamericana del Agua (RIBAGUA) o publicaciones en congresos hidráulicos como el Congreso Latinoamericano de Hidráulica o los congresos nacionales de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica (SOCHID).

Debido a que existen cuencas con crecidas de tipo nivo-pluvial es importante el comportamiento de la línea de nieves ya que su altura determina el área pluvial aportante de la cuenca. Según una investigación presentada en el XI Congreso Nacional de Ingeniería Hidráulica (Peña & Vidal, 1993) por cada grado de aumento en la temperatura durante la tormenta, la cota de la línea de nieves aumenta 200 [m] aproximadamente, lo cual provoca un gran cambio en el área pluvial aportante. En los últimos años en Chile se han generado precipitaciones con temperaturas más altas que lo observado en años anteriores, esto tendría directa relación con el aumento de temperatura debido al impacto del cambio climático (IPCC, 2014).

- En la publicación “Línea de Nieves y un Enfoque Preliminar para Pronosticar la Ocurrencia de Aluviones” (Lagos Zúñiga, Cornwell Varela, & McPhee Torres, 2014), los autores analizaron el comportamiento de la línea de nieves en el pronóstico preliminar de la ocurrencia de aluviones. Este estudio plantea una metodología basada en registros de temperatura y humedad relativa, a diferencia del anterior que se basa en el supuesto de la línea de nieves ocurre en la cota de la temperatura umbral cercano a 1° C. El estudio menciona que la ocurrencia de aluviones tiene directa relación con la altura de línea de nieves, ya que las precipitaciones de tipo líquida en zonas donde alcanzan material removible generan con mayor probabilidad deslizamientos. Como la metodología planteada no depende de datos satelitales, puede ser utilizada en tiempo real en zonas que tengan un registro adecuado de temperatura y humedad relativa de estaciones meteorológicas situadas dentro de la cuenca en estudio. Si no se cuenta con suficiente monitoreo dentro de la cuenca, se plantea la extrapolación de los datos requeridos de una o dos estaciones y complementadas con registros de globo sondas.
- En el estudio “Modelación probabilística de la línea de nieves durante eventos de tormenta entre los 28,5° y 46,5° LS” (Covián G. & Stowhas B., 2015), los autores estudian la línea de nieves entre la latitud 28,5° y 46,5°. Se realiza una modelación estocástica de la línea de nieves en la zona Centro-Sur de Chile y los resultados se consideran para tres épocas del año (verano, otoño-primavera e invierno). Para la época de verano, se obtienen anomalías en la tendencia de la línea de nieves durante eventos de tormenta en estaciones cordilleranas de menor latitud y mayor altitud, lo cual es atribuido a eventos de origen convectivo locales de corta duración, lo que no genera condiciones para la formación de una atmósfera pseudo adiabática húmeda en zonas bajas. En cambio, para las dos épocas restantes la altitud de la línea de nieves disminuye dependiendo de la latitud sur, lo que afirma la hipótesis de existencia de una atmósfera pseudo adiabática húmeda durante eventos de tormenta.

Como se menciona en el estudio anterior (Lagos Zúñiga, Cornwell Varela, & McPhee Torres, 2014), donde la línea de nieves juega un rol importante en la estimación de la ocurrencia de aluviones, los eventos extremos de mayor intensidad tienen gran importancia en los procesos de deslizamiento. En el contexto de los depósitos de relaves y sus obras hidráulicas, estos sedimentos provocados por grandes eventos se podrían depositar finalmente en la cubeta del depósito de relaves disminuyendo el volumen para acumular aguas claras e incrementando el riesgo de aumento en la cota de pelo de agua. Por otro lado, la erosión al inicio y fin de obras de arte podría provocar su falla operacional y colapso de caminos.

- En la publicación “Efecto de los eventos extremos en la erosión y producción de sedimentos. Un análisis predial de la zona central de Chile” (Céspedes & Bonilla, 2014), los autores investigan

acerca del efecto de los eventos extremos en la erosión y producción de sedimentos en la zona central de Chile. Céspedes & Bonilla consideraron datos reales de precipitación, temperatura y propiedades del suelo de seis sitios. Los resultados muestran que los eventos más erosivos pueden llegar a ser 5,6 veces mayor a los que ocurren en eventos de erosión promedio y que los primeros no se producen necesariamente en lugares donde ocurren los eventos de precipitación extrema mayores ya que en los procesos erosivos también influyen las características dinámicas del suelo. Sin embargo, los eventos más erosivos en un determinado lugar se producen cuando la precipitación y la escorrentía es el doble y 3,5 veces mayor respectivamente de la que ocurre en los eventos de erosión promedios.

En el contexto del impacto del cambio climático en las precipitaciones y posterior hidrología de cuencas, existen de igual modo artículos de estudio de cuencas internacionales presentados en los congresos latinoamericanos. En las versiones número XXV y XXVII del Congreso Latinoamericano de Hidráulica realizado en Santiago de Chile y Lima, Perú respectivamente, se presentaron artículos relacionados con el impacto directo del cambio climático en las precipitaciones máximas anuales (Chacón, González, & Galán, 2016) y eventos extremos. Dentro de estos estudios publicados, hay uno en particular (Guzmán Sagreiros, Cavazos González, Vera Herrera, & Salinas López, 2014) que enfatiza en la importancia en la creación de criterios para el dimensionamiento obras hidráulicas debido vulnerabilidad por el impacto del cambio climático en las precipitaciones de Nuevo León, México.

Sumado a lo anterior, existen memorias de título de universidades chilenas orientadas al impacto del Cambio Climático en zonas de Chile que realizan el análisis en obras hidráulicas.

- ◆ Raddatz Delgado (2011) menciona que la seguridad hidrológica de las obras hidráulicas construidas y en proyecto, se puede ver afectada debido a las variaciones en los eventos meteorológicos actuales observados como consecuencia del cambio climático global y que se intensificará en el futuro produciendo modificaciones en los periodos de retorno de diseño de obras hidráulicas. Raddatz Delgado analiza los efectos del escenario de emisiones A2 (entre los años 2070 y 2100) de cuencas de la zona costera de la Región del Bio Bio. Calcula las series de caudales actuales y futuros en base al modelo PRECIS DGF y realiza análisis de frecuencia para estimar los caudales y periodos de retorno actuales para la línea base y futuros para el escenario A2. Finalmente, se obtiene una disminución en los caudales de crecida de las cuencas analizadas observándose que mientras aumenta el periodo de retorno, menor es la variación del caudal. Por lo anterior, se observa un aumento en la seguridad hidrológica de las obras hidráulicas en el periodo analizado.
- ◆ Lagos Zúñiga M. Á. (2012) menciona la vulnerabilidad de las grandes obras hidráulicas ante posibles proyecciones de cambio climático. Evalúa los escenarios A2 y B1 (entre los años 2045 y 2065) para estimar la PMP estadísticamente en las Regiones de Coquimbo y Maule e hidrológicamente en la Cuenca Puclaro. Luego, analiza el impacto del cambio climático en los embalses Puclaro y Colbún (ambos de régimen hidrológico mixto) en temperaturas, en los eventos de 24 horas con periodos de retorno de 1.000 y 10.000 años y en crecidas de mismos periodos de retorno sumándole la CMP. Finalmente, concluye que la operación de los embalses es relevante debido a que su nivel de almacenamiento al inicio de la crecida, influirá en su capacidad de control y que es relevante analizar el comportamiento de estas obras bajo el cambio climático, debido a su larga vida útil. Los resultados muestran gran vulnerabilidad de los embalses Puclaro y Colbún por el importante aumento en las precipitaciones, siendo el más significativo en la CMP del primer embalse. También, se detecta una mayor vulnerabilidad en la seguridad hidrológica del embalse Puclaro debido a la topografía de su cuenca, donde pequeñas variaciones en la elevación de la línea de nieves producen grandes variaciones en el área pluvial aportante.

En cuanto al impacto del cambio climático en el territorio nacional, se destacan dos estudios:

- ◆ En el “Estudio de la variabilidad climática en Chile para el siglo XXI” realizado por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile (CONAMA, 2006), se realiza la estimación de escenarios climáticos para diferentes regiones de Chile durante el siglo XXI, dividiendo el siglo en dos periodos principales, intermedio (desde el 2011 al 2065) y finales del siglo XXI. Para lo anterior, se utilizó el modelo regional PRECIS con resolución espacial de 25 km y dos escenarios de emisiones, uno moderado (SRES B2) y otro severo (SRES A2). Los resultados muestran que, para el periodo intermedio se observa un alza en la isoterma 0°C para el escenario más severo con respecto al clima actual. Por lo tanto, hacia fines de siglo se observan aumentos en la temperatura media en todas las regiones del país, siendo mayor el aumento para el escenario más severo de emisiones y acentuado en regiones andinas, disminuyendo de norte a sur. En el caso de las temperaturas extremas diarias para fines de siglo, se observan mayores aumentos en la cordillera de la zona Norte de Chile durante el verano. Por otro lado, las precipitaciones varían según la región. Para el sector Altiplánico se esperan aumentos de esta variable en primavera y verano. En el Norte Chico, entre los 20 y 33°S, existe un aumento en las precipitaciones en otoño, pero en invierno esto ocurre sólo en el sector andino de esta región. Y para Chile central se observan disminuciones generalizadas en la precipitación
- ◆ En el estudio “Variabilidad y cambios climáticos observados y esperados en el Altiplano del norte de Chile” (Sarricolea Espinoza & Romero Aravena, 2015), los autores estudian a distintas escalas temporales y espaciales el impacto del cambio climático en el Altiplano chileno, específicamente en las regiones Arica y Parinacota y Atacama. Analizan las precipitaciones y temperaturas y luego los eventos extremos como sequías y eventos de precipitación extremos. Para lo anterior utilizan el modelo ACCESS 1.0 y un escenario de forzamiento radiativo alto (8,5 RPC). Los resultados muestran un aumento en la temperatura y disminución en las precipitaciones, sin embargo, se produce un aumento en su variabilidad para el Altiplano reflejado en el aumento del coeficiente de variación, por lo tanto, se concluyen precipitaciones extremas mayores a las actuales.

Finalmente, como se observa en la revisión del estado del arte anterior a pesar de que existen muchos artículos científicos, publicaciones en congresos e investigaciones tanto mundiales como nacionales que evalúan el impacto del cambio climático en eventos extremos, y algunos su efecto en embalses de agua, no se encontraron estudios que traten la vulnerabilidad de obras hidráulicas en sí. Si bien (ICOLD, 2010) plantea algunos criterios de diseño aplicables para reducir la vulnerabilidad de las obras ante los cambios en la escorrentía producto del cambio climático, estas son generales y tampoco se refieren a estos componentes en las obras hidráulicas dentro de los depósitos de relaves. Por lo anterior, se concluye que es necesario un estudio de la vulnerabilidad y análisis de criterios de diseño enfocado directamente a las obras hidráulicas dentro de depósito de relaves impactadas por el cambio climático.

2.5 Comentarios y Resultados del Capítulo

Los impactos en Sudamérica se observan en tendencias significativas de precipitación y temperatura, en variabilidad climática y eventos extremos tales como precipitaciones anuales decrecientes en la zona centro sur de Chile y enfriamiento de su costa. Por otro lado, se espera que continúen cambios en la disponibilidad de agua como la distribución estacional de caudales por el retiramiento de la criósfera andina lo que provoca escorrentías decrecientes en los andes centrales (IPCC, 2014). Por esto, es que cada vez se hace más escaso el suministro de agua para producciones chilenas tan importantes como agricultura y generación de energía hidroeléctrica, lo que convierte al Cambio Climático en un tema directamente relevante para Chile.

Chile es uno de los países con gran vulnerabilidad a los impactos del cambio climático, ya que posee en mayor parte las características mencionadas en el artículo 4° de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (ONU, 1992) como lo es ser propenso a desastres

naturales, poseer zonas costeras bajas, zonas áridas, zonas con cobertura forestal y expuestas a su deterioro, entre otros.

RESULTADO DE LA REVISION- ANALISIS RESPECTO DE LA MODELACION

En Chile, el 2012 la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) junto al Gobierno de Chile, publicaron el informe La Economía del Cambio Climático en Chile (CEPAL y Gobierno de Chile, 2012), en el cual se analiza el efecto económico debido al cambio climático en nuestro país en los 100 años. Para esto, este estudio proyecta los GEI mediante los escenarios A2 y B2 mostrados anteriormente. Estos escenarios imponen un efecto notorio en la disponibilidad de recursos hídricos próximos en los sectores de hidroeléctricas y de agua potable y como era de esperar, el escenario con mayor proyección de GEI, será el más desfavorable económicamente, ya que ambos escenarios son los que presentan menor desarrollo tecnológico y enfocado local y regionalmente.

Para analizar las proyecciones de precipitaciones con efectos del cambio climático en los Acápites siguientes, se plantea que los escenarios RCP son los más adecuados debido a que son los últimos utilizados por la IPCC.

Se escogerán para modelar el cambio climático en las precipitaciones, los escenarios RCP4.5 y RCP8.5. El primero ya que es el escenario menos conservador para estimar el efecto en las precipitaciones debido al cambio climático (el escenario RCP2.6 es muy optimista) y se asemeja al escenario B1, analizado en múltiples estudios.

Por otro lado, el escenario RCP8.5 es el más pesimista, entregando precipitaciones con mayor efecto del cambio climático y similar al escenario A2, muy utilizado en el área de estudio.

3 MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presentan los métodos de la hidrología clásica que se utilizarán en los cálculos de la precipitación máxima probable (PMP), del análisis de frecuencia de las precipitaciones y de las crecidas de las cuencas a analizar.

También, se definen los tipos de depósitos de relaves convencionales en Chile y las principales obras existentes dentro de ellos.

Además, se presenta la legislación actual que rige a los depósitos de relaves en Chile para plantear los periodos de retorno que se utilizarán en el análisis de frecuencia de las precipitaciones en las cuencas a analizar, y en la posterior respuesta hidrológica de estas.

Finalmente se presenta la metodología utilizada actualmente para el diseño de las obras hidráulicas dentro de los depósitos de relaves, que servirá para el análisis de los factores críticos de diseño de estas obras.

3.1 Hidrología Clásica

Para el diseño de obras hidráulicas se utiliza el análisis de eventos extremos de los procesos hidrológicos. El análisis se realiza con un conjunto de datos de un proceso hidrológico, que corresponde a la muestra de variables aleatorias dependientes del espacio y tiempo.

Debido a la nula o escasa información de caudales en ciertas zonas, producto que en Chile las estaciones pluviométricas de la DGA son más escasas que las pluviométricas, generalmente para analizar las cuencas de interés y estimar el caudal de escorrentía directa, se utilizan métodos indirectos basados en las precipitaciones.

Antes de hacer uso de la muestra de precipitaciones de la estación a analizar para caracterizar su régimen pluviométrico, es necesario corroborar la longitud de la muestra para un análisis estadístico, en caso contrario es necesario rellenarla con información de por lo menos tres estaciones vecinas hasta tener mínimo 30 años de datos, periodo suficiente para la definición de clima según WMO (World Meteorological Organization , 2019).

Cada estación meteorológica se puede caracterizar mediante su módulo pluviométrico, que corresponde al promedio de las precipitaciones anuales. Si los datos faltantes son aislados, y el módulo pluviométrico de la estación a analizar difiere en menos de 10% del módulo de las estaciones vecinas, Stowhas recomienda rellenar la muestra utilizando el promedio aritmético de las precipitaciones correspondientes de las estaciones vecinas (Stowhas Borghetti, 2016).

En caso de que el módulo pluviométrico difiera en más de un 10% del módulo de las estaciones vecinas, se deben estimar las precipitaciones faltantes mediante el promedio ponderado por módulos pluviométricos de los datos correspondientes a las estaciones vecinas (Stowhas Borghetti, 2016), de la siguiente forma:

$$\frac{P_x}{M_x} = \frac{P_1/M_1 + P_2/M_2 + \dots + P_i/M_i}{i} \quad (3-1)$$

Por otro lado, si se requiere ampliar la muestra se debe rellenar las precipitaciones con las correspondientes a la estación vecina que mejor se correlacione estadísticamente. Para realizar esto, se escoge la regresión que mejor se acomode a los datos y se analiza su ecuación y el coeficiente de correlación respectivo.

Luego que la muestra tenga extensión suficiente para su análisis, se le debe someter a una serie de ajustes para establecer su calidad y consistencia. Se ocupa la curva doble acumulada para este fin, la cual muestra la relación de las precipitaciones acumuladas de la estación a analizar, con las precipitaciones acumuladas de una estación patrón, correspondiente al promedio de los datos de las

estaciones vecinas. Se debe verificar que la zona en donde se ubican las estaciones sea pluviométricamente homogénea, lo que conlleva que las precipitaciones deben ser proporcionales a la estación patrón (Stöwhas Borghetti, 2016), de la forma:

$$P_x = \alpha \cdot P_p + \beta \quad (3-2)$$

3.1.1 Precipitaciones máximas diarias anuales

Los diseños de obras hidráulicas de gran envergadura son obras cuya falla podría poner en peligro vidas humanas y/o proporcionar daños excesivos (Chow, 1994), por ejemplo, vertederos o muros pertenecientes a embalses de agua o depósitos de relave.

Para estimar las precipitaciones máximas en 24 horas asociados a ciertos periodos de retorno (250, 500, 1000 o 10000 años), se utiliza análisis de frecuencia con, al menos, 30 años de estadística de serie de valores extremos mediante distribuciones de probabilidad que más se ajusten a los datos, verificando esto último con test de bondad de ajuste.

Para realizar el análisis de frecuencia, primero se debe obtener las precipitaciones correspondientes a la probabilidad de ocurrencia de varias distribuciones de probabilidad (Normal, Log Normal, Gumbel, Pearson y Log Pearson) asociados a diferentes periodos de retorno de eventos de precipitación. Cada distribución requiere de parámetros de la muestra de datos como por ejemplo su promedio, desviación estándar y otros característicos de cada distribución en particular. Luego, se analiza cual es la distribución que mejor se ajusta a la muestra de precipitaciones, para esto se debe comparar las probabilidades de ocurrencia de cada dato de la muestra mediante la distribución Weibull con cada distribución mencionada anteriormente, mediante dos test de bondad de Kolmogorov-Smirnov y χ^2 .

Por otro lado, es necesario estimar la PMP, la cual en un principio era calculada por el método hidrometeorológico en el que se maximizan los parámetros que determinan una precipitación máxima como lo son la humedad en la atmósfera y velocidad del viento que desplaza esa humedad hacia la cuenca. Sin embargo, por lo engorroso que se transforma el método debido a la escasez de información de precipitación, temperatura, humedad y velocidad del viento, de esperar, a nivel horario, se estiman métodos estadísticos para aproximar su valor, como el propuesto por Herschfield (Stöwhas Borghetti, 2016):

$$PMP_H = \bar{P}_C + K_M \cdot \sigma_C \quad (3-3)$$

Donde,

\bar{P}_C : Precipitación máxima anual media corregida.

K_M : Coeficiente de frecuencia máximo para una lluvia de 24 horas de duración.

σ_C : Desviación estándar corregida de las precipitaciones máximas anuales.

Los valores del promedio y desviación estándar corregidos se muestran en las ecuaciones a continuación:

$$\bar{P}_C = \bar{P}_N (1 + 0.143 \cdot e^{-0.105 \cdot N}) \left((1.05 - 0.0008 \cdot N) \frac{\bar{P}_{N-1}}{\bar{P}_N} + 3.9 \cdot 10^{-5} (N - 37)^2 + 0.002 \right) \quad (3-4)$$

$$\sigma_C = \sigma_N \cdot (0.993 + 0.307 \cdot e^{-0.258(N-10)^{0.699}}) \left((1.09 + 0.223 \cdot e^{-0.07 \cdot N}) \frac{\sigma_{N-1}}{\sigma_N} + 0.008 \right) \quad (3-5)$$

Donde \bar{P}_{N-1} y σ_{N-1} , son el promedio y desviación estándar de las precipitaciones máximas anuales sin el mayor valor de la serie de datos.

En un estudio realizado (Stöwhas Borghetti, 1983), propone que el valor del coeficiente de frecuencia máximo, K_M , sea de valor constante 11 debido a que es suficientemente conservador para cuencas chilenas, en cambio, los propuestos por Herschfield tienden a sobreestimar en gran medida las

precipitaciones máximas probables en Chile. Por lo tanto, la PMP estimada con este coeficiente de frecuencia, se definirá como PMP_S

También, se propone en este estudio (Stöwhas Borghetti, 1983) dos envolventes superiores de eventos máximos con datos de precipitaciones no sólo nacionales, sino que también algunos mundiales. Las ecuaciones (3-6) y (3-7) muestran las PMP según los promedios corregidos de precipitaciones tanto para zonas cordilleranas como para no cordilleranas respectivamente:

$$PMP_{S\ cord} = \bar{P}_c \left(4 + 3.8 \cdot e^{-0.0069 \cdot \bar{P}_c^{1.141}} \right) \quad (3-6)$$

$$PMP_{S\ no\ cord} = \bar{P}_c \left(3.5 + 3.65 \cdot e^{-0.0076 \cdot \bar{P}_c^{1.102}} \right) \quad (3-7)$$

Se debe tener en cuenta que a pesar de que las precipitaciones son variables discretas con magnitudes e intensidades que cambian en el tiempo, los modelos estocásticos, como el visto anteriormente, tienen asociadas incertidumbres en sus valores.

Si las estaciones de donde se pretende establecer una correlación estadística se encuentran a alturas que difieran mucho de la cuenca en análisis y las precipitaciones son de tipo orográficas, debido a que las muestras de precipitaciones máximas diarias de estas estaciones no representan adecuadamente las precipitaciones en la cuenca a analizar, se genera un gradiente pluviométrico para estimar el aumento de precipitaciones relacionado con aumento de altitud en la cuenca (DGA, 1998).

3.1.2 Crecidas de diseño

Dependiendo de la información hidrológica disponible y de las características de la cuenca, se proponen variados métodos para estimar la crecida de diseño. Para asociar a cada crecida una probabilidad de ocurrencia, se recurre a distintos procedimientos, directos, regionales e indirectos.

Los directos, requieren de valores de caudales máximos en la zona de estudio, los regionales se utilizan con ningún o pocos datos en la zona y se compara con los lugares de similares características y finalmente, los métodos indirectos que como se menciona anteriormente son los más utilizados y estiman la crecida mediante relación de parámetros como la precipitación y escurrimiento (MOP, 2018).

Se observan distintos métodos Precipitación-Escorrentía, que varían según la información a ingresar, estos son el método Racional, el Hidrograma Unitario y los modelos hidrometeorológicos anteriormente mencionados.

💧 Método Racional

Es ideal para cuencas pequeñas, menores a 10 km², ya que asume que la lluvia es uniforme en toda la cuenca y de gran impermeabilidad, debido a que ignora la retención temporal del escurrimiento.

$$Q_{M\acute{a}x} = \frac{C \cdot \overline{i(t_c)} \cdot A_{Total}}{3.6} \quad (3-8)$$

Donde:

$Q_{M\acute{a}x}$: Caudal máximo asociado al tiempo de concentración de la cuenca en [m³/s]

C : coeficiente de escorrentía constante para el suelo

$\overline{i(t_c)}$: intensidad de lluvia asociada al tiempo de concentración de la cuenca en [mm/h]

A_{Total} : Área aportante pluvial en [km²]

◆ Hidrograma Unitario

Es un hidrograma de escorrentía directa causado por una precipitación de duración efectiva e intensidad efectiva constante, lo que conlleva a una precipitación efectiva unitaria (de 1 mm). Entrega información cuantitativa de caudales máximos y la distribución temporal de la escorrentía.

Ideal para cuencas pequeñas desde 30 km^2 a 5000 km^2 , debido a que considera el sistema hidrológico como lineal y constante en el tiempo y el espacio, por lo tanto, puede realizarse superposición de hidrogramas.

Si no se cuenta con la precipitación efectiva y la escorrentía de tormentas para la cuenca hidrográfica, es necesario utilizar el Hidrograma Unitario Sintético (HUS), correlacionando los parámetros del hidrograma unitario con las características geomorfológicas de la cuenca.

Los HUS dependen de tres parámetros fundamentales, el tiempo base (correspondiente al tiempo de la escorrentía directa), la magnitud del caudal máximo y el tiempo máximo (estimado por el instante en que ocurre el caudal máximo instantáneo).

Dentro de los hidrogramas unitarios sintéticos, está el hidrograma unitario de Snyder, el cual relaciona parámetros geomorfológicos de la cuenca con los tres parámetros mencionados anteriormente, a través de constantes de proporcionalidad. Estas constantes varían de acuerdo con la zona en que se ubique la cuenca a analizar. Para cuencas ubicadas entre la Tercera y la Sexta Región, los parámetros del hidrograma sintético son según el Libro Fundamentos de Hidrología Aplicada (Stöwhas Borghetti, 2016):

$$t_p = 0.323 \left(\frac{L\bar{L}}{\sqrt{S}} \right)^{0.422} \quad (3-9)$$

$$q_p = 144.141 t_p^{-0.796} \quad (3-10)$$

$$t_B = 5.377 t_p^{0.805} \quad (3-11)$$

Donde,

t_p es el tiempo al máximo en [h]

L es el largo del cauce principal de la cuenca analizada en [km]

\bar{L} es el largo desde el centro geométrico al punto de salida en la cuenca en [km]

S es la pendiente media de la cuenca en [m/m]

q_p es el caudal máximo en [$L/s \text{ km}^2$]

t_B es el tiempo base en [h]

Linsley modifica las fórmulas de Snyder introduciendo la pendiente media de la cuenca como variable del tiempo máximo. En Chile, Benitez y Arteaga calcularon las constantes para las fórmulas de Snyder y Linsley, dependientes de la zona en estudio y luego, la DGA incluye más constantes para diferentes regiones de Chile.

Snyder desarrolló sus fórmulas utilizando tormentas de duración efectiva (Stöwhas Borghetti, 2016):

$$t_{LL} = \frac{t_p}{5.5} \quad (3-12)$$

Para tormentas de otras duraciones, Snyder presenta una corrección al tiempo máximo t_p :

$$t_{pc} = t_p + \frac{t_R - t_{LL}}{4} \quad (3-13)$$

Donde, t_R es la duración real de la tormenta considerada [h]

Con este nuevo tiempo máximo corregido, se deben estimar nuevamente los parámetros de tiempo base y caudal máximo.

- ◆ Crecidas asociadas a precipitaciones máximas.

La CMP ocurre cuando se maximizan todas las variables que intervienen en el proceso hidrológico, por lo tanto, se obtiene analizando la PMP, ya que corresponde a la precipitación máxima que puede ocurrir en un evento extremo.

Al igual que para las precipitaciones asociadas a periodos de retorno, la CMP, producto de la PMP, se estima según el área de la cuenca. Para cuencas pequeñas se aplica la fórmula racional y para cuencas de mayor área, se utiliza el método de HUS tal como aconseja la Guía Metodológica de Modificación de Cauces Naturales y Artificiales (DGA, 2016).

3.2 Depósitos de Relaves

En este estudio serán de interés los depósitos de relaves convencionales, sin embargo, se debe tener presente que existen otros tipos de depósitos como el depósito de relaves en pasta, la disposición subterránea de relaves (almacenamiento en los caserones de las minas), la disposición submarina, entre otros.

Un depósito de relaves corresponde a “toda obra estructurada en forma segura para contener los relaves provenientes de una Planta de concentración húmeda de especies de minerales...Su función principal es de servir como depósito, generalmente, definitivo de los materiales sólidos proveniente del relave transportado desde la Planta...” (Ministerio de Minería, 2007).

Existen variados tipos de depósitos de relaves convencionales, estos se caracterizan por diferencias en la forma de contener el relave o en su densidad de depósito. Algunos de los tipos de depósitos son los siguientes:

- ◆ Tranque de Relaves.

Corresponde a un depósito de relaves en que el muro de contención está compuesto por la fracción de partículas más gruesas del relave (arenas) provenientes de hidrociclón. Las arenas se compactan en capas para formar el muro de contención.

En la cubeta del depósito, las partículas finas del relave o lamas se ubican sobre las gruesas debido al proceso de sedimentación.

- ◆ Embalse de Relaves.

Similar a embalses de agua. Depósito de relaves ubicado en una depresión natural de la cuenca en la cual se requiera o no, un muro de contención. El muro es construido con material de empréstito o con la fracción más gruesa de los relaves (arenas). Debe ser impermeabilizado en todo el talud interno del embalse y su coronamiento. “La impermeabilización puede estar realizada con un material natural de baja permeabilidad o de material sintético como geomembrana de alta densidad...” (Ministerio de Minería, 2007).

Cuando el contenido de agua en el relave es suficiente, se produce sedimentación de las partículas sólidas del relave, quedando las más gruesas debajo de las finas y sobre estas últimas, una laguna de aguas claras. Esta laguna corresponde a aguas libres de partículas en suspensión.

La ubicación de la laguna de aguas claras depende de dónde desemboquen las entradas del relave al depósito.

Existen obras típicas en los depósitos de relaves:

💧 Muro de Contención.

Como se menciona anteriormente, el muro de contención puede ser construido de arenas de relaves o empréstito, para contener el relave e impedir que escurra hacia flujos de agua natural y que se aíse del ecosistema circundante. Este muro tendrá un coronamiento, que corresponde a su superficie superior y un resguardo que corresponde a la diferencia menor de cotas entre la línea de coronamiento del muro de contención y la superficie contigua de agua, relaves o lamas, dependiendo de dónde se ubique la laguna de aguas claras.

💧 Canales de Contorno.

Son canales ubicados a una cota superior que el depósito y su función es captar el escurrimiento superficial de la cuenca aportante al depósito de relaves y dirigirlo a cursos de agua ubicados aguas abajo de este para prevenir que el agua natural ingrese, se contamine y sobrecargue de agua la cubeta en eventos de crecidas.

💧 Canales de Desvío.

Son canales que desvían el curso principal de aguas interrumpidas por los depósitos de relaves hacia cursos de agua naturales ubicados aguas abajo de ellos, y se encuentran ubicados a un costado de los depósitos. En algunos casos en vez de canales, se construyen túneles con el mismo fin.

💧 Obras de Evacuación de Crecidas.

Según la Dirección General de Aguas (2009), el objetivo de las obras de evacuación de crecidas es “permitir el vaciamiento de los volúmenes de agua en exceso que pueden ingresar al embalse comprometiendo su seguridad”.

Ejemplos de estas obras son las torres de captación de agua y vertederos de emergencia laterales o de tipo Morning Glory.

En el caso de los vertederos, se requiere de obras que dirijan el agua de forma segura hacia flujos de agua, aguas abajo del depósito de relaves. Estas obras corresponden a rápidos de descarga, disipadores de energía y canales.

3.2.1 Contextualización Legal Chilena.

Se debe conocer el contexto legal de lo que se exige para estas obras en su operación y cierre, ya que las precipitaciones futuras de los modelos realizan una predicción hasta el año 2100, periodo que considera la vida útil de las obras analizadas y el posterior funcionamiento de las obras hidráulicas luego del cierre del depósito de relaves.

En el decreto 50 (MOP, 2015), el cual establece las condiciones técnicas que se deben cumplir en el proyecto, construcción y operación de embalses de relaves de capacidad superior a 50.000 [m³] y/o cuyo muro tenga más de 5 [m] de altura, describe a los depósitos de relaves categorizándolos en tres tipos:

- ◆ Categoría A: Pequeños, de altura de muro máxima de 5 [m] a 15 [m] o capacidad de 50.000 [m³] a 1.500.000 [m³]
- ◆ Categoría B: Medianos, de altura de muro máxima de 15 [m] a 30 [m] o capacidad de 1.500.000 [m³] a 60.000.000 [m³]
- ◆ Categoría C: Grandes, de altura de muro máxima igual o superior a 30 [m] o capacidad igual o superior a 60.000.000 [m³]

Para estos depósitos de relaves, se determina que:

- ◆ Los **canales de contorno o perimetrales, no permanentes**, utilizados durante la vida útil del depósito se diseñarán para un periodo de retorno mínimo de 50 años y se verificarán para un periodo de retorno de 100 años (MOP, 2015).
En caso de que el proyecto de los canales de contorno requiera de permiso para obras de regularización o defensa de cauces naturales, las crecidas para el diseño y verificación de las obras serán las asociadas a los periodos de retorno 100 y 200 años respectivamente (SEA, 2014).
- ◆ Se debe implementar un **vertedero de seguridad** que opere durante toda la vida útil del embalse, cuya carga hidráulica es definida por los aportes de las aguas claras y la crecida de periodos de retorno de diseño siguientes:

Tabla 3-1: Crecidas de diseño para obras de evacuación según el Decreto 50 (MOP, 2015).

Categoría de depósito de relaves	Crecida de diseño de periodo de retorno [años]:
A	1.000
B	10.000
C	Mayor entre 10.000 y CMP

- ◆ La diferencia de niveles entre la cota hidráulica de las aguas claras y el coronamiento del muro se entiende como **resguardo mínimo**. Para su cálculo, se considerarán los siguientes factores (MOP, 2015):
 - ◆ Efecto del viento sobre el embalse.
 - ◆ Altura de la ola causada por el viento, incluido el efecto de ascenso de la ola.
 - ◆ Asentamiento por consolidación del muro y/o de su cimentación.
 - ◆ Asentamiento dinámico causado por sismo.

El valor mínimo aceptado para el resguardo será de 1 [m].

Además, se debe tener en cuenta la carga hidráulica en el vertedero evacuador de crecidas. Si esta carga es mayor a la revancha sobre el coronamiento del muro, las aguas claras rebosarán por sobre el muro.

- ◆ En la mayoría de los casos se requerirá **ejecutar modificaciones a la geometría final** del muro aprobado y/o será necesaria la construcción de **obras asociadas al cierre** de los depósitos de

relave, tales como acueductos para el manejo de escorrentías, desvíos de cauces, evacuadores de crecida definitivos, entre otras.

Para el diseño de los **evacuadores de crecidas definitivos** y la carga en el resguardo se deberá utilizar el caudal máximo entre la CMP o la crecida de 10.000 años de periodo de retorno (MOP, 2015).

Previo al término de la vida útil de los embalses se deberá presentar el proyecto de construcción de las obras hidráulicas siguientes que correspondan a cada proyecto:

- ◆ Modificación de cauces naturales o artificiales.
- ◆ Regularización o defensa de cauces naturales.
- ◆ Acueductos que conduzcan más de 2 [m^3/s].
- ◆ Acueductos que conduzcan más de 0,5 [m^3/s], que se proyecten próximos a zonas urbanas, y cuya distancia al extremo más cercano del límite urbano sea inferior a 1 [km] y la cota de fondo sea superior a 10 [m] sobre la cota de dicho límite.
- ◆ Sifones y canoas que crucen cauces naturales.

Según la DGA (2016), para las obras definitivas de modificación de cauces naturales, como lo son las alcantarillas que conducen quebradas naturales que cruzan otras obras, se deben tener en cuenta los siguientes periodos de retorno de diseño y verificación para el diseño hidráulico de este tipo de obras:

Tabla 3-2: Periodos de retorno de diseño y verificación para obras de modificación de cauces naturales (DGA, 2016).

Tipo de Obra	Detalle	Periodo de Retorno [años]	
		Diseño	Verificación
Atravesos con Ductos	Sobre Cauce	50	100
	Bajo Cauce	100	150
Atravesos con Estructura Vial	Puentes	100	150
	Alcantarillas	50	100
Descargas	Ductos	100	150
	Restitución de Caudal	100	150
Modificación de Trazado	Abovedamiento	100	150
	Contorno Abierto	100	150
Regularización	Cauce Natural	100	150
Defensas Fluviales	Cauce Natural	100	-

Por otro lado, el Manual de Carreteras (2018) señala los periodos de retorno y verificación para obras de drenaje de carreteras y caminos, señalando que para la verificación se aceptan alturas mayores a las de diseño.

Tabla 3-3: Periodos de retorno para diseño (MOP, 2018).

Tipo de Obra	Tipo de Ruta	Periodo de retorno [años]		Vida útil supuesta [años]
		Diseño	Verificación	
Puentes y Viaductos	Carreteras	200	300	50
	Caminos	100	150	50
Alcantarillas ($S > 1.75m^2$) o $H_{terraplén} > 10m$ y estructuras enterradas	Carreteras	100	150	50
	Caminos	50	100	30
Alcantarillas ($S < 1.75m^2$)	Carreteras	50	100	50
	Caminos	25	50	30
Drenaje de la Plataforma	Carreteras	10	25	10
	Caminos	5	10	5
Defensa de Riveras	Carreteras	100	-	20
	Caminos	100	-	20

3.2.2 Diseño de Obras de Evacuación de Crecidas dentro de Depósitos de Relaves.

Es importante analizar el funcionamiento de obras hidráulicas que existen en los depósitos de relaves, destacando los factores de diseño críticos de cada una para poder plantear las vulnerabilidades de estos tipos de obras hidráulicas ante un evento extremo que incluya el factor de cambio climático.

3.2.2.1 Depósito de Relaves

Los depósitos de relaves son un tipo de obra de almacenamiento y se definen mediante sus curvas características. Las curvas de espejo de agua o crecida son una curva característica y la curva de capacidad del embalse es otro ejemplo de ellas. Ambas curvas dependen de la topografía del terreno de fondo o batimetría.

En el caso de los tranques de relaves, el terreno bajo la laguna de aguas claras es el relave sedimentado llamado lamas, por lo tanto, se debe considerar un volumen muerto de embalse, el que corresponde a la altura que alcanza el depósito de estas partículas sedimentadas.

3.2.2.2 Vertedero de seguridad

Un evacuador de crecidas es un tipo de obra de control diseñado para verter en forma controlada las aguas de crecidas del depósito de relaves y devolver a su cauce natural aguas abajo. Los vertederos deben ser capaces de evacuar la crecida máxima de diseño, sin que se produzca derrame sobre el muro ya que podría producir su falla y una gran catástrofe hacia aguas abajo (Mery M., 2013).

Existen variados tipos de vertederos evacuadores de crecidas dentro de los depósitos de relave:

- Morning Glory.

Este tipo de vertederos es usado en presas donde el muro posee gran pendiente.

Alcanza una capacidad cercana a la máxima con alturas de carga relativamente bajas. Una ventaja de esto, es que este tipo de vertederos es ideal donde el flujo de salida máximo debe ser limitado, pero de igual forma constituye su principal desventaja ya que, en casos donde se produzca una crecida mayor a la de diseño, existe un bajo aumento en su capacidad. Por lo anterior, se recomienda utilizar este tipo de vertederos como un vertedero de servicio acompañado por otro vertedero de emergencia auxiliar (USBR, 1987).

La estructura de los vertederos de este tipo está compuesta de tres elementos principales como se muestra en la Figura 3-1. El agua ingresa sobre su coronamiento en forma de embudo, cae a través de un eje de transición vertical o inclinado llamado comúnmente pique, y luego fluye hacia aguas abajo por el túnel de descarga horizontal o casi horizontal.

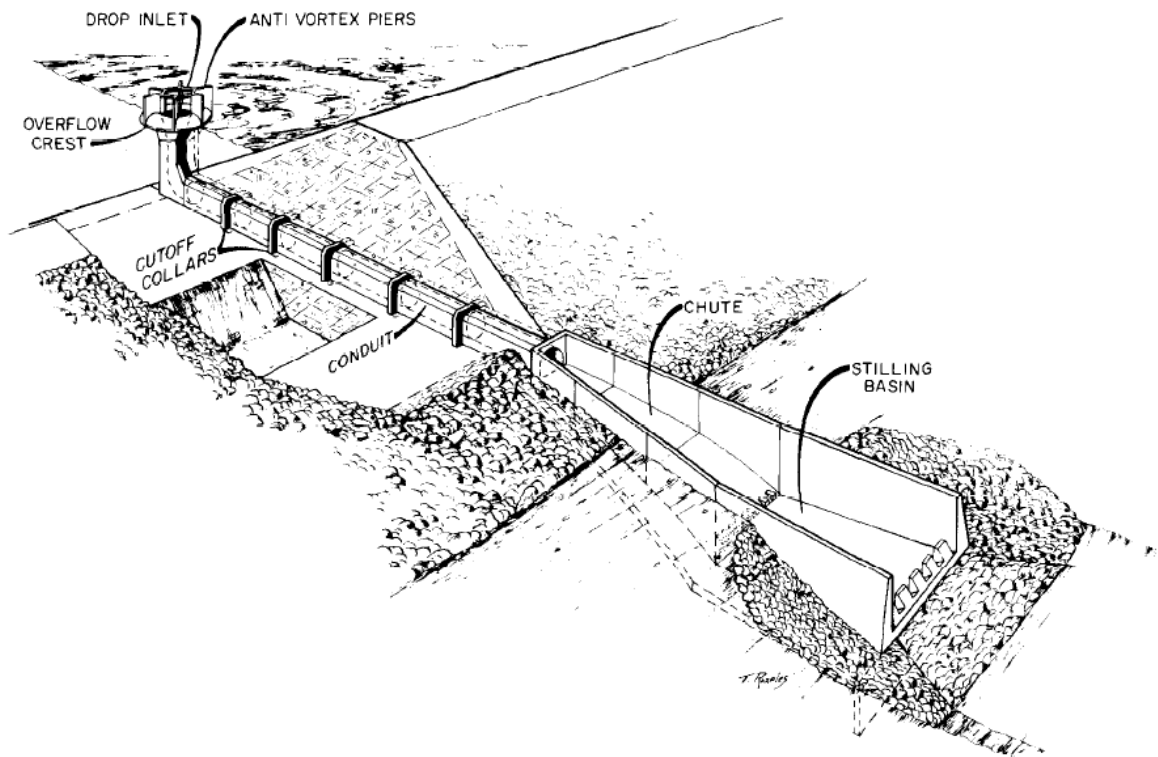


Figura 3-1: Esquema de vertedero Morning Glory (USBR, 1987).

Las características de descarga de un vertedero Morning Glory en su operación depende del rango de altura de carga sobre el coronamiento. A medida que la altura de carga aumenta, el control de descarga cambia desde el flujo sobre el coronamiento del vertedero al flujo de tubo dentro de la transición y luego, al túnel en la porción final aguas abajo.

◆ Coronamiento del vertedero

Según USBR (1987) el coronamiento del vertedero Morning Glory es una estructura de control que para alturas de carga pequeñas, su flujo se rige por una descarga de control de coronamiento.

Para evitar la generación de vórtices, se recomienda utilizar pilares guía en la entrada del flujo a lo largo de la cresta del vertedero como se muestra en la Figura 3-1, ya que el flujo se adhiere a las paredes del vertedero en su coronamiento y pique como se muestra a continuación en la Figura 3-2:

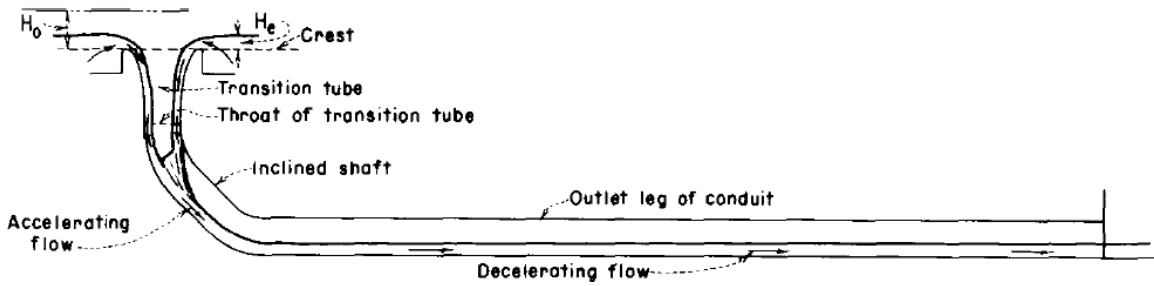


Figura 3-2: Control de coronamiento en un vertedero Morning Glory (USBR, 1987).

La forma del coronamiento del vertedero debe ser similar a la de la lámina inferior de la napa cayendo por un vertedero circular de arista viva y la aireación a lo largo del vertedero debe ser adecuada para evitar subpresiones. Si lo anterior se cumple, el flujo de descarga sobre la cresta se calcula:

$$Q = C_0(2\pi R_s)H_0^{3/2} \left[\frac{ft^3}{s} \right] \quad (3-14)$$

Donde,

R_s es el radio exterior del coronamiento en [ft]. Ver Figura 3-3 inmediatamente debajo.

H_0 es la altura de carga en [ft], desde el umbral del vertedero, hasta la cota del embalse por sobre esta misma.

C_0 es el coeficiente de descarga, dependiente de R_s , H_0 y profundidad de aproximación P como se muestra en la Figura 3-4 más abajo.

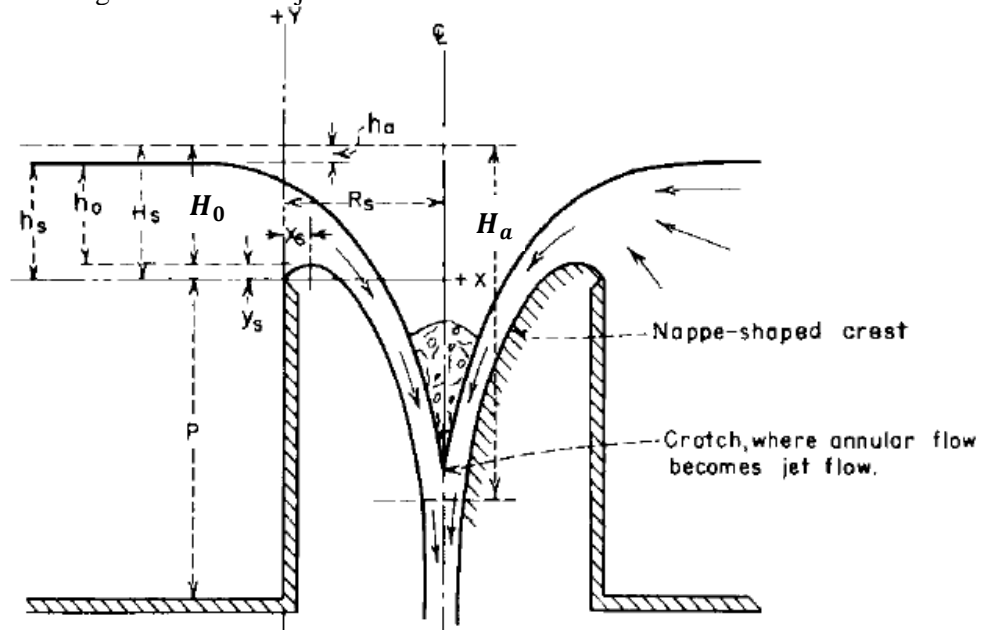


Figura 3-3: Elementos del perfil de la forma de la napa para una cresta circular (USBR, 1987).

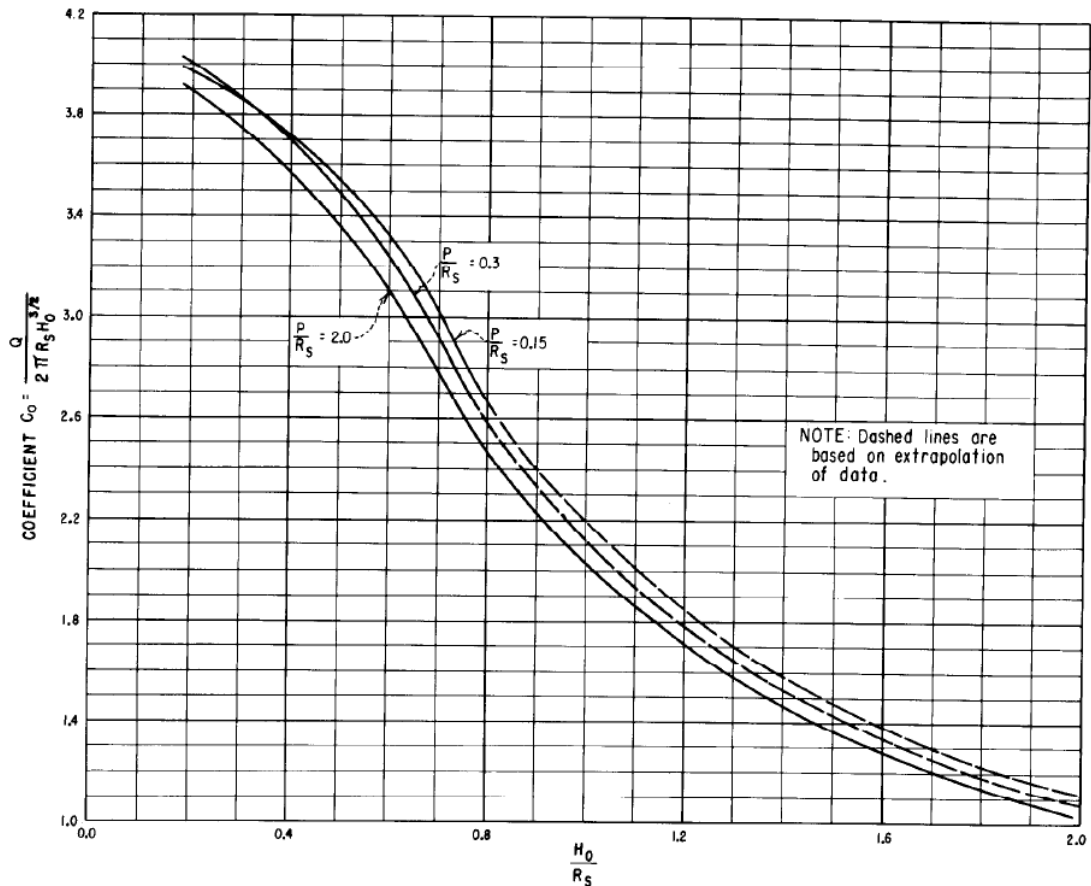


Figura 3-4: Relación del coeficiente de descarga con H_0/R_s para valores de profundidad de aproximación entre $0,3R_s$ y $2R_s$ (USBR, 1987).

Como se menciona anteriormente, la forma del coronamiento del vertedero es la parte inferior de la napa que fluye sobre un vertedero circular de cresta afilada y es definida por los parámetros P/R_s y H_s/R_s .

Los pasos para el diseño del coronamiento del vertedero Morning Glory son:

1. Con P , R_s y H_0 definidos, se obtiene H_s/H_0 de la Figura 3-5 más abajo.
2. Se despeja H_s y se obtiene H_s/R_s .
3. Se interpola entre P/R_s y/o H_s/R_s según corresponda en las tablas de USBR (1987) y se van calculando los puntos (X,Y) de la Figura 3-3.

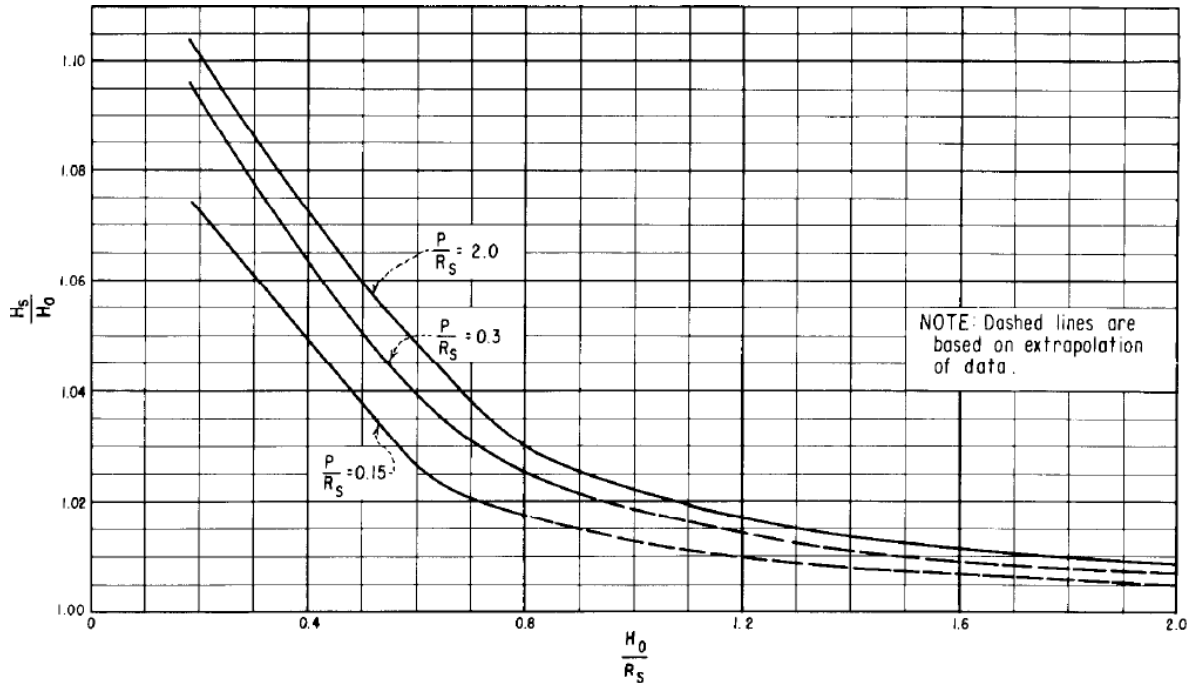


Figura 3-5: Relaciones entre H_s/H_0 con H_0/R_s para crestas de vertederos circulares (USBR, 1987).

Según USBR (1987) la descarga será libre y prevalecerá el control de coronamiento en el vertedero Morning Glory, si la forma de la cresta y pique del vertedero cumple con lo mencionado anteriormente y si H_0/R_s es menor a 0,45.

◆ Pique de Vvertedero.

Como menciona la USBR (1987), el pique del vertedero Morning Glory es también una estructura de control que a medida que aumenta la altura de carga sobre el coronamiento, la napa sobre las paredes se engruesa, el pique del vertedero se comienza a sumergir y el flujo se va convirtiendo en un solo flujo vertical como se observa en la Figura 3-6, en el llamado punto de confluencia.

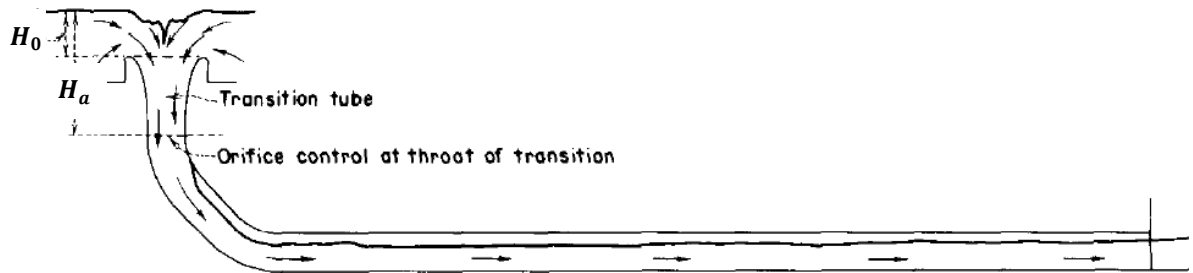


Figura 3-6: Control de orificio o tubo (USBR, 1987).

El flujo en el vertedero Morning Glory es libre hasta que se genera el punto de confluencia. Luego, a medida que el vertedero toma carga, este punto comienza a subir y el coronamiento finalmente se ahoga. Cuando la relación H_0/R_s se acerca a 1, el vertedero se encuentra sumergido y comienza el flujo de tubo (USBR, 1987).

El flujo de descarga en la transición del vertedero Morning Glory se calcula:

$$Q = \pi R^2 \sqrt{2gH_a} \left[\frac{ft^3}{s} \right] \quad (3-15)$$

Donde,

R es el radio que va tomando la transición en [ft]. Ver Figura 3-7 de abajo.

H_a es la distancia entre la superficie del agua y la cota del pique en [ft]. Ver Figura 3-7 de abajo.

Si las pérdidas por fricción, contracción de la lámina de agua y pérdidas de velocidad por cambios de dirección, son consideradas como $0.1H_a$ la Ecuación (3-15) se vuelve:

$$Q = \left(\frac{R}{0.204} \right)^2 \sqrt{H_a} \left[\frac{ft^3}{s} \right] \quad (3-16)$$

Resolviendo R de la Ecuación (3-16) según un determinado Q , se encuentra el tamaño mínimo de la transición para que no se desarrollen subpresiones a lo largo del pique.

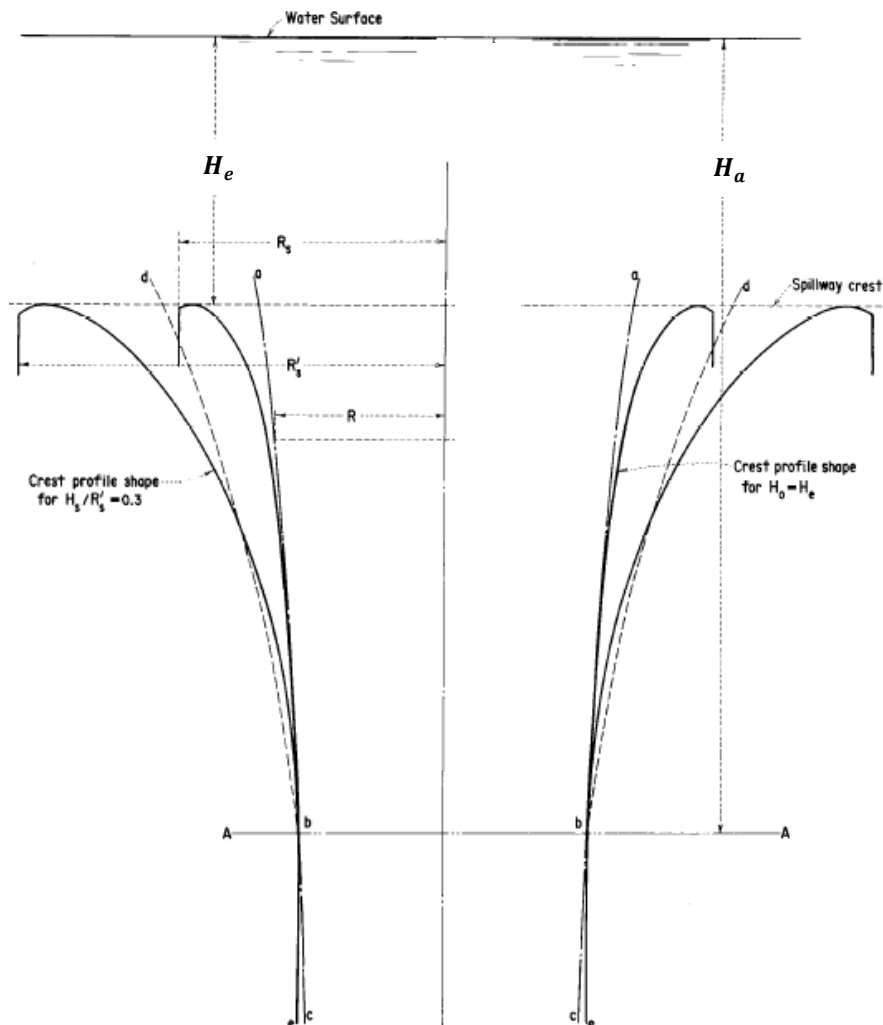


Figura 3-7: Comparación de perfiles de vertedero Morning Glory para diversas condiciones de flujo (USBR, 1987).

En la Figura 3-7 se muestra el perfil de coronamiento de radio R_s del vertedero Morning Glory planteado por USBR (1987) y el perfil para el pique abc obtenido por la Ecuación (3-16).

◆ Túnel de descarga

En el diseño del túnel impera el evitar las subpresiones a lo largo de él. Para lo anterior, se debe tener en cuenta fenómenos como agitación, acción de olas o turbulencia, que provocan que partes del ducto se sellen permitiendo subpresiones. Debido a esto, aparte de una adecuada aireación, se requiere que el diámetro le proporcione al flujo escurrir a superficie libre en toda su extensión y no a boca llena como se muestra en la Figura 3-8. USBR (1987) recomienda que la altura del flujo no alcance mayores alturas que las correspondientes al 75% del área de la sección.

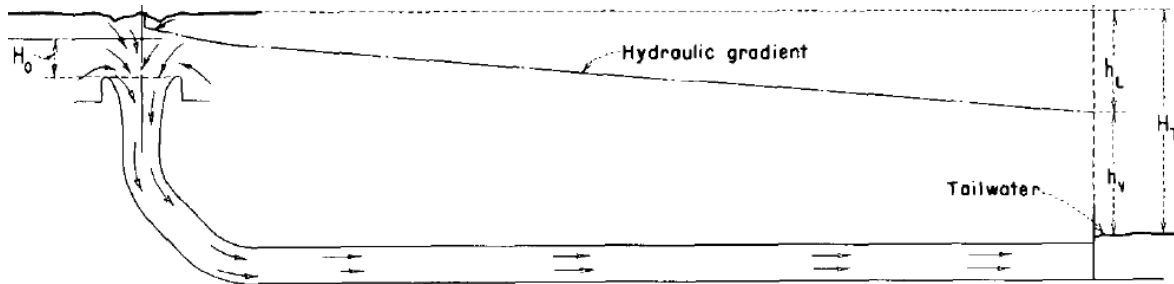


Figura 3-8: Flujo de túnel a boca llena (USBR, 1987).

Por otro lado, la pendiente del túnel influirá en el diámetro requerido de acuerdo al gradiente hidráulico. Si la pendiente del ducto es mayor que la del gradiente hidráulico, el flujo acelerará y su altura disminuirá a lo largo del túnel de descarga por lo que se necesitará un diámetro menor, por el contrario, si la pendiente del ducto es menor a la del gradiente el flujo desacelerará y la altura de escurrimiento a lo largo del túnel aumentará, por lo tanto, también lo hará el diámetro requerido.

Los pasos a seguir para el diseño del túnel de descarga son los siguientes:

1. Seleccionar el diámetro de un conducto de prueba y encontrar su ubicación correspondiente en la transición.
2. Calcular la longitud del túnel de descarga seleccionado.
3. Aproximar las pérdidas por fricción con la fórmula de Manning en el túnel, suponiendo que fluye al 75% del área total.
4. Verificar si la cota en la salida del túnel de prueba otorga la pendiente suficiente para conducir la descarga de diseño a través de la ecuación de Bernoulli entre la entrada y salida del túnel.
5. Luego de verificar el diámetro y la pendiente del túnel con los pasos anteriores, se debe verificar calculando el eje hidráulico mediante cálculos de flujo en canal abierto.

◆ Vertedero de pared delgada:

Es frecuente la utilización de un vertedero lateral en un evacuador de crecidas de un embalse, cuando el depósito de relaves se encuentra en un valle estrecho. Los vertederos laterales entregan el caudal de la crecida a través de su coronamiento a un canal colector o de descarga y éste a su vez al rápido de descarga el cual contiene una obra disipadora de energía a su pie.

◆ Coronamiento del vertedero de pared delgada

En la Figura 3-9 se presenta el esquema de un vertedero de pared delgada y arista viva evacuando un cierto caudal:

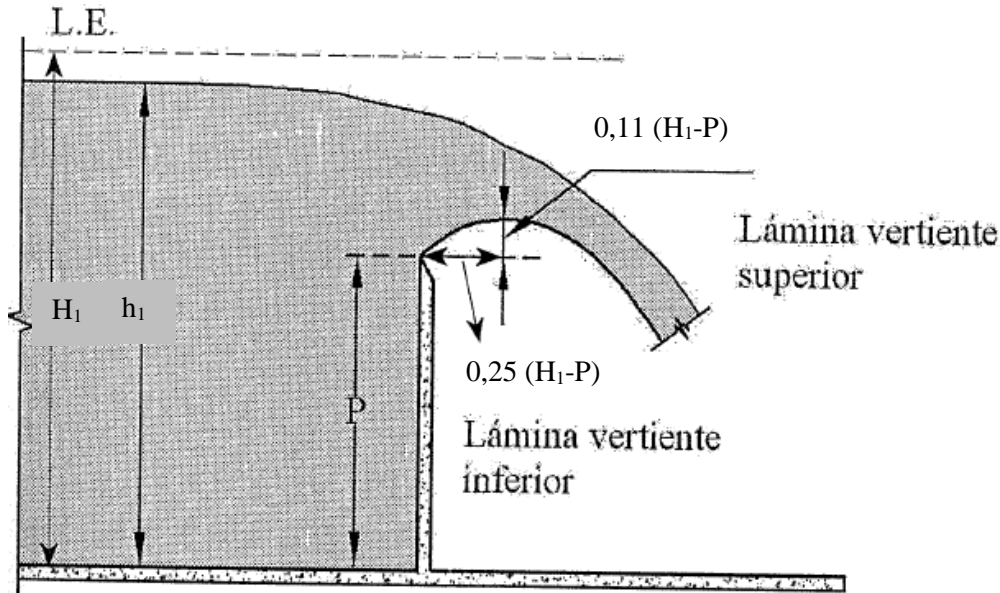


Figura 3-9: Esquema de vertedero de pared delgada (Mery M., 2013).

Como se observa en la Figura 3-9, inmediatamente después del vertedero la napa sufre una contracción y su lámina inferior describe una trayectoria curva llegando a su punto más alto. Para una napa aireada como la anterior, cuando se generan crecidas la carga sobre el vertedero es constante y el caudal de agua vertida por unidad de ancho del vertedero se obtiene de la ecuación siguiente:

$$q = \frac{2}{3} C_Q \sqrt{2g} (h_1 - P)^{3/2} \quad (3-17)$$

Donde:

h_1 es la altura del escurrimiento en el acceso al vertedero.

P es la altura del vertedero.

C_Q es el coeficiente de gasto del vertedero (adimensional).

Horacio Mery (2013) recomienda utilizar la relación propuesta por Henderson de la Ecuación (3-18), basada en las experiencias de Rehbock para calcular el coeficiente de gasto:

$$C_Q = 0.611 + 0.08 \frac{h_1 - P}{P} \quad (3-18)$$

Vertedero Ogee:

Para evitar problemas de aireación de la napa por subpresiones, resultan convenientes los vertederos de coronamiento tipo Ogee, en el cual la forma de su pared simula a la lámina inferior de la napa que pasa sobre un vertedero de pared delgada produciendo la reducción de las componentes de la gravedad de los elementos del fluido debido a la fuerza centrífuga.

La geometría del vertedero se obtiene mediante la mejor aproximación perteneciente a la *US Corps of Engineer* según Mery (2013), la cual divide la geometría en antes y después del punto máximo. Antes del máximo, la geometría se define por tres tramos circulares donde cada uno tiene diferente radio como se muestra en la Figura 3-10:

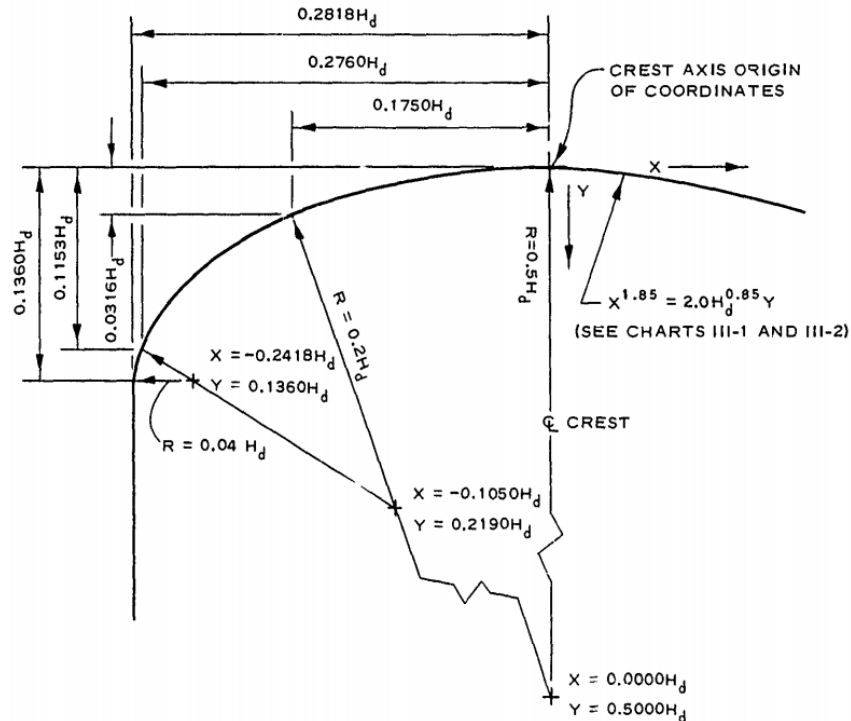


Figura 3-10: Geometría de vertedero de tipo Ogee (USCE, 1977).

Se observa la ubicación con respecto al origen de coordenadas (x,y) de los tres centros de circunferencia donde inician los tres radios, los cuatro puntos que separan los tres arcos de circunferencia y el valor de cada radio. Todo lo anterior se muestra con respecto a la carga hidráulica por sobre el punto superior del vertedero H_d (no confundir con la carga total de la Ecuación (3-19) siguiente). También, en la Figura 3-10 se muestra la ecuación que define la geometría aguas abajo del punto máximo en el vertedero hasta cierto punto, desde donde comienza un tramo recto de pendiente constante (Mery M., 2013).

En la Figura 3-11 se presenta el esquema del vertedero tipo Ogee evacuando un caudal Q_d con una energía específica sobre el umbral del vertedero de H_d :

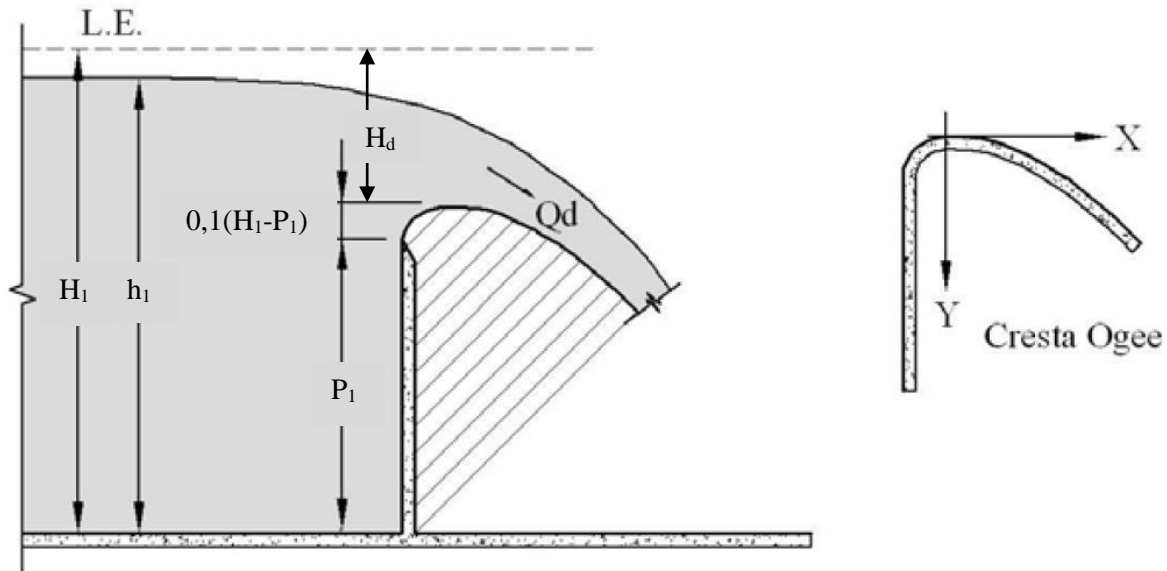


Figura 3-11: Esquema de vertedero de tipo Ogee (Mery M., 2013).

El caudal unitario evacuado por un vertedero Ogee es:

$$q = C_Q \sqrt{2g} (H_d - P)^{3/2} \quad (3-19)$$

Para la energía específica de diseño H_d mostrada en la Figura 3-11, este caudal unitario es el mismo que el evacuado por un vertedero de pared delgada equivalente de altura P_1 . Como se observa en la Ecuación (3-20) y Figura 3-11, la altura del vertedero Ogee será mayor que su equivalente en lámina delgada ya que se le debe sumar la contracción inferior de la napa:

$$P = P_1 + 0.11(H_d - P_1) \quad (3-20)$$

El coeficiente de gasto definido por Mery (2013) de forma experimental, varía con la carga hidráulica sobre el vertedero relativa a la de diseño λ donde:

$$C_Q = \frac{2}{3\sqrt{3}} \left(1 + \frac{4\lambda}{9 + 5\lambda} \right) \quad (3-21)$$

Por lo tanto, cuando ocurre la carga de diseño, $\lambda = 1$ y el coeficiente de gasto se vuelve 0.495.

3.2.2.3 Obra de conducción luego del vertedero

◆ Canal colector (en el caso de vertedero de pared delgada o de tipo Ogee)

Es un tipo de obra de conducción, ya sea el mismo cauce natural aguas abajo o un canal diseñado para guiar el flujo desde el vertedero al rápido de descarga como se muestra a continuación en la Figura 3-12:

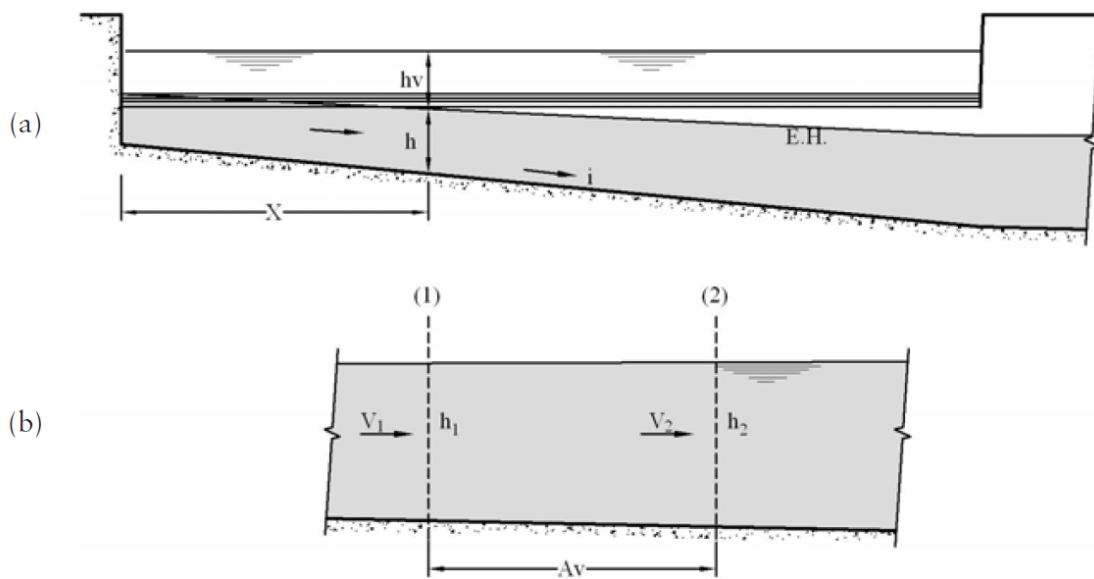


Figura 3-12: Perfil longitudinal de canal colector (Mery M., 2013).

Para el análisis del eje hidráulico a lo largo del canal colector, se deriva la ecuación de Bernoulli con respecto a la distancia x mostrada en la Figura 3-12:

$$\frac{dB}{dx} = \frac{d\left(h + \frac{Q^2}{2gA^2}\right)}{dx} = \left(1 - \frac{v^2}{v_c^2}\right) \frac{dh}{dx} + \frac{2v^2}{x2g} \quad (3-22)$$

Donde,

v es la velocidad media en una sección del canal colector

v_c es la velocidad crítica asignada al canal colector

h es la altura de escurrimiento de una sección del canal colector

x es la distancia desde el inicio del canal colector a la sección analizada del canal

A través del análisis del principio de la cantidad de movimiento entre dos secciones en el canal colector que recibe un caudal unitario desde un vertedero lateral, y asumiendo que la pendiente del eje hidráulico “I” difiere poco de la pendiente i del fondo del canal se presenta el cambio en el eje hidráulico a lo largo del canal:

$$\frac{dh}{dx} = \frac{i - \left(J + \frac{4v^2}{x2g}\right)}{1 - \frac{v^2}{v_c^2}} \quad (3-23)$$

Donde,

i es la pendiente de fondo del canal colector

J es la pérdida friccional en el canal

Introduciendo la Ecuación (3-23) en la Ecuación (3-22) y teniendo en cuenta incrementos finitos Δx entre dos secciones consecutivas 1 y 2:

$$B_2 - B_1 = \Delta x \left(i - \left(J + \frac{2v^2}{x2g} \right) \right) \quad (3-24)$$

Donde,

B_i corresponde al Bernoulli de la sección i

Mediante la Ecuación (3-24) se puede obtener el eje hidráulico por aproximaciones sucesivas.

Notar que en caso de que el régimen en el canal colector sea subcrítico, el denominador de la Ecuación (3-23) es positivo y existirán dos alternativas:

$$i > J + \frac{4 v^2}{x 2g} \quad \text{En este caso, la altura crece en el sentido del escurrimiento en el canal}$$

$$i < J + \frac{4 v^2}{x 2g} \quad \text{En este caso, la altura decrece en el sentido del escurrimiento en el canal}$$

Según Horacio Mery (2013) un vertedero de perfil Ogee admite un nivel de aguas abajo sobre el umbral sin afectar al coeficiente de gasto y en los cálculos es posible admitir un sobre nivel de hasta un 30% de la carga sobre el vertedero sin afectar al eje hidráulico en el colector.

Por otro lado, para calcular el eje hidráulico en el canal colector con caudal afluente variable se debe tener en consideración que la pendiente crítica va a variar a lo largo del canal y si llega a coincidir con la pendiente del canal, se producirá la altura crítica en esa sección del escurrimiento y será el punto de partida para el cálculo del eje hidráulico.

Tomando en cuenta lo anterior y analizando la Ecuación (3-23), si la velocidad promedio en las secciones es la crítica, el eje hidráulico tiende a infinito, por lo tanto, el numerador de esta ecuación debe tender a cero. Así, se despeja la pendiente crítica del canal:

$$i_c = J_c + \frac{4 v^2}{x 2g} = J_c + \frac{2Qq_x}{gA_c^2} \quad (3-25)$$

Donde,

J_c son las pérdidas friccionales en la sección crítica

Q es el caudal en el canal colector en la sección crítica

q_x es el caudal unitario evacuado por el vertedero en la sección crítica

A_c es el área de escurrimiento en el canal colector en la sección crítica.

3.2.2.4 Rápido de descarga

Es un tipo de obra de control que conduce en forma segura los caudales de la crecida hacia aguas abajo de la presa ya que debido a sus fuertes pendientes se generan escurrimientos supercríticos, provocando grandes velocidades y pequeñas alturas en el flujo.

Por lo anterior, el eje hidráulico se calcula desde aguas arriba hacia aguas abajo. Como se muestra en la Figura 3-13, la altura de escurrimiento en la sección (2) se calcula conociendo las características del flujo en la sección (1) a través de la ecuación de Bernoulli. El intervalo de longitud en el plano horizontal para obtener el perfil hidráulico se obtiene según la Ecuación (3-26):

$$\Delta x = \frac{B_2 - B_1}{i - \frac{J_m}{\cos \alpha}} \quad (3-26)$$

Donde,

$i = \tan \alpha$, es la pendiente del canal recto.

J_m son las pérdidas friccionales

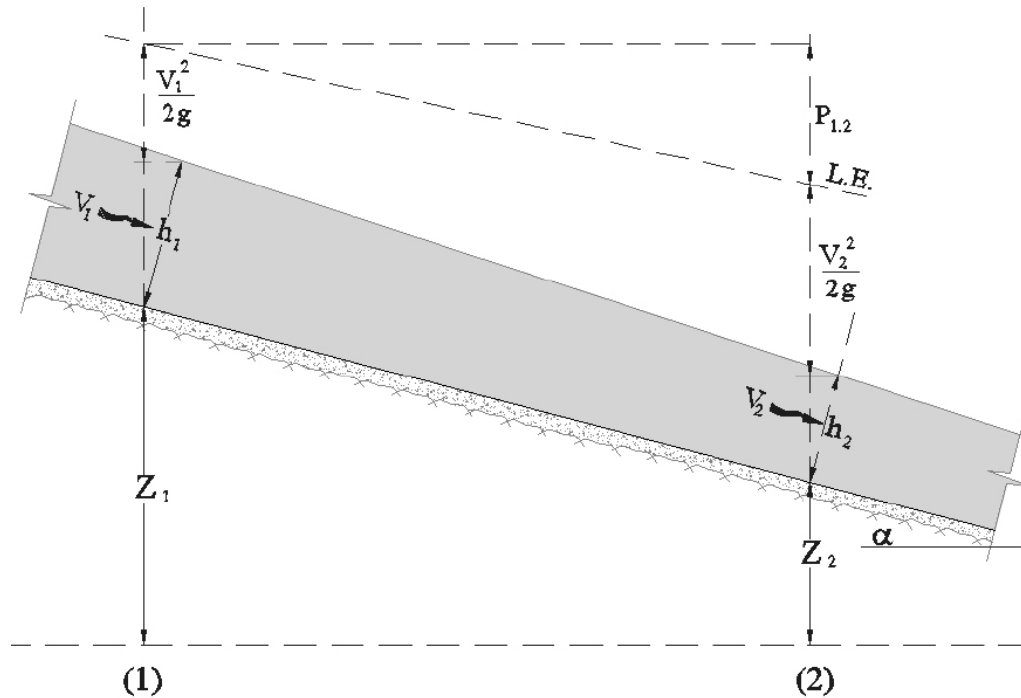


Figura 3-13: Perfil longitudinal de rápido de descarga (Mery M., 2013).

Teniendo en cuenta que estos rápidos son generalmente de hormigón, para el diseño de las paredes laterales y por ende máximas alturas de escurrimiento se aconseja utilizar un coeficiente de Manning $n=0,018$, en cambio para estimar las máximas velocidades de llegada aguas abajo del rápido se recomienda utilizar $n=0,011$ (Mery M., 2013).

El USBR recomienda en estos canales dejar un resguardo considerable según lo siguiente:

$$R_{rev} = 0.6 + 0.037v^3\sqrt{h} \quad [m] \quad (3-27)$$

Los rápidos de descarga pueden ser verticalmente de forma cóncava o convexa como se muestra en la Figura 3-14, uniendo pendientes de tramos rectos con curvas verticales circulares o parabólicas. La presión ejercida por el flujo en el fondo del rápido depende de la altura del escurrimiento h , de su velocidad v y del radio de la curva en el plano vertical R_c según la relación:

$$\frac{p}{\gamma} = h \cos \alpha \pm \frac{hv^2}{gR_c} \quad (3-28)$$

Donde, α es el ángulo entre el fondo del canal y la horizontal en la sección considerada.

Si la forma del rápido es cóncava, la fuerza centrífuga aumenta la presión del peso de la columna de agua, por lo tanto, en la Ecuación (3-28) se suman las componentes. En cambio, para una forma convexa ocurre lo inverso.

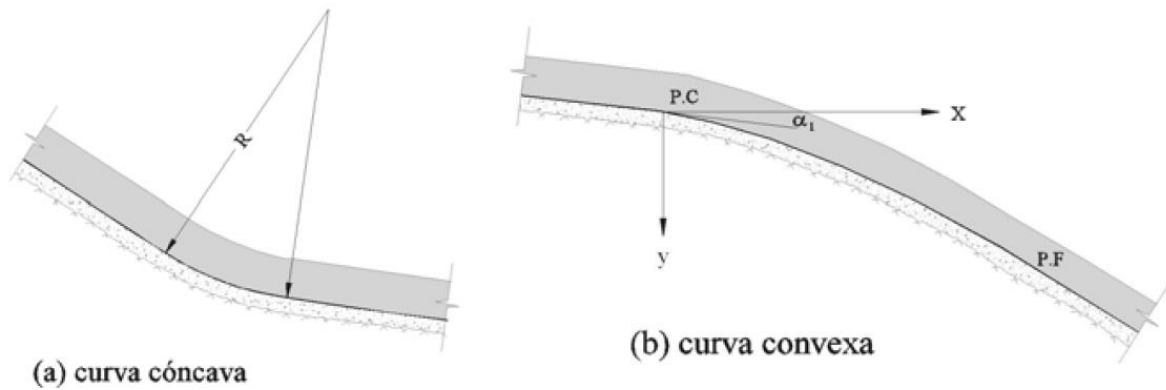


Figura 3-14: Curvas verticales en un rápido de descarga (Mery M., 2013).

3.2.2.5 Obras de disipación de energía

Es necesario disipar la gran cantidad de energía cinética acumulada en los rápidos de descarga para controlar la entrega del caudal hacia un curso natural y evitar erosiones, socavaciones del lecho, entre otros.

Para lo anterior, se disponen obras al pie del rápido de descarga que provoquen la disipación mediante agitación, generación de vórtices internos, choque entre partículas de agua y con obstáculos o paredes.

Otra forma de liberar la energía cinética acumulada es cambiar de régimen de escurrimiento desde supercrítico a subcrítico a través de un resalto hidráulico, en el cual el aumento de la altura de escurrimiento como se muestra en la Figura 3-15 provoca una gran disminución en su velocidad.

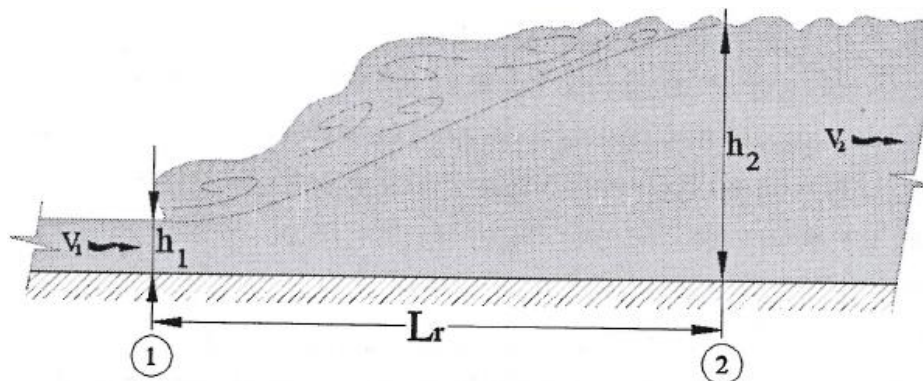


Figura 3-15: Componentes del resalto hidráulico (Mery M., 2013).

En la Figura 3-15,

h_1 es la altura del torrente en el inicio del resalto

v_1 es la velocidad del torrente $> v_c$

h_2 es la altura del escurrimiento subcrítico o altura conjugada

v_2 es la velocidad del régimen subcrítico

L_r es la longitud del resalto hidráulico

Para calcular la altura conjugada, Belanger propone:

$$h_{conj} = \frac{h_1 (\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1)}{2} \quad (3-29)$$

Donde,

$F_1 = \frac{v_1}{\sqrt{gh_1}}$ es el número de Froude del torrente

Para calcular la longitud del resalto, Horacio Mery (2013) presenta la ecuación propuesta por Hager:

$$L_r = h_1 160 \tanh\left(\frac{F_1}{20}\right) - 12h_1 \quad (3-30)$$

Se diseñan generalmente tanques disipadores de energía al pie de los rápidos de descarga que contengan al resalto hidráulico dentro de ellos. Para disminuir la longitud de estos tanques se dispone de bloques de impacto al pie del rápido. Se sugieren (Mery M., 2013) los siguientes tipos de estanques disipadores:

◆ Estanque tipo II USBR

Se utilizan cuando en el flujo el número de Froude del torrente es $F_1 > 4.5$ y su velocidad $v_1 > 18[m/s]$. La altura a la salida del tanque en el régimen subcrítico debe ser $h_2 > 1.05h_{conj}$ y el largo del estanque es de $L_{II} = 4.4h_{conj}$. Las dimensiones de sus componentes se muestran en la Figura 3-16:

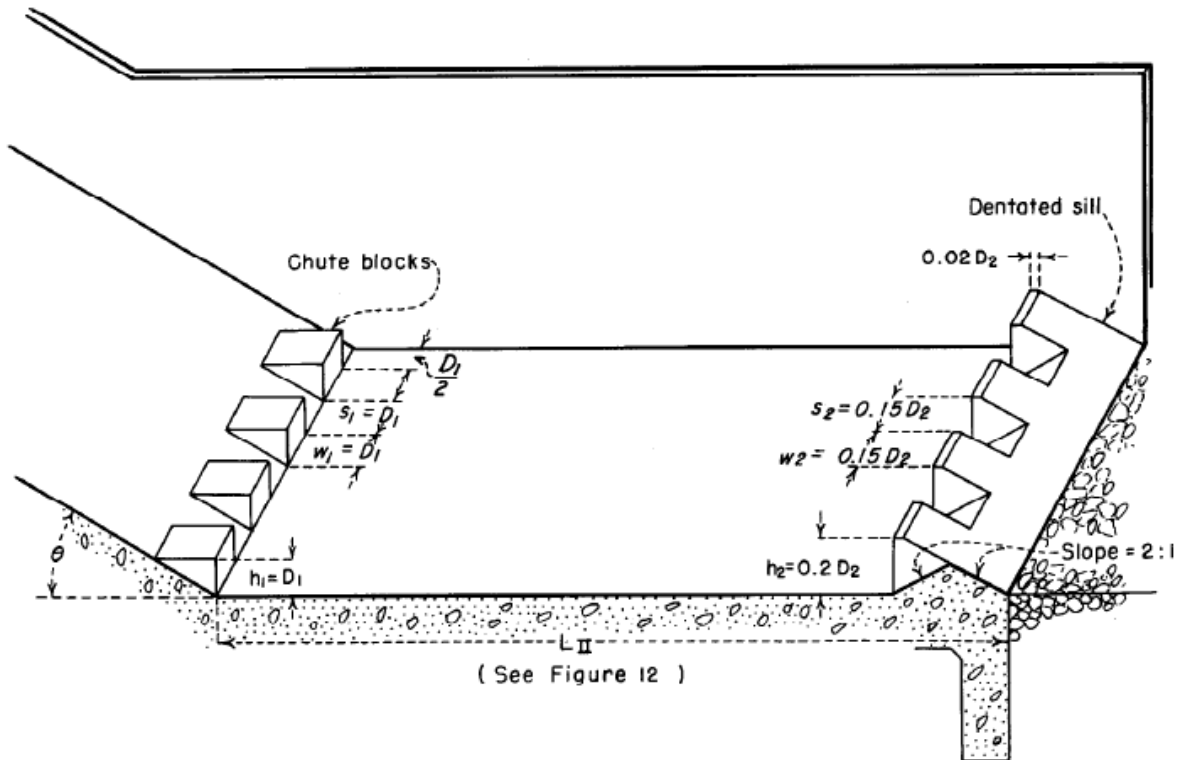


Figura 3-16: Proporciones recomendadas para tanque disipador Tipo II USBR (USBR, 1984)

Estanque tipo III USBR

Este estanque, en comparación con el tipo II anterior, agrega una corrida de bloques de impacto en su centro.

Se utilizan cuando en el flujo el número de Froude del torrente es $F_1 > 4.5$ y su velocidad $v_1 < 18 [m/s]$. La altura a la salida del tanque en el régimen subcrítico debe ser $h_2 = h_{conj}$ y el largo del estanque es de $L_{III} = 2.8h_{conj}$. Las dimensiones de sus componentes se muestran en la Figura 3-17:

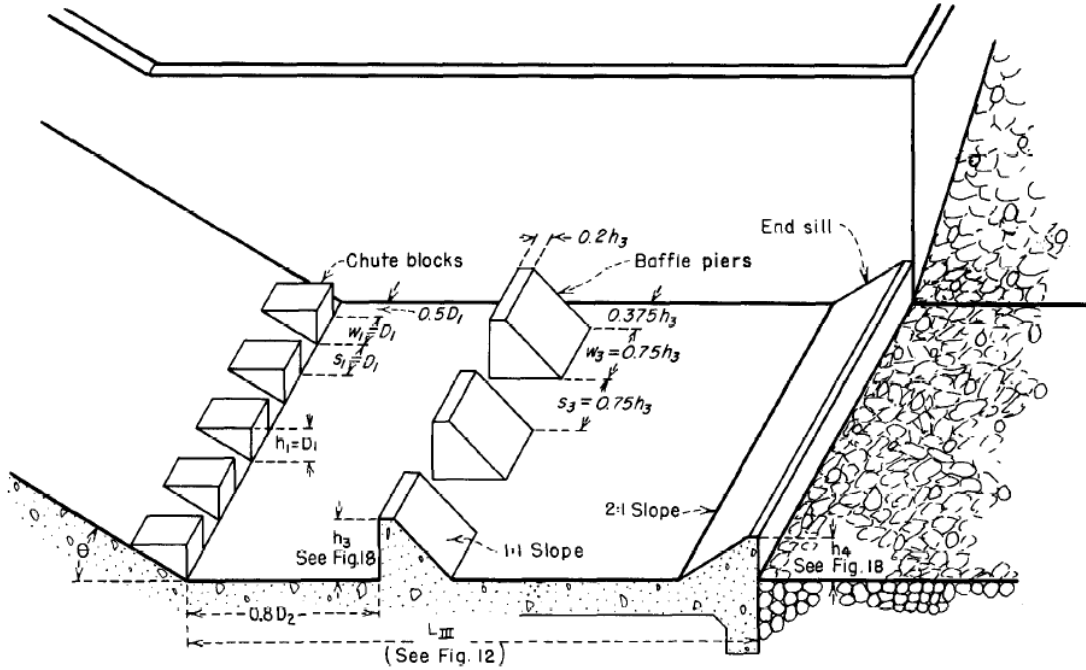


Figura 3-17: Estanque Tipo III USBR (USBR, 1984).

Las alturas h_3 y h_4 se estiman mediante la relación con D_1 de la forma mostrada en la Figura 3-18:

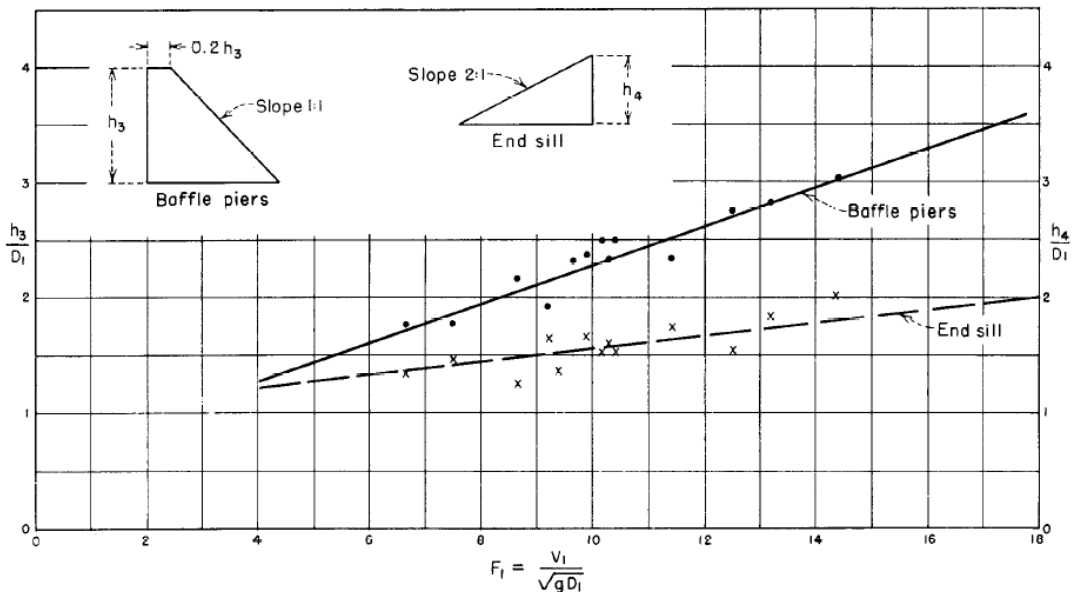


Figura 3-18: Altura de los bloques y umbral final para estanque Tipo III USBR (USBR, 1984).

Estanque tipo IV USBR

Se ocupa para torrentes con baja energía específica. Se utilizan cuando en el flujo el número de Froude del torrente es $2.5 < F_1 < 4.5$ y su velocidad $v_1 > 18[m/s]$. La altura a la salida del tanque en el régimen subcrítico debe ser $h_2 = h_{conj}$ y el largo del estanque es de $L_{IV} = 6.1h_{conj}$. Las dimensiones de sus componentes se muestran en la Figura 3-19:

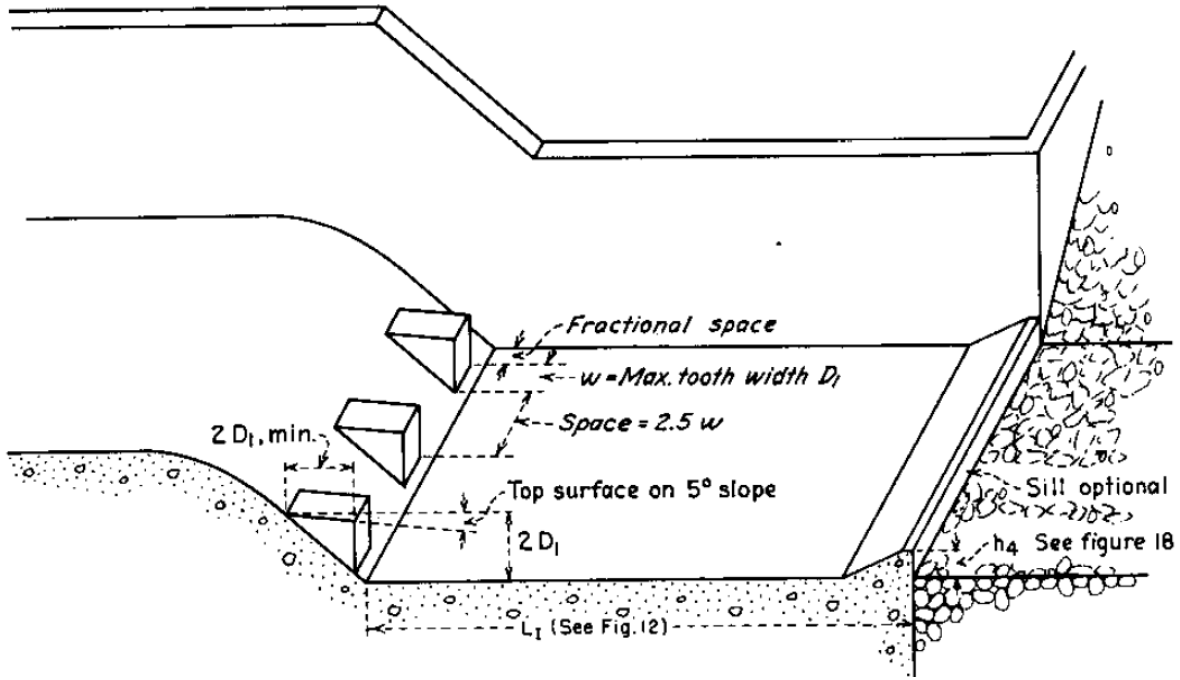


Figura 3-19: Propiedades para estanque Tipo IV USBR (USBR, 1978).

La USBR recomienda dejar un resguardo en los muros del estanque de altura:

$$h_{res} = 0.1(v_1 + h_2)$$

Grada de subida

Si el torrente se enfrenta a una grada de subida de altura a , pueden suceder las dos situaciones mostradas en la Figura 3-20:

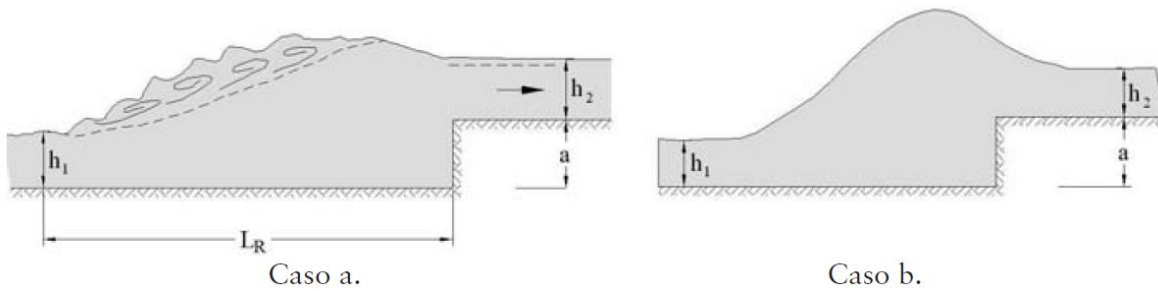


Figura 3-20: Resalto antes de la grada de subida (Mery M., 2013).

El surgimiento del resalto dependerá de la altura h_2 aguas abajo de la grada. En el Caso a de la Figura 3-20, el resalto se produce inmediatamente aguas arriba de la grada. En el Caso b de la Figura 3-20, la altura h_2 no es suficiente para generar un resalto aguas arriba y el torrente sube la grada.

Para que se produzca el Caso a, se debe verificar que el número de Froude en el torrente sea menor que:

$$F_1^2 = \frac{Y(Y^2 + 2AY + 2A^2 - 1)}{2(Y - 1)} \quad (3-31)$$

Donde,

$$Y = \frac{h_2}{h_1}$$

$$A = \frac{A}{h_1}$$

Y finalmente el largo del resalto será:

$$L_{res} = 6 \left(h_2 + \frac{6a}{5} \right) \quad (3-32)$$

3.2.2.6 Canal de Desvío y Contorno

El canal de desvío es una obra hidráulica que desvía las aguas desde una quebrada aguas arriba del depósito de relaves hacia aguas abajo de este, impidiendo que haya contacto de las aguas con el relave.

Por otro lado, un canal de contorno capta las aguas de crecidas de la cuenca aportante al depósito de relaves desviándolas hacia aguas abajo de este, para evitar que se contaminen con los relaves.

En ambos casos la obra hidráulica es un canal abierto. El canal muchas veces es revestido por una membrana de HDPE, por mampostería de piedra donde en algunos casos existe radier de hormigón en su base como se muestra en la Figura 3-21. Los canales revestidos son más favorables que los de tierra, ya que presentan mayor estabilidad y resistencia a la erosión e infiltración, por lo que permiten velocidades mayores y debido a esto, el depósito de sedimentos disminuye.

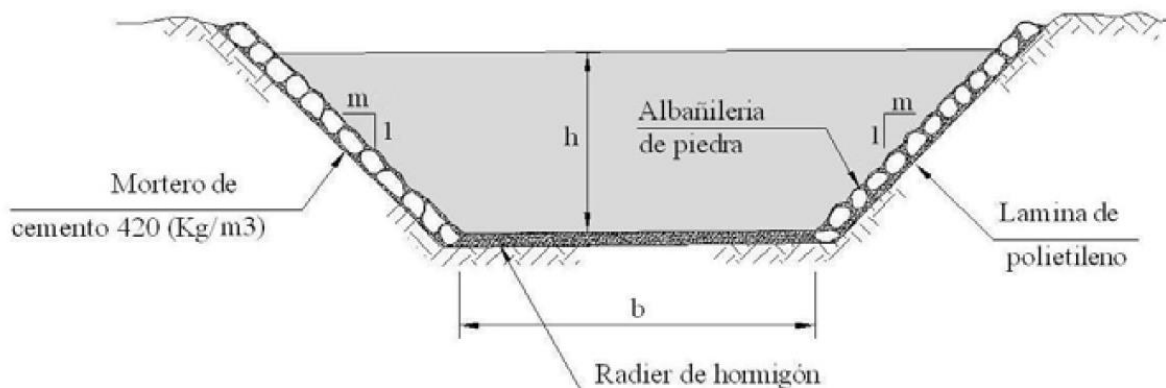


Figura 3-21: Sección típica de canal con albañilería de piedra y base de hormigón (Mery M., 2013).

Si el canal está ubicado en el talud de un cerro, se debe disponer de un contrafoso al pie de este talud para recibir las aguas lluvias y descargarlas al canal cada cierta distancia.

Las secciones más utilizadas son las rectangulares y trapezoidales, donde las últimas resultan más favorables debido a su facilidad para la mantención y mayor estabilidad.

Para calcular el eje hidráulico dentro del canal, se utiliza la fórmula de Manning donde su coeficiente de rugosidad depende del material utilizado en el canal. Ven Te Chow (1994) entrega valores para cada material según la Tabla 3-4:

Tabla 3-4: Valores para el coeficiente de rugosidad de Manning (Chow, 1994).

Material	Mínimo	Normal	Máximo
Concreto			
Terminado con llana metálica (palustre)	0,011	0,013	0,015
Terminado con llana de madera	0,013	0,015	0,016
Pulido con gravas en el fondo	0,015	0,017	0,020
Sin pulir	0,014	0,017	0,020
Lanzado, sección buena	0,016	0,019	0,023
Lanzado, sección ondulada	0,018	0,022	0,025
Sobre roca bien excavada	0,017	0,020	-
Sobre roca irregularmente excavada	0,022	0,027	-
Mampostería			
Piedra partida cementada	0,017	0,025	0,030
Piedra suelta	0,023	0,032	0,035
Bloques de piedra labrados	0,013	0,015	0,017

Para el caso en que el canal se compone de diversos materiales a lo largo de su sección, se debe calcular una rugosidad compuesta a través de un coeficiente de Manning equivalente. Horton y Einstein (Mery M., 2013) proponen la siguiente formulación:

$$\bar{n} = \left(\frac{\sum n_j^{3/2} P_j}{\sum P_j} \right)^{2/3} \quad (3-33)$$

Donde,

P_j es el perímetro mojado del trazo j

n_j es el coeficiente de Manning del material del trazo j

En la Ecuación (3-33), la velocidad media de cada parte del área es igual a la de la sección completa.

Se debe calcular un resguardo o revancha que consiste en un diferencial de altura entre la cota máxima de agua dentro del canal y el coronamiento de este. Este resguardo se realiza por temas de seguridad debido a que la masa de agua se eleva por turbulencias, ondas rodantes, viento, ondas estacionarias o efectos locales como peralte en curvas del eje del canal. En todos los casos esta altura está relacionada con la velocidad de escurrimiento en el canal y en el caso de las curvas, además se relaciona a la curvatura.

Para un flujo subcrítico, James Chwen-Yuan Guo (1999) propone la siguiente relación para el resguardo:

$$R_{res} = 0.3 + \frac{\bar{v}_n^2}{2g} \quad (3-34)$$

Donde,

\bar{v}_n es la velocidad media normal en el canal.

En el caso de los escurrimientos supercríticos, las velocidades del flujo son altas y se recomienda adoptar resguardos mayores a los de la Ecuación (3-34) (Mery M., 2013).

Para las curvas, el peralte se calcula mediante la Ecuación (3-35) con los parámetros mostrados en la Figura 3-22:

$$\Delta h = \frac{C\bar{v}^2 l}{gR_c} \quad (3-35)$$

Donde,

l es el ancho de la superficie libre

R_c es el radio de la curva medida al eje del canal

$C=0.5$ constante para régimen subcrítico en sección trapezoidal

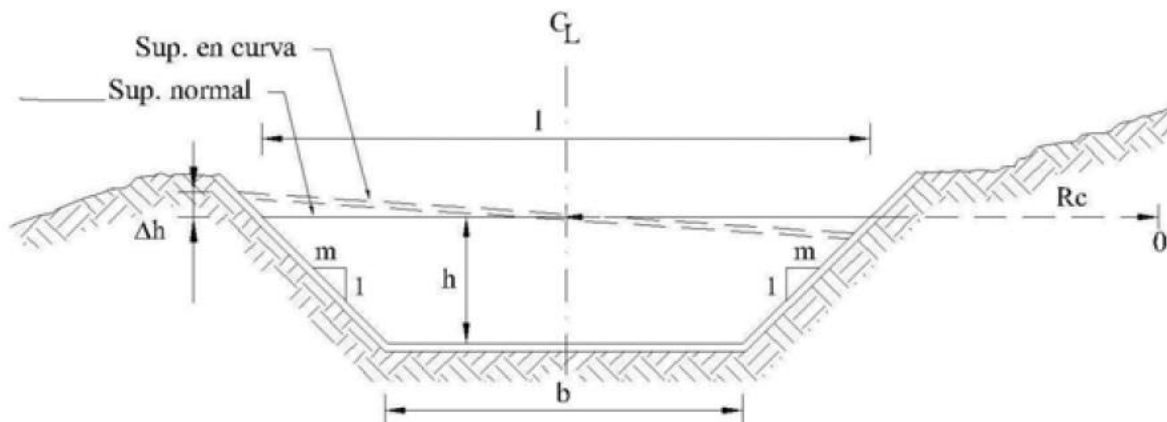


Figura 3-22: Peralte del nivel de agua, debido a una curva en el canal (Mery M., 2013).

De las experiencias de Shuckry, el radio de la curva debe ser igual o mayor de 3 veces el ancho superficial para que no se produzcan grandes perturbaciones en el flujo.

Finalmente, para estar en un régimen alejado de la crisis y evitar variaciones abruptas de altura de escurrimiento, se sugieren las características que debe poseer el flujo para que sea estable (Mery M., 2013):

Flujo subcrítico	$h > 1.1h_c$	o	$F < 0.86$
Flujo supercrítico	$h < 0.9h_c$	o	$F > 1.13$

3.2.2.7 Obras de Saneamiento

Según el Manual de Carreteras (2018), las obras de saneamiento corresponden al sistema de drenaje de aguas presentes en las estructuras de pavimento, ya sea superficiales o internas, que permiten mantener el agua alejada del camino y de su subrasante. Se consideran obras de saneamiento a los fosos, contrafosos, alcantarillas, cunetas, bajadas de agua, bombeo, drenes, entre otros.

3.2.2.7.1 Alcantarillas para Atraveso de Terraplenes de Caminos, Canales y Tuberías

Las alcantarillas se definen como canales rectos cubiertos y de corta longitud. La crecida de diseño depende de la obra que esté atravesando la alcantarilla y del daño provocado si se supera su cota límite, estos periodos de retorno son los expuestos en la Tabla 3-2 en el Acápite 0.

Las alcantarillas están compuestas por el conducto de atraveso junto con las obras de entrada y salida a este y la tubería puede ser de sección circular o rectangular

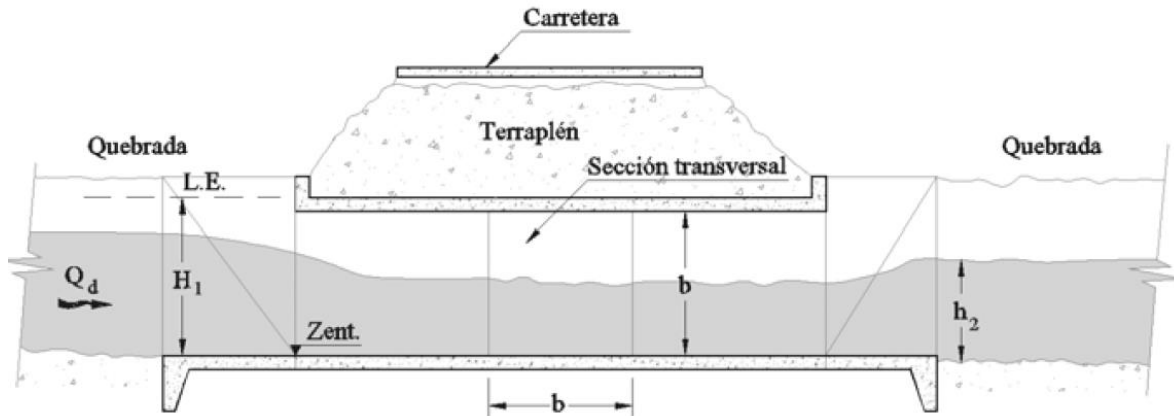


Figura 3-23: Perfil longitudinal de una alcantarilla (Mery M., 2013).

Como muestra la Figura 3-23, se denomina H_1 a la energía específica en la entrada medida con respecto a un plano horizontal de referencia y Z_{ent} a la cota de fondo. La alcantarilla se debe diseñar a superficie libre con condiciones cercanas a la crítica para generar el caudal máximo. Este tipo de escurrimiento se caracteriza por la presencia de ondulaciones estacionarias en la superficie libre, las cuales se deben tener en cuenta para diseñar la altura del conducto ya que, si tocan la clave de la alcantarilla el conducto puede entrar en presión.

Henderson (1966) recomienda que la relación entre la energía específica de aguas arriba y la altura del conducto sea igual o menor de 1,20 y propone relaciones para estimar el caudal dentro de la alcantarilla.

Si la alcantarilla es de sección circular de diámetro D:

$$\frac{Q}{D} = \frac{0.432\sqrt{g}(H_1 - Z_{ent})^{1.9}}{D^{0.4}} \quad \text{si} \quad 0 < \frac{H_1 - Z_{ent}}{D} < 0.8 \quad (3-36)$$

$$\frac{Q}{D} = 0.438\sqrt{g}(H_1 - Z_{ent})^{1.5} \quad \text{si} \quad 0.8 < \frac{H_1 - Z_{ent}}{D} < 1.2 \quad (3-37)$$

Si la alcantarilla es de sección rectangular de ancho b:

$$\frac{Q}{b} = \frac{C_D 2}{3} \sqrt{\frac{2}{3} g (H_1 - Z_{ent})^{1.5}} \quad \text{si} \quad \frac{H_1 - Z_{ent}}{D} < 1.2 \quad (3-38)$$

Donde,

$C_D = 1$ si la alcantarilla es de bordes redondeados donde $R > 0,1b$ y $C_D = 0,9$ si el cajón es de aristas vivas.

Debido a que estas obras limitan el libre paso del agua y/o por motivo de obstrucciones, el nivel a la entrada de la alcantarilla aumentará. Lo anterior se debe tener en cuenta limitando la carga hidráulica

máxima, ya que se producen rebalces de agua que podrían ocasionar problemas en la estabilidad de la obra que se está atravesando (socavaciones, tubificación, entre otras).

Para calcular la carga hidráulica H_e en alcantarillas con control de entrada, el Manual de Carreteras (2018) propone la expresión de la *Federal Highway Administration* (FHWA):

$$H_e = (a + bzF + c(cF)^2 + d(zF)^3 + e(zF)^4 + f(zF)^5 - 0.5i)D \quad (3-39)$$

Donde,

$F = \frac{Q}{D^{5/2}}$ para alcantarillas circulares o $F = \frac{Q}{BD^{3/2}}$ en cajones donde B es el ancho basal.

Q es el caudal en $[m^3/s]$

D es el diámetro o altura de la alcantarilla en [m]

B es el ancho de los cajones en [m]

i es la pendiente longitudinal en $[m/m]$

z = 1.81130889 es el factor de conversión para unidades en m

a, b, c, d, e y f son los coeficientes de regresión según Tabla 3-5 a continuación:

Tabla 3-5: Coeficientes de regresión para alcantarillas con control de entrada (MOP, 2018)

Tipo de obra	a	b	c	d	e	f
Alcantarilla circular de concreto o HDPE estructurado con interior liso, aristas vivas, muro frontal y alas $33^\circ \leq \beta \leq 83^\circ$	0,087483	0,706578	-0,2533	0,0667	-0,00662	0,000251
Alcantarilla circular de concreto, aristas ranuradas, muro frontal y alas $33^\circ \leq \beta \leq 83^\circ$	0,114099	0,653562	-0,2336	0,059772	-0,00616	0,000243
Alcantarilla circular de acero corrugado, muro frontal y alas $33^\circ \leq \beta \leq 83^\circ$	0,167433	0,538595	-0,14937	0,039154	-0,00344	0,000116
Alcantarilla circular de acero corrugado o HDPE estructurado con interior liso, tubo cortado a bisel y sin alas	0,107137	0,757789	-0,3615	0,123393	-0,01606	0,000767
Cajón de aristas vivas, muro frontal y alas $33^\circ \leq \beta \leq 83^\circ$	0,072493	0,507087	-0,11747	0,02217	-0,00149	0,000038
Cajón de aristas vivas, muro frontal y alas $\beta = 17^\circ$ o 100°	0,122117	0,505435	-0,10856	0,020781	-0,00137	0,000035
Cajón de aristas vivas, muro frontal y alas de $\beta = 0^\circ$	0,144133	0,461363	-0,09215	0,020003	-0,00136	0,000036

Continuación de *Tabla 3-5*:

Tipo de obra	a	b	c	d	e	f
Cajón de aristas biseladas, muro frontal y alas $\beta = 50^g$	0,156609	0,398935	-0,06404	0,011201	-0,00064	0,000015

El Manual de Carreteras (2018) limita la Carga hidráulica a la entrada de la alcantarilla H_e según la Tabla 3-6:

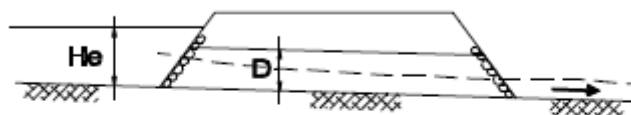
Tabla 3-6: Carga hidráulica de diseño a la entrada de alcantarillas (MOP, 2018).

Tipo de Cauces	Tubos	Cajones
Canales	D (diámetro)	H (altura total)
Diseño de Cauces Naturales	D+0,3 [m]	H+0,3 [m]
Verificación de Cauces Naturales	D+0,6 [m]	H+0,6 [m]
	$H_e \leq \text{Cota exterior de SAP}^1 - 0,3 \text{ [m]}$	

¹Sobrecargas de Plataforma de caminos.

Las obras de entrada a la alcantarilla guían el flujo hacia la alcantarilla con el mínimo de contracción posible y las obras de salida son las encargadas de reestablecer las condiciones naturales del flujo hacia aguas abajo. El Manual de Carreteras (2018) señala que todas la alcantarillas deben tener a su entrada un muro de hormigón frontal perpendicular al cauce como se muestra en la Figura 3-24 con alas de ángulo $\beta = 45^\circ$ con el sentido del escurrimiento, a excepción de caminos locales o de desarrollo donde se puede disponer un tubo cortado bisel en para $D \leq 1[m]$ con protección en el talud que sobrepase la clave del tubo en 0.5[m] y se extienda al menos $1.5D$ hacia ambos lados del tubo desde su borde exterior, sin embargo estos tubos biselados poseen menor eficiencia hidráulica.

DUCTO CORTADO A BISEL SEGÚN INCLINACIÓN DE TALUD



DUCTO CON MURO FRONTAL - CON Y SIN ALAS

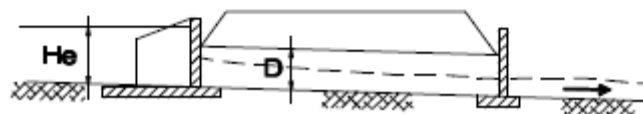


Figura 3-24: Clasificación de tubos y cajones (MOP, 2018).

Las obras de salida para alcantarillas de diámetro o altura útil menor o igual a 1.5[m] podrán ser muros frontales rectos sin alas. Para dimensiones mayores, la obra de salida puede ser un muro frontal con alas.

3.2.2.7.2 Drenaje de la plataforma

Según el Manual de Carreteras (MOP, 2018), las obras de drenaje mantienen las pistas libres de inundación para la precipitación de diseño según muestra la Tabla 3-7:

Tabla 3-7: Normas para drenaje de la plataforma (MOP, 2018).

Características de la Carretera	Tipo de Carretera	Periodo de Retorno [años]
Vías de Circulación Normal Mediana hundida Mediana elevada con soleras Rampas Ramales y otros empalmes de importancia similar	Autopistas o previstas como tales	25
	Autorrutas y Primarios	10
	Caminos	5
Puntos bajos de calzada y secciones bajo nivel de terreno	Autopistas o previstas como tales	50
	Autorrutas y Primarios	25
	Caminos	10

Los caudales de diseño de drenaje de la plataforma se deben estimar con los periodos de retorno asociados a cada obra, el método racional y un tiempo de concentración mínimo de 10 [min]. Sin embargo, el MOP (2018) prohíbe los flujos concentrados en la plataforma de más de $3 \left[\frac{l}{s} \right]$.

◆ Canales longitudinales

Un tipo de canal longitudinal son los canales interceptores o contrafosos de coronación los cuales pueden estar ubicados en corte o terraplenes de caminos.

En el caso de estar en un corte, cuando el camino necesita protección a la erosión de las aguas en los taludes, los cuales pueden deslizarse hacia el camino, el MOP (2018) menciona que se debe construir un contrafoso o zanja protectora sobre la coronación del corte que conduzca las aguas hacia una quebrada o descarga al sistema de drenaje hacia aguas abajo. Si las velocidades dentro de los canales interceptores exceden las señaladas en la Tabla 3-8, los canales se deben revestir para evitar la erosión de los suelos.

Tabla 3-8: Velocidades máximas admisibles en canales no revestidos (MOP, 2018).

Tipo de Terreno	Flujo Intermitente $[\frac{m}{s}]$	Flujo Permanente $[\frac{m}{s}]$
Arena Fina (no coloidal)	0,75	0,75
Arcilla Arenosa (no coloidal)	0,75	0,75
Arcilla Limosa (no coloidal)	0,90	0,90
Arcilla Fina	1,00	1,00
Ceniza Volcánica	1,20	1,00
Grava Fina	1,50	1,20
Arcilla Dura (coloidal)	1,80	1,40
Material Graduado (no coloidal)		
Desde Arcilla a Grava	2,00	1,50
Desde Limo a Grava	2,10	1,70

Continuación *Tabla 3-8*:

Tipo de Terreno	Flujo Intermitente [m/s]	Flujo Permanente [m/s]
Grava	2,30	1,80
Grava Gruesa	2,40	2,00
Desde Grava a Piedras (bajo 15 [cm])	2,70	2,10
Desde Grava a Piedras (sobre 20 [cm])	3,00	2,40

En el caso que la pendiente longitudinal exceda 25%, MOP (2018) recomienda utilizar bajadas de agua.

💧 Cunetas

Si el camino está en terraplén y las aguas que escurren desde la calzada y berma pueden erosionarlo, se debe proyectar una cuneta como canal interceptor en terraplén, constituido de la berma revestida del camino llegando a una solera y así conducir las aguas hacia un desagüe. El MOP (2018) recomienda pendientes longitudinales mínimas de 0,25% y 0,12% en canales de tierra y revestidos respectivamente. Las velocidades dentro de estos canales interceptores deben estar entre 0,25 [m/s] y las máximas no deben exceder las dispuestas en la Tabla 3-8 para canales sin revestir y las de la Tabla 3-9 para canales revestidos:

Tabla 3-9: Velocidades máximas admisibles en contrafosos y cunetas revestidas (MOP, 2018).

Tipo de Revestimiento	Velocidad admisible [m/s]
Mezclas Asfálticas en Sitio y Tratamientos Superficiales	3,0
Mampostería de Piedra	4,5
Hormigón Asfáltico o Cemento Portland	4,5

Para la pendiente transversal máxima de cunetas de 0,5 [m] de ancho con solera, el MOP (2018) establece un valor de 30% hacia la solera. Para cunetas de mayor ancho, la pendiente transversal mínima es de 8%.

La capacidad hidráulica de cunetas triangulares se calcula de acuerdo a la expresión de Manning:

$$Q = \frac{AR_h^{2/3}\sqrt{i}}{n} \quad (3-40)$$

Donde,

Q es el caudal en [m³/s]

A es el área de la sección de la cuneta triangular en [m²]

$R_h = A/P_m$ es el radio hidráulico en [m] y P_m es el perímetro mojado en [m]

i es la pendiente longitudinal de la cuneta

n es el coeficiente de rugosidad de Manning

Las propiedades geométricas de las cunetas triangulares ocupadas en la Ecuación (3-40) son:

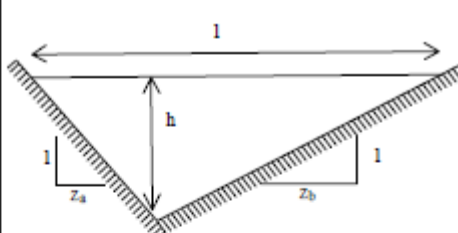
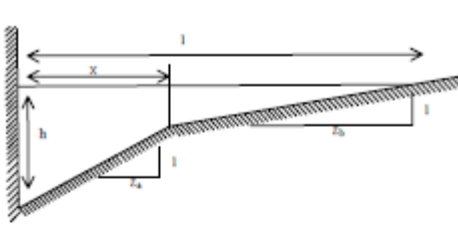
Tipo de Cuneta o Canal	
	
Ancho Superficial (l)	$(z_a + z_b) \cdot h$
Area (π)	$x + z_b \cdot \left(h - \frac{x}{z_a} \right)$
Perímetro Mojado (P)	$x \cdot h + \frac{z_b \cdot h^2}{2} + \frac{x^2}{2 \cdot z_a} \cdot \left(\frac{z_b}{z_a} - \frac{2 \cdot z_b \cdot h}{x} - 1 \right)$
Radio Hidráulico (R)	$h + \sqrt{x^2 \cdot \left(1 + \frac{1}{z_a^2} \right)} + \sqrt{z_b^2 + 1} \cdot \left(h - \frac{x}{z_a} \right)$
	$\frac{(z_a + z_b) \cdot h}{2 \cdot \left(\sqrt{1 + z_a^2} + \sqrt{1 + z_b^2} \right)}$
	$\frac{x \cdot h + \frac{z_b \cdot h^2}{2} + \frac{x^2}{2 \cdot z_a} \cdot \left(\frac{z_b}{z_a} - \frac{2 \cdot z_b \cdot h}{x} - 1 \right)}{h + \sqrt{x^2 \cdot \left(1 + \frac{1}{z_a^2} \right)} + \sqrt{z_b^2 + 1} \cdot \left(h - \frac{x}{z_a} \right)}$

Figura 3-25: Capacidad hidráulica de cunetas y canales triangulares (MOP, 2018).

◆ Bajadas de Agua

Estas obras se disponen cuando se necesita proteger de la erosión a taludes y cortes. Las aguas recogidas por canales laterales e interceptores se desvían hacia conducciones en el pie de estos taludes.

Según el Manual de Carreteras (MOP, 2018), los tipos de bajas de agua más comunes son las bajadas de tubo, las bajadas en canaleta y los vertederos. Las primeras, se utilizan en taludes con $H/V > 4$, las segundas son secciones semicirculares de metal corrugado con embudo en su entrada y se utilizan cuando $H/V \leq 2$ y los vertederos se utilizan en taludes con $H/V \leq 4$.

3.2.2.7.3 Drenaje Subterráneo

Se utiliza drenaje subterráneo para eliminar el exceso de agua del suelo y descender su nivel freático, protegiendo la estabilidad de la plataforma y taludes.

Los tipos de drenes más utilizados son:

💧 Pozos de drenaje

Estos drenes infiltran el exceso de agua de capas de estratos superficiales o capas permeables profundas o alivian acuíferos hacia sistemas de drenaje superficial. Estas obras pueden ser superficiales o profundas.

💧 Subdrenes

Son zanjas de sección rectangular rellenas con material granular permeable y rodeadas de geotextil o por material geocompuesto drenante instaladas en suelos de permeabilidad menor a $0.1 [cm/s]$. Pueden llevar o no una tubería en su fondo dependiendo del caudal, la cual es perforada, ranurada, porosa o con juntas abiertas.

💧 Manta drenante

Corresponde a una capa de geocompuesto drenante que se dispone sobre la subrasante del camino. Debe estar conectada a subdrenes longitudinales.

💧 Zanjas de drenaje

Son zanjas paralelas al camino, de sección trapezoidal generalmente de talud $H/V = 1$ rellenas de material permeable.

💧 Sondajes horizontales

Son tubos metálicos de 50[mm] de diámetro que drenan acuíferos profundos. Son dispuestos en taludes de corte y terraplenes aliviando la tensión hidrostática del suelo, evitando su saturación y deslizamientos.

4 METODOLOGÍA DE EVALUCIÓN DE VULNERABILIDADES Y RIESGOS DE OBRAS HIDRÁULICAS DENTRO DE DEPÓSITOS DE RELAVES

Para realizar la evaluación de vulnerabilidades de las obras hidráulicas asociadas a depósitos de relaves, primero se exponen las grandes fallas que han ocurrido en los últimos años a nivel nacional y mundial para contextualizar la vulnerabilidad que presentan estas obras de gran magnitud. Luego, se analizan y mencionan los factores críticos de diseño en cada una de las obras hidráulicas que caracterizan los depósitos de relaves chilenos. Posteriormente, se presentan las principales fallas que pueden ocurrir en estas obras producto de grandes crecidas debido al cambio climático y se propone un esquema resumen de las amenazas y riesgos más relevantes de estas obras. Finalmente se presenta una metodología de análisis de riesgos utilizada actualmente para las amenazas asociadas con el Cambio Climático.

4.1 Grandes fallas históricas dentro de los depósitos de relaves y embalses de agua

A continuación, se presentan los principales colapsos de las obras dentro de depósitos de relaves y dentro de embalses de agua. Se mencionan los hechos y las principales causas de estas fallas.

4.1.1 Tranque Mina Cadia, Australia

El 9 de marzo del año 2018, uno de los dos muros del depósito de relaves en la mina Cadia de Australia, tuvo un colapso parcial hacia un segundo tranque de relaves, liberando los depósitos a este. El evento ocurrió días después de que dos sismos de 10 segundos de diferencia afectaran el área a dos kilómetros de la mina. El propietario y operador Newcrest Mining no se refiere a la conexión de este evento con los terremotos, pero sí menciona que previamente habían identificado grietas en la pared de la presa durante una inspección regular y estaban inspeccionando y evaluando el terraplén (The Sidney Morning Herald, 2018).

Como se muestra en la Figura 4-1, este evento no produjo daños al medio ambiente ni fue considerada una amenaza a la comunidad.



Figura 4-1: Colapso de muro en Depósito de Relaves Mina Cadia, Australia (The Sidney Morning Herald, 2018).

4.1.2 Samarco, Brasil

El 5 de noviembre del año 2015, ocurrió el colapso repentino de los diques Fundão y Santarém de la Compañía Samarco en Brasil tras un sismo de alta magnitud.

El colapso causó la liberación de 60 millones [m^3] de relaves al medio ambiente, provenientes de los procesos de extracción de hierro, contaminando el Río Doce y causando la muerte de al menos 17 personas.

Se construye un panel de expertos para analizar las posibles causas que podrían haber ocasionado los colapsos. Este panel determina que las presas posiblemente fallaron por licuefacción debido a la extrusión lateral del limo. Este fenómeno ocurre debido a que la presa va aumentando su altura cargando el limo verticalmente, el cual tiende a extenderse lateralmente provocando el cambio en los esfuerzos de la arena adyacente, reduciendo su confinamiento y provocando erosión interna en él (ver Figura 4-2) hasta finalmente el colapso del muro. El panel menciona además que los sismos anteriores al colapso, aceleraron el proceso de falla que ya esta se encontraba avanzada (Fundão Tailings Dam Review Panel, 2016).



Figura 4-2: Efectos de la erosión interna en el talud aguas abajo del Dique 1 (Fundão Tailings Dam Review Panel, 2016).

4.1.3 Mina Mount Polley, Canadá

El 4 de agosto del año 2014, el muro de contención del depósito de relaves de la mina Mount Polley falló abruptamente liberando los relaves en los cursos naturales de agua como se muestra a continuación en la Figura 4-3.



Figura 4-3: Colapso de muro de contención del Depósito de Relaves de la Mina Mount Polley (Mount Polley Review Panel, 2015).

Debido a esto, se crea un panel de expertos que realiza una investigación y posterior informe detallado de las causas de tal desastre y propone medidas para evitar posibles fallas similares en otros sitios de la mina (Mount Polley Review Panel, 2015)

El panel concluyó que la falla se produjo en la fundación del terraplén del muro. Se detectó que la una capa de la base no era continua, por lo tanto, contribuía a una falla no drenada. También en el informe se indica que otra causa fue la construcción de un relleno de roca en el talud aguas abajo del muro, el cual poseía pendiente muy pronunciada al momento de la falla (Mount Polley Review Panel, 2015). Más específicamente en la Revisión de Directrices y Recomendaciones de Gestión de Relajación para Mejoras de la ICMM (2016) se dice que el cambio en la pendiente aguas abajo del muro fue de 2H: 1V a 1.3H: 1V que da como resultado falla no drenada de la capa de arcilla no identificada en la base.

4.1.4 Tranque el Cobre, Mina el Soldado, Chile

El 28 de marzo de 1965, se produjo un terremoto de magnitud 7,6 Richter en La Ligua, Región de Valparaíso.

El tranque de relaves El Cobre de la minera La Disputada de las Condes se encontraba localizado a unos 10 km de la comuna de La Calera y 300 [m] de altura. Este depósito de relaves no poseía muro de contención, sólo algunas corridas de sacos de arena en su frente las cuales producto del terremoto colapsaron, provocando una avalancha de 10 millones de m^3 de relaves hacia el poblado El Cobre ubicado aguas abajo. El área inundada por los relaves abarcó de 8 a 10 km de largo y 200 a 500 m de ancho con alturas de 2 a 5 m (Urrutia de Hazbún & Lanza Lazcano, 1993).

Se registran 87 muertos, centenares de heridos y 222 desaparecidos bajo el aluvión de los relaves que posteriormente endurecieron sepultando en sólo 15 minutos a las familias que vivían en el pueblo arrasado por esta catástrofe.

Este desastre es uno de los más mencionados nacionalmente por su envergadura y debido a que existieron más depósitos de relaves que fallaron producto de este terremoto, provocando la inundación de los terrenos bajos adyacentes inhabitados, pero sin ocasionar víctimas.



Figura 4-4: Bomberos sacando cadáver de entre los relaves (Ercilla, 1965).

4.1.5 Embalse, Laos

El 23 de Julio del 2018, colapsó la presa del proyecto Hidroeléctrico *Xe-Pian Xe-Namnoy* en Construcción en Laos. El motivo aparente del colapso fueron las importantes lluvias continuadas que provocaron que un gran volumen de agua llenara rápidamente el embalse de la hidroeléctrica, la cual consta con tres represas, una principal y dos auxiliares. Una de estas últimas, denominada “represa D”, sufrió una fractura.

Producto del colapso, se vertieron 5.000 millones de m^3 de agua (El Colombiano, 2018) sobre 6 aldeas, provocando la muerte de 19 personas, cientos de personas desaparecidas y más de 6.600 personas sin hogar (BBC, 2018).

4.1.6 Embalse Oroville, USA

Tras las tormentas en California el año 2017, la presa Oroville se llenó hasta su capacidad.

La cadena de daños comenzó el 7 de febrero, cuando el rápido de descarga del vertedero principal de la Presa Oroville se rompió tras días de utilización intensiva. Por lo tanto, se detuvo su operación debido a que el agua se desviaba hacia la montaña, produciendo socavación y arrastre de sedimentos hacia el río Feather aguas abajo (El País, 2017).

Debido a lo anterior, comenzó a operar tras casi 50 años inoperativo el vertedero de emergencia, ubicado sobre el muro al costado del vertedero principal. Sin embargo, su descarga provocó la socavación de un cráter en la montaña aguas abajo de 152 m de largo, 91 metros de ancho y 13 metros de altura provocando incluso la erosión del muro (BBC, 2017).

Por motivos preventivos, casi 200.000 personas fueron evacuadas el 12 de Febrero (El País, 2017).

Finalmente, se decidió abrir nuevamente el vertedero principal y evacuar $2.830[m^3/s]$ de agua aunque significaba terminar de destruir el rápido de descarga (BBC, 2017).

En la figura Figura 4-5 se presenta una imagen del daño ocurrido en ambos vertederos y el arrastre de material provocado por la socavación en el muro y la montaña.



Figura 4-5: Daños ocasionados en el vertedero principal y de emergencia de la Presa Oroville, tras las importantes precipitaciones (El País, 2017).

4.2 Factores críticos de obras hidráulicas dentro de depósitos de relaves.

Como se pudo apreciar en el Acápite anterior, las fallas fueron producto eventualidades como grandes crecidas, sismos o producto de inadecuada mantención de las obras o cambios en el diseño de ellas. En el análisis de la influencia del cambio climático en las obras de depósitos de relaves, la única variable relevante son las grandes crecidas.

Debido a lo anterior, se apunta al análisis de los factores críticos en las obras hidráulicas de depósitos de relaves ante aumentos de las crecidas tanto en el aumento del caudal, como en la altura de carga en ellas.

4.2.1 Depósito de relaves

Los principales factores críticos que pueden afectar a la operación en los depósitos de relaves debido las crecidas son:

X Resguardo del Muro

La altura del muro del depósito de relaves dependerá, principalmente, de la capacidad que se requiera para el almacenamiento de estos y está ligada a la producción de cada compañía minera. Los muros se diseñan para que, en ningún caso, **el relave pueda sobrepasar su coronamiento** y fluir hacia aguas abajo del depósito de relaves y para soportar la carga estática que produce el relave y laguna de aguas en él (sólo en el caso que la laguna esté dispuesta adyacente al muro) evitando una **falla de tipo geotécnica**.

X Embancamiento por Acarreo de Fondo

Durante las crecidas, los cauces afluentes a los depósitos de relaves acarrearán por su fondo las partículas sólidas más gruesas, debido a las fuerzas hidrodinámicas que actúan sobre ellas. Estas partículas se acumulan en el lecho de la laguna de aguas claras, ya que su velocidad de escurrimiento disminuye por el aumento en la altura de la masa líquida, y durante la vida útil del embalse avanzan lentamente hacia la presa donde se embancan denominándose deltas. Este proceso producirá una **pérdida en el volumen de acumulación del depósito de relaves** (Mery M., 2013).

X Embancamiento por Acarreo en Suspensión

El arrastre en suspensión ocurre cuando las partículas de sedimentos más pequeñas son levantadas por la turbulencia del escurrimiento y transportadas por él. Se genera una mezcla entre las partículas sólidas finas y líquidas sin que las primeras toquen el fondo del cauce. A diferencia de las partículas más gruesas, **las partículas más finas no presentan el riesgo de provocar obstrucciones** en las canalizaciones al disminuir la velocidad del escurrimiento, y basta un aumento de la velocidad para que nuevamente entren en movimiento. Por lo anterior, una parte importante de estos sedimentos fluyen hacia aguas abajo a través del evacuador de crecidas (Mery M., 2013).

X Socavación en los Estribos del Muro

Los estribos son estructuras internas laterales del muro que permiten empotrarlo al terreno. Se debe impedir la **infiltración y/o socavación en ellos** producto de crecidas, ya que se compromete la estabilidad del muro.

4.2.2 Canaletas y Tuberías de Relaves

Las canaletas y tuberías que transportan los relaves hacia el depósito y que se encuentran dentro de la cuenca aportante al depósito de relaves poseen los siguientes factores críticos:

X Socavación en Conducción

Dependiendo de la topografía de la cuenca aportante al depósito de relaves, pueden existir cauces que confluyan a lo largo del trazado de canaletas y tuberías que transporten relaves hacia el depósito. Por lo tanto, estas obras están expuestas a sufrir **socavación en su base**, por ende, se debe diseñar obras que las protejan, tales como desvíos de las aguas afluentes hacia otro sector o cruces de cauces mediante alcantarillas para asegurar la operación de estas obras luego de la crecida.

X Arrastre de Sedimentos

Los cauces afluentes a canaletas y tuberías que transportan relaves hacia el depósito, pueden traer consigo partículas de suelo erosionado debido a la crecida las cuales podrían **dañar las estructuras o embancar estos depósitos dentro de la conducción** (en el caso de canaletas) dejándolas inhabilitadas para su posterior operación.

X Desbordamiento de Relaves

En el caso de las canaletas de relaves, si bien puede existir un canal de contorno que encauce y conduzca las aguas afluentes al depósito y canaleta de relaves hacia aguas abajo, si la crecida afluente a esta canaleta es mayor que la de diseño o debido al embancamiento por arrastre de sedimentos, se producirá el aumento de nivel dentro de la canaleta de relaves, y posterior **desbordamiento de las aguas contaminadas con relave al terreno aledaño**.

4.2.3 Cajones Receptores, Distribuidores y/o de Bombeo de Relaves

Los cajones que se disponen al final del trayecto de las tuberías o canaletas que transportan el relave hacia el depósito, poseen los siguientes factores críticos de diseño:

X Socavación en Cajones

De igual forma que en el Acápite 4.2.2 anterior, si los cauces confluyen a los cajones dispuestos en el perímetro del depósito de relaves, y no se diseñan obras de protección para estos cajones o se desvían los cauces, **el terreno aledaño a estas estructuras puede sufrir socavaciones, impidiendo el funcionamiento operacional** posterior a la crecida.

X Arrastre de Sedimentos

Asimismo, los cajones se deben proteger para el posible arrastre de sedimentos que pueda ocurrir en las crecidas y producir **daños en la fundación de estas estructuras**.

Del mismo modo, en el caso de una canaleta de relaves afluente a un cajón, se debe tener en cuenta el **embancamiento que se puede producir dentro de esta estructura** debido a las partículas afluentes de la canaleta.

4.2.4 Canal de Desvío y Contorno

Los canales que transportan las aguas afluentes al depósito de relaves las cuales son desviadas aguas abajo de este, presentan los siguientes factores críticos de diseño:

X Socavación en Conducción

Al igual que las canaletas y tuberías que transportan relaves, las obras de conducción de aguas como los canales de desvío de cauces hacia aguas abajo del depósito de relaves o los canales de contorno, pueden sufrir **daños en el terreno bajo ellas debido a la socavación** producto de cauces afluentes a su trayecto en crecidas.

X Arrastre de Sedimentos

Si el contrafoso supera su capacidad y los sedimentos son acarreados hacia los canales de desvío y contorno por los cauces afluentes a estas obras, pueden **dañarlas o acumularse en su lecho ocasionando embancamiento y, por ende, problemas de operación e incluso desborde de estas aguas hacia el depósito de relaves** si el reguardo no es suficiente para contener las aguas.

4.2.5 Obras de Saneamiento

Las obras de saneamiento dispuestas para la protección de la estructura de los caminos y del lecho de las obras de conducción hidráulicas como canales, canaletas y tuberías, presentan los siguientes factores críticos de diseño:

X Falla en la Estructura de Caminos

Las obras de saneamiento deben proteger al camino y su subrasante de las aguas de crecidas. En el caso de que la crecida sea mayor a la de diseño de estas obras, las estructuras drenantes no serán capaces de mantener el agua alejada del camino pudiendo provocar su **inoperación momentánea o colapso**.

4.2.5.1 Alcantarillas

A continuación, se analiza la vulnerabilidad de las alcantarillas dispuestas en cruce de cauces con caminos, canales y tuberías:

X Subpresiones dentro de la Alcantarilla

Debido a la falta de capacidad en la alcantarilla ya sea por condiciones de tubería a boca llena en crecidas mayores a la de diseño o por la formulación de ondas estacionarias y perturbaciones mencionadas en el Acápito 3.2.2.7.1, **el conducto entra en presión y puede colapsar, afectando la estabilidad del terraplén y camino sobre él.**

X Socavación

Para grandes crecidas, en la entrada de las alcantarillas sin muro frontal (caminos locales o de desarrollo según Acápito 3.2.2.7.1) es posible que se generen vórtices y remolinos que **erosionen el terraplén del camino** sobre los 0,5[m] de protección sobre la alcantarilla, **provocando grandes fuerzas de empuje en la entrada que pueden provocar su falla.**

Si las uniones no son del todo impermeables, se pueden ocasionar **infiltraciones a lo largo de la alcantarilla erosionando el material bajo ella y pudiendo producir la falla de la alcantarilla y/o terraplén del camino.**

Por otro lado, si las obras de protección del lecho del cauce a la entrada y salida de la alcantarilla no son suficientes se puede generar **grandes socavaciones que comprometan su estabilidad**, más aún en la salida de la alcantarilla debido a las altas velocidades.

X Arrastre de Sedimentos

En ejes de alcantarilla que no son rectos se puede producir **depósito de sedimentos y una disminución en la capacidad de la alcantarilla.**

4.2.5.2 Drenaje de la Plataforma

Tal como se menciona en el Acápito 0, en el Manual de Carreteras (2018) el MOP prohíbe los flujos sobre la plataforma mayores a 3 [l/s], sin embargo si se producen crecidas mayores se analizan las siguientes vulnerabilidades:

X Inundación de Pistas

Si la crecida es mayor a la del diseño de las cunetas, fosos y contrafosos o la pendiente longitudinal es muy baja en estas obras, **las pistas se inundarán y quedarán inoperantes.**

X Erosión de obras sin revestimiento

Si las velocidades dentro de las obras de drenaje superficial son mayores a las admisibles, se pueden producir grandes erosiones y, por ende, **quedar disponible material para el arrastre de partículas de suelo** o incluso **provocar el colapso de estas obras.**

Además, en canaletas proporcionadas como bajadas de agua donde se produzcan alturas de escurrimiento mayores al límite de la sección semicircular, es posible que se produzcan erosiones en el talud o corte del suelo aledaño a estas obras y que las **partículas del material erosionado viajen hacia las obras aguas abajo.**

X Arrastre de sedimentos hacia Contrafoso

Si la socavación en el terraplén o corte del camino es mucha, el material erosionado puede deslizarse hacia el contrafoso e **inhabilitarlo.**

4.2.5.3 Drenaje Subterráneo

Se infiere del Acápite 3.2.2.7.3 la vulnerabilidad de las obras de drenaje subterráneo:

X Inundación de Pistas e inestabilidad de terraplén del camino

Si la crecida provoca niveles de acuíferos mayores a los del diseño de las obras de drenaje subterráneo o a la capacidad de infiltración de sus materiales, la capacidad no será suficiente para evacuar el exceso de agua del suelo y se puede generar **la inundación de las pistas del camino** e incluso **perturbar la estabilidad de él.**

4.2.6 Vertedero de seguridad

Se analizan los factores críticos de diseño de los vertederos de tipo Morning Glory, pared delgada y de tipo Ogee:

💧 Vertedero Morning Glory.

Se infiere del Acápite 3.2.2.2, que los factores críticos de este tipo de vertederos serán los siguientes:

X Altura de carga sobre el coronamiento

Desde una altura de carga hacia arriba la eficiencia de la descarga del vertedero comienza a disminuir significativamente, actuando en flujo libre sólo cuando $H_0/R_s < 0.45$

Si la carga en el vertedero comienza a ser mayor que la de diseño, el vertedero se comenzará a ahogar y ya no regirá el flujo de tubo, sino que pasará a controlar el flujo de túnel aguas abajo de este. El problema surge cuando la altura del agua en el túnel alcanza el máximo y termina el flujo a superficie libre comenzando el flujo a presión, pudiendo provocar **cavitación dentro de él.**

X Forma del coronamiento

Si la forma del coronamiento no se asemeja a la parte inferior de la lámina libre sobre un vertedero circular de arista viva, se producirán **subpresiones bajo esta lámina de agua, dañando** la estructura del vertedero.

X Radio de coronamiento R_s

Al aumentar el diámetro del coronamiento del vertedero, la descarga es mayor a una menor altura de carga, la transición se comenzará a **ahogar más rápidamente** y el control en el tubo ocurrirá con una altura de carga menor.

X Tamaño de la transición

Si el tamaño del eje es menor al mínimo desarrollado en el Acápite 3.2.2.2 por la Ecuación (3-16), **se desarrollarán subpresiones en ella**, es por esto, que en ningún caso el perfil de coronamiento puede ser menor. En cambio, si se diseña una transición de mayor tamaño, **el flujo luego del punto de control se desarrollará bajo presión.**

Independiente de los casos anteriores, el flujo dentro del vertedero pasará directo desde el control de coronamiento, al control aguas abajo del túnel.

X Aireación en el punto de control y a lo largo del túnel

Debido a las posibles subpresiones en transición y túnel evacuador, se deben diseñar obras de aireación que eviten lo anterior.

X Profundidad de aproximación

Como se pudo observar en la Figura 3-4 del Acápite 3.2.2.2, para casi todas las condiciones de flujo sobre un vertedero Morning Glory, el coeficiente de descarga C_0 y por lo tanto la descarga,

aumentan a medida que la profundidad de aproximación P disminuye. Lo anterior ocurre debido a que la componente de velocidad vertical disminuye, la napa se deprime impulsando al flujo hacia abajo más rápidamente lo que provoca que la posición del punto de confluencia baje y disminuya el ahogamiento permitiendo aumentar finalmente la descarga.

X Perfil hidráulico dentro del túnel de descarga

Para asegurar presión atmosférica dentro del túnel de descarga, se debe asegurar que el flujo no comprenda toda el área de la sección ducto para evitar **subpresión en él**.

X Pendiente del túnel de descarga

Se compara el gradiente hidráulico con la pendiente del túnel y se corrobora que el flujo se desarrolle a superficie libre por el ducto (sin **subpresiones**), permitiendo la descarga aguas abajo de este.

◆ Vertedero de pared delgada.

Los factores críticos de este tipo de vertederos son los siguientes:

X Verificación de caudal

El vertedero se diseña para un caudal de diseño Q_d y una carga hidráulica de diseño H_d , sin embargo, es recomendable verificar su operación en un rango de caudales entre $0,1Q$ y Q y para condiciones de emergencia donde pueden ocurrir caudales mayores al de diseño y por ende, cargas sobre el vertedero mayores **provocando la inestabilidad**.

X Aireación de la napa

Si la napa no es adecuadamente ventilada, la característica de la descarga del vertedero resulta muy afectada y el vertedero puede operar en forma insegura pudiendo generar **subpresiones bajo la napa**.

En algunos casos es conveniente tener contracciones laterales para facilitar la aeración de la napa vertiente.

◆ Vertedero Ogee.

Los factores críticos de este tipo de vertederos son los siguientes:

X Subpresiones por altura máxima de carga

Si la curvatura de la parte inferior de la napa es mayor que el diseño del vertedero se comenzará a despegar y se pueden generar subpresiones, por lo tanto, la **cavitación puede producirse y generar daños potenciales**.

Mery (2013) recomienda que la carga máxima de operación sea:

$$H_{MÁX} = \frac{4}{3} \cdot H_d \quad (4-1)$$

Lo que provocaría una presión mínima sobre el fondo sería de $-0,5 \cdot H_d$ aproximadamente.

4.2.7 Canal colector luego del vertedero

El canal colector dispuesto luego de los vertederos de tipo Ogee o pared delgada presenta los siguientes factores críticos para su diseño:

X Componentes de velocidad en el sentido del escurrimiento del canal colector.

Para efectuar el cálculo del eje hidráulico se idealiza el problema y se supone que el caudal entregado desde el vertedero se incorpora al escurrimiento del canal colector en forma normal, sin ninguna componente de velocidad en el sentido del escurrimiento.

X Formación de resalto hidráulico dentro del canal colector.

Si se llegase a producir la crisis en el canal colector y aguas abajo de este se presenta una altura de escurrimiento capaz de ahogar al torrente que se genera, se **producirá un resalto hidráulico no deseado** como se muestra en la Figura 4-6:

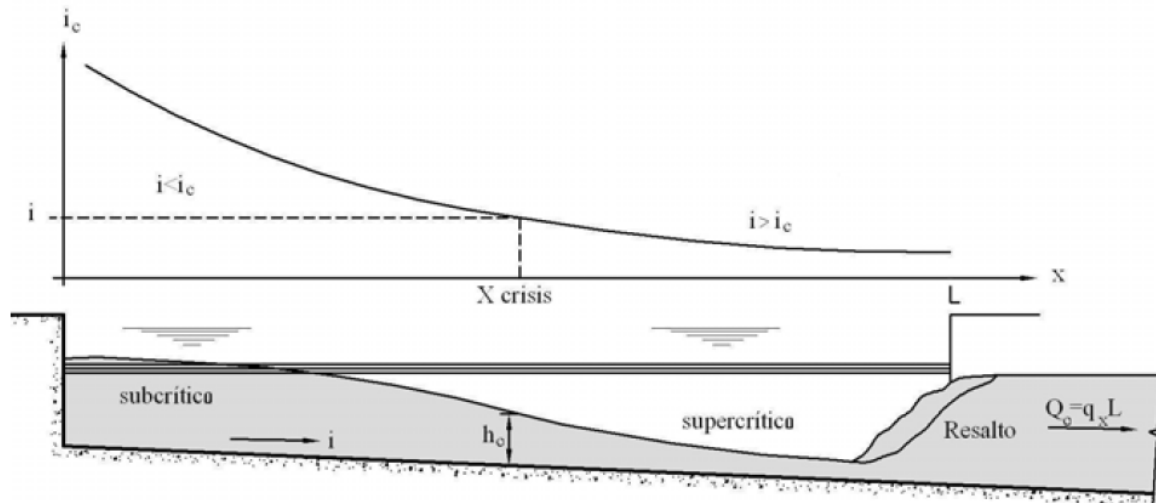


Figura 4-6: Pendiente crítica producida en el canal colector (Mery M., 2013).

Sin embargo, debido a la forma de la Ecuación (3-25) si la crecida es importante la pendiente crítica aumenta, por ende, es menor probable que se produzca resalto hidráulico dentro del canal colector.

X Perturbación del escurrimiento en el canal debido a la napa afluyente.

No siempre ocurre que la totalidad de la sección de este canal es útil para el flujo descargado desde el vertedero. Hay casos, como se muestra en la Figura 4-7, en que la afluencia al escurrimiento del canal conductor le resta superficie útil y la perturbación puede ser intensa.

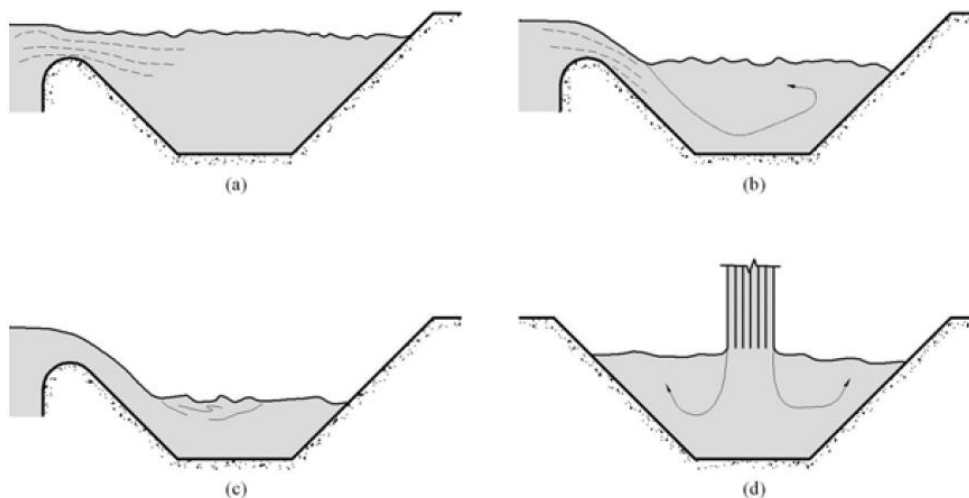


Figura 4-7: Casos de afluencia a canal colector. (a) Lámina sobre el vertedero totalmente ahogada por el escurrimiento en el canal colector y napa superficial. (b) Lámina sobre el vertedero en el límite de ahogamiento y napa sumergida por el fondo del canal colector. (c) Lámina libre sobre el vertedero no afectada por escurrimiento en el canal. (d) Lámina líquida que cae sobre el escurrimiento en el canal colector (Mery M., 2013).

La mayor perturbación del escurrimiento en el canal se produce cuando más sumergida esté la lámina líquida y mayor sea el caudal unitario afluente. Como se esquematiza en la Figura 4-7 en el caso (a) el aprovechamiento del canal es pequeño, a medida que el ahogamiento de la lámina afluente al canal decae dicho aprovechamiento va aumentando. Finalmente en el caso (c) la perturbación provocada por la napa al escurrimiento en el canal colector es prácticamente cero.

El caso (d) en la Figura 4-7 si bien no es un vertedero el que entrega el caudal afluente, se entrega como ejemplo de una lámina con mínima perturbación en el flujo sobre el canal colector.

4.2.8 Rápido de descarga

Los factores críticos de los cuales depende el diseño de los rápidos de descarga son:

X Régimen de escurrimiento

Se debe mantener el régimen supercrítico en toda su longitud a modo de evitar la **generación de resaltos**.

X Dirección y forma horizontal

Debe ser recto sin curvas en las paredes laterales para evitar la formación **de ondas estacionarias sobre la superficie libre**.

X Forma Vertical para Evitar Subpresiones

Para evitar **presiones muy altas** en un perfil cóncavo, se recomienda que el radio de la curva esté comprendido entre 5 y 10 veces la altura del escurrimiento.

Para una forma convexa, la napa tiende a separarse del fondo del canal, produciendo la introducción de aire bajo la lámina y **permitiendo subpresiones**. Por esto, se recomienda que la forma del fondo del canal sea más horizontal que la trayectoria de la lámina líquida estimada con la carga dada por el Bernoulli al inicio del rápido. Se recomienda adoptar una parábola tangente al fondo del canal al inicio y fin del rápido de la forma:

$$y = x \cdot \tan \alpha_1 + \frac{x^2}{6 \cdot B_1 \cdot \cos \alpha_1^2} \quad (4-2)$$

Donde,

x , y son las coordenadas de la curva.

h_1 es la altura del escurrimiento al inicio de la curva.

h_v es la altura de velocidad al inicio de la curva.

$B_1 = h_1 \cos \alpha_1 + h_v$ es el Bernoulli al inicio de la curva.

X Ondas rodantes

Se suelen producir ondas rodantes en los rápidos de descarga para caudales menores, los cuales son **perjudiciales especialmente para un dissipador de tipo resalto hidráulico** al fin del rápido. Para que esto no ocurra, se deben verificar los parámetros de Vedernikov y Montuori:

$$V = \frac{2 \cdot b \cdot v}{3 \cdot P_m \cdot \sqrt{g \cdot h \cdot \cos \theta}} \quad (4-3)$$

$$M^2 = \frac{v^2}{g \cdot J \cdot L \cdot \cos \theta} \quad (4-4)$$

Donde,

V es el número de Vedernikov adimensional

b es el ancho basal del canal

v es la velocidad media de escurrimiento

P_m es el perímetro mojado de la sección considerada

h es la profundidad media en la sección considerada

θ es el ángulo de inclinación del tramo en estudio

M es el número de Montuori adimensional

J es la pendiente media de la línea de energía en el tramo

L es la longitud del tramo en estudio

Horacio Mery (2013) propone los gráficos de las Figura 4-8 y Figura 4-9 del libro *Design of Small Canal Structures* (1978), para analizar la posibilidad de que se generen ondas rodantes:

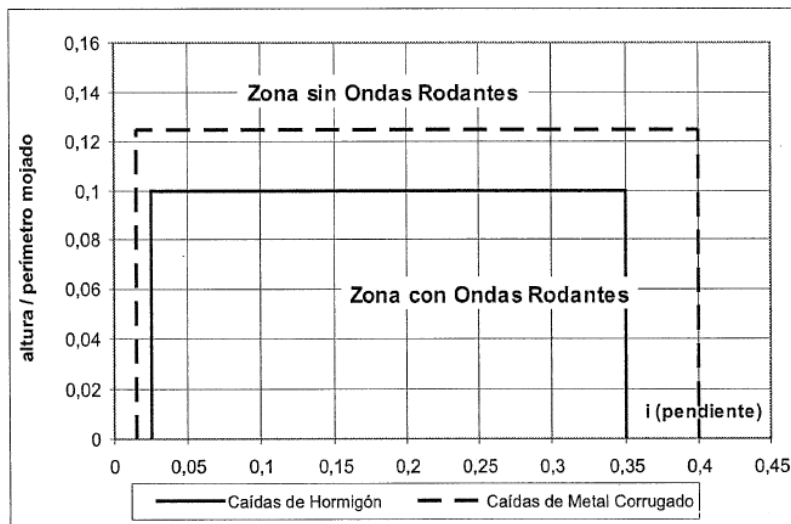


Figura 4-8: Criterios de forma y pendiente para Flujo Slug (Mery M., 2013).

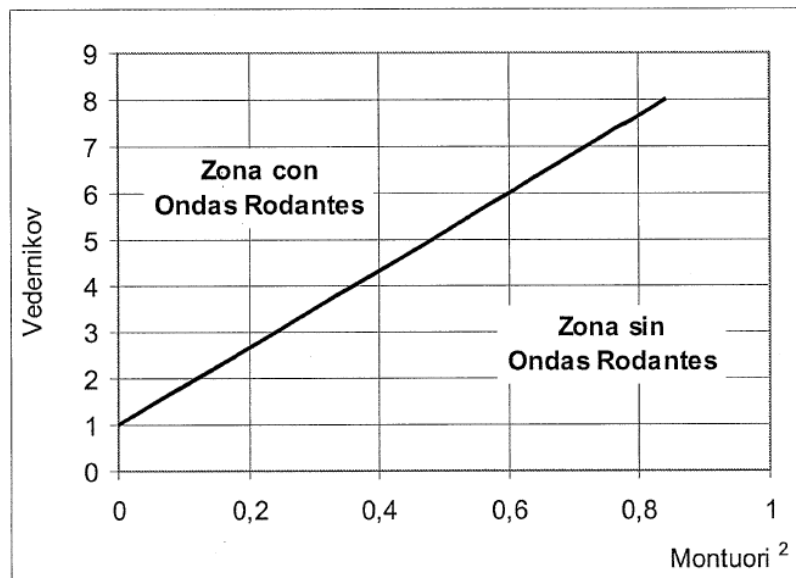


Figura 4-9: Criterio para Flujo Slug (Mery M., 2013).

4.2.9 Obras de Disipación de Energía

Para las obras de disipación de energía al pie de los rápidos de descarga se deben considerar los siguientes factores críticos:

X Disipación Insuficiente

En el caso que la disipación no le proporcione al escurrimiento el descenso de energía requerido y controle su entrega al cauce natural aguas abajo, se producirá **socavación en el lecho y ribera del cauce**.

Para calcular la eficiencia del resalto hidráulico como disipador de energía, Horacio Mery (2013) propone la siguiente relación:

$$e_r = \frac{(\sqrt{1 + 8 \cdot F_1^2} - 3)^3}{8(\sqrt{1 + 8 \cdot F_1^2} - 1)(2 + F_1^2)} \quad (4-5)$$

Donde,

F_1 es el número de Froude del torrente a la entrada del estanque.

Notar que la eficiencia del resalto depende sólo del número de Froude del torrente.

X Largo Insuficiente de la Obra Disipadora

Si la obra posee menor longitud que la necesaria para generar el resalto hidráulico según los parámetros de la Ecuación (3-30), y los bloques no son suficientes para disipar toda la energía cinética producida en el rápido, no será posible **entregar el caudal al cauce natural de forma controlada**.

X Desborde del Escurrimiento

Debido al aumento del escurrimiento producto del resalto hidráulico generado en el estanque o grada vistos en el Acápite 3.2.2.5, si el resguardo no es suficiente para soportar la altura conjugada del resalto se producirá el **desborde del escurrimiento fuera de la obra disipadora**.

X Subpresiones dentro de la Obra Disipadora

Debido a la gran turbulencia y velocidades de impacto en los bloques disipadores, se puede generar **cavitación en estas obras**. Como se menciona en el Acápite 3.2.2.5, para los estanques disipadores tipo III de la USBR (1984) se limita la velocidad de entrada del torrente.

Otro efecto de las subpresiones dentro de los estanques disipadores es el **levantamiento de la losa de fondo**.

4.3 Fallas que pueden experimentar las obras hidráulicas dentro de los depósitos de relaves debido al cambio climático.

Se parte de la premisa que durante una crecida de proporciones (como lo son la crecida con 10.000 años de periodo de retorno o la CMP), la operación de plantas espesadoras de relaves, de conducción e impulsión tanto de relaves como de agua, y de captación y bombeo de aguas de recirculación dentro del depósito de relaves, se detiene.

Los efectos del cambio climático son muchos, sin embargo, se exponen los más importantes y los que impactarán directamente a las obras hidráulicas dentro de depósitos de relaves.

Tal como se menciona en el Acápite 2.1, la causa atribuida al cambio climático es la actividad antropogénica, ya que debido al constante y desmedido aumento en las emisiones de gases efecto invernadero, se han observado en el último tiempo la alteración tanto en los sistemas hidrológicos como en los sistemas climáticos extremos.

El cambio en los sistemas hidrológicos resulta en el aumento tanto de la temperatura de la atmósfera como de los océanos. En estos últimos, también se ha observado la acidificación en el agua de su superficie atribuido a la absorción de dióxido de carbono desde la atmósfera.

Por otro lado, están los cambios en la precipitación característica de cada zona. De acuerdo a esto, se han identificado cambios tanto en la distribución espacial como temporal. Esta última se refleja en el cambio en la frecuencia de las precipitaciones en una determinada zona, lo que junto con el aumento de temperaturas desencadena climas más secos en las zonas áridas y, por otro lado, más lluviosos en las zonas húmedas.

El aumento de las temperaturas en un sistema hidrológico provoca, además de la escasez hídrica, el ascenso de la línea de nieves y con esto, la disminución de la precipitación sólida y el aumento en el área aportante de precipitaciones líquidas dentro de las cuencas.

Por otro lado, se registran cambios en la frecuencia de sistemas climáticos extremos. Reflejado en el aumento de ciclones, la continua escasez de agua atribuida a fenómenos como las sequías, el cambio en las temperaturas extremas tanto en su frecuencia como en su valor y el aumento de eventos de precipitaciones intensas.

Se observa el aumento en las temperaturas extremas, ya sea el aumento en las temperaturas más cálidas, como la disminución de las temperaturas más frías. Junto con esto, se observa una constancia en el aumento en la frecuencia de días y noches más cálidas, por ende, cada vez se observan menos los días y noches frías.

Si bien son muchos los efectos atribuidos al cambio climático, en este estudio se enfatizará el impacto en las precipitaciones intensas ya que son estas las que generarán el aumento en las crecidas y las fallas relacionadas a estas.

En la siguiente página se presenta un esquema para identificar los riesgos que presentan las obras hidráulicas dentro de los depósitos de relaves chilenos. En el esquema se destacan los efectos del cambio climático en las obras hidráulicas más utilizadas en el diseño de depósitos de relaves chilenos y los efectos críticos que pueden afectar de mayor manera a la operación del depósito de relaves y sus obras vinculadas. Además, se destacan las amenazas del cambio climático sobre las obras hidráulicas y los riesgos que presentan estas obras ante el cambio climático.

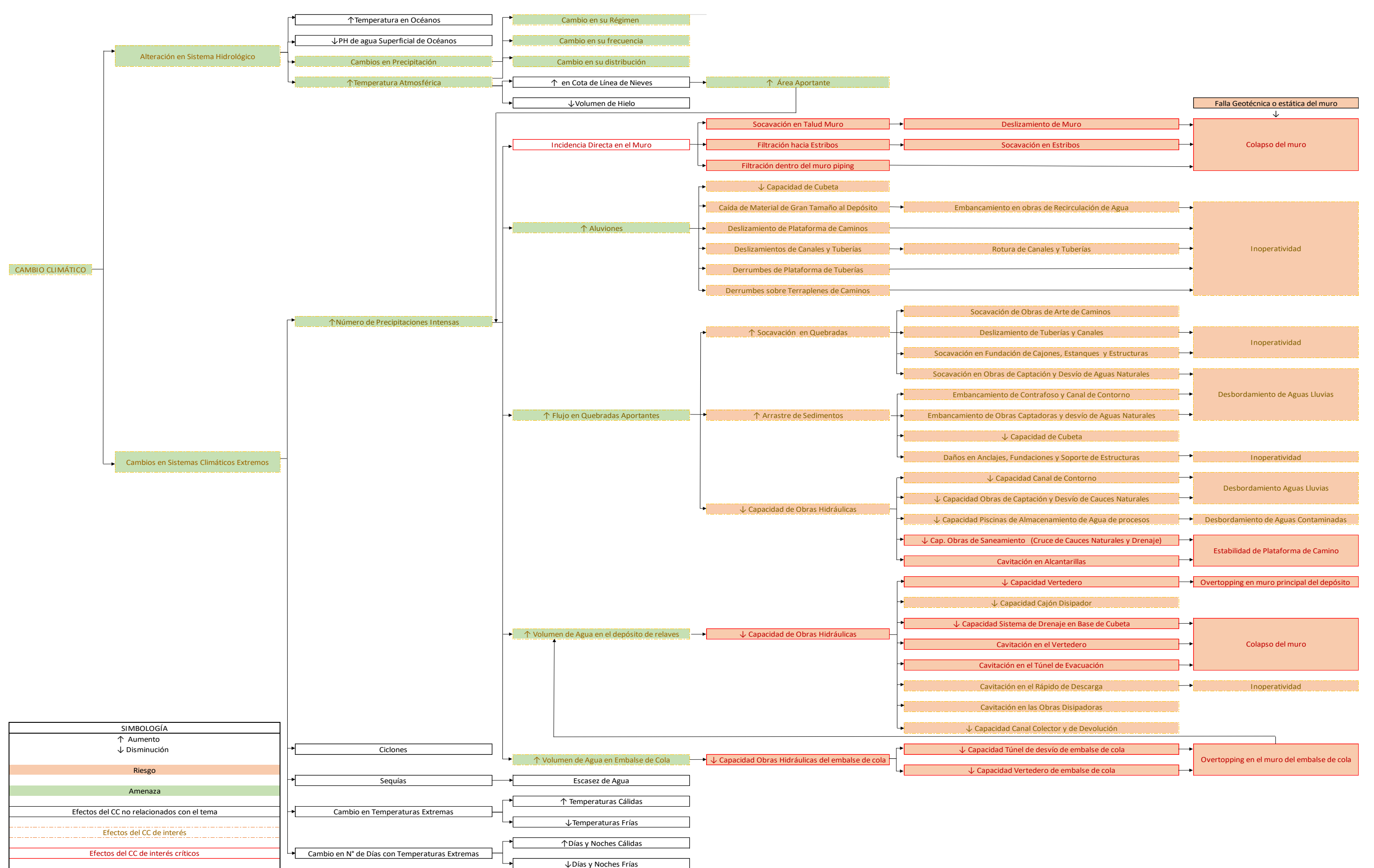


Figura 4-10: Esquema de efectos del cambio climático en las obras hidráulicas dentro de depósitos de relaves en Chile (Fuente: Elaboración propia).

En el esquema anterior se destacan los efectos críticos considerados, los cuales principalmente atienden a la protección de la salud y vida humana, luego a la protección del medio ambiente y finalmente a la protección de las instalaciones como tal.

En este contexto, a pesar de que los muros deben por diseño soportar las cargas hidrostáticas hasta su coronamiento, se considera falla geotécnica de tipo estática ya que causaría un impacto muy grande aguas abajo del depósito de relaves. Por esta misma razón, se considera falla de muro debido a tubificación, aunque según el Decreto 50 (MOP, 2015) se debe disponer protección mediante impermeabilizantes en el talud aguas arriba del muro.

4.4 Evaluación de Vulnerabilidades en Obras Hidráulicas Asociadas al Cambio Climático

Una vez identificados los factores críticos de diseño, las vulnerabilidades frente al Cambio Climático y su relevancia para cada obra hidráulica dentro del depósito de relaves a analizar, se debe realizar la evaluación de estas vulnerabilidades asociada a los riesgos que sufren estas obras hidráulicas.

En el marco de la CESCO Week 2019 organizada por CESCO (Centro de estudios del cobre y la minería) y SONAMI (Sociedad Nacional de Minería), se realiza el seminario “Minería y Cambio Climático: ¿Hacia Dónde Vamos?”. En esta actividad se expusieron temas principalmente relacionados con los efectos del Cambio Climático en la Industria Minera.

En la presentación “Riesgo Climático y Adaptación” (Brevis Vergara & Vicuña Díaz, 2019) el exponente propone un método para identificar los niveles de vulnerabilidad para minimizar el riesgo frente a los efectos del Cambio Climático. El método que se propone tiene origen en el paper “A Framework for Assessing the Vulnerability of Communities in the Canadian Arctic to Risks Associated with Climate Change” (Ford & Smit, 2004).

Este documento conceptualiza la vulnerabilidad como “..una función de la exposición a los efectos climáticos nocivos y la capacidad de adaptación para hacer frente a estos...” (Ford & Smit, 2004), buscando proponer una metodología para evaluar la vulnerabilidad de las comunidades del Ártico canadiense a los riesgos asociados con el cambio climático. La identificación de vulnerabilidades propuesta en este paper, está compuesta de dos partes principales, la primera etapa evalúa la vulnerabilidad actual al documentar las exposiciones y las estrategias adaptativas actuales, la segunda etapa evalúa la vulnerabilidad futura al estimar los cambios en la exposición climática y predecir la capacidad de adaptación futura sobre la base del comportamiento pasado.

En base a lo anterior, es posible aplicar la metodología planteada en el documento analizado (Ford & Smit, 2004), en los efectos del cambio climático en obras hidráulicas dentro de depósitos de relaves chilenos.

En este contexto, el esquema presentado en el Acápito 4.3 permite realizar el primer análisis identificando:

- Los riesgos actuales en la operación de las obras hidráulicas en el depósito de relaves analizado debido al Cambio Climático.
- Los efectos del cambio climático críticos de la totalidad de estos riesgos y clasificarlos de acuerdo a la protección de la salud y vida humana, el medio ambiente o su desempeño.

Para la segunda parte que corresponde al análisis de futuros riesgos, se propone utilizar las proyecciones climáticas del modelo y escenarios climáticos presentados en los Acápites 2.2 y 2.3, y luego corregirlos (a través de la línea base) a nivel de la cuenca aportante al depósito de relaves analizado, para finalmente analizar los riesgos de cada obra proyectados a escenarios futuros que reflejen el efecto del Cambio Climático en las crecidas.

5 EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS PRECIPITACIONES DE CUATRO DEPÓSITOS DE RELAVES

A continuación, se analizan las precipitaciones en cuatro depósitos de relaves de la Gran Minería chilena. Cada uno de ellos posee diferente ubicación dentro de Chile, características geográficas y obras hidráulicas dentro de él.

Se caracteriza pluviométricamente las cuencas aportantes a cada uno de ellos, entregando la información respectiva. Luego, se realiza el análisis de frecuencia con datos históricos de estaciones meteorológicas de la DGA y datos proporcionados por la línea base de los modelos de proyección de cambio climático. Finalmente, se escoge el modelo que más se acerque a la realidad y se realiza la corrección de los datos para obtener una proyección de precipitaciones futuras más acertada en cada depósito.

5.1 Cuenca Estero Alhué

El depósito de relaves Carén se encuentra en la comuna de Alhué a los 34,12°LS, al Sur de la Región Metropolitana, en el sotavento de la Cordillera de la Costa y cercano a Rancagua como se muestra en la Figura 5-1.

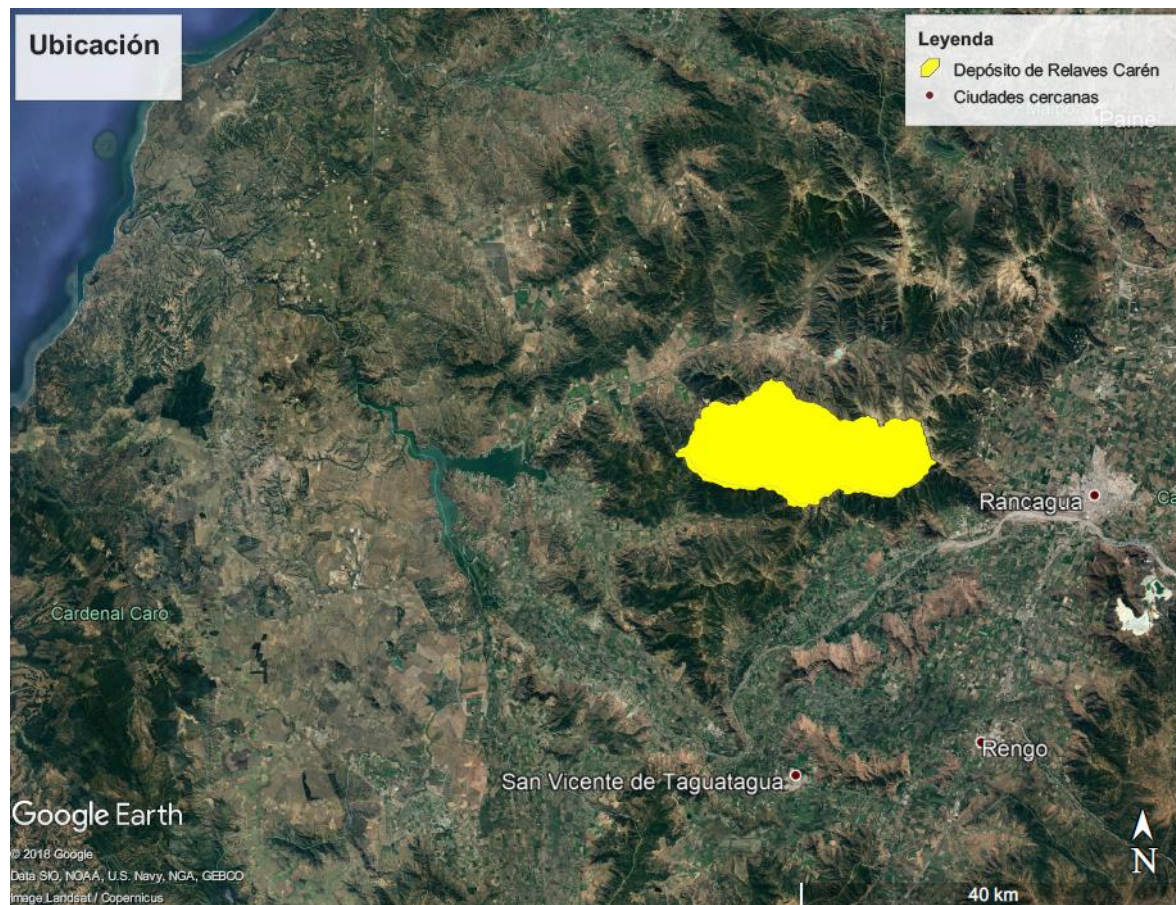


Figura 5-1: Ubicación del Depósito de Relaves Carén (Fuente: Elaboración propia).

Esta zona se caracteriza por un clima templado mediterráneo determinado por la concentración de precipitaciones en el periodo invernal (Mayo a Agosto).

5.1.1 Área Pluvial Aportante

En la Figura 5-2 se presenta el área de la cuenca aportante al depósito de relaves (en naranja) que corresponde aproximadamente a 214 [km²] de los cuales 21,5 [km²] pertenecen al depósito de relaves (en amarillo).

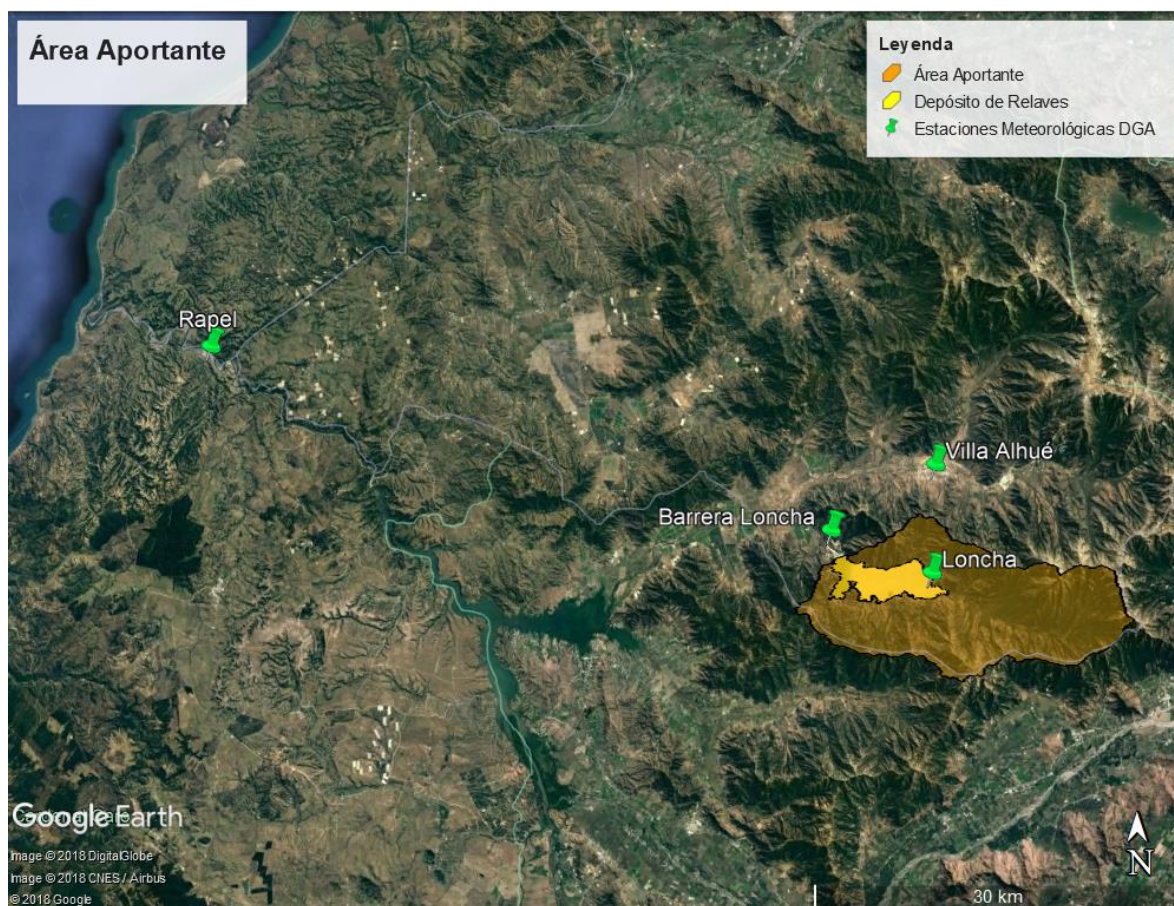


Figura 5-2: Ubicación del área pluvial aportante al Depósito de Relaves y estaciones meteorológicas de la DGA para el análisis de frecuencia (Fuente: Elaboración propia).

La máxima cota de la cuenca es de 2.045 [m.s.n.m] y la línea de nieves según Peña y Vidal (1993) para esta Latitud se encuentra aproximadamente a 1.750 [m.s.n.m]. Sin embargo, debido a las fuertes pendientes en las zonas altas de la cuenca, el área aportante nival corresponde al 1,98% del área aportante total. Por lo tanto, el régimen hidrológico de la cuenca se considera de tipo pluvial con escurrimiento importante en los meses de invierno y descarga al Estero Alhué, ubicado a 6,2 [km] aproximadamente aguas abajo del muro principal.

5.1.2 Distribución espacial y temporal de precipitación DGA

Se analizan las estaciones pertenecientes a la DGA más próximas al depósito. Las estaciones Loncha, Barrera Loncha y Villa Alhué mostradas en la Figura 5-2 pertenecen a la misma subcuenca de la DGA “Estero Alhué”.

Las estaciones anteriores se encuentran vigentes a excepción de la estación Loncha, ubicada en la cubeta del depósito de relaves, la cual dejó de funcionar al comienzo de su operación. Esta estación cuenta con serie de precipitaciones desde el año 1.976 hasta el año 1.985. En su reemplazo se instala la estación Barrera Loncha ubicada a 1,25 [km] aguas abajo del muro principal aproximadamente, la cual será reemplazada con la estación Loncha por su cercanía y representatividad espacial.

A las estaciones anteriores se añade la estación Rapel de la DGA perteneciente a la subcuenca “Río Rapel” la cual, a pesar de no estar ubicada en las cercanías del depósito de relaves, sus precipitaciones son similares y presentan una buena correlación con las precipitaciones de la estación Barrera Loncha. Además, esta estación se ubica en la trayectoria de las precipitaciones que provienen del Océano Pacífico y entran a la cuenca del estero Alhué como precipitaciones de tipo orográficas.

Como se muestra en la Tabla 5-1, las estaciones mencionadas anteriormente están ubicadas a cotas menores que la cota media de la cuenca y no representan adecuadamente las precipitaciones en la cuenca analizada. Para estimar las precipitaciones orográficas en la cota media de la cuenca se genera un gradiente pluviométrico que representa el aumento de las precipitaciones a medida que aumenta la altitud topográfica.

Tabla 5-1: Características de las estaciones DGA analizadas (Fuente: Elaboración propia).

Estación	Cota [m.s.n.m]	Código BNA	Coordenadas UTM [m]	
			Este	Norte
Barrera Loncha	144	06042004-1	298056	6226383
Loncha	210	06042003-3	306310	6222857
Villa Alhué	197	06040001-6	306637	6231926
Rapel	16	06056003-K	247349	6240424

Las series de precipitaciones diarias máximas anuales se obtienen desde la página web de la DGA (Información Oficial Hidrometeorológica y de Calidad de Aguas en Línea, 2018) y se presentan en el ANEXO A.

Se realiza el análisis de frecuencia para distintas distribuciones (Normal, Log Normal, Gumbel, Pearson, Log Pearson). Para lo anterior, se considera una estadística de precipitaciones de 27 años desde el 1979 al 2005 ya que como se comentará en el Acápite 5.1.3, los modelos de proyección de cambio climático poseen su línea base hasta el año 2005. También, se consideran los periodos de retorno de 10 años para construir el gradiente pluviométrico interpolado, 100 años como se menciona en la Tabla 3-2 para alcantarillas y periodos de 1.000 y 10.000 años como se menciona en la Tabla 3-1, asociados a este tipo de obras de gran magnitud y relevancia.

Las precipitaciones obtenidas para cada estación pluviométrica según su periodo de retorno se detallan en la Tabla 5-2:

Tabla 5-2: Resultados análisis de frecuencia para cada estación (Fuente: Elaboración propia).

Estación	Distribución Seleccionada	Periodo de Retorno [años]			
		10	100	1.000	10.000
Barrera Loncha	Gumbel	108	164	218	273
Villa Alhué		123	190	256	321
Rapel		108	159	209	260

Para la obtención de la Tabla 5-2, se busca la distribución que proyecte de mejor forma la serie de precipitaciones diarias máximas anuales otorgada por la DGA y se verifica que no se rechacen los test de bondad χ^2 y Kolmogorov-Smirnov. En la Tabla 5-2 se indica que la distribución seleccionada por análisis gráfico para las tres estaciones, es Gumbel y es importante destacar que para todas las

distribuciones y estaciones no se rechazaron las hipótesis de ninguno de los dos test de bondad de ajuste.

El análisis de frecuencia con la distribución Gumbel para las diferentes estaciones se presenta en el ANEXO B.

El gradiente de precipitaciones realizado con las precipitaciones en cada estación para los 10 años de periodo de retorno mostrados en la Tabla 5-2, se genera siguiendo el comportamiento de la expresión lineal que la describe, la cual se presenta en la Figura 5-3:

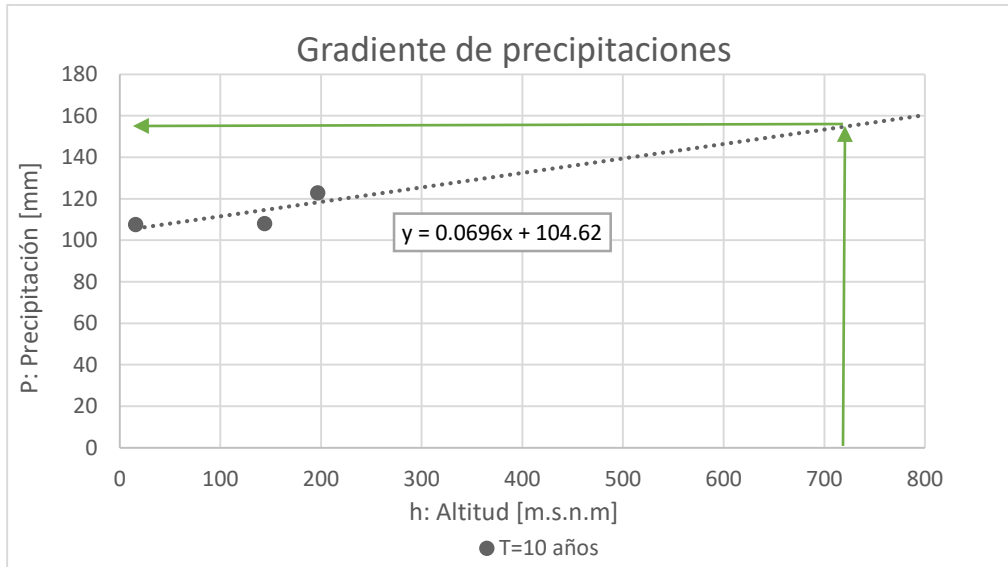


Figura 5-3: Gradiente pluviométrico y ecuación de la línea de tendencia (Fuente: Elaboración propia).

Con la expresión lineal de gradiente entregada en la Figura 5-3, se estiman las precipitaciones diarias máximas para la cota media de la cuenca (720 m.s.n.m) y periodo de retorno de 10 años correspondiente a 155[mm]. Con esto, se obtiene el factor amplificador desde las precipitaciones de la estación base Barrera Loncha a las precipitaciones en la cota media de la cuenca. Este factor se calcula mediante el siguiente cociente:

$$f = \frac{P_{\text{cota media cuenca}}}{P_{\text{estación base}}}$$

Se utilizará el factor amplificador 1,43 para aumentar las precipitaciones asociadas a los otros periodos de retorno y la PMP desde la estación base Barrera Loncha en los datos de la línea base.

Tabla 5-3: Precipitaciones representativas de la cuenca aportante al depósito de relaves en mm (Fuente: Elaboración propia).

Cota	P(T=10)	P(T=100)	P(T=1.000)	P(T=10.000)
720	155	234	312	390

Para estimar la precipitación máxima probable se tiene en cuenta la Ecuación (3-3) en el acápite 3.1.1, con sus diferentes coeficientes de frecuencia máximos (K_M) y formas para estimar la precipitación máxima probable según si la estación es cordillerana o no. En la Tabla 5-4 se presentan las variables para estimar la PMP y sus valores:

Tabla 5-4: Variables que intervienen en el cálculo de la Precipitación Máxima Probable y sus valores dependiendo del método (Fuente: Elaboración propia).

Parámetro	Barrera Loncha
P_n [mm]	68
σ_n [mm]	26
P_{n-1} [mm]	66
σ_{n-1} [mm]	25
P_c [mm]	69
σ_c [mm]	29
K_M	17
K_M Stowhas	11
PMP_H [mm]	552
PMP_S [mm]	391
$PMP_{S\ no\ cord}$ [mm]	352

Tal como propone Ludwig Stowhas en el VI Congreso SOCHID (1983), los valores para el coeficiente de frecuencia propuestos por Herschfield (Stöwhas Borghetti, 2016) estiman una PMP muy por sobre las definidas por Stowhas (PMP_S y $PMP_{S\ no\ cord}$ en la Tabla 5-4), por lo tanto, sólo se analizarán estas últimas.

Para un cálculo conservador, se elegirá la máxima PMP en la estación Barrera Loncha calculada según las ecuaciones de Stowhas (2016). Se proyecta la PMP escogida hacia la cota media de la cuenca, según el factor amplificador 1,43 estimando una PMP=559 mm, correspondiente a la cuenca aportante al depósito de relaves Carén.

5.1.3 Proyección Precipitaciones futuras considerando Cambio Climático

Como se menciona en el Acápite 0, se utilizan dos modelos de proyección de cambio climático, ESM2G y ESM2M para estimar las precipitaciones sobre cada estación DGA. Para determinar cuál modelo se acerca más a las precipitaciones medidas por la DGA, se realiza un análisis gráfico de los datos y se calcula su RMSE.

Las series de precipitaciones diarias máximas anuales de ambos modelos de proyección de cambio climático se obtienen desde la página web del NCCS (Centro de la NASA para Simulaciones Climáticas por sus siglas en inglés) y se presentan en el ANEXO C.

La muestra de datos es de 27 años, considerando desde el año que se tiene información de la DGA de las estaciones (1979) hasta el 2005 donde se acaba la muestra de línea base de ambos modelos.

Se debe tener en cuenta que la resolución de los modelos es de cuadrículas de 25 [km] horizontal y verticalmente sobre el planeta Tierra, por lo que no alcanzan a notar la diferencia de precipitaciones entre las estaciones Barrera Loncha y Villa Alhué, las cuales se encuentran a una distancia de 10 [km] aproximadamente en línea recta.

A pesar de lo anterior, se analiza la cercanía de los valores de precipitación entre los modelos y cada estación.

5.1.3.1 Barrera Loncha

Como se muestra en la Figura 5-4, en esta estación los datos de la proyección ESM2G son los más cercanos a los datos reales obtenidos de la DGA, tanto para bajas precipitaciones, como para las de mayor valor. Se comprueba lo anterior con la pendiente de la línea de tendencia de este modelo que se encuentra también más cercana a la línea gris representativa de 45°.

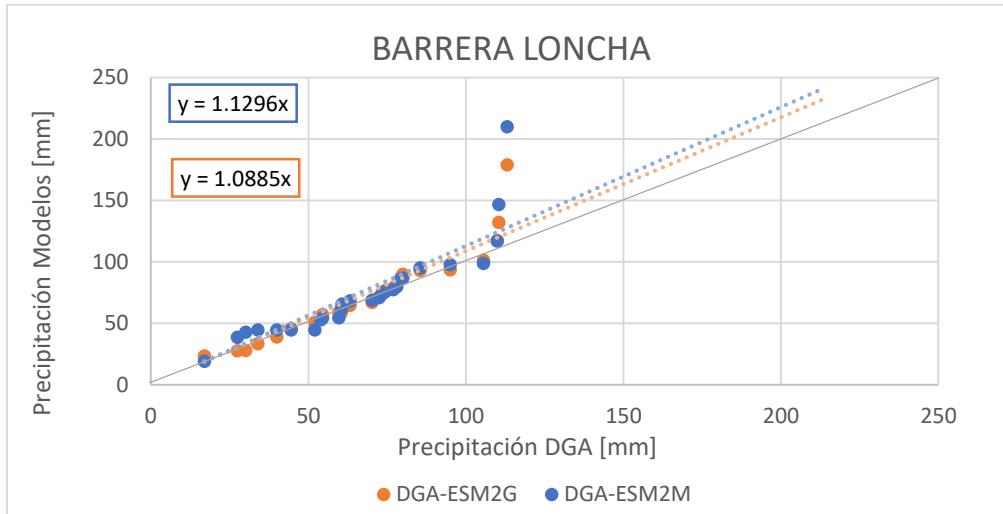


Figura 5-4: Comparación de precipitaciones de la DGA y modelos ESM2G y ESM2M (Fuente: Elaboración propia).

Otra forma de determinar cuál modelo presenta las precipitaciones más representativas de la estación, es calculando el factor RMSE:

Tabla 5-5: Valores RMSE de precipitaciones de los modelos ESM2G y ESM2M en estación Barrera Loncha (Fuente: Elaboración propia).

ESM2G	ESM2M
45,4	49,2

Como el análisis de tipo gráfico y de RMSE coinciden, el modelo que más se acerca a las precipitaciones reales obtenidas en la estación Barrera Loncha de la DGA, es ESM2G.

5.1.3.2 Villa Alhué

Como se muestra en la Figura 5-5, las líneas de tendencias de ambas proyecciones son cercanas a los datos de la DGA, sin embargo, la proyección ESM2M posee la pendiente de su línea de tendencia más cercana a uno (1). Sin embargo, el modelo ESM2G presenta mayor cercanía con las altas precipitaciones de la DGA.

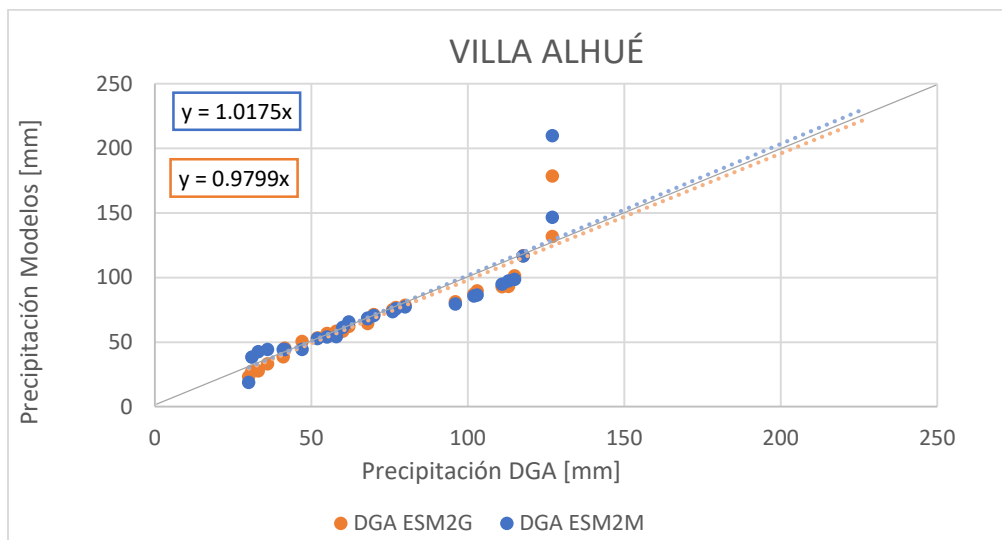


Figura 5-5: Comparación de precipitaciones de la DGA y modelos ESM2G y ESM2M (Fuente: Elaboración propia).

El factor RMSE de las precipitaciones de la DGA y ambos modelos para la estación Villa Alhué son:

Tabla 5-6: Valores RMSE de precipitaciones de los modelos ESM2G y ESM2M en estación Villa Alhué (Fuente: Elaboración propia).

ESM2G	ESM2M
50,9	49,2

Pese a que el análisis RMSE plantea que el modelo con menor error es el ESM2M, se prioriza el análisis gráfico, por lo tanto, el modelo que más se acerca a las precipitaciones reales obtenidas en la estación Villa Alhué de la DGA, es ESM2G.

5.1.3.3 Rapel

Como se muestra en la Figura 5-6 en la estación Rapel, la proyección ESM2G presenta su línea de tendencia más cercana a la línea gris representativa de 45°. Sin embargo, para las altas precipitaciones los valores tienden a diferir en mayor medida de los medidos por la DGA.

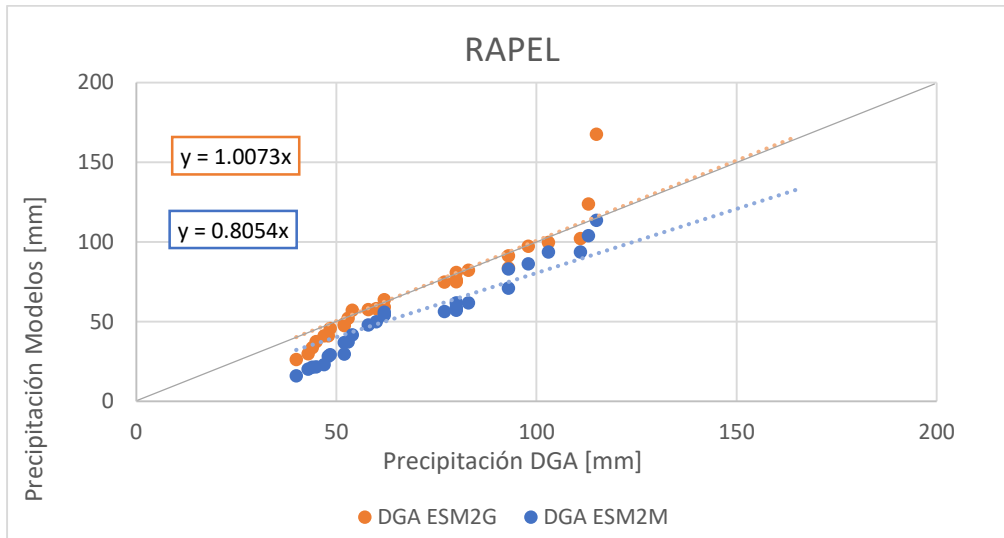


Figura 5-6: Comparación de precipitaciones de la DGA y modelos ESM2G y ESM2M
(Fuente: Elaboración propia).

El factor RMSE de las precipitaciones de la DGA y ambos modelos para la estación Rapel son:

Tabla 5-7: Valores RMSE de precipitaciones de los modelos ESM2G y ESM2M en estación Rapel
(Fuente: Elaboración propia).

ESM2G	ESM2M
40,4	37,3

El análisis de tipo gráfico y de RMSE coinciden, en que el modelo que más se acerca a las precipitaciones reales obtenidas en la estación Rapel de la DGA es ESM2M.

5.1.3.4 Corrección de Modelos Hidrológicos

El modelo que más se acerca a las precipitaciones reales obtenidas en las estaciones Barrera Loncha y Villa Alhué de la DGA es ESM2G. Como estas estaciones son las más cercanas al depósito, se escoge este modelo para proyectar las precipitaciones en el área aportante del depósito Carén. Luego, mediante las proyecciones del modelo ESM2G de la línea base y su comparación con las precipitaciones de la DGA en cada estación, se calculan factores de corrección, para poder corregir el modelo y ajustarlo a las precipitaciones reales de cada estación. Estos factores de corrección se calculan de la siguiente forma para cada periodo de retorno en la estación DGA:

$$f^T = \frac{P_{DGA}^T}{P_{Modelo}^T}$$

Así, si la proyección de las precipitaciones del modelo en la línea base (1979-2005) son mayores a las medidas por la DGA en esa estación, el factor aplicable a las proyecciones será de reducción para acercarlas a las precipitaciones medidas. En caso contrario, el factor será amplificador.

En el caso de la Estación Barrera Loncha, a continuación, en la Figura 5-7 se representan las precipitaciones según cada periodo de retorno y ambos modelos de proyección de cambio climático:

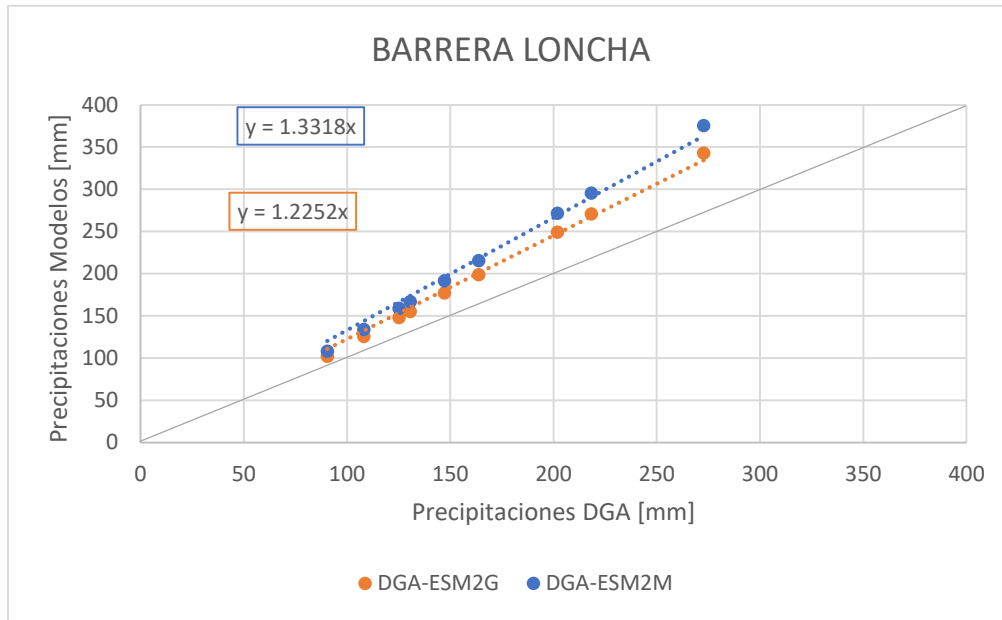


Figura 5-7: Comparación de las precipitaciones del análisis de frecuencia en la estación Barrera Loncha de cada modelo con las precipitaciones del análisis de frecuencia de la DGA (Fuente: Elaboración propia).

Se observa que las precipitaciones en esta estación de ambas proyecciones son mayores a las observadas por la DGA, por lo tanto, el factor que se aplicará a las precipitaciones futuras será para reducirlas.

Para la estación Villa Alhué, se obtienen las precipitaciones según cada periodo de retorno de ambos modelos y se comparan con las observadas por la DGA según la Figura 5-8:

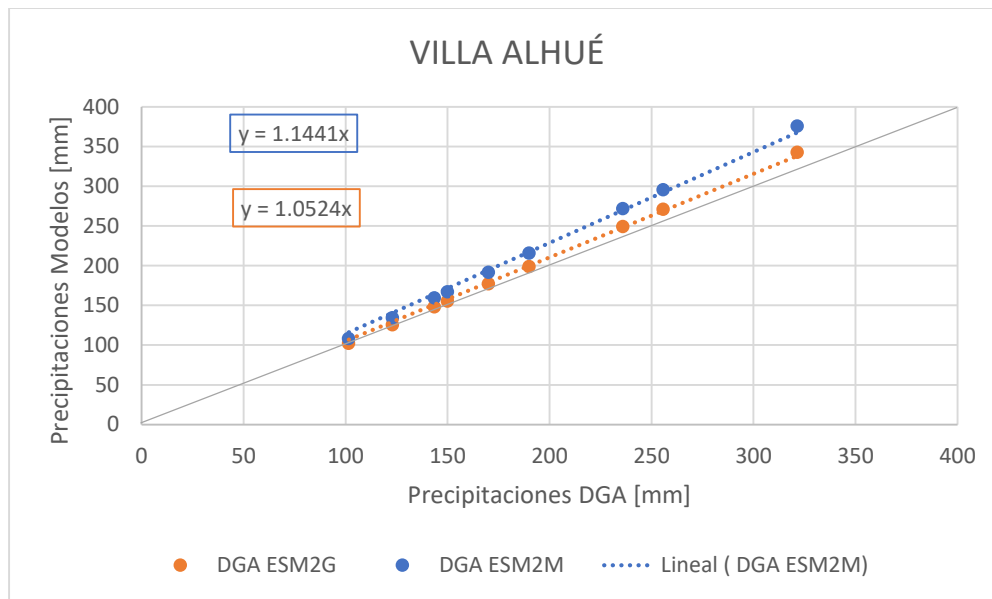


Figura 5-8: Comparación de las precipitaciones del análisis de frecuencia en la estación Villa Alhué de cada modelo con las precipitaciones del análisis de frecuencia de la DGA (Fuente: Elaboración propia).

Se observa que las precipitaciones en esta estación de ambas proyecciones, al igual que en la estación Barrera Loncha, son mayores a las observadas por la DGA, entonces el factor será de reducción.

En la estación Rapel se tienen las siguientes Precipitaciones de los modelos:

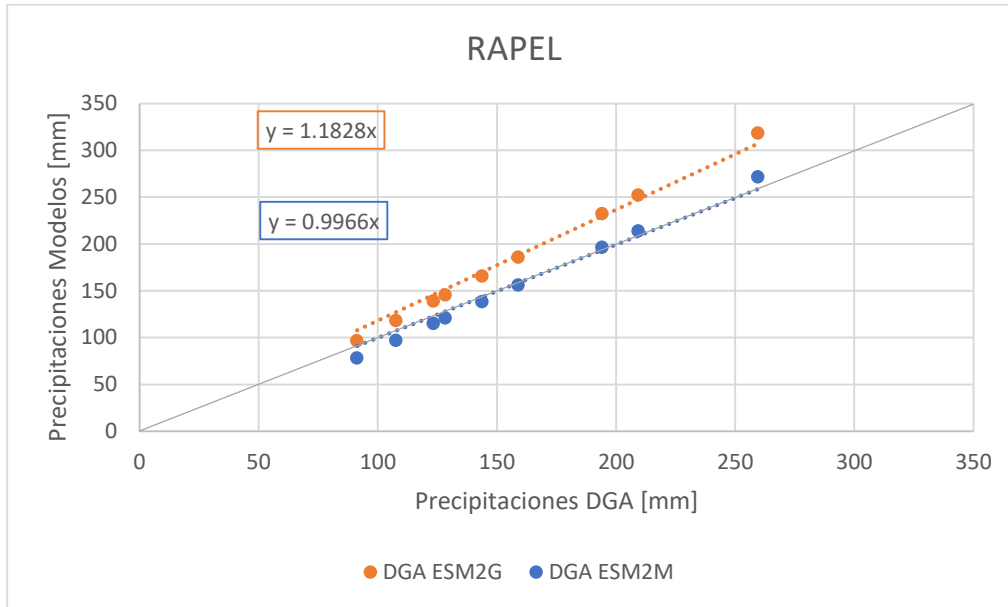


Figura 5-9: Comparación de las precipitaciones del análisis de frecuencia en la estación Rapel de cada modelo con las precipitaciones del análisis de frecuencia de la DGA (Fuente: Elaboración propia).

En la Figura 5-9 anterior, se observa que las precipitaciones de la proyección ESM2G son mayores que las obtenidas por la DGA, en cambio algunas de las precipitaciones de la proyección ESM2M de bajos periodos de retorno, están por debajo de las precipitaciones de la DGA. El factor para las precipitaciones futuras de la proyección ESM2G será de reducción.

Según las precipitaciones mostradas en la Figura 5-7, Figura 5-8 y Figura 5-9 para el Modelo ESM2G se calculan los siguientes factores de reducción:

Tabla 5-8: Factores de reducción aplicables a las precipitaciones futuras de la proyección ESM2G (Fuente: Elaboración propia).

Periodo de Retorno	10	100	1.000	10.000
BARRERA LONCHA	0,861	0,823	0,806	0,796
VILLA ALHUÉ	0,979	0,955	0,944	0,937
RAPEL	0,910	0,855	0,829	0,814

Con los factores de reducción de la Tabla 5-8, se podrán reducir las Precipitaciones Futuras de cada estación según cada periodo de retorno.

Se debe agregar que sólo para los datos de precipitación de la estación Rapel, la distribución Gumbel y la proyección ESM2M, se rechazó el test de bondad de Kolmogorov-Smirnov, sin embargo, esta proyección no es la seleccionada para representar la cuenca aportante al depósito de relaves Carén.

En el caso de la PMP, se presentan el detalle del cálculo para la estación base Barrera Loncha:

Tabla 5-9: Variables que intervienen en el cálculo de la Precipitación Máxima Probable de la proyección ESM2G y sus valores dependiendo del método (Fuente: Elaboración propia).

Parámetro	Barrera Loncha
P_n [mm]	72
σ_n [mm]	34
P_{n-1} [mm]	68
σ_{n-1} [mm]	27
P_c [mm]	71
σ_c [mm]	32
K_M	16
K_M Stowhas	11
PMP_H [mm]	602
PMP_S [mm]	427
$PMP_{S\ no\ cord}$ [mm]	361

Se debe recordar que las precipitaciones de la Proyección ESM2G para las estaciones Barrera Loncha y Villa Alhué en la línea base son los mismos.

Se toma la mayor PMP según Stowhas (PMP_S y $PMP_{S\ no\ cord}$ en la Tabla 5-9) de la estación base Barrera Loncha, y se lleva a la cota media de la cuenca mediante el factor amplificador planteado por el gradiente de precipitaciones 1,43. Sin embargo, teniendo en cuenta la PMP del modelo ESM2G llevada a la cota media de la cuenca de 610 mm, y la PMP de los datos de la DGA también en la cota media de 559 mm, se debe aplicar un factor reductor para la PMP futura proyectada. El factor reductor para la PMP calculado es de 0,92.

Lo anterior ocurre debido a que, para el análisis de frecuencia sólo se utilizan factores de reducción por las precipitaciones mayores de los modelos para cada periodo de retorno.

5.1.3.5 Precipitaciones Futuras

De acuerdo a lo indicado en el acápite 2.5, se realiza el análisis de frecuencia de los modelos de proyección de precipitaciones de RCP4.5 y RCP8.5 para cada estación (ver ANEXO F), y se obtienen las precipitaciones corregidas por los factores de reducción de la Tabla 5-8:

Tabla 5-10: Precipitaciones en mm para las tres estaciones con RCP4.5 y RCP 8.5 estimadas por el análisis de frecuencia (Fuente: Elaboración propia).

RCP	Estación	Distribución Seleccionada	Periodo de Retorno [años]			
			10	100	1.000	10.000
4.5	Barrera Loncha	Gumbel	101	157	212	267
	Villa Alhué		115	182	249	315
	Rapel		91	137	181	226
8.5	Barrera Loncha	Gumbel	112	179	244	308
	Villa Alhué		128	207	285	363
	Rapel		94	148	200	252

En la Tabla 5-10 se indica que la distribución seleccionada para las tres estaciones, al igual que en el análisis de frecuencia de las precipitaciones de la línea base, es Gumbel. El criterio para la elección de la distribución fue análisis gráfico de las precipitaciones de los periodos de retorno de cada estación. Es importante destacar que para todas las distribuciones y estaciones no se rechazaron las hipótesis de ninguno de los dos test de bondad de ajuste.

El gradiente de precipitaciones realizado con las precipitaciones en cada estación para los 10 años de periodo de retorno mostrado en la Tabla 5-10, se genera siguiendo el comportamiento de la expresión lineal que la describe, la cual se presenta en la Figura 5-10 para RCP4.5:

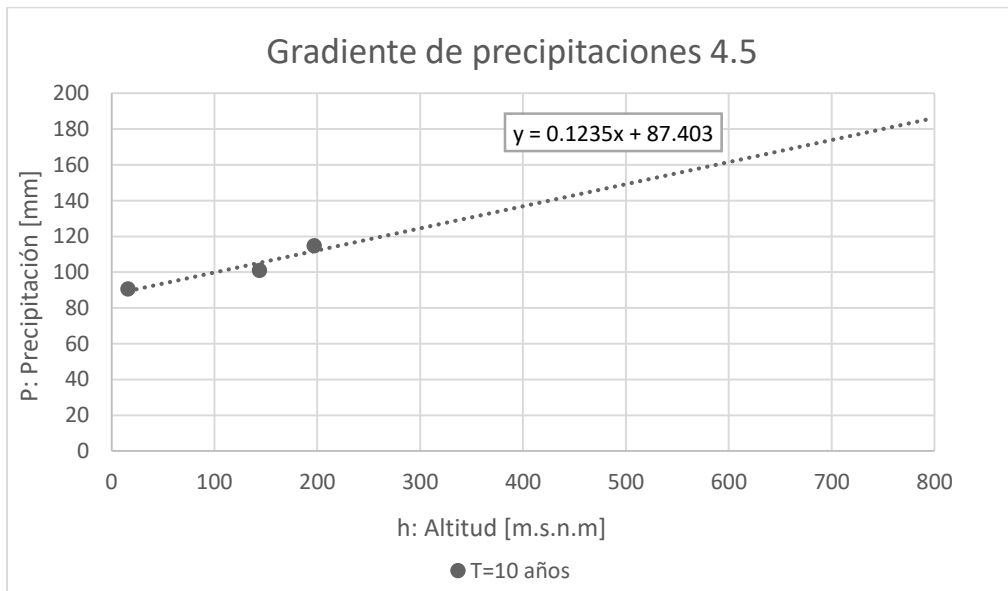


Figura 5-10: Gradiente pluviométrico para T=10 años y ecuación de la línea de tendencia para RCP 4.5 (Fuente: Elaboración propia).

Y en la Figura 5-11 para RCP8.5:

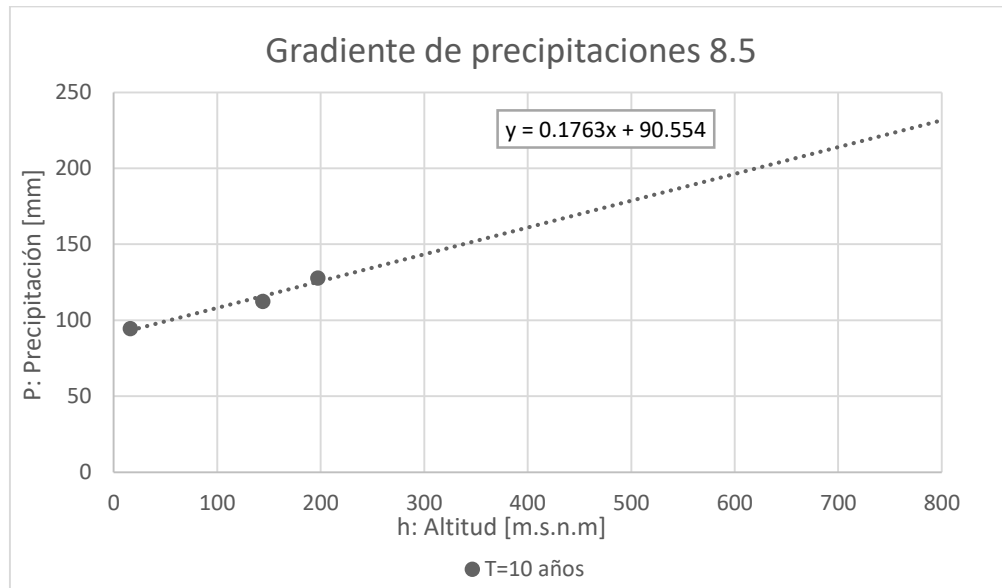


Figura 5-11: Gradiente pluviométrico para T=10 años y ecuación de la línea de tendencia para RCP 8.5 (Fuente: Elaboración propia).

Con las expresiones lineales de gradientes entregadas en la Figura 5-10 y Figura 5-11, se estiman las precipitaciones diarias máximas para la cota media de la cuenca y periodo de retorno 10 años. Se calculan los factores amplificadores de 1,75 para RCP 4.5 y de 1,94 para RCP 8.5 y se estiman las siguientes precipitaciones en la cota media de la cuenca para los otros periodos de retorno:

Tabla 5-11: Precipitaciones representativas de la cuenca aportante al depósito de relaves para cada RCP en mm (Fuente: Elaboración propia).

RCP	Cota	P(T=10)	P(T=100)	P(T=1.000)	P(T=10.000)
4.5	720	176	275	371	467
8.5		217	346	472	597

Como se menciona en el Acápite 5.1.3, la resolución del modelo no alcanza a diferenciar las estaciones Barrera Loncha y Villa Alhué (ver el ANEXO E), por lo tanto, sus precipitaciones serán idénticas. Se presentan las PMP de la estación Barrera Loncha para ambas RCPs corregidas por el factor reductor del Acápite 5.1.3.4:

Tabla 5-12: Precipitación Máxima Probable futura dependiendo del método y RCP (Fuente: Elaboración propia).

RCP	4.5	8.5
Parámetro	BARRERA LONCHA	
PMP_H [mm]	659	717
PMP_S [mm]	462	506
PMP_{S no cord.} [mm]	327	339

Tal como se menciona en el Acápite 5.1.2, para un cálculo conservador se elegirán las máximas PMP para cada escenario, calculadas según las ecuaciones de Stowhas (2016). Se llevan estas precipitaciones a la cota media de la cuenca, según los factores planteados por los gradientes de precipitaciones.

Para RCP4.5 se tendrá una PMP de 806 [mm] y para RCP8.5 se tendrá una PMP de 979 [mm].

5.1.4 Comparación de situación actual y futura.

En la Tabla 5-13 y Tabla 5-14 se presentan las precipitaciones para las estaciones de la DGA y para la cota media de la cuenca respectivamente, presentando los datos de la línea base y escenarios de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5

Tabla 5-13: Precipitaciones (mm) de la línea base y de las proyecciones futuras, para cada estación de la DGA (Fuente: Elaboración propia).

T Años	BARRERA LONCHA			VILLA ALHUE			RAPEL		
	Línea Base	RCP 4.5	RCP 8.5	Línea Base	RCP 4.5	RCP 8.5	Línea Base	RCP 4.5	RCP 8.5
10	108	101	112	123	115	128	108	91	94
100	164	157	179	190	182	207	159	137	148
1.000	218	212	244	256	249	285	209	181	200
10.000	273	267	308	321	315	363	260	226	252
PMP	391	504	553	465	504	553	366	410	459

Tabla 5-14: Precipitaciones (mm) de la línea base y las proyectadas a futuro, para la cota media de la cuenca (Fuente: Elaboración propia).

T Años	COTA MEDIA CUENCA		
	Línea Base	RCP 4.5	RCP 8.5
10	155	176	217
100	234	275	346
1.000	312	371	472
10.000	390	467	597
PMP	559	806	979

5.2 Cuenca Salar de Michincha.

El depósito de relaves Pampa Pabellón se encuentra en la comuna de Pica dentro de la Región de Tarapacá, al Sur Este de la ciudad de Iquique, en el Altiplano chileno cercano al límite con Bolivia a los 20,94°LS, como se muestra en la Figura 5-12.

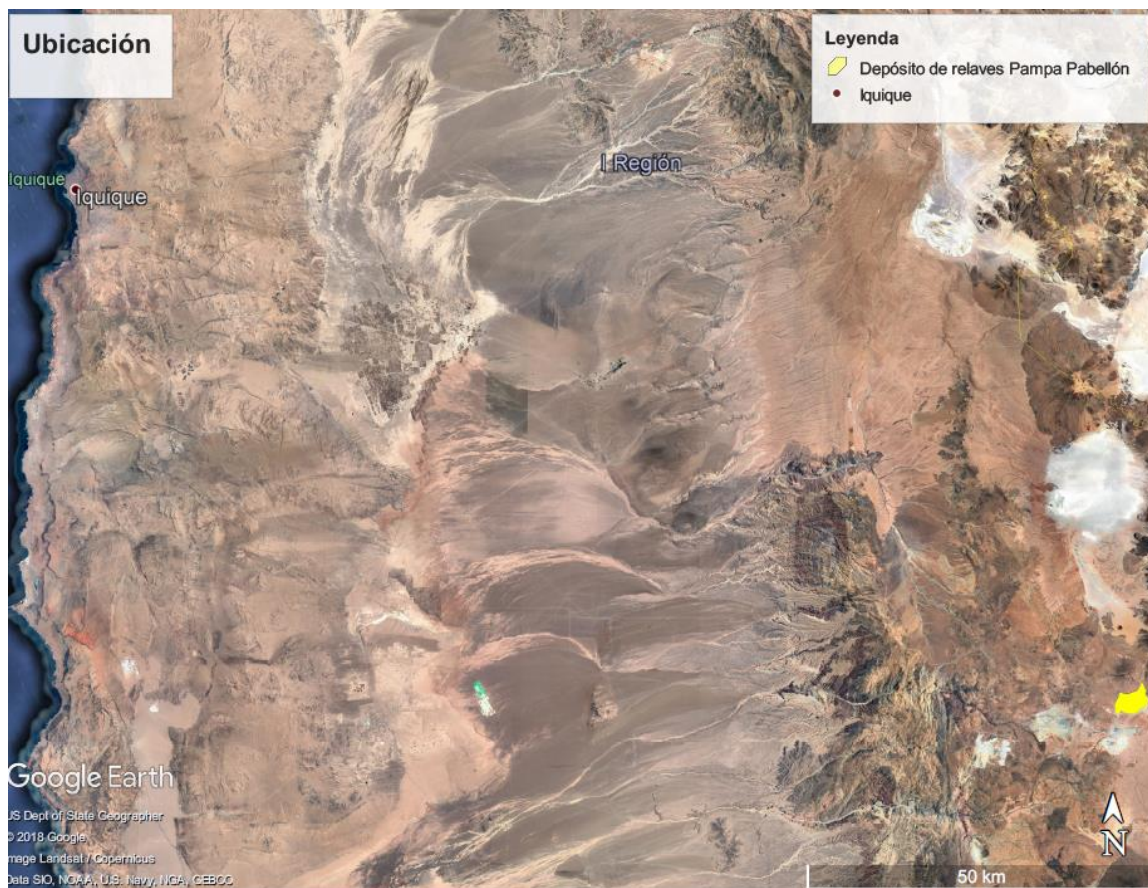


Figura 5-12: Ubicación Depósito de Relaves Pampa Pabellón (Fuente: Elaboración propia).

El clima de la zona es desértico con escurrimiento importante en verano entre los meses de diciembre a marzo, debido al invierno altiplánico.

5.2.1 Área Pluvial Aportante

En la Figura 5-13 se presenta el área de la cuenca aportante al depósito de relaves (en naranja) que corresponde aproximadamente a 87 [km²] de los cuales 13,7 [km²] pertenecen al depósito de relaves (en amarillo).

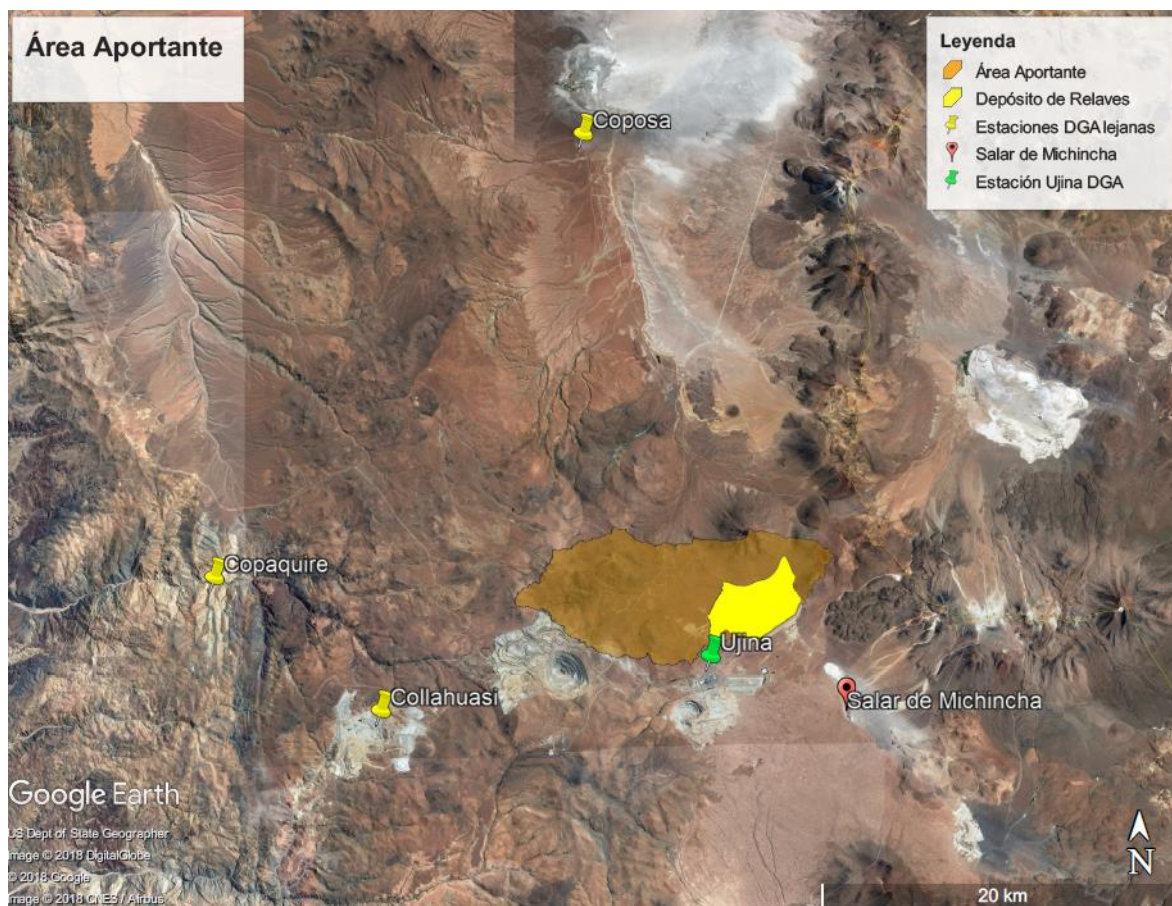


Figura 5-13: Ubicación del área pluvial aportante al depósito de relaves y estaciones meteorológicas de la DGA para el análisis de frecuencia (Fuente: Elaboración propia).

En la DIA del proyecto “Continuidad Relaves Convencionales, Depósito Pampa Pabellón” (AMEC, 2014), se analiza la línea de nieves correspondiente a esta zona. En este estudio, se basan en el informe DICTUC (Actualización de Estudio Hidrológico Cuencas de Coposa y Michincha, 2010) el cual analiza la temperatura media del mes más frío durante el invierno altiplánico, estimándolo en 6,9°C a la cota de 4.179 [m.s.n.m] en la estación meteorológica Pampa Ujina. Además, plantean un gradiente térmico de -0,58°C por cada 100 [m] de altura. Tomando en cuenta lo anterior, AMEC determina que la cota de la isoterma cero durante un evento de precipitación extremo sea igual a 4.782 [m.s.n.m].

Teniendo en cuenta esta elevación de la línea de nieves y que la máxima cota de la cuenca es de 5.104 [m.s.n.m], el área aportante nival corresponde al 1,65% del área aportante total. Por lo tanto, de forma conservadora se estima que el régimen hidrológico de la cuenca se considerará de tipo pluvial con escurrimiento importante en los meses de verano.

5.2.2 Distribución espacial y temporal de precipitación DGA

Debido a que geográficamente el depósito de relaves se encuentra en el altiplano, las precipitaciones son de tipo convectivas y abarcan terrenos limitados. Es por esto, que se analiza la estación Ujina perteneciente a la DGA mostrada en la Figura 5-13 (en verde), distanciada a sólo a 2 [km] aproximadamente del depósito.

Se extraen las series de precipitaciones diarias máximas anuales desde la página web de la DGA (Información Oficial Hidrometeorológica y de Calidad de Aguas en Línea, 2018) y se presentan en el ANEXO A.

Esta estación posee información de precipitaciones máximas anuales desde el año 1974 al año 2017, pero posee periodos sin datos de precipitaciones. Es por esto, que se buscan más estaciones cercanas al depósito que se correlacionen de buena forma con la estación Ujina y sirvan para el relleno de la muestra de sus precipitaciones. Se localizan las estaciones de la Figura 5-13 (en amarillo) Collahuasi, Copaquire y Coposa. La primera se encuentra suspendida desde el 2006 y a pesar de ser la única que pertenece a la misma subcuenca de la estación Ujina “Salar de Michincha”, posee el mismo periodo sin datos de precipitaciones. La estación Coposa pertenece a la subcuenca “Pampa del Tamarugal” y la estación Copaquire a la subcuenca “Quebrada de Chacarilla” y tampoco poseen datos de precipitaciones en este periodo.

Debido a lo anterior, se buscan las estaciones más próximas al depósito de relaves pertenecientes a Bolivia (Colcha K, Calcha de Lipez y Salinas de GM) que puedan servir para el relleno de las precipitaciones de la estación Ujina, pero como se muestra en el ANEXO A poseen mala correlación con los datos de esta estación.

Habiendo analizado entonces las estaciones meteorológicas más cercanas al depósito, tanto chilenas como bolivianas, se procede al análisis de frecuencia presentada en el ANEXO B y a la estimación de la PMP de la estación Ujina.

Se realiza el análisis de frecuencia mediante distintas distribuciones de probabilidad (Normal, Log Normal, Gumbel, Pearson, Log Pearson). Para lo anterior, se considera una estadística de precipitaciones de 25 años dentro del periodo 1974 al 2005, los periodos de retorno para alcantarillas de 100 años como se menciona en la Tabla 3-2 y periodos de 1.000 y 10.000 años asociados a este tipo de obras de gran magnitud y relevancia presentadas en la Tabla 3-1.

Las precipitaciones en mm obtenidas para la estación Ujina según cada periodo de retorno se detallan en la Tabla 5-15:

Tabla 5-15: Resultados análisis de frecuencia para la estación Ujina de la DGA
(Fuente: Elaboración propia).

Estación	Distribución Seleccionada	Periodo de Retorno [años]			
		10	100	1.000	10.000
Ujina	Gumbel	47	77	107	136

Es importante destacar que para todas las distribuciones no se rechazaron las hipótesis de ninguno de los dos test de bondad de ajuste.

En la Tabla 5-16 se presentan las variables para estimar la PMP y sus valores:

Tabla 5-16: Variables que intervienen en el cálculo de la Precipitación Máxima Probable y sus valores dependiendo del método (Fuente: Elaboración propia).

Parámetro	UJINA
P_n [mm]	25
σ_n [mm]	14
P_{n-1} [mm]	24
σ_{n-1} [mm]	12
P_c [mm]	25
σ_c [mm]	15
K_M	19
K_M Stowhas	11
PMP_H [mm]	297
PMP_S [mm]	185
$PMP_{S\ cord}$ [mm]	173

Para un cálculo conservador se elegirá la máxima PMP calculada según las ecuaciones de Stowhas (2016) de 185[mm].

5.2.3 Proyección Precipitaciones futuras considerando Cambio Climático

Como se muestra en la Figura 5-14, en esta estación los modelos se alejan de las precipitaciones reales, pero los datos de la proyección ESM2G son en su mayoría, ligeramente mayores que los de la proyección ESM2M.

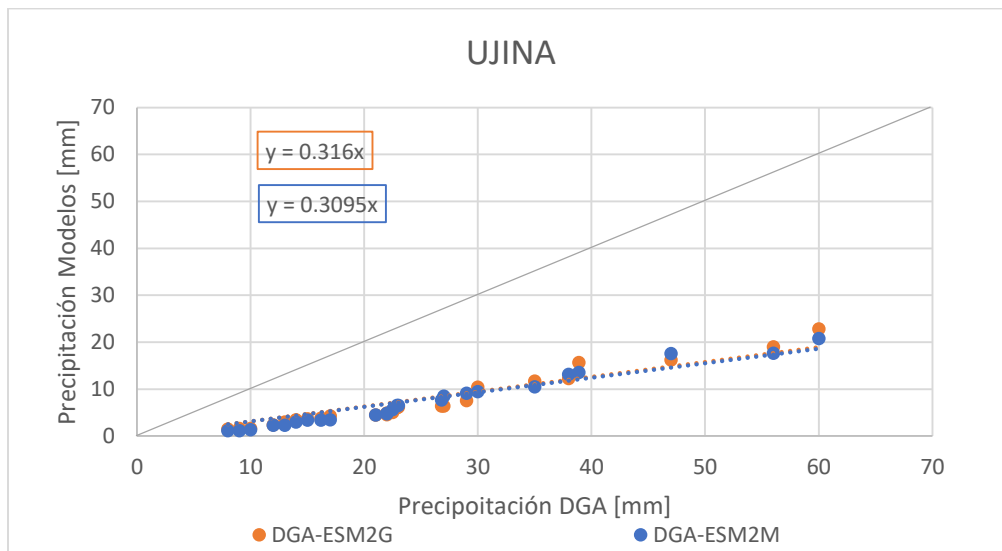


Figura 5-14: Comparación de precipitaciones de la DGA y modelos ESM2G y ESM2M (Fuente: Elaboración propia).

Otra forma de determinar cuál modelo presenta las precipitaciones más representativas de la estación, es calculando el factor RMSE:

Tabla 5-17: Valores RMSE de precipitaciones de los modelos ESM2G y ESM2M en estación Ujina (Fuente: Elaboración propia).

ESM2G	ESM2M
20,6	21,2

A pesar de la amplia diferencia entre los valores medios de precipitación entre los proyectados y los observados por la DGA, la proyección que más se acerca a las precipitaciones reales obtenidas en la estación Ujina de la DGA es ESM2G.

5.2.3.1 Corrección de Modelos Hidrológicos

Mediante las proyecciones del modelo ESM2G de la línea base y su comparación con las precipitaciones de la DGA en la estación Ujina, se calculan factores de corrección para poder corregir el modelo y ajustarlo a las precipitaciones reales medidas por la DGA. Estos factores de corrección se calculan de la siguiente forma para cada periodo de retorno en la estación Ujina:

$$f^T = \frac{P_{DGA}^T}{P_{Modelo}^T}$$

Así, si la proyección de las precipitaciones del modelo en la línea base (1974-2005) son menores a las medidas por la DGA en esta estación, el factor aplicable a las proyecciones será amplificador para acercarlas a las precipitaciones medidas. En caso contrario, el factor será reductor.

En la Figura 5-15 se representan las precipitaciones en la estación Ujina, según cada periodo de retorno y ambos modelos de proyección de cambio climático:

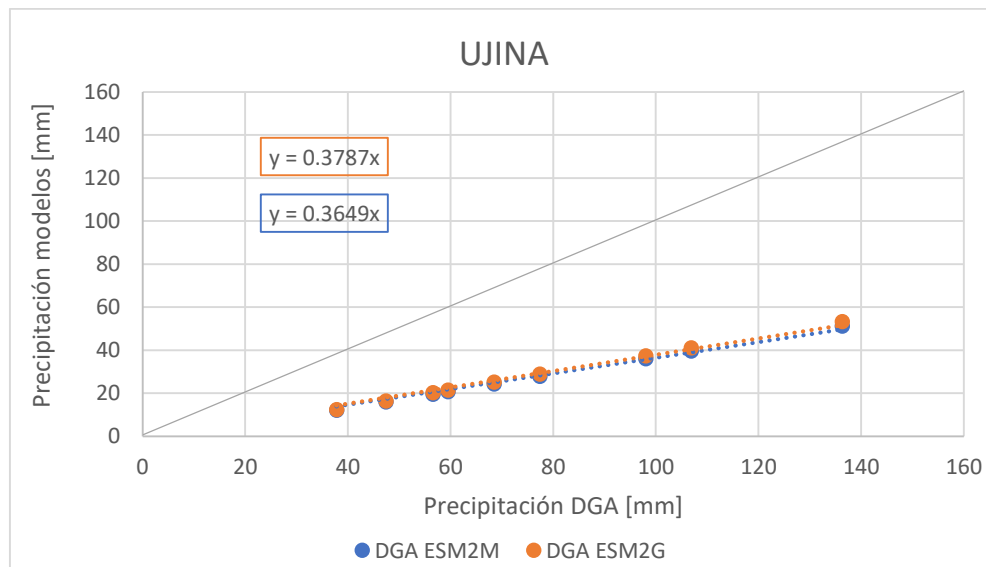


Figura 5-15: Comparación de las precipitaciones del análisis de frecuencia en la estación Ujina de cada modelo con las precipitaciones del análisis de frecuencia de la DGA (Fuente: Elaboración propia).

Se observa que las precipitaciones de ambos modelos en esta estación son ampliamente menores a las observadas por la DGA, por lo tanto, el factor que se aplicará a las precipitaciones futuras será para amplificarlas.

Como el Modelo ESM2G es el que se utilizará para obtener las precipitaciones futuras en la estación Ujina, se calculan los siguientes factores de amplificación para este modelo:

Tabla 5-18: Factores de amplificación aplicables a las precipitaciones futuras de la proyección ESM2G (Fuente: Elaboración propia).

Periodo de Retorno	10	100	1.000	10.000
UJINA	2.877	2.676	2.597	2.555

Con los factores de la Tabla 5-18, se podrán amplificar las Precipitaciones Futuras de la estación Ujina según cada periodo de retorno.

En el caso de la PMP, se presenta el detalle del cálculo:

Tabla 5-19: Variables que intervienen en el cálculo de la Precipitación Máxima Probable de la proyección ESM2G y sus valores dependiendo del método (Fuente: Elaboración propia).

Parámetro	Ujina
P_n [mm]	7
σ_n [mm]	6
P_{n-1} [mm]	7
σ_{n-1} [mm]	5
P_c [mm]	7
σ_c [mm]	6
K_M	20
K_M Stowhas	11
PMP_H [mm]	122
PMP_S [mm]	72
$PMP_{S\ cord}$ [mm]	53

Se toma la mayor PMP según lo propuesto por Stowhas (PMP_S y $PMP_{S\ cord}$ en la Tabla 5-19) para representar la cuenca aportante, obteniéndose 72 [mm] y teniendo en cuenta la PMP según los datos de la DGA en esta misma estación de 185 [mm], se debe aplicar un factor amplificador a la PMP de la proyección ESM2G. El factor amplificador para a PMP calculado es de 2,59.

Lo anterior, ocurre debido a que las precipitaciones en la estación según ambos modelos (como se muestra en la Figura 5-15) se muestran ampliamente menores que las observadas por la DGA.

5.2.3.2 Precipitaciones Futuras

Se realiza el análisis de frecuencia de los modelos de proyección de precipitaciones de RCP4.5 y RCP8.5 para la estación Ujina, y se obtienen las precipitaciones corregidas por los factores de amplificación de la Tabla 5-18:

Tabla 5-20: Precipitaciones en mm para la estación Ujina con RCP4.5 y RCP 8.5 estimadas por el análisis de frecuencia (Fuente: Elaboración propia).

RCP	Estación	Distribución Seleccionada	Periodo de Retorno [años]			
			10	100	1.000	10.000
4.5	Ujina	Gumbel	39	59	78	98
8.5			45	69	92	116

En la Tabla 5-20, se indica que la distribución seleccionada para la estación Ujina, al igual que en el análisis de frecuencia de las precipitaciones de la línea base, es Gumbel. Es importante destacar que para todas las distribuciones y estaciones no se rechazaron las hipótesis de ninguno de los dos test de bondad de ajuste.

El análisis de frecuencia con la distribución Gumbel para la estación Ujina se adjunta en el ANEXO E.

A continuación, se presentan las PMP de la Estación Ujina para ambas RCPs corregidas por los factores de amplificación del Acápite 5.2.3.1:

Tabla 5-21: Precipitación Máxima Probable futura dependiendo del método y RCP (Fuente: Elaboración propia).

Estación	UJINA	
	4.5	8.5
PMP_H [mm]	272	324
PMP_S [mm]	163	194
PMP_{S cord} [mm]	169	189

Tal como se menciona en el Acápite 5.1.2, para un cálculo conservador se elegirán las máximas PMP para cada estación calculadas según las ecuaciones de Stowhas (2016):

Tabla 5-22: Precipitación Máxima Probable para cada estación de la cuenca aportante al depósito de relaves (Fuente: Elaboración propia).

Parámetro	RCP	Ujina
PMP [mm]	4.5	169
	8.5	194

5.2.4 Comparación de situación actual y futura.

En la Tabla 5-13 y Tabla 5-14 se presentan las precipitaciones para las estaciones de la DGA y para la cota media de la cuenca respectivamente, presentando los datos de la línea base y escenarios de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5

Tabla 5-23: Precipitaciones de la línea base y de las proyecciones futuras, para cada estación de la DGA (Fuente: Elaboración propia).

T	UJINA		
Años	Línea Base	RCP 4.5	RCP 8.5
10	47	39	45
100	77	59	69
1.000	107	78	92
10.000	136	98	116
PMP	185	156	179

5.3 Cuenca Estero Pupío

El depósito de relaves Mauro se encuentra en la comuna de Los Vilos, al Sur de la Región de Coquimbo, y cercano al poblado de Caimanes, la ciudad de Salamanca y Los Vilos como se muestra en la Figura 5-16, en el sotavento de la Cordillera de la Costa a los 31,97°LS.

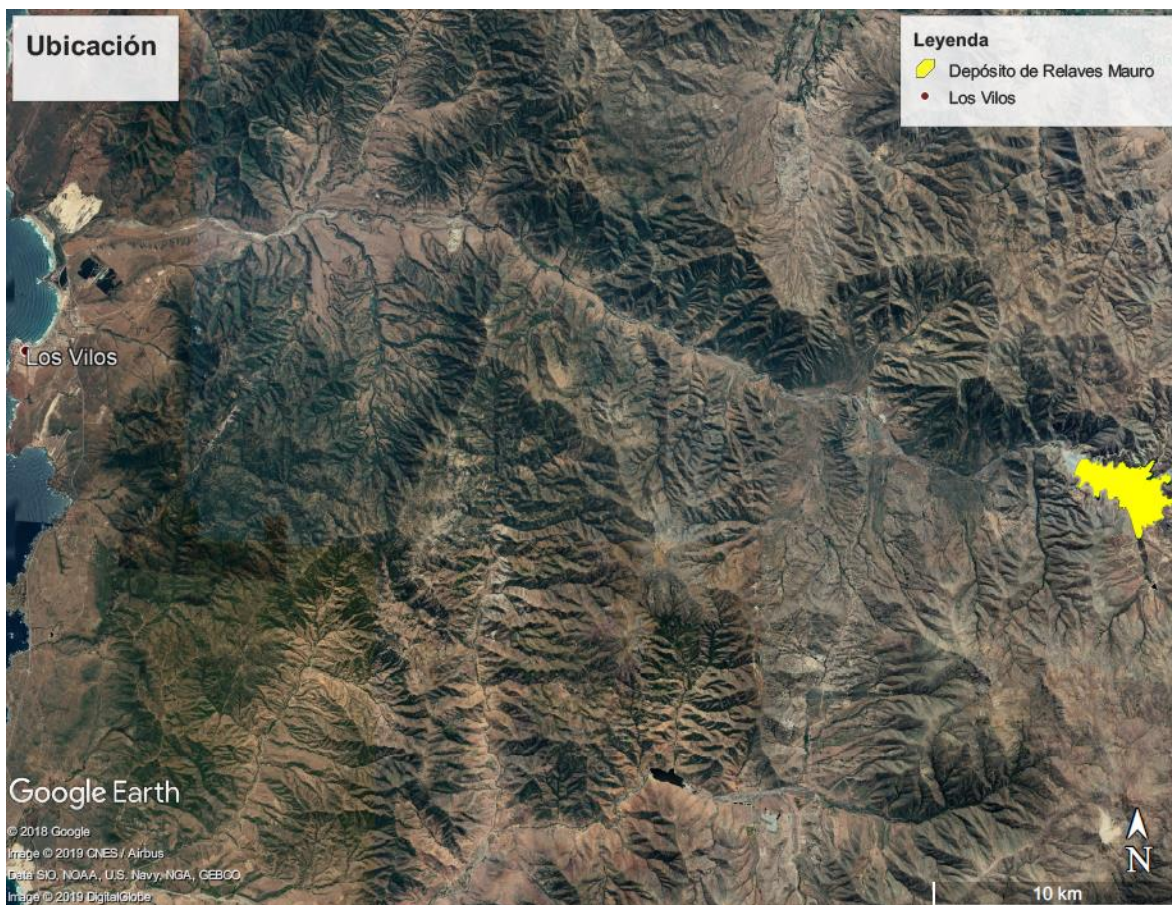


Figura 5-16: Ubicación Depósito de Relaves Mauro (Fuente: Elaboración propia).

El clima en esta zona es semiárido con precipitaciones escasas e irregulares en los meses de invierno.

5.3.1 Área Pluvial Aportante

En la Figura 5-17, se presenta el área de la cuenca aportante al depósito de relaves (en naranja) que corresponde aproximadamente a 77,5 [km²] de los cuales 6,3 [km²] pertenecen al depósito de relaves (en amarillo).

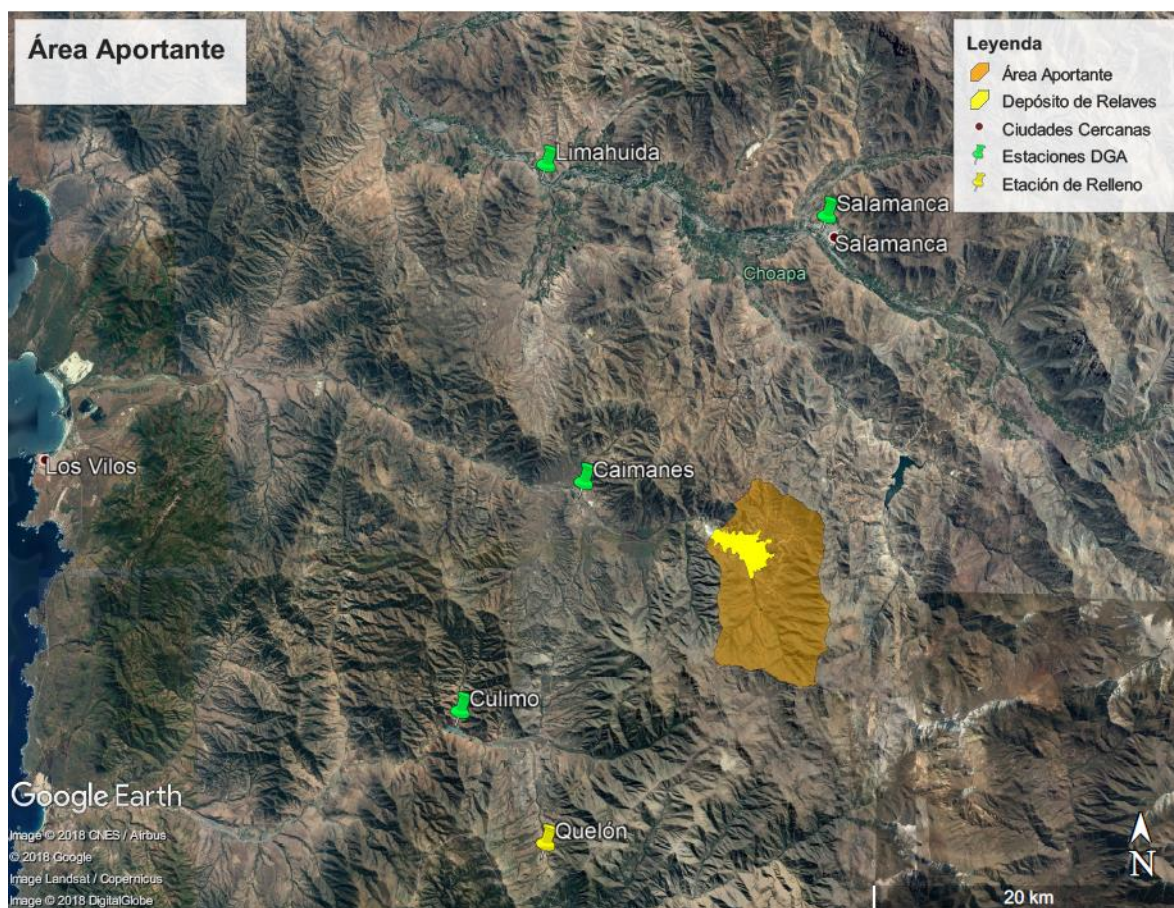


Figura 5-17: Ubicación del área pluvial aportante al depósito de relaves y estaciones meteorológicas de la DGA para el análisis de frecuencia (Fuente: Elaboración propia).

La máxima cota de la cuenca es de 2.340 [m.s.n.m] y la línea de nieves según Peña y Vidal (1993) para esta latitud se encuentra aproximadamente a 2.080 [m.s.n.m]. Sin embargo, el área aportante nival corresponde al 3,05% del área aportante total. Por lo tanto, el régimen hidrológico de la cuenca se considera de tipo pluvial con escurrimiento importante en los meses de invierno y descarga al Estero Pupío, ubicado inmediatamente aguas abajo del muro principal.

5.3.2 Distribución espacial y temporal de precipitación DGA

Se analizan las estaciones pertenecientes a la DGA más próximas al depósito mostradas en la Figura 5-17 las cuales se encuentran vigentes y cuentan con las series de precipitaciones presentadas en el ANEXO A.

La estación Caimanes se ubica en la subcuenca del Estero Pupío a unos 12,5 [km] aproximadamente aguas abajo del muro y su muestra de precipitaciones diarias máximas anuales para la línea base es de un periodo de 16 años, desde el año 1990 al año 2005. Por lo tanto, se rellena su información pluviométrica a través de la correlación lineal con la estación Culimo, la cual posee una muestra de 44 datos desde el año 1974 al año 2017.

Por otro lado, la estación Quelón se encuentra ubicada en la misma subcuenca de la estación Culimo, Cuenca del Río Quilimarí. Debido a lo anterior, se utiliza para rellenar datos de precipitaciones de esta última estación que se escapan de la tendencia en la figura comparativa entre ambas estaciones.

Como se muestra en la Tabla 5-24, las estaciones mencionadas anteriormente están situadas a cotas menores que la cota media de la cuenca analizada y no representan adecuadamente las precipitaciones en ella. Para estimar las precipitaciones orográficas en la cota media de la cuenca se genera un gradiente pluviométrico que representa el aumento de las precipitaciones a medida que aumenta la altitud topográfica. Para el propósito anterior, se añaden las estaciones Limahuida y Salamanca pertenecientes a la cuenca Río Choapa Medio de la DGA.

Tabla 5-24: Características de las estaciones DGA analizadas (Fuente: Elaboración propia).

Estación	Cota [m.s.n.m]	Código BNA	Coordenadas UTM [m]	
			Este	Norte
Caimanes	450	4810003-1	297855	6464707
Culimo	380	4900002-2	289994	6449542
Quelón	890	4900003-0	295804	6441126
Limahuida	300	4716005-7	294998	6485416
Salamanca	510	4711004-1	313536	6482348

Las series de precipitaciones diarias máximas anuales se obtienen desde la página web de la DGA (Información Oficial Hidrometeorológica y de Calidad de Aguas en Línea, 2018) y se presentan en el ANEXO A.

Se realiza el análisis de frecuencia para distintas distribuciones de probabilidad (Normal, Log Normal, Gumbel, Pearson, Log Pearson). Para lo anterior, se considera una estadística de precipitaciones de 32 años desde el 1974 al 2005 (debido a la línea base de las proyecciones de cambio climático). De igual manera que en los depósitos de relaves analizados anteriormente, se consideran los periodos de retorno de 10, 100, 1.000 y 10.000 años.

Las precipitaciones obtenidas para cada estación pluviométrica según su periodo de retorno se detallan en la Tabla 5-25:

Tabla 5-25: Resultados análisis de frecuencia para cada estación (Fuente: Elaboración propia).

Estación	Distribución Seleccionada	Periodo de Retorno [años]			
		10	100	1.000	10.000
Caimanes	Gumbel	117	189	260	331
Culimo		96	155	212	269
Quelón		98	156	213	270
Limahuida		69	111	152	193
Salamanca		90	142	194	246

Para la obtención de la Tabla 5-25, se busca la distribución que proyecte de mejor forma la serie de precipitaciones diarias máximas anuales otorgada por la DGA y se verifica que no se rechacen los

test de bondad χ^2 y Kolmogorov-Smirnov. La distribución seleccionada por análisis gráfico para las cuatro estaciones, es Gumbel y es importante destacar que para todas las distribuciones y estaciones no se rechazaron las hipótesis de ninguno de los dos test de bondad de ajuste.

El análisis de frecuencia con la distribución Gumbel para las diferentes estaciones se presenta en el ANEXO B.

El gradiente de precipitaciones realizado con las precipitaciones en cada estación para 10 años de periodo de retorno mostrado en la Tabla 5-25, se genera siguiendo el comportamiento de la expresión lineal que la describe, la cual se presenta en la Figura 5-18:

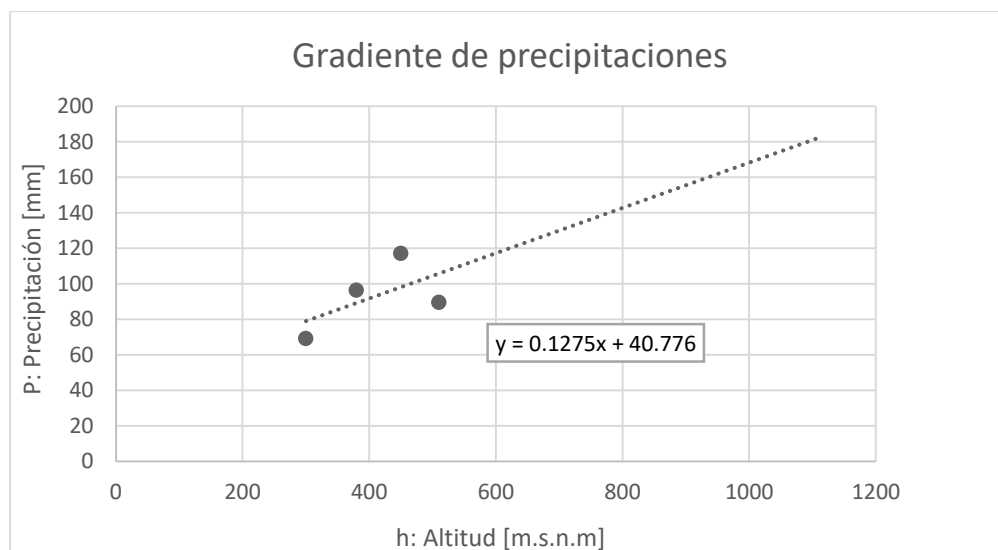


Figura 5-18: Gradiente pluviométrico y ecuación de la línea de tendencia (Fuente: Elaboración propia).

Con la expresión lineal de gradiente entregada en la Figura 5-18, se estiman las precipitaciones diarias máximas para la cota media de la cuenca (1.292 m.s.n.m.) y periodo de retorno de 10 años correspondiente a 206[mm]. Con esto, se obtiene el factor amplificador de 1,76 desde las precipitaciones de la estación base Caimanes a las precipitaciones en la cota media de la cuenca. Este factor se calcula mediante el siguiente cociente:

$$f = \frac{P_{\text{cota media cuenca}}}{P_{\text{estación base}}}$$

Se utilizará el factor amplificador 1,76 para aumentar las precipitaciones asociadas a los otros periodos de retorno y la PMP desde la estación base Caimanes en los datos de la línea base.

Tabla 5-26: Precipitaciones representativas de la cuenca aportante al depósito de relaves (Fuente: Elaboración propia).

Cota	P(T=10)	P(T=100)	P(T=1.000)	P(T=10.000)
1292	206	332	456	581

Para estimar la precipitación máxima probable se tiene en cuenta la Ecuación (3-3), con sus diferentes coeficientes de frecuencia máximos (K_M) y formas para estimar la precipitación máxima probable según si la estación es cordillerana o no. En la Tabla 5-27 se presentan las variables necesarias para estimar la PMP y sus valores:

Tabla 5-27: Variables que intervienen en el cálculo de la Precipitación Máxima Probable y sus valores dependiendo del método (Fuente: Elaboración propia).

Parámetro	Caimanes
P_n [mm]	65
σ_n [mm]	34
P_{n-1} [mm]	63
σ_{n-1} [mm]	33
P_c [mm]	65
σ_c [mm]	38
K_M	17
K_M Stowhas	11
PMP_H [mm]	703
PMP_S [mm]	485
PMP_S no cord [mm]	338

Tal como propone Ludwig Stowhas en el VI Congreso SOCHID (1983), los valores para el coeficiente de frecuencia propuestos por Herschfield (Stowhas Borghetti, 2016) proponen un valor para la PMP muy por sobre las definidas por Stowhas (PMP_S y PMP_S no cord en la Tabla 5-4) para la estación analizada.

Para un cálculo conservador, se elegirá la máxima PMP en la estación Caimanes calculada según las ecuaciones de Stowhas (2016). Se proyecta la PMP escogida hacia la cota media de la cuenca, según el factor amplificador 1,76 determinando una PMP=851 mm, correspondiente a la cuenca aportante al depósito de relaves Mauro.

5.3.3 Proyección Precipitaciones futuras considerando Cambio Climático

Como se menciona en el Acápite 0, se utilizan dos modelos de proyección de cambio climático, ESM2G y ESM2M para estimar las precipitaciones sobre cada estación DGA. Para plantear cuál modelo se acerca más a las reales precipitaciones, se analiza las líneas de tendencia y el RMSE (valor cuadrático medio por sus siglas en inglés) de los datos.

Las series de precipitaciones diarias máximas anuales de ambos modelos de proyección de cambio climático se obtienen desde la página web del NCCS (Centro de la NASA para Simulaciones Climáticas por sus siglas en inglés) y se presentan en el ANEXO C. La muestra de datos es de 32 años, considerando desde el año que se tiene información de la DGA de las estaciones (1974) hasta el 2005 donde se acaba la muestra de línea base de ambos modelos.

5.3.3.1 Caimanes

Como se muestra en la Figura 5-19, en esta estación los datos de ambas proyecciones se comportan de forma similar, esto lo comprueba las líneas de tendencia superpuestas. Al analizar las pendientes de las líneas de tendencia, la pendiente de la proyección ESM2G se encuentra ligeramente más cercana a la línea gris representativa de 45°, sin embargo, la proyección ESM2M es más cercana para mayores valores de precipitación.

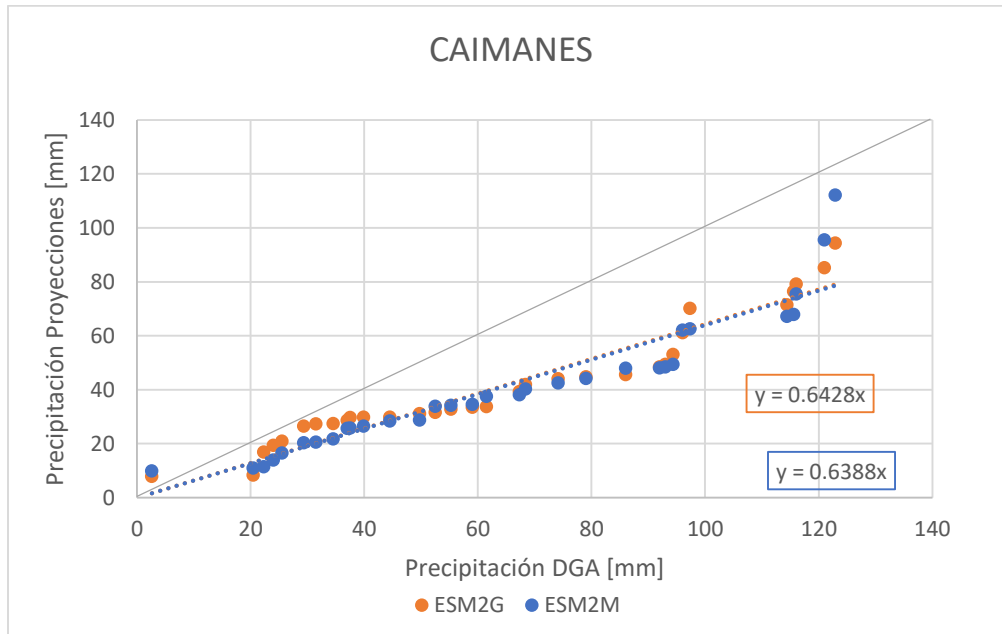


Figura 5-19: Comparación de precipitaciones de la DGA y modelos ESM2G y ESM2M
(Fuente: Elaboración propia).

Otra forma de determinar cuál modelo presenta las precipitaciones más representativas de la estación, es calculando el factor RMSE:

Tabla 5-28: Valores RMSE de precipitaciones de los modelos ESM2G y ESM2M en estación Caimanes
(Fuente: Elaboración propia).

ESM2G	ESM2M
49,1	51,6

Se comprueba que ambas proyecciones se alejan de la realidad medida, sin embargo, según el análisis gráfico el modelo que más se acerca a las precipitaciones reales obtenidas en la estación Caimanes de la DGA es ESM2M.

5.3.3.2 Culimo

Como se muestra en la Figura 5-20 en la estación Culimo, a diferencia que en la estación Caimanes, los datos de ambas proyecciones son más cercanos a los datos reales obtenidos de la DGA ya que las pendientes de sus líneas de tendencia se acercan a la pendiente de 45° en gris. Por otro lado, la proyección ESM2G presenta un dato muy alejado de los datos de precipitaciones. A pesar de la cercanía de la mayoría de las precipitaciones de ambas proyecciones a los datos de la DGA, la pendiente de la línea de tendencia de la proyección ESM2M se encuentra más cercanas.

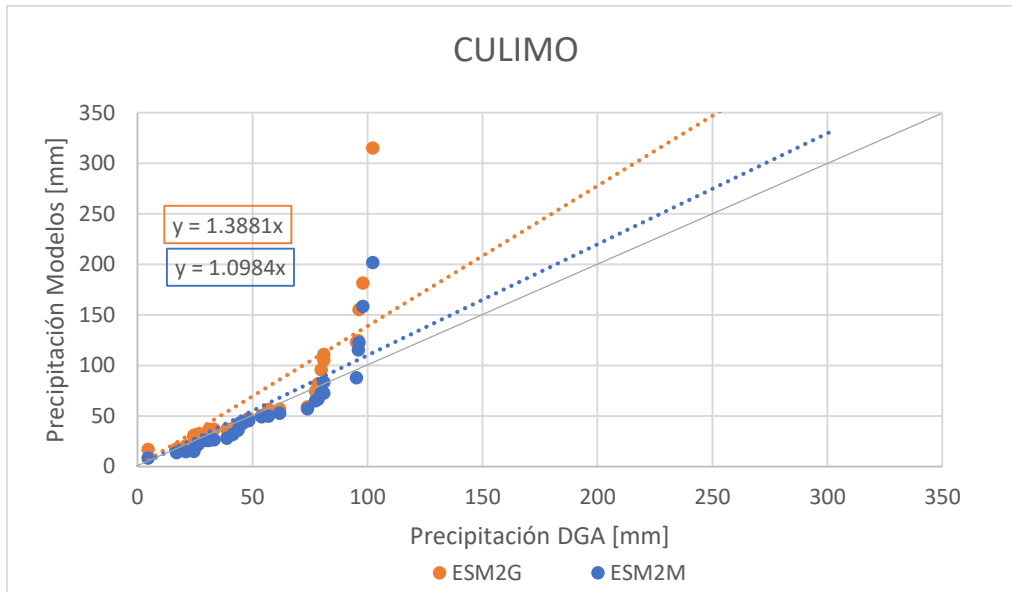


Figura 5-20: Comparación de precipitaciones de la DGA y modelos ESM2G y ESM2M
(Fuente: Elaboración propia).

El factor RMSE de las precipitaciones de la DGA y ambos modelos para la estación Culimo son:

Tabla 5-29: Valores RMSE de precipitaciones de los modelos ESM2G y ESM2M en estación Culimo
(Fuente: Elaboración propia).

ESM2G	ESM2M
75,5	52,4

Por lo tanto, el modelo que más se acerca a las precipitaciones reales obtenidas en la estación Culimo de la DGA es ESM2M.

5.3.3.3 Limahuida

Como se muestra en la Figura 5-21 en la estación Limahuida, los datos de la proyección ESM2G son los más cercanos a los datos reales obtenidos de la DGA. Se comprueba lo anterior con la pendiente de la línea de tendencia de esta proyección que se encuentra más cercana a la línea gris representativa de 45°.

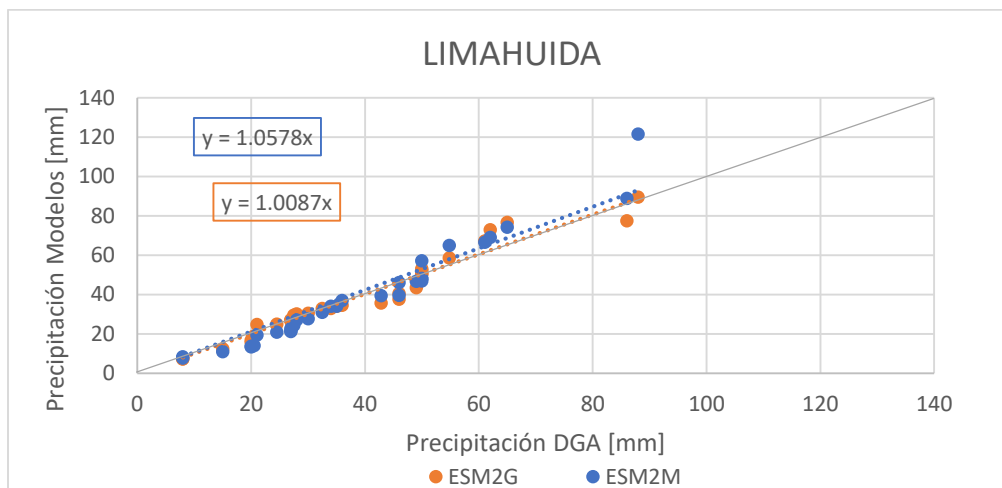


Figura 5-21: Comparación de precipitaciones de la DGA y modelos ESM2G y ESM2M (Fuente: Elaboración propia).

El factor RMSE de las precipitaciones de la DGA y ambas proyecciones para la estación Limahuida son:

Tabla 5-30: Valores RMSE de precipitaciones de los modelos ESM2G y ESM2M en estación Limahuida (Fuente: Elaboración propia).

ESM2G	ESM2M
33,0	32,8

Los valores RMSE son similares, sin embargo, el modelo que más se acerca a las precipitaciones reales obtenidas en la estación Limahuida de la DGA es ESM2M.

5.3.3.4 Salamanca

Como se muestra en la Figura 5-22 en la estación Salamanca, los datos de la proyección ESM2M son los más cercanos a los datos reales obtenidos de la DGA. Se comprueba lo anterior con la pendiente de la línea de tendencia de esta proyección que se encuentra más cercana a la línea gris representativa de 45°.

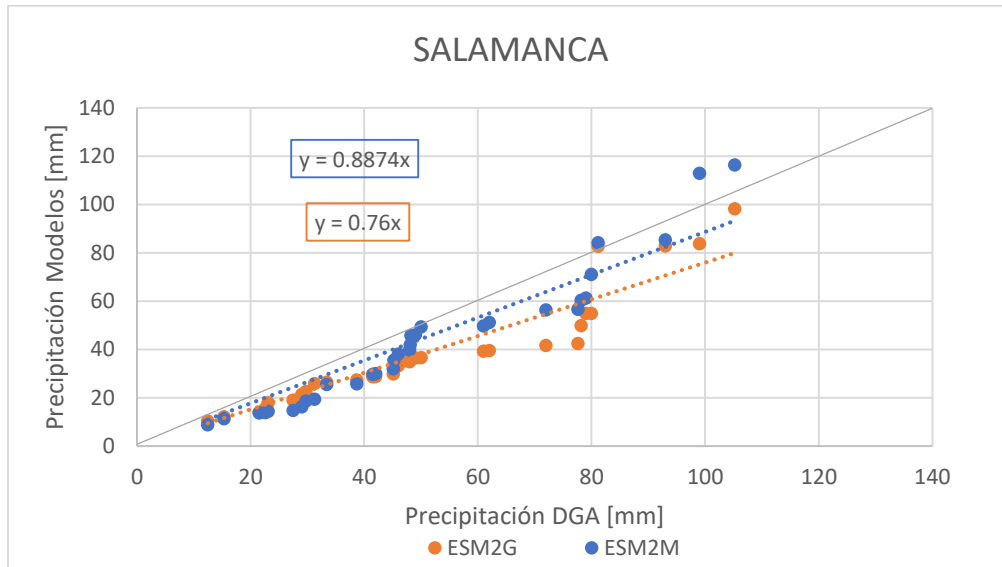


Figura 5-22: Comparación de precipitaciones de la DGA y modelos ESM2G y ESM2M (Fuente: Elaboración propia).

El factor RMSE de las precipitaciones de la DGA y ambos modelos para la estación Salamanca son:

Tabla 5-31: Valores RMSE de precipitaciones de los modelos ESM2G y ESM2M en estación Salamanca (Fuente: Elaboración propia).

ESM2G	ESM2M
36,2	38,8

Pese a la cercanía de los RMSE, el modelo que más se acerca a las precipitaciones reales obtenidas en la estación Salamanca de la DGA es ESM2G.

5.3.3.5 Corrección de Modelos Hidrológicos

Como se menciona anteriormente para la mayoría de las estaciones, las precipitaciones estimadas por las proyecciones en su línea base que más se parecen a las medidas por la DGA son las de la proyección ESM2M. A pesar de que en la estación Salamanca los datos de la DGA tienen mayor cercanía con la proyección ESM2G, es más conveniente comparar datos de las mismas proyecciones para evitar mayor error de arrastre. Por lo tanto, se corrige la proyección ESM2M para ajustarla a las precipitaciones reales de cada estación en el periodo de línea base determinado (1974-2005), mediante factores de corrección. Estos factores de corrección se calculan de la siguiente forma para cada periodo de retorno en la estación DGA:

$$f^T = \frac{P_{DGA}^T}{P_{Modelo}^T}$$

Así, si la proyección de las precipitaciones del modelo en la línea base (1974-2005) son mayores a las medidas por la DGA en esa estación, el factor aplicable a las proyecciones será de reducción para acercarlos a las precipitaciones medidas. En caso contrario, el factor será amplificador.

En el caso de la Estación Caimanes, a continuación, en la Figura 5-23 se representan las precipitaciones según cada periodo de retorno y ambos modelos de proyección de cambio climático:

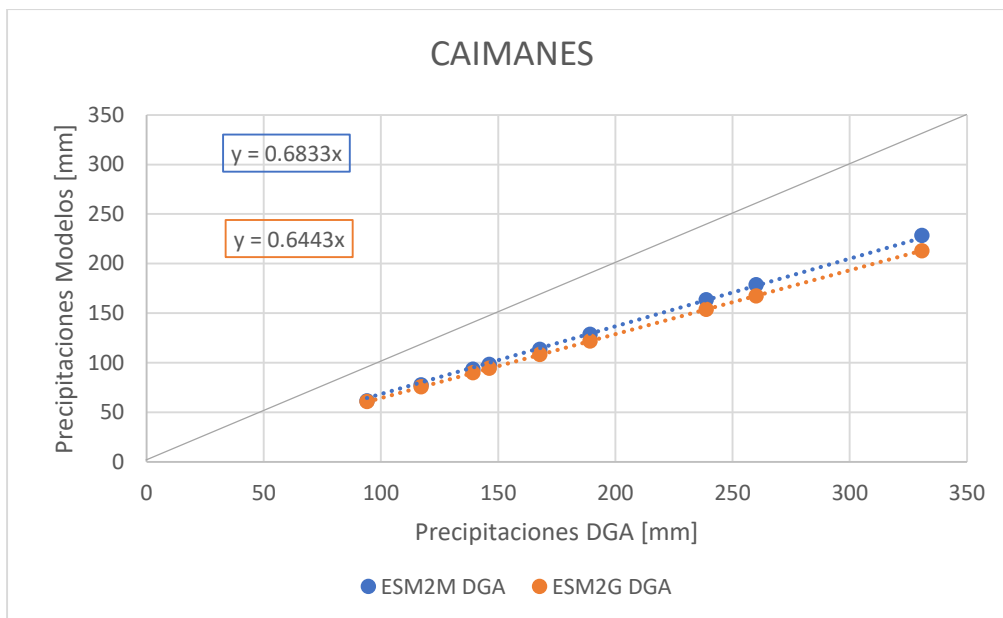


Figura 5-23: Comparación de las precipitaciones del análisis de frecuencia en la estación Caimanes de cada proyección con las precipitaciones del análisis de frecuencia de la DGA (Fuente: Elaboración propia).

Se observa que las precipitaciones en esta estación de ambas proyecciones son menores a las observadas por la DGA, por lo tanto, los factores que se aplicarán a las precipitaciones futuras de la proyección ESM2M, será para aumentarlas.

Para la estación Culimo, se obtienen las precipitaciones según cada periodo de retorno de ambos modelos y se comparan con las observadas por la DGA según la Figura 5-24:

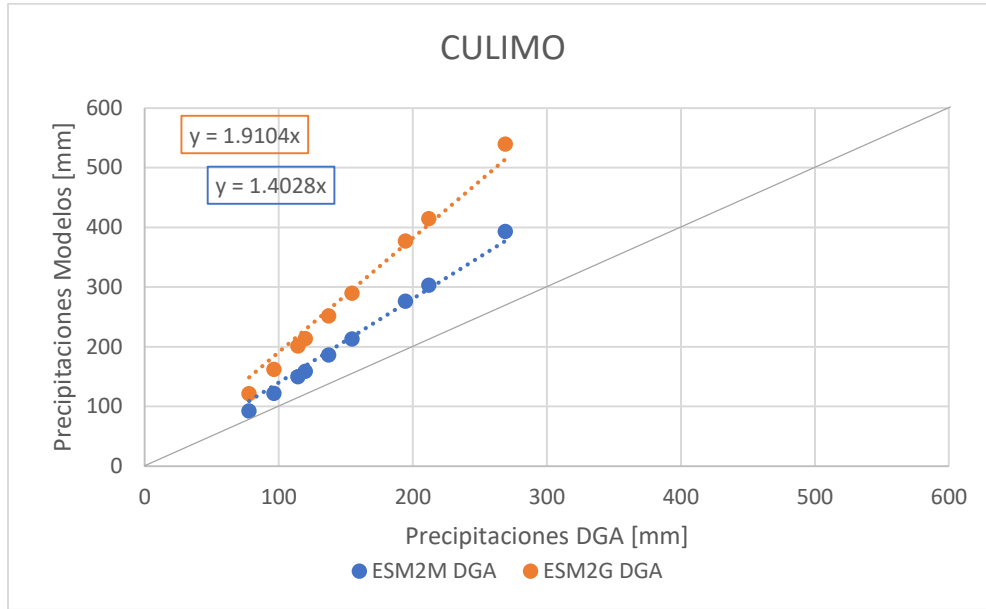


Figura 5-24: Comparación de las precipitaciones del análisis de frecuencia en la estación Culimo de cada proyección con las precipitaciones del análisis de frecuencia de la DGA (Fuente: Elaboración propia).

Se observa que las precipitaciones en esta estación de ambas proyecciones, a diferencia que en la estación Caimanes, son mayores a las observadas por la DGA, entonces los factores serán de reducción.

En la estación Limahuida se tienen las siguientes Precipitaciones de las proyecciones:

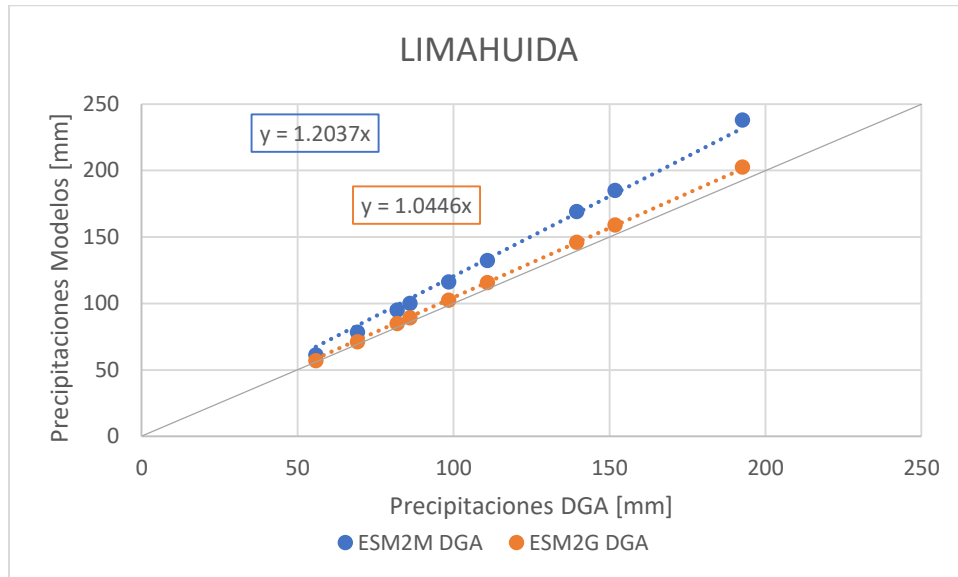


Figura 5-25: Comparación de las precipitaciones del análisis de frecuencia en la estación Limahuida de cada proyección con las precipitaciones del análisis de frecuencia de la DGA (Fuente: Elaboración propia).

En la Figura 5-25 anterior, se observa que las precipitaciones de las proyecciones son mayores que las precipitaciones de la DGA. Los factores para las precipitaciones futuras de la proyección ESM2M serán de reducción.

Finalmente, en la estación Salamanca se tienen las siguientes Precipitaciones de las proyecciones:

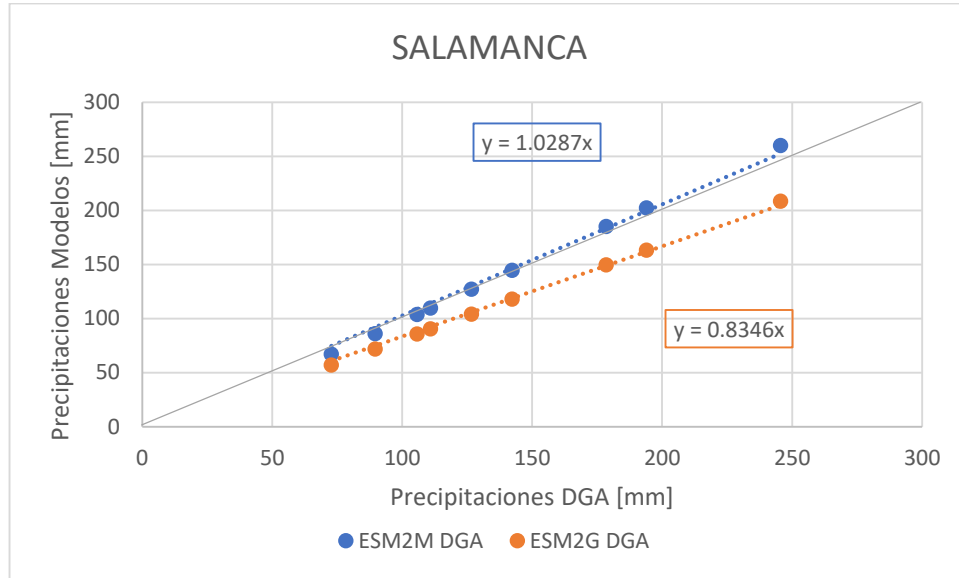


Figura 5-26: Comparación de las precipitaciones del análisis de frecuencia en la estación Salamanca de cada proyección con las precipitaciones del análisis de frecuencia de la DGA (Fuente: Elaboración propia).

En la Figura 5-26 anterior, se observa que las precipitaciones de la proyección ESM2M son mayores que las precipitaciones de la DGA para periodos de retorno altos, y menores para periodos de retorno más bajos. El factor para las precipitaciones futuras de la proyección ESM2M será de amplificación para periodos de retorno bajos y de reducción para periodos de retorno mayores.

Según las precipitaciones mostradas en la Figura 5-23, Figura 5-24, Figura 5-25 y Figura 5-26 para el Modelo ESM2M se calculan los siguientes factores de corrección:

Tabla 5-32: Factores aplicables a las precipitaciones futuras de la proyección ESM2M (Fuente: Elaboración propia).

Periodo de Retorno	10	100	1.000	10.000
CAIMANES	1,504	1,470	1,455	1,447
CULIMO	0,791	0,724	0,698	0,684
LIMAHUIDA	0,884	0,839	0,820	0,810
SALAMANCA	1,042	0,983	0,958	0,944

Con los factores de corrección de la Tabla 5-32, se podrán modificar las Precipitaciones Futuras de cada estación según cada periodo de retorno y acercarlas a las medidas por la DGA en cada estación.

En el caso de la PMP, se presentan el detalle del cálculo para cada estación de análisis:

Tabla 5-33: Variables que intervienen en el cálculo de la Precipitación Máxima Probable de la proyección ESM2G y sus valores dependiendo del método (Fuente: Elaboración propia).

Parámetro	Caimanes
P_n [mm]	41
σ_n [mm]	24
P_{n-1} [mm]	38
σ_{n-1} [mm]	21
P_c [mm]	40
σ_c [mm]	24
K_M	18
K_M Stowhas	11
PMP_H [mm]	468
PMP_S [mm]	303
$PMP_{S\ no\ cord}$ [mm]	233

Se toma la mayor PMP según Stöwhas (PMP_S y $PMP_{S\ no\ cord}$ en la Tabla 5-33) de la estación base Caimanes, y se lleva a la cota media de la cuenca mediante el factor amplificador planteado por el gradiente de precipitaciones 1,76. Sin embargo, teniendo en cuenta la PMP del modelo llevada a la cota media de la cuenca de 532 mm, y la PMP de los datos de la DGA también en la cota media de 851 mm, se debe aplicar un factor amplificador para la PMP futura proyectada. El factor amplificador para la PMP calculado es de 1,6.

Lo anterior ocurre debido a que, para el análisis de frecuencia de la estación Caimanes se ocupan factores amplificadores para las precipitaciones de la proyección ESM2M por las precipitaciones menores del modelo para cada periodo de retorno.

5.3.3.6 Precipitaciones Futuras

Se realiza el análisis de frecuencia de los modelos de proyección de precipitaciones de RCP4.5 y RCP8.5 para cada estación, y se obtienen las precipitaciones corregidas por los factores de reducción de la Tabla 5-32:

Tabla 5-34: Precipitaciones en mm para las cuatro estaciones con RCP4.5 y RCP 8.5 estimadas por el análisis de frecuencia (Fuente: Elaboración propia).

RCP	Estación	Distribución Seleccionada	Periodo de Retorno [años]			
			10	100	1.000	10.000
4.5	Caimanes	Gumbel	117	200	281	362
	Culimo		79	124	170	215
	Limahuida		66	111	155	198
	Salamanca		81	136	190	243
8.5	Caimanes	Gumbel	98	166	232	298
	Culimo		81	128	175	221
	Limahuida		53	87	120	153
	Salamanca		84	143	200	256

En la Tabla 5-34, se indica que la distribución seleccionada para las cuatro estaciones, al igual que en el análisis de frecuencia de las precipitaciones de la línea base, es Gumbel. Es importante destacar que en algunas estaciones y distribuciones se rechazó las hipótesis del test de bondad de Kolmogorov-Smirnov, no así el test χ^2 , por lo tanto, se aceptan los resultados.

El análisis de frecuencia con la distribución Gumbel para las diferentes estaciones se presenta en el ANEXO E.

El gradiente de precipitaciones realizado con las precipitaciones en cada estación para 10 años de periodo de retorno se genera siguiendo el comportamiento de la expresión lineal que la describe, la cual se presenta en la Figura 5-27 para RCP4.5:

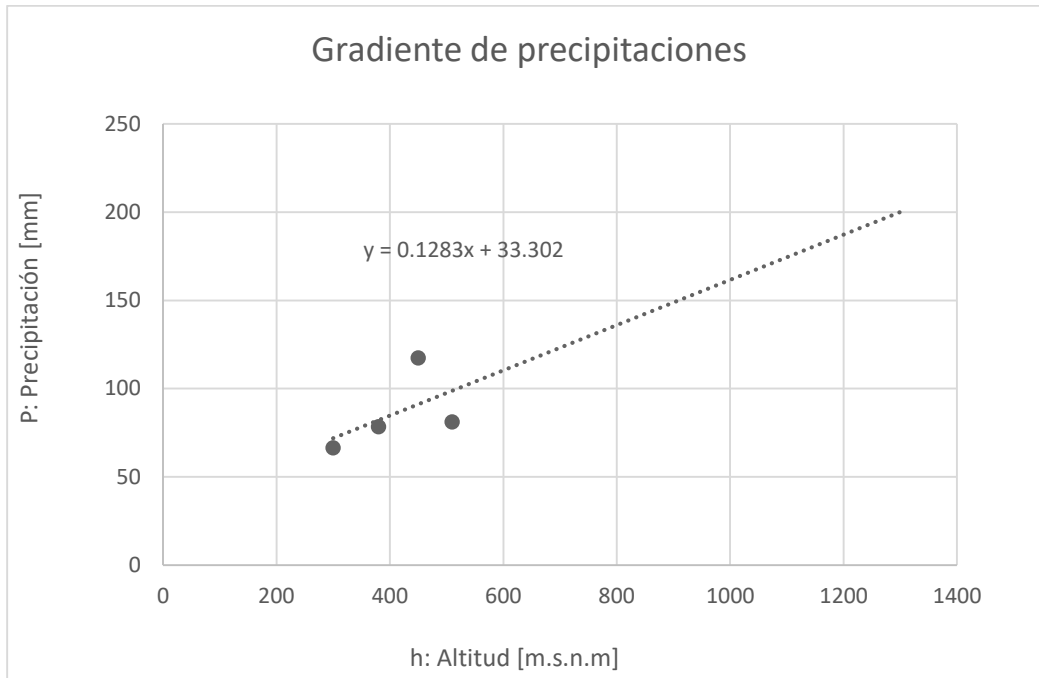


Figura 5-27: Gradiente pluviométrico y ecuación de la línea de tendencia para RCP 4.5 (Fuente: Elaboración propia).

Y en la Figura 5-28 para RCP8.5:

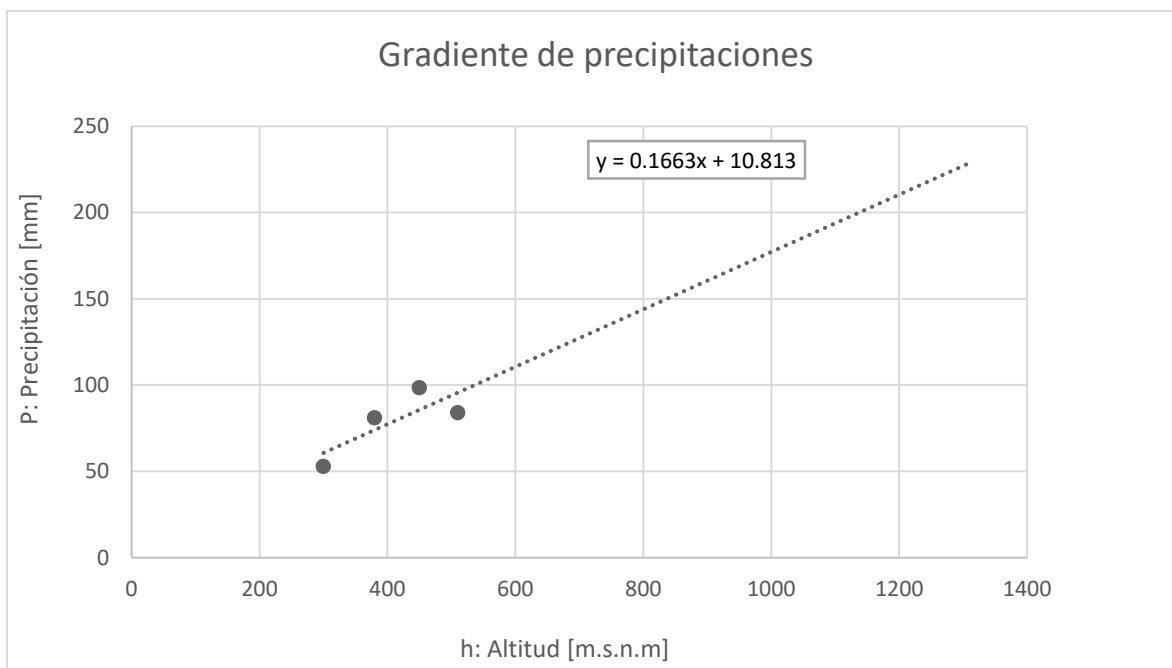


Figura 5-28: Gradiente pluviométrico y ecuación de la línea de tendencia para RCP 8.5 (Fuente: Elaboración propia).

Con las expresiones lineales de gradientes entregadas en la Figura 5-27 y Figura 5-28, se estiman las precipitaciones diarias máximas para la cota media de la cuenca y periodo de retorno 10 años. Se calculan los factores de 1,15 para RCP 4.5 y de 2,22 para RCP 8.5. Con estos factores, se estiman las siguientes precipitaciones en la cota media de la cuenca para los otros periodos de retorno:

Tabla 5-35: Precipitaciones en mm representativas de la cuenca aportante al depósito de relaves para cada RCP (Fuente: Elaboración propia).

RCP	Cota	P(T=10)	P(T=100)	P(T=1.000)	P(T=10.000)
4.5	1292	199	339	476	613
8.5		226	380	532	683

A continuación, se presentan las PMP de las estaciones analizadas para ambas RCPs y corregidas por el factor amplificador del Acápito 5.3.3.5:

Tabla 5-36: Precipitación Máxima Probable futura dependiendo del método y RCP (Fuente: Elaboración propia).

Estaciones	CAIMANES	
	4.5	8.5
PMP _H [mm]	935	758
PMP _S [mm]	598	479
PMP _{S no cord} [mm]	369	325

Tal como se menciona en el Acápito 5.3.2, para un cálculo conservador se elegirán las máximas PMP para cada escenario, calculadas según las ecuaciones de Stowhas (2016). Se llevan estas precipitaciones a la cota media de la cuenca, según los factores planteados por los gradientes de precipitaciones. Para RCP4.5 se tendrá una PMP de 1.013 [mm] y para RCP8.5 se tendrá una PMP de 1.100 [mm].

5.3.4 Comparación de situación actual y futura.

En la Tabla 5-13 y Tabla 5-14 se presentan las precipitaciones para las estaciones de la DGA y para la cota media de la cuenca respectivamente, presentando los datos de la línea base y escenarios de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5

Tabla 5-37: Precipitaciones de la línea base y de las proyecciones futuras, para cada estación de la DGA (Fuente: Elaboración propia).

T	CAIMANES			CULIMO			LIMAHUIDA			SALAMANCA		
	Línea Base	RCP 4.5	RCP 8.5	Línea Base	RCP 4.5	RCP 8.5	Línea Base	RCP 4.5	RCP 8.5	Línea Base	RCP 4.5	RCP 8.5
10	117	117	98	96	79	81	69	66	53	90	81	84
100	189	200	166	155	124	128	111	111	87	142	136	143
1.000	260	281	232	212	170	175	152	155	120	194	190	200
10.000	331	362	298	269	215	221	193	198	153	246	243	256
PMP	485	373	299	392	427	483	266	366	277	348	343	378

Tabla 5-38: Precipitaciones de la línea base y las proyectadas a futuro, para la cota media de la cuenca (Fuente: Elaboración propia).

T	COTA MEDIA CUENCA		
Años	Línea Base	RCP 4.5	RCP 8.5
10	206	199	226
100	332	339	380
1.000	456	476	532
10.000	581	613	683
PMP	851	1013	1100

5.4 Cuenca Choapa

El depósito de relaves Quillayes se encuentra en la comuna de Los Vilos, al Sur de la Región de Coquimbo, y cercano Límite con Bolivia como se muestra en la Figura 5-29, a los 31,87°LS.

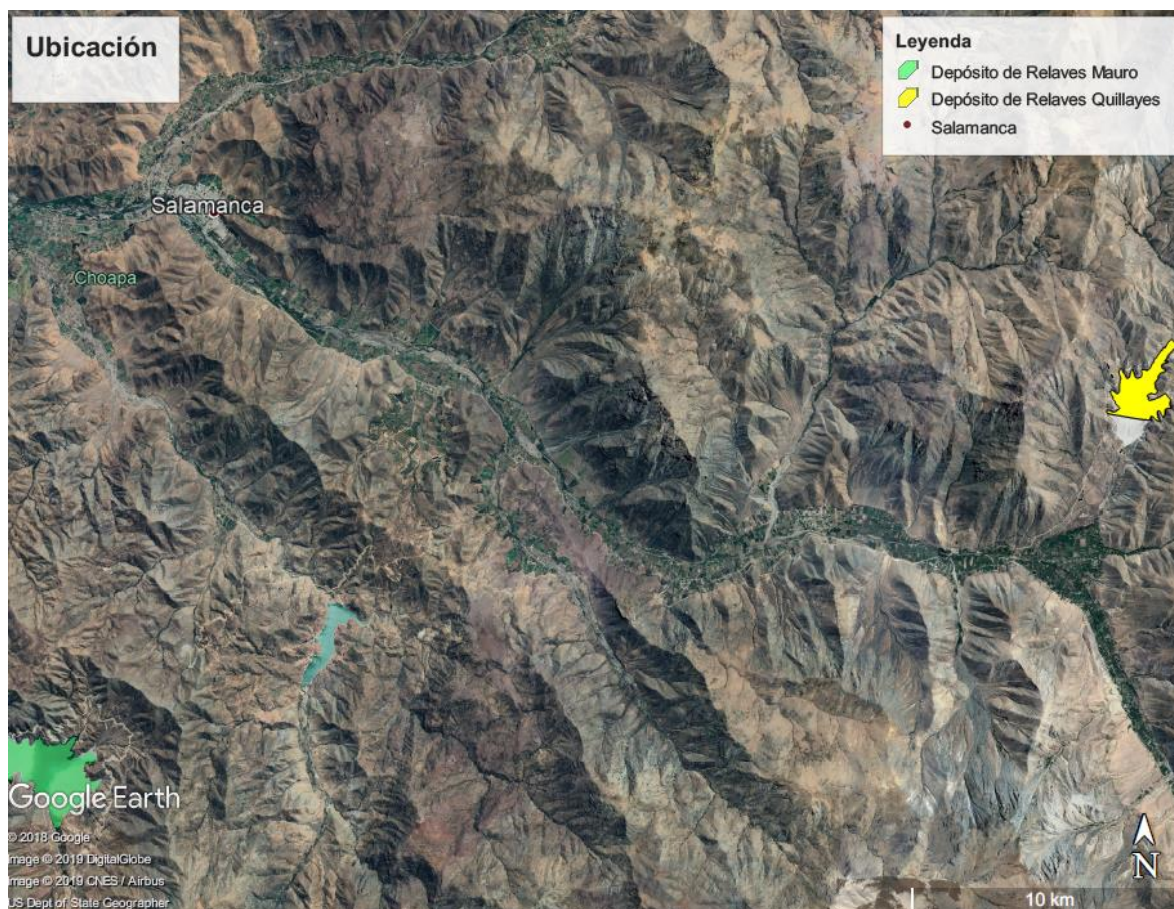


Figura 5-29: Ubicación Depósito de Relaves Quillayes (Fuente: Elaboración propia).

El clima en esta zona es semiárido con precipitaciones escasas e irregulares en los meses de invierno.

5.4.1 Área Pluvial Aportante

En la Figura 5-30, se presenta el área de la cuenca aportante al depósito de relaves (en naranja) que corresponde aproximadamente a 215,3 [km²] de los cuales 3,1 [km²] pertenecen al depósito de relaves (en amarillo).

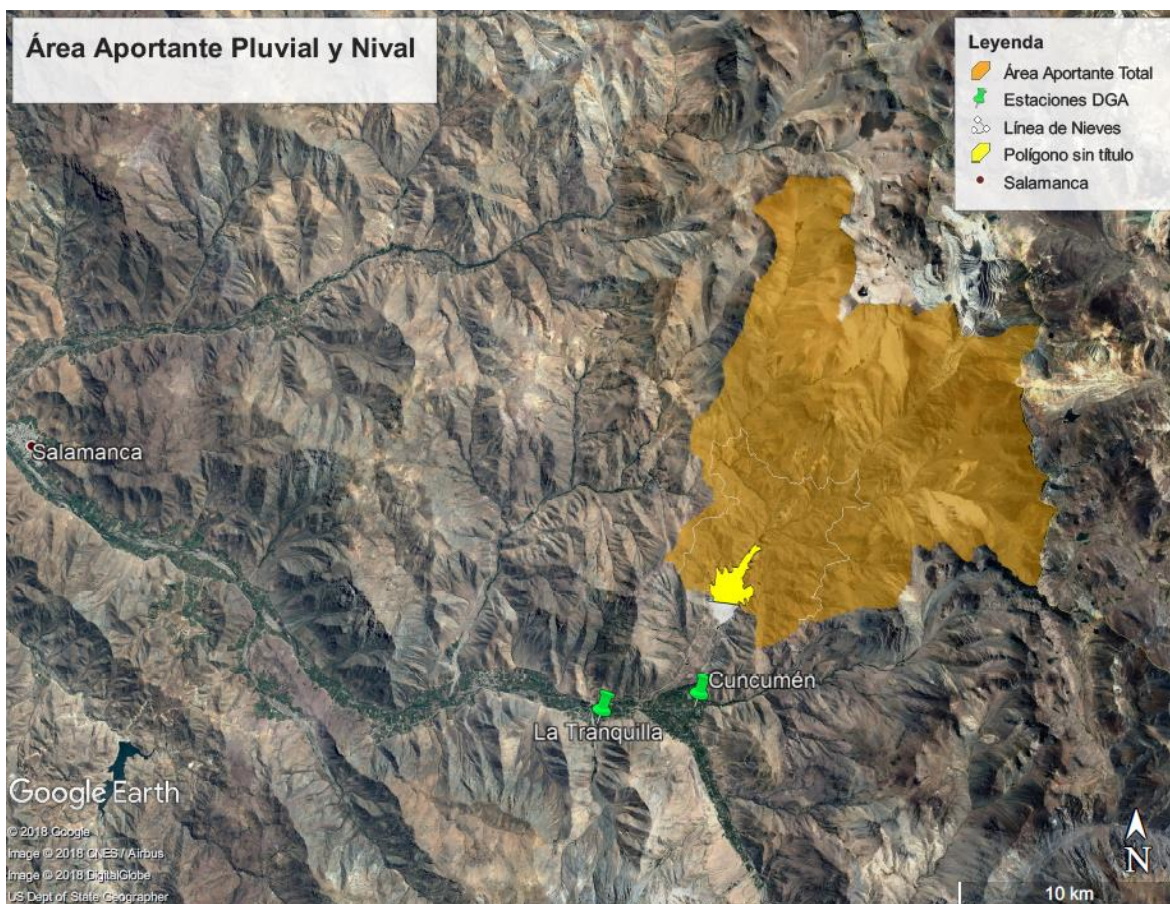


Figura 5-30: Ubicación del área pluvial aportante al depósito de relaves y estaciones meteorológicas de la DGA para el análisis de frecuencia (Fuente: Elaboración propia).

La máxima cota de la cuenca aportante (naranja) es de 4440 [m.s.n.m] y la línea de nieves según Peña y Vidal (1993) para esta latitud se encuentra aproximadamente a 2102 [m.s.n.m] (línea blanca). Esto reduciría considerablemente el área aportante Pluvial a sólo 45,5 [km²] (área bajo línea de nieves). El área de aporte nival correspondiente a 169,8 [km²] aproximadamente, aportará al caudal de deshielo.

5.4.2 Distribución espacial y temporal de precipitación DGA

Se analizan las estaciones pertenecientes a la DGA más próximas al depósito mostradas en la Figura 5-30, las cuales se encuentran vigentes y cuentan con las series de precipitaciones presentadas en el ANEXO A.

La estación Cuncumén se ubica en la subcuenca del Río Choapa Alto a unos 4 [km] aproximadamente aguas abajo del muro y su muestra de precipitaciones diarias máximas anuales para la línea base es de un periodo de 31 años, desde el año 1975 al año 2005. Sin embargo, se corrigen las precipitaciones que difieren de mayor manera de la estación La Tranquilla desarrollando correlación lineal entre sus precipitaciones.

Como se muestra en la Tabla 5-43, las estaciones mencionadas anteriormente están situadas a cotas menores que la cota media de la cuenca aportante al depósito Quillayes y no representan adecuadamente las precipitaciones en ella. Para estimar las precipitaciones orográficas en la cota media de la cuenca se genera un gradiente pluviométrico.

Tabla 5-39: Características de las estaciones DGA analizadas (Fuente: Elaboración propia).

Estación	Cota [m.s.n.m]	Código BNA	Coordenadas UTM [m]	
			Este	Norte
Cuncumén	1100	4703003-K	346469	6469914
La Tranquilla	1000	4710001-1	341195	6469550
Coirón	840	4711003-3	332248	6468923
Salamanca	510	4711004-1	313736	6482674

Las series de precipitaciones diarias máximas anuales se obtienen desde la página web de la DGA (Información Oficial Hidrometeorológica y de Calidad de Aguas en Línea, 2018) y se presentan en el ANEXO A.

Se realiza el análisis de frecuencia para distintas distribuciones de probabilidad (Normal, Log Normal, Gumbel, Pearson, Log Pearson). Para lo anterior, se considera una estadística de precipitaciones de 31 años desde el 1975 al 2005 (debido a la línea base de las proyecciones de cambio climático). De igual manera que en los depósitos de relaves analizados anteriormente, se consideran los periodos de retorno de 10, 100, 1.000 y 10.000 años.

Las precipitaciones obtenidas para cada estación pluviométrica según su periodo de retorno se detallan en la Tabla 5-25:

Tabla 5-40: Resultados análisis de frecuencia para cada estación (Fuente: Elaboración propia).

Estación	Distribución Seleccionada	Periodo de Retorno [años]			
		10	100	1.000	10.000
Cuncumén	Gumbel	103	171	237	303
La Tranquilla		101	165	229	292
Coirón		121	198	273	349
Salamanca		91	144	196	248

Para la obtención de la Tabla 5-40, se busca la distribución que proyecte de mejor forma la serie de precipitaciones diarias máximas anuales otorgada por la DGA y se verifica que no se rechacen los test de bondad χ^2 y Kolmogorov-Smirnov. En la Tabla 5-40 se indica que la distribución seleccionada por análisis gráfico para las cuatro estaciones es Gumbel y es importante destacar que para todas las distribuciones y estaciones no se rechazaron las hipótesis de ninguno de los dos test de bondad de ajuste.

El análisis de frecuencia con la distribución Gumbel para las diferentes estaciones se presenta en el ANEXO B.

El gradiente de precipitaciones realizado con la muestra de cada estación para 10 años de periodo de retorno mostrado en la Tabla 5-40, se genera siguiendo el comportamiento de la expresión lineal que la describe, la cual se presenta en la Figura 5-31:

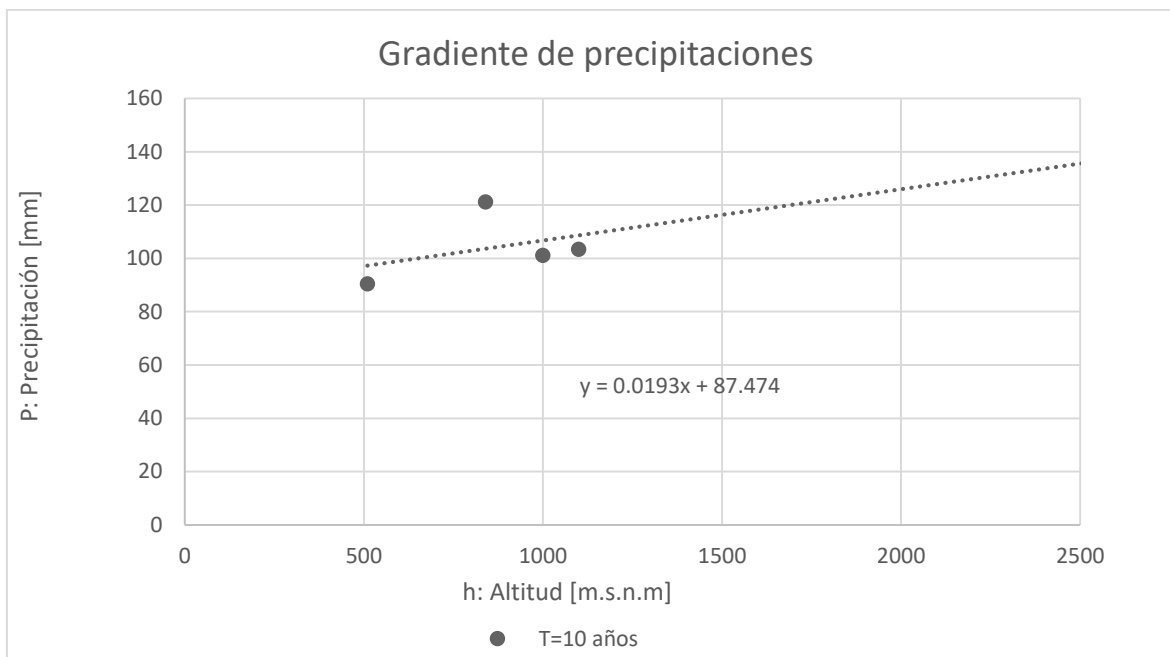


Figura 5-31: Gradiente pluviométrico y ecuación de la línea de tendencia (Fuente: Elaboración propia).

Con la expresión lineal de gradiente entregada en la figura anterior, se estiman las precipitaciones diarias máximas para la cota media de la cuenca y periodo de retorno de 10 años correspondiente a 138 [mm]. Con esto, se obtiene el factor amplificador de 1,34 desde las precipitaciones de la estación base Cuncumén a las precipitaciones en la cota media de la cuenca. Este factor se utilizará para aumentar las precipitaciones asociadas a los otros periodos de retorno.

Tabla 5-41: Precipitaciones representativas de la cuenca aportante al depósito de relaves (Fuente: Elaboración propia).

Cota	P(T=10)	P(T=100)	P(T=1.000)	P(T=10.000)
2450	138	228	317	405

Para estimar la precipitación máxima probable se tiene en cuenta la Ecuación (3-3), con sus diferentes coeficientes de frecuencia máximos (K_M) y formas para estimar la precipitación máxima probable según si la estación es cordillerana o no. En la siguiente tabla, se presentan las variables necesarias para estimar la PMP y sus valores:

Tabla 5-42: Variables que intervienen en el cálculo de la Precipitación Máxima Probable y sus valores dependiendo del método (Fuente: Elaboración propia).

Parámetro	Cuncumén
P_n [mm]	54
σ_n [mm]	32
P_{n-1} [mm]	52
σ_{n-1} [mm]	29
P_c [mm]	53
σ_c [mm]	33

Continuación de *Tabla 5-42*.

Parámetro	Cuncumén
K_M	17
K_M <i>Stowhas</i>	11
PMP_H [mm]	625
PMP_S [mm]	418
PMP_{S cord} [mm]	320

Tal como propone Ludwig Stowhas en el VI Congreso SOCHID (1983), los valores para el coeficiente de frecuencia propuestos por Herschfield (Stöwahas Borghetti, 2016) proponen un valor para la PMP muy por sobre las definidas por Stowhas (PMP_S y $PMP_{S cord}$) por lo tanto, sólo se analizarán estas últimas.

Para un cálculo conservador se elegirán la máxima PMP en la estación Cuncumén calculada según las ecuaciones de Stowhas (2016). Se proyecta la PMP escogida hacia la cota media de la cuenca, según el factor amplificador 1,34 determinando una PMP=559 mm, correspondiente a la cuenca aportante al depósito de relaves Carén.

5.4.3 Proyección Precipitaciones futuras considerando Cambio Climático

Se utilizan los dos modelos de proyección de cambio climático, ESM2G y ESM2M para estimar las precipitaciones sobre cada estación DGA. Para determinar cuál modelo se acerca más a las reales precipitaciones, se analiza las líneas de tendencia y el RMSE (error cuadrático medio por sus siglas en inglés) de los datos.

Las series de precipitaciones diarias máximas anuales de ambos modelos de proyección de cambio climático se obtienen desde la página web del NCCS (Centro de la NASA para Simulaciones Climáticas por sus siglas en inglés) y se presentan en el ANEXO C. La muestra de datos es de 31 años, considerando desde el año que se tiene información de la DGA de las estaciones (1975) hasta el 2005 donde se acaba la muestra de línea base de ambos modelos.

5.4.3.1 Cuncumén

Como se muestra en la Figura 5-32, en esta estación la mayoría de las precipitaciones de ambas proyecciones son menores a los datos de la DGA, esto se puede comprobar con las pendientes de las líneas de tendencia menores a 1. La pendiente de la proyección ESM2M se encuentra más cercana a la línea gris representativa de 45° y por lo tanto a las precipitaciones medidas por la DGA.

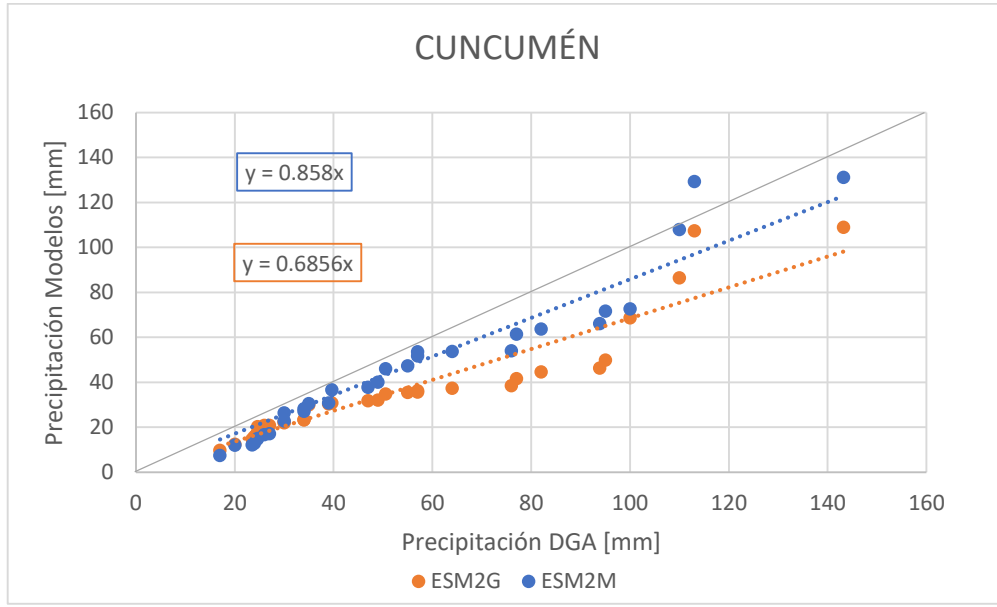


Figura 5-32: Comparación de precipitaciones de la DGA y modelos ESM2G y ESM2M (Fuente: Elaboración propia).

Otra forma de determinar cuál modelo presenta las precipitaciones más representativas de la estación, es calculando el factor RMSE:

Tabla 5-43: Valores RMSE de precipitaciones de los modelos ESM2G y ESM2M en estación Cuncumén (Fuente: Elaboración propia).

ESM2G	ESM2M
43,5	45,1

Se comprueba que ambas proyecciones se encuentran lejanas a los valores de la DGA, y por análisis gráfico, el modelo que más se acerca a las precipitaciones reales obtenidas en la estación Cuncumén de la DGA es ESM2M.

5.4.3.2 La Tranquilla

Como se muestra en la Figura 5-33 en la estación La Tranquilla, al igual que en la estación Cuncumén, la mayor parte de los datos de ambas proyecciones son menores a los datos reales obtenidos de la DGA. Esto se comprueba por las pendientes de sus líneas de tendencia, las cuales son menores a la pendiente de 45° en gris., sin embargo, la pendiente de la línea de tendencia de la proyección ESM2M se encuentra más cercana.

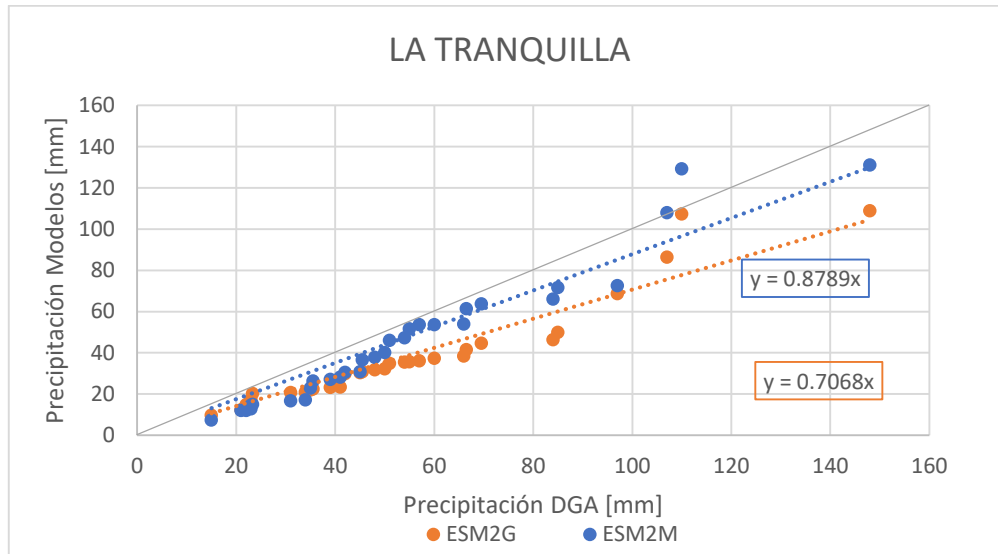


Figura 5-33: Comparación de precipitaciones de la DGA y proyecciones ESM2G y ESM2M (Fuente: Elaboración propia).

El factor RMSE de las precipitaciones de la DGA y ambas proyecciones para la estación La Tranquilla son:

Tabla 5-44: Valores RMSE de precipitaciones de los modelos ESM2G y ESM2M en estación La Tranquilla (Fuente: Elaboración propia).

ESM2G	ESM2M
44,8	44,7

Los factores RMSE demuestran que la proyección que más se acerca a las precipitaciones reales obtenidas en la estación La Tranquilla de la DGA es ESM2M a pesar de la semejanza entre sus RMSE.

5.4.3.3 Corrección de Modelos Hidrológicos

Como se menciona anteriormente para ambas estaciones, las precipitaciones estimadas por la proyección ESM2M son las que más se asemejan a los valores reales medidos por la DGA. Por lo tanto, mediante las proyecciones de la línea base de este modelo y su comparación con las precipitaciones de la DGA en cada estación, se calculan factores de corrección, para poder corregir el modelo y ajustarlo a las precipitaciones reales de cada estación. Estos factores de corrección se calculan de la siguiente forma para cada periodo de retorno en la estación DGA:

$$f^T = \frac{P_{DGA}^T}{P_{Modelo}^T}$$

Así, si la proyección de las precipitaciones del modelo en la línea base (1975-2005) son menores a las medidas por la DGA en esa estación, el factor aplicable a las proyecciones será de amplificación para acercarlos a las precipitaciones medidas. En caso contrario, el factor será reductor.

A continuación, en la Figura 5-34 se representan las precipitaciones según cada periodo de retorno y ambos modelos de proyección de cambio climático para la estación Cuncumén:

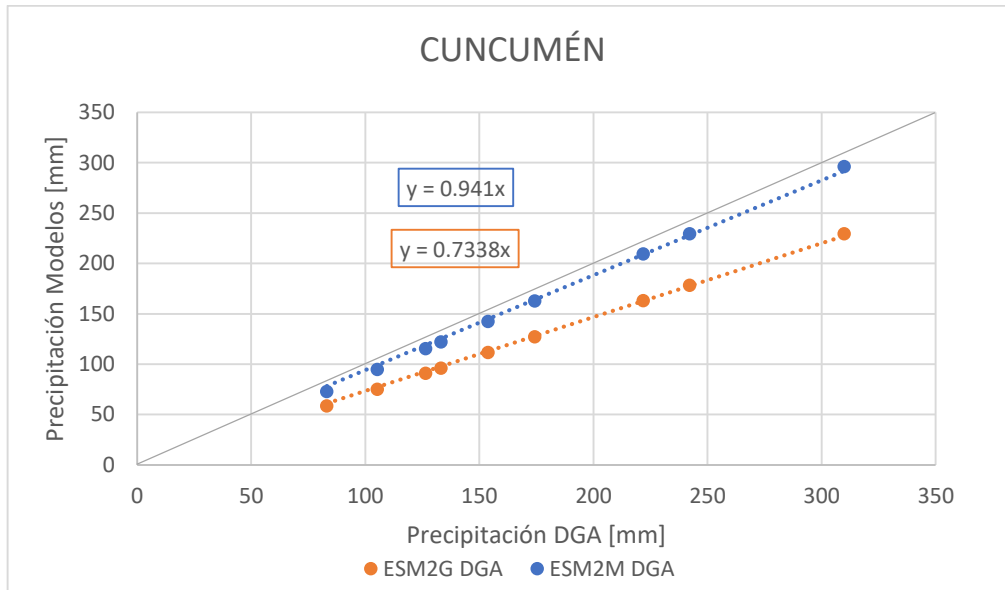


Figura 5-34: Comparación de las precipitaciones del análisis de frecuencia en la estación Cuncumén de cada proyección con las precipitaciones del análisis de frecuencia de la DGA (Fuente: Elaboración propia).

Se observa que las precipitaciones de todos los periodos de retorno para ambas proyecciones son menores a las observadas por la DGA, por lo tanto, a pesar de su cercanía el factor que se aplicará a las precipitaciones futuras de la proyección ESM2M, será para aumentarlas.

Para la estación La Tranquilla, se obtienen las precipitaciones según cada periodo de retorno de ambos modelos y se comparan con las observadas por la DGA según la Figura 5-35:

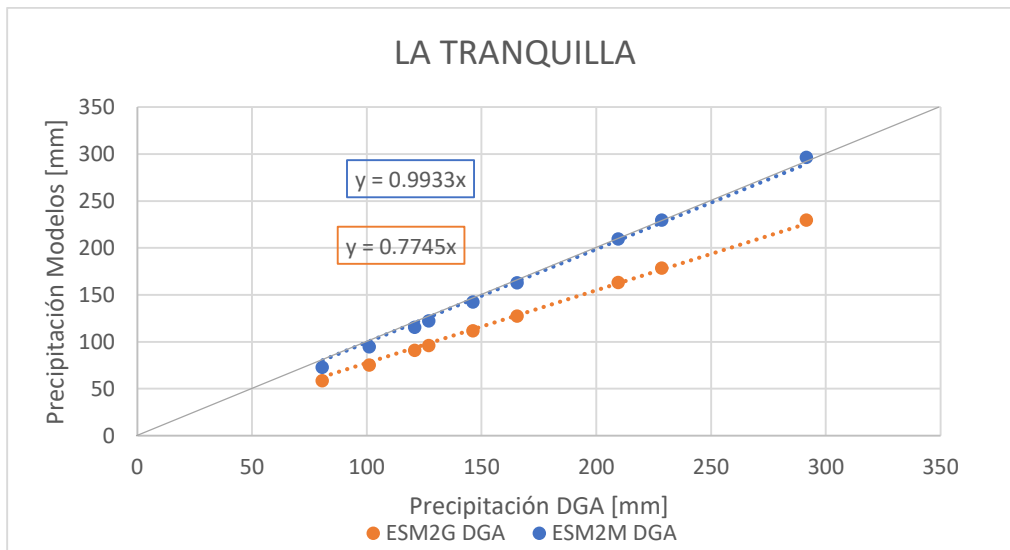


Figura 5-35: Comparación de las precipitaciones del análisis de frecuencia en la estación La Tranquilla de cada proyección con las precipitaciones del análisis de frecuencia de la DGA (Fuente: Elaboración propia).

Se observa que las precipitaciones en esta estación se asemejan en gran medida a la proyección ESM2M, correspondiendo al buen ajuste analizado anteriormente. Sin embargo, se observa que, para los periodos de retorno bajos, las precipitaciones del modelo son menores a las observadas por la DGA, y para los periodos de retorno altos algunos valores son mayores, entonces el factor aplicable a este modelo será de amplificación para periodos de retorno menores y de reducción para los más altos.

Según las precipitaciones mostradas en la Figura 5-34 y Figura 5-35, para el Modelo ESM2M se calculan los siguientes factores de corrección:

Tabla 5-45: Factores aplicables a las precipitaciones futuras de la proyección ESM2M (Fuente: Elaboración propia).

Periodo de Retorno	10	100	1000	10000
CUNCUMÉN	1,091	1,049	1,032	1,023
LA TRANQUILLA	1,067	1,016	0,995	0,984

Con los factores de la Tabla 5-45, se podrán modificar las Precipitaciones Futuras de cada estación según cada periodo de retorno.

En el caso de la PMP, se presentan el detalle del cálculo para cada estación de análisis:

Tabla 5-46: Variables que intervienen en el cálculo de la Precipitación Máxima Probable de la proyección ESM2G y sus valores dependiendo del método (Fuente: Elaboración propia).

Parámetro	Cuncumén y La Tranquilla
P_n [mm]	45
σ_n [mm]	32
P_{n-1} [mm]	42
σ_{n-1} [mm]	29
P_c [mm]	54
σ_c [mm]	33
K_M	17
K_M Stowhas	11
PMP_H [mm]	623
PMP_S [mm]	417
$PMP_{S\ cord}$ [mm]	321

Se puede apreciar, que para ambas estaciones se obtienen los mismos valores de precipitación. Esto ocurre debido a la resolución del modelo NEX GDDP de malla de 25 [km], y las estaciones se encuentran a una distancia de 4,7 [km].

Se toma la mayor PMP según Stowhas (PMP_S y $PMP_{S\ cord}$ en la Tabla 5-46) y se lleva a la cota media de la cuenca mediante el factor amplificador planteado por el gradiente de precipitaciones 1,34.

Sin embargo, teniendo en cuenta la PMP del modelo llevada a la cota media de la cuenca de 558 mm, y la PMP de los datos de la DGA en la cota media de 559 mm, se debe aplicar un leve factor amplificador para la PMP futura proyectada. El factor amplificador para a PMP calculado es de 1,003.

Lo anterior ocurre debido a que, el análisis de frecuencia de la estación Caimanes plantea que los valores del modelo se encuentran levemente por debajo de los valores de precipitación medidos por la DGA.

5.4.3.4 Precipitaciones Futuras

Se realiza el análisis de frecuencia de los modelos de proyección de precipitaciones de RCP4.5 y RCP8.5 para cada estación, y se observa que las distribuciones Log Normal y Log Pearson son las únicas que no rechazan a ninguno de los dos test de bondad de ajuste. Finalmente se obtienen las precipitaciones corregidas por los factores de la Tabla 5-45 mediante la distribución Log Normal (análisis gráfico en ANEXO F):

Tabla 5-47: Precipitaciones en mm para las tres estaciones con RCP4.5 y RCP 8.5 estimadas por el análisis de frecuencia (Fuente: Elaboración propia).

RCP	Estación	Distribución Seleccionada	Periodo de Retorno [años]			
			10	100	1.000	10.000
4.5	Cuncumén	Log Normal	84	206	400	695
	La Tranquilla		83	199	386	669
8.5	Cuncumén		80	202	401	709
	La Tranquilla		79	196	387	682

En la Tabla 5-47, se indica que la distribución seleccionada para ambas estaciones es Log Normal. Es importante destacar que no se rechazan las hipótesis del test de bondad de Kolmogorov-Smirnov, y del test χ^2 , por lo tanto, se aceptan los resultados.

El análisis de frecuencia con la distribución Log Normal para ambas estaciones se presenta en el ANEXO E.

El gradiente de precipitaciones es realizado con las precipitaciones de dos estaciones de la DGA, Cuncumén y La Tranquilla, para los 10 años de periodo de retorno.

Con las expresiones lineales de gradientes entregadas en base a estos dos puntos, se estiman las precipitaciones diarias máximas para la cota media de la cuenca:

Tabla 5-48: Precipitaciones en mm representativas de la cuenca aportante al depósito de relaves para cada RCP (Fuente: Elaboración propia).

RCP	Cota	P(T=10)	P(T=100)	P(T=1.000)	P(T=10.000)
4.5	2450	110	267	520	902
8.5		104	262	520	919

Se calculan los factores de amplificación para llevar las precipitaciones de la estación Cuncumén a la cota media de la cuenca de 1,3 para RCP4.5 y para RCP8.5.

A continuación, se presentan las precipitaciones de las estaciones analizadas para ambas RCPs y corregidas por los factores que se obtienen de los gradientes pluviométricos:

Tabla 5-49: Precipitación Máxima Probable futura dependiendo del método y RCP
(Fuente: Elaboración propia).

Estaciones	CUNCUMÉN Y LA TRANQUILLA	
	4.5	8.5
RCP		
PMP_H [mm]	794	906
PMP_S [mm]	505	571
PMP_{S no cord} [mm]	299	291

Para el análisis de la cuenca aportante al depósito de relaves, se escoge la mayor PMP de la Tabla 5-49 para cada escenario, según los métodos de Stowhas. Luego, se llevan estos valores a la cota media de la cuenca utilizando el factor 1,3. Se tiene para RCP4.5 una PMP de 657 [mm] y para RCP8.5 se tendrá una PMP de 742 [mm].

Cabe destacar que las PMP para ambas estaciones es la misma, ya que el modelo NEX GDDP no alcanza a diferenciar su ubicación por la malla de 25 [km].

5.4.4 Comparación de situación actual y futura.

En la Tabla 5-13 y Tabla 5-14 se presentan las precipitaciones para las estaciones de la DGA y para la cota media de la cuenca respectivamente, presentando los datos de la línea base y escenarios de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5

Tabla 5-50: Precipitaciones de la línea base y de las proyecciones futuras, para cada estación de la DGA
(Fuente: Elaboración propia).

T	CUNCUMÉN			LA TRANQUILLA		
	Línea Base	RCP 4.5	RCP 8.5	Línea Base	RCP 4.5	RCP 8.5
10	103	84	80	101	83	79
100	171	206	202	165	199	196
1.000	237	400	401	229	386	387
10.000	303	695	709	292	669	682
PMP	418	505	571	378	505	571

Tabla 5-51: Precipitaciones de la línea base y las proyectadas a futuro, para la cota media de la cuenca
(Fuente: Elaboración propia).

T	COTA MEDIA CUENCA		
	Línea Base	RCP 4.5	RCP 8.5
10	138	110	104
100	228	267	262
1.000	317	520	520
10.000	405	902	919
PMP	559	657	742

Cabe destacar que la precipitación para T=10.000 años es superior a la PMP, por lo tanto, deben limitarse los valores a esta última estimación.

5.5 Análisis

Se pronosticó que los cambios en la precipitación no serían uniformes. En las latitudes altas de Chile se espera un aumento en la precipitación media anual debido al escenario RCP8.5 y que disminuya en regiones secas de latitud media. También el escenario RCP 8.5 pronostica que en las regiones húmedas de latitud media la precipitación media aumente.

Por otro lado, también se pronostica el aumento en la intensidad y frecuencia de precipitaciones extremas en la mayoría de las regiones de latitud media.

Todo lo anterior se reafirma con los resultados obtenidos. En el depósito de relaves Carén, resultó ser que las precipitaciones aumentan según cada periodo de retorno. Las precipitaciones del escenario RCP 8.5 son mayores que las correspondientes al escenario RCP 4.5, lo que hace lógica de que a mayor concentración de GEI mayor efecto del cambio climático.

Por otro lado, las precipitaciones extremas (PMP) también revelan los mismos resultados.

Las diferencias porcentuales se presentan a continuación:

Tabla 5-52: Aumento porcentual con respecto a la situación base, en las precipitaciones máximas diarias de la cota media de la cuenca afluyente al depósito de relaves Carén [%] (Fuente: Elaboración propia).

T	10	100	1.000	10.000	PMP
4.5	14	18	19	20	44
8.5	40	48	51	53	75

En el caso del depósito de relaves Pampa Pabellón, se repite el mismo patrón que en Carén con respecto al aumento de la precipitación futura de acuerdo al aumento en las concentraciones de GEI. Sin embargo, a pesar de aplicar factores de amplificación calculados con el periodo de línea base para corregir el modelo, se obtienen precipitaciones futuras menores a las actuales. Esto confirma la predicción que, para latitudes bajas, las precipitaciones disminuirán. El porcentaje de reducción para cada periodo de retorno y escenario, se presentan a continuación:

Tabla 5-53: Reducción porcentual con respecto a la situación base, en las precipitaciones máximas diarias de la cota media de la cuenca afluyente al depósito de relaves Pampa Pabellón [%] (Fuente: Elaboración propia).

T	10	100	1.000	10.000	PMP
4.5	-17	-23	-27	-28	-16
8.5	-4	-10	-14	-15	-3

En el depósito de relaves Mauro, se proyectan precipitaciones mayores que las observada hasta el 2005 por la DGA para casi todos los periodos de retorno y escenarios analizados, exceptuando el escenario RCP4.5 con precipitación de 10 años de periodo de retorno.

Por otro lado, el comportamiento de las PMP se mantiene el aumento al igual que la concentración en los GEI hacia el año 2100 (RCP8.5). Todo lo anterior se refleja en la Tabla 5-54.

:

Tabla 5-54: Cambio porcentual con respecto a la situación base, en las precipitaciones máximas diarias de la cota media de la cuenca afluyente al depósito de relaves Mauro [%]
(Fuente: Elaboración propia).

T	10	100	1.000	10.000	PMP
4.5	-3	2	4	6	19
8.5	10	14	17	18	29

Finalmente, para el depósito de relaves Quillayes se obtuvo algo similar a lo del depósito Mauro. Las precipitaciones para ambos escenarios para las precipitaciones de periodo de retorno 10 años, se proyectan menores a las medidas hasta el año 2005 por la DGA. Sin embargo, se debe observar en la Tabla 5-55 que a medida que los periodos de retorno aumentan, el valor de la precipitación máxima diaria también lo hará. Lo anterior significará que la precipitación aumentará a medida que el evento tenga menor probabilidad. Sin embargo, las PMP a pesar de que aumentarán hacia el año 2100 para ambos escenarios, lo hace en menor medida que las precipitaciones con periodos de retorno 1.000 y 10.000 años.

Tabla 5-55: Reducción porcentual con respecto a la situación base, en las precipitaciones máximas diarias de la cota media de la cuenca afluyente del depósito de relaves Quillayes [%]
(Fuente: Elaboración propia).

T	10	100	1.000	10.000	PMP
4.5	-20	17	64	123	18
8.5	-25	15	64	127	33

Siguiendo con el mismo análisis de las precipitaciones menos frecuentes, para los eventos de PMP se pronostica un mayor aumento a medida que también lo hacen los GEI en la atmósfera, esto es bajo el escenario RCP 8.5.

Se debe tener en cuenta que en este informe sólo se utilizan dos de las 21 proyecciones del modelo NEX GDDP como modo de ejemplificar y demostrar las proyecciones entregadas por este, por lo tanto, los resultados obtenidos variarán según la proyección y ubicación de la cuenca a analizar. Esto fue demostrado mediante el análisis de cuencas en distintas zonas de Chile, con variados climas y geografías.

Por otro lado, la comparación de ambos escenarios utilizados (RCP4.5 y RCP8.5) demuestra que a mayor concentración de GEI, se ratifica la tendencia a la disminución o aumento de las precipitaciones en cada zona analizada. Lo anterior da cuenta que además de considerar resultados distintos según ubicación y proyección, también se tienen diferentes resultados según el escenario a considerar.

6 EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL DEPÓSITO DE RELAVES CARÉN

6.1 Antecedentes

En el Estudio de Impacto Ambiental de proyecto "Peraltamiento Embalse Carén" (2007) se detallan las obras que componen el depósito de relaves Carén hasta su cierre. Dentro de ellas menciona:

- Muro principal y muro auxiliar "Sotello" en sector Sur Poniente del depósito
- Sistema de evacuación de crecidas y de aguas claras
 - Vertedero Morning Glory (pique, túnel de evacuación, obra disipadora de descarga)
 - Torre de evacuación
 - Canal de conducción
- Caminos de operación y acceso*
 - Camino de acceso conexión a obras.
 - Camino de acceso a zanja drenaje.
 - Camino de acceso a rampa.
 - Camino a torre de captación.
 - Camino Tramo B.

*El detalle de los tipos de caminos se obtiene del proyecto sometido a DIA "Ajustes de Aspectos Constructivos en Proyecto Peraltamiento Embalse Carén, Séptima Etapa" (CODELCO, 2017) en donde se presenta la ubicación de cada camino:

6.1.1 Muros

El Estudio de Impacto Ambiental (2007) menciona que el proyecto considera 12 etapas y que, para este estudio en particular, se consideran de la quinta a la duodécima etapa. Se realiza el peraltamiento periódico de los muros principal y auxiliar debido a los volúmenes crecientes de producción. El peraltamiento del muro principal sucede en cada una, mientras que el muro auxiliar Sotello crece sólo en las etapas séptima, novena, décima, undécima y duodécima.

El muro principal y auxiliar son de tipo enrocado con un núcleo impermeable. Para el peraltamiento del muro se considera relleno estructural homogéneo de material enrocado, con una pantalla de hormigón en su talud aguas arriba unido al núcleo impermeable, por medio de un plinto articulado y un muro cortafuga de hormigón armado.

Se detallan a continuación las características del muro principal y auxiliar para cada etapa de crecimiento:

Tabla 6-1: Detalle entre las etapas séptima a duodécima del peraltamiento del muro principal.

Fuentes: EIA (2007) y DIA (2017) .

Etapa Muro Sotello	Etapa Muro Principal	Cota Coronamiento (m.s.n.m)	Peralte (m)	Altura Total Muro Principal (m)	Longitud Coronamiento Muro Auxiliar(m)	Longitud Coronamiento Muro Principal(m)
	5 ^a	219	9,2	80	-	946
	6 ^a	228	9	89	-	970
1 ^a	7 ^a	237	9	98	182	1.090
-	8 ^a	246	9	107	-	1.105
2 ^a	9 ^a	254	8	115	215	1.122
3 ^a	10 ^a	262	8	123	250	1.134
4 ^a	11 ^a	270	8	131	289	1.145
5 ^a	12 ^a	276	6	137	304	1.152

Según el Catastro de Embalses de la DGA (2011) el muro principal de cota 219 [m.s.n.m] (quinta etapa), cuenta con aliviaderos de presión de agua constituidos por un dren chimenea inclinado y una alfombra drenante hacia aguas abajo. También menciona que la revancha mínima que presenta el muro en relación al nivel de aguas máximas apreciado es de aproximadamente 5 [m].



Figura 6-1: Vista talud aguas arriba del muro principal del Depósito de Relaves Carén (DGA, 2011).

6.1.2 Sistema Evacuador de Crecidas y Aguas Claras

En el EIA (CIMM T&S, 2007), se menciona que el vertedero Morning Glory conecta su pique al túnel evacuador excavado en roca, el cual descarga las aguas a un canal ubicado al lado izquierdo del muro principal al cauce del estero Carén. Este vertedero es diseñado para evacuar la crecida de período de retorno 1000 años durante la operación del embalse. Además, se proyecta la construcción de un nuevo vertedero Morning Glory y su correspondiente pique etapa por medio, comenzando desde la quinta etapa. Sin embargo, se construye un túnel evacuador de crecidas, un disipador de descarga

y un canal conductor en la séptima etapa. En las etapas que no se construye un nuevo vertedero evacuador, se proyecta el peralte del vertedero que ya está en operación para aumentar su vida útil.

Por otro lado, este catastro (DGA, 2011) menciona que el vertedero Morning Glory construido en la tercera etapa y peraltado en la cuarta etapa, contiene un pique de 46 [m] de longitud y 3 [m] de diámetro con capacidad para la crecida milenaria ($119 \text{ m}^3/\text{s}$) manteniendo la revancha mínima de 1 [m] excepto en el último año de cada etapa donde se acepta sin revancha, presentando las siguientes características de operación en la tercera y cuarta etapa:

Tabla 6-2: Característica de obras de evacuación de emergencia (DGA, 2011).

Características	Vertedero	Peralte Vertedero
Etapas	Tercera	Cuarta
Cota Umbral [m.s.n.m]	196,70	205,00
Q Peak crecida T=1.000 años [m^3/s]	737	
Cota máxima de Aguas [m.s.n.m] (último año de cada etapa)	201,42	209,50
Caudal Máximo Evacuado [m^3/s]	94,90	93,70

Además, este catastro (DGA, 2011) menciona que el diámetro del umbral del vertedero Morning Glory es de 6 [m] con una altura total de 79 [m].

Según la EIA (2007), existe una torre de captación que en operación normal descarga las aguas claras hacia una planta de Molibdeno, por lo que no será de análisis en este Acápite. Sin embargo, esta torre se va sellando mediante losetas a medida que el nivel de los relaves va aumentando. Para evitar la descarga de relaves a través de las aguas claras, se considera un nivel de seguridad de 3 [m] entre el umbral de las losetas y el nivel de los relaves.

Se presenta en la Figura 6-2 una vista del vertedero descrito, desde el talud aguas arriba del muro principal:



Figura 6-2: Vista del vertedero Morning Glory (DGA, 2011).

Finalmente, el catastro (DGA, 2011) menciona que la obra de entrega al cauce natural que se encuentra operativa es un canal trapecial construido en mampostería de dimensiones:

Tabla 6-3: Características de canal de entrega a cauce natural (DGA, 2011).

Parámetro	Valor
B [m]	2
H [m]	4
T [H/V]	1

6.1.3 Caminos y Atravesos

Se presenta a continuación la ubicación de los caminos mencionados en la DIA “Ajustes de Aspectos Constructivos en Proyecto Peraltamiento Embalse Carén, Séptima Etapa” (CODELCO, 2017):

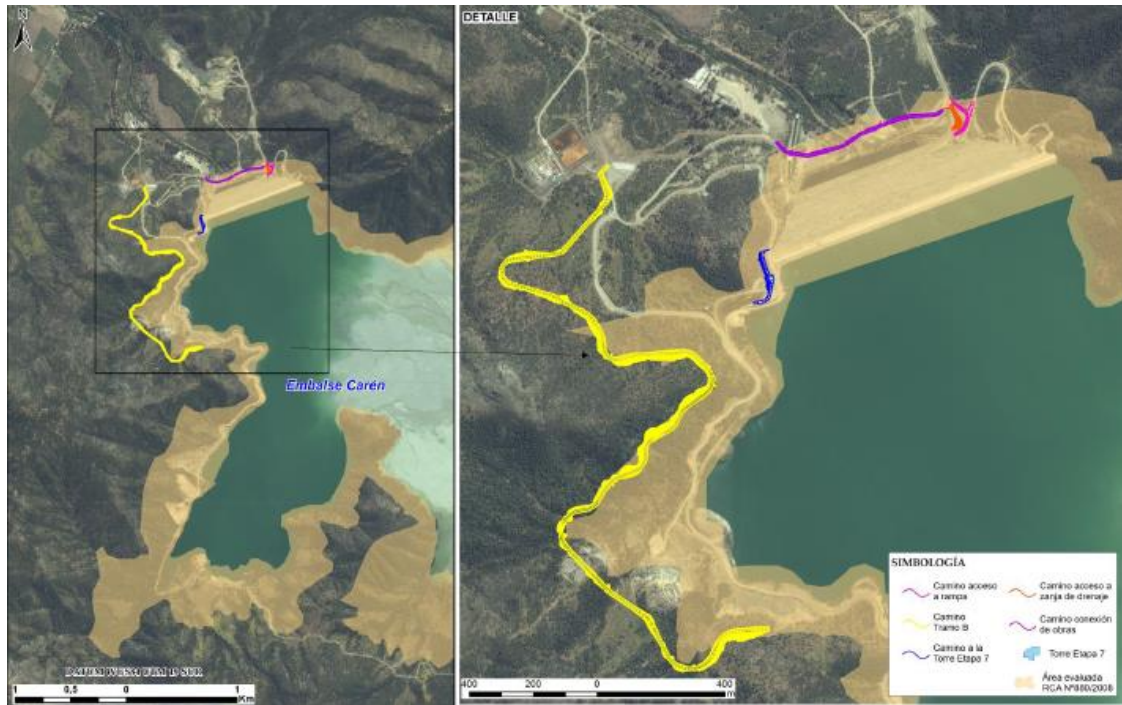


Figura 6-3: Ubicación caminos proyecto “Ajustes de Aspectos Constructivos en Proyecto Peraltamiento Embalse Carén, Séptima Etapa” (CODELCO, 2017).

En el caso de los caminos de operación y acceso se considera su construcción en todas las etapas desde la quinta a la duodécima, debido a la inundación de estos a medida que el depósito crece. El Camino Tramo B es el único que permanecerá operativo hasta el término de la vida útil del depósito, y a lo largo de su trazado poseerá 16 atravesos de quebradas diseñados con escurrimiento eventual sólo en caso de precipitaciones. Las obras de cruce serán alcantarillas, badenes y bajadas de agua detalladas a continuación en la Figura 6-4:



Figura 6-4: Obras de arte par Camino Tramo B (CODELCO, 2017).

Las alcantarillas serán de acero corrugado de 1 [m] de diámetro y el cajón de hormigón armado de 2x2 [m]. Se considera revestimiento de lecho con mampostería de piedra a la entrada y salida de cada alcantarilla como elementos de protección.

Las bajadas de agua serán construidas mediante tubos de media caña y la sección tipo de los contrafosos se detalla a continuación en la Figura 6-5.

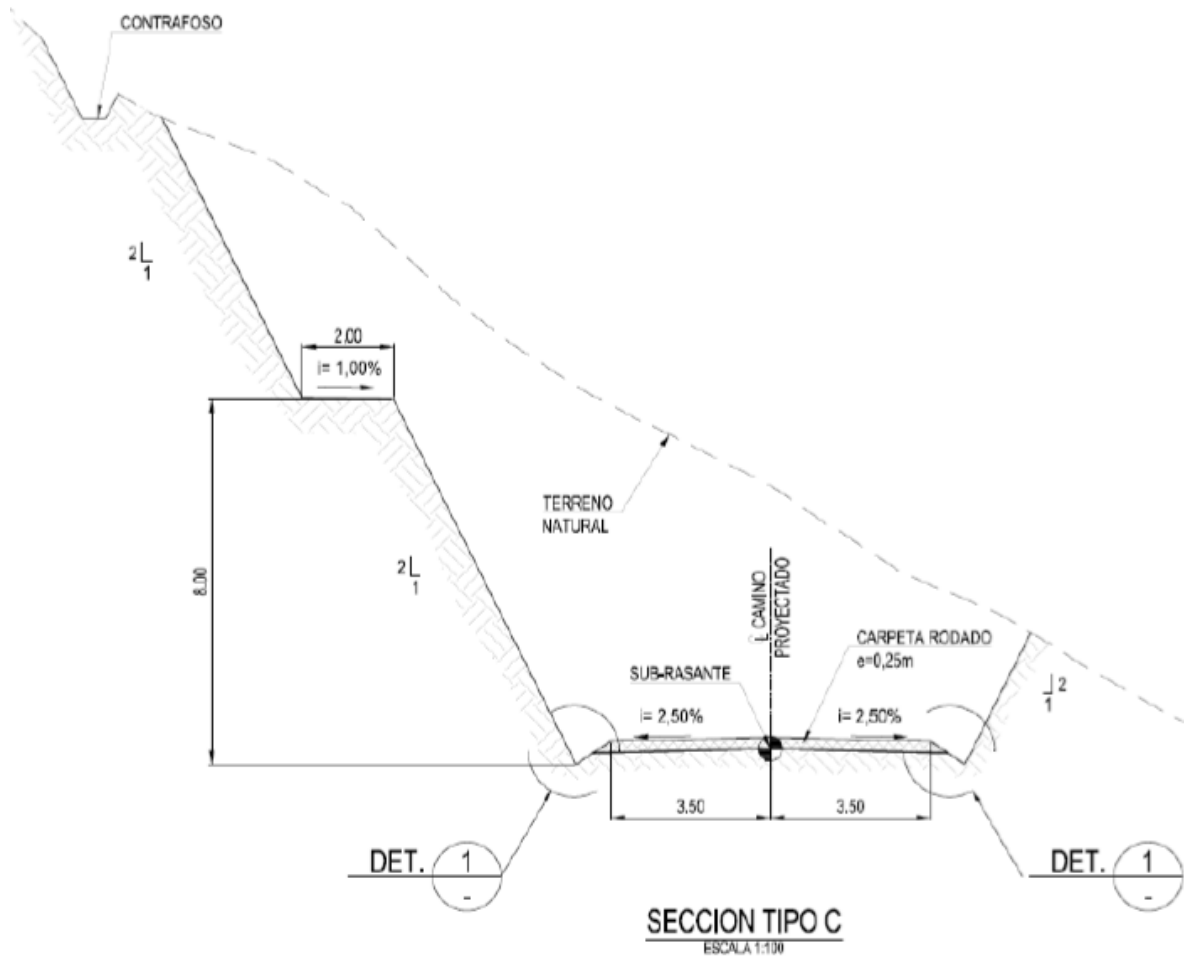


Figura 6-5: Sección tipo contrafoso proyectado (CODELCO, 2017).

Este depósito de relaves no considera canal de contorno por lo que la totalidad de las aguas lluvias de la cuenca aportante ingresan a la cubeta del depósito.

Al término de la duodécima etapa del proyecto, se realizará el cierre del depósito cuando el nivel teórico de relaves en el muro junto al vertedero alcance la cota estimada de 268,5 [m.s.n.m.] y el coronamiento de los muros sea de 276 [m.s.n.m], por lo tanto, cuando el muro principal tenga una altura total de 137 [m].

De acuerdo con el Plan de Cierre de la Faena (SERNAGEOMIN, 2015), el término de las operaciones para la faena será en el año 2046. Luego, se considera una etapa de cierre de 5 años hasta el año 2051 y una etapa de post cierre hasta el año 2061 en los 10 años siguientes.

En la etapa de cierre no se podrá dejar en operación obras que requieran mantención, por lo tanto, se sellará el vertedero y el túnel de descarga y se contempla la construcción de un vertedero de seguridad que evacúe las aguas naturales afluentes y la CMP, que no requiera de operación alguna.

En la etapa de post cierre se verifica la estabilidad física del depósito abandonado.

Se consideran las siguientes suposiciones para el modelamiento de las crecidas:

- ◆ Se asume que actualmente se encuentra construida la sexta etapa, donde la cota del muro principal es de 228 [m.s.n.m].
- ◆ Se supone que el Caudal de diseño del vertedero Mornign Glory es de 94 [m^3/s] (ver Tabla 6-2) correspondiente a un periodo de retorno de 1.000 años, ya que sólo en el 2015 se publica el Decreto 50. La cota umbral de vertedero se asume de 223 [m.s.n.m], ya que conservadoramente a mayor cota se presenta menor revancha entre el coronamiento del vertedero y el muro principal, y se asume un aumento de 10 [m] en la cota de coronamiento por cada etapa desde la cuarta etapa en la Tabla 6-2.
- ◆ Con lo anterior, se asume que actualmente existe una Revancha de 5 [m] desde el coronamiento del vertedero al coronamiento del muro.
- ◆ Las dimensiones del Vertedero Morning Glory se asumen:
 - ◆ Diámetro Externo en umbral de 6 [m]
 - ◆ Diámetro Pique de 3 [m]
 - ◆ La profundidad de aproximación será de 3 [m] (considerando el nivel de seguridad de la torre de captación (CIMM T&S, 2007))
- ◆ Los atravesos se diseñan y verifican de acuerdo al Decreto 50 (MOP, 2015).
- ◆ Conservadoramente se asume que el depósito de relaves se encuentra lleno (la cota de la laguna de aguas claras está en la cota de umbral del vertedero), por lo cual no aporta capacidad de regulación y todo el volumen de la crecida se evacuará por el vertedero y se acumulará en el volumen correspondiente a la revancha entre el coronamiento del vertedero y el muro.

6.2 Morfología de la cuenca aportante

Para calcular el área aportante presentado en el Acápite 5.1.1, se utiliza el Software Global Mapper v17 cargando los datos de elevación de terreno del ASTER GDEM. Con estas elevaciones se encuentran los cauces definidos en la zona e identificando el punto de aforo del cauce principal, ubicado en el muro del depósito de relaves, se calcula el área aportante a ese punto. Se muestra lo anterior en la Figura 6-6:

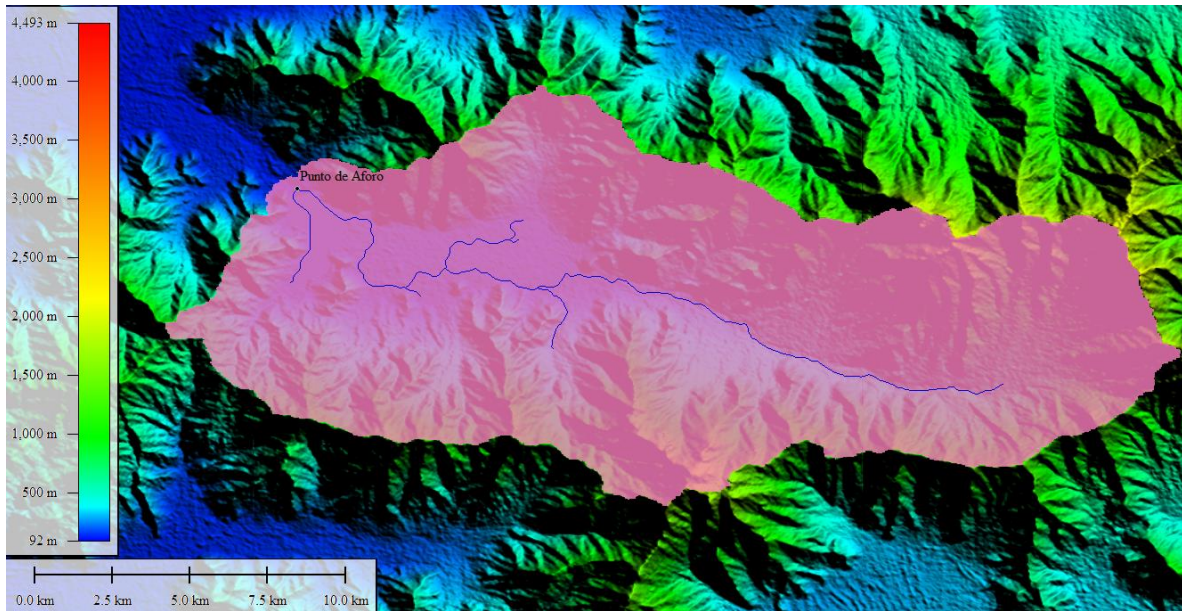


Figura 6-6: Vista de la información entregada por Global Mapper (Fuente: Elaboración propia).

Con estos datos, se utiliza el programa QGis 2.18.18 para ubicar el centroide del área aportante obtenida con Global Mapper.

Se descargan los archivos raster de elevaciones correspondientes a la zona del depósito de relaves de la página del Servicio Geológico de los Estados Unidos (<https://earthexplorer.usgs.gov/>), y se cargan junto con el área aportante al depósito de relaves. Se obtienen así los valores de pendiente y cota media de la cuenca, las curvas de nivel cada 10 metros y la máxima y mínima cota en ella.



Figura 6-7: Curvas de nivel cada 10 [m] calculadas con el programa Qgis (Fuente: Elaboración propia).

Finalmente, con el programa Google Earth, cargando el cauce y la ubicación del centroide que definen la cuenca aportante, se mide la longitud del cauce principal y del centroide hasta el punto de aforo.

Los parámetros morfológicos de la cuenca afluente al depósito de relaves son los entregados en la Tabla 6-4:

Tabla 6-4: Parámetros morfológicos de la cuenca aportante al depósito de relaves (Fuente: Elaboración propia).

Parámetro	Simbología	Valor	Unidad
Área pluvial aportante	A	214,3	Km ²
Longitud del cauce principal	L	23,8	km
Longitud desde el centro de gravedad de la cuenca al punto de salida	L_g	14,3	km
Pendiente media de la cuenca	S	0,2048	m/m
Cota media de la cuenca	H_m	720	m
Cota máxima	H_{max}	2.074	m
Cota mínima	H_{min}	200	m
Desnivel Máximo	ΔH	1.874	m

6.3 Crecida

Se estima mediante el Hidrograma Sintético tipo Linsley el caudal de crecida y luego el hidrograma de crecida. Con este último se calcula el volumen de crecida asociado a cada periodo de retorno y la CMP.

Con los parámetros morfológicos de la cuenca de la Tabla 6-4 se plantean los parámetros del HUS Linsley tal como se menciona en el Acápito 3.1.2:

Tabla 6-5: Parámetros para HUS Linsley (Fuente: Elaboración propia).

Parámetro	símbolo	Valor	Unidad
Tiempo peak	t_p	5,28	horas
Caudal peak	q_p	38,31	L/sKm ²
Tiempo base	t_B	20,54	horas
Duración efectiva	t_{LL}	0,96	horas
Tiempo real	t_R	1	horas
Tiempo peak corregido	t_{pc}	5,29	horas
Caudal peak corregido	q_{pc}	38,25	L/sKm ²
Tiempo base corregido	t_{Bc}	20,57	horas

La curva número de la cuenca aportante debe ser compuesta debido a los diferentes tipos de suelos presentes en la cuenca. La curva compuesta se definirá con la ponderación de las áreas aportantes del terreno natural, los relaves en la cubeta y la laguna de aguas claras.

Para el terreno natural se calcula la curva número mediante la Ecuación (6-1) presentada en el Manual de Cálculo de Crecidas sin Información Fluviométrica (DGA, 1995):

$$CN = 11,9 + 73,7 \cdot \text{Log}(\text{lat} - 25^\circ) \quad (6-1)$$

Ya que el centroide de la cuenca aportante se encuentra en los 34.13°LS, la curva número para el terreno natural será de 83.

Se define una curva número igual a 90 para la playa de relaves y de 100 para la laguna de aguas claras ya que la precipitación sobre la laguna es un aporte directo a su volumen.

Se ponderan las curvas número anteriores por el porcentaje de área de cada tipo de suelo y se obtiene:

Tabla 6-6: Método de la curva número compuesta (Fuente: Elaboración propia).

Tipo Superficie Cuenca aportante	CN	Área [km ²]	% Área	CN estimado
Terreno natural	83	192,76	90,0	74
Relave	90	17,24	8,0	7
Laguna	100	4,26	2,0	2
Total		214,26	100	83,61

Se obtiene la curva número de la cuenca aportante al depósito de Relaves Carén de 83,61.

La precipitación efectiva se estima mediante el método de Stowhäs presentado en su libro (Stowhäs Borghetti, Fundamentos de Hidrología Aplicada, 2016). Este método propone las siguientes ecuaciones para estimar la infiltración inicial que se produce antes del punto de encharcamiento:

$$I_0 = 0,23 \cdot S \quad \text{si } P > 100 \text{ [m]}$$

$$I_0 = 2,3 \cdot 10^{-3} \cdot P \cdot S \quad \text{si } P < 100 \text{ [mm]}$$

Luego, para estimar la infiltración potencial propone la siguiente ecuación:

$$S = 25,4 \cdot \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (6-2)$$

Por lo tanto, para el terreno perteneciente a la cuenca aportante al depósito Carén la infiltración potencial será de 50 [mm].

Finalmente, la precipitación efectiva se estima mediante las relaciones:

$$P_{ef} = 0 \quad \text{si } P < 0,2 \cdot S$$

$$P_{ef} = \frac{(P - 0,2 \cdot S)^2}{P + 0,8 \cdot S} \quad \text{si } P \geq 0,2 \cdot S$$

Donde, P es la precipitación correspondiente a cada periodo de retorno.

El detalle de las precipitaciones efectivas tanto para los datos históricos como para las proyecciones RCP4.5 y RCP8.5 se presentan en el ANEXO G. También en este anexo se encuentran los Hietogramas de diseño obtenidos mediante la distribución Endesa para las precipitaciones asociadas a cada periodo de retorno.

El hidrograma adimensional propuesto por Stowhäs (2016) se presenta a continuación:

Tabla 6-7: Hidrograma adimensional utilizado (Stowhäs Borghetti, 2016).

t/t_p	0,0	0,3	0,5	0,6	0,8	1,0	1,3	1,5	1,8	2,3	2,7	3,0
q/q_p	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	0,8	0,6	0,4	0,2	0,1	0,0

Multiplicando este hidrograma con los parámetros de tiempo y caudal peak de la cuenca aportante a Carén, se obtiene el hidrograma de crecida de la cuenca el cual debe ser corregido para que el área bajo su curva sea equivalente a una lluvia de 1 [mm]. Luego, se discretiza el hidrograma anterior en intervalos de tiempo de 1 [h], obteniendo lo siguiente:

Tabla 6-8: HUS discretizado en 1 [h] (Fuente: Elaboración propia).

t [horas]	q [l/s mm km ²]
0	0,0
1	5,4
2	11,9
3	22,8
4	34,3
5	37,4
6	36,5
7	33,3
8	25,4
9	20,0
10	15,6
11	12,4
12	9,1
13	6,9
14	4,9
15	2,4
16	0,0

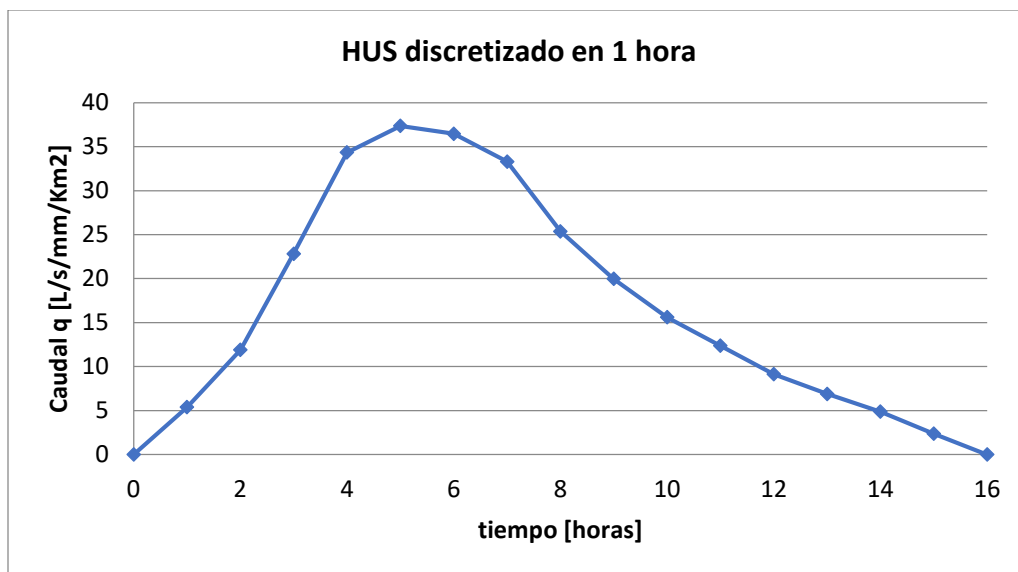


Figura 6-8: HUS corregido y discretizado a 1 hora (Fuente: Elaboración propia).

6.3.1 Caudal de Crecida

Se obtienen los caudales máximos instantáneos para las crecidas de la situación base y resultantes de la precipitación proyectada RCP4.5 y RCP8.5:

Tabla 6-9: Caudales máximos de crecidas en periodos histórico, proyección RCP4.5 y RCP8.5
(Fuente: Elaboración propia).

T [años]	Q_{max} [m^3/s]		
	Línea Base	Proyección RCP4.5	Proyección RCP8.5
100	650	784	1.021
1.000	909	1.104	1.436
10.000	1.168	1.420	1.845
CMP	1.414	1.691	1.863

Se presentan a continuación los hidrogramas de crecidas históricos, resultantes de las precipitaciones RCP4.5 y RCP8.5.

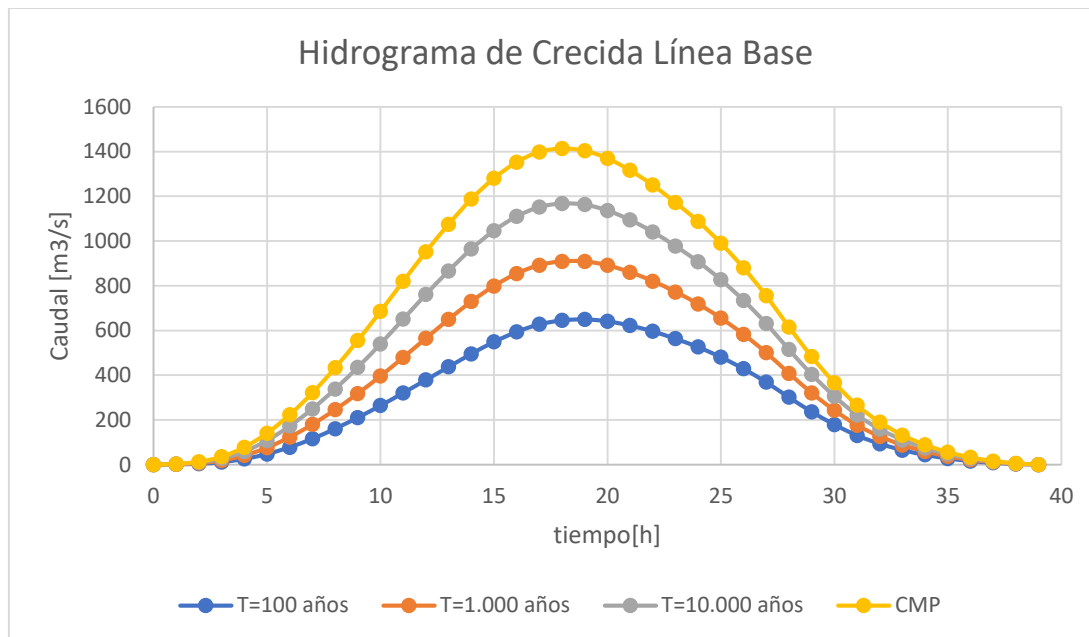


Figura 6-9: Hidrograma de crecida obtenido de las precipitaciones de la línea base
(Fuente: Elaboración propia).

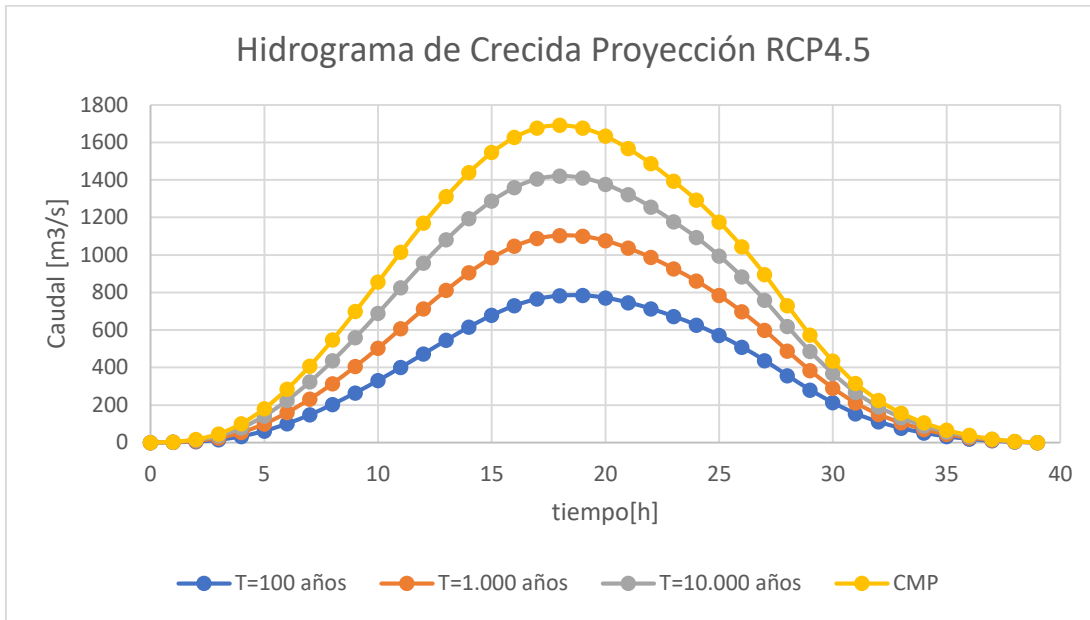


Figura 6-10: Hidrograma de crecidas obtenido de las proyecciones de precipitación con escenario RCP4.5 (Fuente: Elaboración propia).

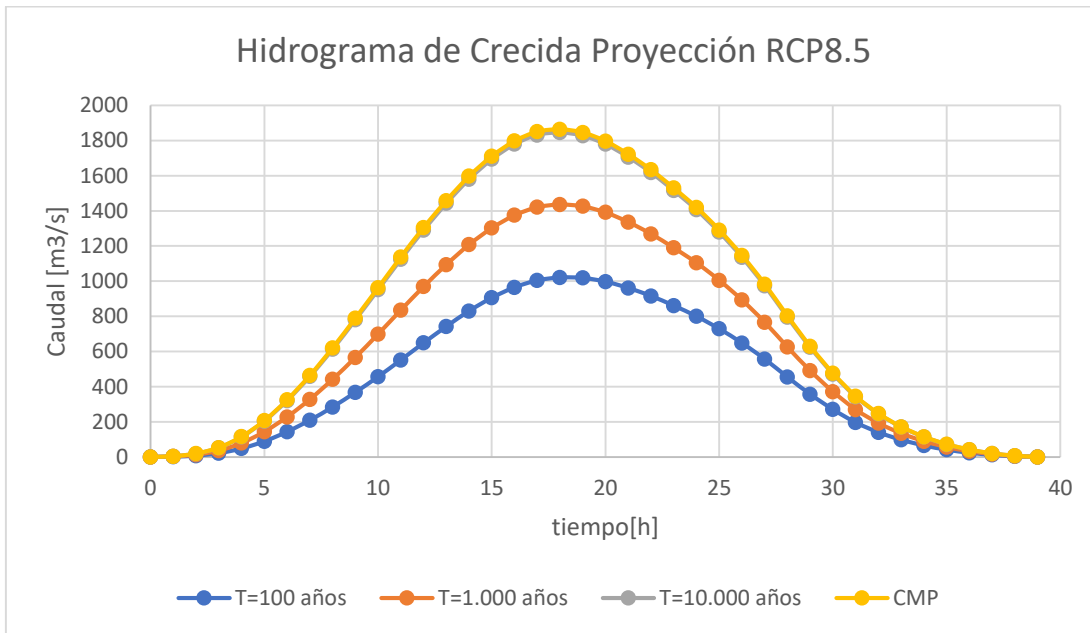


Figura 6-11: Hidrograma de crecidas obtenido de las proyecciones de precipitación con escenario RCP8.5 (Fuente: Elaboración propia).

6.3.2 Volumen de Crecida

Con los hidrogramas de crecida de la Figura 6-9, Figura 6-10 y Figura 6-11, se calculan los volúmenes de crecidas correspondientes para las crecidas históricas, del escenario RCP4.5 y del escenario RCP 8.5.

Tabla 6-10: Volúmenes de diferentes crecidas de datos de la línea base, escenario RCP4.5 y escenario RCP8.5 (Fuente: Elaboración propia).

T [años]	$V_{max} [Mm^3]$		
	Situación base	Escenario RCP4.5	Escenario RCP8.5
100	39	47	62
1000	55	68	89
10000	72	88	116
CMP	88	105	117

Como se aprecia en la Tabla 6-10, el volumen de la crecida aumentará según aumente el escenario de emisiones de GEI hacia el año 2100. Se comprueba que a medida que los caudales de las crecidas aumenten con los escenarios más desfavorables (como se observó en la Tabla 6-9), los volúmenes asociados a esas crecidas también lo harán.

Por otro lado, se observa en la Tabla 6-10 que los volúmenes de las crecidas aumentan con su periodo de retorno y que los volúmenes asociados a la CMP son mayores que los volúmenes asociados a las crecidas de 10.000 años de periodo de retorno.

6.4 Análisis de Resultados en las Obras Hidráulicas

Los atraviesos actualmente se diseñan según el Decreto 50, donde los periodos de retorno para su diseño son 100 años y para su verificación 150 años. Como el análisis de frecuencia no se realiza para 150 años directamente, se interpola la precipitación asociada a ese periodo de retorno en la Figura 6-12, el cual corresponde a las precipitaciones de diferentes periodos de retorno obtenidas del análisis de frecuencia de los datos históricos:

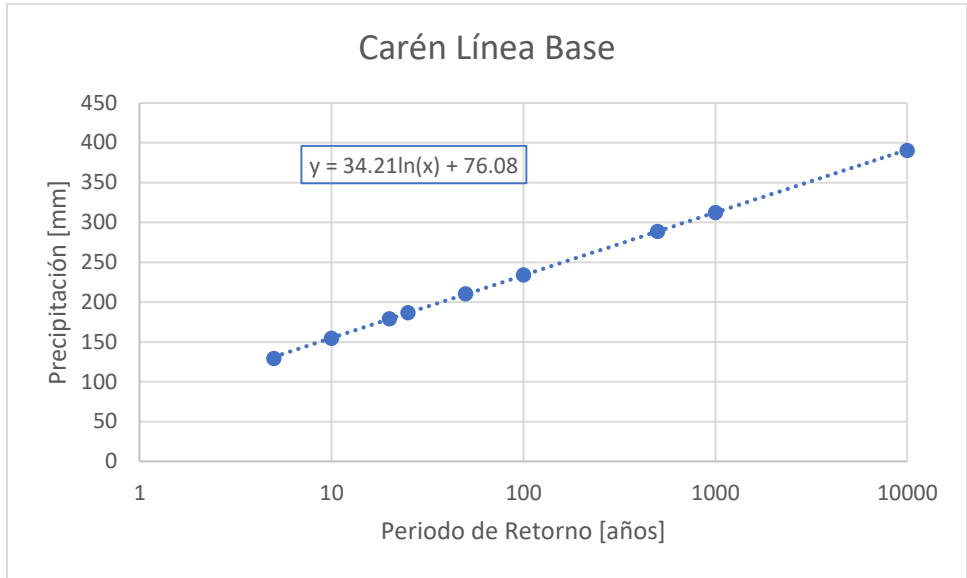


Figura 6-12: Análisis de frecuencia resultante de las precipitaciones históricas en Depósito de Relaves Carén (Fuente: Elaboración propia).

Con la línea de tendencia presentada, se estima la precipitación histórica asociada a 150 años de periodo de retorno de 247 [mm].

De forma similar se construyen las curvas resultantes del análisis de frecuencia de ambos escenarios. Para RCP4.5 se construye la siguiente figura:

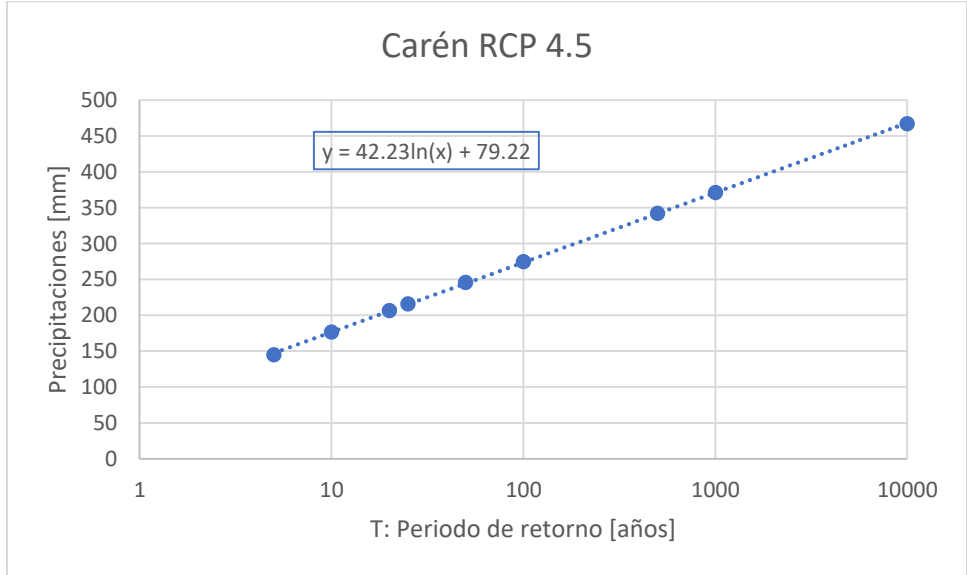


Figura 6-13: Análisis de frecuencia resultante del escenario RCP4.5 en el depósito de Relaves Carén (Fuente: Elaboración propia).

La precipitación asociada a 150 años de periodo de retorno de las precipitaciones modeladas por efecto del escenario RCP4.5 es de 291 [mm].

Para RCP8.5 se construye la siguiente figura:

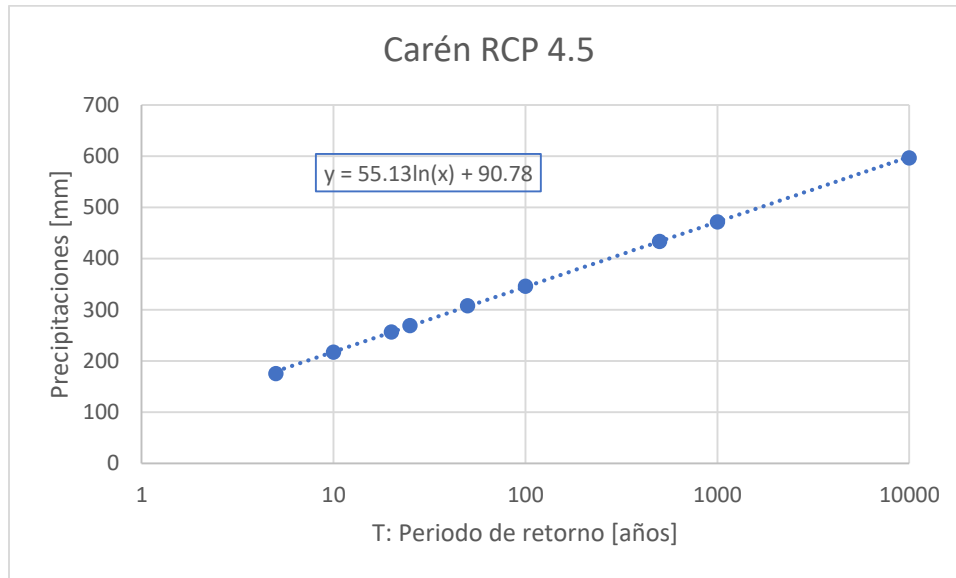


Figura 6-14: Análisis de frecuencia resultante del escenario RCP8.5 en el depósito de Relaves Carén (Fuente: Elaboración propia).

La precipitación asociada a 150 años de periodo de retorno de las precipitaciones modeladas por efecto del escenario RCP4.5 es de 367 [mm].

A modo de resumen, se presenta el cambio debido a los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 en las precipitaciones de diseño y verificación de los atraviesos de caminos:

Tabla 6-11: Precipitaciones para el diseño y verificación de atraviesos de caminos (Fuente: Elaboración propia).

Periodo de Retorno T [años]	Precipitaciones línea base [mm]	Precipitaciones RCP4.5 [mm]	Precipitaciones RCP8.5 [mm]
100	234	275	346
150	247	291	367

Luego, se realiza el análisis de cómo tendrían que cambiar los periodos de retorno de diseño y verificación si se quisiesen diseñar estas obras de acuerdo con las proyecciones de precipitaciones futuras. Para esto, se asocian las precipitaciones de ambos escenarios de periodos de retorno de 100 y 150 años, y se ingresan a la ecuación de la línea de tendencia presentada en la Figura 6-12 para despejar los periodos de retorno de diseño y verificación correspondientes de los datos históricos de precipitaciones. Para el escenario RCP4.5 resulta que los periodos de retorno de diseño y verificación de las obras se modificarían a 335 años de periodo de retorno para el diseño y de 535 años para la verificación. Ahora, para el escenario RCP8.5 resultan 2.670 años de periodo de retorno para el diseño y 4.933 años para verificación.

En el caso del vertedero de seguridad, actualmente tiene una capacidad asociada a una precipitación de 1.000 años de periodo de retorno correspondiente a 312mm.

La precipitación de 1.000 años de periodo de retorno de los datos de precipitaciones históricas en la cuenca aportante al depósito Carén, tiene sus precipitaciones equivalentes en los escenarios RCP4.5 y RCP8.5, por ende, provocan volúmenes de crecida afluente al depósito distintos.

Con los valores de las crecidas de las precipitaciones históricas de 100, 1.000 y 10.000 años de periodo de retorno, se construye la siguiente curva del volumen de crecida:

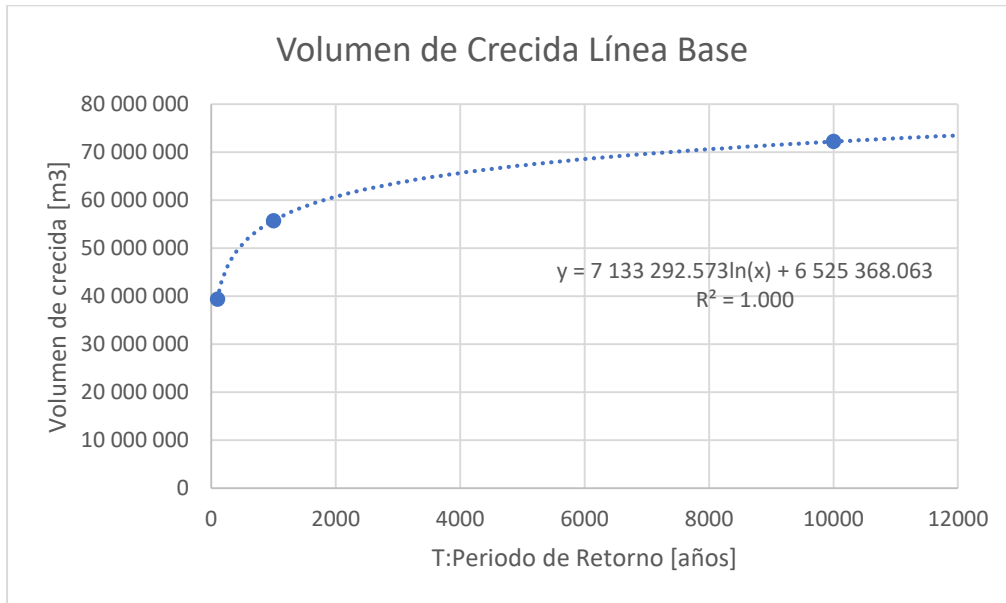


Figura 6-15: Relación entre volumen de crecida y periodo de retorno en la Cuenca Carén (Fuente: Elaboración propia).

Como se puede observar en la Figura 6-15, la línea de tendencia se ajusta perfectamente a los volúmenes calculados con los periodos de retorno 100, 1.000 y 10.000 años y que el volumen para la crecida de 1.000 años de periodo de retorno corresponde a 55,7 [Mm³].

Se plantean los periodos de retorno para la línea base, asociados a los volúmenes de crecidas de los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 mediante la ecuación de la línea de tendencia presentada:

Tabla 6-12 Cambio en los periodos de retorno para el vertedero Morning Glory (Fuente: Elaboración propia).

Periodo	Parámetro	Valor
Línea base	P [mm]	312
	V crecida [Mm ³]	55,7
	T _{LB crecida} [años]	1000
RCP4.5	P [mm]	371
	V crecida [Mm ³]	68,1
	T _{LB crecida} [años]	5.598
RCP8.5	P [mm]	472
	V crecida [Mm ³]	89,4
	T _{LB crecida} [años]	111.487

Como se aprecia en la Tabla 6-12, si se ajusta la crecida de 68,1 [Mm³] asociada a la precipitación de 1.000 años de periodo de retorno del escenario RCP4.5 (371 [mm]) a la línea de tendencia de crecidas históricas (Figura 6-15), se despeja el periodo de retorno de 5.598 años.

Por otro lado, si se ajusta la crecida de 89,4 [Mm³] asociada a la precipitación de 1.000 años de periodo de retorno del escenario RCP8.5 (472 [mm]) a la línea de tendencia de crecidas históricas (Figura 6-15), se despeja el periodo de retorno de 111.487 años.

Estos periodos de retorno son abismantes y dan cuenta del cambio que se debería tomar en cuenta en el diseño del vertedero, considerando el efecto del cambio climático.

Analizado de otra forma, la diferencia porcentual del volumen provocado por ambos escenarios se calcula de la siguiente manera:

$$\frac{V_{RCP} - V_{LÍNEA BASE}}{V_{LÍNEA BASE}} \quad (6-3)$$

Para el escenario RCP4.5, el volumen de la crecida aumentará en 22%, en cambio para el escenario RCP8.5 crecerá en un 60% del volumen de diseño actual.

Finalmente, se analizan los volúmenes de las crecidas y la capacidad del depósito para contenerlas. Como se menciona en el Acápito 6.1, se supone una altura de coronamiento del vertedero Morning Glory de 223 [m.s.n.m] y para el muro de 228 [m.s.n.m], por lo tanto, una revancha de 5 [m].

A través del programa AutoCAD Civil3D se estiman los volúmenes de relleno correspondientes a la cota del coronamiento del vertedero y del muro. Si se supone que el depósito se encuentra en su tope de capacidad volumétrica, o sea que el relave llega a la cota de 223 [m.s.n.m] cuando se produce la crecida, la capacidad para retener el volumen de la crecida será la diferencia entre el relleno hasta la cota 228 [m.s.n.m] de coronamiento del muro y la cota 223 [m.s.n.m] de coronamiento del vertedero.

Para calcular el volumen de relleno en el programa AutoCAD Civil3D, se proyecta un plano a la cota 223 [m.s.n.m] que corta el DEM de elevaciones en 3D de la cuenca aportante al depósito de relaves Carén. Mediante la secuencia anterior, se obtienen los volúmenes siguientes:

Tabla 6-13: Volúmenes de capacidad del Depósito de Relaves Carén (Fuente: Elaboración propia).

Cota de plano Interceptor [m.s.n.m]	Volumen de Relleno [Mm ³]
271	1.947
276	2.108
Volumen de capacidad del depósito	161

Por lo tanto, el depósito tiene capacidad para retener 118,2 [Mm³] en la revancha de 5 [m] entre el coronamiento del vertedero y el muro. Por lo tanto, el depósito puede retener en el volumen de revancha las crecidas de la Tabla 6-10 y para las crecidas tanto históricas como con efecto del cambio climático, puede contener los volúmenes asociados incluso para la CMP.

Como conclusiones, se puede deducir de la que las obras de atravesos de caminos no serán capaces de portear los caudales afluentes a ellos ya que las precipitaciones futuras relacionadas a 100 y 150 años de periodo de retorno, podrían ser mayores que la precipitación de verificación actual y, por tanto, producirán mayores caudales en las obras, ahogándolas y comprometiendo la estabilidad del camino. En el caso del vertedero Morning Glory, se observa que diseñado para una crecida de periodo de retorno de 1.000 años no dará abasto para las crecidas relacionadas con las precipitaciones futuras ya que sus volúmenes de crecidas estarán en porcentaje muy por sobre el volumen de crecida de diseño, por lo tanto, para el diseño del vertedero final en etapa de cierre se debe tener en consideración las crecidas con efecto del cambio climático. La capacidad del depósito actual (representada por el volumen de la revancha entre el coronamiento del vertedero y el muro) podrá contener las crecidas futuras debido a que posee el volumen suficiente.

7 MEDIDAS DE ADAPTACIÓN DE OBRAS HIDRÁULICAS EN DEPÓSITOS DE RELAVES

En este capítulo se presentan las medidas de adaptación de obras hidráulicas en depósitos de relaves a tener en consideración de acuerdo a los obtenidos en el Acápites 4, 5 y 6.

Inicialmente, se debe tener en cuenta la ubicación geográfica del depósito de relaves a analizar, la tendencia que existe hasta la actualidad en sus precipitaciones y los efectos del cambio climático en el clima de la zona en el mediano y largo plazo.

Luego, se deben identificar las obras que existen dentro del depósito de relaves y evaluar su vulnerabilidad ante el cambio climático. Si la tendencia de las precipitaciones provoca un aumento en las crecidas, se debe tener especial cuidado en las obras evacuadoras, debido a que, si sobrepasan su capacidad podrían impactar catastróficamente en el depósito de relaves.

Todo depósito de relaves debe cumplir con la legislación vigente (MOP, 2015) y contar con un sistema evacuador de crecidas. También, como fue evidenciado en el Acápites 6, el aumento en la crecida debido al cambio climático se puede reflejar en un aumento en el periodo de retorno de diseño de la obra evacuadora. En el caso del depósito de relaves Carén, este aumento en los periodos de retorno de diseño se estima significativo para ambos escenarios hacia el año 2100, por lo tanto, se sugiere aumentar las crecidas de diseño para los evacuadores que se construyan en la etapa de cierre y queden evacuando las crecidas de los depósitos abandonados. Esto incluye el aumento en la capacidad de las obras que prosiguen al vertedero como los canales receptores, túnel de evacuación (en el caso de vertedero Morning Glory), rápidos de descarga, obras disipadoras y de entrega al cauce natural. Además, se recomienda la operación de estas obras cuando sea posible para detectar posibles fallas y evitarlas en grandes crecidas.

En el caso de vertederos de tipo Morning Glory, se debe procurar que el control permanezca en la transición aguas arriba del túnel y nunca opere con control de tubo ni se produzcan daños por cavitación en el túnel. Lo anterior se cumple si la altura de carga está siempre por debajo de la altura de carga de diseño y la pendiente del túnel es mayor que la proporcionada por el gradiente hidráulico del flujo dentro del ducto. Por lo tanto, en zonas donde la tendencia en las crecidas es en aumento, se debe estimar una altura de carga de diseño mayor en el vertedero de seguridad.

Para determinar la capacidad de los canales de desvío, contorno y colectores de forma conservadora, se recomienda determinar el eje hidráulico considerando un coeficiente de rugosidad de Manning mayor al valor normal. Por ejemplo, en un canal revestido de hormigón la CFE (Comisión Federal de Electricidad de México) recomienda $n = 0,018$ (Mery M., 2013). Además, se recomienda establecer escurrimiento subcrítico en el canal estableciendo una pendiente de fondo menor a la crítica en todo su desarrollo. Analizando la Ecuación (3-25), se entiende que la menor pendiente crítica se desarrollará en la última sección del canal colector.

Para evitar el overtopping de los relaves y aguas claras por el muro, se recomienda diseñar el muro con una revancha mayor entre el coronamiento del evacuador y del muro, que lo exigido por la legislación vigente (MOP, 2015), de esta manera, se aumenta la capacidad de contención para las crecidas futuras. Se sugiere diseñar el muro de contención para una crecida asociada al escenario RCP8.5, considerando la revancha correspondiente de acuerdo a lo establecido en el Decreto 50.

En el caso del aumento en las crecidas en las quebradas afluentes al depósito de relaves, las obras de saneamiento y drenaje de caminos deben ser diseñadas para crecidas de periodos de retorno mayores. En particular, como se analizó en el Acápites 6, las crecidas de diseño y verificación futuras serán mayores que las crecidas actuales de verificación de estas obras, por lo tanto, las obras actuales no operarán en condiciones de diseño y/u óptimas o en el peor de los casos, no poseerán capacidad suficiente para portear los caudales proyectados a futuro y se deberá aumentar su capacidad para proteger la estabilidad de los caminos. Con el aumento en la capacidad de alcantarillas se disminuirá

la probabilidad de cavitación dentro de ellas por el contacto de la lámina de agua con la parte superior debido a ondulaciones y la altura hidráulica. Además, se recomienda aumentar la altura del muro frontal en ellas, para disminuir la posibilidad de socavación del talud del camino.

Por otro lado, en el caso del aumento de las crecidas producto del cambio climático, los canales de contorno y desvíos que capten las aguas naturales y las conduzcan aguas abajo del depósito, se recomienda diseñarlos para crecidas mayores a 100 y 150 años de periodo de retorno como lo exige el Decreto 50. Se sugiere diseñarlos para la Crecida Máxima Probable.

Las quebradas también pueden ser afluentes hacia las piscinas de almacenamiento de agua de procesos. Para evitar la contaminación de las aguas naturales con las aguas de procesos, se recomienda construir canales de contorno que rodeen estas piscinas y desvíen los cauces hacia el canal de contorno del depósito de relaves. Se debe tener en cuenta el aumento de caudal en esta última obra en toda la zona aguas abajo de la unión.

Las obras que se recomienda aumentar su capacidad deben ser adaptables de tal forma que sea posible en un futuro adecuarlas al crecimiento observado en los caudales. Lo anterior es debido a la incertidumbre de cuánto será el aumento en las crecidas en escenarios de emisiones y modelos de proyección futuros.

Debido al aumento del caudal en las quebradas, se producirá mayor riesgo de socavación en ellas y en las obras que encaucen este flujo. En este sentido, la efectividad de las obras de protección del lecho a la entrada y salida de alcantarillas debe ser constantemente evaluada y en caso de observar mayor socavación en el lecho, aumentar su área y espesor de protección o introducir obras disipadoras de energía.

Por otro lado, como buena práctica de ingeniería, se debe tener especial cuidado en quebradas afluentes a diferentes obras. Toda obra, ya sea de conducción, estanques, cajones, y en particular los muros de contención deben ser protegidas de las quebradas afluentes si fuese el caso. Para este último caso, se recomienda el encausamiento del flujo afluente al muro para evitar la socavación. De preferencia se recomienda desviar estas aguas hacia aguas abajo del muro para evitar que las aguas naturales ingresen al depósito, sean contaminadas con los relaves y disminuyan la capacidad de la cubeta debido a las grandes crecidas.

Para la protección de socavación en el lecho de las obras de conducción, tanto de agua como de relaves, se recomienda diseñar obras de atraveso de los cauces afluentes a ellas, para que el agua siga su curso natural aguas abajo de la quebrada. Lo mismo se recomienda para obras de desvío de cauces naturales.

Para otras estructuras como estanques y cajones, se recomienda el desvío del cauce afluente hacia aguas abajo de la obra, para evitar que ocurra socavación en sus fundaciones.

El aumento en el arrastre de sedimentos provocado por el aumento en la escorrentía de las quebradas provocará la sedimentación de las partículas trasladadas donde las velocidades disminuyan. Para evitar el embancamiento en contrafosos ubicados en el pie de taludes, de los canales de contorno y de las obras de captación y desvío de aguas naturales, se recomienda el monitoreo y limpieza periódica de ellos.

Por otro lado, producto del aumento en las crecidas, las partículas en suspensión producto de la socavación pueden ser arrastradas hacia fundaciones y anclajes de estructuras. Para evitar lo anterior, se recomienda construir obras de protección alrededor de estas obras, que contengan los sedimentos y no afecten su estabilidad.

Metodología propuesta

A lo largo del desarrollo de la presente memoria de título, se utilizaron procedimientos para analizar el efecto del Cambio Climático en las obras hidráulicas dentro de depósitos de relaves. Estos procedimientos se resumen en la siguiente metodología de análisis:

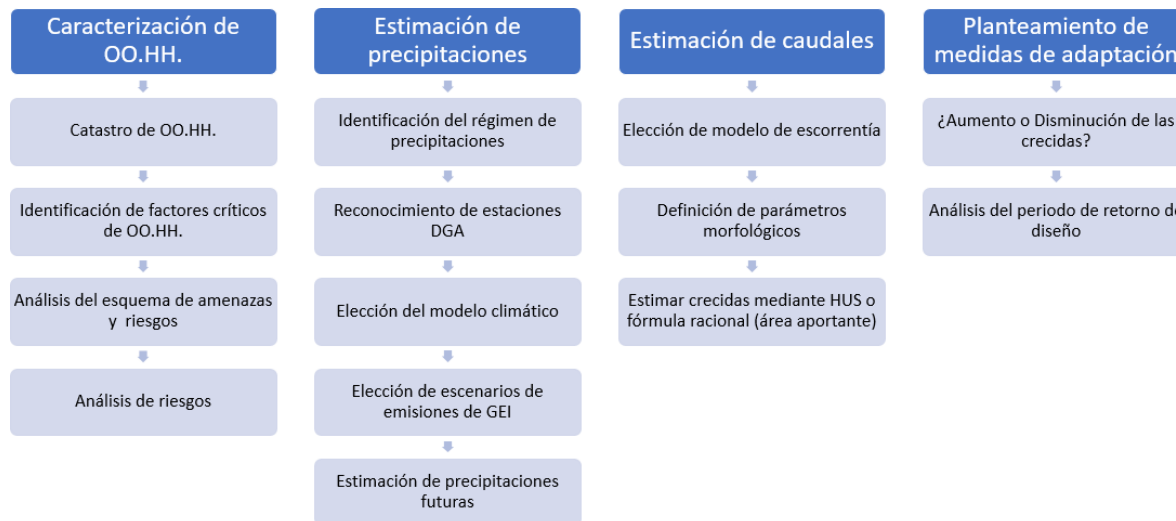


Figura 7-1: Metodología para análisis de efectos del cambio climático y planteamiento de medidas de adaptación (Fuente: Elaboración propia).

Para realizar una estimación cuantitativa del cambio en las precipitaciones debido al cambio climático utilizando los modelos analizados, se propone la siguiente metodología:

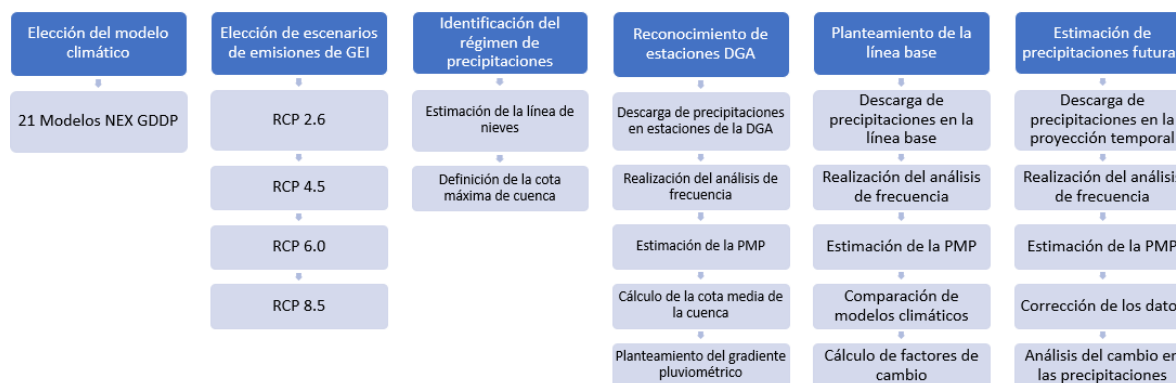


Figura 7-2: Metodología propuesta para determinar precipitaciones futuras en una cuenca determinada (Fuente: Elaboración propia).

8 CONCLUSIONES, COMENTARIOS Y RECOMENDACIONES

En la presente memoria se propone una metodología de evaluación de vulnerabilidades y medidas de adaptación al cambio climático, para obras hidráulicas características de depósitos de relaves de la Gran Minería Chilena.

Para realizar la evaluación de vulnerabilidades de las obras hidráulicas asociadas a depósitos de relaves, primero se deben definir los factores críticos de diseño en cada obra hidráulica presente en el depósito de relaves a analizar. Posteriormente, se deben identificar mediante el esquema propuesto las fallas que pueden ocurrir en estas obras producto de grandes crecidas debido al efecto del cambio climático. Este esquema resume las amenazas y riesgos más relevantes de estas obras. Finalmente, se utilizan las proyecciones climáticas futuras del modelo y escenarios climáticos escogidos y corregidos, que reflejen el efecto del Cambio Climático en las crecidas, para el análisis de los futuros riesgos de cada obra en el depósito de relaves a analizar.

Además, en la presente memoria se presenta la estimación de la alteración en las precipitaciones debido al efecto del cambio climático, en cuatro cuencas aportantes a depósitos de relaves ubicados en distintas zonas dentro de Chile. Luego, se estima el cambio en las crecidas de diseño de las obras hidráulicas en el Depósito de Relaves Carén y su impacto en estas obras.

8.1 Comentarios sobre Modelos considerando Cambio Climático

Para estimar la precipitación futura en las cuencas analizadas, se consideraron sólo dos de las veintiuna proyecciones de cambio climático proporcionadas por el modelo NEX GDDP y se utilizaron dos de los cuatro escenarios de rutas de concentración representativas. Sin embargo, se obtuvo gran incertidumbre dependiendo de cada zona, en cuanto a la magnitud del cambio en las precipitaciones entre escenarios y proyecciones diferentes. Se puede concluir que no existe certeza cuantitativa de efecto del cambio climático en las precipitaciones, sin embargo, las proyecciones ESM2G y ESM2M de precipitaciones utilizadas coinciden de forma cualitativa en el efecto de este fenómeno en cada zona analizada, evidenciando un aumento en las precipitaciones en la zona Centro Sur de Chile y la disminución de ellas en las zonas al Norte del país.

Entre las dos proyecciones que se utilizaron, la proyección ESM2M se acerca más a las precipitaciones de la línea base observadas por la DGA en estaciones del norte más cercanas a la alta cordillera, en cambio la proyección ESM2G tuvo mayor cercanía a las precipitaciones de estaciones en cotas más bajas.

En el caso de las proyecciones en la cuenca Salar de Michincha, se observa una gran lejanía con las precipitaciones de la estación Ujina observadas por la DGA. Lo anterior, provoca grandes factores de amplificación para la corrección de las proyecciones y puede ser la razón de que las precipitaciones futuras sean menores a las actuales, a pesar de que las precipitaciones futuras aumentan a medida que aumenta la concentración de GEI en los escenarios RCP.

8.2 Comentarios sobre crecidas

Del análisis de las crecidas en la cuenca del Estero Alhué, se obtienen mayores caudales instantáneos y volúmenes de crecida a medida que aumentan las concentraciones de GEI en los escenarios. Además, se obtienen mayores valores en la Crecida Máxima Probable que en la crecida de 10.000 años de periodo de retorno, corroborando lo obtenido en las precipitaciones y expresando la relación directa entre precipitación y escorrentía utilizada por el método indirecto para determinar crecidas.

8.3 Comentarios sobre metodología

Sobre el análisis de las obras hidráulicas en los depósitos de relaves Carén y Pampa Pabellón, en virtud de la escasa información del detalle del diseño de las obras, se realizaron los supuestos de las obras presentes en la actualidad y de sus características. Se propone realizar un análisis hidráulico

detallado de cada obra presente en el depósito de relaves a analizar, a través del estudio de variadas proyecciones de cambio climático y concluir de forma cuantitativa el efecto del fenómeno en las obras.

8.4 Comentarios sobre metodologías de adaptación al cambio climático para obras hidráulicas

En esta memoria se realizó el análisis de los riesgos asociados a las obras hidráulicas dentro de Depósitos de Relaves chilenos, debido a la amenaza producida por el cambio climático. Lo anterior se realizó mediante las metodologías descritas, tanto de análisis de vulnerabilidad de las obras hidráulicas, como del efecto del cambio climático en las precipitaciones.

El fin de analizar los riesgos que presentan las obras hidráulicas, es poder estimar las modificaciones que ellas requieren y así obtener medidas de adaptación al cambio climático para obras hidráulicas específicas dentro de un depósito de relaves en particular.

8.5 Recomendaciones para obras hidráulicas

La recomendación en general para las obras dispuestas en depósitos de relaves, es que presenten la posibilidad de adaptarse a las variaciones por efecto del cambio climático a medida que transcurre su vida útil. Esta posibilidad se encuentra directamente relacionada con que contengan el espacio libre suficiente, para permitir que la obra aumente su capacidad en el futuro.

Finalmente, la medición del impacto del cambio climático en obras hidráulicas dentro de depósitos de relaves, dependerá directamente del criterio a utilizar para determinar los caudales afluentes a ellas. La presente memoria propone una metodología, y deja abierta la posibilidad de aplicar cualquier criterio para el análisis cuantitativo del impacto de este fenómeno en las obras aquí descritas.

9 BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

- AMEC. (2014). *DIA Proyecto "Continuidad Relaves Convencionales, Depósito Pampa Pabellón"*. Declaración de Impacto Ambiental.
- ArcGis. (2018). *Fundamentos del Almacenamiento de Datos NetCDF*. Obtenido de <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/netcdf/fundamentals-of-netcdf-data-storage.htm>
- BBC. (14 de Febrero de 2017). *News Mundo*. Recuperado el 12 de Septiembre de 2018, de <https://www.bbc.com/mundo/noticias-internacional-38964605>
- BBC. (25 de Julio de 2018). *NEWS Mundo*. Obtenido de <https://www.bbc.com/mundo/noticias-internacional-44938217>
- Brevis Vergara, W., & Vicuña Díaz, S. (2019). Riesgo climático y adaptación. *Minería y Cambio Climático: ¿Hacia Dónde Vamos?* (pág. 19). Santiago: Cesco .
- Centro de Cambio Global US. (2012). *Enfoque Metodológico para Evaluar la Adaptación al Cambio Climático en la Infraestructura Pública del MOP*. Santiago, Chile.
- CEPAL y Gobierno de Chile. (2012). *La Economía del Cambio Climático en Chile*.
- Céspedes, R., & Bonilla, C. (2014). Efecto de los Eventos Extremos en la Erosión y Producción de Sedimentos. Un Análisis Predial de la Zona Central de Chile. *XXV Congreso Latinoamericano de Hidráulica*. Santiago, Chile.
- Chacón, M., González, J., & Galán, Á. (2016). Inclusión del Cambio Climático en el Análisis Regional de Precipitaciones Máximas Anuales en España. *XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*. Lima, Perú.
- Chow, V. T. (1994). *Hidráulica de Canales Abiertos*. Bogotá, Colombia: McGRAW-HILL Interamericana.
- CIMM T&S. (2007). *EIA de proyecto "Peraltamiento Embalse Carén"*. Resumen Ejecutivo, Santiago, Chile.
- CODELCO. (2017). *DIA de Proyecto "Ajustes de Aspectos Constructivos en Proyecto Peraltamiento Embalse Carén, Séptima Etapa"*. Declaración de Impacto Ambiental, Santiago, Chile.
- CONAMA. (2006). *Estudio de la Variabilidad Climática en Chile para el Siglo XXI*. Santiago, Departamento de Geofísica, Universidad de Chile.
- Covián G., F., & Stowhas B., L. (2015). Modelación Probabilística de la Línea de Nieves Durante Eventos de Tormenta entre los 28,5° y 46,5° LS. *XXII Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica*. Santiago, Chile.
- DGA. (1995). *Manual de Cálculo de Crecidas y Caudales Mínimos en Cuencas sin Información Fluviométrica*. Manual , Dirección General de Aguas, Santiago, Chile.

- DGA. (1998). *Taller de Hidrología Aplicada a la Resolución de Solicitudes de Derechos de Aprovechamiento de Aguas Superficiales*. Santiago, Chile.
- DGA. (2009). *Guías de Reconocimiento de Obras Tipo*. Aquaterra Ingenieros LTDA, Santiago, Chile.
- DGA. (2011). *Catastro e Inspección Preliminar de Embalses Ubicados en las Regiones de Valparaíso, Metropolitana, del Maule y de la Araucanía*. Santiago, Chile: Aquaterra Ingenieros .
- DGA. (2016). *Guías Metodológicas para Presentación y Revisión Técnica de Proyectos de Modificación de Cauces Naturales y Artificiales*. Santiago, Chile: MOP.
- DGA. (28 de Mayo de 2018). *Información Oficial Hidrometeorológica y de Calidad de Aguas en Línea*. Obtenido de <http://snia.dga.cl/BNAConsultas/reportes>
- DICTUC. (2010). *Actualización de Estudio Hidrológico Cuencas de Coposa y Michincha*. Santiago, Chile: DICTUC.
- Dong, N. D., Jayakumar, K., & Agilan, V. (2017). Impact of Climate Change on Flood Frequency of the Triam Reservoir in Vietnam Using RCMS. *Journal of Hydrologic Engineering*, 23(2). doi:05017032-1
- Ehsani, N., Vörösmarty, C., Fekete, B., & Stakhiv, E. (2017). Reservoir operations under climate change: Storage capacity options to mitigate risk. *Journal of Hydrology*, 555, 435-446.
- El Colombiano. (24 de Julio de 2018). *El Colombiano*. Obtenido de <http://www.elcolombiano.com/internacional/tragedia-por-colapso-de-presa-en-laos-JY9045496>
- El País. (03 de Marzo de 2017). *El País*. Recuperado el 12 de Septiembre de 2018, de https://elpais.com/elpais/2017/03/02/album/1488486369_345048.html#foto_gal_1
- Ercilla. (31 de Marzo de 1965). El Valle de la Muerte. *Revista Ercilla*(1558).
- FICLIMA. (s.f.). *Descripción de la Metodología de Downscaling Estadístico*.
- Ford, J. D., & Smit, B. (2004). *A Framework for Assessing the Vulnerability of Communities in the Canadian Arctic to Risks Associated with Climate Change*. Artic.
- Fundão Tailings Dam Review Panel. (2016). *Report on the Immediate Causes of the Failure of the Fundão Dam*. Obtenido de <http://fundaoinvestigation.com/>
- Guo, J.-Y. (1999). *Channel Design and Flow Análisis*. Water Resources Publications.
- Guzmán Sagreiros, R., Cavazos González, R. A., Vera Herrera, J. A., & Salinas López, J. C. (2014). Comportamiento del Contraste de Precipitaciones Asociados a un Periodo de Retorno (TR) y los Índices de Cambio Climático. *XXV Congreso Latinoamericano de Hidráulica*. Santiago, Chile.

- Henderson, F. M. (1966). *Open Channel Flow*. New York, USA: MACMILLAN Publishing .
- ICMM. (2013). *Adapting to a changing climate: implications for the mining and metals industry*. ICMM.
- ICMM. (2016). *Review of Tailings Management Guidelines and Recomendations for Improvement*.
- ICOLD. (2010). *Climate Change: Potential Challenges and Adaptations for the 21st Century Water Resources Engineer*. Hanoi, Vietnam: ICOLD.
- IPCC. (2000). *Informe Especial del IPCC. Escenario de Emisiones*. IPCC.
- IPCC. (2013). *Quinto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental de Cambio Climático. Bases Físicas*. IPCC.
- IPCC. (2014). *Quinto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental del Cambio Climático*. IPCC.
- IPCC. (2018). *Data Distribution Centre*. Obtenido de http://www.ipcc-data.org/guidelines/pages/gcm_guide.html
- Ji-Hyeok , C., Tae-Hyung, Y., Jong-Suk, K., & Young-II, M. (2017). Dam Rehabilitation Assessment Using the Delphi-AHP Method for Adapting to Climate Change. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 144(2). doi:06017007-1
- Lagos Zúñiga, M. A. (2012). *Impacto del Cambio Climático en Eventos Extremos y Análisis de la Vulnerabilidad de Algunas Obras Hidráulicas en Chile*. Santiago, Chile: Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- Lagos Zúñiga, M., Cornwell Varela, E., & McPhee Torres, J. (2014). Línea de Nieves y un Enfoque Preliminar para Pronosticar la Ocurrencia de Aluviones. *XXV Congreso Latinoamericano de Hidráulica*. Santiago, Chile.
- McInnes, W. (10 de Marzo de 2018). *The Sidney Morning Herald*. Obtenido de <https://www.smh.com.au/national/nsw/work-suspended-after-dam-collapses-at-australia-s-largest-gold-mines-20180310-p4z3s7.html?crpt=search>
- Mery M., H. (2013). *Hidráulica Aplicada al Diseño de Obras*. Santiago, Chile, Chile: Ril Editores.
- Ministerio de Minería. (11 de Abril de 2007). Decreto Supremo N°248. *Reglamento para la Aprobación de Proyectos de Diseño, Construcción, Operación y Cierre de los Depósitos de Relaves*, 24. Chile.
- MMA. (25 de Abril de 2018). *Ministerio del Medio Ambiente*. Recuperado el 2018, de <http://portal.mma.gob.cl/cambio-climatico/>
- MOP. (19 de Diciembre de 2015). Decreto 50. *Aprueba Reglamento a que se Refiere el Artículo 295 Inciso 2°, del Código de Aguas, Estableciendo las Condiciones Técnicas que Deberán Cumplirse en el Proyecto, Construcción y Operación de las Obras Hidráulicas Identificadas*

en el Artículo 294 del Referid. Chile. Obtenido de <https://www.leychile.cl/N?i=1085618&f=2015-12-19&p=>

- MOP. (2018). *Manual de Carreteras* (Vol. 1). Chile: Dirección de Vialidad, Ministerio de Obras Públicas.
- MOP y MMA. (2017). *Plan de Adaptación y Mitigación de los Servicios de Infraestructura al - cambio Climático*. Ministerio de Obras Públicas y Ministerio del Medio Ambiente, Santiago, Chile.
- Mount Polley Review Pannel. (30 de Junio de 2015). *Mount Polley Independent Expert Investigation and Review Report*. Recuperado el 12 de Septiembre de 2018, de <https://www.mountpolleyreviewpanel.ca/>
- NASA. (2015). *Tech Note NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections (NEX GDDP)*. NASA.
- NASA. (2018). *Ames Research Center*. Obtenido de <https://www.nasa.gov/ames>
- Naz, B., Kao, S.-C., Ashfaq, M., Gao, H., Rastogi, D., & Gangrade, S. (2018). Effects of climate change on streamflow extremes and implications for reservoir inflow in the United States. *Journal of Hydrology*, 556, 359-370.
- Nigam, U., & Yadav, S. M. (2015). Climate Change Impact on Reservoir Operation: Ukai Reservoir as a Case Study. *E-proceedings of the 36th IAHR World Congress*, (pág. 10). The Hague, The Netherlands.
- ONU. (1992). *Convención -marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*.
- Peel, M., Srikanthan, R., McMahon, T., & Karoly, D. (2014). Uncertainty in runoff based on Global Climate Model precipitation and temperature data – Part 2: Estimation and uncertainty of annual runoff and reservoir yield. *11(5)*, 4579–4638.
- Peña, H., & Vidal, F. (1993). Estimación Estadística de la Línea de Nieves durante los Eventos de Precipitación entre las latitudes 28 y 38 grados Sur. *XI Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica*. Concepción, Chile.
- QGIS. (2018). *Datos Raster*. Obtenido de https://docs.qgis.org/2.8/es/docs/gentle_gis_introduction/raster_data.html
- Raddatz Delgado, D. A. (2011). *Efecto del Cambio Climático en la Seguridad Hidrológica de Obras Hidráulicas. Análisis en Cuencas Pluviales de la Zona Central de Chile para el Escenario A2*. Santiago, Chile: Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- Sarricolea Espinoza, P., & Romero Aravena, H. (Diciembre de 2015). Variabilidad y cambios climáticos observados y esperados en el Altiplano del norte de Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*, 62, 169-183.
- SEA. (2014). PAS 157. *Permiso obras de regularización o defensa de cauces naturales*. Chile.

- SERNAGEOMIN. (2015). *Resolución Exenta 1485*. Santiago, Chile.
- Soundharajan, B.-S., Adeloje, A., & Remesan, R. (2016). Evaluating the variability in surface water reservoir planning characteristics during climate change impacts assessment. *Journal of Hydrology*, 538, 625-639.
- Stöwhas Borghetti, L. A. (1983). Precipitaciones Máximas Diarias en Chile. *VI Congreso Nacional de Hidráulica, SOCHID, 1*. Santiago, Chile.
- Stöwhas Borghetti, L. A. (2016). *Fundamentos de Hidrología Aplicada*. USM.
- Urrutia de Hazbún, R., & Lanza Lazcano, C. (1993). *Catástrofes en Chile 1541-1992*. Santiago, Chile: La Noria.
- USBR. (1978). *Design of Small Canal Structures*. Denver, USA.
- USBR. (1984). *Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators* (Vol. 25).
- USBR. (1987). *Design of Small Dams* (Third Edition ed.). USA.
- USCE. (1977). *Hydraulic Design Criteria* (Vol. 1).
- USDA. (1986). *Urban Hydrology for Small Watersheds TR-55*. Technical Release 55, United States Department of Agriculture, Conservation Engineering Division.
- World Meteorological Organization . (27 de Junio de 2019). *World Meteorological Organization* . Obtenido de http://www.wmo.int/pages/prog/wcp/ccl/faq/faq_doc_en.html

10.ANEXOS

Se presenta a continuación la información detallada de precipitaciones diarias máximas de cada estación.

En el ANEXO A se disponen las series de precipitaciones diarias máximas anuales de las Estaciones DGA que permiten realizar el análisis de frecuencia presentado en el ANEXO B.

Por otro lado, en el ANEXO C se disponen las series de precipitaciones diarias máximas anuales sobre cada estación de la DGA según los datos de ambos modelos de proyección del cambio climático para la línea base temporal (hasta el 2005). Luego, en el ANEXO D se realiza el análisis de frecuencia del modelo que más se asemeja a los datos reales proporcionados por la DGA.

Finalmente, en el ANEXO E se presentan las series de precipitaciones diarias máximas anuales sobre cada estación de la DGA según los datos del modelo de proyección de cambio climático elegido para la proyección temporal (desde el 2006 hasta el 2100). Luego, en el ANEXO F se realiza en análisis de frecuencia de este modelo.

Por otro lado, en el ANEXO G se dispone de los hidrogramas de crecidas de las cuencas Estero Alhué y Salar de Michincha analizadas.

10.1. ANEXO A: Precipitaciones Históricas en Estaciones Meteorológicas de la DGA

Se presentan las precipitaciones diarias máximas anuales en las estaciones meteorológicas de la DGA de la línea base de tiempo (hasta el 2005) para cada depósito de relaves.

10.1.1. Cuenca Estero Alhué

Tabla A-1: Serie de Precipitaciones DGA desde 1979 a 2005.

año	BARRERA LONCHA	LONCHA	VILLA ALHUÉ	RAPEL
1979	-	74,5	62,0	62,0
1980	-	77,0	80,0	80,0
1981	-	72,5	77,0	77,0
1982	-	95,0	111,0	111,0
1983	-	52,1	60,0	60,0
1984	73,5	76,4	113,0	113,0
1985	40,0	38,5	30,0	45,0
1986	60,5	-	102,0	93,0
1987	85,5	-	127,0	83,0
1988	30,1	-	31,0	43,0
1989	78,1	-	68,0	44,0
1990	27,5	-	41,5	40,0
1991	54,5	-	47,0	48,5
1992	80,0	-	103,0	103,0

año	BARRERA LONCHA	LONCHA	VILLA ALHUÉ	RAPEL
1993	59,7	-	52,0	47,0
1994	70,2	-	68,0	52,0
1995	54,0	-	58,0	53,0
1996	34,0	-	36,0	52,0
1997	110,0	-	115,0	98,0
1998	17,0	-	33,0	48,0
1999	60,7	-	41,0	54,0
2000	110,5	-	127,0	93,0
2001	79,4	-	96,0	115,0
2002	113,1	-	117,7	80,0
2003	105,6	-	76,0	80,0
2004	44,5	-	70,0	58,0
2005	63,2	-	55,0	62,0

10.1.2. Cuenca Salar de Michincha

10.1.2.1. Precipitaciones Diarias Máximas Anuales DGA

Tabla A-2: Serie de Precipitaciones DGA desde 1974 a 2005 en mm.

año	UJINA	COLLAHUASI	COPOSA	COPAQUIRE
1974	27,0	26,0	-	-
1975	30,0	25,0	-	-
1976	47,0	12,0	-	-
1977	13,0	18,0	-	5,0
1978	17,0	29,0	-	8,0
1979	22,0	15,0	-	29,0
1980	9,0	27,0	-	4,0
1981	22,5	29,0	-	12,0
1982	12,0	15,0	-	14,0
1983	8,0	23,0	20,1	14,0
1984	38,0	19,0	15,4	13,0
1985	23,0	18,5	9,1	12,0
1986	56,0	13,0	10,0	9,0
1987	35,0	33,0	13,1	17,0
1988	-	12,0	-	4,0
1989	-	11,0	-	13,0
1990	-	8,0	-	13,0
1991	29,0	24,0	-	8,5
1992	-	-	-	8,0
1993	-	-	-	6,5
1994	-	-	-	-
1995	-	-	-	-
1996	60,0	-	-	-

año	UJINA	COLLAHUASI	COPOSA	COPAQUIRE
1997	15,0	-	-	-
1998	10,0	-	-	15,0
1999	22,0	-	-	30,0
2000	26,8	-	17,0	15,0
2001	22,9	-	25,1	43,0
2002	21,0	-	9,5	35,0
2003	14,0	-	6,7	15,0
2004	38,9	-	15,0	15,0
2005	16,2	-	16,1	30,0

10.1.2.2. *Precipitaciones Diarias Máximas Anuales Bolivia*

Tabla A-3: Serie de Precipitaciones Senamhi desde 1974 a 2005 en mm.

año	COLCHA K	CALCHA DE LIPEZ	SALINAS G, DE MENDOZA
1974	-	-	24,0
1975	-	-	24,0
1976	-	-	33,0
1977	-	-	34,0
1978	-	-	28,0
1979	1,4	-	33,0
1980	16,0	-	50,0
1981	2,3	-	56,0
1982	42,0	-	20,0
1983	11,1	4,2	22,0
1984	30,0	9,3	32,0
1985	31,2	20,1	21,3
1986	28,0	14,2	5,1
1987	50,0	11,0	26,1
1988	15,0	21,5	0,0
1989	18,0	11,1	2,0
1990	25,7	35,2	10,0
1991	18,0	25,2	25,0
1992	49,5	18,5	20,1
1993	44,0	25,5	24,6
1994	16,8	25,7	26,8
1995	20,2	9,2	16,0
1996	14,0	30,0	-
1997	35,0	27,3	-
1998	16,0	24,0	-
1999	22,0	-	-

año	COLCHA K	CALCHA DE LIPEZ	SALINAS G, DE MENDOZA
2000	22,0	-	-
2001	24,0	-	-
2002	17,8	-	-
2003	46,0	-	-
2004	29,5	-	-
2005	32,0	-	25,8

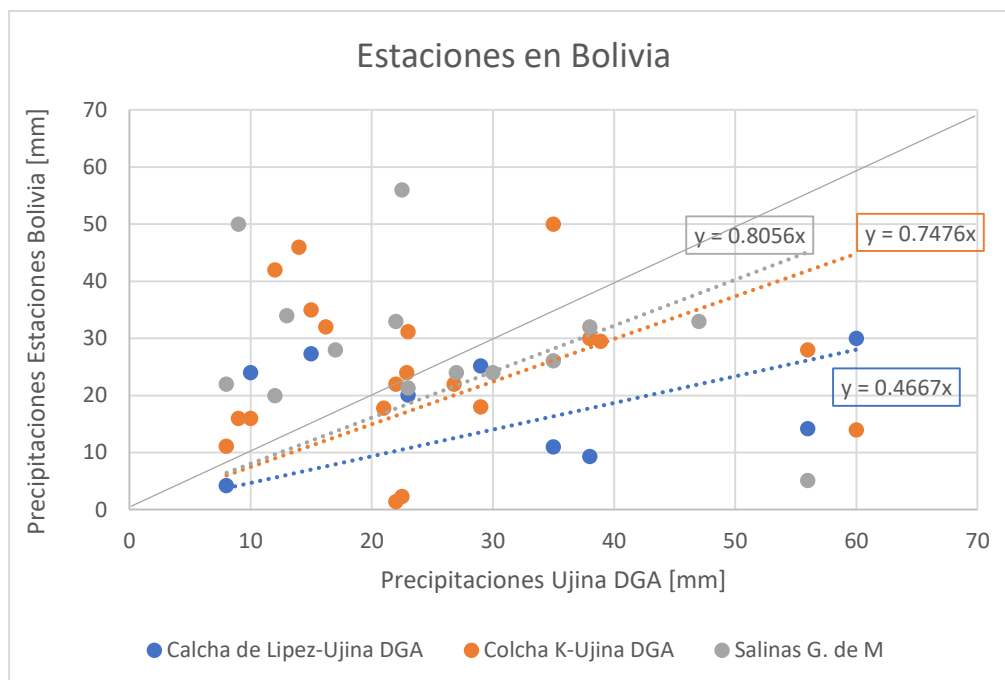


Figura A-1: Correlación entre Estación Ujina DGA y Estaciones Meteorológicas Bolivianas.

10.1.3. Cuenca Estero Pupío

Tabla A-4: Serie de Precipitaciones DGA desde 1974 a 2017 en mm.

año	CAIMANES	CULIMO	LIMAHUIDA	SALAMANCA	QUELÓN
1974	-	78,5	35,0	28,5	47,5
1975	-	46,0	27,0	45,2	44,0
1976	-	33,2	27,0	23,1	25,0
1977	-	41,4	30,0	49,0	54,5
1978	-	96,2	50,0	99,0	105,0
1979	-	17,0	8,0	52,5	18,0
1980	-	61,7	50,0	79,0	50,0
1981	-	81,0	34,0	34,0	72,0
1982	-	77,4	40,0	72,0	82,0
1983	-	56,9	49,0	46,0	44,0
1984	-	102,3	50,0	80,0	99,0

año	CAIMANES	CULIMO	LIMAHUIDA	SALAMANCA	QUELÓN
1985	-	26,2	21,0	22,6	34,0
1986	-	95,2	50,0	53,8	112,0
1987	-	79,9	50,0	93,0	94,0
1988	-	24,4	27,0	29,0	26,3
1989	-	1,8	20,0	38,7	39,0
1990	22,3	21,0	15,0	15,3	22,0
1991	67,3	38,8	28,0	50,0	45,0
1992	86,0	73,8	50,0	78,2	64,0
1993	34,5	29,6	36,0	75,2	44,5
1994	37,0	25,3	24,5	33,4	32,5
1995	37,5	44,3	20,5	27,5	39,0
1996	24,0	45,5	35,0	48,1	40,5
1997	116,0	96,0	48,0	77,6	80,0
1998	2,6	4,5	8,0	18,4	9,0
1999	44,5	31,0	32,5	45,1	40,0
2000	79,0	54,0	65,0	62,0	62,2
2001	92,0	81,0	62,0	61,0	73,0
2002	121,0	98,0	86,0	143,5	108,0
2003	61,5	48,2	46,0	41,5	66,0
2004	59,0	48,2	46,0	48,0	75,0
2005	25,5	24,5	20,0	21,5	35,0
2006	41,0	57,2	31,5	45,5	50,3
2007	70,0	40,0	32,5	59,0	77,0
2008	46,8	37,8	65,0	41,5	80,0
2009	58,0	44,2	27,5	37,0	48,0
2010	35,0	35,0	20,5	28,0	28,0
2011	36,0	28,3	32,5	39,5	33,0
2012	40,0	33,5	37,2	18,0	36,5
2013	32,0	21,1	36,5	26,0	40,0
2014	47,5	45,2	44,5	43,3	42,0
2015	79,0	69,3	68,5	49,2	24,5
2016	78,0	48,7	62,0	49,9	91,0
2017	73,0	52,6	76,5	80,0	41,0

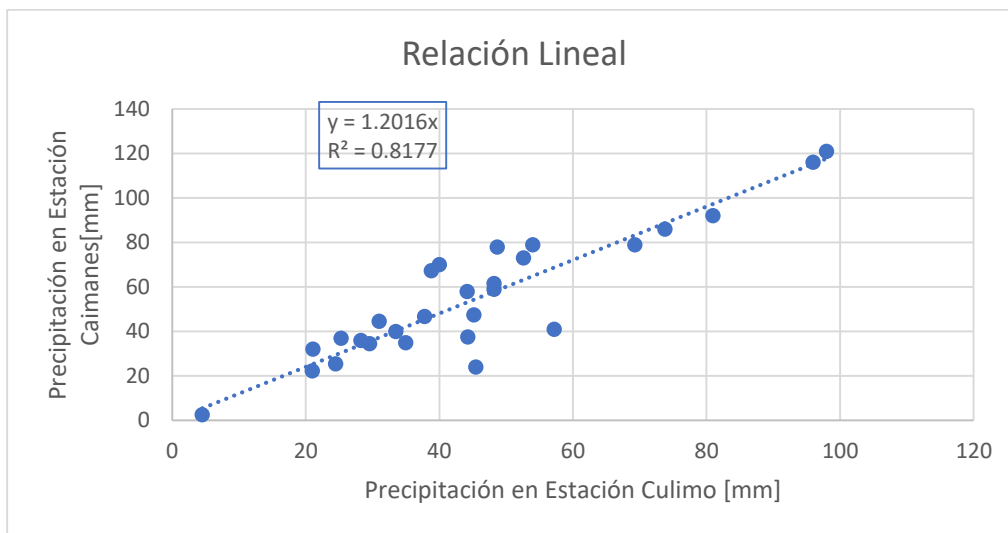


Figura A-2: Correlación entre Estación Caimanes DGA y Estación Culimo DGA desde 1990 al 2017.

10.1.4. Cuenca Choapa

Tabla A-5: Serie de Precipitaciones DGA desde 1975 a 2017 en mm.

año	CUNCUMÉN	LA TRANQUILLA
1975	34,0	48,0
1976	24,6	23,3
1977	76,0	66,5
1978	113,0	107,0
1979	35,0	39,0
1980	100,0	84,0
1981	26,0	34,0
1982	57,0	54,0
1983	49,0	57,0
1984	82,0	60,0
1985	24,5	23,0
1986	47,0	42,0
1987	95,0	85,0
1988	23,5	22,0
1989	0,0	41,0
1990	24,0	21,0
1991	50,5	45,0
1992	77,0	66,0
1993	110,0	110,0
1994	27,0	31,0
1995	17,0	23,0
1996	30,0	45,5
1997	129,0	148,0

año	CUNCUMÉN	LA TRANQUILLA
1998	20,0	15,0
1999	30,0	35,5
2000	64,0	51,0
2001	57,0	69,5
2002	53,0	97,0
2003	55,0	55,0
2004	39,0	50,0
2005	34,0	35,0
2006	41,0	47,0
2007	56,0	38,0
2008	70,0	52,0
2009	49,0	50,0
2010	24,0	33,0
2011	48,0	64,5
2012	13,0	16,5
2013	50,0	39,0
2014	31,0	29,0
2015	36,0	80,0
2016	54,0	73,0
2017	48,0	91,0

10.2. ANEXO B: Análisis de Frecuencia de las Precipitaciones Históricas en Estaciones Meteorológicas de la DGA

Se presenta la información del análisis de frecuencia de la línea base de tiempo, con la distribución determinada en el Acápite 5 y para las estaciones de la DGA correspondientes a cada depósito analizado.

10.2.1. Cuenca Estero Alhué

10.2.1.1. Estación Barrera Loncha

Tabla B-1: Resumen Parámetros de Análisis, Estación Barrera Loncha DGA.

Distribución Gumbel		Kolmogorov Smirnov			χ^2		
μ	67,5	α	0,05	¿SE ACEPTA?	α	0,05	¿SE ACEPTA?
σ	26,0	D (N, α)	0,254	SI	v	2,779	SI
N	27	D (N, α)-Max(D)	0,139		$\chi^2v(1-\alpha)$	7,408	
Ym	0,53300						
σm	1,09982						

Tabla B-2: Detalle Análisis de Frecuencia con Gumbel, Estación Barrera Loncha DGA.

Nº	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
1	17,0	0,036	-1,230	0,033	0,033	0,000
2	27,5	0,071	-0,893	0,087	0,051	0,003
3	30,1	0,107	-0,810	0,106	0,034	0,000
4	34,0	0,143	-0,685	0,138	0,030	0,000
5	40,0	0,179	-0,493	0,195	0,052	0,001
6	44,5	0,214	-0,349	0,242	0,064	0,004
7	52,1	0,250	-0,105	0,329	0,115	0,025
8	54,0	0,286	-0,044	0,352	0,102	0,015
9	54,5	0,321	-0,028	0,357	0,072	0,004
10	59,7	0,357	0,138	0,419	0,097	0,011
11	60,5	0,393	0,164	0,428	0,071	0,003
12	60,7	0,429	0,170	0,430	0,037	0,000
13	63,2	0,464	0,250	0,459	0,031	0,000
14	70,2	0,500	0,475	0,537	0,073	0,003
15	72,5	0,536	0,548	0,561	0,061	0,001
16	73,5	0,571	0,580	0,571	0,036	0,000
17	74,5	0,607	0,612	0,582	0,026	0,001
18	77,0	0,643	0,693	0,606	0,037	0,002
19	78,1	0,679	0,728	0,617	0,062	0,006
20	79,4	0,714	0,769	0,629	0,085	0,010
21	80,0	0,750	0,789	0,635	0,115	0,018
22	85,5	0,786	0,965	0,683	0,103	0,013
23	95,0	0,821	1,269	0,755	0,066	0,005
24	105,6	0,857	1,609	0,819	0,039	0,002
25	110,0	0,893	1,750	0,840	0,052	0,003
26	110,5	0,929	1,766	0,843	0,086	0,008
27	113,1	0,964	1,849	0,854	0,110	0,013

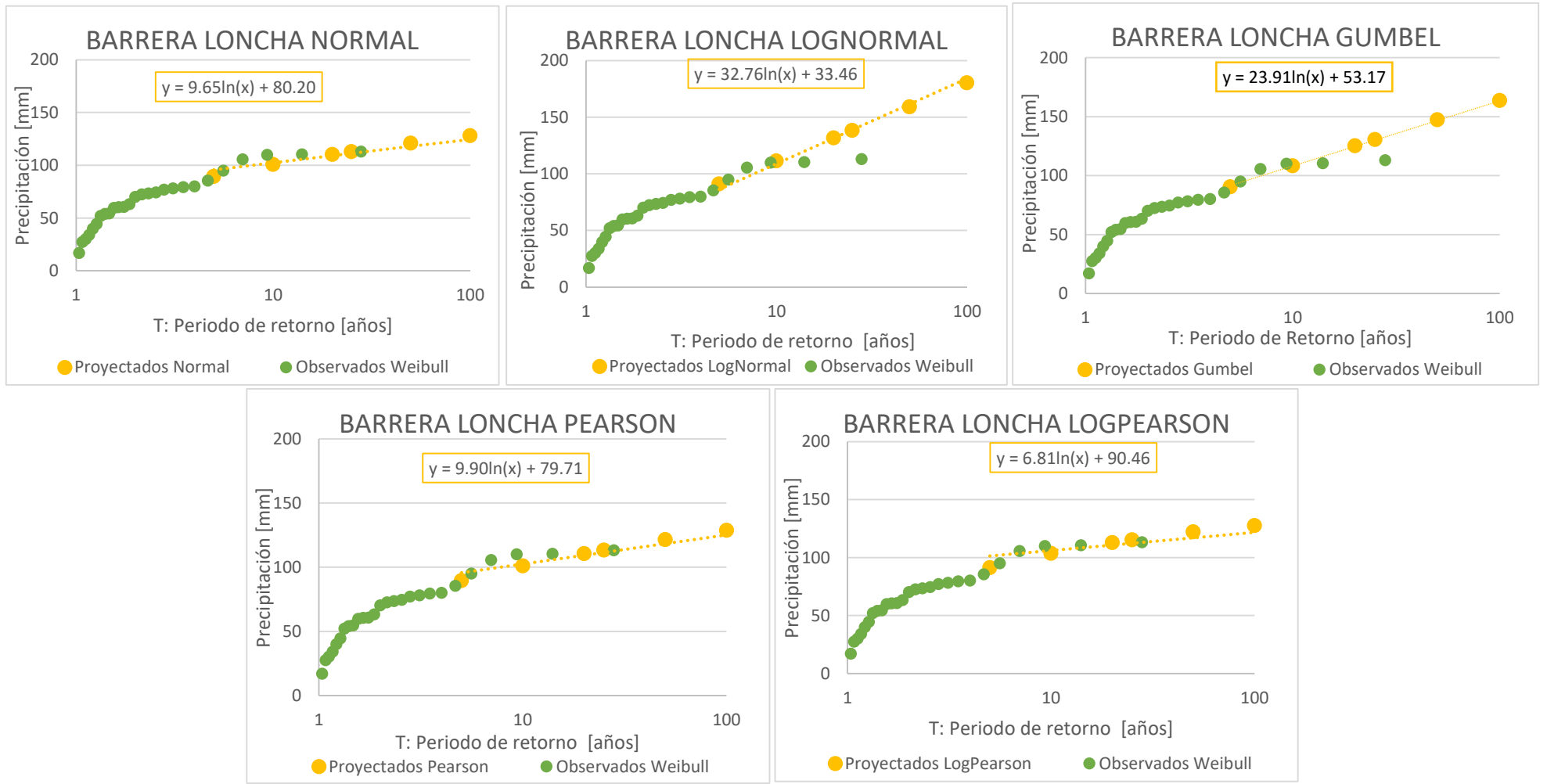


Figura B-1: Comparación entre los análisis de frecuencia de las distribuciones de probabilidad, estación Barrera Loncha DGA.

10.2.1.2. Estación Villa Alhué

Tabla B-3: Resumen Parámetros de Análisis, Estación Villa Alhué DGA.

Distribución Gumbel		Kolmogorov Smirnov			χ^2		
μ	74,0	α	0,05	¿SE ACEPTA?	α	0,05	¿SE ACEPTA?
σ	31,4	D (N, α)	0,254	SI	v	2,779	SI
N	27	D (N, α)-Max(D)	0,134		$\chi^2_{v(1-\alpha)}$	7,408	
Ym	0,53300						
σ_m	1,09982						

Tabla B-4: Detalle Análisis de Frecuencia con Gumbel, Estación Villa Alhué DGA.

Nº	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
1	30,0	0,036	-0,813	0,105	0,105	0,134
2	31,0	0,071	-0,781	0,113	0,077	0,024
3	33,0	0,107	-0,717	0,129	0,058	0,004
4	36,0	0,143	-0,621	0,156	0,048	0,001
5	41,0	0,179	-0,461	0,205	0,062	0,004
6	41,5	0,214	-0,445	0,210	0,032	0,000
7	47,0	0,250	-0,269	0,270	0,056	0,002
8	52,0	0,286	-0,108	0,328	0,078	0,006
9	55,0	0,321	-0,012	0,363	0,078	0,005
10	58,0	0,357	0,084	0,399	0,077	0,005
11	60,0	0,393	0,148	0,422	0,065	0,002
12	62,0	0,429	0,212	0,445	0,052	0,001
13	68,0	0,464	0,404	0,513	0,084	0,005
14	68,0	0,500	0,404	0,513	0,049	0,000
15	70,0	0,536	0,468	0,535	0,035	0,000
16	76,0	0,571	0,660	0,597	0,061	0,001
17	77,0	0,607	0,693	0,606	0,035	0,000
18	80,0	0,643	0,789	0,635	0,028	0,000
19	96,0	0,679	1,301	0,762	0,119	0,010
20	102,0	0,714	1,493	0,799	0,120	0,010
21	103,0	0,750	1,525	0,805	0,090	0,004
22	111,0	0,786	1,782	0,845	0,095	0,004
23	113,0	0,821	1,846	0,854	0,068	0,001
24	115,0	0,857	1,910	0,862	0,041	0,000
25	117,7	0,893	1,996	0,873	0,020	0,000
26	127,0	0,929	2,294	0,904	0,024	0,001
27	127,0	0,964	2,294	0,904	0,060	0,004

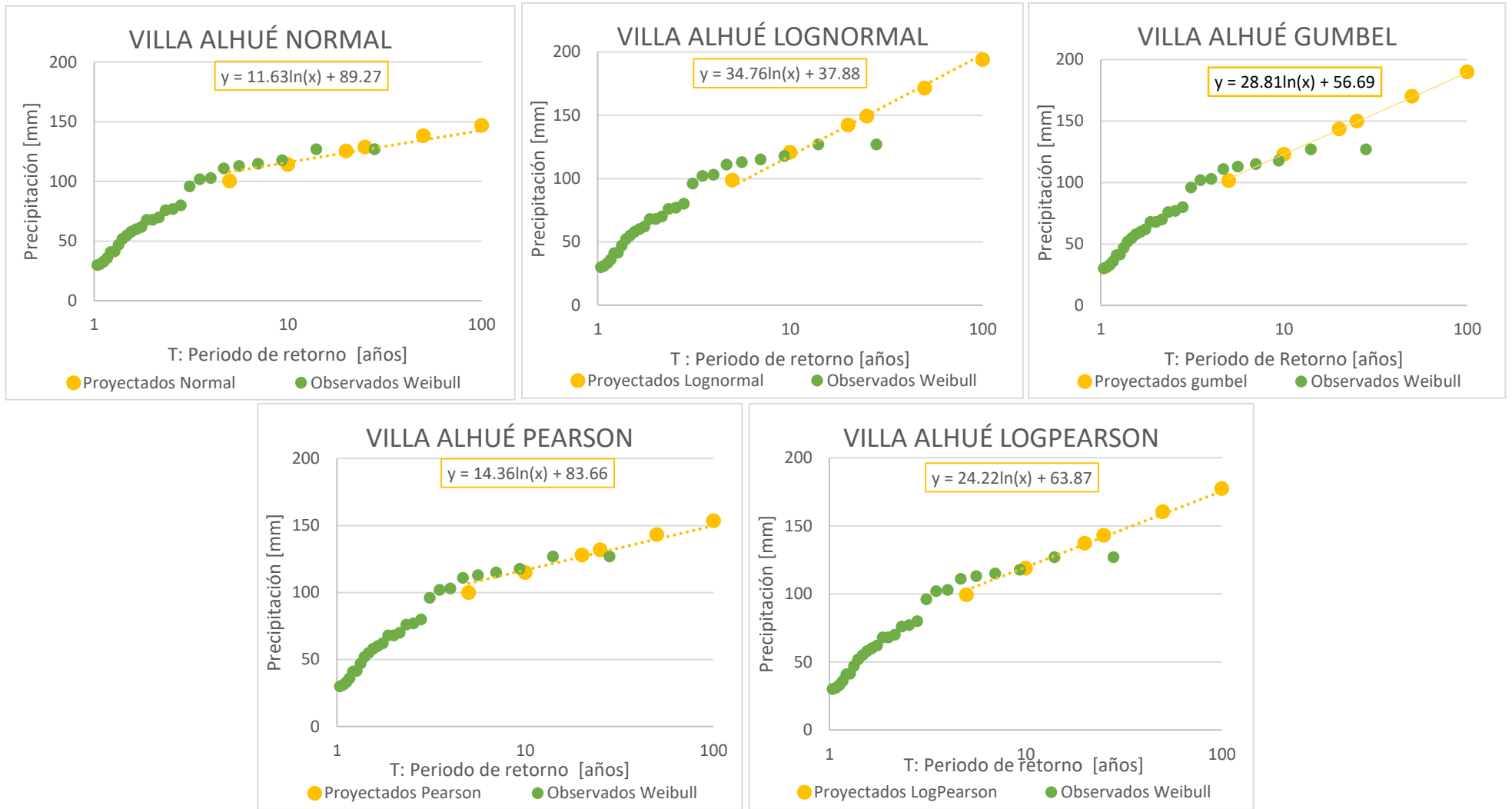


Figura B-2: Comparación entre los análisis de frecuencia de las distribuciones de probabilidad, estación Villa Alhué DGA.

10.2.1.3. Estación Rapel

Tabla B-5: Resumen Parámetros de Análisis, Estación Rapel DGA.

Distribución Gumbel		Kolmogorov Smirnov			χ^2		
μ	70,2	α	0,05	¿SE ACEPTA?	α	0,05	¿SE ACEPTA?
σ	24,0	D (N, α)	0,254	SI	v	2,779	SI
N	27	D (N, α)-Max(D)	0,060		$\chi^2v(1-\alpha)$	7,408	
Ym	0,53300						
σm	1,09982						

Tabla B-6: Detalle Análisis de Frecuencia con Gumbel, Estación Rapel DGA.

Nº	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
1	40,0	0,036	-0,493	0,195	0,195	0,707
2	43,0	0,071	-0,397	0,226	0,190	0,335
3	44,0	0,107	-0,365	0,237	0,166	0,157
4	45,0	0,143	-0,333	0,248	0,141	0,077
5	47,0	0,179	-0,269	0,270	0,127	0,047
6	48,0	0,214	-0,236	0,282	0,103	0,021
7	48,5	0,250	-0,220	0,287	0,073	0,006
8	52,0	0,286	-0,108	0,328	0,078	0,006
9	52,0	0,321	-0,108	0,328	0,042	0,000
10	53,0	0,357	-0,076	0,340	0,018	0,001
11	54,0	0,393	-0,044	0,352	0,041	0,004
12	58,0	0,429	0,084	0,399	0,030	0,002
13	60,0	0,464	0,148	0,422	0,042	0,004
14	62,0	0,500	0,212	0,445	0,055	0,006
15	62,0	0,536	0,212	0,445	0,090	0,015
16	77,0	0,571	0,693	0,606	0,071	0,002
17	80,0	0,607	0,789	0,635	0,063	0,001
18	80,0	0,643	0,789	0,635	0,028	0,000
19	80,0	0,679	0,789	0,635	0,044	0,003
20	83,0	0,714	0,885	0,662	0,053	0,004
21	93,0	0,750	1,205	0,741	0,027	0,000
22	93,0	0,786	1,205	0,741	0,045	0,003
23	98,0	0,821	1,365	0,775	0,047	0,003
24	103,0	0,857	1,525	0,805	0,053	0,003
25	111,0	0,893	1,782	0,845	0,048	0,003
26	113,0	0,929	1,846	0,854	0,075	0,006
27	115,0	0,964	1,910	0,862	0,102	0,011

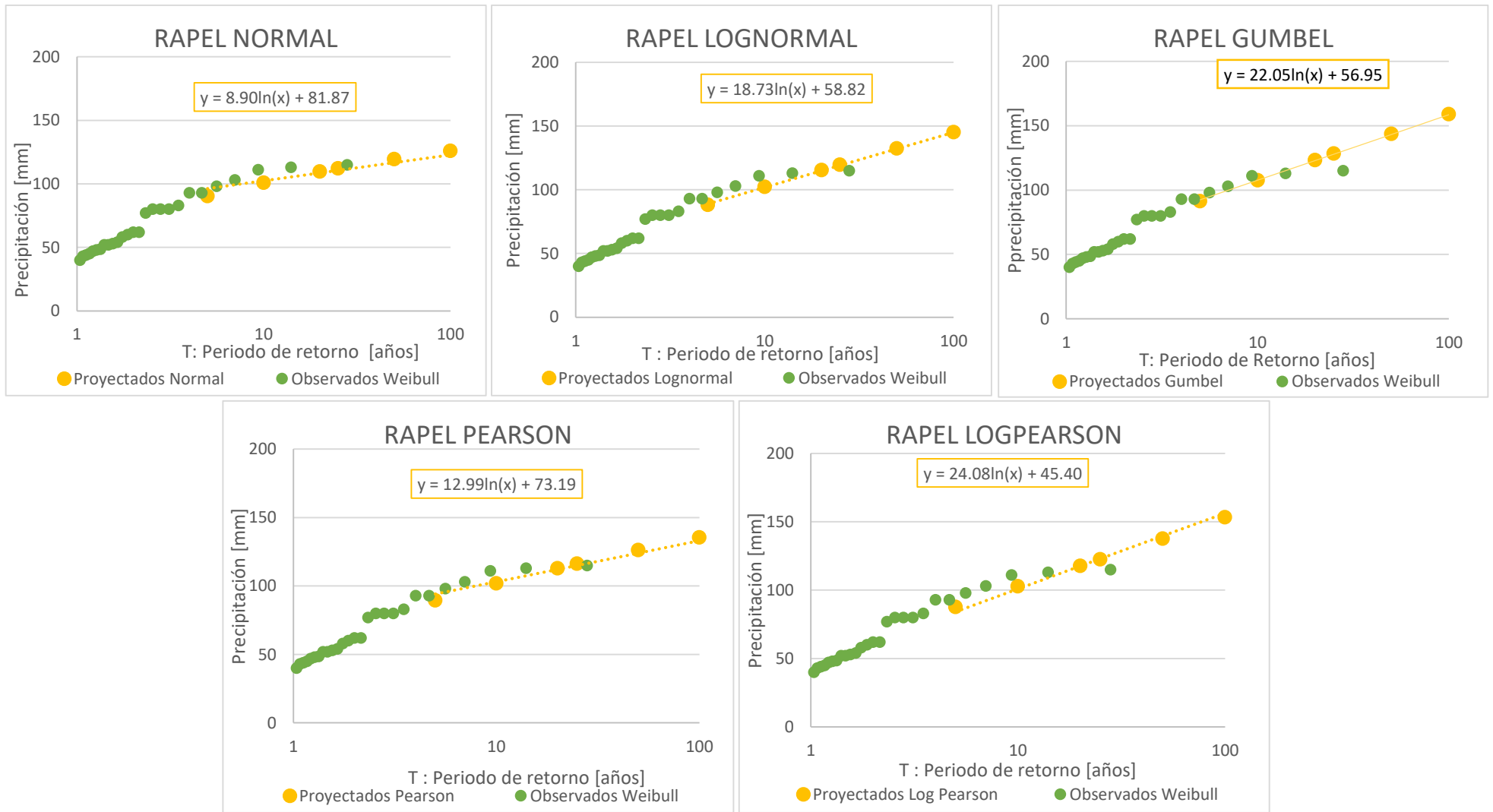


Figura B-3: Comparación entre los análisis de frecuencia de las distribuciones de probabilidad, estación Rapel DGA.

10.2.1.4. *Resumen Precipitaciones Análisis de Frecuencia*

Tabla B-7: Resumen de Precipitaciones en las tres Estaciones DGA en mm.

T [años]	5	10	20	25	50	100	500	1,000	10,000
Barrera Loncha	90	108	125	131	147	164	202	218	273
Villa Alhué	102	123	143	150	170	190	236	256	321
Rapel	91	108	123	128	144	159	194	209	260

10.2.2. **Cuenca Salar de Michincha- Estación Ujina**

Tabla B-8: Resumen Parámetros de Análisis, Estación Ujina DGA.

Distribución Gumbel		Kolmogorov Smirnov			χ^2		
μ	25,4	α	0,05	ζ SE ACEPTA?	α	0,05	ζ SE ACEPTA?
σ	13,9	D(N, α)	0,264	SI	ν	2,667	SI
N	25	D(N, α)-Max(D)	0,163		$\chi^2_{\nu(1-\alpha)}$	7,205	
Ym	0,531						
σ_m	1,091						

Tabla B-9: Detalle Análisis de Frecuencia con Gumbel, Estación Ujina DGA.

Nº	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
1	8,0	0,038	-0,831	0,101	0,101	0,100
2	9,0	0,077	-0,753	0,120	0,081	0,024
3	10,0	0,115	-0,675	0,140	0,063	0,005
4	12,0	0,154	-0,519	0,186	0,071	0,007
5	13,0	0,192	-0,440	0,212	0,058	0,002
6	14,0	0,231	-0,362	0,238	0,046	0,000
7	15,0	0,269	-0,284	0,265	0,034	0,000
8	16,2	0,308	-0,190	0,298	0,029	0,000
9	17,0	0,346	-0,127	0,321	0,025	0,002
10	21,0	0,385	0,186	0,436	0,090	0,007
11	22,0	0,423	0,264	0,464	0,079	0,004
12	22,0	0,462	0,264	0,464	0,041	0,000
13	22,5	0,500	0,303	0,478	0,022	0,001
14	22,9	0,538	0,334	0,489	0,050	0,005
15	23,0	0,577	0,342	0,492	0,085	0,013
16	26,8	0,615	0,639	0,590	0,025	0,001
17	27,0	0,654	0,655	0,595	0,059	0,005
18	29,0	0,692	0,812	0,641	0,051	0,004
19	30,0	0,731	0,890	0,663	0,068	0,006
20	35,0	0,769	1,281	0,757	0,027	0,000
21	38,0	0,808	1,516	0,803	0,034	0,000
22	38,9	0,846	1,586	0,815	0,031	0,001
23	47,0	0,885	2,220	0,897	0,051	0,000
24	56,0	0,923	2,924	0,948	0,063	0,001
25	60,0	0,962	3,237	0,961	0,038	0,000

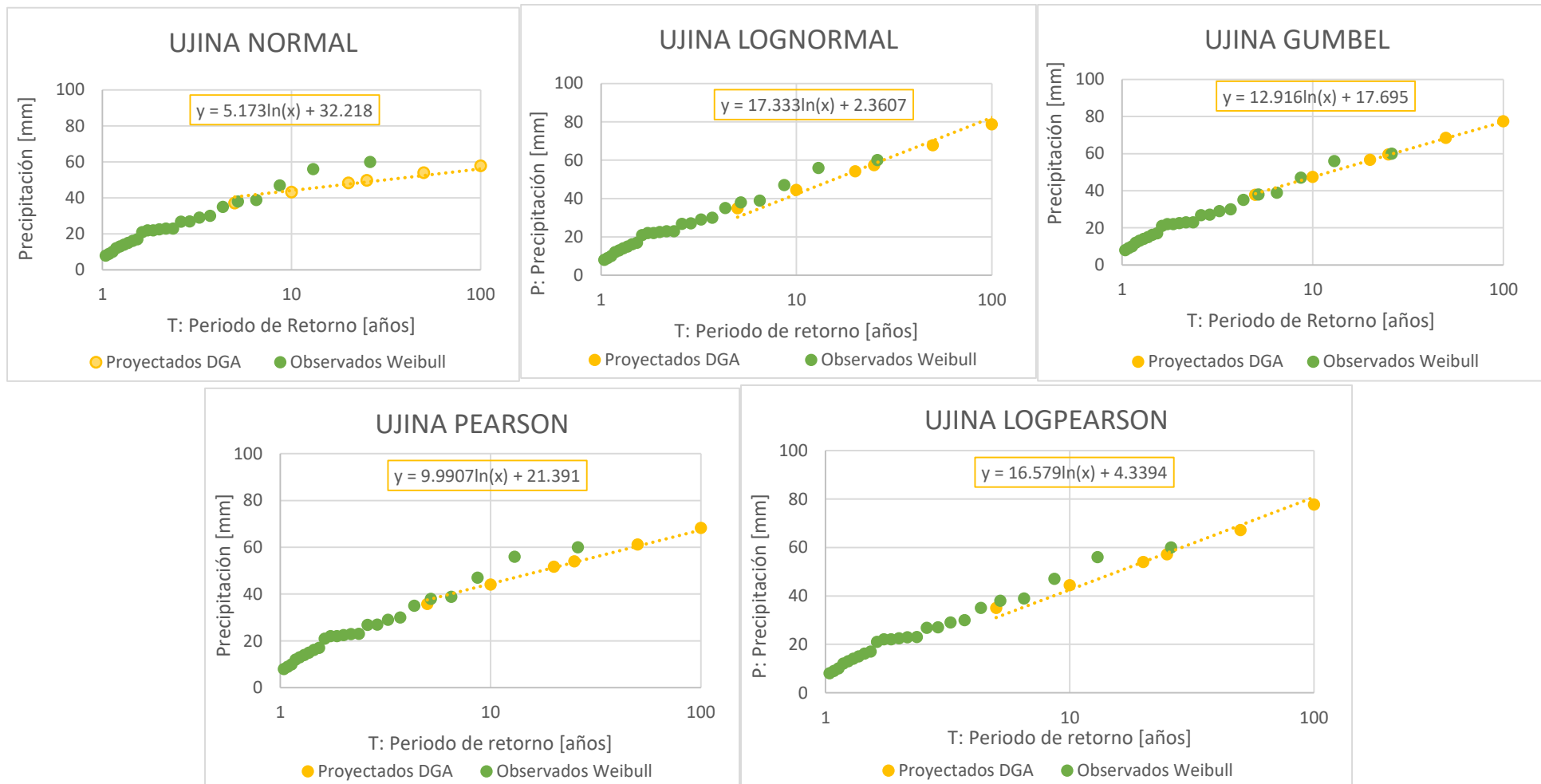


Figura B-4: Comparación entre los análisis de frecuencia de las distribuciones de probabilidad, estación Ujina DGA.

10.2.2.1. Resumen Precipitaciones Análisis de Frecuencia

Tabla B-10: Resumen de Precipitaciones en la Estación Ujina DGA en mm.

T [años]	5	10	20	25	50	100	500	1,000	10,000
Ujina	38	47	57	60	68	77	98	107	136

10.2.3. Cuenca Estero Pupío

10.2.3.1. Estación Caimanes

Tabla B-11: Resumen Parámetros de Análisis, Estación Caimanes DGA.

Distribución Gumbel	Kolmogorov Smirnov			χ^2			
μ	64,5	α	0,05	SE ACEPTA?	α	0,05	SE ACEPTA?
σ	34,4	D(N, α)	0,234	SI	v	3,025	SI
N	32	D(N, α)-Max(D)	0,113		$\chi^2_{v(1-\alpha)}$	7,853	
Ym	0,538						
σ_m	1,119						

Tabla B-12: Detalle Análisis de Frecuencia con Gumbel, Estación Caimanes DGA.

Nº	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
1	2,6	0,030	-1,478	0,012	0,018	0,011
2	20,4	0,061	-0,898	0,086	0,056	0,011
3	22,3	0,091	-0,837	0,099	0,039	0,001
4	24,0	0,121	-0,781	0,113	0,022	0,001
5	25,5	0,152	-0,732	0,125	0,027	0,005
6	29,3	0,182	-0,608	0,159	0,023	0,003
7	31,5	0,212	-0,538	0,180	0,032	0,005
8	34,5	0,242	-0,439	0,212	0,031	0,004
9	37,0	0,273	-0,358	0,239	0,034	0,004
10	37,5	0,303	-0,342	0,245	0,058	0,011
11	39,9	0,333	-0,264	0,272	0,061	0,011
12	44,5	0,364	-0,114	0,326	0,038	0,004
13	49,7	0,394	0,057	0,389	0,025	0,000
14	52,5	0,424	0,146	0,421	0,027	0,000
15	55,3	0,455	0,237	0,454	0,030	0,000
16	59,0	0,485	0,358	0,497	0,043	0,000
17	61,5	0,515	0,440	0,525	0,040	0,000
18	67,3	0,545	0,629	0,587	0,072	0,003
19	68,4	0,576	0,664	0,597	0,052	0,001
20	74,1	0,606	0,851	0,653	0,077	0,004
21	79,0	0,636	1,010	0,695	0,089	0,005
22	86,0	0,667	1,238	0,748	0,112	0,010
23	92,0	0,697	1,433	0,788	0,121	0,012
24	93,0	0,727	1,466	0,794	0,097	0,006
25	94,3	0,758	1,509	0,802	0,074	0,003
26	96,0	0,788	1,563	0,811	0,053	0,001
27	97,3	0,818	1,606	0,818	0,030	0,000
28	114,4	0,848	2,162	0,891	0,073	0,002
29	115,6	0,879	2,201	0,895	0,047	0,000
30	116,0	0,909	2,214	0,897	0,018	0,000
31	121,0	0,939	2,377	0,911	0,028	0,001
32	122,9	0,970	2,440	0,917	0,053	0,003

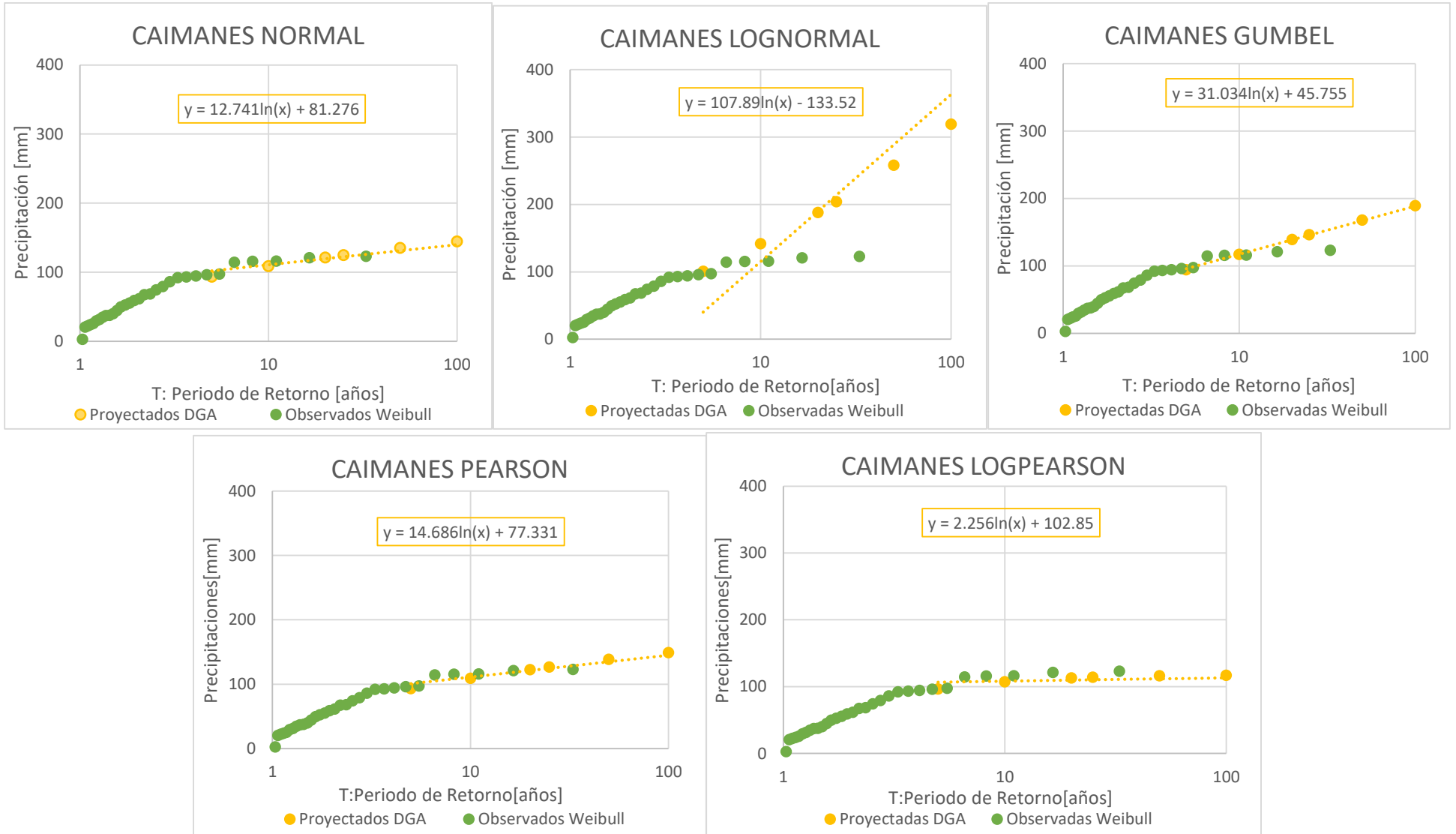


Figura B-5: Comparación entre los análisis de frecuencia de las distribuciones de probabilidad, estación Caimanes DGA.

10.2.3.2. Estación Culimo

Tabla B-13: Resumen Parámetros de Análisis, Estación Culimo DGA.

Distribución Gumbel		Kolmogorov Smirnov			χ^2		
μ	53,9	α	0,05	SE ACEPTA?	α	0,05	SE ACEPTA?
σ	27,7	D(N, α)	0,234	SI	v	3,025	SI
N	32	D(N, α)-Max(D)	0,101		$\chi^2_{v(1-\alpha)}$	7,853	
Ym	0,538						
σ_m	1,119						

Tabla B-14: Detalle Análisis de Frecuencia con Gumbel, Estación Culimo DGA.

Nº	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
1	4,5	0,030	-1,455	0,014	0,016	0,009
2	17,0	0,061	-0,950	0,075	0,045	0,004
3	21,0	0,091	-0,789	0,111	0,050	0,004
4	24,4	0,121	-0,652	0,147	0,056	0,005
5	24,5	0,152	-0,648	0,148	0,027	0,000
6	25,3	0,182	-0,616	0,157	0,025	0,003
7	26,2	0,212	-0,579	0,168	0,044	0,009
8	29,6	0,242	-0,442	0,211	0,031	0,004
9	31,0	0,273	-0,386	0,230	0,043	0,007
10	33,2	0,303	-0,297	0,260	0,043	0,006
11	38,8	0,333	-0,071	0,342	0,039	0,000
12	41,4	0,364	0,034	0,380	0,047	0,001
13	43,7	0,394	0,125	0,414	0,050	0,001
14	44,3	0,424	0,151	0,423	0,029	0,000
15	45,5	0,455	0,199	0,441	0,016	0,000
16	46,0	0,485	0,219	0,448	0,037	0,003
17	48,2	0,515	0,308	0,480	0,036	0,002
18	48,2	0,545	0,308	0,480	0,066	0,008
19	54,0	0,576	0,542	0,559	0,017	0,000
20	56,9	0,606	0,659	0,596	0,020	0,000
21	61,7	0,636	0,853	0,653	0,047	0,000
22	73,8	0,667	1,341	0,770	0,133	0,016
23	77,4	0,697	1,486	0,797	0,131	0,014
24	78,5	0,727	1,530	0,805	0,108	0,008
25	79,9	0,758	1,587	0,815	0,088	0,004
26	81,0	0,788	1,631	0,822	0,065	0,001
27	81,0	0,818	1,631	0,822	0,034	0,000
28	95,2	0,848	2,204	0,896	0,077	0,003
29	96,0	0,879	2,236	0,899	0,050	0,000
30	96,2	0,909	2,244	0,899	0,021	0,000
31	98,0	0,939	2,317	0,906	0,033	0,001
32	102,3	0,970	2,490	0,920	0,049	0,003

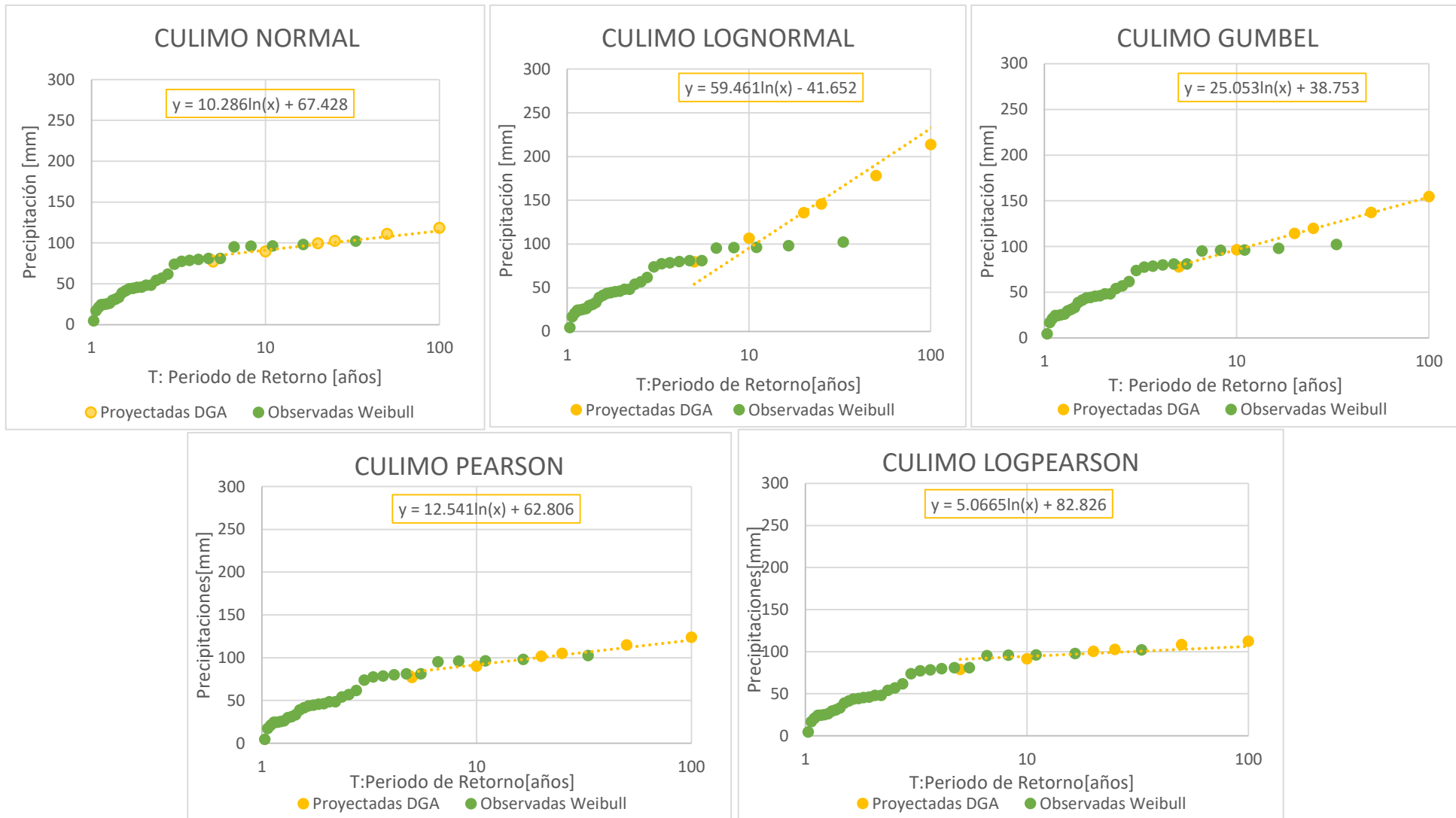


Figura B-6: Comparación entre los análisis de frecuencia de las distribuciones de probabilidad, estación Culimo DGA.

10.2.3.3. *Estación Limahuida*

Tabla B-15: Resumen Parámetros de Análisis, Estación Limahuida DGA.

Distribución Gumbel		Kolmogorov Smirnov			χ^2		
μ	38,8	α	0,05	SE ACEPTA?	α	0,05	SE ACEPTA?
σ	19,8	D(N, α)	0,234	SI	v	3,025	SI
N	32	D(N, α)-Max(D)	0,132		$\chi^2_{v(1-\alpha)}$	7,853	
Ym	0,538						
σ_m	1,119						

Tabla B-16: Detalle Análisis de Frecuencia con Gumbel, Estación Limahuida DGA.

Nº	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
1	8,0	0,030	-1,199	0,036	0,036	0,001
2	8,0	0,061	-1,199	0,036	0,024	0,010
3	15,0	0,091	-0,804	0,107	0,046	0,003
4	20,0	0,121	-0,522	0,185	0,094	0,034
5	20,0	0,152	-0,522	0,185	0,064	0,008
6	20,5	0,182	-0,494	0,194	0,043	0,001
7	21,0	0,212	-0,466	0,203	0,021	0,000
8	24,5	0,242	-0,269	0,270	0,058	0,003
9	27,0	0,273	-0,128	0,321	0,079	0,009
10	27,0	0,303	-0,128	0,321	0,048	0,001
11	27,0	0,333	-0,128	0,321	0,018	0,000
12	27,5	0,364	-0,101	0,331	0,033	0,003
13	28,0	0,394	-0,071	0,342	0,052	0,007
14	30,0	0,424	0,041	0,383	0,041	0,004
15	32,5	0,455	0,182	0,435	0,020	0,001
16	34,0	0,485	0,267	0,465	0,020	0,001
17	35,0	0,515	0,323	0,485	0,030	0,002
18	36,0	0,545	0,380	0,505	0,041	0,003
19	42,8	0,576	0,765	0,628	0,083	0,005
20	46,0	0,606	0,944	0,678	0,102	0,008
21	46,0	0,636	0,944	0,678	0,072	0,003
22	49,0	0,667	1,113	0,720	0,084	0,004
23	50,0	0,697	1,169	0,733	0,066	0,002
24	50,0	0,727	1,169	0,733	0,036	0,000
25	50,0	0,758	1,169	0,733	0,025	0,001
26	50,0	0,788	1,169	0,733	0,055	0,004
27	54,8	0,818	1,442	0,789	0,029	0,001
28	61,1	0,848	1,793	0,847	0,029	0,000
29	62,0	0,879	1,846	0,854	0,025	0,001
30	65,0	0,909	2,015	0,875	0,034	0,001
31	86,0	0,939	3,199	0,960	0,051	0,000
32	88,0	0,970	3,312	0,964	0,025	0,000

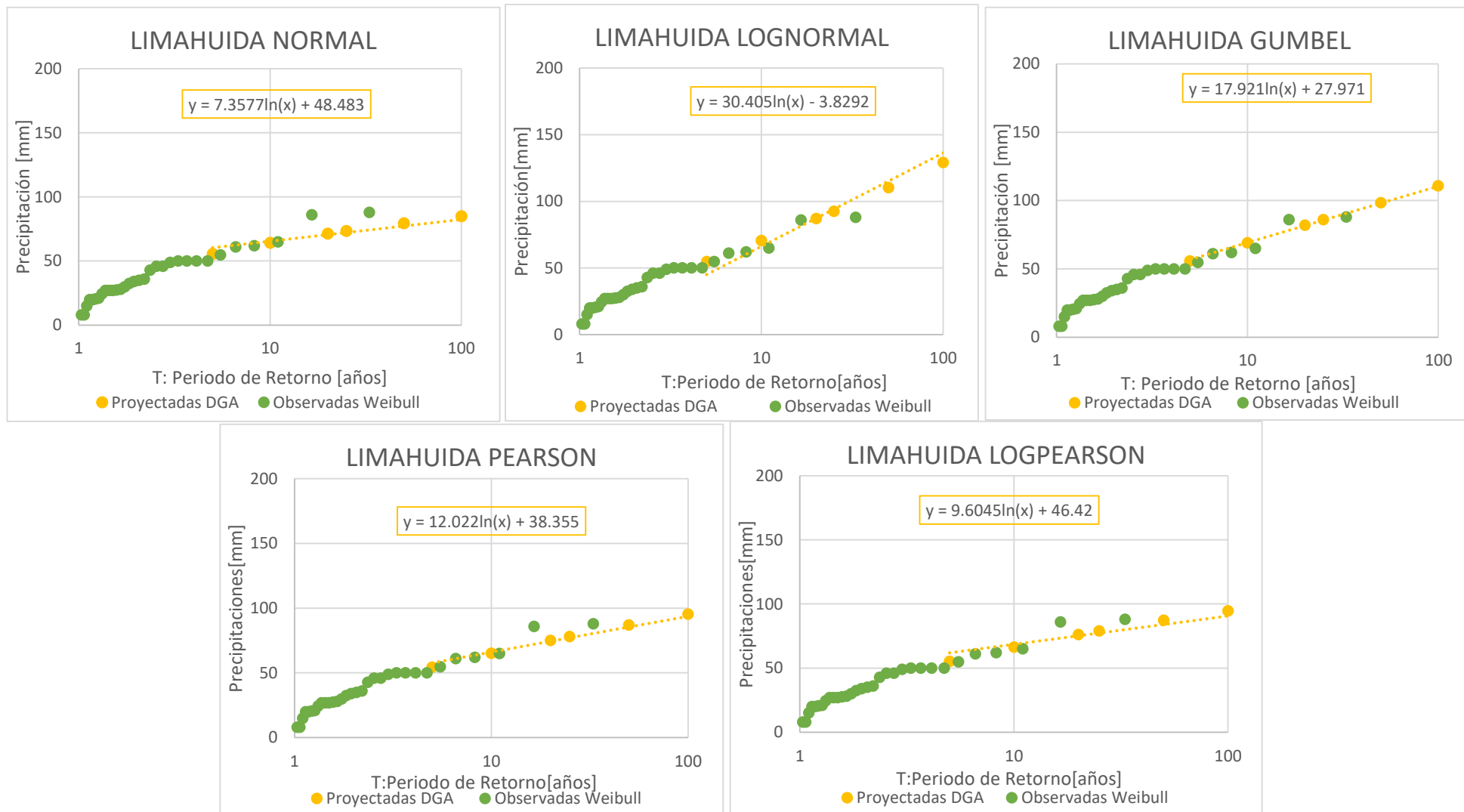


Figura B-7: Comparación entre los análisis de frecuencia de las distribuciones de probabilidad, estación Limahuida DGA.

10.2.3.4. *Estación Salamanca*

Tabla B-17: Resumen Parámetros de Análisis, Estación Salamanca DGA.

Distribución Gumbel		Kolmogorov Smirnov			χ^2		
μ	51,1	α	0,05	SE ACEPTA?	α	0,05	SE ACEPTA?
σ	25,1	D(N, α)	0,234	SI	v	3,025	SI
N	32	D(N, α)-Max(D)	0,126		$\chi^2_{v(1-\alpha)}$	7,853	
Ym	0,538						
σ_m	1,119						

Tabla B-18: Detalle Análisis de Frecuencia con Gumbel, Estación Salamanca DGA.

Nº	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
1	12,4	0,030	-1,187	0,038	0,038	0,002
2	15,3	0,061	-1,060	0,056	0,025	0,000
3	21,5	0,091	-0,783	0,112	0,051	0,005
4	22,6	0,121	-0,734	0,124	0,034	0,000
5	23,1	0,152	-0,712	0,130	0,021	0,003
6	27,5	0,182	-0,516	0,187	0,036	0,000
7	29,0	0,212	-0,449	0,209	0,027	0,000
8	29,7	0,242	-0,416	0,220	0,023	0,002
9	31,3	0,273	-0,347	0,243	0,030	0,003
10	33,4	0,303	-0,253	0,276	0,027	0,002
11	38,7	0,333	-0,016	0,362	0,059	0,002
12	41,5	0,364	0,109	0,408	0,074	0,005
13	42,0	0,394	0,130	0,416	0,052	0,001
14	45,1	0,424	0,269	0,466	0,072	0,004
15	45,2	0,455	0,274	0,467	0,043	0,000
16	46,0	0,485	0,310	0,480	0,026	0,000
17	48,0	0,515	0,399	0,511	0,026	0,000
18	48,1	0,545	0,403	0,513	0,033	0,002
19	48,2	0,576	0,408	0,514	0,062	0,007
20	49,0	0,606	0,443	0,526	0,080	0,010
21	50,0	0,636	0,488	0,541	0,095	0,014
22	61,0	0,667	0,979	0,687	0,050	0,001
23	62,0	0,697	1,023	0,698	0,031	0,000
24	72,0	0,727	1,469	0,794	0,098	0,006
25	77,6	0,758	1,719	0,836	0,109	0,008
26	78,2	0,788	1,746	0,840	0,082	0,003
27	79,0	0,818	1,782	0,845	0,057	0,001
28	80,0	0,848	1,826	0,851	0,033	0,000
29	81,1	0,879	1,877	0,858	0,021	0,000
30	93,0	0,909	2,406	0,914	0,035	0,000
31	99,0	0,939	2,674	0,933	0,024	0,000
32	105,2	0,970	2,952	0,949	0,021	0,000

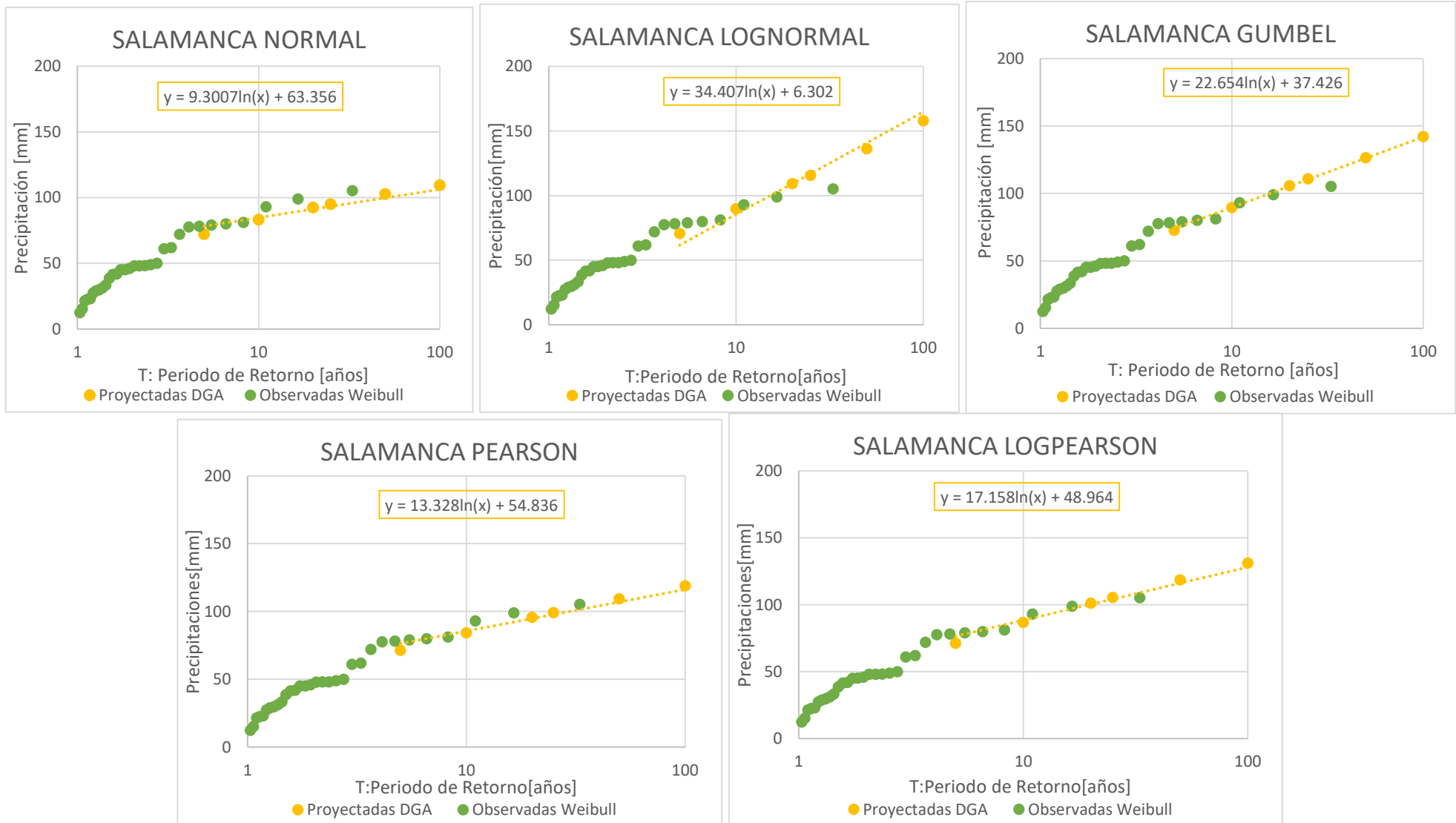


Figura B-8: Comparación entre los análisis de frecuencia de las distribuciones de probabilidad, estación Salamanca DGA.

10.2.3.5. Resumen Precipitaciones Análisis de Frecuencia

Tabla B-19: Resumen de Precipitaciones en las cuatro Estaciones DGA en mm.

T [años]	5	10	20	25	50	100	500	1,000	10,000
Caimanes	94	117	139	146	168	189	239	260	331
Culimo	78	96	114	120	137	155	195	212	269
Limahuida	56	69	82	86	98	111	139	152	193
Salamanca	73	90	106	111	127	142	178	194	246

10.2.4. Cuenca Choapa

10.2.4.1. Estación Cuncumén

Tabla B-20: Resumen Parámetros de Análisis, Estación Cuncumén DGA.

Distribución Gumbel		Kolmogorov Smirnov			χ^2		
μ	54,8	α	0,05	SE ACEPTA?	α	0,05	SE ACEPTA?
σ	32,8	D(N, α)	0,238	SI	v	2,979	SI
N	31	D(N, α)-Max(D)	0,116		$\chi^2_{v(1-\alpha)}$	7,772	
Ym	0,537						
σ_m	1,116						

Tabla B-21: Detalle Análisis de Frecuencia con Gumbel, Estación Cuncumén DGA.

Nº	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
1	17,0	0,031	-0,747	0,121	0,121	0,258
2	20,0	0,063	-0,645	0,149	0,117	0,119
3	23,5	0,094	-0,526	0,184	0,122	0,087
4	24,0	0,125	-0,509	0,189	0,096	0,033
5	24,5	0,156	-0,492	0,195	0,070	0,009
6	24,6	0,188	-0,489	0,196	0,040	0,000
7	26,0	0,219	-0,441	0,211	0,024	0,000
8	27,0	0,250	-0,407	0,223	0,027	0,003
9	30,0	0,281	-0,305	0,257	0,024	0,002
10	30,0	0,313	-0,305	0,257	0,055	0,010
11	34,0	0,344	-0,169	0,306	0,038	0,004
12	34,0	0,375	-0,169	0,306	0,069	0,013
13	35,0	0,406	-0,135	0,318	0,088	0,019
14	39,0	0,438	0,001	0,368	0,069	0,011
15	39,7	0,469	0,024	0,377	0,092	0,018
16	47,0	0,500	0,273	0,467	0,033	0,002
17	49,0	0,531	0,341	0,491	0,040	0,003
18	50,5	0,563	0,392	0,509	0,054	0,005
19	55,0	0,594	0,545	0,560	0,034	0,002
20	57,0	0,625	0,613	0,582	0,043	0,003
21	57,0	0,656	0,613	0,582	0,075	0,008
22	64,0	0,688	0,851	0,652	0,035	0,002
23	76,0	0,719	1,259	0,753	0,065	0,002
24	77,0	0,750	1,293	0,760	0,041	0,000
25	82,0	0,781	1,463	0,793	0,043	0,000
26	93,9	0,813	1,866	0,857	0,075	0,002
27	95,0	0,844	1,905	0,862	0,049	0,000
28	100,0	0,875	2,075	0,882	0,038	0,000
29	110,0	0,906	2,415	0,915	0,040	0,000
30	113,0	0,938	2,517	0,922	0,016	0,000
31	143,2	0,969	3,544	0,972	0,034	0,000

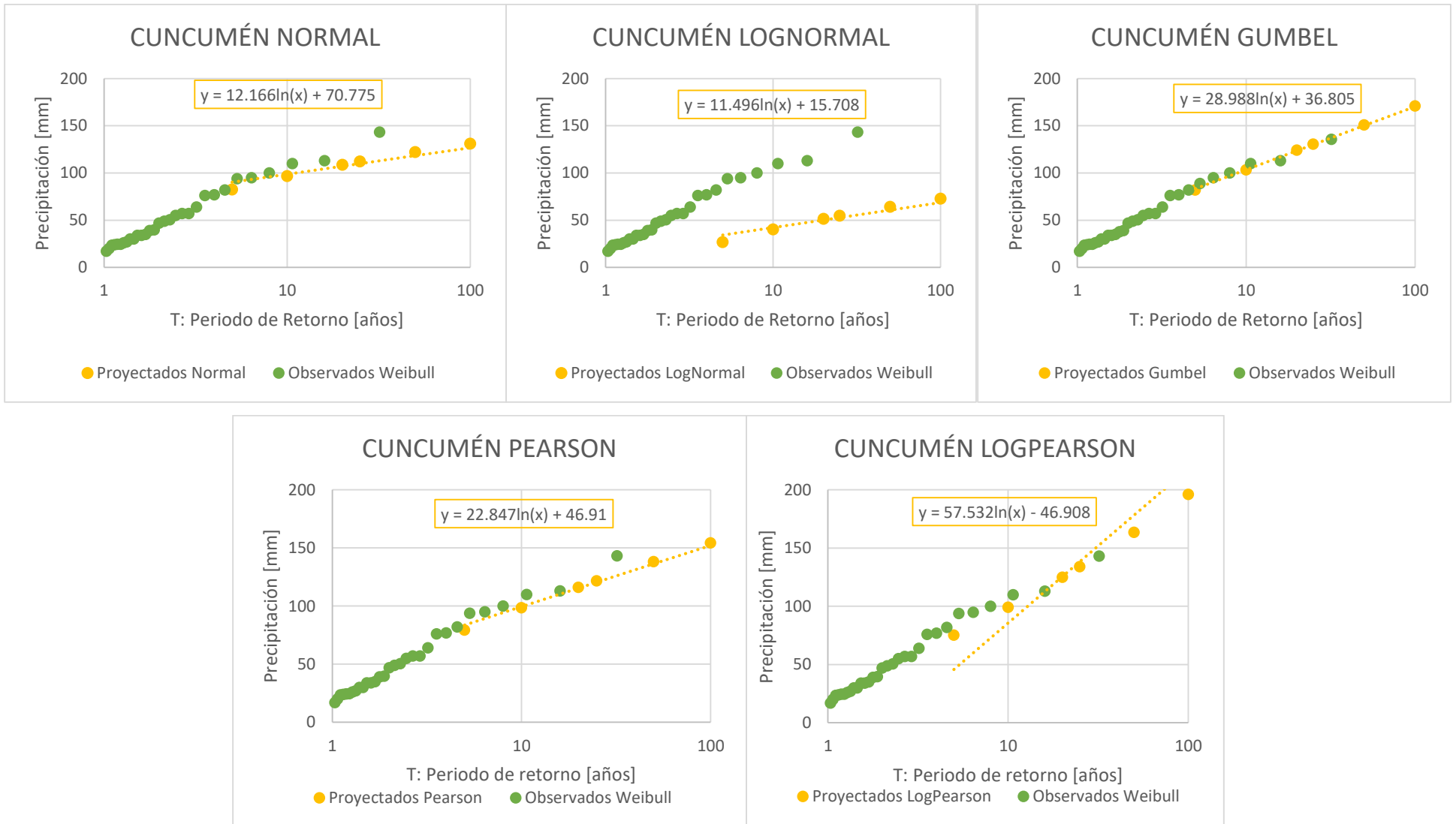


Figura B-9: Comparación entre los análisis de frecuencia de las distribuciones de probabilidad, estación Cuncumén DGA.

10.2.4.2. Estación La Tranquilla

Tabla B-22: Resumen Parámetros de Análisis, Estación La Tranquilla DGA.

Distribución Gumbel		Kolmogorov Smirnov			χ^2		
μ	54,3	α	0,05	SE ACEPTA?	α	0,05	SE ACEPTA?
σ	30,5	D(N, α)	0,238	SI	v	2,979	SI
N	31	D(N, α)-Max(D)	0,130		$\chi^2_{v(1-\alpha)}$	7,772	
Ym	0,537						
σ_m	1,116						

Tabla B-23: Detalle Análisis de Frecuencia con Gumbel, Estación La Tranquilla DGA.

Nº	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
1	15,0	0,031	-0,899	0,086	0,086	0,095
2	21,0	0,063	-0,680	0,139	0,108	0,094
3	22,0	0,094	-0,643	0,149	0,087	0,033
4	23,0	0,125	-0,607	0,160	0,066	0,010
5	23,0	0,156	-0,607	0,160	0,035	0,000
6	23,3	0,188	-0,596	0,163	0,025	0,003
7	31,0	0,219	-0,314	0,254	0,067	0,006
8	34,0	0,250	-0,205	0,293	0,074	0,007
9	35,0	0,281	-0,168	0,306	0,056	0,002
10	35,5	0,313	-0,150	0,313	0,032	0,000
11	39,0	0,344	-0,022	0,360	0,047	0,001
12	41,0	0,375	0,051	0,387	0,043	0,000
13	42,0	0,406	0,088	0,400	0,025	0,000
14	45,0	0,438	0,197	0,440	0,034	0,000
15	45,5	0,469	0,215	0,447	0,022	0,001
16	48,0	0,500	0,307	0,479	0,021	0,001
17	50,0	0,531	0,380	0,505	0,027	0,001
18	51,0	0,563	0,416	0,517	0,045	0,004
19	54,0	0,594	0,526	0,554	0,040	0,003
20	55,0	0,625	0,563	0,566	0,059	0,006
21	57,0	0,656	0,636	0,589	0,067	0,007
22	60,0	0,688	0,745	0,622	0,065	0,006
23	66,0	0,719	0,965	0,683	0,036	0,002
24	66,5	0,750	0,983	0,688	0,062	0,005
25	69,5	0,781	1,093	0,715	0,066	0,006
26	84,0	0,813	1,622	0,821	0,040	0,000
27	85,0	0,844	1,659	0,827	0,017	0,000
28	97,0	0,875	2,097	0,884	0,041	0,000
29	107,0	0,906	2,463	0,918	0,043	0,000
30	110,0	0,938	2,573	0,926	0,020	0,000
31	148,0	0,969	3,961	0,981	0,044	0,000

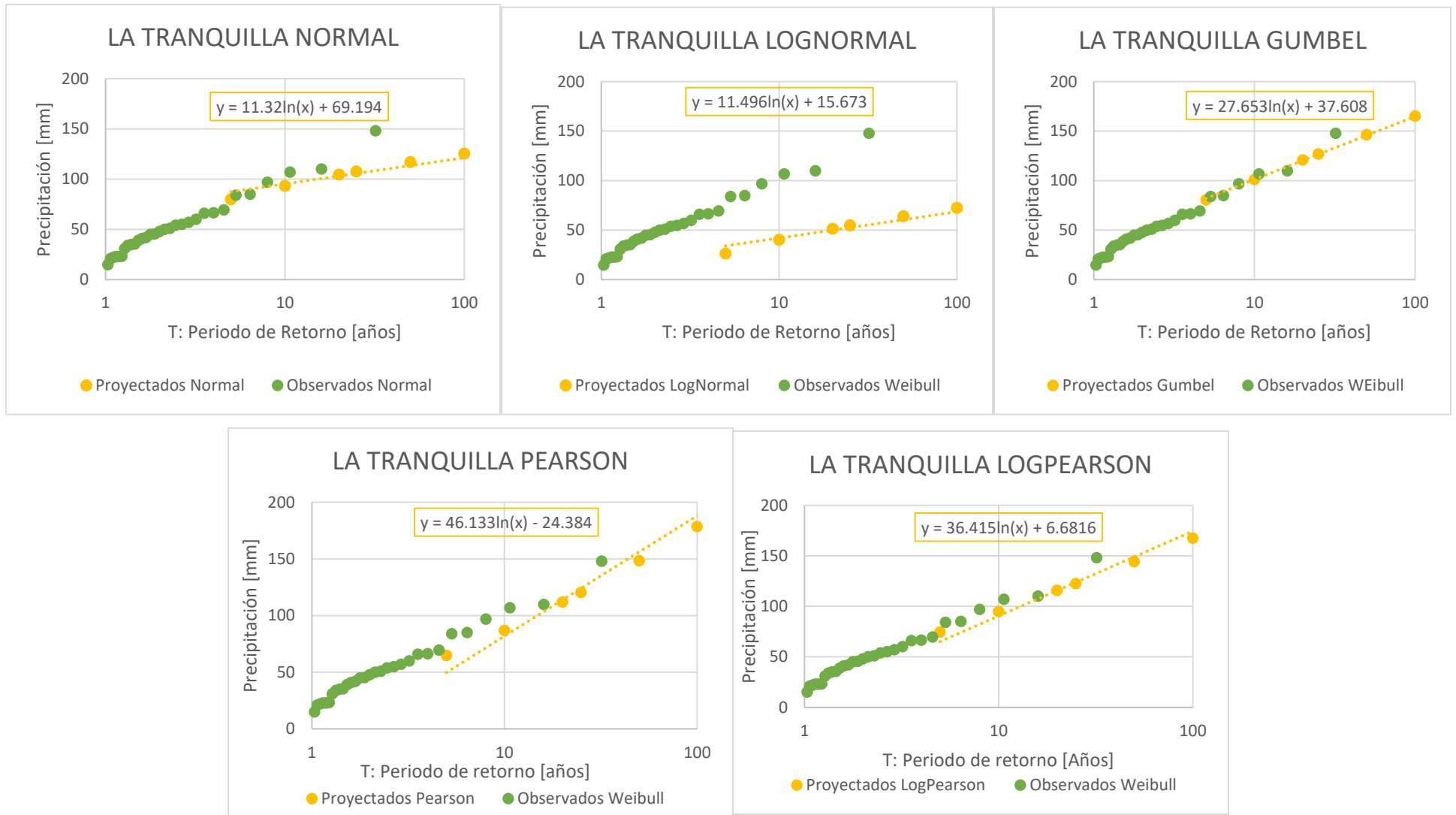


Figura B-10: Comparación entre los análisis de frecuencia de las distribuciones de probabilidad, estación La Tranquilla DGA.

10.2.4.3. Resumen Precipitaciones Análisis de Frecuencia

Tabla B-24: Resumen de precipitaciones máximas diarias en las estaciones DGA de distribución Gumbel, en mm.

T [años]	5	10	20	25	50	100	500	1,000	10,000
Cuncumén	83	105	126	133	154	174	222	242	310
La Tranquilla	81	101	121	127	146	165	210	229	292

10.3. ANEXO C: Precipitaciones en la Línea Base de las Proyecciones

Se presentan las series de precipitaciones diarias máximas anuales de la línea base de tiempo, de acuerdo con las proyecciones ESM2G y ESM2M del modelo NEX GDDP.

10.3.1. Cuenca Estero Alhué

Tabla C-1: Serie de Precipitaciones NEXGDDP desde 1979 a 2005, Cuenca Estero Alhué en mm.

año	BARRERA LONCHA		VILLA ALHUÉ		RAPEL	
	ESM2G	ESM2M	ESM2G	ESM2M	ESM2G	ESM2M
1979	56,9	79,7	56,9	79,7	97,5	54,3
1980	53,5	70,7	53,5	70,7	59,3	56,0
1981	76,9	85,8	76,9	85,8	58,3	29,3
1982	81,3	146,7	81,3	146,7	99,9	71,1
1983	58,5	209,9	58,5	209,9	41,2	93,8
1984	87,2	44,5	87,2	44,5	74,9	20,3
1985	64,5	73,6	64,5	73,6	75,2	57,3
1986	78,7	54,1	78,7	54,1	52,3	58,9
1987	89,7	94,9	89,7	94,9	91,4	113,6
1988	93,4	44,4	93,4	44,4	63,9	23,1
1989	101,4	65,7	101,4	65,7	30,0	48,0
1990	23,4	77,4	23,4	77,4	26,3	37,4
1991	117,1	75,8	117,1	75,8	76,3	83,3
1992	75,3	97,5	75,3	97,5	48,7	104,1
1993	92,9	18,9	92,9	18,9	123,9	16,2
1994	62,3	52,8	62,3	52,8	83,7	29,9
1995	71,4	68,3	71,4	68,3	57,8	86,3
1996	178,8	116,9	178,8	116,9	167,6	93,8
1997	38,8	61,7	38,8	61,7	33,7	41,9
1998	66,9	98,8	66,9	98,8	102,3	50,1
1999	50,8	42,7	50,8	42,7	41,2	37,0
2000	27,9	38,5	27,9	38,5	37,6	61,9
2001	27,6	86,7	27,6	86,7	81,0	61,8

año	BARRERA LONCHA		VILLA ALHUÉ		RAPEL	
	ESM2G	ESM2M	ESM2G	ESM2M	ESM2G	ESM2M
2002	45,5	44,5	45,5	44,5	47,6	21,7
2003	132,0	54,3	132,0	54,3	82,3	21,7
2004	33,4	68,6	33,4	68,6	45,9	56,5
2005	58,6	44,4	58,6	44,4	57,4	28,3

10.3.2. Cuenca Salar de Michincha

Tabla C-2: Serie de Precipitaciones NEXGDDP desde 1974 a 2005, Estación Ujina en mm.

año	UJINA	
	ESM2G	ESM2M
1974	2,3	2,3
1975	6,4	4,8
1976	11,7	8,5
1977	1,4	13,5
1978	3,4	13,1
1979	4,4	6,5
1980	15,7	4,5
1981	1,6	9,4
1982	4,2	7,6
1983	1,6	10,4
1984	4,8	2,3
1985	3,6	3,3
1986	22,8	3,3
1987	6,2	17,6
1988	12,3	1,9
1989	18,4	1,4
1990	3,9	3,5
1991	12,2	20,7
1992	3,3	1,9
1993	1,9	2,2
1994	1,4	5,8
1995	3,8	3,6
1996	5,0	1,1
1997	3,7	6,5
1998	18,9	9,1
1999	6,0	4,7
2000	7,5	5,6
2001	3,0	17,6
2002	6,4	3,4

año	UJINA	
	ESM2G	ESM2M
2003	10,4	1,3
2004	4,5	2,9
2005	16,2	1,1

10.3.3. Cuenca Estero Pupío

Tabla C-3: Serie de Precipitaciones NEXGDDP desde 1974 a 2005, Cuenca Estero Pupío en mm.

año	CAIMANES		CULIMO		LIMAHUIDA		SALAMANCA	
	ESM2G	ESM2M	ESM2G	ESM2M	ESM2G	ESM2M	ESM2G	ESM2M
1974	29,8	28,5	30,8	72,5	29,6	27,1	36,5	13,9
1975	79,2	40,4	44,9	43,7	77,6	39,7	34,9	16,3
1976	39,4	26,6	37,0	202,0	37,7	21,3	82,8	11,4
1977	42,0	75,6	37,7	72,6	27,0	74,4	36,2	30,0
1978	94,4	20,5	47,7	25,7	58,7	21,0	28,9	49,4
1979	70,2	44,2	56,8	83,4	67,3	48,1	21,5	84,2
1980	31,6	33,9	74,6	57,3	30,3	31,1	26,0	42,0
1981	71,5	20,7	45,5	28,2	72,9	14,1	55,1	39,9
1982	21,0	49,4	32,9	65,2	15,8	46,2	18,1	49,8
1983	27,4	48,0	56,6	52,6	27,3	48,3	49,9	85,4
1984	27,6	11,6	58,9	14,9	24,8	11,0	98,3	14,5
1985	85,3	37,7	105,2	45,4	89,7	37,0	42,5	32,1
1986	45,7	25,9	36,9	26,6	43,6	24,4	26,5	14,8
1987	26,5	62,7	40,5	46,0	19,0	66,6	33,4	19,5
1988	61,2	25,8	40,8	20,4	52,4	22,8	54,9	38,2
1989	32,8	10,0	29,1	14,7	25,1	8,5	30,0	13,8
1990	8,0	67,3	50,6	25,8	7,3	69,1	19,1	60,5
1991	16,9	62,2	32,2	87,8	12,5	65,0	12,2	45,9
1992	28,7	68,0	42,4	49,2	30,6	57,3	27,5	116,5
1993	29,9	11,0	181,7	8,5	34,6	7,8	83,0	8,9
1994	76,5	16,6	315,3	50,0	76,8	13,8	39,3	25,6
1995	33,8	48,6	110,9	31,8	33,0	46,9	83,9	29,8
1996	49,5	95,6	95,8	158,4	50,5	89,0	28,7	113,1
1997	31,2	34,6	123,1	66,8	34,1	34,1	14,1	51,3
1998	44,9	38,2	155,2	16,9	40,7	27,8	36,7	56,8
1999	48,5	34,3	20,5	42,9	50,8	34,2	10,5	35,6
2000	8,5	42,6	17,4	43,3	7,4	39,6	15,7	25,8
2001	19,4	21,8	31,2	115,6	16,9	19,6	35,5	61,3
2002	33,6	14,1	16,9	21,7	33,0	13,5	39,6	18,7

año	CAIMANES		CULIMO		LIMAHUIDA		SALAMANCA	
	ESM2G	ESM2M	ESM2G	ESM2M	ESM2G	ESM2M	ESM2G	ESM2M
2003	44,1	48,1	36,8	35,9	35,8	47,0	31,9	71,2
2004	29,9	112,2	124,6	122,9	26,6	121,6	22,7	56,5
2005	53,2	28,9	81,9	13,7	53,1	21,6	41,8	46,2

10.3.4. Cuenca Choapa

Tabla C-4: Serie de Precipitaciones NEXGDDP desde 1975 a 2005, Cuenca Choapa en mm.

año	CUMCUMÉN		LA TRANQUILLA	
	ESM2G	ESM2M	ESM2G	ESM2M
1975	30,4	15,1	30,4	15,1
1976	109,0	12,9	109,0	12,9
1977	35,5	30,6	35,5	30,6
1978	32,2	66,2	32,2	66,2
1979	20,9	129,4	20,9	129,4
1980	22,0	47,4	22,0	47,4
1981	44,7	37,9	44,7	37,9
1982	17,4	46,2	17,4	46,2
1983	41,6	63,8	41,6	63,8
1984	107,4	12,1	107,4	12,1
1985	38,5	30,8	38,5	30,8
1986	23,3	14,7	23,3	14,7
1987	37,5	16,8	37,5	16,8
1988	50,0	28,3	50,0	28,3
1989	22,5	12,2	22,5	12,2
1990	20,3	61,5	20,3	61,5
1991	14,9	40,1	14,9	40,1
1992	23,5	108,0	23,5	108,0
1993	68,8	7,5	68,8	7,5
1994	46,4	22,9	46,4	22,9
1995	86,5	27,2	86,5	27,2
1996	30,0	131,2	30,0	131,2
1997	12,5	53,7	12,5	53,7
1998	30,8	53,7	30,8	53,7
1999	9,8	36,7	9,8	36,7
2000	15,9	26,4	15,9	26,4
2001	35,6	71,7	35,6	71,7
2002	34,9	17,2	34,9	17,2
2003	31,8	72,7	31,8	72,7
2004	20,9	51,7	20,9	51,7
2005	36,2	54,1	36,2	54,1

10.4. ANEXO D: Análisis de Frecuencia de las Precipitaciones en la Línea Base de las Proyecciones

Se presenta la información del análisis de frecuencia de la línea base de tiempo, con la distribución determinada en el Acápite 5 y para las estaciones de la DGA correspondientes a cada depósito analizado mediante las series de precipitaciones de las proyecciones de cambio climático.

10.4.1. Cuenca Estero Alhué

10.4.1.1. Estación Barrera Loncha

Tabla D-1: Resumen Parámetros de Análisis, Estación Barrera Loncha, Modelo ESM2G.

Distribución Gumbel		Kolmogorov Smirnov			χ^2		
μ	72,0	α	0,05	SE ACEPTA?	α	0,05	SE ACEPTA?
σ	34,3	D(N, α)	0,254	SI	v	2,779	SI
N	27	D(N, α)-Max(D)	0,154		$\chi^2v(1-\alpha)$	7,408	
Ym	0,53300						
σ_m	1,09982						

Tabla D-2: Detalle Análisis de Frecuencia, Estación Barrera Loncha, Modelo ESM2G.

Nº	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
1	23,4	0,036	-1,026	0,061	0,061	0,019
2	27,6	0,071	-0,889	0,088	0,052	0,004
3	27,9	0,107	-0,881	0,090	0,018	0,003
4	33,4	0,143	-0,705	0,132	0,025	0,001
5	38,8	0,179	-0,530	0,183	0,040	0,000
6	45,5	0,214	-0,317	0,253	0,075	0,007
7	50,8	0,250	-0,148	0,314	0,099	0,016
8	53,5	0,286	-0,060	0,346	0,096	0,013
9	56,9	0,321	0,048	0,386	0,100	0,013
10	58,5	0,357	0,101	0,405	0,084	0,006
11	58,6	0,393	0,102	0,405	0,048	0,000
12	62,3	0,429	0,221	0,448	0,056	0,001
13	64,5	0,464	0,291	0,474	0,045	0,000
14	66,9	0,500	0,368	0,501	0,036	0,000
15	71,4	0,536	0,512	0,549	0,049	0,000
16	75,3	0,571	0,637	0,589	0,053	0,001
17	76,9	0,607	0,688	0,605	0,034	0,000
18	78,7	0,643	0,746	0,622	0,020	0,001
19	81,3	0,679	0,830	0,647	0,032	0,002
20	87,2	0,714	1,020	0,697	0,019	0,000
21	89,7	0,750	1,101	0,717	0,033	0,001
22	92,9	0,786	1,203	0,741	0,045	0,003
23	93,4	0,821	1,218	0,744	0,078	0,007
24	101,4	0,857	1,474	0,795	0,062	0,004
25	117,1	0,893	1,976	0,871	0,022	0,001
26	132,0	0,929	2,454	0,918	0,025	0,000
27	178,8	0,964	3,954	0,981	0,052	0,000

Tabla D-3: Resumen Parámetros de Análisis, Estación Barrera Loncha, Modelo ESM2M.

Distribución Gumbel		Kolmogorov Smirnov			χ^2		
μ	74,7	α	0,05	SE ACEPTA?	α	0,05	SE ACEPTA?
σ	38,1	$D(N,\alpha)$	0,254	SI	v	2,779	SI
N	27	$D(N,\alpha)$ -Max(D)	0,103		$\chi^2v(1-\alpha)$	7,408	
Ym	0,53300						
σm	1,09982						

Tabla D-4: Detalle Análisis de Frecuencia, Estación Barrera Loncha, Modelo ESM2M.

Nº	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
1	18,9	0,036	-1,170	0,040	0,040	0,000
2	38,5	0,071	-0,542	0,179	0,144	0,163
3	42,7	0,107	-0,406	0,223	0,152	0,125
4	44,4	0,143	-0,352	0,241	0,134	0,068
5	44,4	0,179	-0,351	0,242	0,099	0,022
6	44,5	0,214	-0,349	0,242	0,064	0,004
7	44,5	0,250	-0,348	0,243	0,028	0,000
8	52,8	0,286	-0,082	0,338	0,088	0,009
9	54,1	0,321	-0,041	0,353	0,067	0,003
10	54,3	0,357	-0,035	0,355	0,034	0,000
11	61,7	0,393	0,202	0,442	0,085	0,006
12	65,7	0,429	0,331	0,488	0,095	0,008
13	68,3	0,464	0,412	0,516	0,087	0,006
14	68,6	0,500	0,425	0,520	0,056	0,001
15	70,7	0,536	0,491	0,542	0,042	0,000
16	73,6	0,571	0,585	0,573	0,037	0,000
17	75,8	0,607	0,656	0,595	0,024	0,000
18	77,4	0,643	0,705	0,610	0,033	0,002
19	79,7	0,679	0,781	0,632	0,046	0,003
20	85,8	0,714	0,974	0,686	0,029	0,001
21	86,7	0,750	1,002	0,693	0,057	0,004
22	94,9	0,786	1,267	0,755	0,031	0,001
23	97,5	0,821	1,350	0,772	0,050	0,003
24	98,8	0,857	1,390	0,780	0,078	0,007
25	116,9	0,893	1,969	0,870	0,023	0,001
26	146,7	0,929	2,924	0,948	0,055	0,000
27	209,9	0,964	4,949	0,993	0,064	0,001

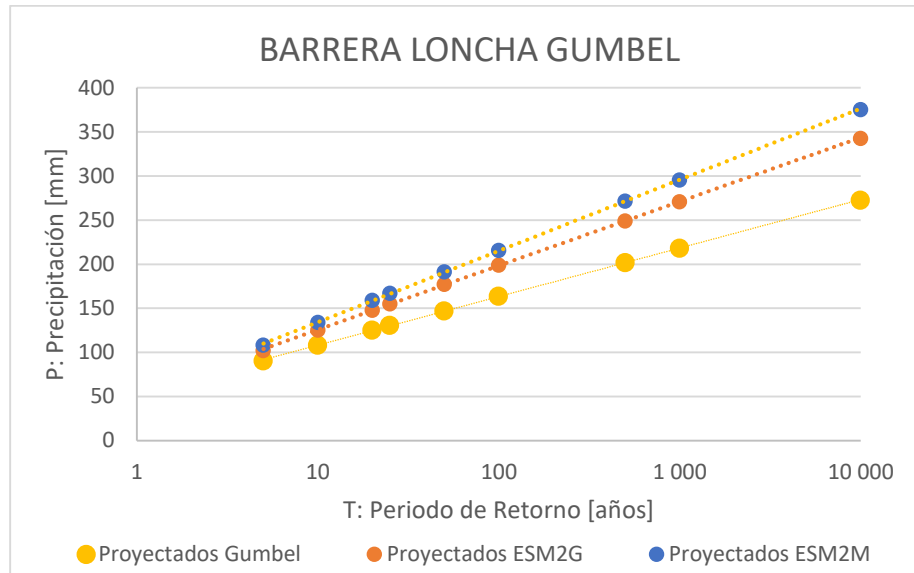


Figura D-1: Comparación entre Análisis de Frecuencia de Línea Base Modelo NEX GDDP y DGA.

10.4.1.2. Estación Villa Alhué

Tabla D-5: Resumen Parámetros de Análisis, Estación Villa Alhué, Modelo ESM2G.

Distribución Gumbel		Kolmogorov Smirnov			χ^2		
μ	72,0	α	0,05	SE ACEPTA?	α	0,05	SE ACEPTA?
σ	34,3	$D(N,\alpha)$	0,254	SI	v	2,779	SI
N	27	$D(N,\alpha)-Max(D)$	0,154		$\chi^2v(1-\alpha)$	7,408	
Ym	0,53300						
σm	1,09982						

Tabla D-6: Detalle Análisis de Frecuencia, Estación Villa Alhué, Modelo ESM2G.

Nº	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
1	23,4	0,036	-1,026	0,061	0,061	0,019
2	27,6	0,071	-0,889	0,088	0,052	0,004
3	27,9	0,107	-0,881	0,090	0,018	0,003
4	33,4	0,143	-0,705	0,132	0,025	0,001
5	38,8	0,179	-0,530	0,183	0,040	0,000
6	45,5	0,214	-0,317	0,253	0,075	0,007
7	50,8	0,250	-0,148	0,314	0,099	0,016
8	53,5	0,286	-0,060	0,346	0,096	0,013
9	56,9	0,321	0,048	0,386	0,100	0,013
10	58,5	0,357	0,101	0,405	0,084	0,006
11	58,6	0,393	0,102	0,405	0,048	0,000
12	62,3	0,429	0,221	0,448	0,056	0,001
13	64,5	0,464	0,291	0,474	0,045	0,000
14	66,9	0,500	0,368	0,501	0,036	0,000
15	71,4	0,536	0,512	0,549	0,049	0,000
16	75,3	0,571	0,637	0,589	0,053	0,001
17	76,9	0,607	0,688	0,605	0,034	0,000
18	78,7	0,643	0,746	0,622	0,020	0,001
19	81,3	0,679	0,830	0,647	0,032	0,002
20	87,2	0,714	1,020	0,697	0,019	0,000

Nº	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
21	89,7	0,750	1,101	0,717	0,033	0,001
22	92,9	0,786	1,203	0,741	0,045	0,003
23	93,4	0,821	1,218	0,744	0,078	0,007
24	101,4	0,857	1,474	0,795	0,062	0,004
25	117,1	0,893	1,976	0,871	0,022	0,001
26	132,0	0,929	2,454	0,918	0,025	0,000
27	178,8	0,964	3,954	0,981	0,052	0,000

Tabla D-7: Resumen Parámetros de Análisis, Estación Villa Alhué, Modelo ESM2M.

Distribución Gumbel		Kolmogorov Smirnov			χ^2		
μ	74,7	α	0,05	SE ACEPTA?	α	0,05	SE ACEPTA?
σ	38,1	D(N, α)	0,254	SI	ν	2,779	SI
N	27	D(N, α)-Max(D)	0,103		$\chi^2_{\nu(1-\alpha)}$	7,408	
Ym	0,53300						
σm	1,09982						

Tabla D-8: Detalle Análisis de Frecuencia, Estación Villa Alhué, Modelo ESM2M.

Nº	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
1	18,9	0,036	-1,170	0,040	0,040	0,000
2	38,5	0,071	-0,542	0,179	0,144	0,163
3	42,7	0,107	-0,406	0,223	0,152	0,125
4	44,4	0,143	-0,352	0,241	0,134	0,068
5	44,4	0,179	-0,351	0,242	0,099	0,022
6	44,5	0,214	-0,349	0,242	0,064	0,004
7	44,5	0,250	-0,348	0,243	0,028	0,000
8	52,8	0,286	-0,082	0,338	0,088	0,009
9	54,1	0,321	-0,041	0,353	0,067	0,003
10	54,3	0,357	-0,035	0,355	0,034	0,000
11	61,7	0,393	0,202	0,442	0,085	0,006
12	65,7	0,429	0,331	0,488	0,095	0,008
13	68,3	0,464	0,412	0,516	0,087	0,006
14	68,6	0,500	0,425	0,520	0,056	0,001
15	70,7	0,536	0,491	0,542	0,042	0,000
16	73,6	0,571	0,585	0,573	0,037	0,000
17	75,8	0,607	0,656	0,595	0,024	0,000
18	77,4	0,643	0,705	0,610	0,033	0,002
19	79,7	0,679	0,781	0,632	0,046	0,003
20	85,8	0,714	0,974	0,686	0,029	0,001
21	86,7	0,750	1,002	0,693	0,057	0,004
22	94,9	0,786	1,267	0,755	0,031	0,001
23	97,5	0,821	1,350	0,772	0,050	0,003
24	98,8	0,857	1,390	0,780	0,078	0,007
25	116,9	0,893	1,969	0,870	0,023	0,001
26	146,7	0,929	2,924	0,948	0,055	0,000
27	209,9	0,964	4,949	0,993	0,064	0,001

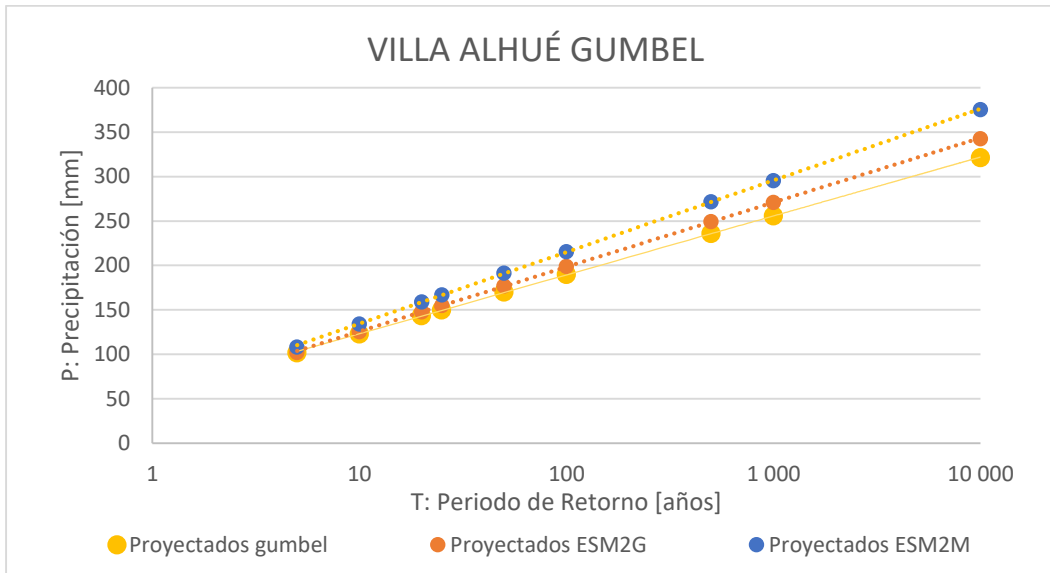


Figura D-2: Comparación entre Análisis de Frecuencia de Línea Base Modelo NEX GDDP y DGA.

10.4.1.3. Estación Rapel

Tabla D-9: Resumen Parámetros de Análisis, Estación Rapel, Modelo ESM2G.

Distribución Gumbel		Kolmogorov Smirnov			χ^2		
μ	68,8	α	0,05	SE ACEPTA?	α	0,05	SE ACEPTA?
σ	31,7	$D(N,\alpha)$	0,254	SI	v	2,779	SI
N	27	$D(N,\alpha)-Max(D)$	0,162		$\chi^2v(1-\alpha)$	7,408	
Ym	0,53300						
σm	1,09982						

Tabla D-10: Detalle Análisis de Frecuencia, Estación Rapel, Modelo ESM2G.

Nº	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
1	26,3	0,036	-0,930	0,079	0,079	0,053
2	30,0	0,071	-0,813	0,105	0,069	0,016
3	33,7	0,107	-0,693	0,135	0,064	0,007
4	37,6	0,143	-0,570	0,171	0,064	0,005
5	41,2	0,179	-0,455	0,207	0,064	0,004
6	41,2	0,214	-0,454	0,207	0,029	0,000
7	45,9	0,250	-0,305	0,258	0,043	0,000
8	47,6	0,286	-0,250	0,277	0,027	0,000
9	48,7	0,321	-0,213	0,290	0,031	0,003
10	52,3	0,357	-0,098	0,332	0,025	0,002
11	57,4	0,393	0,064	0,391	0,034	0,000
12	57,8	0,429	0,077	0,396	0,033	0,002
13	58,3	0,464	0,095	0,403	0,062	0,008
14	59,3	0,500	0,127	0,414	0,086	0,015
15	63,9	0,536	0,272	0,467	0,069	0,009
16	74,9	0,571	0,627	0,586	0,050	0,000
17	75,2	0,607	0,636	0,589	0,018	0,001
18	76,3	0,643	0,672	0,600	0,043	0,003
19	81,0	0,679	0,821	0,644	0,034	0,002
20	82,3	0,714	0,863	0,656	0,058	0,005

Nº	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
21	83,7	0,750	0,908	0,668	0,082	0,009
22	91,4	0,786	1,154	0,729	0,056	0,004
23	97,5	0,821	1,348	0,771	0,050	0,003
24	99,9	0,857	1,425	0,786	0,071	0,006
25	102,3	0,893	1,503	0,801	0,092	0,010
26	123,9	0,929	2,194	0,894	0,034	0,001
27	167,6	0,964	3,596	0,973	0,044	0,000

Tabla D-11: Resumen Parámetros de Análisis, Estación Rapel, Modelo ESM2M.

Distribución Gumbel		Kolmogorov Smirnov			χ^2		
μ	54,0	α	0,05	SE ACEPTA?	α	0,05	SE ACEPTA?
σ	27,6	$D(N,\alpha)$	0,254	NO	v	2,779	SI
N	27	$D(N,\alpha)-\text{Max}(D)$	-0,016		$\chi^2v(1-\alpha)$	7,408	
Y_m	0,53300						
σ_m	1,09982						

Tabla D-12: Detalle Análisis de Frecuencia, Estación Rapel, Modelo ESM2M.

Nº	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
1	16,2	0,036	-1,255	0,030	0,030	0,001
2	20,3	0,071	-1,123	0,046	0,025	0,009
3	21,7	0,107	-1,081	0,053	0,055	0,028
4	21,7	0,143	-1,078	0,053	0,090	0,057
5	23,1	0,179	-1,033	0,060	0,118	0,078
6	28,3	0,214	-0,866	0,093	0,122	0,069
7	29,3	0,250	-0,835	0,100	0,150	0,090
8	29,9	0,286	-0,818	0,104	0,182	0,116
9	37,0	0,321	-0,589	0,165	0,156	0,076
10	37,4	0,357	-0,576	0,169	0,188	0,099
11	41,9	0,393	-0,432	0,214	0,179	0,081
12	48,0	0,429	-0,237	0,282	0,147	0,050
13	50,1	0,464	-0,168	0,307	0,158	0,054
14	54,3	0,500	-0,036	0,355	0,145	0,042
15	56,0	0,536	0,021	0,375	0,160	0,048
16	56,5	0,571	0,037	0,382	0,190	0,063
17	57,3	0,607	0,062	0,391	0,217	0,077
18	58,9	0,643	0,111	0,409	0,234	0,085
19	61,8	0,679	0,206	0,443	0,235	0,082
20	61,9	0,714	0,209	0,444	0,270	0,102
21	71,1	0,750	0,503	0,546	0,204	0,055
22	83,3	0,786	0,893	0,664	0,122	0,019
23	86,3	0,821	0,991	0,690	0,131	0,021
24	93,8	0,857	1,230	0,747	0,111	0,014
25	93,8	0,893	1,231	0,747	0,146	0,024
26	104,1	0,929	1,560	0,810	0,118	0,015
27	113,6	0,964	1,866	0,857	0,108	0,012

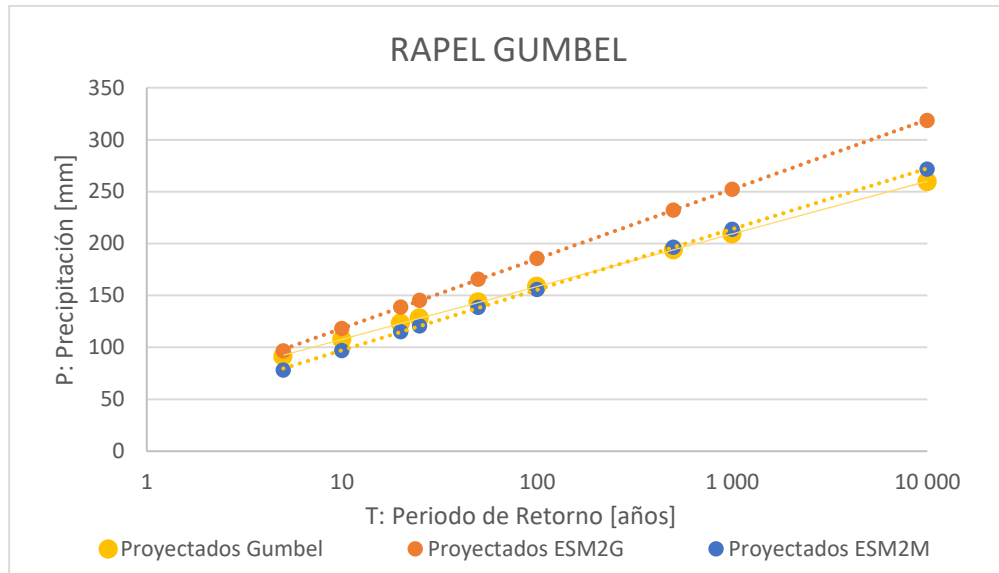


Figura D-3: Comparación entre Análisis de Frecuencia de Línea Base Modelo NEX GDDP y DGA.

10.4.1.4. Resumen Precipitaciones Análisis de Frecuencia

Tabla D-13: Resumen de Precipitaciones en las tres Estaciones, Modelo ESM2G y ESM2M en mm.

MODELO	T [años]	5	10	20	25	50	100	500	1,000	10,000
ESM2G	Barrera Loncha	102	126	148	155	177	199	249	271	343
	Villa Alhué	102	126	148	155	177	199	249	271	343
	Rapel	97	118	139	146	166	186	232	252	319
ESM2M	Barrera Loncha	108	134	159	167	192	216	272	296	376
	Villa Alhué	108	134	159	167	192	216	272	296	376
	Rapel	78	97	115	121	139	156	197	214	272

10.4.2. Cuenca Salar de Michincha

Tabla D-14: Resumen Parámetros de Análisis, Estación Ujina, Modelo ESM2G.

Distribución Gumbel		Kolmogorov Smirnov			χ^2		
μ	7,4	α	0,05	SE ACEPTA?	α	0,05	SE ACEPTA?
σ	5,8	D(N, α)	0,264	SI	v	2,667	SI
N	25	D(N, α)-Max(D)	0,098		$\chi^2v(1-\alpha)$	7,205	
Ym	0,531						
σ_m	1,091						

Tabla D-15: Detalle Análisis de Frecuencia, Estación Ujina, Modelo ESM2G.

Nº	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
1	1,4	0,038	-0,587	0,166	0,166	0,420
2	1,6	0,077	-0,561	0,173	0,135	0,121
3	1,6	0,115	-0,557	0,174	0,098	0,030
4	2,3	0,154	-0,417	0,219	0,104	0,028
5	3,0	0,192	-0,300	0,259	0,105	0,023
6	3,4	0,231	-0,207	0,292	0,100	0,016
7	3,6	0,269	-0,178	0,303	0,072	0,004
8	3,7	0,308	-0,151	0,312	0,043	0,000
9	4,2	0,346	-0,062	0,345	0,037	0,000
10	4,4	0,385	-0,021	0,360	0,024	0,002
11	4,5	0,423	-0,009	0,365	0,058	0,008
12	4,8	0,462	0,058	0,389	0,073	0,011
13	5,0	0,500	0,080	0,397	0,103	0,021
14	6,0	0,538	0,283	0,471	0,068	0,008
15	6,2	0,577	0,307	0,479	0,098	0,017
16	6,4	0,615	0,344	0,492	0,123	0,025
17	6,4	0,654	0,348	0,493	0,160	0,039
18	7,5	0,692	0,564	0,566	0,126	0,023
19	10,4	0,731	1,098	0,716	0,024	0,000
20	11,7	0,769	1,343	0,770	0,039	0,000
21	12,2	0,808	1,444	0,790	0,020	0,000
22	15,7	0,846	2,097	0,884	0,077	0,002
23	16,2	0,885	2,195	0,895	0,048	0,000
24	18,9	0,923	2,716	0,936	0,051	0,000
25	22,8	0,962	3,446	0,969	0,046	0,000

Tabla D-16: Resumen Parámetros de Análisis, Estación Ujina, Modelo ESM2M.

Distribución Gumbel		Kolmogorov Smirnov			χ^2		
μ	7,2	α	0,05	¿SE ACEPTA?	α	0,05	¿SE ACEPTA?
σ	5,5	D(N, α)	0,264	NO	v	2,667	SI
N	25	D(N, α)-Max(D)	0,126		$\chi^2v(1-\alpha)$	7,205	
Ym	0,531						
σ_m	1,091						

Tabla D-17: Detalle Análisis de Frecuencia, Estación Ujina, Modelo ESM2M.

Nº	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
1	1,1	0,038	-0,684	0,138	0,138	0,257
2	1,1	0,077	-0,676	0,140	0,102	0,052

Nº	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
3	1,3	0,115	-0,635	0,152	0,075	0,011
4	2,3	0,154	-0,451	0,208	0,093	0,019
5	2,3	0,192	-0,445	0,210	0,056	0,002
6	2,9	0,231	-0,321	0,252	0,059	0,002
7	3,3	0,269	-0,241	0,280	0,049	0,000
8	3,3	0,308	-0,239	0,281	0,027	0,002
9	3,4	0,346	-0,226	0,286	0,061	0,011
10	4,5	0,385	-0,019	0,361	0,024	0,001
11	4,7	0,423	0,028	0,378	0,045	0,005
12	4,8	0,462	0,043	0,384	0,078	0,013
13	5,6	0,500	0,209	0,444	0,056	0,006
14	6,5	0,538	0,380	0,505	0,034	0,002
15	6,5	0,577	0,389	0,508	0,069	0,008
16	7,6	0,615	0,609	0,581	0,035	0,002
17	8,5	0,654	0,773	0,630	0,024	0,001
18	9,1	0,692	0,888	0,663	0,030	0,001
19	9,4	0,731	0,962	0,682	0,048	0,003
20	10,4	0,769	1,156	0,730	0,039	0,002
21	13,1	0,808	1,686	0,831	0,062	0,001
22	13,5	0,846	1,770	0,843	0,036	0,000
23	17,6	0,885	2,564	0,926	0,080	0,002
24	17,6	0,923	2,567	0,926	0,042	0,000
25	20,7	0,962	3,183	0,959	0,036	0,000

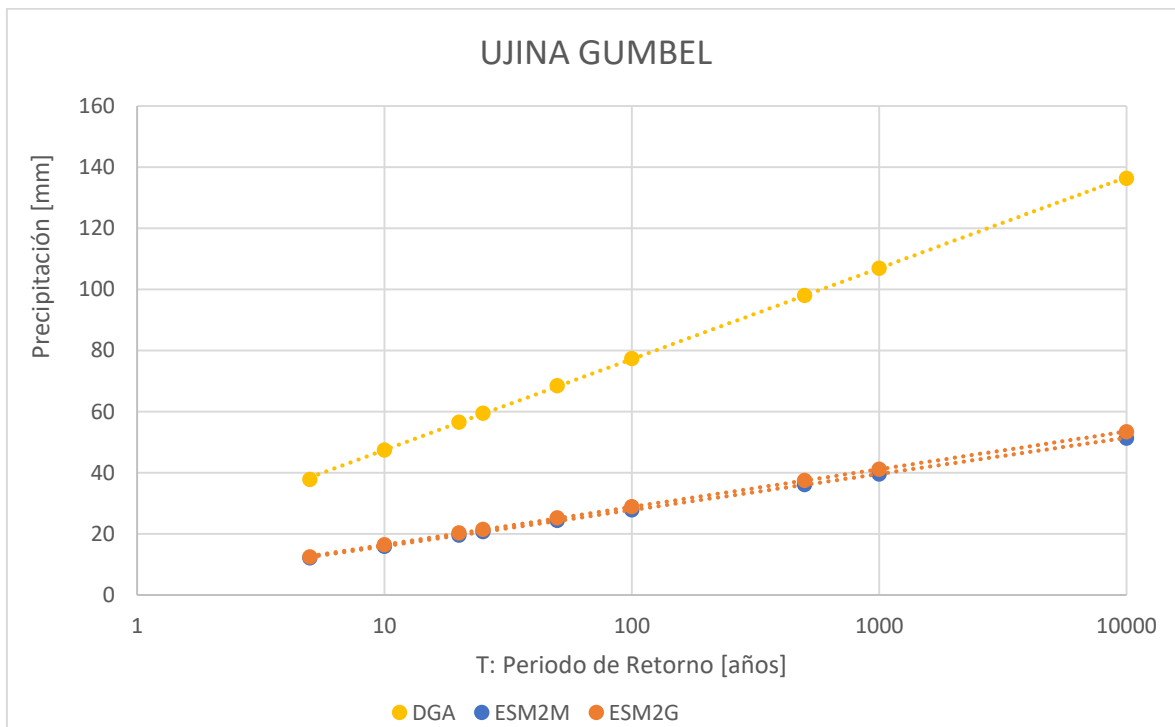


Figura D-4: Comparación entre Análisis de Frecuencia de Línea Base Modelo NEX GDDP y DGA.

10.4.2.1. Resumen Precipitaciones Análisis de Frecuencia

Tabla D-18: Resumen de Precipitaciones en la Estación Ujina, Modelo ESM2G y ESM2M en mm.

MODELO	T [años]	5	10	20	25	50	100	500	1,000	10,000
ESM2G	Ujina	12	16	20	22	25	29	37	41	53
ESM2M		12	16	20	21	24	28	36	40	51

10.4.3. Cuenca Estero Pupío

10.4.3.1. Estación Caimanes

Tabla D-19: Resumen Parámetros de Análisis, Estación Caimanes, Modelo ESM2G.

Distribución Gumbel		Kolmogorov Smirnov			χ^2		
μ	41,9	α	0,05	SE ACEPTA?	α	0,05	SE ACEPTA?
σ	22,1	D(N, α)	0,234	SI	ν	3,025	SI
N	32	D(N, α)-Max(D)	0,107		$\chi^2_{v(1-\alpha)}$	7,853	
Ym	0,538						
σ_m	1,119						

Tabla D-20: Detalle Análisis de Frecuencia, Estación Caimanes, Modelo ESM2G.

Nº	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
1	8,0	0,030	-1,185	0,038	0,038	0,002
2	8,5	0,061	-1,161	0,041	0,020	0,006
3	16,9	0,091	-0,732	0,125	0,064	0,013
4	19,4	0,121	-0,604	0,160	0,070	0,013
5	21,0	0,152	-0,523	0,185	0,064	0,007
6	26,5	0,182	-0,244	0,279	0,128	0,052
7	27,4	0,212	-0,202	0,294	0,112	0,032
8	27,6	0,242	-0,192	0,298	0,086	0,013
9	28,7	0,273	-0,133	0,319	0,077	0,008
10	29,8	0,303	-0,080	0,339	0,066	0,004
11	29,9	0,333	-0,074	0,341	0,038	0,000
12	29,9	0,364	-0,071	0,342	0,022	0,001
13	31,2	0,394	-0,009	0,365	0,029	0,002
14	31,6	0,424	0,015	0,373	0,051	0,006
15	32,8	0,455	0,075	0,395	0,059	0,008
16	33,6	0,485	0,112	0,409	0,076	0,012
17	33,8	0,515	0,123	0,413	0,102	0,020
18	39,4	0,545	0,407	0,514	0,031	0,002
19	42,0	0,576	0,542	0,559	0,017	0,000
20	44,1	0,606	0,648	0,593	0,017	0,000
21	44,9	0,636	0,687	0,605	0,032	0,002
22	45,7	0,667	0,730	0,618	0,049	0,004
23	48,5	0,697	0,872	0,658	0,039	0,002
24	49,5	0,727	0,921	0,672	0,056	0,004
25	53,2	0,758	1,108	0,719	0,039	0,002
26	61,2	0,788	1,514	0,803	0,045	0,000
27	70,2	0,818	1,970	0,870	0,082	0,003
28	71,5	0,848	2,039	0,878	0,060	0,001
29	76,5	0,879	2,290	0,904	0,055	0,001
30	79,2	0,909	2,428	0,916	0,037	0,000
31	85,3	0,939	2,740	0,937	0,028	0,000

N°	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
32	94,4	0,970	3,198	0,960	0,021	0,000

Tabla D-21: Resumen Parámetros de Análisis, Estación Caimanes, Modelo ESM2M.

Distribución Gumbel		Kolmogorov Smirnov			χ^2		
μ	40,8	α	0,05	SE ACEPTA?	α	0,05	SE ACEPTA?
σ	24,2	D(N, α)	0,234	SI	v	3,025	SI
N	32	D(N, α)-Max(D)	0,145		$\chi^2_{v(1-\alpha)}$	7,853	
Ym	0,538						
σ_m	1,119						

Tabla D-22: Detalle Análisis de Frecuencia, Estación Caimanes, Modelo ESM2M.

N°	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
1	10,0	0,030	-0,884	0,089	0,089	0,113
2	11,0	0,061	-0,838	0,099	0,069	0,024
3	11,6	0,091	-0,811	0,105	0,045	0,002
4	14,1	0,121	-0,696	0,135	0,044	0,001
5	16,6	0,152	-0,580	0,167	0,046	0,002
6	20,5	0,182	-0,400	0,225	0,073	0,010
7	20,7	0,212	-0,390	0,228	0,046	0,001
8	21,8	0,242	-0,340	0,245	0,033	0,000
9	25,8	0,273	-0,156	0,311	0,068	0,005
10	25,9	0,303	-0,149	0,313	0,041	0,000
11	26,6	0,333	-0,117	0,325	0,022	0,000
12	28,5	0,364	-0,028	0,357	0,024	0,000
13	28,9	0,394	-0,013	0,363	0,031	0,002
14	33,9	0,424	0,221	0,449	0,055	0,001
15	34,3	0,455	0,237	0,454	0,030	0,000
16	34,6	0,485	0,252	0,460	0,025	0,001
17	37,7	0,515	0,394	0,509	0,025	0,000
18	38,2	0,545	0,417	0,517	0,028	0,001
19	40,4	0,576	0,520	0,552	0,024	0,001
20	42,6	0,606	0,621	0,584	0,022	0,001
21	44,2	0,636	0,697	0,608	0,029	0,001
22	48,0	0,667	0,871	0,658	0,022	0,000
23	48,1	0,697	0,877	0,660	0,037	0,002
24	48,6	0,727	0,897	0,665	0,062	0,005
25	49,4	0,758	0,937	0,676	0,082	0,009
26	62,2	0,788	1,525	0,804	0,047	0,000
27	62,7	0,818	1,548	0,809	0,021	0,000
28	67,3	0,848	1,760	0,842	0,024	0,000
29	68,0	0,879	1,793	0,847	0,032	0,001
30	75,6	0,909	2,144	0,889	0,020	0,000
31	95,6	0,939	3,071	0,955	0,046	0,000
32	112,2	0,970	3,834	0,979	0,039	0,000

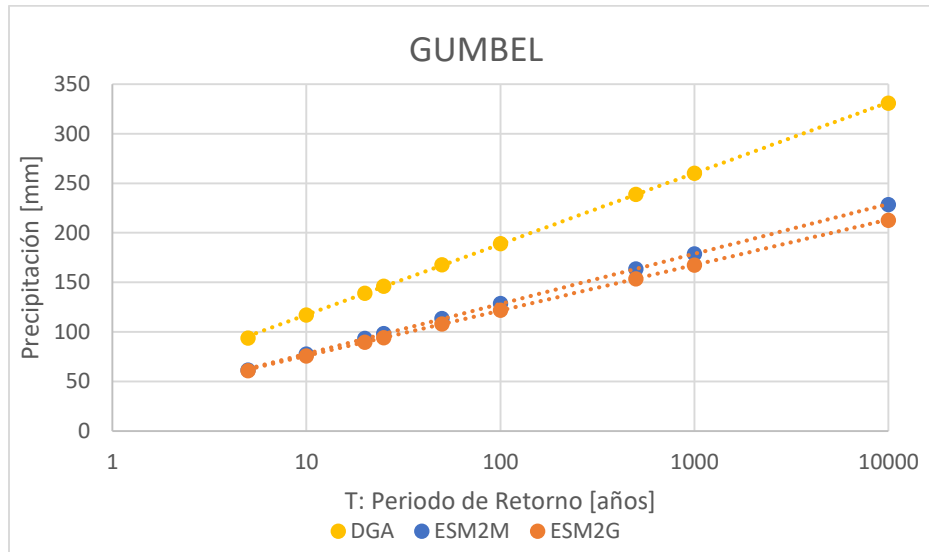


Figura D-5: Comparación entre Análisis de Frecuencia de Línea Base Modelo NEX GDDP y DGA.

10.4.3.2. Estación Culimo

Tabla D-23: Resumen Parámetros de Análisis, Estación Culimo, Modelo ESM2G.

Distribución Gumbel		Kolmogorov Smirnov			χ^2		
μ	69,1	α	0,05	SE ACEPTA?	α	0,05	SE ACEPTA?
σ	60,7	D(N, α)	0,234	SI	ν	3,025	SI
N	32	D(N, α)-Max(D)	0,018		$\chi^2_{\nu(1-\alpha)}$	7,853	
Ym	0,538						
σ_m	1,119						

Tabla D-24: Detalle Análisis de Frecuencia, Estación Culimo, Modelo ESM2G.

Nº	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
1	16,9	0,030	-0,425	0,217	0,217	1,146
2	17,4	0,061	-0,414	0,220	0,190	0,420
3	20,5	0,091	-0,358	0,239	0,178	0,241
4	29,1	0,121	-0,200	0,295	0,204	0,249
5	30,8	0,152	-0,168	0,306	0,185	0,158
6	31,2	0,182	-0,160	0,309	0,158	0,089
7	32,2	0,212	-0,143	0,316	0,134	0,050
8	32,9	0,242	-0,129	0,320	0,108	0,025
9	36,8	0,273	-0,059	0,346	0,104	0,020
10	36,9	0,303	-0,055	0,347	0,075	0,007
11	37,0	0,333	-0,054	0,348	0,045	0,001
12	37,7	0,364	-0,040	0,353	0,020	0,000
13	40,5	0,394	0,010	0,372	0,022	0,001
14	40,8	0,424	0,015	0,374	0,051	0,006
15	42,4	0,455	0,046	0,385	0,070	0,011
16	44,9	0,485	0,091	0,401	0,084	0,014
17	45,5	0,515	0,102	0,405	0,110	0,023
18	47,7	0,545	0,143	0,420	0,125	0,029
19	50,6	0,576	0,196	0,439	0,136	0,032
20	56,6	0,606	0,307	0,479	0,127	0,027
21	56,8	0,636	0,311	0,481	0,156	0,038

Nº	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
22	58,9	0,667	0,350	0,494	0,173	0,045
23	74,6	0,697	0,639	0,590	0,107	0,016
24	81,9	0,727	0,773	0,630	0,097	0,013
25	95,8	0,758	1,030	0,700	0,058	0,004
26	105,2	0,788	1,202	0,740	0,047	0,003
27	110,9	0,818	1,307	0,763	0,055	0,004
28	123,1	0,848	1,531	0,806	0,043	0,002
29	124,6	0,879	1,559	0,810	0,068	0,005
30	155,2	0,909	2,122	0,887	0,022	0,001
31	181,7	0,939	2,612	0,929	0,020	0,000
32	315,3	0,970	5,072	0,994	0,054	0,001

Tabla D-25: Resumen Parámetros de Análisis, Estación Culimo, Modelo ESM2M.

Distribución Gumbel		Kolmogorov Smirnov			χ^2		
μ	55,1	α	0,05	SE ACEPTA?	α	0,05	SE ACEPTA?
σ	43,6	D(N, α)	0,234	SI	ν	3,025	SI
N	32	D(N, α)-Max(D)	0,080		$\chi^2_{\nu(1-\alpha)}$	7,853	
Ym	0,538						
σ_m	1,119						

Tabla D-26: Detalle Análisis de Frecuencia, Estación Culimo, Modelo ESM2M.

Nº	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
1	8,5	0,030	-0,658	0,145	0,145	0,435
2	13,7	0,061	-0,524	0,185	0,154	0,254
3	14,7	0,091	-0,498	0,193	0,132	0,114
4	14,9	0,121	-0,492	0,195	0,104	0,045
5	16,9	0,152	-0,441	0,211	0,090	0,024
6	20,4	0,182	-0,350	0,242	0,090	0,020
7	21,7	0,212	-0,319	0,253	0,071	0,008
8	25,7	0,242	-0,215	0,289	0,077	0,009
9	25,8	0,273	-0,212	0,290	0,048	0,001
10	26,6	0,303	-0,193	0,297	0,025	0,000
11	28,2	0,333	-0,152	0,312	0,021	0,001
12	31,8	0,364	-0,058	0,346	0,017	0,001
13	35,9	0,394	0,046	0,385	0,021	0,000
14	42,9	0,424	0,225	0,450	0,056	0,002
15	43,3	0,455	0,236	0,454	0,030	0,000
16	43,7	0,485	0,246	0,458	0,027	0,002
17	45,4	0,515	0,291	0,473	0,042	0,003
18	46,0	0,545	0,306	0,479	0,067	0,008
19	49,2	0,576	0,387	0,507	0,069	0,008
20	50,0	0,606	0,409	0,515	0,092	0,014
21	52,6	0,636	0,474	0,537	0,100	0,016
22	57,3	0,667	0,595	0,576	0,091	0,012
23	65,2	0,697	0,796	0,637	0,060	0,005
24	66,8	0,727	0,839	0,649	0,078	0,008
25	72,5	0,758	0,984	0,688	0,070	0,006
26	72,6	0,788	0,987	0,689	0,099	0,012
27	83,4	0,818	1,265	0,754	0,064	0,005
28	87,8	0,848	1,377	0,777	0,071	0,006
29	115,6	0,879	2,090	0,884	0,035	0,000
30	122,9	0,909	2,277	0,902	0,024	0,000

Nº	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
31	158,4	0,939	3,189	0,960	0,051	0,000
32	202,0	0,970	4,307	0,987	0,047	0,000

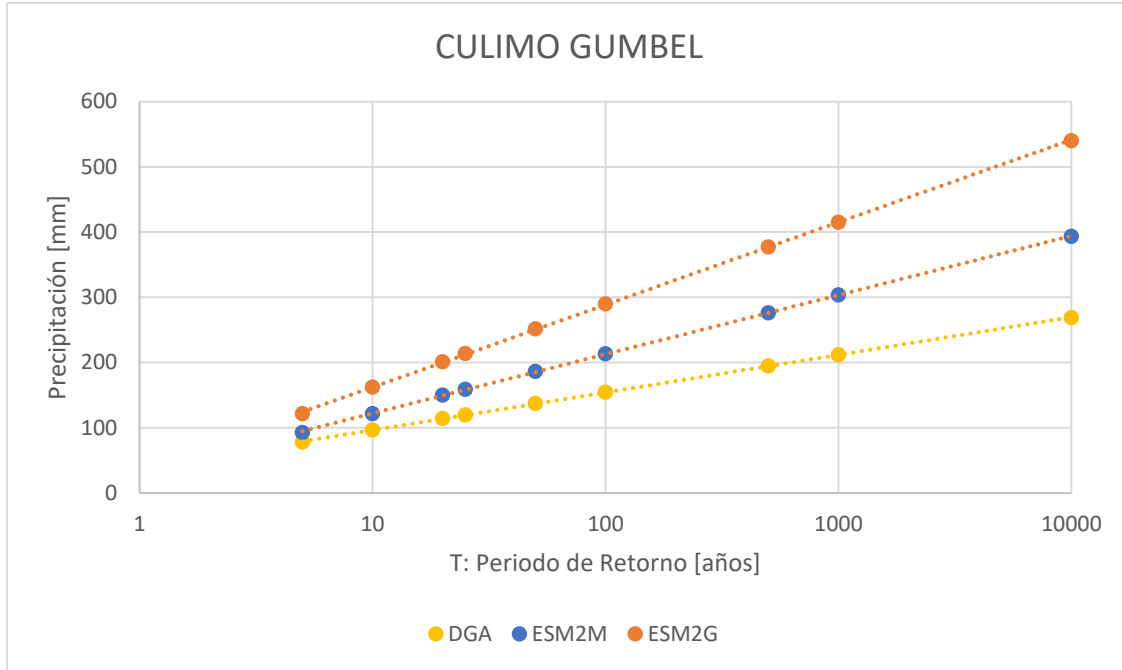


Figura D-6: Comparación entre Análisis de Frecuencia de Línea Base Modelo NEX GDDP y DGA.

10.4.3.3. Estación Limahuida

Tabla D-27: Resumen Parámetros de Análisis, Estación Limahuida, Modelo ESM2G.

Distribución Gumbel		Kolmogorov Smirnov			χ^2		
μ	38,8	α	0,05	SE ACEPTA?	α	0,05	SE ACEPTA?
σ	21,1	D(N, α)	0,234	SI	ν	3,025	SI
N	32	D(N, α)-Max(D)	0,122		$\chi^2_{\nu(1-\alpha)}$	7,853	
Ym	0,538						
σ_m	1,119						

Tabla D-28: Detalle Análisis de Frecuencia, Estación Limahuida, Modelo ESM2G.

Nº	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
1	7,3	0,030	-1,134	0,045	0,045	0,007
2	7,4	0,061	-1,127	0,046	0,015	0,004
3	12,5	0,091	-0,859	0,094	0,034	0,000
4	15,8	0,121	-0,685	0,138	0,047	0,002
5	16,9	0,152	-0,623	0,155	0,034	0,000
6	19,0	0,182	-0,510	0,189	0,038	0,000
7	24,8	0,212	-0,203	0,294	0,112	0,031
8	25,1	0,242	-0,191	0,298	0,086	0,013
9	26,6	0,273	-0,108	0,328	0,086	0,011
10	27,0	0,303	-0,089	0,335	0,062	0,003
11	27,3	0,333	-0,071	0,342	0,039	0,000

Nº	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
12	29,6	0,364	0,050	0,386	0,053	0,001
13	30,3	0,394	0,086	0,400	0,036	0,000
14	30,6	0,424	0,100	0,405	0,020	0,001
15	33,0	0,455	0,228	0,451	0,027	0,000
16	33,0	0,485	0,230	0,452	0,033	0,002
17	34,1	0,515	0,289	0,473	0,042	0,003
18	34,6	0,545	0,313	0,481	0,064	0,008
19	35,8	0,576	0,377	0,504	0,072	0,009
20	37,7	0,606	0,478	0,538	0,068	0,008
21	40,7	0,636	0,638	0,589	0,047	0,003
22	43,6	0,667	0,788	0,635	0,032	0,002
23	50,5	0,697	1,155	0,730	0,063	0,002
24	50,8	0,727	1,172	0,734	0,037	0,000
25	52,4	0,758	1,259	0,753	0,026	0,000
26	53,1	0,788	1,295	0,760	0,027	0,001
27	58,7	0,818	1,588	0,815	0,027	0,000
28	67,3	0,848	2,047	0,879	0,061	0,001
29	72,9	0,879	2,345	0,909	0,060	0,001
30	76,8	0,909	2,550	0,925	0,046	0,000
31	77,6	0,939	2,592	0,928	0,019	0,000
32	89,7	0,970	3,231	0,961	0,022	0,000

Tabla D-29: Resumen Parámetros de Análisis, Estación Limahuida, Modelo ESM2M.

Distribución Gumbel		Kolmogorov Smirnov			χ^2		
μ	39,0	α	0,05	SE ACEPTA?	α	0,05	SE ACEPTA?
σ	25,6	D(N, α)	0,234	SI	v	3,025	SI
N	32	D(N, α)-Max(D)	0,132		$\chi^2_{v(1-\alpha)}$	7,853	
Ym	0,538						
σ_m	1,119						

Tabla D-30: Detalle Análisis de Frecuencia, Estación Limahuida, Modelo ESM2M.

Nº	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
1	7,8	0,030	-0,824	0,102	0,102	0,171
2	8,5	0,061	-0,796	0,109	0,079	0,038
3	11,0	0,091	-0,684	0,138	0,077	0,024
4	13,5	0,121	-0,578	0,168	0,077	0,018
5	13,8	0,152	-0,564	0,172	0,051	0,003
6	14,1	0,182	-0,550	0,177	0,025	0,000
7	19,6	0,212	-0,312	0,255	0,073	0,009
8	21,0	0,242	-0,250	0,277	0,065	0,005
9	21,3	0,273	-0,237	0,281	0,039	0,000
10	21,6	0,303	-0,223	0,287	0,016	0,001
11	22,8	0,333	-0,172	0,305	0,028	0,002
12	24,4	0,364	-0,102	0,330	0,033	0,003
13	27,1	0,394	0,016	0,374	0,020	0,001
14	27,8	0,424	0,048	0,386	0,039	0,004
15	31,1	0,455	0,190	0,437	0,017	0,001
16	34,1	0,485	0,324	0,485	0,031	0,000
17	34,2	0,515	0,325	0,485	0,030	0,002
18	37,0	0,545	0,451	0,529	0,017	0,001
19	39,6	0,576	0,561	0,565	0,020	0,000
20	39,7	0,606	0,566	0,567	0,039	0,003

Nº	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
21	46,2	0,636	0,849	0,652	0,046	0,000
22	46,9	0,667	0,880	0,660	0,024	0,000
23	47,0	0,697	0,883	0,661	0,036	0,002
24	48,1	0,727	0,932	0,674	0,053	0,004
25	48,3	0,758	0,944	0,678	0,080	0,008
26	57,3	0,788	1,335	0,769	0,019	0,000
27	65,0	0,818	1,671	0,829	0,041	0,000
28	66,6	0,848	1,740	0,839	0,021	0,000
29	69,1	0,879	1,851	0,855	0,024	0,001
30	74,4	0,909	2,081	0,883	0,026	0,001
31	89,0	0,939	2,717	0,936	0,027	0,000
32	121,6	0,970	4,142	0,984	0,045	0,000

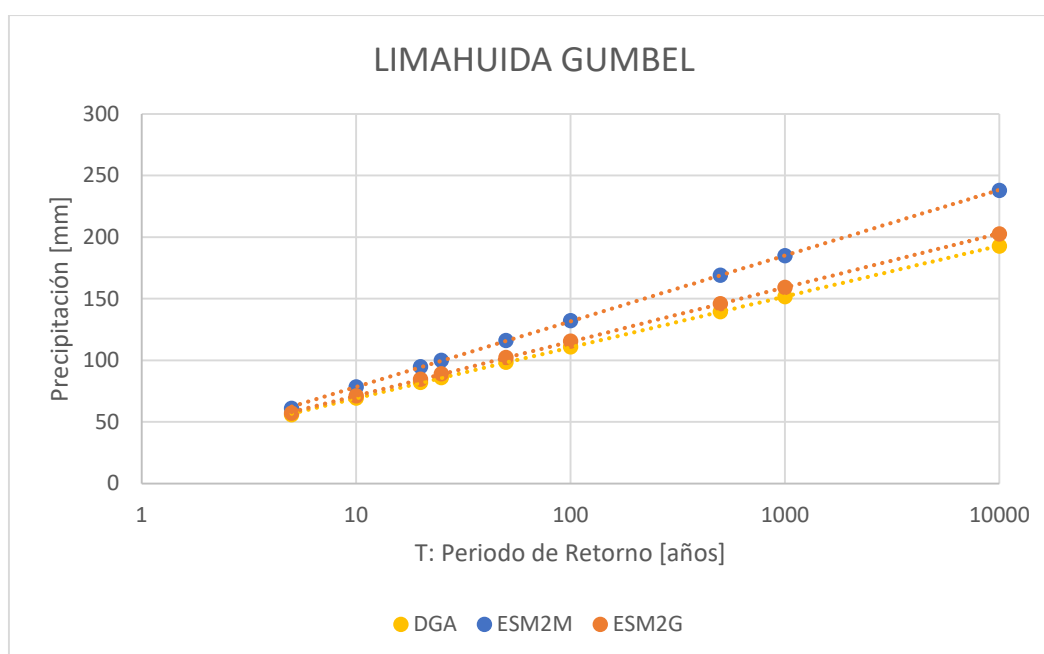


Figura D-7: Comparación entre Análisis de Frecuencia de Línea Base Modelo NEX GDDP y DGA.

10.4.3.4. Estación Salamanca

Tabla D-31: Resumen Parámetros de Análisis, Estación Salamanca, Modelo ESM2G.

Distribución Gumbel		Kolmogorov Smirnov			χ^2		
μ	38,1	α	0,05	SE ACEPTA?	α	0,05	SE ACEPTA?
σ	22,0	D(N, α)	0,234	SI	ν	3,025	SI
N	32	D(N, α)-Max(D)	0,104		$\chi^2_{v(1-\alpha)}$	7,853	
Ym	0,538						
σ_m	1,119						

Tabla D-32: Detalle Análisis de Frecuencia, Estación Salamanca, Modelo ESM2G.

Nº	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
1	10,5	0,030	-0,866	0,093	0,093	0,128
2	12,2	0,061	-0,779	0,113	0,083	0,046

Nº	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
3	14,1	0,091	-0,682	0,138	0,078	0,025
4	15,7	0,121	-0,600	0,162	0,071	0,013
5	18,1	0,152	-0,480	0,199	0,077	0,015
6	19,1	0,182	-0,427	0,216	0,064	0,006
7	21,5	0,212	-0,303	0,258	0,077	0,010
8	22,7	0,242	-0,243	0,280	0,067	0,006
9	26,0	0,273	-0,076	0,340	0,097	0,017
10	26,5	0,303	-0,048	0,350	0,078	0,007
11	27,5	0,333	0,000	0,368	0,065	0,004
12	28,7	0,364	0,064	0,391	0,058	0,002
13	28,9	0,394	0,071	0,394	0,030	0,000
14	30,0	0,424	0,127	0,415	0,021	0,000
15	31,9	0,455	0,223	0,449	0,025	0,000
16	33,4	0,485	0,302	0,477	0,023	0,000
17	34,9	0,515	0,379	0,504	0,020	0,000
18	35,5	0,545	0,409	0,515	0,031	0,002
19	36,2	0,576	0,446	0,527	0,049	0,004
20	36,5	0,606	0,460	0,532	0,074	0,009
21	36,7	0,636	0,468	0,535	0,102	0,016
22	39,3	0,667	0,602	0,578	0,088	0,012
23	39,6	0,697	0,618	0,583	0,114	0,019
24	41,8	0,727	0,728	0,617	0,110	0,017
25	42,5	0,758	0,764	0,628	0,130	0,022
26	49,9	0,788	1,142	0,727	0,061	0,005
27	54,9	0,818	1,397	0,781	0,037	0,002
28	55,1	0,848	1,403	0,782	0,067	0,005
29	82,8	0,879	2,816	0,942	0,093	0,005
30	83,0	0,909	2,824	0,942	0,064	0,001
31	83,9	0,939	2,869	0,945	0,036	0,000
32	98,3	0,970	3,604	0,973	0,034	0,000

Tabla D-33: Resumen Parámetros de Análisis, Estación Salamanca, Modelo ESM2M.

Distribución Gumbel	Kolmogorov Smirnov			χ^2			
μ	43,1	α	0,05	SE ACEPTA?	α	0,05	SE ACEPTA?
σ	28,0	D(N, α)	0,234	SI	v	3,025	SI
N	32	D(N, α)-Max(D)	0,133		$\chi^2_{v(1-\alpha)}$	7,853	
Ym	0,538						
σ_m	1,119						

Tabla D-34: Detalle Análisis de Frecuencia, Estación Salamanca, Modelo ESM2M.

Nº	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
1	8,9	0,030	-0,830	0,101	0,101	0,164
2	11,4	0,061	-0,731	0,125	0,095	0,069
3	13,8	0,091	-0,634	0,152	0,091	0,041
4	13,9	0,121	-0,630	0,153	0,062	0,008
5	14,5	0,152	-0,607	0,160	0,039	0,000
6	14,8	0,182	-0,593	0,164	0,018	0,002
7	16,3	0,212	-0,534	0,182	0,031	0,004
8	18,7	0,242	-0,438	0,212	0,030	0,004
9	19,5	0,273	-0,403	0,224	0,049	0,009
10	25,6	0,303	-0,162	0,308	0,036	0,000
11	25,8	0,333	-0,152	0,312	0,021	0,001

Nº	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
12	29,8	0,364	0,006	0,370	0,037	0,000
13	30,0	0,394	0,016	0,374	0,020	0,001
14	32,1	0,424	0,100	0,404	0,020	0,001
15	35,6	0,455	0,240	0,455	0,031	0,000
16	38,2	0,485	0,344	0,492	0,038	0,000
17	39,9	0,515	0,411	0,515	0,030	0,000
18	42,0	0,545	0,495	0,544	0,028	0,000
19	45,9	0,576	0,650	0,593	0,048	0,001
20	46,2	0,606	0,661	0,597	0,021	0,000
21	49,4	0,636	0,791	0,635	0,029	0,000
22	49,8	0,667	0,805	0,639	0,027	0,001
23	51,3	0,697	0,868	0,657	0,040	0,002
24	56,5	0,727	1,073	0,710	0,017	0,000
25	56,8	0,758	1,085	0,713	0,044	0,003
26	60,5	0,788	1,233	0,747	0,041	0,002
27	61,3	0,818	1,267	0,754	0,064	0,005
28	71,2	0,848	1,661	0,827	0,021	0,001
29	84,2	0,879	2,182	0,893	0,045	0,000
30	85,4	0,909	2,231	0,898	0,019	0,000
31	113,1	0,939	3,336	0,965	0,056	0,001
32	116,5	0,970	3,473	0,969	0,030	0,000

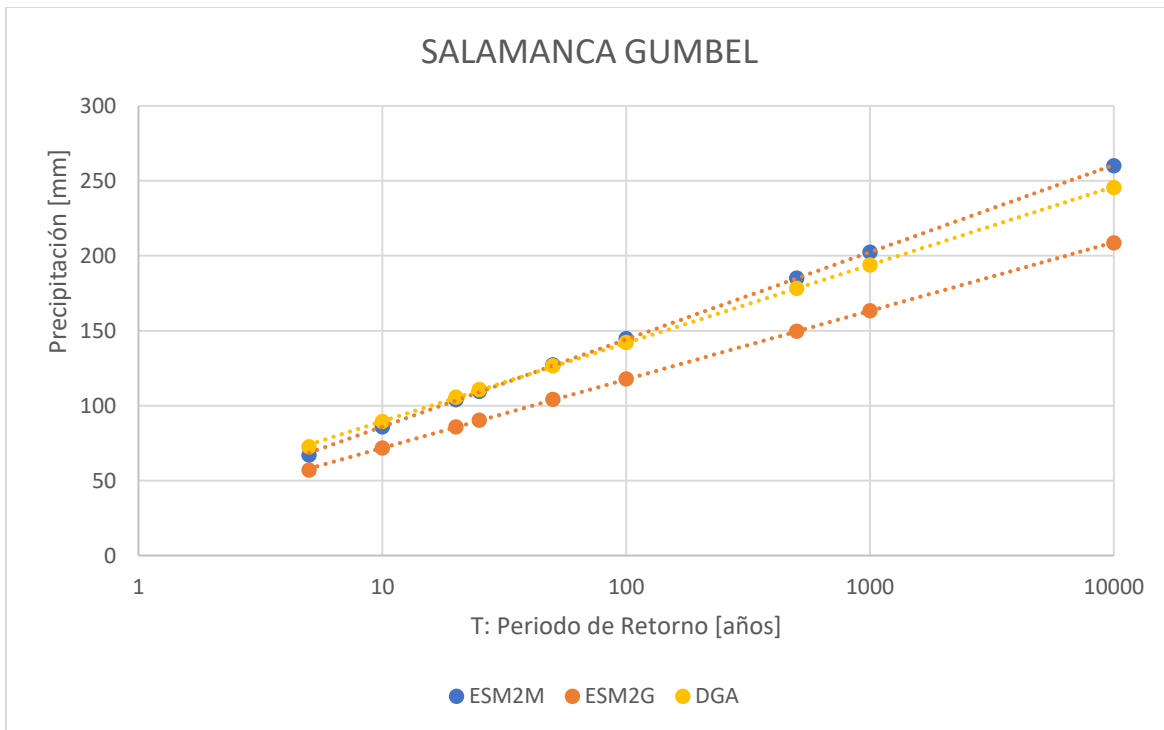


Figura D-8: Comparación entre Análisis de Frecuencia de Línea Base Modelo NEX GDDP y DGA.

10.4.3.5. Resumen Precipitaciones Análisis de Frecuencia

Tabla D-35: Resumen de Precipitaciones en las cuatro estaciones, Modelo ESM2G y ESM2M en mm.

MODELO	T [años]	5	10	20	25	50	100	500	1,000	10,000
ESM2G	CAIMANES	61	76	90	94	108	122	154	167	213
ESM2M		62	78	93	98	114	129	164	179	229
ESM2G	CULIMO	121	162	201	214	252	290	377	415	540
ESM2M		93	122	150	159	186	213	276	303	393
ESM2G	LIMAHUIDA	57	71	85	89	102	116	146	159	203
ESM2M		61	78	95	100	116	132	169	185	238
ESM2G	SALAMANCA	57	72	86	90	104	118	150	163	209
ESM2M		67	86	104	110	127	145	185	202	260

10.4.4. Cuenca Choapa

10.4.4.1. Estación Cuncumén

Tabla D-36: Resumen Parámetros de Análisis, Estación Cuncumén, Modelo ESM2G.

Distribución Gumbel		Kolmogorov Smirnov			χ^2		
μ	37,2	α	0,05	SE ACEPTA?	α	0,05	SE ACEPTA?
σ	24,8	D(N, α)	0,238	SI	ν	2,979	SI
N	31	D(N, α)-Max(D)	0,096		$\chi^2_{\nu(1-\alpha)}$	7,772	
Ym	0,537						
σ_m	1,116						

Tabla D-37: Detalle Análisis de Frecuencia, Estación Cuncumén, Modelo ESM2G.

Nº	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
1	9,8	0,031	-0,694	0,135	0,135	0,345
2	12,5	0,063	-0,575	0,169	0,138	0,182
3	14,9	0,094	-0,468	0,203	0,140	0,126
4	15,9	0,125	-0,419	0,219	0,125	0,070
5	17,4	0,156	-0,353	0,241	0,116	0,046
6	20,3	0,188	-0,224	0,286	0,130	0,052
7	20,9	0,219	-0,197	0,296	0,108	0,027
8	20,9	0,250	-0,195	0,296	0,078	0,009
9	22,0	0,281	-0,145	0,315	0,065	0,004
10	22,5	0,313	-0,122	0,323	0,042	0,000
11	23,3	0,344	-0,087	0,336	0,023	0,000
12	23,5	0,375	-0,078	0,339	0,036	0,003
13	30,0	0,406	0,215	0,447	0,072	0,004
14	30,4	0,438	0,235	0,453	0,047	0,001
15	30,8	0,469	0,252	0,460	0,022	0,000
16	31,8	0,500	0,297	0,476	0,024	0,001
17	32,2	0,531	0,314	0,482	0,050	0,005
18	34,9	0,563	0,434	0,523	0,039	0,003
19	35,5	0,594	0,463	0,533	0,061	0,006
20	35,6	0,625	0,469	0,535	0,090	0,013
21	36,2	0,656	0,496	0,544	0,112	0,019
22	37,5	0,688	0,550	0,562	0,126	0,023
23	38,5	0,719	0,597	0,577	0,142	0,028
24	41,6	0,750	0,738	0,620	0,130	0,023
25	44,7	0,781	0,877	0,660	0,122	0,019

Nº	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
26	46,4	0,813	0,952	0,680	0,133	0,022
27	50,0	0,844	1,115	0,720	0,123	0,018
28	68,8	0,875	1,963	0,869	0,025	0,000
29	86,5	0,906	2,760	0,939	0,064	0,001
30	107,4	0,938	3,704	0,976	0,069	0,002
31	109,0	0,969	3,773	0,977	0,040	0,000

Tabla D-38: Resumen Parámetros de Análisis, Estación Cuncumén, Modelo ESM2M.

Distribución Gumbel		Kolmogorov Smirnov			χ^2		
μ	45,2	α	0,05	SE ACEPTA?	α	0,05	SE ACEPTA?
σ	32,3	D(N, α)	0,238	SI	v	2,979	SI
N	31	D(N, α)-Max(D)	0,109		$\chi^2_{v(1-\alpha)}$	7,772	
Ym	0,537						
σ_m	1,116						

Tabla D-39: Detalle Análisis de Frecuencia, Estación Cuncumén, Modelo ESM2M.

Nº	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
1	7,5	0,031	-0,764	0,117	0,117	0,235
2	12,1	0,063	-0,607	0,160	0,128	0,151
3	12,2	0,094	-0,602	0,161	0,098	0,048
4	12,9	0,125	-0,577	0,168	0,075	0,015
5	14,7	0,156	-0,517	0,187	0,062	0,006
6	15,1	0,188	-0,503	0,191	0,035	0,000
7	16,8	0,219	-0,442	0,211	0,024	0,000
8	17,2	0,250	-0,428	0,216	0,034	0,005
9	22,9	0,281	-0,231	0,284	0,034	0,000
10	26,4	0,313	-0,112	0,327	0,046	0,001
11	27,2	0,344	-0,084	0,337	0,024	0,000
12	28,3	0,375	-0,045	0,351	0,024	0,001
13	30,6	0,406	0,034	0,380	0,026	0,002
14	30,8	0,438	0,042	0,383	0,054	0,007
15	36,7	0,469	0,243	0,457	0,019	0,000
16	37,9	0,500	0,285	0,471	0,029	0,002
17	40,1	0,531	0,363	0,499	0,032	0,002
18	46,2	0,563	0,571	0,568	0,037	0,000
19	47,4	0,594	0,614	0,582	0,019	0,000
20	51,7	0,625	0,764	0,628	0,034	0,000
21	53,7	0,656	0,829	0,646	0,021	0,000
22	53,7	0,688	0,832	0,647	0,040	0,002
23	54,1	0,719	0,843	0,650	0,068	0,007
24	61,5	0,750	1,102	0,717	0,033	0,001
25	63,8	0,781	1,178	0,735	0,046	0,003
26	66,2	0,813	1,262	0,753	0,059	0,004
27	71,7	0,844	1,452	0,791	0,052	0,003
28	72,7	0,875	1,487	0,798	0,077	0,007
29	108,0	0,906	2,707	0,935	0,060	0,001
30	129,4	0,938	3,445	0,969	0,062	0,001
31	131,2	0,969	3,506	0,970	0,033	0,000

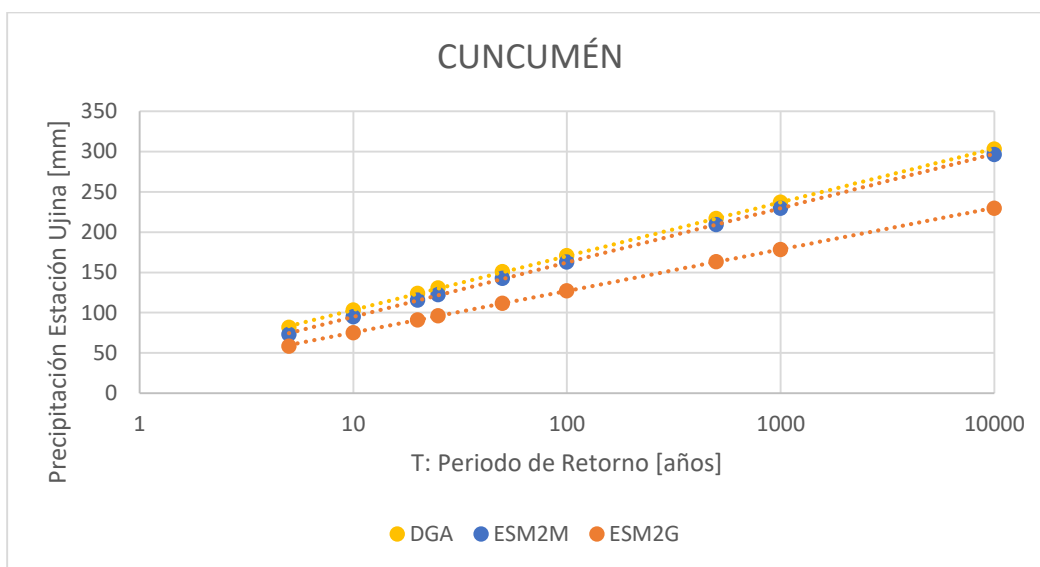


Figura D-9: Comparación entre Análisis de Frecuencia de Línea Base Modelo NEX GDDP y DGA.

10.4.4.2. Estación La Tranquilla

Tabla D-40: Resumen Parámetros de Análisis, Estación La Tranquilla, Modelo ESM2G.

Distribución Gumbel		Kolmogorov Smirnov			χ^2		
μ	37,2	α	0,05	SE ACEPTA?	α	0,05	SE ACEPTA?
σ	24,8	D(N, α)	0,238	SI	ν	2,979	SI
N	31	D(N, α)-Max(D)	0,096		$\chi^2_{\nu(1-\alpha)}$	7,772	
Ym	0,537						
σ_m	1,116						

Tabla D-41: Detalle Análisis de Frecuencia, Estación La Tranquilla, Modelo ESM2G.

Nº	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
1	9,8	0,031	-0,694	0,135	0,135	0,345
2	12,5	0,063	-0,575	0,169	0,138	0,182
3	14,9	0,094	-0,468	0,203	0,140	0,126
4	15,9	0,125	-0,419	0,219	0,125	0,070
5	17,4	0,156	-0,353	0,241	0,116	0,046
6	20,3	0,188	-0,224	0,286	0,130	0,052
7	20,9	0,219	-0,197	0,296	0,108	0,027
8	20,9	0,250	-0,195	0,296	0,078	0,009
9	22,0	0,281	-0,145	0,315	0,065	0,004
10	22,5	0,313	-0,122	0,323	0,042	0,000
11	23,3	0,344	-0,087	0,336	0,023	0,000
12	23,5	0,375	-0,078	0,339	0,036	0,003
13	30,0	0,406	0,215	0,447	0,072	0,004
14	30,4	0,438	0,235	0,453	0,047	0,001
15	30,8	0,469	0,252	0,460	0,022	0,000
16	31,8	0,500	0,297	0,476	0,024	0,001
17	32,2	0,531	0,314	0,482	0,050	0,005
18	34,9	0,563	0,434	0,523	0,039	0,003

N°	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
19	35,5	0,594	0,463	0,533	0,061	0,006
20	35,6	0,625	0,469	0,535	0,090	0,013
21	36,2	0,656	0,496	0,544	0,112	0,019
22	37,5	0,688	0,550	0,562	0,126	0,023
23	38,5	0,719	0,597	0,577	0,142	0,028
24	41,6	0,750	0,738	0,620	0,130	0,023
25	44,7	0,781	0,877	0,660	0,122	0,019
26	46,4	0,813	0,952	0,680	0,133	0,022
27	50,0	0,844	1,115	0,720	0,123	0,018
28	68,8	0,875	1,963	0,869	0,025	0,000
29	86,5	0,906	2,760	0,939	0,064	0,001
30	107,4	0,938	3,704	0,976	0,069	0,002
31	109,0	0,969	3,773	0,977	0,040	0,000

Tabla D-42: Resumen Parámetros de Análisis, Estación La Tranquilla, Modelo ESM2M.

Distribución Gumbel	Kolmogorov Smirnov			χ^2			
μ	45,2	α	0,05	SE ACEPTA?	α	0,05	SE ACEPTA?
σ	32,3	D(N, α)	0,238	SI	v	2,979	SI
N	31	D(N, α)-Max(D)	0,109		$\chi^2_{v(1-\alpha)}$	7,772	
Ym	0,537						
σ_m	1,116						

Tabla D-43: Detalle Análisis de Frecuencia, Estación La Tranquilla, Modelo ESM2M.

N°	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
1	7,5	0,031	-0,764	0,117	0,117	0,235
2	12,1	0,063	-0,607	0,160	0,128	0,151
3	12,2	0,094	-0,602	0,161	0,098	0,048
4	12,9	0,125	-0,577	0,168	0,075	0,015
5	14,7	0,156	-0,517	0,187	0,062	0,006
6	15,1	0,188	-0,503	0,191	0,035	0,000
7	16,8	0,219	-0,442	0,211	0,024	0,000
8	17,2	0,250	-0,428	0,216	0,034	0,005
9	22,9	0,281	-0,231	0,284	0,034	0,000
10	26,4	0,313	-0,112	0,327	0,046	0,001
11	27,2	0,344	-0,084	0,337	0,024	0,000
12	28,3	0,375	-0,045	0,351	0,024	0,001
13	30,6	0,406	0,034	0,380	0,026	0,002
14	30,8	0,438	0,042	0,383	0,054	0,007
15	36,7	0,469	0,243	0,457	0,019	0,000
16	37,9	0,500	0,285	0,471	0,029	0,002
17	40,1	0,531	0,363	0,499	0,032	0,002
18	46,2	0,563	0,571	0,568	0,037	0,000
19	47,4	0,594	0,614	0,582	0,019	0,000
20	51,7	0,625	0,764	0,628	0,034	0,000
21	53,7	0,656	0,829	0,646	0,021	0,000
22	53,7	0,688	0,832	0,647	0,040	0,002
23	54,1	0,719	0,843	0,650	0,068	0,007
24	61,5	0,750	1,102	0,717	0,033	0,001
25	63,8	0,781	1,178	0,735	0,046	0,003
26	66,2	0,813	1,262	0,753	0,059	0,004
27	71,7	0,844	1,452	0,791	0,052	0,003
28	72,7	0,875	1,487	0,798	0,077	0,007

Nº	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
29	108,0	0,906	2,707	0,935	0,060	0,001
30	129,4	0,938	3,445	0,969	0,062	0,001
31	131,2	0,969	3,506	0,970	0,033	0,000

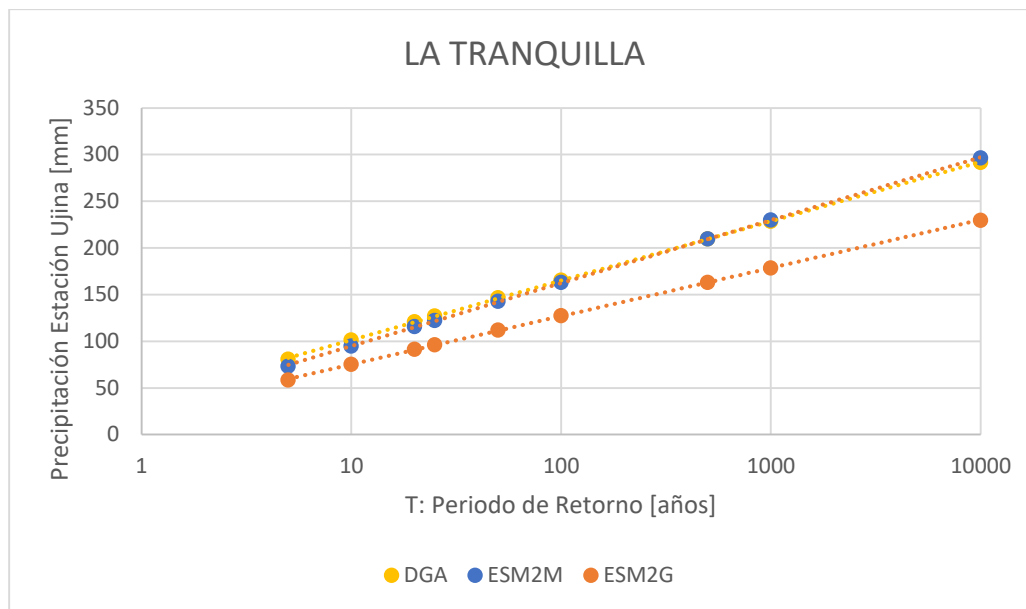


Figura D-10: Comparación entre Análisis de Frecuencia de Línea Base Modelo NEX GDDP y DGA.

10.4.4.3. Resumen Precipitaciones Análisis de Frecuencia

Tabla D-44: Resumen de Precipitaciones en las cuatro estaciones, Modelo ESM2G y ESM2M en mm.

MODELO	T [años]	5	10	20	25	50	100	500	1,000	10,000
ESM2G	CUNCUMÉN	59	75	91	96	112	127	163	179	230
ESM2M		73	95	116	122	143	163	210	230	296
ESM2G	LA TRANQUILLA	59	75	91	96	112	127	163	179	230
ESM2M		73	95	116	122	143	163	210	230	296

10.5. ANEXO E: Precipitaciones Futuras de las Proyecciones

Se presentan las series de precipitaciones diarias máximas anuales de la proyección, de acuerdo con la proyección elegida (ESM2G y ESM2M del modelo NEX GDDP).

10.5.1. Cuenca Estero Alhué

Tabla E-1: Serie de Precipitaciones ESM2G desde 2006 a 2100 en mm.

RCP	4,5	8,5	4,5	8,5	4,5	8,5
año	BARRERA LONCHA		VILLA ALHUÉ		RAPEL	
2006	52,2	34,1	52,2	34,1	64,9	39,2
2007	28,8	53,5	28,8	53,5	29,7	50,4
2008	59,6	141,4	59,6	141,4	74,4	41,2

RCP	4,5	8,5	4,5	8,5	4,5	8,5
año	BARRERA LONCHA		VILLA ALHUÉ		RAPEL	
2009	112,2	135,5	112,2	135,5	102,6	53,9
2010	44,7	91,1	44,7	91,1	60,0	100,0
2011	151,7	137,1	151,7	137,1	74,2	106,2
2012	38,0	118,6	38,0	118,6	39,9	95,3
2013	75,7	78,6	75,7	78,6	83,3	75,6
2014	38,0	261,2	38,0	261,2	29,8	140,1
2015	117,7	41,2	117,7	41,2	84,1	35,1
2016	69,4	37,0	69,4	37,0	65,5	18,6
2017	102,3	57,2	102,3	57,2	75,4	97,6
2018	31,0	95,5	31,0	95,5	35,3	53,9
2019	29,8	90,3	29,8	90,3	15,5	54,9
2020	97,0	43,8	97,0	43,8	42,6	54,1
2021	24,4	177,5	24,4	177,5	25,2	93,2
2022	78,9	126,9	78,9	126,9	76,9	40,4
2023	77,6	145,1	77,6	145,1	49,5	69,0
2024	46,5	87,7	46,5	87,7	53,9	69,0
2025	94,5	80,1	94,5	80,1	70,8	42,7
2026	36,2	36,9	36,2	36,9	58,5	22,8
2027	36,6	139,5	36,6	139,5	26,5	47,0
2028	107,5	77,3	107,5	77,3	99,9	91,8
2029	112,9	63,4	112,9	63,4	143,2	62,7
2030	57,7	74,6	57,7	74,6	42,0	42,4
2031	155,1	92,9	155,1	92,9	111,3	75,5
2032	53,9	87,0	53,9	87,0	48,2	78,0
2033	13,1	94,5	13,1	94,5	19,6	97,4
2034	20,6	41,4	20,6	41,4	25,8	61,0
2035	117,0	30,0	117,0	30,0	75,1	37,6
2036	81,4	120,7	81,4	120,7	37,3	86,4
2037	23,0	91,1	23,0	91,1	39,3	45,4
2038	69,9	20,8	69,9	20,8	124,8	14,0
2039	62,8	61,2	62,8	61,2	17,0	40,0
2040	57,8	36,3	57,8	36,3	48,9	24,0
2041	176,1	66,1	176,1	66,1	73,4	82,9
2042	40,3	26,6	40,3	26,6	138,7	25,8
2043	36,0	67,2	36,0	67,2	13,6	95,1
2044	78,2	95,6	78,2	95,6	19,0	34,7
2045	34,8	25,6	34,8	25,6	33,0	31,5
2046	35,0	51,1	35,0	51,1	50,5	72,6
2047	64,4	26,3	64,4	26,3	43,2	23,6

RCP	4,5	8,5	4,5	8,5	4,5	8,5
año	BARRERA LONCHA		VILLA ALHUÉ		RAPEL	
2048	56,5	83,3	56,5	83,3	59,1	65,1
2049	35,1	47,3	35,1	47,3	40,3	52,3
2050	58,2	42,0	58,2	42,0	42,6	24,4
2051	39,2	74,9	39,2	74,9	57,8	78,5
2052	54,7	36,1	54,7	36,1	40,3	24,6
2053	61,8	93,0	61,8	93,0	40,1	179,0
2054	20,3	62,8	20,3	62,8	42,9	48,7
2055	74,6	107,2	74,6	107,2	35,8	110,9
2056	62,8	40,9	62,8	40,9	70,5	37,3
2057	39,2	24,0	39,2	24,0	81,2	21,5
2058	42,7	33,6	42,7	33,6	69,8	40,8
2059	92,6	75,9	92,6	75,9	144,2	64,3
2060	149,9	43,6	149,9	43,6	72,3	38,3
2061	23,1	20,5	23,1	20,5	25,2	26,9
2062	152,9	69,4	152,9	69,4	38,8	52,5
2063	19,7	29,5	19,7	29,5	19,9	9,6
2064	99,7	54,1	99,7	54,1	63,8	27,4
2065	47,4	24,6	47,4	24,6	42,3	23,1
2066	48,6	105,5	48,6	105,5	43,8	115,7
2067	60,3	102,8	60,3	102,8	45,8	45,6
2068	26,8	113,8	26,8	113,8	38,1	135,7
2069	27,3	29,7	27,3	29,7	19,8	32,1
2070	27,8	57,8	27,8	57,8	34,2	114,5
2071	88,9	99,0	88,9	99,0	49,2	21,9
2072	74,6	17,4	74,6	17,4	95,6	15,2
2073	137,1	42,5	137,1	42,5	90,6	92,5
2074	73,7	29,6	73,7	29,6	48,1	8,9
2075	50,3	10,7	50,3	10,7	160,6	20,0
2076	48,1	15,8	48,1	15,8	32,1	16,0
2077	41,5	24,5	41,5	24,5	27,5	14,5
2078	28,4	91,3	28,4	91,3	24,6	75,8
2079	39,6	74,7	39,6	74,7	49,5	39,9
2080	95,6	201,4	95,6	201,4	76,8	138,0
2081	106,4	13,6	106,4	13,6	68,0	16,1
2082	26,2	17,0	26,2	17,0	28,3	7,5
2083	57,6	63,1	57,6	63,1	37,2	28,8
2084	85,7	105,0	85,7	105,0	27,8	64,9
2085	80,5	72,7	80,5	72,7	77,3	23,1
2086	43,7	13,5	43,7	13,5	50,8	10,9

RCP	4,5	8,5	4,5	8,5	4,5	8,5
año	BARRERA LONCHA		VILLA ALHUÉ		RAPEL	
2087	67,2	71,7	67,2	71,7	65,8	39,1
2088	113,0	58,8	113,0	58,8	85,7	24,4
2089	63,2	57,4	63,2	57,4	43,3	35,1
2090	21,8	58,7	21,8	58,7	24,7	70,7
2091	15,0	32,0	15,0	32,0	31,6	15,1
2092	42,7	30,3	42,7	30,3	54,6	31,9
2093	114,6	21,3	114,6	21,3	96,9	10,4
2094	10,7	82,1	10,7	82,1	24,8	51,9
2095	25,8	34,0	25,8	34,0	40,9	35,2
2096	41,7	6,9	41,7	6,9	53,6	7,5
2097	48,1	33,9	48,1	33,9	62,8	20,0
2098	170,1	53,5	170,1	53,5	116,8	47,3
2099	55,9	143,0	55,9	143,0	50,2	106,8
2100	61,6	64,5	61,6	64,5	38,8	118,1

10.5.2. Cuenca Salar de Michincha

Tabla E-2: Serie de Precipitaciones ESM2G desde 2006 a 2100 en mm.

RCP	4,5	8,5
año	UJINA	
2006	2,9	4,0
2007	6,7	11,9
2008	3,4	9,4
2009	4,5	4,5
2010	12,8	5,1
2011	13,0	6,8
2012	3,5	4,5
2013	11,4	10,0
2014	13,7	14,2
2015	2,5	6,3
2016	3,9	17,8
2017	6,1	6,5
2018	18,0	1,7
2019	2,6	4,3
2020	5,3	22,3
2021	16,4	13,3
2022	4,9	8,9
2023	10,1	2,0
2024	11,1	2,8
2025	2,5	2,8

RCP	4,5	8,5
año	UJINA	
2026	10,4	7,6
2027	2,5	7,6
2028	2,8	14,4
2029	2,3	6,1
2030	6,6	2,6
2031	7,5	3,6
2032	9,8	1,5
2033	3,7	3,9
2034	19,6	4,2
2035	7,1	6,1
2036	2,8	20,2
2037	4,5	3,5
2038	9,6	6,9
2039	6,3	2,1
2040	7,4	1,6
2041	9,5	6,7
2042	5,4	6,4
2043	0,9	13,5
2044	12,1	16,7
2045	3,9	15,9
2046	11,5	8,0
2047	3,0	5,6
2048	5,2	5,1
2049	5,0	10,0
2050	11,7	6,9
2051	10,5	3,2
2052	7,7	14,5
2053	3,0	9,4
2054	7,9	5,3
2055	9,0	4,4
2056	13,9	13,5
2057	4,1	5,8
2058	7,4	8,9
2059	3,8	6,9
2060	5,2	10,9
2061	9,7	4,9
2062	2,2	4,0
2063	2,9	4,0
2064	2,9	9,6

RCP	4,5	8,5
año	UJINA	
2065	8,6	2,3
2066	17,5	2,3
2067	13,0	3,5
2068	9,7	2,3
2069	3,8	20,9
2070	5,9	6,6
2071	4,6	1,1
2072	2,6	12,6
2073	3,2	18,8
2074	13,2	13,0
2075	6,4	5,5
2076	5,2	8,5
2077	14,1	13,3
2078	7,4	13,1
2079	3,1	19,7
2080	10,2	6,6
2081	4,9	13,6
2082	1,6	4,7
2083	10,1	12,7
2084	5,9	3,4
2085	8,5	5,4
2086	4,4	14,7
2087	9,3	13,3
2088	10,8	2,7
2089	4,5	9,8
2090	9,3	1,9
2091	5,2	12,1
2092	1,7	1,5
2093	14,1	13,7
2094	10,3	10,3
2095	4,9	10,1
2096	13,9	12,7
2097	5,7	16,4
2098	17,4	10,3
2099	2,2	9,3
2100	8,3	3,5

10.5.3. Cuenca Estero Pupío

Tabla E-3: Serie de Precipitaciones ESM2M desde 2006 a 2100 en mm.

RCP	4,5	8,5	4,5	8,5	4,5	8,5	4,5	8,5
año	CAIMANES		CULIMO		LIMAHUIDA		SALAMANCA	
2006	24,9	56,6	56,2	118,9	24,8	50,8	11,3	51,5
2007	59,5	22,4	41,4	22,6	51,2	18,9	10,6	11,5
2008	18,5	17,5	9,6	31,5	19,6	14,1	9,7	12,7
2009	36,9	51,6	44,4	42,0	33,9	38,5	31,5	198,6
2010	48,6	53,6	25,2	53,3	45,9	44,6	97,6	37,7
2011	54,9	94,0	52,1	43,2	57,4	91,0	100,3	20,1
2012	43,2	48,3	26,5	139,5	35,0	46,2	41,0	44,4
2013	17,1	114,9	23,4	50,5	14,3	113,8	65,7	84,3
2014	28,8	50,0	75,7	122,0	23,0	49,1	44,6	14,7
2015	15,2	17,4	37,7	45,9	14,3	14,0	8,7	34,2
2016	50,5	68,8	111,4	45,4	47,6	58,8	97,1	74,4
2017	48,0	15,0	44,2	24,8	42,1	15,5	14,0	3,5
2018	70,4	68,6	31,5	67,0	53,5	67,5	12,8	102,5
2019	22,0	15,5	24,9	27,7	19,0	14,9	75,2	23,2
2020	26,1	36,1	45,0	63,3	26,5	32,6	20,3	141,8
2021	120,3	9,7	61,3	29,8	130,3	9,5	38,1	9,0
2022	12,4	57,2	47,0	168,3	10,5	55,3	29,2	60,2
2023	29,0	2,4	174,3	20,5	31,5	2,4	68,9	2,6
2024	55,9	12,2	72,9	107,7	60,0	9,2	55,2	22,3
2025	13,1	33,8	61,8	122,6	11,0	33,2	16,5	63,6
2026	20,7	18,1	15,8	12,3	21,2	11,6	6,6	15,7
2027	44,0	38,1	115,0	71,5	38,8	36,7	50,4	48,6
2028	140,6	25,4	136,9	41,1	138,8	27,5	62,9	110,9
2029	23,8	20,4	13,4	34,6	22,0	21,8	10,2	29,4
2030	116,2	8,0	43,1	18,4	109,4	7,7	51,4	23,7
2031	27,7	84,2	55,3	31,2	24,5	79,3	46,0	13,0
2032	82,9	4,9	242,0	15,5	80,6	5,0	87,9	7,7
2033	30,1	20,0	30,2	7,5	18,5	19,5	25,7	10,3
2034	12,2	23,8	24,2	65,8	11,8	26,6	43,4	8,9
2035	77,3	49,2	42,8	56,4	79,1	41,4	68,0	70,5
2036	30,6	43,7	51,8	95,5	25,6	38,1	56,2	54,1
2037	86,9	8,4	97,0	6,6	74,7	6,7	38,6	7,7
2038	23,0	31,4	27,4	38,3	25,2	24,0	17,7	14,1
2039	10,3	36,8	8,2	166,2	7,6	42,6	13,0	54,8
2040	51,7	33,8	37,8	102,2	49,2	22,7	51,2	15,0
2041	24,0	74,0	21,6	28,4	18,6	54,1	31,5	35,0
2042	107,7	29,5	67,6	35,9	111,8	26,2	37,0	17,4

RCP	4,5	8,5	4,5	8,5	4,5	8,5	4,5	8,5
año	CAIMANES		CULIMO		LIMAHUIDA		SALAMANCA	
2043	17,2	40,9	34,3	21,1	14,7	39,0	17,4	13,2
2044	36,0	24,4	40,8	60,7	33,5	19,3	24,1	14,4
2045	25,6	21,6	38,5	7,8	21,1	19,9	18,8	15,9
2046	28,5	21,2	103,5	16,0	16,9	13,4	12,7	29,4
2047	103,7	22,1	39,1	105,6	94,7	19,9	57,2	29,4
2048	129,6	22,5	54,8	47,7	115,8	13,6	34,0	16,6
2049	6,8	62,5	9,3	57,3	5,1	45,4	2,7	62,5
2050	17,3	72,9	39,8	87,1	14,5	79,3	38,5	36,0
2051	15,9	12,0	50,3	20,4	15,4	10,2	27,5	11,3
2052	38,3	6,2	28,5	42,0	23,1	6,1	51,4	12,9
2053	8,7	30,9	43,3	39,4	7,9	20,2	206,7	45,7
2054	7,6	6,2	16,7	7,7	6,4	6,0	9,8	9,8
2055	39,0	52,1	47,5	71,2	35,8	44,4	71,0	23,2
2056	95,6	53,3	99,1	88,9	101,0	56,3	72,7	84,7
2057	33,7	8,6	25,8	35,3	34,0	6,2	11,2	43,3
2058	11,3	22,0	28,5	36,2	8,3	20,7	8,0	32,4
2059	46,6	37,2	115,0	68,4	43,4	36,6	97,1	40,5
2060	49,0	5,5	59,1	6,1	45,6	5,0	70,4	6,2
2061	22,3	12,1	31,6	54,3	21,3	11,1	18,3	78,0
2062	11,5	25,0	51,7	20,3	9,3	21,3	9,7	23,4
2063	12,4	20,5	32,6	48,8	11,0	19,6	6,3	32,3
2064	15,0	18,6	35,2	49,8	14,7	17,7	10,1	16,6
2065	74,4	31,1	107,0	50,3	70,0	22,1	67,8	35,1
2066	43,2	37,9	22,4	58,7	44,5	38,8	22,3	20,5
2067	17,4	25,8	40,0	19,8	15,7	25,6	12,7	45,5
2068	24,8	9,9	48,6	11,9	24,1	8,8	30,9	14,8
2069	18,5	67,4	18,0	41,9	19,2	56,4	17,5	95,5
2070	13,7	24,2	21,9	92,6	14,2	23,0	12,5	58,3
2071	11,8	28,8	8,6	83,3	11,4	29,8	5,4	24,2
2072	43,7	10,2	35,5	11,3	29,2	8,8	28,3	10,3
2073	33,3	63,0	39,5	37,1	26,6	60,3	19,0	35,5
2074	43,3	29,7	99,0	54,0	44,6	30,6	5,6	70,7
2075	12,3	10,5	51,2	28,4	11,6	10,1	21,0	15,2
2076	8,9	56,5	13,0	35,7	7,5	43,2	6,6	27,2
2077	49,2	21,4	37,7	49,3	35,5	20,7	102,5	9,3
2078	16,4	20,4	31,3	40,8	16,4	18,2	27,3	29,2
2079	16,6	37,8	79,0	43,5	16,4	31,3	18,3	17,4
2080	12,1	44,9	18,0	35,2	10,0	44,7	7,3	18,0
2081	12,0	18,3	20,4	34,0	9,0	17,5	18,1	20,2

RCP	4,5	8,5	4,5	8,5	4,5	8,5	4,5	8,5
año	CAIMANES		CULIMO		LIMAHUIDA		SALAMANCA	
2082	11,3	8,1	51,1	21,2	13,1	7,5	17,5	8,4
2083	8,4	6,8	6,0	28,1	7,4	8,3	11,6	17,8
2084	14,3	45,1	16,4	126,2	11,9	48,1	6,6	114,0
2085	42,3	13,4	46,8	16,5	44,1	10,6	28,1	4,5
2086	15,6	12,3	16,7	6,7	14,2	12,7	15,0	9,8
2087	24,2	4,5	24,7	15,8	24,5	4,3	43,0	5,7
2088	14,9	130,2	45,2	88,4	12,2	102,4	23,6	90,4
2089	12,1	6,4	8,3	20,0	10,0	5,5	12,0	14,2
2090	34,0	45,5	38,5	181,0	31,3	48,0	17,6	13,8
2091	54,5	17,2	29,7	19,4	53,9	18,1	34,9	17,6
2092	23,5	12,3	57,7	13,5	24,6	11,3	27,0	14,3
2093	34,9	6,1	62,9	33,2	32,2	4,9	23,2	13,8
2094	16,9	14,1	16,6	13,2	16,2	12,6	36,2	7,2
2095	65,4	34,4	24,6	14,6	69,3	36,9	31,3	43,8
2096	80,8	19,3	110,1	11,4	76,7	15,6	45,7	13,8
2097	28,5	11,9	8,4	19,2	29,0	11,5	14,7	17,6
2098	19,2	19,0	59,7	14,4	17,6	13,4	10,3	7,7
2099	22,5	18,1	26,3	48,3	19,8	15,2	12,2	17,7
2100	8,2	17,7	14,5	51,5	8,6	18,0	12,0	38,8

10.5.4. Cuenca Choapa

Tabla E-4: Serie de Precipitaciones ESM2M desde 2006 a 2100 en mm.

RCP	4,5	8,5	4,5	8,5
año	CUNCUMÉN		LA TRANQUILLA	
2006	12,8	42,9	12,8	42,9
2007	9,3	9,6	9,3	9,6
2008	11,1	11,0	11,1	11,0
2009	26,8	290,4	26,8	290,4
2010	135,2	44,4	135,2	44,4
2011	102,7	18,2	102,7	18,2
2012	48,4	32,6	48,4	32,6
2013	71,3	121,7	71,3	121,7
2014	40,9	14,6	40,9	14,6
2015	11,2	35,3	11,2	35,3
2016	106,6	77,1	106,6	77,1
2017	14,9	3,0	14,9	3,0
2018	13,4	92,7	13,4	92,7
2019	88,9	21,0	88,9	21,0

RCP	4,5	8,5	4,5	8,5
año	CUNCUMÉN		LA TRANQUILLA	
2020	16,6	158,8	16,6	158,8
2021	42,9	8,6	42,9	8,6
2022	40,1	44,5	40,1	44,5
2023	62,0	2,8	62,0	2,8
2024	75,0	18,8	75,0	18,8
2025	20,4	56,8	20,4	56,8
2026	5,6	13,5	5,6	13,5
2027	42,7	78,0	42,7	78,0
2028	62,4	169,8	62,4	169,8
2029	9,7	32,8	9,7	32,8
2030	57,7	17,7	57,7	17,7
2031	40,8	11,1	40,8	11,1
2032	65,5	5,8	65,5	5,8
2033	19,9	7,9	19,9	7,9
2034	47,1	7,4	47,1	7,4
2035	77,5	64,9	77,5	64,9
2036	56,7	47,6	56,7	47,6
2037	38,1	6,5	38,1	6,5
2038	26,2	14,0	26,2	14,0
2039	10,3	45,1	10,3	45,1
2040	42,1	14,7	42,1	14,7
2041	26,3	29,8	26,3	29,8
2042	41,3	32,5	41,3	32,5
2043	14,9	12,2	14,9	12,2
2044	25,7	13,1	25,7	13,1
2045	14,5	12,3	14,5	12,3
2046	11,1	26,2	11,1	26,2
2047	51,1	27,7	51,1	27,7
2048	40,8	14,5	40,8	14,5
2049	2,4	52,1	2,4	52,1
2050	49,3	32,3	49,3	32,3
2051	29,2	9,5	29,2	9,5
2052	49,8	10,1	49,8	10,1
2053	287,7	43,0	287,7	43,0
2054	7,0	9,9	7,0	9,9
2055	51,5	27,7	51,5	27,7
2056	58,2	71,2	58,2	71,2
2057	11,3	48,4	11,3	48,4
2058	7,6	27,1	7,6	27,1

RCP	4,5	8,5	4,5	8,5
año	CUNCUMÉN		LA TRANQUILLA	
2059	102,3	42,3	102,3	42,3
2060	90,6	6,8	90,6	6,8
2061	20,8	97,7	20,8	97,7
2062	7,2	19,9	7,2	19,9
2063	4,7	30,4	4,7	30,4
2064	10,5	14,1	10,5	14,1
2065	70,5	29,0	70,5	29,0
2066	17,2	18,6	17,2	18,6
2067	10,4	56,4	10,4	56,4
2068	27,4	15,5	27,4	15,5
2069	15,4	86,2	15,4	86,2
2070	11,3	77,9	11,3	77,9
2071	5,4	17,6	5,4	17,6
2072	30,3	8,6	30,3	8,6
2073	20,3	32,4	20,3	32,4
2074	4,7	93,8	4,7	93,8
2075	26,3	16,3	26,3	16,3
2076	6,7	23,7	6,7	23,7
2077	119,6	7,8	119,6	7,8
2078	34,6	31,7	34,6	31,7
2079	20,7	17,7	20,7	17,7
2080	17,1	15,1	17,1	15,1
2081	19,1	21,7	19,1	21,7
2082	15,0	9,0	15,0	9,0
2083	10,3	17,6	10,3	17,6
2084	7,6	95,1	7,6	95,1
2085	37,3	5,3	37,3	5,3
2086	12,8	8,9	12,8	8,9
2087	46,2	5,6	46,2	5,6
2088	20,5	71,1	20,5	71,1
2089	12,3	14,3	12,3	14,3
2090	16,2	17,4	16,2	17,4
2091	35,7	17,6	35,7	17,6
2092	25,4	16,0	25,4	16,0
2093	41,6	12,5	41,6	12,5
2094	38,4	7,8	38,4	7,8
2095	26,4	65,4	26,4	65,4
2096	41,6	10,4	41,6	10,4
2097	13,9	14,7	13,9	14,7

RCP	4,5	8,5	4,5	8,5
año	CUNCUMÉN		LA TRANQUILLA	
2098	9,0	8,4	9,0	8,4
2099	10,6	15,7	10,6	15,7
2100	13,2	31,6	13,2	31,6

10.6. ANEXO F: Análisis de Frecuencia de las Precipitaciones Futuras de las Proyecciones

Se presenta la información del análisis de frecuencia de la proyección de RCP4.5 y RCP8.5, con la distribución determinada en el Acápite 5 y para la ubicación de las estaciones de la DGA correspondientes a cada depósito analizado mediante las series de precipitaciones de las proyecciones de cambio climático elegidas.

10.6.1. Cuenca Estero Alhué

10.6.1.1. Estación Barrera Loncha

10.6.1.1.1. RCP4.5

Tabla F-1: Resumen Parámetros de Análisis, Estación Barrera Loncha, Proyección ESM2G RCP4.5.

Distribución Gumbel		Kolmogorov Smirnov			χ^2		
μ	64,1	α	0,05	SE ACEPTA?	α	0,05	SE ACEPTA?
σ	37,8	$D(N,\alpha)$	0,140	SI	v	4,603	SI
N	95	$D(N,\alpha)$ -Max(D)	0,076		$\chi^2v(1-\alpha)$	10,443	
Y_m	0,55931						
σ_m	1,20361						

Tabla F-2: Detalle Análisis de Frecuencia con Gumbel, Estación Barrera Loncha, Proyección ESM2G RCP4.5.

Nº	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
1	10,7	0,010	-1,140	0,044	0,044	0,107
2	13,1	0,021	-1,064	0,055	0,045	0,056
3	15,0	0,031	-1,006	0,065	0,044	0,036
4	19,7	0,042	-0,856	0,095	0,064	0,068
5	20,3	0,052	-0,835	0,100	0,058	0,043
6	20,6	0,063	-0,827	0,102	0,050	0,025
7	21,8	0,073	-0,789	0,111	0,048	0,020
8	23,0	0,083	-0,749	0,121	0,048	0,017
9	23,1	0,094	-0,746	0,121	0,038	0,008
10	24,4	0,104	-0,704	0,132	0,039	0,008
11	25,8	0,115	-0,660	0,144	0,040	0,008
12	26,2	0,125	-0,648	0,148	0,033	0,004
13	26,8	0,135	-0,629	0,153	0,028	0,002
14	27,3	0,146	-0,613	0,158	0,023	0,001
15	27,8	0,156	-0,599	0,162	0,016	0,000
16	28,4	0,167	-0,579	0,168	0,012	0,000
17	28,8	0,177	-0,566	0,172	0,005	0,000
18	29,8	0,188	-0,534	0,182	0,006	0,000
19	31,0	0,198	-0,495	0,194	0,006	0,000

Nº	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
20	34,8	0,208	-0,373	0,234	0,036	0,003
21	35,0	0,219	-0,367	0,236	0,028	0,001
22	35,1	0,229	-0,365	0,237	0,018	0,000
23	36,0	0,240	-0,336	0,247	0,017	0,000
24	36,2	0,250	-0,331	0,249	0,009	0,000
25	36,6	0,260	-0,318	0,253	0,007	0,000
26	38,0	0,271	-0,272	0,269	0,009	0,000
27	38,0	0,281	-0,271	0,269	0,012	0,000
28	39,2	0,292	-0,236	0,282	0,010	0,000
29	39,2	0,302	-0,233	0,283	0,019	0,001
30	39,6	0,313	-0,223	0,287	0,026	0,002
31	40,3	0,323	-0,198	0,296	0,027	0,002
32	41,5	0,333	-0,162	0,309	0,025	0,002
33	41,7	0,344	-0,153	0,312	0,032	0,003
34	42,7	0,354	-0,122	0,323	0,031	0,003
35	42,7	0,365	-0,121	0,323	0,041	0,005
36	43,7	0,375	-0,092	0,334	0,041	0,004
37	44,7	0,385	-0,058	0,346	0,039	0,004
38	46,5	0,396	-0,002	0,367	0,029	0,002
39	47,4	0,406	0,028	0,378	0,028	0,002
40	48,1	0,417	0,050	0,386	0,030	0,002
41	48,1	0,427	0,050	0,386	0,041	0,004
42	48,6	0,438	0,066	0,392	0,045	0,005
43	50,3	0,448	0,118	0,411	0,037	0,003
44	52,2	0,458	0,179	0,433	0,025	0,001
45	53,9	0,469	0,235	0,454	0,015	0,000
46	54,7	0,479	0,260	0,463	0,017	0,001
47	55,9	0,490	0,297	0,476	0,014	0,000
48	56,5	0,500	0,316	0,483	0,017	0,001
49	57,6	0,510	0,353	0,495	0,015	0,000
50	57,7	0,521	0,354	0,496	0,025	0,001
51	57,8	0,531	0,357	0,497	0,035	0,002
52	58,2	0,542	0,372	0,502	0,040	0,003
53	59,6	0,552	0,415	0,517	0,035	0,002
54	60,3	0,563	0,438	0,524	0,038	0,003
55	61,6	0,573	0,479	0,538	0,035	0,002
56	61,8	0,583	0,484	0,540	0,043	0,003
57	62,8	0,594	0,517	0,551	0,043	0,003
58	62,8	0,604	0,518	0,551	0,053	0,005
59	63,2	0,615	0,529	0,555	0,060	0,006
60	64,4	0,625	0,570	0,568	0,057	0,005
61	67,2	0,635	0,658	0,596	0,040	0,002
62	69,4	0,646	0,727	0,617	0,029	0,001
63	69,9	0,656	0,743	0,621	0,035	0,002
64	73,7	0,667	0,865	0,656	0,010	0,000
65	74,6	0,677	0,892	0,664	0,013	0,000
66	74,6	0,688	0,894	0,664	0,023	0,001
67	75,7	0,698	0,928	0,673	0,025	0,001
68	77,6	0,708	0,988	0,689	0,019	0,001
69	78,2	0,719	1,009	0,695	0,024	0,001
70	78,9	0,729	1,029	0,700	0,030	0,001
71	80,5	0,740	1,082	0,713	0,027	0,001
72	81,4	0,750	1,111	0,720	0,030	0,001

Nº	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
73	85,7	0,760	1,246	0,750	0,010	0,000
74	88,9	0,771	1,348	0,771	0,011	0,000
75	92,6	0,781	1,466	0,794	0,023	0,000
76	94,5	0,792	1,527	0,805	0,024	0,000
77	95,6	0,802	1,562	0,811	0,019	0,000
78	97,0	0,813	1,608	0,819	0,016	0,000
79	99,7	0,823	1,692	0,832	0,019	0,000
80	102,3	0,833	1,777	0,844	0,021	0,000
81	106,4	0,844	1,906	0,862	0,029	0,000
82	107,5	0,854	1,939	0,866	0,022	0,000
83	112,2	0,865	2,091	0,884	0,030	0,000
84	112,9	0,875	2,113	0,886	0,022	0,000
85	113,0	0,885	2,116	0,886	0,011	0,000
86	114,6	0,896	2,168	0,892	0,006	0,000
87	117,0	0,906	2,244	0,899	0,007	0,000
88	117,7	0,917	2,266	0,901	0,015	0,000
89	137,1	0,927	2,884	0,946	0,029	0,000
90	149,9	0,938	3,290	0,963	0,036	0,001
91	151,7	0,948	3,348	0,965	0,028	0,000
92	152,9	0,958	3,388	0,967	0,019	0,000
93	155,1	0,969	3,455	0,969	0,011	0,000
94	170,1	0,979	3,933	0,981	0,012	0,000
95	176,1	0,990	4,126	0,984	0,006	0,000

10.6.1.1.2. RCP8.5

Tabla F-3: Resumen Parámetros de Análisis, Estación Barrera Loncha, Proyección ESM2G RCP8.5.

Distribución Gumbel		Kolmogorov Smirnov			χ^2		
μ	68,1	α	0,05	SE ACEPTA?	α	0,05	SE ACEPTA?
σ	44,4	$D(N,\alpha)$	0,140	SI	v	4,603	SI
N	95	$D(N,\alpha)-\text{Max}(D)$	0,079		$\chi^2v(1-\alpha)$	10,443	
Ym	0,560						
σm	1,204						

Tabla F-4: Detalle Análisis de Frecuencia con Gumbel, Estación Barrera Loncha, Proyección ESM2G RCP8.5.

Nº	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
1	6,9	0,010	-1,101	0,050	0,050	0,147
2	10,7	0,021	-0,997	0,067	0,056	0,100
3	13,5	0,031	-0,922	0,081	0,060	0,079
4	13,6	0,042	-0,918	0,082	0,050	0,038
5	15,8	0,052	-0,859	0,094	0,053	0,034
6	17,0	0,063	-0,826	0,102	0,050	0,025
7	17,4	0,073	-0,814	0,105	0,042	0,014
8	20,5	0,083	-0,731	0,125	0,052	0,021
9	20,8	0,094	-0,723	0,128	0,044	0,012
10	21,3	0,104	-0,711	0,131	0,037	0,007
11	24,0	0,115	-0,636	0,151	0,047	0,012
12	24,5	0,125	-0,623	0,155	0,040	0,007
13	24,6	0,135	-0,620	0,156	0,031	0,003
14	25,6	0,146	-0,594	0,164	0,028	0,002
15	26,3	0,156	-0,574	0,169	0,024	0,001

N°	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
16	26,6	0,167	-0,565	0,172	0,016	0,000
17	29,5	0,177	-0,486	0,197	0,030	0,002
18	29,6	0,188	-0,484	0,197	0,020	0,001
19	29,7	0,198	-0,483	0,198	0,010	0,000
20	30,0	0,208	-0,474	0,200	0,008	0,000
21	30,3	0,219	-0,467	0,203	0,016	0,001
22	32,0	0,229	-0,420	0,218	0,011	0,001
23	33,6	0,240	-0,377	0,233	0,007	0,000
24	33,9	0,250	-0,369	0,236	0,014	0,001
25	34,0	0,260	-0,365	0,237	0,024	0,002
26	34,1	0,271	-0,361	0,238	0,033	0,004
27	36,1	0,281	-0,310	0,256	0,025	0,002
28	36,3	0,292	-0,302	0,258	0,033	0,004
29	36,9	0,302	-0,286	0,264	0,038	0,005
30	37,0	0,313	-0,285	0,265	0,048	0,007
31	40,9	0,323	-0,177	0,303	0,020	0,001
32	41,2	0,333	-0,170	0,306	0,028	0,002
33	41,4	0,344	-0,164	0,308	0,036	0,004
34	42,0	0,354	-0,149	0,313	0,041	0,005
35	42,5	0,365	-0,134	0,319	0,046	0,006
36	43,6	0,375	-0,104	0,330	0,045	0,005
37	43,8	0,385	-0,099	0,331	0,054	0,008
38	47,3	0,396	-0,004	0,367	0,029	0,002
39	51,1	0,406	0,098	0,404	0,008	0,000
40	53,5	0,417	0,162	0,427	0,021	0,000
41	53,5	0,427	0,164	0,428	0,011	0,000
42	54,1	0,438	0,180	0,434	0,007	0,000
43	57,2	0,448	0,264	0,464	0,026	0,001
44	57,4	0,458	0,269	0,466	0,018	0,000
45	57,8	0,469	0,280	0,470	0,011	0,000
46	58,7	0,479	0,303	0,478	0,009	0,000
47	58,8	0,490	0,306	0,479	0,011	0,000
48	61,2	0,500	0,372	0,502	0,012	0,000
49	62,8	0,510	0,416	0,517	0,017	0,000
50	63,1	0,521	0,425	0,520	0,010	0,000
51	63,4	0,531	0,433	0,523	0,009	0,000
52	64,5	0,542	0,461	0,532	0,009	0,000
53	66,1	0,552	0,504	0,546	0,006	0,000
54	67,2	0,563	0,534	0,556	0,006	0,000
55	69,4	0,573	0,595	0,576	0,014	0,000
56	71,7	0,583	0,656	0,595	0,022	0,000
57	72,7	0,594	0,682	0,603	0,020	0,000
58	74,6	0,604	0,734	0,619	0,025	0,000
59	74,7	0,615	0,738	0,620	0,016	0,000
60	74,9	0,625	0,743	0,622	0,007	0,000
61	75,9	0,635	0,770	0,630	0,006	0,000
62	77,3	0,646	0,809	0,641	0,005	0,000
63	78,6	0,656	0,842	0,650	0,006	0,000
64	80,1	0,667	0,884	0,662	0,005	0,000
65	82,1	0,677	0,937	0,676	0,009	0,000
66	83,3	0,688	0,971	0,685	0,008	0,000
67	87,0	0,698	1,072	0,710	0,023	0,000
68	87,7	0,708	1,090	0,715	0,017	0,000

N°	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
69	90,3	0,719	1,160	0,731	0,023	0,000
70	91,1	0,729	1,181	0,736	0,017	0,000
71	91,1	0,740	1,182	0,736	0,007	0,000
72	91,3	0,750	1,187	0,737	0,013	0,000
73	92,9	0,760	1,231	0,747	0,014	0,000
74	93,0	0,771	1,233	0,747	0,024	0,001
75	94,5	0,781	1,275	0,756	0,025	0,001
76	95,5	0,792	1,301	0,762	0,030	0,001
77	95,6	0,802	1,303	0,762	0,040	0,002
78	99,0	0,813	1,395	0,781	0,032	0,001
79	102,8	0,823	1,499	0,800	0,023	0,001
80	105,0	0,833	1,558	0,810	0,023	0,001
81	105,5	0,844	1,571	0,812	0,031	0,001
82	107,2	0,854	1,617	0,820	0,034	0,001
83	113,8	0,865	1,798	0,847	0,017	0,000
84	118,6	0,875	1,927	0,865	0,010	0,000
85	120,7	0,885	1,984	0,872	0,014	0,000
86	126,9	0,896	2,152	0,890	0,006	0,000
87	135,5	0,906	2,384	0,912	0,016	0,000
88	137,1	0,917	2,428	0,916	0,009	0,000
89	139,5	0,927	2,494	0,921	0,006	0,000
90	141,4	0,938	2,545	0,925	0,013	0,000
91	143,0	0,948	2,589	0,928	0,020	0,000
92	145,1	0,958	2,645	0,931	0,027	0,001
93	177,5	0,969	3,523	0,971	0,013	0,000
94	201,4	0,979	4,169	0,985	0,016	0,000
95	261,2	0,990	5,790	0,997	0,018	0,000

10.6.1.1.3. Análisis gráfico

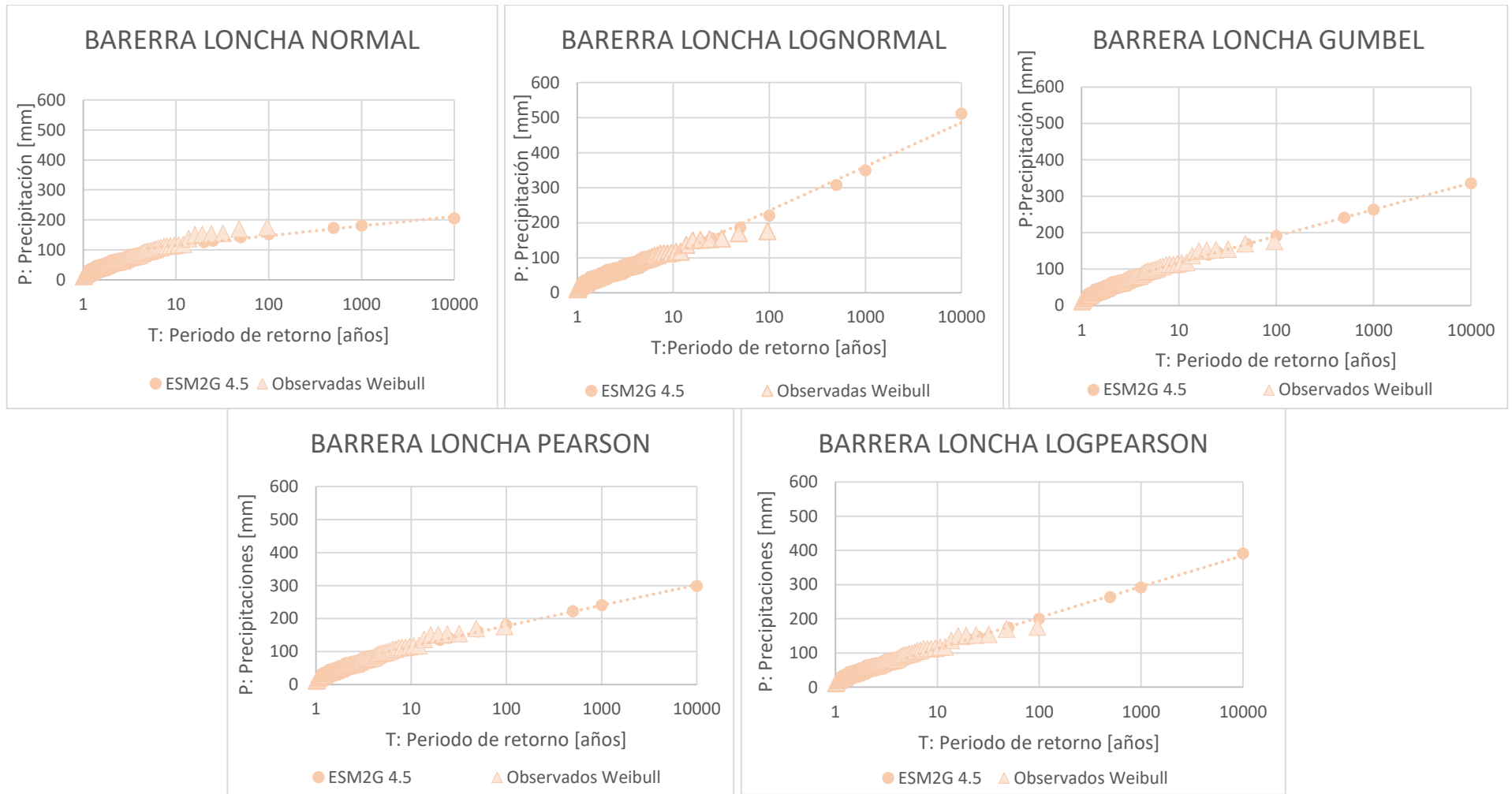


Figura F-1: Comparación entre los análisis de frecuencia de las distribuciones de probabilidad, estación Barrera Loncha DGA, proyección RCP 4.5

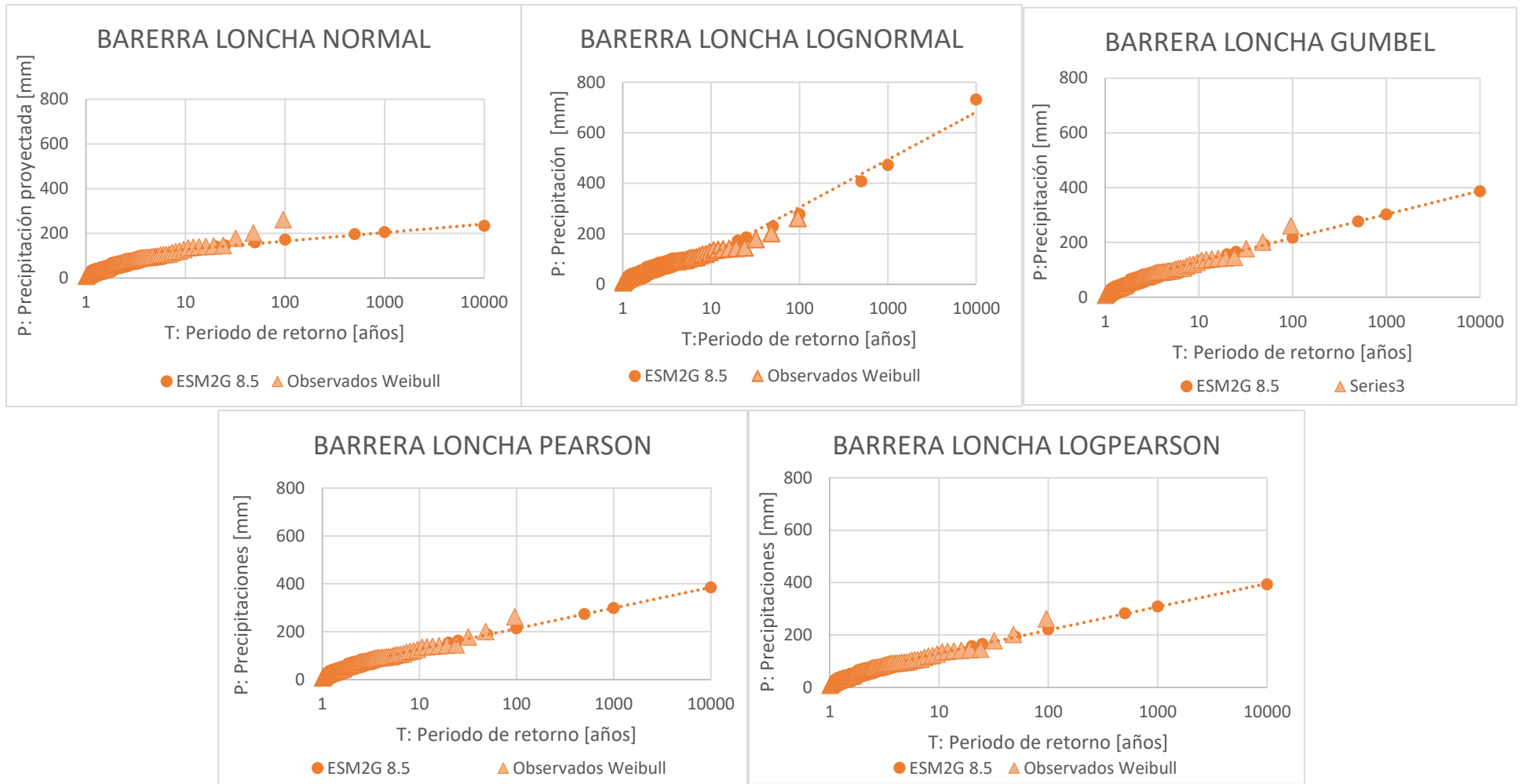


Figura F-2: Comparación entre los análisis de frecuencia de las distribuciones de probabilidad, estación Barrera Loncha DGA, proyección RCP 8.5

10.6.1.2. Estación Villa Alhué

10.6.1.2.1. RCP4.5

Tabla F-5: Resumen Parámetros de Análisis, Estación Villa Alhué, Proyección ESM2G RCP4.5.

Distribución Gumbel		Kolmogorov Smirnov			χ^2		
μ	64,1	α	0,05	SE ACEPTA?	α	0,05	SE ACEPTA?
σ	37,8	$D(N,\alpha)$	0,140	SI	v	4,603	SI
N	95	$D(N,\alpha)\text{-Max}(D)$	0,076		$\chi^2v(1-\alpha)$	10,443	
Y_m	0,560						
σ_m	1,204						

Tabla F-6: Detalle Análisis de Frecuencia con Gumbel, Estación Villa Alhué, Proyección ESM2G RCP4.5.

Nº	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
1	10,7	0,010	-1,140	0,044	0,044	0,107
2	13,1	0,021	-1,064	0,055	0,045	0,056
3	15,0	0,031	-1,006	0,065	0,044	0,036
4	19,7	0,042	-0,856	0,095	0,064	0,068
5	20,3	0,052	-0,835	0,100	0,058	0,043
6	20,6	0,063	-0,827	0,102	0,050	0,025
7	21,8	0,073	-0,789	0,111	0,048	0,020
8	23,0	0,083	-0,749	0,121	0,048	0,017
9	23,1	0,094	-0,746	0,121	0,038	0,008
10	24,4	0,104	-0,704	0,132	0,039	0,008
11	25,8	0,115	-0,660	0,144	0,040	0,008
12	26,2	0,125	-0,648	0,148	0,033	0,004
13	26,8	0,135	-0,629	0,153	0,028	0,002
14	27,3	0,146	-0,613	0,158	0,023	0,001
15	27,8	0,156	-0,599	0,162	0,016	0,000
16	28,4	0,167	-0,579	0,168	0,012	0,000
17	28,8	0,177	-0,566	0,172	0,005	0,000
18	29,8	0,188	-0,534	0,182	0,006	0,000
19	31,0	0,198	-0,495	0,194	0,006	0,000
20	34,8	0,208	-0,373	0,234	0,036	0,003
21	35,0	0,219	-0,367	0,236	0,028	0,001
22	35,1	0,229	-0,365	0,237	0,018	0,000
23	36,0	0,240	-0,336	0,247	0,017	0,000
24	36,2	0,250	-0,331	0,249	0,009	0,000
25	36,6	0,260	-0,318	0,253	0,007	0,000
26	38,0	0,271	-0,272	0,269	0,009	0,000
27	38,0	0,281	-0,271	0,269	0,012	0,000
28	39,2	0,292	-0,236	0,282	0,010	0,000
29	39,2	0,302	-0,233	0,283	0,019	0,001
30	39,6	0,313	-0,223	0,287	0,026	0,002
31	40,3	0,323	-0,198	0,296	0,027	0,002
32	41,5	0,333	-0,162	0,309	0,025	0,002
33	41,7	0,344	-0,153	0,312	0,032	0,003
34	42,7	0,354	-0,122	0,323	0,031	0,003
35	42,7	0,365	-0,121	0,323	0,041	0,005
36	43,7	0,375	-0,092	0,334	0,041	0,004
37	44,7	0,385	-0,058	0,346	0,039	0,004
38	46,5	0,396	-0,002	0,367	0,029	0,002
39	47,4	0,406	0,028	0,378	0,028	0,002

N°	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
40	48,1	0,417	0,050	0,386	0,030	0,002
41	48,1	0,427	0,050	0,386	0,041	0,004
42	48,6	0,438	0,066	0,392	0,045	0,005
43	50,3	0,448	0,118	0,411	0,037	0,003
44	52,2	0,458	0,179	0,433	0,025	0,001
45	53,9	0,469	0,235	0,454	0,015	0,000
46	54,7	0,479	0,260	0,463	0,017	0,001
47	55,9	0,490	0,297	0,476	0,014	0,000
48	56,5	0,500	0,316	0,483	0,017	0,001
49	57,6	0,510	0,353	0,495	0,015	0,000
50	57,7	0,521	0,354	0,496	0,025	0,001
51	57,8	0,531	0,357	0,497	0,035	0,002
52	58,2	0,542	0,372	0,502	0,040	0,003
53	59,6	0,552	0,415	0,517	0,035	0,002
54	60,3	0,563	0,438	0,524	0,038	0,003
55	61,6	0,573	0,479	0,538	0,035	0,002
56	61,8	0,583	0,484	0,540	0,043	0,003
57	62,8	0,594	0,517	0,551	0,043	0,003
58	62,8	0,604	0,518	0,551	0,053	0,005
59	63,2	0,615	0,529	0,555	0,060	0,006
60	64,4	0,625	0,570	0,568	0,057	0,005
61	67,2	0,635	0,658	0,596	0,040	0,002
62	69,4	0,646	0,727	0,617	0,029	0,001
63	69,9	0,656	0,743	0,621	0,035	0,002
64	73,7	0,667	0,865	0,656	0,010	0,000
65	74,6	0,677	0,892	0,664	0,013	0,000
66	74,6	0,688	0,894	0,664	0,023	0,001
67	75,7	0,698	0,928	0,673	0,025	0,001
68	77,6	0,708	0,988	0,689	0,019	0,001
69	78,2	0,719	1,009	0,695	0,024	0,001
70	78,9	0,729	1,029	0,700	0,030	0,001
71	80,5	0,740	1,082	0,713	0,027	0,001
72	81,4	0,750	1,111	0,720	0,030	0,001
73	85,7	0,760	1,246	0,750	0,010	0,000
74	88,9	0,771	1,348	0,771	0,011	0,000
75	92,6	0,781	1,466	0,794	0,023	0,000
76	94,5	0,792	1,527	0,805	0,024	0,000
77	95,6	0,802	1,562	0,811	0,019	0,000
78	97,0	0,813	1,608	0,819	0,016	0,000
79	99,7	0,823	1,692	0,832	0,019	0,000
80	102,3	0,833	1,777	0,844	0,021	0,000
81	106,4	0,844	1,906	0,862	0,029	0,000
82	107,5	0,854	1,939	0,866	0,022	0,000
83	112,2	0,865	2,091	0,884	0,030	0,000
84	112,9	0,875	2,113	0,886	0,022	0,000
85	113,0	0,885	2,116	0,886	0,011	0,000
86	114,6	0,896	2,168	0,892	0,006	0,000
87	117,0	0,906	2,244	0,899	0,007	0,000
88	117,7	0,917	2,266	0,901	0,015	0,000
89	137,1	0,927	2,884	0,946	0,029	0,000
90	149,9	0,938	3,290	0,963	0,036	0,001
91	151,7	0,948	3,348	0,965	0,028	0,000
92	152,9	0,958	3,388	0,967	0,019	0,000

Nº	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
93	155,1	0,969	3,455	0,969	0,011	0,000
94	170,1	0,979	3,933	0,981	0,012	0,000
95	176,1	0,990	4,126	0,984	0,006	0,000

10.6.1.2.2. RCP8.5

Tabla F-7: Resumen Parámetros de Análisis, Estación Villa Alhué, Proyección ESM2G RCP8.5.

Distribución Gumbel		Kolmogorov Smirnov			χ^2		
μ	68,1	α	0,05	SE ACEPTA?	α	0,05	SE ACEPTA?
σ	44,4	$D(N,\alpha)$	0,140	SI	v	4,603	SI
N	95	$D(N,\alpha)-\text{Max}(D)$	0,079		$\chi^2v(1-\alpha)$	10,443	
Ym	0,559						
σm	1,204						

Tabla F-8: Detalle Análisis de Frecuencia con Gumbel, Estación Villa Alhué, Proyección ESM2G RCP8.5.

Nº	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
1	6,9	0,010	-1,101	0,050	0,050	0,147
2	10,7	0,021	-0,997	0,067	0,056	0,100
3	13,5	0,031	-0,922	0,081	0,060	0,079
4	13,6	0,042	-0,918	0,082	0,050	0,038
5	15,8	0,052	-0,859	0,094	0,053	0,034
6	17,0	0,063	-0,826	0,102	0,050	0,025
7	17,4	0,073	-0,814	0,105	0,042	0,014
8	20,5	0,083	-0,731	0,125	0,052	0,021
9	20,8	0,094	-0,723	0,128	0,044	0,012
10	21,3	0,104	-0,711	0,131	0,037	0,007
11	24,0	0,115	-0,636	0,151	0,047	0,012
12	24,5	0,125	-0,623	0,155	0,040	0,007
13	24,6	0,135	-0,620	0,156	0,031	0,003
14	25,6	0,146	-0,594	0,164	0,028	0,002
15	26,3	0,156	-0,574	0,169	0,024	0,001
16	26,6	0,167	-0,565	0,172	0,016	0,000
17	29,5	0,177	-0,486	0,197	0,030	0,002
18	29,6	0,188	-0,484	0,197	0,020	0,001
19	29,7	0,198	-0,483	0,198	0,010	0,000
20	30,0	0,208	-0,474	0,200	0,008	0,000
21	30,3	0,219	-0,467	0,203	0,016	0,001
22	32,0	0,229	-0,420	0,218	0,011	0,001
23	33,6	0,240	-0,377	0,233	0,007	0,000
24	33,9	0,250	-0,369	0,236	0,014	0,001
25	34,0	0,260	-0,365	0,237	0,024	0,002
26	34,1	0,271	-0,361	0,238	0,033	0,004
27	36,1	0,281	-0,310	0,256	0,025	0,002
28	36,3	0,292	-0,302	0,258	0,033	0,004
29	36,9	0,302	-0,286	0,264	0,038	0,005
30	37,0	0,313	-0,285	0,265	0,048	0,007
31	40,9	0,323	-0,177	0,303	0,020	0,001
32	41,2	0,333	-0,170	0,306	0,028	0,002
33	41,4	0,344	-0,164	0,308	0,036	0,004
34	42,0	0,354	-0,149	0,313	0,041	0,005
35	42,5	0,365	-0,134	0,319	0,046	0,006

N°	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
36	43,6	0,375	-0,104	0,330	0,045	0,005
37	43,8	0,385	-0,099	0,331	0,054	0,008
38	47,3	0,396	-0,004	0,367	0,029	0,002
39	51,1	0,406	0,098	0,404	0,008	0,000
40	53,5	0,417	0,162	0,427	0,021	0,000
41	53,5	0,427	0,164	0,428	0,011	0,000
42	54,1	0,438	0,180	0,434	0,007	0,000
43	57,2	0,448	0,264	0,464	0,026	0,001
44	57,4	0,458	0,269	0,466	0,018	0,000
45	57,8	0,469	0,280	0,470	0,011	0,000
46	58,7	0,479	0,303	0,478	0,009	0,000
47	58,8	0,490	0,306	0,479	0,011	0,000
48	61,2	0,500	0,372	0,502	0,012	0,000
49	62,8	0,510	0,416	0,517	0,017	0,000
50	63,1	0,521	0,425	0,520	0,010	0,000
51	63,4	0,531	0,433	0,523	0,009	0,000
52	64,5	0,542	0,461	0,532	0,009	0,000
53	66,1	0,552	0,504	0,546	0,006	0,000
54	67,2	0,563	0,534	0,556	0,006	0,000
55	69,4	0,573	0,595	0,576	0,014	0,000
56	71,7	0,583	0,656	0,595	0,022	0,000
57	72,7	0,594	0,682	0,603	0,020	0,000
58	74,6	0,604	0,734	0,619	0,025	0,000
59	74,7	0,615	0,738	0,620	0,016	0,000
60	74,9	0,625	0,743	0,622	0,007	0,000
61	75,9	0,635	0,770	0,630	0,006	0,000
62	77,3	0,646	0,809	0,641	0,005	0,000
63	78,6	0,656	0,842	0,650	0,006	0,000
64	80,1	0,667	0,884	0,662	0,005	0,000
65	82,1	0,677	0,937	0,676	0,009	0,000
66	83,3	0,688	0,971	0,685	0,008	0,000
67	87,0	0,698	1,072	0,710	0,023	0,000
68	87,7	0,708	1,090	0,715	0,017	0,000
69	90,3	0,719	1,160	0,731	0,023	0,000
70	91,1	0,729	1,181	0,736	0,017	0,000
71	91,1	0,740	1,182	0,736	0,007	0,000
72	91,3	0,750	1,187	0,737	0,013	0,000
73	92,9	0,760	1,231	0,747	0,014	0,000
74	93,0	0,771	1,233	0,747	0,024	0,001
75	94,5	0,781	1,275	0,756	0,025	0,001
76	95,5	0,792	1,301	0,762	0,030	0,001
77	95,6	0,802	1,303	0,762	0,040	0,002
78	99,0	0,813	1,395	0,781	0,032	0,001
79	102,8	0,823	1,499	0,800	0,023	0,001
80	105,0	0,833	1,558	0,810	0,023	0,001
81	105,5	0,844	1,571	0,812	0,031	0,001
82	107,2	0,854	1,617	0,820	0,034	0,001
83	113,8	0,865	1,798	0,847	0,017	0,000
84	118,6	0,875	1,927	0,865	0,010	0,000
85	120,7	0,885	1,984	0,872	0,014	0,000
86	126,9	0,896	2,152	0,890	0,006	0,000
87	135,5	0,906	2,384	0,912	0,016	0,000
88	137,1	0,917	2,428	0,916	0,009	0,000

N°	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
89	139,5	0,927	2,494	0,921	0,006	0,000
90	141,4	0,938	2,545	0,925	0,013	0,000
91	143,0	0,948	2,589	0,928	0,020	0,000
92	145,1	0,958	2,645	0,931	0,027	0,001
93	177,5	0,969	3,523	0,971	0,013	0,000
94	201,4	0,979	4,169	0,985	0,016	0,000
95	261,2	0,990	5,790	0,997	0,018	0,000

10.6.1.2.3. Análisis gráfico

Como el modelo ESM2G arroja exactamente la misma proyección de precipitaciones para las estaciones Barrera Loncha y Villa Alhué, el análisis gráfico de esta última estación corresponde al del acápite 10.6.1.1.3.

10.6.1.3. Estación Rapel

10.6.1.3.1. RCP4.5

Tabla F-9: Resumen Parámetros de Análisis, Estación Rapel, Proyección ESM2G RCP4.5.

Distribución Gumbel		Kolmogorov Smirnov			χ^2		
μ	56,3	α	0,05	SE ACEPTA?	α	0,05	SE ACEPTA?
σ	30,8	$D(N,\alpha)$	0,140	SI	v	4,603	SI
N	95	$D(N,\alpha)-\text{Max}(D)$	0,070		$\chi^2v(1-\alpha)$	10,443	
Y_m	0,559						
σ_m	1,204						

Tabla F-10: Detalle Análisis de Frecuencia con Gumbel, Estación Rapel, Proyección ESM2G RCP4.5.

Nº	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
1	13,6	0,010	-1,107	0,049	0,049	0,140
2	15,5	0,021	-1,032	0,060	0,050	0,075
3	17,0	0,031	-0,972	0,071	0,050	0,051
4	19,0	0,042	-0,895	0,086	0,055	0,048
5	19,6	0,052	-0,873	0,091	0,050	0,029
6	19,8	0,063	-0,865	0,093	0,041	0,015
7	19,9	0,073	-0,862	0,094	0,031	0,006
8	24,6	0,083	-0,677	0,140	0,067	0,038
9	24,7	0,094	-0,673	0,141	0,058	0,024
10	24,8	0,104	-0,671	0,141	0,048	0,013
11	25,2	0,115	-0,653	0,146	0,042	0,009
12	25,2	0,125	-0,652	0,147	0,032	0,004
13	25,8	0,135	-0,629	0,153	0,028	0,002
14	26,5	0,146	-0,603	0,161	0,025	0,002
15	27,5	0,156	-0,563	0,173	0,027	0,002
16	27,8	0,167	-0,551	0,176	0,020	0,001
17	28,3	0,177	-0,534	0,182	0,015	0,000
18	29,7	0,188	-0,476	0,200	0,023	0,001
19	29,8	0,198	-0,475	0,200	0,013	0,000
20	31,6	0,208	-0,405	0,223	0,025	0,001
21	32,1	0,219	-0,385	0,230	0,022	0,001
22	33,0	0,229	-0,349	0,242	0,023	0,001
23	34,2	0,240	-0,301	0,259	0,030	0,002
24	35,3	0,250	-0,260	0,273	0,034	0,002
25	35,8	0,260	-0,241	0,280	0,030	0,002
26	37,2	0,271	-0,184	0,301	0,040	0,003
27	37,3	0,281	-0,180	0,302	0,031	0,002
28	38,1	0,292	-0,148	0,314	0,032	0,002
29	38,8	0,302	-0,122	0,323	0,031	0,001
30	38,8	0,313	-0,122	0,323	0,021	0,000
31	39,3	0,323	-0,103	0,330	0,018	0,000
32	39,9	0,333	-0,079	0,339	0,016	0,000
33	40,1	0,344	-0,070	0,342	0,009	0,000
34	40,3	0,354	-0,064	0,344	0,010	0,000
35	40,3	0,365	-0,062	0,345	0,020	0,001
36	40,9	0,375	-0,040	0,353	0,022	0,001
37	42,0	0,385	0,001	0,368	0,017	0,001
38	42,3	0,396	0,015	0,373	0,023	0,001

N°	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
39	42,6	0,406	0,026	0,377	0,029	0,002
40	42,6	0,417	0,027	0,378	0,039	0,004
41	42,9	0,427	0,039	0,382	0,045	0,005
42	43,2	0,438	0,051	0,387	0,051	0,006
43	43,3	0,448	0,054	0,388	0,060	0,008
44	43,8	0,458	0,071	0,394	0,064	0,009
45	45,8	0,469	0,150	0,423	0,046	0,004
46	48,1	0,479	0,241	0,456	0,023	0,001
47	48,2	0,490	0,243	0,456	0,033	0,002
48	48,9	0,500	0,273	0,467	0,033	0,002
49	49,2	0,510	0,284	0,471	0,039	0,003
50	49,5	0,521	0,295	0,475	0,046	0,004
51	49,5	0,531	0,297	0,476	0,056	0,006
52	50,2	0,542	0,321	0,484	0,057	0,006
53	50,5	0,552	0,334	0,489	0,063	0,007
54	50,8	0,563	0,346	0,493	0,070	0,009
55	53,6	0,573	0,454	0,530	0,043	0,003
56	53,9	0,583	0,467	0,534	0,049	0,004
57	54,6	0,594	0,494	0,543	0,050	0,004
58	57,8	0,604	0,619	0,584	0,021	0,001
59	58,5	0,615	0,647	0,592	0,022	0,001
60	59,1	0,625	0,670	0,599	0,026	0,001
61	60,0	0,635	0,705	0,610	0,025	0,001
62	62,8	0,646	0,812	0,642	0,006	0,000
63	63,8	0,656	0,852	0,653	0,007	0,000
64	64,9	0,667	0,897	0,665	0,009	0,000
65	65,5	0,677	0,919	0,671	0,006	0,000
66	65,8	0,688	0,932	0,675	0,013	0,000
67	68,0	0,698	1,016	0,696	0,009	0,000
68	69,8	0,708	1,087	0,714	0,016	0,000
69	70,5	0,719	1,116	0,721	0,012	0,000
70	70,8	0,729	1,127	0,723	0,006	0,000
71	72,3	0,740	1,183	0,736	0,007	0,000
72	73,4	0,750	1,228	0,746	0,006	0,000
73	74,2	0,760	1,258	0,753	0,008	0,000
74	74,4	0,771	1,267	0,755	0,016	0,000
75	75,1	0,781	1,293	0,760	0,021	0,001
76	75,4	0,792	1,306	0,763	0,029	0,001
77	76,8	0,802	1,362	0,774	0,028	0,001
78	76,9	0,813	1,366	0,775	0,038	0,002
79	77,3	0,823	1,381	0,778	0,045	0,002
80	81,2	0,833	1,532	0,806	0,028	0,001
81	83,3	0,844	1,614	0,819	0,024	0,001
82	84,1	0,854	1,647	0,825	0,029	0,001
83	85,7	0,865	1,709	0,834	0,030	0,001
84	90,6	0,875	1,899	0,861	0,014	0,000
85	95,6	0,885	2,096	0,884	0,009	0,000
86	96,9	0,896	2,144	0,889	0,006	0,000
87	99,9	0,906	2,261	0,901	0,005	0,000
88	102,6	0,917	2,368	0,911	0,006	0,000
89	111,3	0,927	2,708	0,935	0,019	0,000
90	116,8	0,938	2,920	0,948	0,020	0,000
91	124,8	0,948	3,236	0,961	0,024	0,000

Nº	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
92	138,7	0,958	3,778	0,977	0,029	0,000
93	143,2	0,969	3,952	0,981	0,023	0,000
94	144,2	0,979	3,992	0,982	0,013	0,000
95	160,6	0,990	4,631	0,990	0,011	0,000

10.6.1.3.2. RCP8.5

Tabla F-11: Resumen Parámetros de Análisis, Estación Rapel, Proyección ESM2G RCP8.5.

Distribución Gumbel		Kolmogorov Smirnov			χ^2		
μ	53,7	α	0,05	SE ACEPTA?	α	0,05	SE ACEPTA?
σ	35,6	D(N, α)	0,140	SI	v	4,603	SI
N	95	D(N, α)-Max(D)	0,074		$\chi^2v(1-\alpha)$	10,443	
Ym	0,559						
σm	1,204						

Tabla F-12: Detalle Análisis de Frecuencia con Gumbel, Estación Rapel, Proyección ESM2G RCP8.5.

Nº	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
1	7,5	0,010	-1,001	0,066	0,066	0,295
2	7,5	0,021	-0,998	0,066	0,056	0,099
3	8,9	0,031	-0,952	0,075	0,054	0,061
4	9,6	0,042	-0,928	0,080	0,048	0,035
5	10,4	0,052	-0,901	0,085	0,043	0,021
6	10,9	0,063	-0,884	0,089	0,037	0,011
7	14,0	0,073	-0,780	0,113	0,050	0,022
8	14,5	0,083	-0,762	0,117	0,044	0,014
9	15,1	0,094	-0,743	0,122	0,039	0,009
10	15,2	0,104	-0,740	0,123	0,029	0,003
11	16,0	0,115	-0,712	0,130	0,026	0,002
12	16,1	0,125	-0,709	0,131	0,016	0,000
13	18,6	0,135	-0,624	0,155	0,030	0,003
14	20,0	0,146	-0,579	0,168	0,032	0,003
15	20,0	0,156	-0,579	0,168	0,022	0,001
16	21,5	0,167	-0,526	0,184	0,028	0,002
17	21,9	0,177	-0,513	0,188	0,022	0,001
18	22,8	0,188	-0,484	0,197	0,020	0,001
19	23,1	0,198	-0,473	0,201	0,013	0,000
20	23,1	0,208	-0,473	0,201	0,007	0,000
21	23,6	0,219	-0,455	0,207	0,012	0,001
22	24,0	0,229	-0,444	0,211	0,019	0,002
23	24,4	0,240	-0,428	0,215	0,024	0,002
24	24,4	0,250	-0,428	0,216	0,034	0,005
25	24,6	0,260	-0,423	0,217	0,043	0,007
26	25,8	0,271	-0,382	0,231	0,040	0,006
27	26,9	0,281	-0,343	0,244	0,037	0,005
28	27,4	0,292	-0,327	0,250	0,042	0,006
29	28,8	0,302	-0,282	0,266	0,037	0,004
30	31,5	0,313	-0,189	0,299	0,014	0,001
31	31,9	0,323	-0,176	0,303	0,020	0,001
32	32,1	0,333	-0,168	0,307	0,027	0,002

Nº	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
33	34,7	0,344	-0,080	0,338	0,005	0,000
34	35,1	0,354	-0,068	0,343	0,011	0,000
35	35,1	0,365	-0,068	0,343	0,022	0,001
36	35,2	0,375	-0,064	0,344	0,031	0,003
37	37,3	0,385	0,006	0,370	0,015	0,001
38	37,6	0,396	0,016	0,374	0,022	0,001
39	38,3	0,406	0,041	0,383	0,023	0,001
40	39,1	0,417	0,068	0,393	0,024	0,001
41	39,2	0,427	0,071	0,394	0,033	0,003
42	39,9	0,438	0,093	0,402	0,036	0,003
43	40,0	0,448	0,098	0,404	0,044	0,004
44	40,4	0,458	0,110	0,408	0,050	0,005
45	40,8	0,469	0,124	0,413	0,056	0,007
46	41,2	0,479	0,139	0,419	0,060	0,008
47	42,4	0,490	0,178	0,433	0,057	0,007
48	42,7	0,500	0,190	0,438	0,062	0,008
49	45,4	0,510	0,280	0,470	0,041	0,003
50	45,6	0,521	0,286	0,472	0,049	0,005
51	47,0	0,531	0,334	0,489	0,042	0,003
52	47,3	0,542	0,343	0,492	0,050	0,005
53	48,7	0,552	0,392	0,509	0,043	0,003
54	50,4	0,563	0,449	0,528	0,034	0,002
55	51,9	0,573	0,500	0,545	0,028	0,001
56	52,3	0,583	0,512	0,549	0,034	0,002
57	52,5	0,594	0,521	0,552	0,042	0,003
58	53,9	0,604	0,566	0,567	0,037	0,002
59	53,9	0,615	0,568	0,567	0,047	0,004
60	54,1	0,625	0,574	0,569	0,056	0,005
61	54,9	0,635	0,600	0,578	0,058	0,005
62	61,0	0,646	0,805	0,640	0,006	0,000
63	62,7	0,656	0,863	0,656	0,010	0,000
64	64,3	0,667	0,918	0,671	0,015	0,000
65	64,9	0,677	0,939	0,676	0,010	0,000
66	65,1	0,688	0,945	0,678	0,009	0,000
67	69,0	0,698	1,077	0,711	0,024	0,000
68	69,0	0,708	1,078	0,712	0,014	0,000
69	70,7	0,719	1,133	0,725	0,016	0,000
70	72,6	0,729	1,199	0,740	0,021	0,000
71	75,5	0,740	1,297	0,761	0,032	0,001
72	75,6	0,750	1,301	0,762	0,022	0,000
73	75,8	0,760	1,306	0,763	0,013	0,000
74	78,0	0,771	1,381	0,778	0,017	0,000
75	78,5	0,781	1,397	0,781	0,010	0,000
76	82,9	0,792	1,546	0,808	0,027	0,000
77	86,4	0,802	1,665	0,828	0,036	0,001
78	91,8	0,813	1,846	0,854	0,052	0,002
79	92,5	0,823	1,869	0,857	0,045	0,001
80	93,2	0,833	1,894	0,860	0,037	0,001
81	95,1	0,844	1,958	0,868	0,035	0,001
82	95,3	0,854	1,963	0,869	0,025	0,000
83	97,4	0,865	2,035	0,878	0,023	0,000
84	97,6	0,875	2,044	0,878	0,014	0,000
85	100,0	0,885	2,124	0,887	0,012	0,000

N°	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
86	106,2	0,896	2,335	0,908	0,022	0,000
87	106,8	0,906	2,352	0,909	0,013	0,000
88	110,9	0,917	2,493	0,921	0,014	0,000
89	114,5	0,927	2,612	0,929	0,013	0,000
90	115,7	0,938	2,653	0,932	0,006	0,000
91	118,1	0,948	2,734	0,937	0,011	0,000
92	135,7	0,958	3,328	0,965	0,017	0,000
93	138,0	0,969	3,406	0,967	0,009	0,000
94	140,1	0,979	3,479	0,970	0,010	0,000
95	179,0	0,990	4,792	0,992	0,013	0,000

10.6.1.3.3. Análisis gráfico

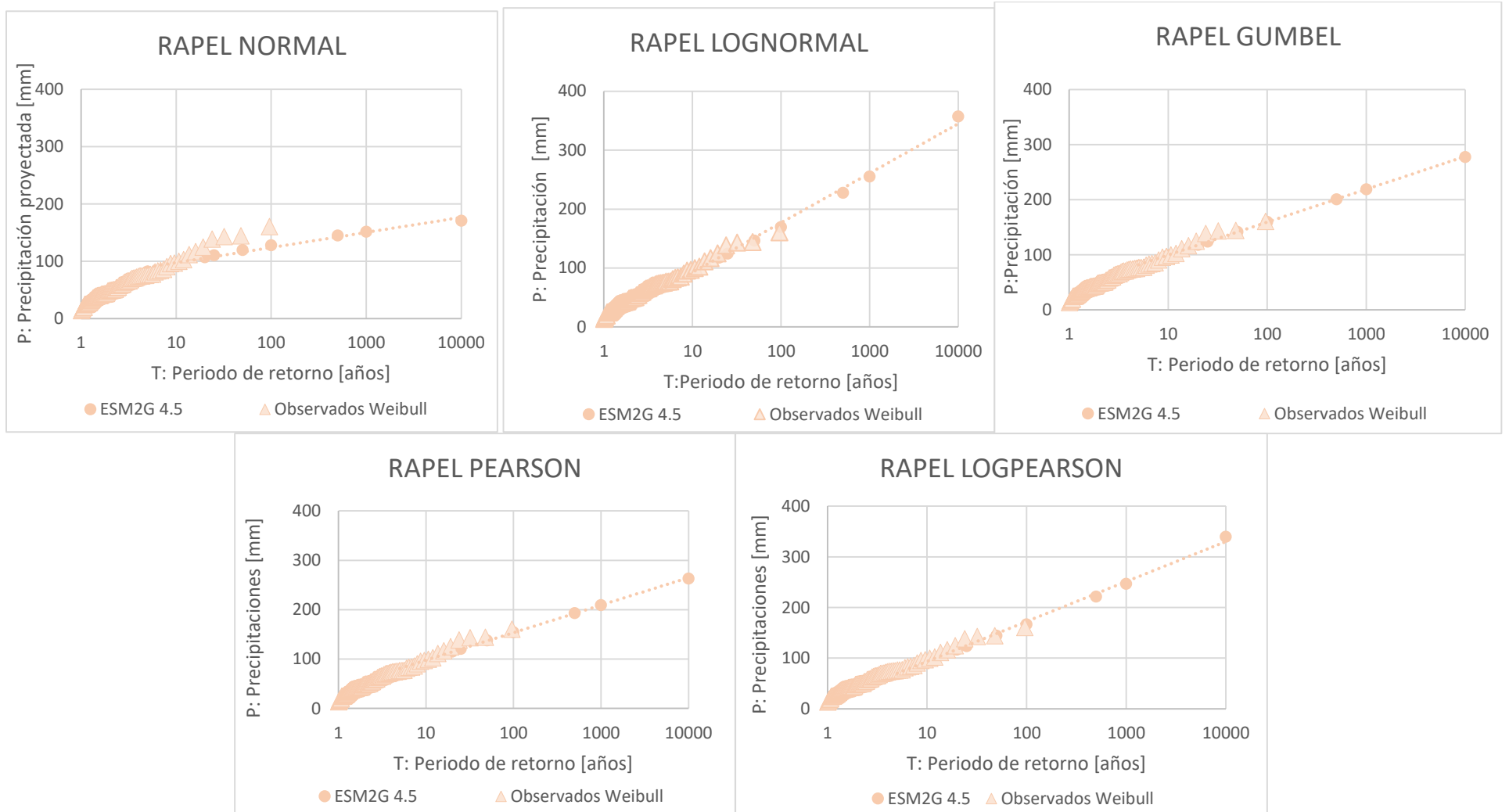


Figura F-3: Comparación entre los análisis de frecuencia de las distribuciones de probabilidad, estación Rapel DGA, proyección RCP4.5

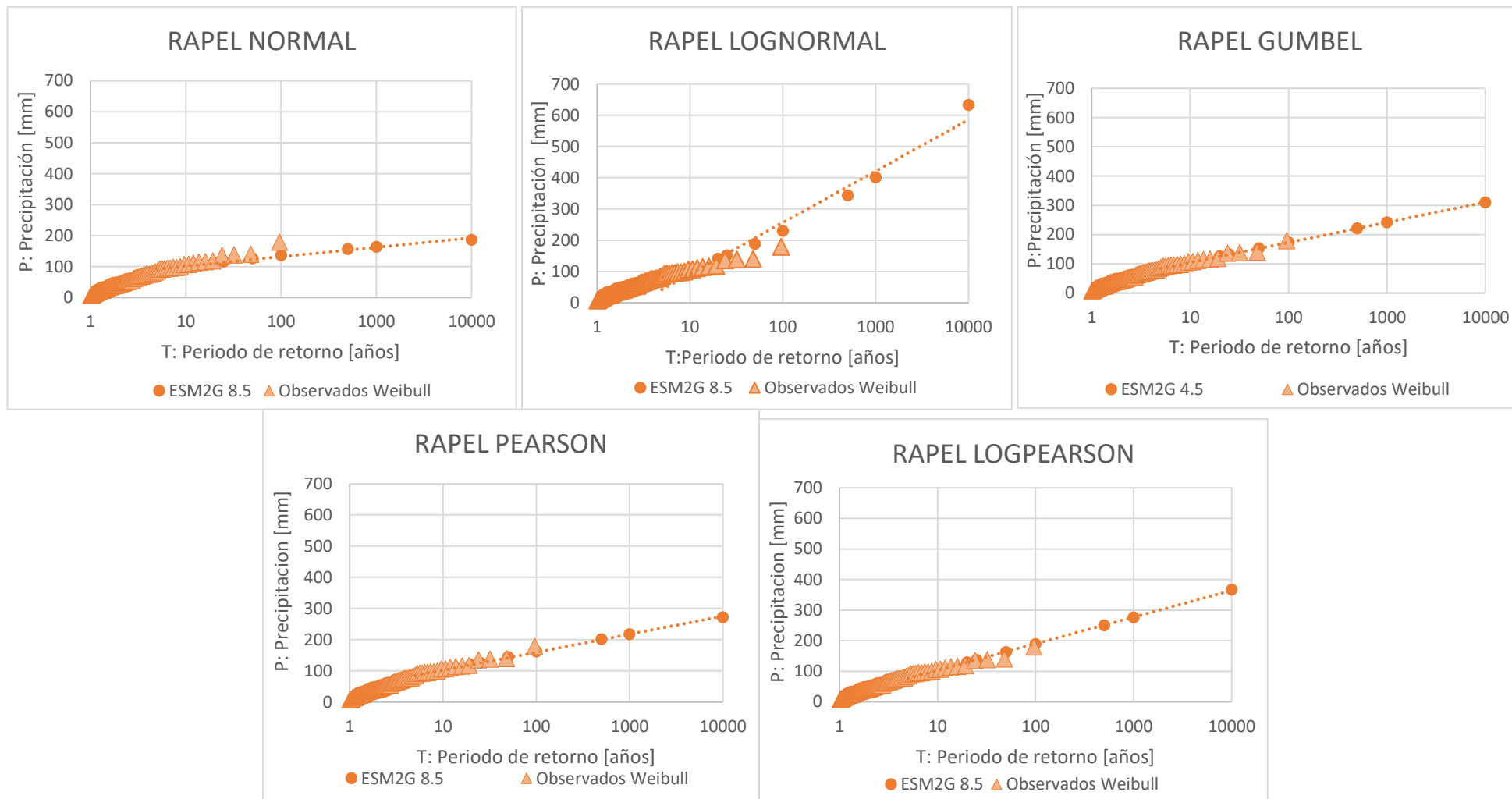


Figura F-4: Comparación entre los análisis de frecuencia de las distribuciones de probabilidad, estación Rapel DGA, proyección RCP8.5

10.6.1.4. Resumen Precipitaciones Análisis de Frecuencia

Tabla F-13: Resumen de Precipitaciones en las tres Estaciones, Modelo ESM2G en mm.

RCP	T [años]	5	10	20	25	50	100	500	1,000	10,000
4.5	Barrera Loncha	94	117	140	147	169	191	242	263	336
	Villa Alhué	94	117	140	147	169	191	242	263	336
	Rapel	80	100	118	124	142	160	201	219	278
8.5	Barrera Loncha	103	131	157	166	191	217	277	302	387
	Villa Alhué	103	131	157	166	191	217	277	302	387
	Rapel	82	104	125	132	153	173	221	242	310

10.6.2. Cuenca Salar de Michincha

10.6.2.1. Estación Ujina

10.6.2.1.1. RCP4.5

Tabla F-14: Resumen Parámetros de Análisis, Estación Ujina, Proyección ESM2G RCP4.5.

Distribución Gumbel		Kolmogorov Smirnov			χ^2		
μ	7,4	α	0,05	SE ACEPTA?	α	0,05	SE ACEPTA?
σ	4,3	$D(N,\alpha)$	0,140	SI	v	4,603	SI
N	95	$D(N,\alpha)$ -Max(D)	0,068		$\chi^2v(1-\alpha)$	10,443	
Y_m	0,559						
σ_m	1,204						

Tabla F-15: Detalle Análisis de Frecuencia con Gumbel, Estación Ujina, Proyección ESM2G RCP4.5.

Nº	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
1	0,9	0,010	-1,219	0,034	0,034	0,053
2	1,6	0,021	-1,036	0,060	0,049	0,072
3	1,7	0,031	-1,014	0,064	0,043	0,033
4	2,2	0,042	-0,874	0,091	0,060	0,059
5	2,2	0,052	-0,867	0,093	0,051	0,032
6	2,3	0,063	-0,843	0,098	0,046	0,020
7	2,5	0,073	-0,800	0,108	0,046	0,017
8	2,5	0,083	-0,790	0,111	0,038	0,009
9	2,5	0,094	-0,779	0,113	0,030	0,004
10	2,6	0,104	-0,752	0,120	0,026	0,002
11	2,6	0,115	-0,751	0,120	0,016	0,000
12	2,8	0,125	-0,713	0,130	0,016	0,000
13	2,8	0,135	-0,706	0,132	0,007	0,000
14	2,9	0,146	-0,673	0,141	0,005	0,000
15	2,9	0,156	-0,666	0,143	0,013	0,001
16	2,9	0,167	-0,665	0,143	0,023	0,003
17	3,0	0,177	-0,661	0,144	0,033	0,006
18	3,0	0,188	-0,650	0,147	0,040	0,009
19	3,1	0,198	-0,610	0,159	0,039	0,008
20	3,2	0,208	-0,596	0,163	0,045	0,010
21	3,4	0,219	-0,526	0,184	0,035	0,006
22	3,5	0,229	-0,511	0,189	0,040	0,007
23	3,7	0,240	-0,454	0,207	0,033	0,004
24	3,8	0,250	-0,432	0,214	0,036	0,005
25	3,8	0,260	-0,418	0,219	0,041	0,007
26	3,9	0,271	-0,391	0,228	0,043	0,007

N°	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
27	3,9	0,281	-0,386	0,230	0,051	0,009
28	4,1	0,292	-0,338	0,246	0,045	0,007
29	4,4	0,302	-0,248	0,278	0,024	0,002
30	4,5	0,313	-0,239	0,281	0,032	0,003
31	4,5	0,323	-0,232	0,283	0,040	0,005
32	4,5	0,333	-0,230	0,284	0,049	0,007
33	4,6	0,344	-0,200	0,295	0,049	0,007
34	4,9	0,354	-0,131	0,320	0,034	0,003
35	4,9	0,365	-0,128	0,321	0,044	0,005
36	4,9	0,375	-0,119	0,324	0,051	0,007
37	5,0	0,385	-0,096	0,332	0,053	0,007
38	5,2	0,396	-0,049	0,350	0,046	0,005
39	5,2	0,406	-0,036	0,355	0,052	0,007
40	5,2	0,417	-0,028	0,358	0,059	0,008
41	5,2	0,427	-0,024	0,359	0,068	0,011
42	5,3	0,438	-0,007	0,365	0,072	0,012
43	5,4	0,448	0,030	0,379	0,069	0,011
44	5,7	0,458	0,097	0,404	0,055	0,007
45	5,9	0,469	0,146	0,422	0,047	0,005
46	5,9	0,479	0,160	0,426	0,053	0,006
47	6,1	0,490	0,218	0,447	0,042	0,004
48	6,3	0,500	0,278	0,469	0,031	0,002
49	6,4	0,510	0,289	0,473	0,038	0,003
50	6,6	0,521	0,361	0,498	0,023	0,001
51	6,7	0,531	0,368	0,501	0,031	0,002
52	7,1	0,542	0,489	0,542	0,010	0,000
53	7,4	0,552	0,568	0,567	0,026	0,000
54	7,4	0,563	0,578	0,571	0,019	0,000
55	7,4	0,573	0,586	0,573	0,011	0,000
56	7,5	0,583	0,596	0,576	0,007	0,000
57	7,7	0,594	0,654	0,594	0,011	0,000
58	7,9	0,604	0,716	0,613	0,020	0,000
59	8,3	0,615	0,810	0,641	0,037	0,001
60	8,5	0,625	0,888	0,663	0,048	0,002
61	8,6	0,635	0,915	0,670	0,045	0,002
62	9,0	0,646	1,021	0,698	0,062	0,004
63	9,3	0,656	1,090	0,715	0,069	0,005
64	9,3	0,667	1,094	0,715	0,059	0,004
65	9,5	0,677	1,159	0,731	0,064	0,004
66	9,6	0,688	1,171	0,734	0,056	0,003
67	9,7	0,698	1,199	0,740	0,052	0,003
68	9,7	0,708	1,210	0,742	0,044	0,002
69	9,8	0,719	1,228	0,746	0,038	0,001
70	10,1	0,729	1,310	0,763	0,045	0,002
71	10,1	0,740	1,336	0,769	0,040	0,001
72	10,2	0,750	1,342	0,770	0,030	0,001
73	10,3	0,760	1,371	0,776	0,026	0,000
74	10,4	0,771	1,400	0,781	0,021	0,000
75	10,5	0,781	1,426	0,786	0,016	0,000
76	10,8	0,792	1,509	0,802	0,020	0,000
77	11,1	0,802	1,590	0,815	0,024	0,000
78	11,4	0,813	1,694	0,832	0,030	0,000
79	11,5	0,823	1,723	0,837	0,024	0,000

N°	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
80	11,7	0,833	1,777	0,844	0,021	0,000
81	12,1	0,844	1,882	0,859	0,025	0,000
82	12,8	0,854	2,065	0,881	0,037	0,001
83	13,0	0,865	2,122	0,887	0,033	0,001
84	13,0	0,875	2,135	0,888	0,024	0,000
85	13,2	0,885	2,175	0,893	0,018	0,000
86	13,7	0,896	2,332	0,907	0,022	0,000
87	13,9	0,906	2,366	0,910	0,015	0,000
88	13,9	0,917	2,377	0,911	0,005	0,000
89	14,1	0,927	2,441	0,917	0,011	0,000
90	14,1	0,938	2,441	0,917	0,021	0,000
91	16,4	0,948	3,063	0,954	0,017	0,000
92	17,4	0,958	3,346	0,965	0,017	0,000
93	17,5	0,969	3,390	0,967	0,009	0,000
94	18,0	0,979	3,517	0,971	0,008	0,000
95	19,6	0,990	3,974	0,981	0,008	0,000

10.6.2.1.2. RCP8.5

Tabla F-16: Resumen Parámetros de Análisis, Estación Ujina, Proyección ESM2G RCP8.5.

Distribución Gumbel		Kolmogorov Smirnov			χ^2		
μ	8,2	α	0,05	SE ACEPTA?	α	0,05	SE ACEPTA?
σ	5,2	$D(N,\alpha)$	0,140	SI	v	4,603	SI
N	95	$D(N,\alpha)-\text{Max}(D)$	0,056		$\chi^2v(1-\alpha)$	10,443	
Y_m	0,559						
σ_m	1,204						

Tabla F-17: Detalle Análisis de Frecuencia con Gumbel, Estación Ujina, Proyección ESM2G RCP8.5.

N°	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
1	1,1	0,010	-1,104	0,049	0,049	0,143
2	1,5	0,021	-1,013	0,064	0,053	0,088
3	1,5	0,031	-1,002	0,066	0,045	0,038
4	1,6	0,042	-0,995	0,067	0,036	0,015
5	1,7	0,052	-0,961	0,073	0,031	0,009
6	1,9	0,063	-0,924	0,080	0,028	0,005
7	2,0	0,073	-0,893	0,087	0,025	0,003
8	2,1	0,083	-0,867	0,092	0,020	0,001
9	2,3	0,094	-0,822	0,103	0,019	0,001
10	2,3	0,104	-0,821	0,103	0,009	0,000
11	2,3	0,115	-0,820	0,103	0,011	0,001
12	2,6	0,125	-0,749	0,121	0,006	0,000
13	2,7	0,135	-0,726	0,127	0,009	0,001
14	2,8	0,146	-0,716	0,129	0,017	0,002
15	2,8	0,156	-0,706	0,132	0,024	0,004
16	3,2	0,167	-0,616	0,157	0,010	0,001
17	3,4	0,177	-0,563	0,173	0,006	0,000
18	3,5	0,188	-0,548	0,177	0,010	0,001
19	3,5	0,198	-0,545	0,178	0,020	0,002
20	3,5	0,208	-0,540	0,180	0,029	0,004
21	3,6	0,219	-0,510	0,189	0,030	0,004
22	3,9	0,229	-0,459	0,205	0,024	0,002

N°	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
23	4,0	0,240	-0,437	0,213	0,027	0,003
24	4,0	0,250	-0,435	0,213	0,037	0,005
25	4,0	0,260	-0,433	0,214	0,046	0,008
26	4,2	0,271	-0,373	0,234	0,037	0,005
27	4,3	0,281	-0,352	0,241	0,040	0,006
28	4,4	0,292	-0,332	0,248	0,043	0,006
29	4,5	0,302	-0,317	0,253	0,049	0,008
30	4,5	0,313	-0,314	0,254	0,058	0,011
31	4,7	0,323	-0,256	0,275	0,048	0,007
32	4,9	0,333	-0,214	0,290	0,044	0,006
33	5,1	0,344	-0,170	0,306	0,038	0,004
34	5,1	0,354	-0,166	0,307	0,047	0,006
35	5,3	0,365	-0,134	0,319	0,046	0,006
36	5,4	0,375	-0,093	0,334	0,041	0,005
37	5,5	0,385	-0,077	0,340	0,046	0,005
38	5,6	0,396	-0,053	0,349	0,047	0,006
39	5,8	0,406	-0,020	0,361	0,046	0,005
40	6,1	0,417	0,053	0,387	0,029	0,002
41	6,1	0,427	0,060	0,390	0,037	0,003
42	6,3	0,438	0,106	0,407	0,031	0,002
43	6,4	0,448	0,125	0,414	0,034	0,003
44	6,5	0,458	0,151	0,423	0,035	0,003
45	6,6	0,469	0,172	0,431	0,038	0,003
46	6,6	0,479	0,186	0,436	0,043	0,004
47	6,7	0,490	0,207	0,444	0,046	0,004
48	6,8	0,500	0,223	0,449	0,051	0,005
49	6,9	0,510	0,238	0,455	0,056	0,006
50	6,9	0,521	0,242	0,456	0,065	0,008
51	6,9	0,531	0,244	0,457	0,075	0,010
52	7,6	0,542	0,409	0,515	0,027	0,001
53	7,6	0,552	0,416	0,517	0,035	0,002
54	8,0	0,563	0,509	0,548	0,014	0,000
55	8,5	0,573	0,615	0,582	0,020	0,000
56	8,9	0,583	0,711	0,612	0,039	0,001
57	8,9	0,594	0,713	0,613	0,029	0,001
58	9,3	0,604	0,814	0,642	0,048	0,002
59	9,4	0,615	0,818	0,643	0,039	0,001
60	9,4	0,625	0,827	0,646	0,031	0,001
61	9,6	0,635	0,874	0,659	0,034	0,001
62	9,8	0,646	0,918	0,671	0,035	0,001
63	10,0	0,656	0,956	0,681	0,035	0,001
64	10,0	0,667	0,961	0,682	0,026	0,000
65	10,1	0,677	0,993	0,691	0,024	0,000
66	10,3	0,688	1,036	0,701	0,024	0,000
67	10,3	0,698	1,047	0,704	0,017	0,000
68	10,9	0,708	1,170	0,733	0,035	0,001
69	11,9	0,719	1,415	0,784	0,076	0,006
70	12,1	0,729	1,458	0,792	0,074	0,005
71	12,6	0,740	1,573	0,813	0,084	0,007
72	12,7	0,750	1,588	0,815	0,076	0,006
73	12,7	0,760	1,601	0,817	0,067	0,004
74	13,0	0,771	1,670	0,828	0,068	0,004
75	13,1	0,781	1,699	0,833	0,062	0,003

N°	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
76	13,3	0,792	1,731	0,838	0,057	0,003
77	13,3	0,802	1,740	0,839	0,047	0,002
78	13,3	0,813	1,745	0,840	0,038	0,001
79	13,5	0,823	1,782	0,845	0,033	0,001
80	13,5	0,833	1,792	0,847	0,024	0,000
81	13,6	0,844	1,802	0,848	0,015	0,000
82	13,7	0,854	1,826	0,851	0,008	0,000
83	14,2	0,865	1,945	0,867	0,013	0,000
84	14,4	0,875	1,997	0,873	0,008	0,000
85	14,5	0,885	2,008	0,874	0,011	0,000
86	14,7	0,896	2,066	0,881	0,015	0,000
87	15,9	0,906	2,331	0,907	0,012	0,000
88	16,4	0,917	2,456	0,918	0,012	0,000
89	16,7	0,927	2,520	0,923	0,006	0,000
90	17,8	0,938	2,770	0,939	0,012	0,000
91	18,8	0,948	3,012	0,952	0,015	0,000
92	19,7	0,958	3,232	0,961	0,013	0,000
93	20,2	0,969	3,347	0,965	0,007	0,000
94	20,9	0,979	3,490	0,970	0,009	0,000
95	22,3	0,990	3,816	0,978	0,011	0,000

10.6.2.1.3. Análisis gráfico

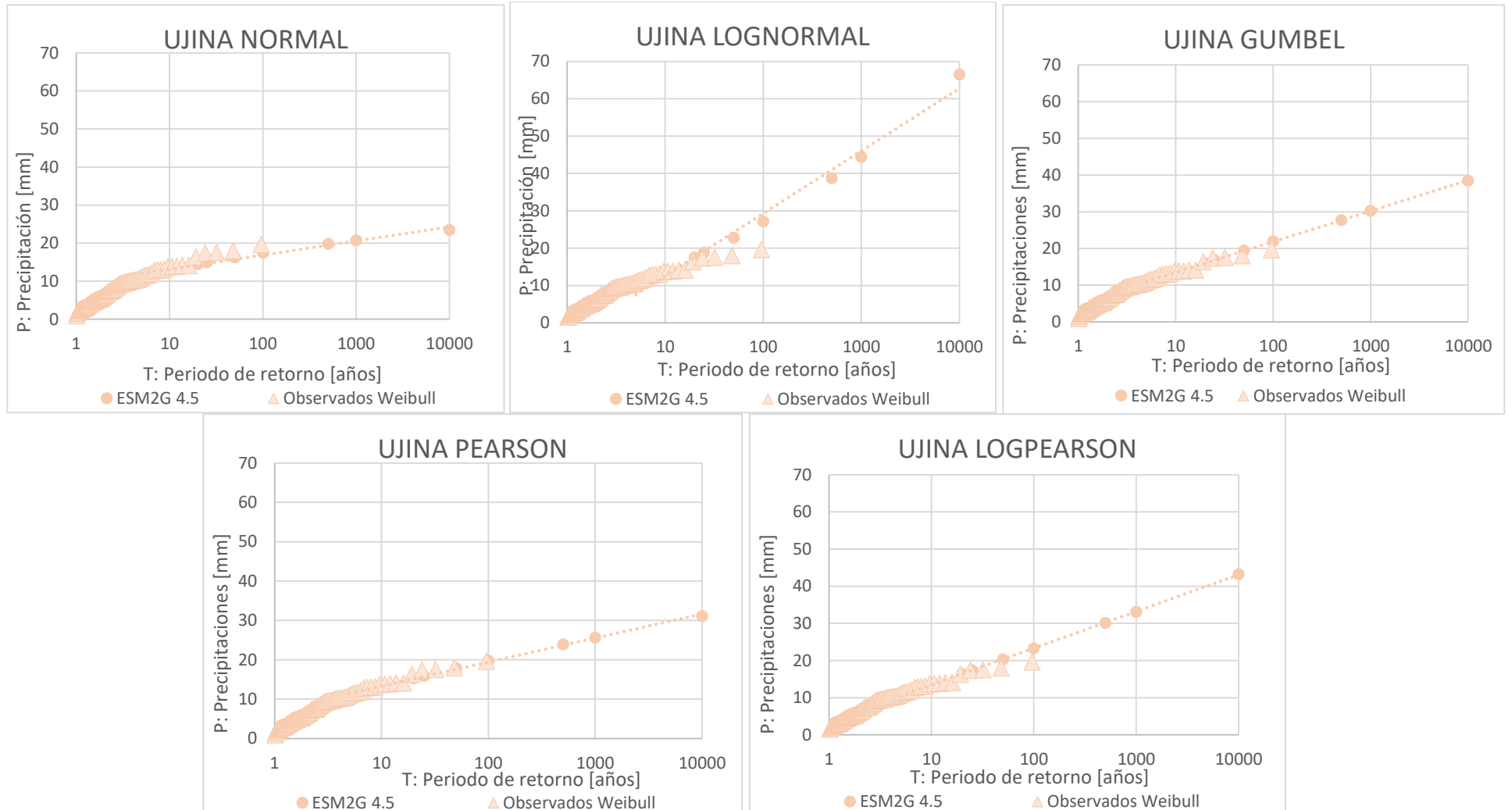


Figura F-5: Comparación entre los análisis de frecuencia de las distribuciones de probabilidad, estación Ujina DGA, proyección RCP4.5

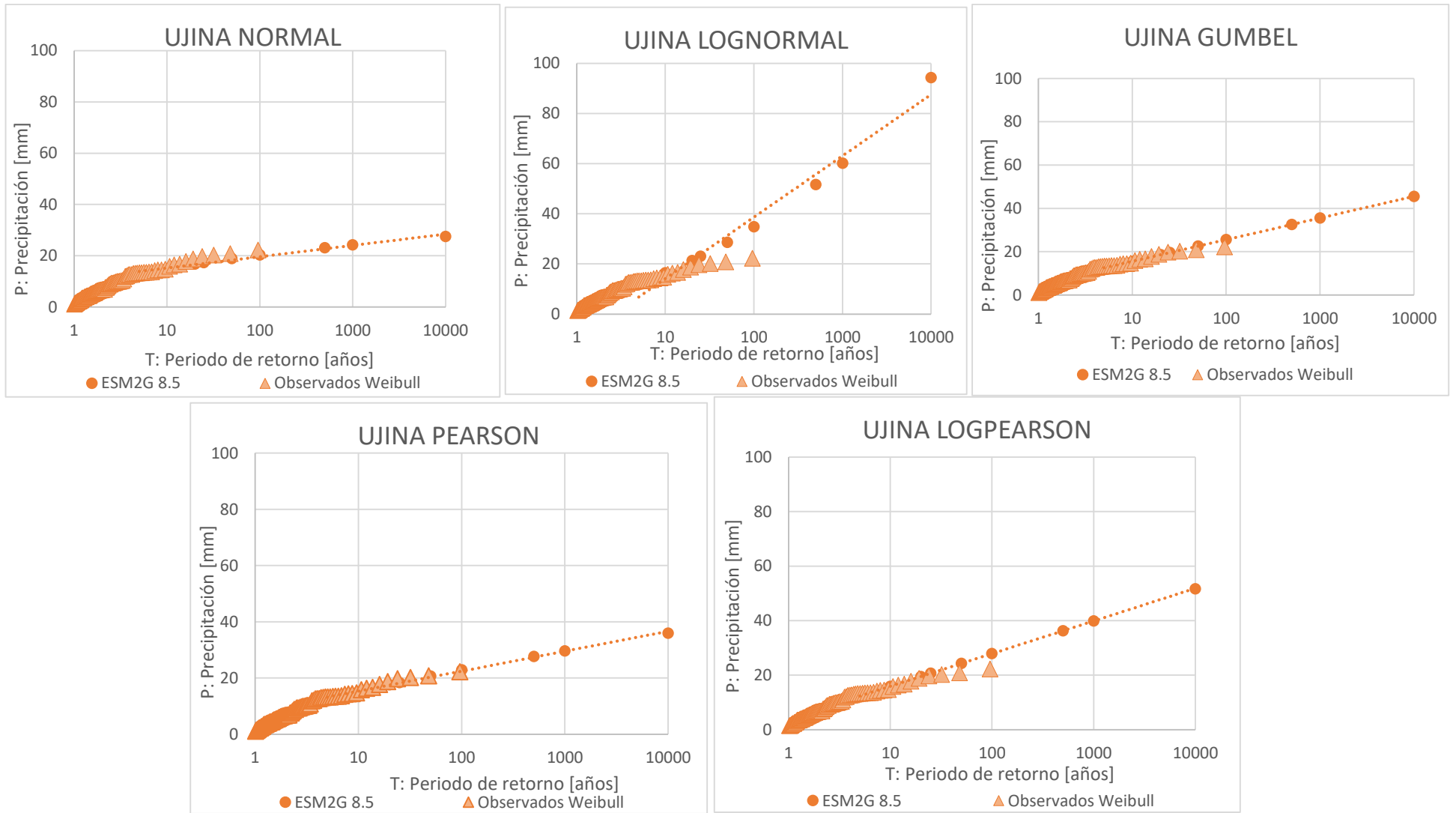


Figura F-6: Comparación entre los análisis de frecuencia de las distribuciones de probabilidad, estación Ujina DGA, proyección RCP8.5

10.6.2.2. Resumen Precipitaciones Análisis de Frecuencia

Tabla F-18: Resumen de Precipitaciones en la Estación Ujina, Modelo ESM2G en mm.

RCP	T [años]	5	10	20	25	50	100	500	1,000	10,000
4,5	Ujina	11	13	16	17	19	22	28	30	39
8,5		12	16	19	20	23	26	33	36	45

10.6.3. Cuenca Estero Pupío

10.6.3.1. Estación Caimanes

10.6.3.1.1. RCP4.5

Tabla F-19: Resumen Parámetros de Análisis, Estación Caimanes, Proyección ESM2M RCP4.5.

Distribución Gumbel		Kolmogorov Smirnov			χ^2		
μ	36,4	α	0,05	SE ACEPTA?	α	0,05	SE ACEPTA?
σ	29,7	D(N, α)	0,140	NO	v	4,603	SI
N	95	D(N, α)-Max(D)	-0,010		$\chi^2_{v(1-\alpha)}$	10,443	
Ym	0,559						
σ_m	1,204						

Tabla F-20: Detalle Análisis de Frecuencia con Gumbel, Estación Caimanes, Proyección ESM2M RCP4.5.

Nº	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
1	6,8	0,010	-0,642	0,150	0,150	1,858
2	7,6	0,021	-0,607	0,160	0,149	0,926
3	8,2	0,031	-0,583	0,167	0,146	0,588
4	8,4	0,042	-0,577	0,168	0,137	0,386
5	8,7	0,052	-0,565	0,172	0,131	0,277
6	8,9	0,063	-0,555	0,175	0,123	0,203
7	10,3	0,073	-0,499	0,193	0,130	0,197
8	11,3	0,083	-0,459	0,205	0,133	0,179
9	11,3	0,094	-0,459	0,206	0,122	0,133
10	11,5	0,104	-0,452	0,208	0,114	0,103
11	11,8	0,115	-0,438	0,212	0,108	0,083
12	12,0	0,125	-0,430	0,215	0,100	0,065
13	12,1	0,135	-0,428	0,216	0,091	0,047
14	12,1	0,146	-0,427	0,216	0,080	0,034
15	12,2	0,156	-0,422	0,218	0,072	0,024
16	12,3	0,167	-0,419	0,219	0,062	0,016
17	12,4	0,177	-0,415	0,220	0,053	0,010
18	12,4	0,188	-0,415	0,220	0,043	0,006
19	13,1	0,198	-0,386	0,230	0,042	0,005
20	13,7	0,208	-0,361	0,238	0,040	0,004
21	14,3	0,219	-0,336	0,247	0,039	0,004
22	14,9	0,229	-0,311	0,255	0,037	0,003
23	15,0	0,240	-0,310	0,256	0,027	0,001
24	15,2	0,250	-0,300	0,259	0,020	0,000
25	15,6	0,260	-0,285	0,264	0,014	0,000
26	15,9	0,271	-0,273	0,269	0,008	0,000
27	16,4	0,281	-0,250	0,277	0,006	0,000
28	16,6	0,292	-0,245	0,279	0,013	0,001
29	16,9	0,302	-0,231	0,284	0,018	0,001

N°	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
30	17,1	0,313	-0,222	0,287	0,026	0,002
31	17,2	0,323	-0,221	0,287	0,036	0,004
32	17,3	0,333	-0,217	0,289	0,045	0,006
33	17,4	0,344	-0,213	0,290	0,054	0,008
34	18,5	0,354	-0,168	0,306	0,048	0,006
35	18,5	0,365	-0,168	0,306	0,058	0,009
36	19,2	0,375	-0,137	0,318	0,057	0,009
37	20,7	0,385	-0,078	0,339	0,046	0,006
38	22,0	0,396	-0,025	0,359	0,037	0,003
39	22,3	0,406	-0,011	0,364	0,043	0,004
40	22,5	0,417	-0,004	0,366	0,050	0,006
41	23,0	0,427	0,015	0,373	0,054	0,007
42	23,5	0,438	0,035	0,381	0,057	0,007
43	23,8	0,448	0,047	0,385	0,063	0,009
44	24,0	0,458	0,055	0,388	0,070	0,011
45	24,2	0,469	0,062	0,391	0,078	0,013
46	24,8	0,479	0,088	0,400	0,079	0,013
47	24,9	0,490	0,092	0,402	0,088	0,016
48	25,6	0,500	0,120	0,412	0,088	0,015
49	26,1	0,510	0,142	0,420	0,090	0,016
50	27,7	0,521	0,204	0,443	0,078	0,012
51	28,5	0,531	0,237	0,454	0,077	0,011
52	28,5	0,542	0,238	0,455	0,087	0,014
53	28,8	0,552	0,250	0,459	0,093	0,016
54	29,0	0,563	0,259	0,462	0,100	0,018
55	30,1	0,573	0,303	0,478	0,095	0,016
56	30,6	0,583	0,322	0,484	0,099	0,017
57	33,3	0,594	0,434	0,523	0,071	0,008
58	33,7	0,604	0,449	0,528	0,076	0,010
59	34,0	0,615	0,461	0,532	0,082	0,011
60	34,9	0,625	0,499	0,545	0,080	0,010
61	36,0	0,635	0,544	0,560	0,076	0,009
62	36,9	0,646	0,577	0,570	0,075	0,009
63	38,3	0,656	0,635	0,589	0,068	0,007
64	39,0	0,667	0,663	0,597	0,069	0,007
65	42,3	0,677	0,796	0,637	0,040	0,002
66	43,2	0,688	0,835	0,648	0,039	0,002
67	43,2	0,698	0,836	0,648	0,050	0,004
68	43,3	0,708	0,837	0,649	0,060	0,005
69	43,7	0,719	0,855	0,653	0,065	0,006
70	44,0	0,729	0,867	0,657	0,072	0,007
71	46,6	0,740	0,974	0,685	0,054	0,004
72	48,0	0,750	1,030	0,700	0,050	0,003
73	48,6	0,760	1,051	0,705	0,055	0,004
74	49,0	0,771	1,070	0,710	0,061	0,005
75	49,2	0,781	1,079	0,712	0,069	0,006
76	50,5	0,792	1,132	0,724	0,067	0,006
77	51,7	0,802	1,180	0,735	0,067	0,006
78	54,5	0,813	1,290	0,759	0,053	0,003
79	54,9	0,823	1,308	0,763	0,060	0,004
80	55,9	0,833	1,351	0,772	0,062	0,005
81	59,5	0,844	1,495	0,799	0,045	0,002
82	65,4	0,854	1,735	0,838	0,016	0,000

Nº	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
83	70,4	0,865	1,938	0,866	0,012	0,000
84	74,4	0,875	2,099	0,885	0,020	0,000
85	77,3	0,885	2,217	0,897	0,022	0,000
86	80,8	0,896	2,358	0,910	0,024	0,000
87	82,9	0,906	2,443	0,917	0,021	0,000
88	86,9	0,917	2,605	0,929	0,022	0,000
89	95,6	0,927	2,957	0,949	0,033	0,001
90	103,7	0,938	3,287	0,963	0,036	0,001
91	107,7	0,948	3,449	0,969	0,031	0,000
92	116,2	0,958	3,794	0,978	0,030	0,000
93	120,3	0,969	3,961	0,981	0,023	0,000
94	129,6	0,979	4,337	0,987	0,018	0,000
95	140,6	0,990	4,783	0,992	0,012	0,000

10.6.3.1.2. RCP8.5

Tabla F-21: Resumen Parámetros de Análisis, Estación Caimanes, Proyección ESM2M RCP8.5.

Distribución Gumbel		Kolmogorov Smirnov			χ^2		
μ	31,3	α	0,05	SE ACEPTA?	α	0,05	SE ACEPTA?
σ	24,3	D(N, α)	0,140	SI	v	4,603	SI
N	95	D(N, α)-Max(D)	0,035		$\chi^2_{v(1-\alpha)}$	10,443	
Ym	0,559						
σ_m	1,204						

Tabla F-22: Detalle Análisis de Frecuencia con Gumbel, Estación Caimanes, Proyección ESM2M RCP8.5.

Nº	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
1	2,4	0,010	-0,875	0,091	0,091	0,622
2	4,5	0,021	-0,771	0,115	0,105	0,428
3	4,9	0,031	-0,752	0,120	0,099	0,251
4	5,5	0,042	-0,721	0,128	0,097	0,179
5	6,1	0,052	-0,691	0,136	0,094	0,135
6	6,2	0,063	-0,688	0,137	0,085	0,088
7	6,2	0,073	-0,687	0,137	0,075	0,056
8	6,4	0,083	-0,678	0,140	0,067	0,038
9	6,8	0,094	-0,654	0,146	0,063	0,029
10	8,0	0,104	-0,595	0,163	0,070	0,034
11	8,1	0,115	-0,590	0,164	0,060	0,022
12	8,4	0,125	-0,576	0,169	0,054	0,015
13	8,6	0,135	-0,564	0,172	0,047	0,010
14	9,7	0,146	-0,510	0,189	0,054	0,013
15	9,9	0,156	-0,502	0,192	0,046	0,008
16	10,2	0,167	-0,490	0,196	0,039	0,005
17	10,5	0,177	-0,472	0,201	0,035	0,003
18	11,9	0,188	-0,402	0,224	0,047	0,007
19	12,0	0,198	-0,398	0,226	0,038	0,004
20	12,1	0,208	-0,393	0,227	0,029	0,002
21	12,2	0,219	-0,388	0,229	0,021	0,000
22	12,3	0,229	-0,386	0,230	0,011	0,000
23	12,3	0,240	-0,382	0,231	0,009	0,000
24	13,4	0,250	-0,330	0,249	0,009	0,000
25	14,1	0,260	-0,296	0,261	0,011	0,000

Nº	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
26	15,0	0,271	-0,249	0,277	0,017	0,000
27	15,5	0,281	-0,225	0,286	0,015	0,000
28	17,2	0,292	-0,138	0,317	0,036	0,002
29	17,4	0,302	-0,130	0,320	0,028	0,001
30	17,5	0,313	-0,126	0,322	0,019	0,000
31	17,7	0,323	-0,117	0,325	0,012	0,000
32	18,1	0,333	-0,096	0,333	0,010	0,000
33	18,1	0,344	-0,094	0,333	0,010	0,000
34	18,3	0,354	-0,083	0,337	0,017	0,001
35	18,6	0,365	-0,069	0,342	0,022	0,001
36	19,0	0,375	-0,053	0,348	0,027	0,002
37	19,3	0,385	-0,038	0,354	0,032	0,003
38	20,0	0,396	0,001	0,368	0,028	0,002
39	20,4	0,406	0,019	0,375	0,031	0,002
40	20,4	0,417	0,020	0,375	0,041	0,004
41	20,5	0,427	0,021	0,376	0,051	0,006
42	21,2	0,438	0,059	0,390	0,048	0,005
43	21,4	0,448	0,067	0,393	0,055	0,007
44	21,6	0,458	0,080	0,397	0,061	0,008
45	22,0	0,469	0,097	0,404	0,065	0,009
46	22,1	0,479	0,103	0,406	0,074	0,011
47	22,4	0,490	0,115	0,410	0,079	0,013
48	22,5	0,500	0,121	0,412	0,088	0,015
49	23,8	0,510	0,186	0,436	0,074	0,011
50	24,2	0,521	0,206	0,443	0,078	0,012
51	24,4	0,531	0,216	0,447	0,084	0,013
52	25,0	0,542	0,247	0,458	0,084	0,013
53	25,4	0,552	0,267	0,465	0,087	0,014
54	25,8	0,563	0,285	0,471	0,091	0,015
55	28,8	0,573	0,435	0,524	0,049	0,004
56	29,5	0,583	0,472	0,536	0,047	0,004
57	29,7	0,594	0,479	0,538	0,056	0,005
58	30,9	0,604	0,541	0,559	0,046	0,003
59	31,1	0,615	0,547	0,561	0,054	0,005
60	31,4	0,625	0,562	0,565	0,060	0,006
61	33,8	0,635	0,682	0,603	0,032	0,002
62	33,8	0,646	0,685	0,604	0,042	0,003
63	34,4	0,656	0,715	0,613	0,043	0,003
64	36,1	0,667	0,796	0,637	0,030	0,001
65	36,8	0,677	0,831	0,647	0,030	0,001
66	37,2	0,688	0,853	0,653	0,035	0,002
67	37,8	0,698	0,881	0,661	0,037	0,002
68	37,9	0,708	0,884	0,662	0,047	0,003
69	38,1	0,719	0,896	0,665	0,054	0,004
70	40,9	0,729	1,035	0,701	0,028	0,001
71	43,7	0,740	1,176	0,735	0,005	0,000
72	44,9	0,750	1,235	0,748	0,008	0,000
73	45,1	0,760	1,242	0,749	0,011	0,000
74	45,5	0,771	1,264	0,754	0,017	0,000
75	48,3	0,781	1,403	0,782	0,011	0,000
76	49,2	0,792	1,449	0,791	0,009	0,000
77	50,0	0,802	1,486	0,798	0,006	0,000
78	51,6	0,813	1,565	0,811	0,009	0,000

Nº	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
79	52,1	0,823	1,593	0,816	0,007	0,000
80	53,3	0,833	1,650	0,825	0,008	0,000
81	53,6	0,844	1,667	0,828	0,016	0,000
82	56,5	0,854	1,809	0,849	0,005	0,000
83	56,6	0,865	1,814	0,850	0,015	0,000
84	57,2	0,875	1,845	0,854	0,021	0,001
85	62,5	0,885	2,105	0,885	0,010	0,000
86	63,0	0,896	2,131	0,888	0,008	0,000
87	67,4	0,906	2,347	0,909	0,013	0,000
88	68,6	0,917	2,409	0,914	0,008	0,000
89	68,8	0,927	2,420	0,915	0,012	0,000
90	72,9	0,938	2,624	0,930	0,007	0,000
91	74,0	0,948	2,675	0,933	0,014	0,000
92	84,2	0,958	3,182	0,959	0,011	0,000
93	94,0	0,969	3,669	0,975	0,016	0,000
94	114,9	0,979	4,708	0,991	0,022	0,000
95	130,2	0,990	5,467	0,996	0,017	0,000

10.6.3.1.3. Análisis gráfico

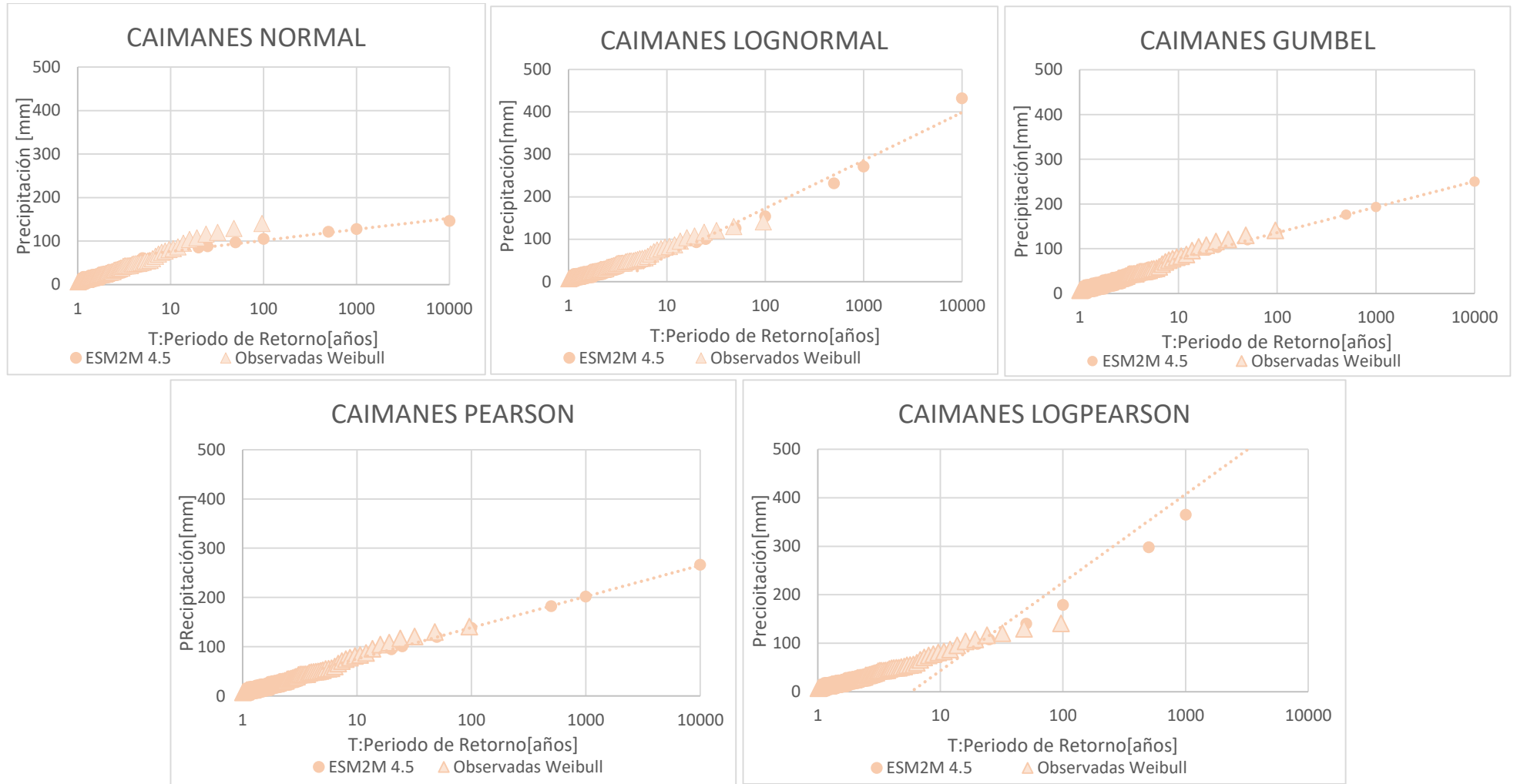


Figura F-7: Comparación entre los análisis de frecuencia de las distribuciones de probabilidad, estación Caimanes DGA, proyección RCP 4.5

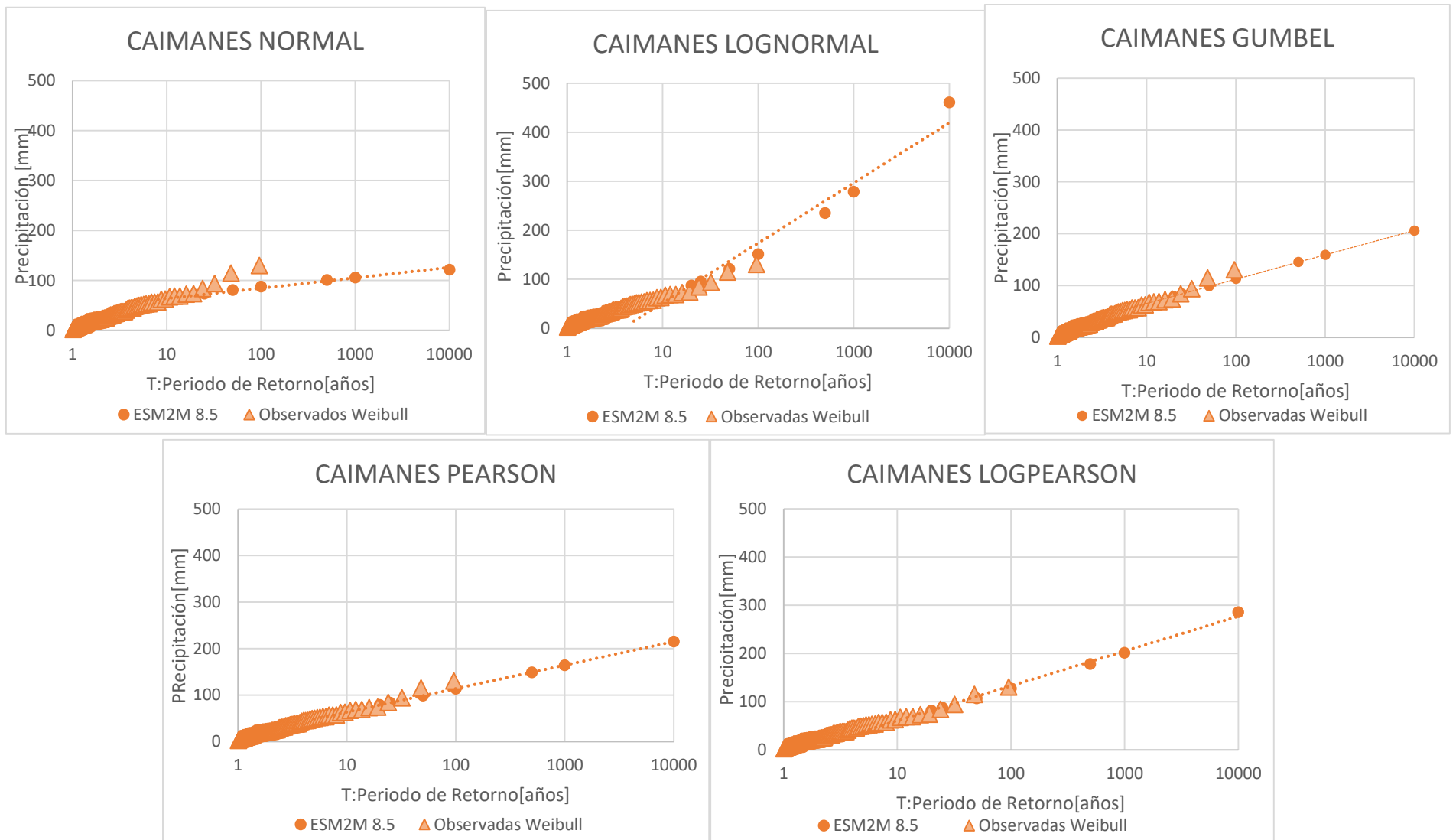


Figura F-8: Comparación entre los análisis de frecuencia de las distribuciones de probabilidad, estación Caimanes DGA, proyección RCP 8.5

10.6.3.2. *Estación Culimo*

10.6.3.2.1. RCP4.5

Tabla F-23: Resumen Parámetros de Análisis, Estación Culimo, Proyección ESM2M RCP4.5.

Distribución Gumbel		Kolmogorov Smirnov			χ^2		
μ	47,1	α	0,05	SE ACEPTA?	α	0,05	SE ACEPTA?
σ	37,1	D(N, α)	0,140	SI	v	4,603	SI
N	95	D(N, α)-Max(D)	0,017		$\chi^2_{v(1-\alpha)}$	10,443	
Ym	0,559						
σ_m	1,204						

Tabla F-24: Detalle Análisis de Frecuencia con Gumbel, Estación Culimo, Proyección ESM2M RCP4.5.

Nº	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
1	6,0	0,010	-0,772	0,115	0,115	1,045
2	8,2	0,021	-0,703	0,133	0,122	0,601
3	8,3	0,031	-0,699	0,134	0,113	0,336
4	8,4	0,042	-0,695	0,135	0,104	0,208
5	8,6	0,052	-0,689	0,136	0,095	0,137
6	9,3	0,063	-0,666	0,143	0,091	0,103
7	9,6	0,073	-0,658	0,145	0,082	0,071
8	13,0	0,083	-0,548	0,177	0,104	0,106
9	13,4	0,094	-0,534	0,181	0,098	0,082
10	14,5	0,104	-0,497	0,193	0,100	0,076
11	15,8	0,115	-0,456	0,207	0,102	0,074
12	16,4	0,125	-0,435	0,213	0,099	0,062
13	16,6	0,135	-0,431	0,215	0,090	0,046
14	16,7	0,146	-0,427	0,216	0,081	0,034
15	16,7	0,156	-0,426	0,216	0,070	0,023
16	18,0	0,167	-0,383	0,231	0,074	0,024
17	18,0	0,177	-0,383	0,231	0,064	0,016
18	20,4	0,188	-0,306	0,257	0,080	0,026
19	21,6	0,198	-0,269	0,270	0,083	0,026
20	21,9	0,208	-0,260	0,273	0,076	0,020
21	22,4	0,219	-0,242	0,280	0,072	0,017
22	23,4	0,229	-0,210	0,291	0,072	0,017
23	24,2	0,240	-0,183	0,301	0,072	0,016
24	24,6	0,250	-0,169	0,306	0,066	0,013
25	24,7	0,260	-0,168	0,306	0,056	0,008
26	24,9	0,271	-0,161	0,309	0,049	0,005
27	25,2	0,281	-0,153	0,312	0,041	0,003
28	25,8	0,292	-0,130	0,320	0,039	0,003
29	26,3	0,302	-0,115	0,326	0,034	0,002
30	26,5	0,313	-0,109	0,328	0,026	0,001
31	27,4	0,323	-0,081	0,338	0,026	0,001
32	28,5	0,333	-0,043	0,352	0,029	0,001
33	28,5	0,344	-0,043	0,352	0,019	0,000
34	29,7	0,354	-0,005	0,366	0,022	0,000
35	30,2	0,365	0,012	0,372	0,018	0,000
36	31,3	0,375	0,045	0,385	0,020	0,000
37	31,5	0,385	0,053	0,387	0,012	0,000
38	31,6	0,396	0,057	0,389	0,007	0,000
39	32,6	0,406	0,088	0,400	0,006	0,000
40	34,3	0,417	0,145	0,421	0,015	0,000

N°	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
41	35,2	0,427	0,173	0,431	0,014	0,000
42	35,5	0,438	0,182	0,435	0,008	0,000
43	37,7	0,448	0,254	0,460	0,023	0,000
44	37,7	0,458	0,255	0,461	0,013	0,000
45	37,8	0,469	0,257	0,461	0,007	0,000
46	38,5	0,479	0,279	0,469	0,010	0,000
47	38,5	0,490	0,280	0,470	0,020	0,001
48	39,1	0,500	0,298	0,476	0,024	0,001
49	39,5	0,510	0,312	0,481	0,030	0,002
50	39,8	0,521	0,320	0,484	0,037	0,003
51	40,0	0,531	0,328	0,487	0,045	0,004
52	40,8	0,542	0,353	0,495	0,046	0,004
53	41,4	0,552	0,373	0,502	0,050	0,004
54	42,8	0,563	0,419	0,518	0,045	0,004
55	43,1	0,573	0,428	0,521	0,052	0,005
56	43,3	0,583	0,434	0,523	0,060	0,006
57	44,2	0,594	0,463	0,533	0,061	0,006
58	44,4	0,604	0,472	0,536	0,068	0,008
59	45,0	0,615	0,491	0,542	0,072	0,009
60	45,2	0,625	0,498	0,545	0,080	0,010
61	46,8	0,635	0,549	0,561	0,074	0,009
62	47,0	0,646	0,554	0,563	0,083	0,011
63	47,5	0,656	0,571	0,568	0,088	0,012
64	48,6	0,667	0,608	0,580	0,087	0,011
65	50,3	0,677	0,663	0,597	0,080	0,009
66	51,1	0,688	0,688	0,605	0,082	0,010
67	51,2	0,698	0,691	0,606	0,092	0,012
68	51,7	0,708	0,706	0,610	0,098	0,014
69	51,8	0,719	0,709	0,611	0,107	0,016
70	52,1	0,729	0,721	0,615	0,114	0,018
71	54,8	0,740	0,810	0,641	0,099	0,013
72	55,3	0,750	0,823	0,645	0,105	0,015
73	56,2	0,760	0,852	0,653	0,108	0,015
74	57,7	0,771	0,903	0,667	0,104	0,014
75	59,1	0,781	0,946	0,678	0,103	0,014
76	59,7	0,792	0,966	0,684	0,108	0,015
77	61,3	0,802	1,018	0,697	0,105	0,014
78	61,8	0,813	1,034	0,701	0,112	0,015
79	62,9	0,823	1,069	0,709	0,113	0,016
80	67,6	0,833	1,223	0,745	0,088	0,009
81	72,9	0,844	1,394	0,780	0,063	0,005
82	75,7	0,854	1,486	0,797	0,057	0,004
83	79,0	0,865	1,593	0,816	0,048	0,003
84	97,0	0,875	2,175	0,893	0,028	0,000
85	99,0	0,885	2,242	0,899	0,024	0,000
86	99,1	0,896	2,245	0,899	0,014	0,000
87	103,5	0,906	2,388	0,912	0,016	0,000
88	107,0	0,917	2,499	0,921	0,015	0,000
89	110,1	0,927	2,601	0,929	0,012	0,000
90	111,4	0,938	2,643	0,931	0,006	0,000
91	115,0	0,948	2,759	0,939	0,009	0,000
92	115,0	0,958	2,759	0,939	0,020	0,000
93	136,9	0,969	3,470	0,969	0,011	0,000

Nº	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
94	174,3	0,979	4,683	0,991	0,022	0,000
95	242,0	0,990	6,875	0,999	0,020	0,000

10.6.3.2.2. RCP8.5

Tabla F-25: Resumen Parámetros de Análisis, Estación Culimo, Proyección ESM2M RCP8.5.

Distribución Gumbel		Kolmogorov Smirnov			χ^2		
μ	48,8	α	0,05	SE ACEPTA?	α	0,05	SE ACEPTA?
σ	38,2	D(N, α)	0,140	SI	v	4,603	SI
N	95	D(N, α)-Max(D)	0,028		$\chi^2v(1-\alpha)$	10,443	
Ym	0,559						
σm	1,204						

Tabla F-26: Detalle Análisis de Frecuencia con Gumbel, Estación Culimo, Proyección ESM2M RCP8.5.

Nº	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
1	6,1	0,010	-0,786	0,111	0,111	0,979
2	6,6	0,021	-0,770	0,115	0,105	0,428
3	6,7	0,031	-0,767	0,116	0,095	0,230
4	7,5	0,042	-0,743	0,122	0,091	0,156
5	7,7	0,052	-0,735	0,124	0,083	0,100
6	7,8	0,063	-0,731	0,125	0,073	0,063
7	11,3	0,073	-0,623	0,155	0,092	0,092
8	11,4	0,083	-0,618	0,156	0,083	0,064
9	11,9	0,094	-0,604	0,160	0,077	0,047
10	12,3	0,104	-0,591	0,164	0,071	0,035
11	13,2	0,115	-0,563	0,173	0,068	0,029
12	13,5	0,125	-0,551	0,176	0,062	0,021
13	14,4	0,135	-0,525	0,185	0,060	0,018
14	14,6	0,146	-0,517	0,187	0,052	0,012
15	15,5	0,156	-0,491	0,195	0,049	0,010
16	15,8	0,167	-0,479	0,199	0,043	0,006
17	16,0	0,177	-0,474	0,200	0,034	0,003
18	16,5	0,188	-0,458	0,206	0,029	0,002
19	18,4	0,198	-0,399	0,225	0,038	0,004
20	19,2	0,208	-0,375	0,233	0,036	0,003
21	19,4	0,219	-0,367	0,236	0,028	0,001
22	19,8	0,229	-0,354	0,241	0,022	0,001
23	20,0	0,240	-0,347	0,243	0,014	0,000
24	20,3	0,250	-0,339	0,246	0,006	0,000
25	20,4	0,260	-0,335	0,247	0,013	0,001
26	20,5	0,271	-0,331	0,248	0,022	0,002
27	21,1	0,281	-0,315	0,254	0,027	0,003
28	21,2	0,292	-0,309	0,256	0,036	0,004
29	22,6	0,302	-0,267	0,271	0,031	0,003
30	24,8	0,313	-0,197	0,296	0,017	0,001
31	27,7	0,323	-0,107	0,329	0,016	0,000
32	28,1	0,333	-0,092	0,334	0,011	0,000
33	28,4	0,344	-0,085	0,337	0,007	0,000
34	28,4	0,354	-0,082	0,338	0,016	0,001
35	29,8	0,365	-0,041	0,353	0,012	0,000
36	31,2	0,375	0,003	0,369	0,006	0,000
37	31,5	0,385	0,014	0,373	0,012	0,000

Nº	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
38	33,2	0,396	0,068	0,393	0,007	0,000
39	34,0	0,406	0,094	0,403	0,007	0,000
40	34,6	0,417	0,112	0,409	0,008	0,000
41	35,2	0,427	0,131	0,416	0,011	0,000
42	35,3	0,438	0,132	0,416	0,021	0,001
43	35,7	0,448	0,146	0,421	0,027	0,002
44	35,9	0,458	0,153	0,424	0,034	0,003
45	36,2	0,469	0,162	0,427	0,042	0,004
46	37,1	0,479	0,191	0,438	0,041	0,004
47	38,3	0,490	0,227	0,451	0,039	0,003
48	39,4	0,500	0,262	0,463	0,037	0,003
49	40,8	0,510	0,308	0,480	0,031	0,002
50	41,1	0,521	0,315	0,482	0,039	0,003
51	41,9	0,531	0,341	0,491	0,040	0,003
52	42,0	0,542	0,344	0,492	0,049	0,005
53	42,0	0,552	0,346	0,493	0,059	0,006
54	43,2	0,563	0,384	0,506	0,056	0,006
55	43,5	0,573	0,393	0,509	0,064	0,007
56	45,4	0,583	0,452	0,529	0,054	0,005
57	45,9	0,594	0,467	0,534	0,060	0,006
58	47,7	0,604	0,526	0,554	0,051	0,004
59	48,3	0,615	0,542	0,559	0,056	0,005
60	48,8	0,625	0,558	0,564	0,061	0,006
61	49,3	0,635	0,574	0,569	0,066	0,007
62	49,8	0,646	0,591	0,575	0,071	0,008
63	50,3	0,656	0,606	0,579	0,077	0,009
64	50,5	0,667	0,613	0,582	0,085	0,011
65	51,5	0,677	0,645	0,592	0,085	0,011
66	53,3	0,688	0,702	0,609	0,078	0,009
67	54,0	0,698	0,723	0,615	0,082	0,010
68	54,3	0,708	0,733	0,619	0,090	0,011
69	56,4	0,719	0,800	0,638	0,081	0,009
70	57,3	0,729	0,827	0,646	0,083	0,010
71	58,7	0,740	0,872	0,658	0,081	0,009
72	60,7	0,750	0,935	0,675	0,075	0,007
73	63,3	0,760	1,016	0,696	0,064	0,005
74	65,8	0,771	1,094	0,716	0,055	0,004
75	67,0	0,781	1,131	0,724	0,057	0,004
76	68,4	0,792	1,176	0,735	0,057	0,004
77	71,2	0,802	1,265	0,754	0,048	0,003
78	71,5	0,813	1,275	0,756	0,056	0,004
79	83,3	0,823	1,647	0,825	0,012	0,000
80	87,1	0,833	1,766	0,843	0,020	0,000
81	88,4	0,844	1,807	0,849	0,015	0,000
82	88,9	0,854	1,823	0,851	0,007	0,000
83	92,6	0,865	1,938	0,866	0,012	0,000
84	95,5	0,875	2,031	0,877	0,013	0,000
85	102,2	0,885	2,243	0,899	0,024	0,000
86	105,6	0,896	2,348	0,909	0,023	0,000
87	107,7	0,906	2,416	0,915	0,019	0,000
88	118,9	0,917	2,769	0,939	0,033	0,001
89	122,0	0,927	2,864	0,945	0,028	0,000
90	122,6	0,938	2,882	0,946	0,018	0,000

Nº	P24 ordenados	PocWeibull	yi	PocGumbel	D	χ^2
91	126,2	0,948	2,996	0,951	0,014	0,000
92	139,5	0,958	3,416	0,968	0,020	0,000
93	166,2	0,969	4,259	0,986	0,028	0,000
94	168,3	0,979	4,322	0,987	0,018	0,000
95	181,0	0,990	4,725	0,991	0,012	0,000

10.6.3.2.3. Análisis gráfico

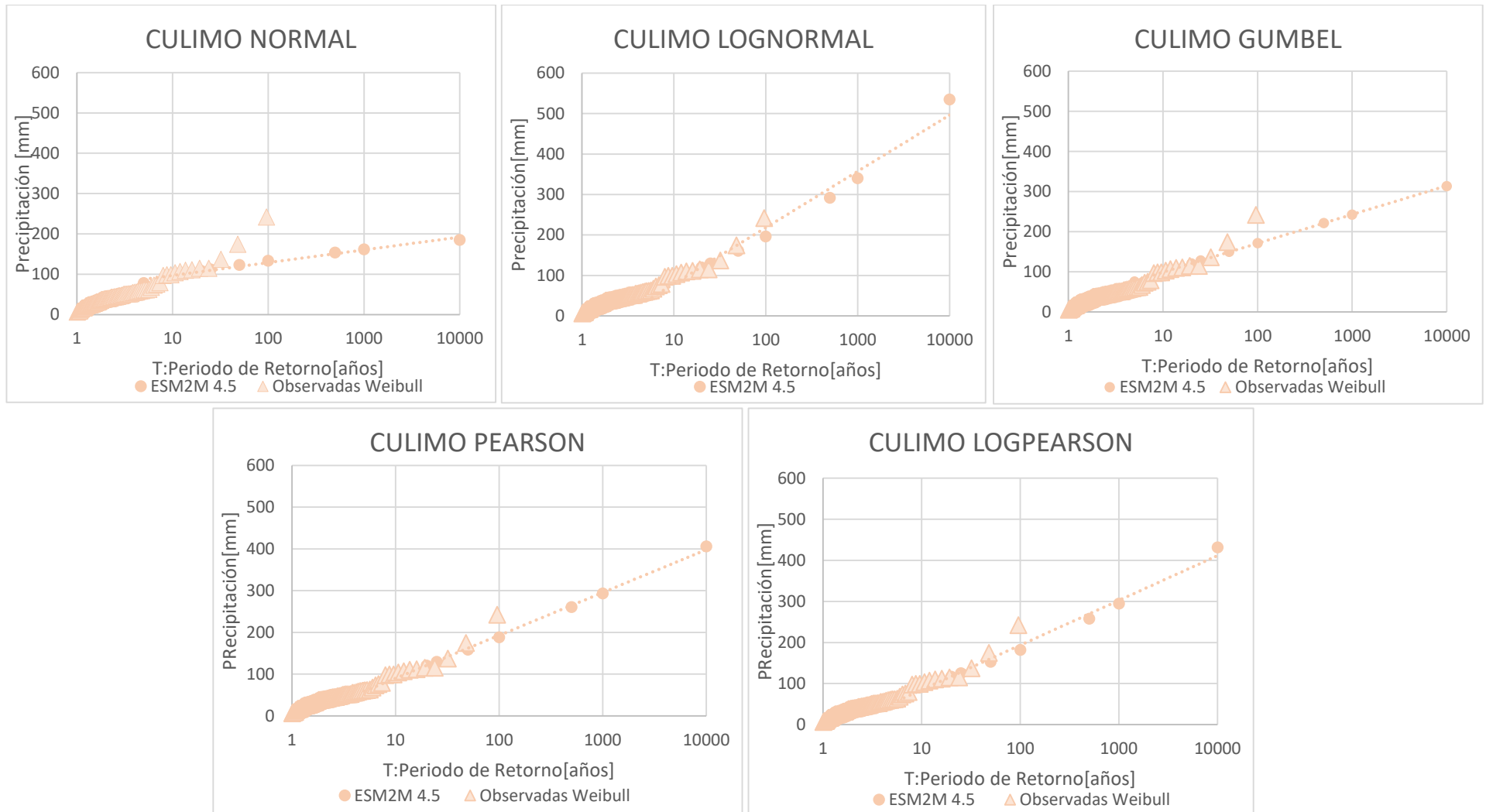


Figura F-9: Comparación entre los análisis de frecuencia de las distribuciones de probabilidad, estación Culimo DGA, proyección RCP 4.5

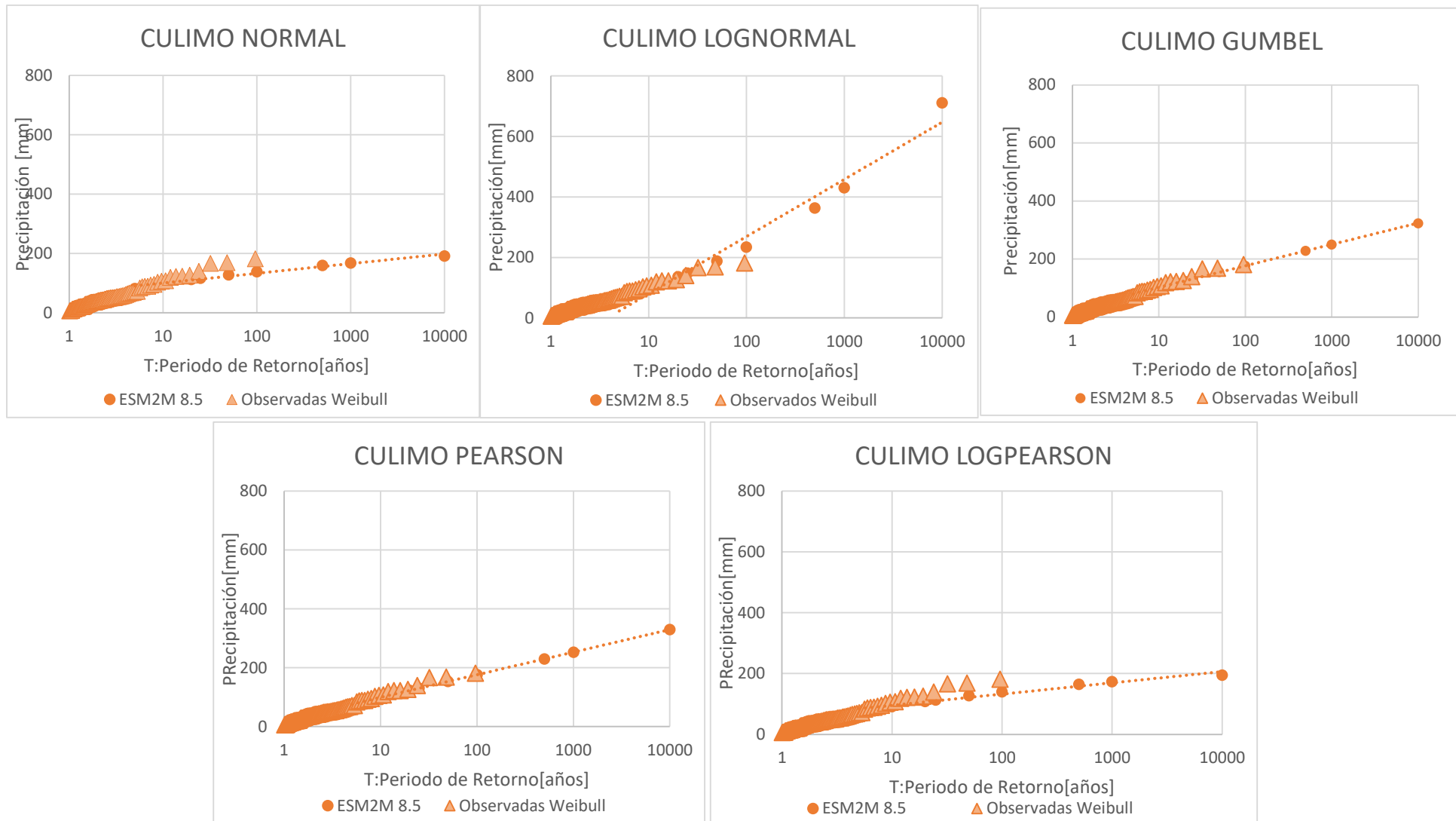


Figura F-10: Comparación entre los análisis de frecuencia de las distribuciones de probabilidad, estación Culimo DGA, proyección RCP 8.5

10.6.3.3. Estación Limahuida

10.6.3.3.1. RCP4.5

Tabla F-27: Resumen Parámetros de Análisis, Estación Limahuida, Proyección ESM2M RCP4.5.

Distribución Gumbel		Kolmogorov Smirnov			χ^2		
μ	33,9	α	0,05	SE ACEPTA?	α	0,05	SE ACEPTA?
σ	29,4	D(N, α)	0,140	NO	v	4,603	SI
N	95	D(N, α)-Max(D)	-0,023		$\chi^2_{v(1-\alpha)}$	10,443	
Ym	0,559						
σ_m	1,204						

Tabla F-28: Detalle Análisis de Frecuencia con Gumbel, Estación Limahuida, Proyección ESM2M RCP4.5.

Nº	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
1	5,1	0,010	-0,622	0,155	0,155	2,016
2	6,4	0,021	-0,571	0,170	0,160	1,075
3	7,4	0,031	-0,529	0,183	0,162	0,738
4	7,5	0,042	-0,523	0,185	0,154	0,493
5	7,6	0,052	-0,519	0,186	0,145	0,346
6	7,9	0,063	-0,509	0,190	0,137	0,258
7	8,3	0,073	-0,493	0,195	0,132	0,203
8	8,6	0,083	-0,481	0,198	0,125	0,159
9	9,0	0,094	-0,463	0,204	0,121	0,130
10	9,3	0,104	-0,453	0,207	0,114	0,102
11	10,0	0,115	-0,423	0,217	0,113	0,092
12	10,0	0,125	-0,422	0,217	0,103	0,068
13	10,5	0,135	-0,403	0,224	0,099	0,058
14	11,0	0,146	-0,382	0,231	0,096	0,050
15	11,0	0,156	-0,381	0,231	0,086	0,036
16	11,4	0,167	-0,364	0,237	0,081	0,030
17	11,6	0,177	-0,356	0,240	0,073	0,022
18	11,8	0,188	-0,348	0,243	0,066	0,016
19	11,9	0,198	-0,343	0,244	0,057	0,011
20	12,2	0,208	-0,332	0,248	0,050	0,008
21	13,1	0,219	-0,297	0,260	0,052	0,008
22	14,2	0,229	-0,252	0,276	0,057	0,010
23	14,2	0,240	-0,251	0,276	0,047	0,006
24	14,3	0,250	-0,245	0,279	0,039	0,003
25	14,3	0,260	-0,244	0,279	0,029	0,001
26	14,5	0,271	-0,237	0,282	0,021	0,000
27	14,7	0,281	-0,229	0,284	0,014	0,000
28	14,7	0,292	-0,229	0,284	0,007	0,000
29	15,4	0,302	-0,201	0,294	0,008	0,000
30	15,7	0,313	-0,188	0,299	0,013	0,001
31	16,2	0,323	-0,167	0,307	0,016	0,001
32	16,4	0,333	-0,162	0,309	0,025	0,002
33	16,4	0,344	-0,161	0,309	0,035	0,004
34	16,9	0,354	-0,140	0,317	0,037	0,004
35	17,6	0,365	-0,113	0,326	0,038	0,004
36	18,5	0,375	-0,072	0,341	0,034	0,003
37	18,6	0,385	-0,069	0,342	0,043	0,005
38	19,0	0,396	-0,052	0,349	0,047	0,006
39	19,2	0,406	-0,045	0,351	0,055	0,007

N°	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
40	19,6	0,417	-0,027	0,358	0,059	0,008
41	19,8	0,427	-0,020	0,360	0,067	0,010
42	21,1	0,438	0,033	0,380	0,057	0,008
43	21,2	0,448	0,037	0,382	0,066	0,010
44	21,3	0,458	0,041	0,383	0,075	0,012
45	22,0	0,469	0,068	0,393	0,076	0,012
46	23,0	0,479	0,111	0,409	0,071	0,010
47	23,1	0,490	0,114	0,410	0,080	0,013
48	24,1	0,500	0,156	0,425	0,075	0,011
49	24,5	0,510	0,170	0,430	0,080	0,013
50	24,5	0,521	0,173	0,431	0,090	0,015
51	24,6	0,531	0,176	0,432	0,099	0,018
52	24,8	0,542	0,186	0,436	0,106	0,021
53	25,2	0,552	0,199	0,441	0,111	0,022
54	25,6	0,563	0,217	0,447	0,115	0,024
55	26,5	0,573	0,255	0,461	0,112	0,022
56	26,6	0,583	0,258	0,462	0,122	0,025
57	29,0	0,594	0,355	0,496	0,098	0,016
58	29,2	0,604	0,365	0,500	0,105	0,018
59	31,3	0,615	0,451	0,529	0,086	0,012
60	31,5	0,625	0,458	0,531	0,094	0,014
61	32,2	0,635	0,486	0,541	0,095	0,014
62	33,5	0,646	0,542	0,559	0,087	0,012
63	33,9	0,656	0,557	0,564	0,092	0,013
64	34,0	0,667	0,561	0,565	0,101	0,015
65	35,0	0,677	0,603	0,578	0,099	0,014
66	35,5	0,688	0,624	0,585	0,102	0,015
67	35,8	0,698	0,634	0,588	0,109	0,017
68	38,8	0,708	0,757	0,625	0,083	0,010
69	42,1	0,719	0,895	0,665	0,054	0,004
70	43,4	0,729	0,949	0,679	0,050	0,003
71	44,1	0,740	0,977	0,686	0,053	0,004
72	44,5	0,750	0,991	0,690	0,060	0,005
73	44,6	0,760	0,997	0,691	0,069	0,006
74	45,6	0,771	1,036	0,701	0,069	0,006
75	45,9	0,781	1,051	0,705	0,076	0,007
76	47,6	0,792	1,119	0,721	0,070	0,006
77	49,2	0,802	1,184	0,736	0,066	0,005
78	51,2	0,813	1,266	0,754	0,058	0,004
79	53,5	0,823	1,361	0,774	0,049	0,003
80	53,9	0,833	1,378	0,777	0,056	0,004
81	57,4	0,844	1,520	0,804	0,040	0,002
82	60,0	0,854	1,626	0,821	0,033	0,001
83	69,3	0,865	2,007	0,874	0,020	0,000
84	70,0	0,875	2,037	0,878	0,013	0,000
85	74,7	0,885	2,229	0,898	0,023	0,000
86	76,7	0,896	2,311	0,906	0,020	0,000
87	79,1	0,906	2,410	0,914	0,018	0,000
88	80,6	0,917	2,473	0,919	0,013	0,000
89	94,7	0,927	3,052	0,954	0,037	0,001
90	101,0	0,938	3,310	0,964	0,037	0,001
91	109,4	0,948	3,653	0,974	0,037	0,001
92	111,8	0,958	3,750	0,977	0,029	0,000

Nº	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
93	115,8	0,969	3,916	0,980	0,022	0,000
94	130,3	0,979	4,511	0,989	0,020	0,000
95	138,8	0,990	4,857	0,992	0,013	0,000

10.6.3.3.2. RCP8.5

Tabla F-29: Resumen Parámetros de Análisis, Estación Limahuida, Proyección ESM2M RCP8.5.

Distribución Gumbel		Kolmogorov Smirnov			χ^2		
μ	28,4	α	0,05	SE ACEPTA?	α	0,05	SE ACEPTA?
σ	22,3	D(N, α)	0,140	SI	v	4,603	SI
N	95	D(N, α)-Max(D)	0,028		$\chi^2_{v(1-\alpha)}$	10,443	
Ym	0,559						
σ_m	1,204						

Tabla F-30: Detalle Análisis de Frecuencia con Gumbel, Estación Limahuida, Proyección ESM2M RCP8.5.

Nº	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
1	2,4	0,010	-0,846	0,097	0,097	0,725
2	4,3	0,021	-0,742	0,122	0,112	0,495
3	4,9	0,031	-0,711	0,130	0,110	0,315
4	5,0	0,042	-0,707	0,132	0,100	0,194
5	5,0	0,052	-0,702	0,133	0,091	0,126
6	5,5	0,063	-0,676	0,140	0,088	0,096
7	6,0	0,073	-0,648	0,148	0,085	0,077
8	6,1	0,083	-0,646	0,149	0,076	0,051
9	6,2	0,094	-0,640	0,150	0,067	0,034
10	6,7	0,104	-0,614	0,158	0,064	0,027
11	7,5	0,115	-0,571	0,170	0,066	0,027
12	7,7	0,125	-0,558	0,174	0,060	0,019
13	8,3	0,135	-0,526	0,184	0,059	0,017
14	8,8	0,146	-0,499	0,193	0,057	0,015
15	8,8	0,156	-0,498	0,193	0,047	0,009
16	9,2	0,167	-0,478	0,199	0,043	0,006
17	9,5	0,177	-0,462	0,204	0,038	0,004
18	10,1	0,188	-0,430	0,215	0,038	0,004
19	10,2	0,198	-0,423	0,217	0,030	0,002
20	10,6	0,208	-0,402	0,224	0,026	0,001
21	11,1	0,219	-0,377	0,233	0,024	0,001
22	11,3	0,229	-0,363	0,237	0,019	0,000
23	11,5	0,240	-0,354	0,241	0,011	0,000
24	11,6	0,250	-0,350	0,242	0,008	0,000
25	12,6	0,260	-0,296	0,261	0,011	0,000
26	12,7	0,271	-0,291	0,263	0,008	0,000
27	13,4	0,281	-0,251	0,277	0,006	0,000
28	13,4	0,292	-0,250	0,277	0,015	0,001
29	13,6	0,302	-0,239	0,281	0,021	0,001
30	14,0	0,313	-0,220	0,288	0,025	0,002
31	14,1	0,323	-0,214	0,290	0,033	0,003
32	14,9	0,333	-0,172	0,305	0,028	0,002
33	15,2	0,344	-0,151	0,312	0,031	0,003
34	15,5	0,354	-0,135	0,318	0,036	0,004
35	15,6	0,365	-0,130	0,320	0,044	0,005

Nº	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
36	17,5	0,375	-0,027	0,358	0,017	0,001
37	17,7	0,385	-0,019	0,361	0,025	0,002
38	18,0	0,396	-0,004	0,366	0,030	0,002
39	18,1	0,406	0,004	0,369	0,037	0,003
40	18,2	0,417	0,007	0,370	0,046	0,005
41	18,9	0,427	0,045	0,384	0,043	0,004
42	19,3	0,438	0,068	0,393	0,045	0,005
43	19,5	0,448	0,077	0,396	0,052	0,006
44	19,6	0,458	0,086	0,399	0,059	0,008
45	19,9	0,469	0,100	0,405	0,064	0,009
46	19,9	0,479	0,101	0,405	0,074	0,011
47	20,2	0,490	0,115	0,410	0,080	0,013
48	20,7	0,500	0,144	0,421	0,079	0,013
49	20,7	0,510	0,146	0,421	0,089	0,016
50	21,3	0,521	0,177	0,433	0,088	0,015
51	21,8	0,531	0,204	0,442	0,089	0,015
52	22,1	0,542	0,220	0,448	0,094	0,016
53	22,7	0,552	0,252	0,460	0,092	0,015
54	23,0	0,563	0,270	0,466	0,096	0,017
55	24,0	0,573	0,324	0,485	0,088	0,013
56	25,6	0,583	0,409	0,515	0,069	0,008
57	26,2	0,594	0,443	0,526	0,068	0,008
58	26,6	0,604	0,463	0,533	0,071	0,008
59	27,5	0,615	0,512	0,549	0,065	0,007
60	29,8	0,625	0,634	0,588	0,037	0,002
61	30,6	0,635	0,677	0,602	0,034	0,002
62	31,3	0,646	0,714	0,613	0,033	0,002
63	32,6	0,656	0,786	0,634	0,022	0,001
64	33,2	0,667	0,821	0,644	0,023	0,001
65	36,6	0,677	1,001	0,692	0,026	0,000
66	36,7	0,688	1,007	0,694	0,017	0,000
67	36,9	0,698	1,020	0,697	0,010	0,000
68	38,1	0,708	1,081	0,712	0,014	0,000
69	38,5	0,719	1,103	0,718	0,009	0,000
70	38,8	0,729	1,123	0,722	0,007	0,000
71	39,0	0,740	1,135	0,725	0,015	0,000
72	41,4	0,750	1,260	0,753	0,014	0,000
73	42,6	0,760	1,328	0,767	0,017	0,000
74	43,2	0,771	1,361	0,774	0,014	0,000
75	44,4	0,781	1,425	0,786	0,015	0,000
76	44,6	0,792	1,434	0,788	0,007	0,000
77	44,7	0,802	1,441	0,789	0,013	0,000
78	45,4	0,813	1,476	0,796	0,017	0,000
79	46,2	0,823	1,523	0,804	0,019	0,000
80	48,0	0,833	1,617	0,820	0,013	0,000
81	48,1	0,844	1,623	0,821	0,023	0,001
82	49,1	0,854	1,678	0,830	0,025	0,001
83	50,8	0,865	1,768	0,843	0,021	0,001
84	54,1	0,875	1,949	0,867	0,008	0,000
85	55,3	0,885	2,015	0,875	0,010	0,000
86	56,3	0,896	2,066	0,881	0,015	0,000
87	56,4	0,906	2,073	0,882	0,025	0,001
88	58,8	0,917	2,202	0,895	0,021	0,000

Nº	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
89	60,3	0,927	2,283	0,903	0,024	0,001
90	67,5	0,938	2,673	0,933	0,006	0,000
91	79,3	0,948	3,307	0,964	0,027	0,000
92	79,3	0,958	3,312	0,964	0,016	0,000
93	91,0	0,969	3,939	0,981	0,022	0,000
94	102,4	0,979	4,558	0,990	0,021	0,000
95	113,8	0,990	5,175	0,994	0,015	0,000

10.6.3.3.3. Análisis gráfico

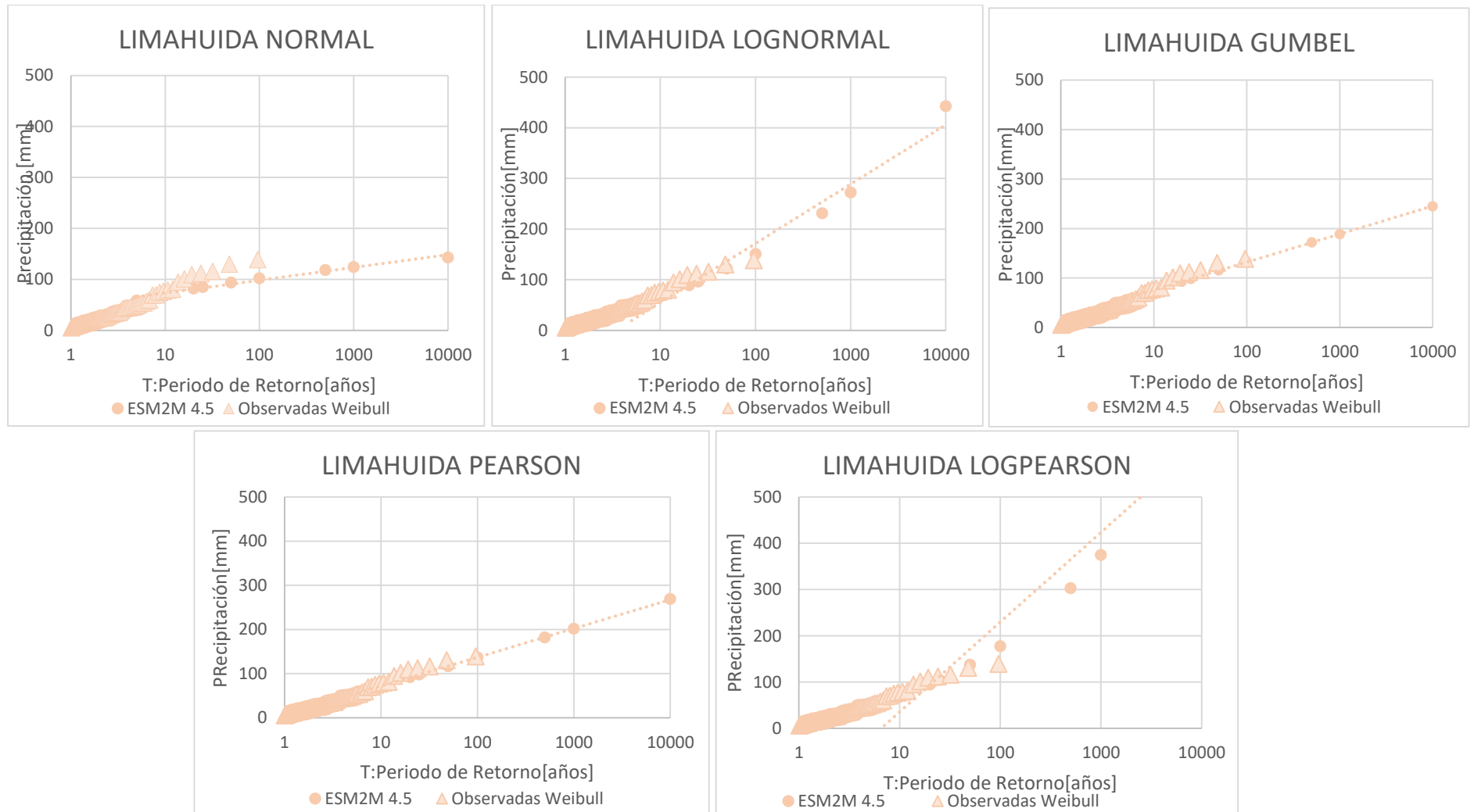


Figura F-11: Comparación entre los análisis de frecuencia de las distribuciones de probabilidad, estación Limahuida DGA, proyección RCP 4.5

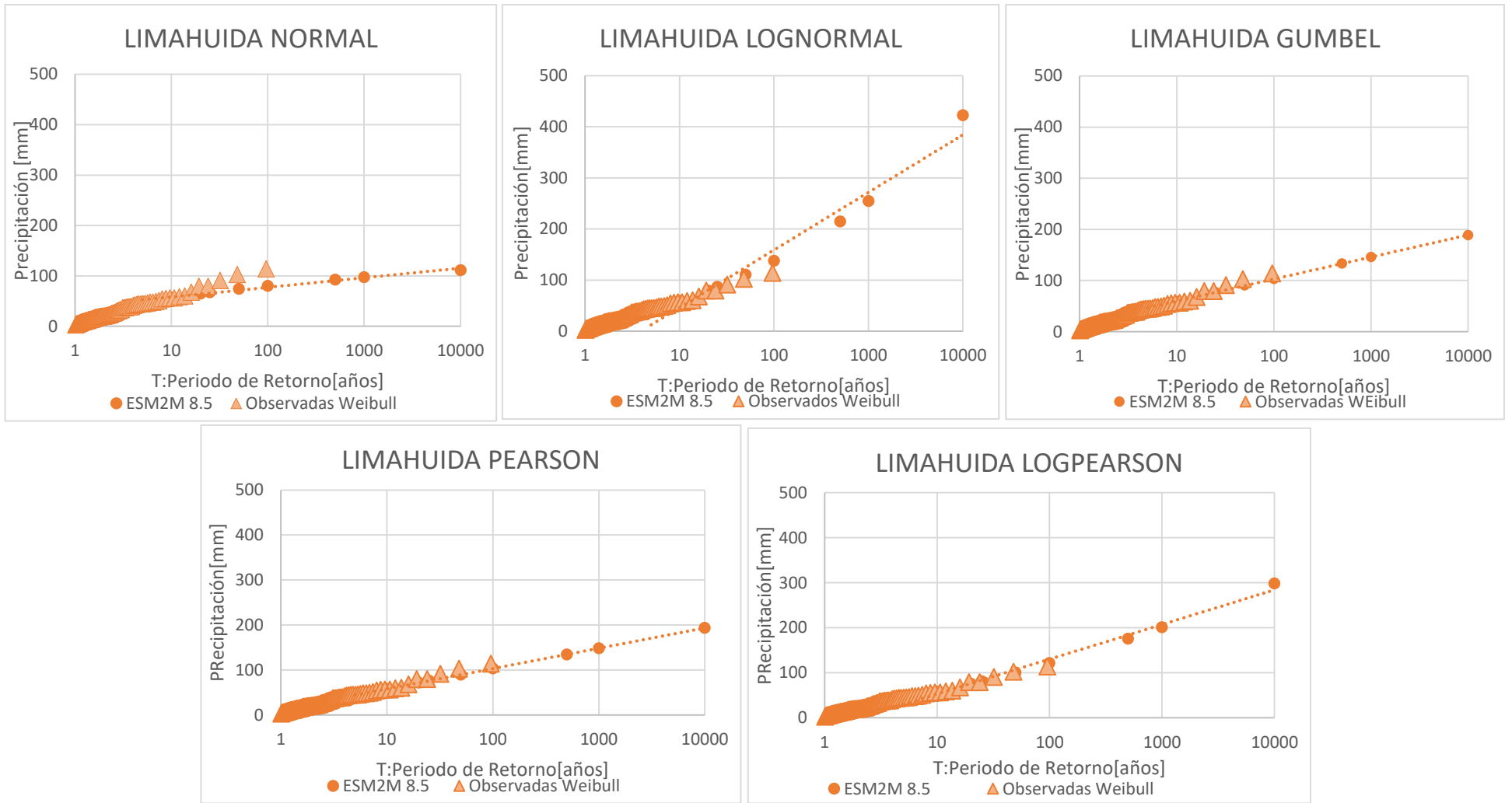


Figura F-12: Comparación entre los análisis de frecuencia de las distribuciones de probabilidad, estación Limahuida DGA, proyección RCP 8.5

10.6.3.4. Estación Salamanca

10.6.3.4.1. RCP4.5

Tabla F-31: Resumen Parámetros de Análisis, Estación Salamanca, Proyección ESM2M RCP4.5.

Distribución Gumbel		Kolmogorov Smirnov			χ^2		
μ	34,4	α	0,05	SE ACEPTA?	α	0,05	SE ACEPTA?
σ	31,0	D(N, α)	0,140	NO	v	4,603	SI
N	95	D(N, α)-Max(D)	-0,022		$\chi^2_{v(1-\alpha)}$	10,443	
Ym	0,559						
σ_m	1,204						

Tabla F-32: Detalle Análisis de Frecuencia con Gumbel, Estación Salamanca, Proyección ESM2M RCP4.5.

Nº	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
1	2,7	0,010	-0,672	0,141	0,141	1,642
2	5,4	0,021	-0,565	0,172	0,162	1,099
3	5,6	0,031	-0,559	0,174	0,153	0,651
4	6,3	0,042	-0,531	0,183	0,151	0,477
5	6,6	0,052	-0,520	0,186	0,144	0,345
6	6,6	0,063	-0,519	0,186	0,134	0,245
7	6,6	0,073	-0,518	0,187	0,124	0,178
8	7,3	0,083	-0,492	0,195	0,122	0,149
9	8,0	0,094	-0,465	0,204	0,120	0,128
10	8,7	0,104	-0,437	0,213	0,119	0,113
11	9,7	0,115	-0,399	0,225	0,121	0,107
12	9,7	0,125	-0,398	0,226	0,111	0,081
13	9,8	0,135	-0,396	0,226	0,101	0,061
14	10,1	0,146	-0,382	0,231	0,095	0,050
15	10,2	0,156	-0,379	0,232	0,086	0,037
16	10,3	0,167	-0,376	0,233	0,077	0,026
17	10,6	0,177	-0,362	0,238	0,071	0,021
18	11,2	0,188	-0,342	0,245	0,068	0,018
19	11,3	0,198	-0,338	0,246	0,059	0,012
20	11,6	0,208	-0,324	0,251	0,053	0,009
21	12,0	0,219	-0,311	0,255	0,047	0,006
22	12,0	0,229	-0,308	0,256	0,038	0,003
23	12,2	0,240	-0,303	0,258	0,029	0,001
24	12,5	0,250	-0,291	0,263	0,023	0,001
25	12,7	0,260	-0,284	0,265	0,015	0,000
26	12,7	0,271	-0,283	0,265	0,006	0,000
27	12,8	0,281	-0,277	0,267	0,014	0,001
28	13,0	0,292	-0,271	0,270	0,022	0,002
29	14,0	0,302	-0,232	0,283	0,019	0,001
30	14,7	0,313	-0,203	0,294	0,019	0,001
31	15,0	0,323	-0,193	0,297	0,026	0,002
32	16,5	0,333	-0,133	0,319	0,014	0,001
33	17,4	0,344	-0,100	0,331	0,013	0,000
34	17,5	0,354	-0,097	0,332	0,022	0,001
35	17,5	0,365	-0,095	0,333	0,031	0,003
36	17,6	0,375	-0,090	0,335	0,040	0,004
37	17,7	0,385	-0,088	0,335	0,050	0,006
38	18,1	0,396	-0,074	0,341	0,055	0,008
39	18,3	0,406	-0,067	0,343	0,063	0,010

N°	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
40	18,3	0,417	-0,066	0,344	0,073	0,013
41	18,8	0,427	-0,045	0,351	0,076	0,013
42	19,0	0,438	-0,038	0,354	0,084	0,016
43	20,3	0,448	0,011	0,372	0,076	0,013
44	21,0	0,458	0,039	0,382	0,076	0,013
45	22,3	0,469	0,090	0,401	0,068	0,010
46	23,2	0,479	0,127	0,414	0,065	0,009
47	23,6	0,490	0,142	0,420	0,070	0,010
48	24,1	0,500	0,160	0,426	0,074	0,011
49	25,7	0,510	0,222	0,449	0,061	0,007
50	27,0	0,521	0,272	0,467	0,054	0,006
51	27,3	0,531	0,286	0,472	0,059	0,007
52	27,5	0,542	0,291	0,474	0,068	0,009
53	28,1	0,552	0,314	0,482	0,070	0,009
54	28,3	0,563	0,322	0,485	0,078	0,011
55	29,2	0,573	0,357	0,497	0,076	0,010
56	30,9	0,583	0,425	0,520	0,063	0,007
57	31,3	0,594	0,439	0,525	0,069	0,008
58	31,5	0,604	0,446	0,527	0,077	0,010
59	31,5	0,615	0,447	0,527	0,087	0,012
60	34,0	0,625	0,543	0,559	0,066	0,007
61	34,9	0,635	0,580	0,571	0,064	0,006
62	36,2	0,646	0,629	0,587	0,059	0,005
63	37,0	0,656	0,661	0,597	0,060	0,005
64	38,1	0,667	0,703	0,609	0,057	0,005
65	38,5	0,677	0,719	0,614	0,063	0,006
66	38,6	0,688	0,724	0,616	0,072	0,007
67	41,0	0,698	0,815	0,642	0,055	0,004
68	43,0	0,708	0,895	0,665	0,044	0,003
69	43,4	0,719	0,907	0,668	0,051	0,004
70	44,6	0,729	0,955	0,680	0,049	0,003
71	45,7	0,740	0,999	0,692	0,048	0,003
72	46,0	0,750	1,010	0,695	0,055	0,004
73	50,4	0,760	1,180	0,735	0,025	0,001
74	51,2	0,771	1,211	0,742	0,029	0,001
75	51,4	0,781	1,219	0,744	0,037	0,002
76	51,4	0,792	1,220	0,744	0,047	0,003
77	55,2	0,802	1,368	0,775	0,027	0,001
78	56,2	0,813	1,405	0,783	0,030	0,001
79	57,2	0,823	1,446	0,790	0,033	0,001
80	62,9	0,833	1,665	0,828	0,006	0,000
81	65,7	0,844	1,773	0,844	0,011	0,000
82	67,8	0,854	1,855	0,855	0,011	0,000
83	68,0	0,865	1,864	0,856	0,008	0,000
84	68,9	0,875	1,899	0,861	0,014	0,000
85	70,4	0,885	1,957	0,868	0,017	0,000
86	71,0	0,896	1,979	0,871	0,025	0,001
87	72,7	0,906	2,046	0,879	0,027	0,001
88	75,2	0,917	2,142	0,889	0,027	0,001
89	87,9	0,927	2,634	0,931	0,014	0,000
90	97,1	0,938	2,992	0,951	0,024	0,000
91	97,1	0,948	2,995	0,951	0,014	0,000
92	97,6	0,958	3,013	0,952	0,006	0,000

Nº	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
93	100,3	0,969	3,119	0,957	0,012	0,000
94	102,5	0,979	3,202	0,960	0,019	0,000
95	206,7	0,990	7,245	0,999	0,020	0,000

10.6.3.4.2. RCP8.5

Tabla F-33: Resumen Parámetros de Análisis, Estación Salamanca, Proyección ESM2M RCP8.5.

Distribución Gumbel		Kolmogorov Smirnov			χ^2		
μ	34,2	α	0,05	SE ACEPTA?	α	0,05	SE ACEPTA?
σ	33,0	D(N, α)	0,140	NO	v	4,603	SI
N	95	D(N, α)-Max(D)	-0,029		$\chi^2_{v(1-\alpha)}$	10,443	
Ym	0,559						
σ_m	1,204						

Tabla F-34: Detalle Análisis de Frecuencia con Gumbel, Estación Salamanca, Proyección ESM2M RCP8.5.

Nº	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
1	2,6	0,010	-0,590	0,165	0,165	2,288
2	3,5	0,021	-0,557	0,174	0,164	1,133
3	4,5	0,031	-0,521	0,186	0,165	0,762
4	5,7	0,042	-0,476	0,200	0,169	0,601
5	6,2	0,052	-0,459	0,205	0,164	0,452
6	7,2	0,063	-0,422	0,218	0,166	0,385
7	7,7	0,073	-0,407	0,223	0,160	0,308
8	7,7	0,083	-0,405	0,223	0,150	0,235
9	7,7	0,094	-0,404	0,224	0,140	0,180
10	8,4	0,104	-0,378	0,232	0,139	0,158
11	8,9	0,115	-0,362	0,238	0,134	0,133
12	9,0	0,125	-0,356	0,240	0,125	0,105
13	9,3	0,135	-0,346	0,243	0,118	0,086
14	9,8	0,146	-0,330	0,249	0,113	0,073
15	9,8	0,156	-0,328	0,249	0,104	0,056
16	10,3	0,167	-0,311	0,255	0,099	0,047
17	10,3	0,177	-0,310	0,256	0,089	0,035
18	11,3	0,188	-0,272	0,269	0,092	0,035
19	11,5	0,198	-0,266	0,271	0,084	0,027
20	12,7	0,208	-0,222	0,287	0,089	0,030
21	12,9	0,219	-0,216	0,289	0,081	0,023
22	13,0	0,229	-0,213	0,290	0,071	0,016
23	13,2	0,240	-0,204	0,293	0,064	0,012
24	13,8	0,250	-0,183	0,301	0,061	0,010
25	13,8	0,260	-0,182	0,301	0,051	0,006
26	13,8	0,271	-0,182	0,301	0,041	0,003
27	14,1	0,281	-0,173	0,305	0,034	0,002
28	14,2	0,292	-0,168	0,306	0,025	0,001
29	14,3	0,302	-0,166	0,307	0,015	0,000
30	14,4	0,313	-0,161	0,309	0,007	0,000
31	14,7	0,323	-0,151	0,312	0,010	0,000
32	14,8	0,333	-0,146	0,314	0,019	0,001
33	15,0	0,344	-0,139	0,317	0,027	0,002
34	15,2	0,354	-0,130	0,320	0,034	0,003
35	15,7	0,365	-0,112	0,327	0,038	0,004

Nº	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
36	15,9	0,375	-0,106	0,329	0,046	0,006
37	16,6	0,385	-0,082	0,338	0,048	0,006
38	16,6	0,396	-0,081	0,338	0,058	0,008
39	17,4	0,406	-0,053	0,348	0,058	0,008
40	17,4	0,417	-0,052	0,349	0,068	0,011
41	17,6	0,427	-0,046	0,351	0,076	0,014
42	17,6	0,438	-0,045	0,351	0,086	0,017
43	17,7	0,448	-0,040	0,353	0,095	0,020
44	17,8	0,458	-0,037	0,354	0,104	0,024
45	18,0	0,469	-0,030	0,357	0,112	0,027
46	20,1	0,479	0,045	0,385	0,095	0,019
47	20,2	0,490	0,052	0,387	0,102	0,021
48	20,5	0,500	0,062	0,391	0,109	0,024
49	22,3	0,510	0,128	0,415	0,095	0,018
50	23,2	0,521	0,159	0,426	0,095	0,017
51	23,2	0,531	0,161	0,427	0,104	0,020
52	23,4	0,542	0,167	0,429	0,113	0,023
53	23,7	0,552	0,176	0,432	0,120	0,026
54	24,2	0,563	0,196	0,440	0,123	0,027
55	27,2	0,573	0,307	0,479	0,094	0,015
56	29,2	0,583	0,378	0,504	0,080	0,011
57	29,4	0,594	0,385	0,507	0,087	0,013
58	29,4	0,604	0,387	0,507	0,097	0,016
59	29,4	0,615	0,387	0,507	0,107	0,019
60	32,3	0,625	0,491	0,542	0,083	0,011
61	32,4	0,635	0,497	0,544	0,091	0,013
62	34,2	0,646	0,559	0,565	0,081	0,010
63	35,0	0,656	0,589	0,574	0,082	0,010
64	35,1	0,667	0,593	0,576	0,091	0,012
65	35,5	0,677	0,609	0,580	0,097	0,014
66	36,0	0,688	0,626	0,586	0,102	0,015
67	37,7	0,698	0,690	0,606	0,092	0,012
68	38,8	0,708	0,728	0,617	0,091	0,012
69	40,5	0,719	0,789	0,635	0,084	0,010
70	43,3	0,729	0,892	0,664	0,065	0,006
71	43,8	0,740	0,912	0,669	0,070	0,007
72	44,4	0,750	0,934	0,675	0,075	0,007
73	45,5	0,760	0,974	0,686	0,075	0,007
74	45,7	0,771	0,980	0,687	0,084	0,009
75	48,6	0,781	1,084	0,713	0,068	0,006
76	51,5	0,792	1,193	0,738	0,053	0,004
77	54,1	0,802	1,286	0,759	0,044	0,002
78	54,8	0,813	1,311	0,764	0,049	0,003
79	58,3	0,823	1,438	0,789	0,034	0,001
80	60,2	0,833	1,508	0,801	0,032	0,001
81	62,5	0,844	1,593	0,816	0,028	0,001
82	63,6	0,854	1,632	0,822	0,032	0,001
83	70,5	0,865	1,882	0,859	0,006	0,000
84	70,7	0,875	1,890	0,860	0,015	0,000
85	74,4	0,885	2,027	0,877	0,009	0,000
86	78,0	0,896	2,156	0,891	0,005	0,000
87	84,3	0,906	2,386	0,912	0,016	0,000
88	84,7	0,917	2,400	0,913	0,007	0,000

Nº	P24 ordenados	PoccWeibull	yi	PoccGumbel	D	χ^2
89	90,4	0,927	2,608	0,929	0,012	0,000
90	95,5	0,938	2,794	0,941	0,014	0,000
91	102,5	0,948	3,052	0,954	0,016	0,000
92	110,9	0,958	3,356	0,966	0,018	0,000
93	114,0	0,969	3,469	0,969	0,011	0,000
94	141,8	0,979	4,484	0,989	0,020	0,000
95	198,6	0,990	6,553	0,999	0,019	0,000

10.6.3.4.3. Análisis gráfico

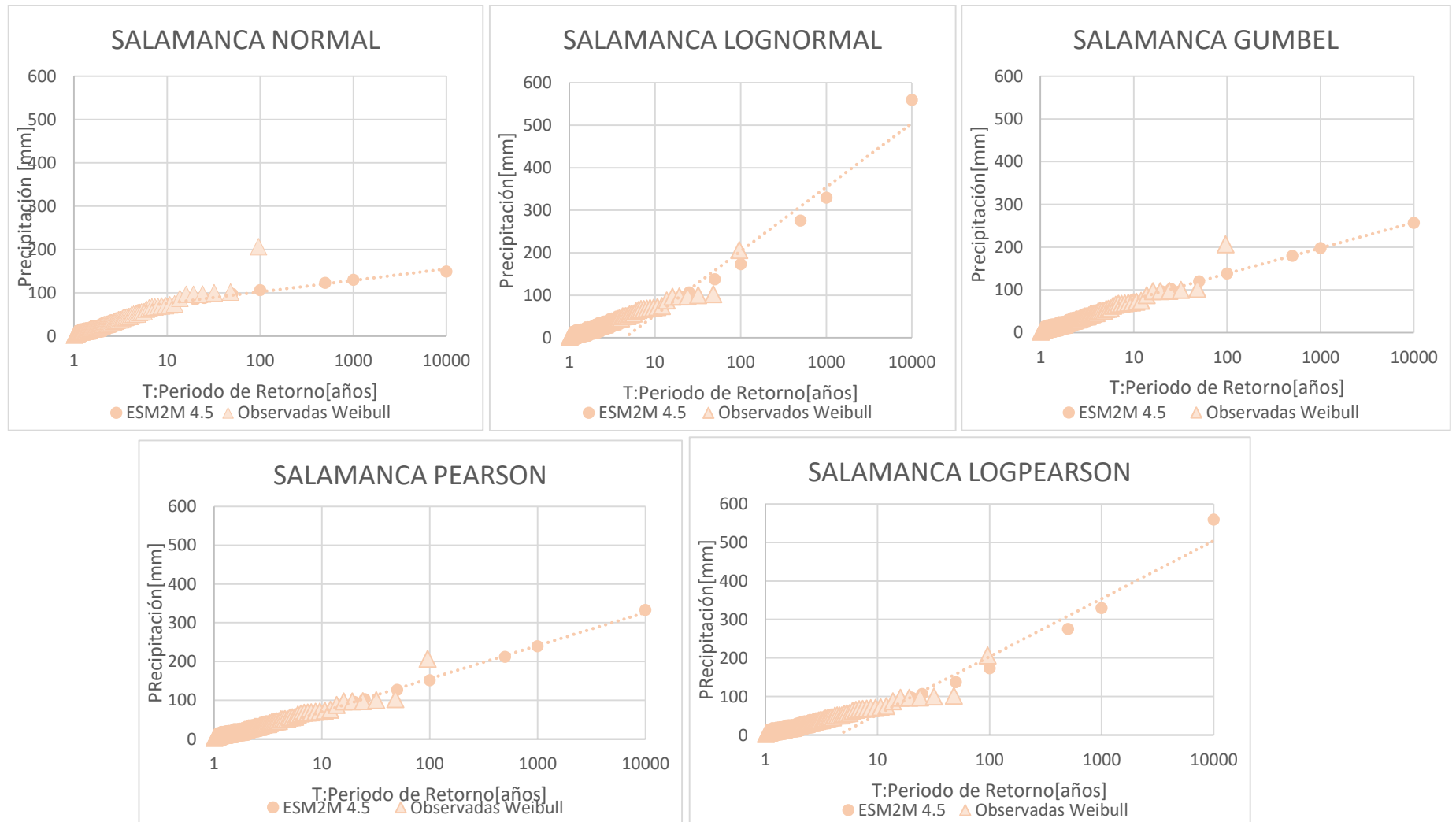


Figura F-13: Comparación entre los análisis de frecuencia de las distribuciones de probabilidad, estación Salamanca DGA, proyección RCP 4.5

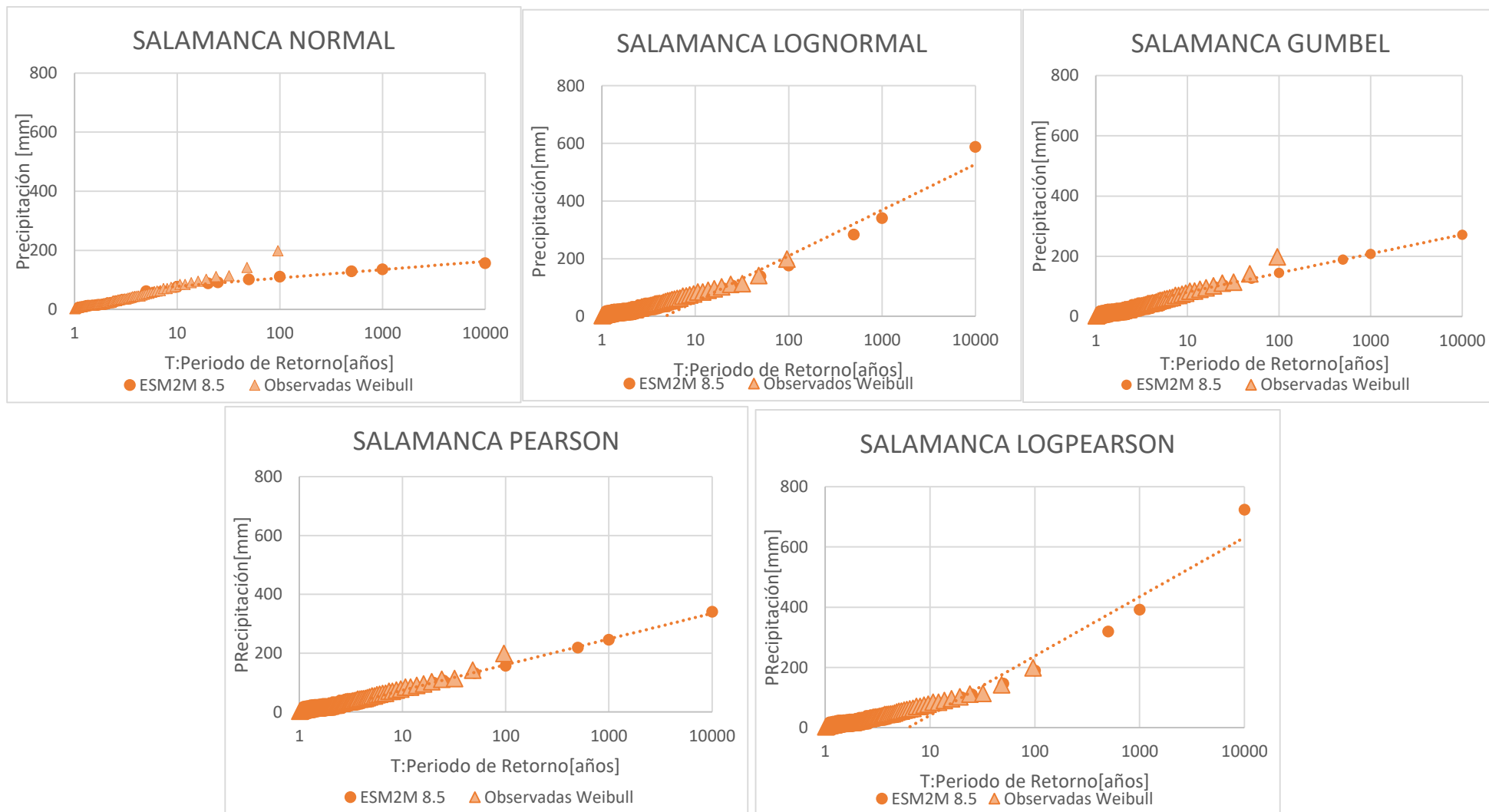


Figura F-14: Comparación entre los análisis de frecuencia de las distribuciones de probabilidad, estación Salamanca DGA, proyección RCP 8.5

10.6.3.5. Resumen Precipitaciones Análisis de Frecuencia

Tabla F-35: Resumen de Precipitaciones en las cuatro Estaciones, Modelo ESM2M en mm.

RCP	T [años]	5	10	20	25	50	100	500	1,000	10,000
4,5	Caimanes	60	78	96	102	119	136	176	193	250
8,5		50	65	80	85	99	113	145	159	206
4,5	Culimo	76	99	122	129	150	172	222	243	314
8,5		79	102	125	133	155	177	228	250	323
4,5	Limahuida	57	75	93	98	115	133	172	189	245
8,5		46	60	73	77	90	103	133	146	189
4,5	Salamanca	59	78	97	102	121	139	180	198	257
8,5		60	81	100	107	126	145	189	208	272

10.6.4. Cuenca Choapa

10.6.4.1. Estación Cuncumén

10.6.4.1.1. RCP4.5

Tabla F-36: Resumen Parámetros de Análisis, Estación Cuncumén, Proyección ESM2M RCP4.5.

Distribución LogNormal		Kolmogorov Smirnov			χ^2		
μ	3,2	α	0,05	SE ACEPTA?	α	0,05	SE ACEPTA?
σ	0,9	D(N, α)	0,140	SI	v	4,603	SI
N	95	D(N, α)-Max(D)	0,055		$\chi^2_{v(1-\alpha)}$	10,443	

Tabla F-37: Detalle Análisis de Frecuencia con Log Normal, Estación Cuncumén, Proyección ESM2M RCP4.5.

Nº	Ln(P24) ordenados	PoccWeibull	zi	Pocc Log Normal	D	χ^2	Exp(Pocc LogNormal)
1	0,892	0,010	-2,596	0,005	0,006	0,003	1,005
2	1,539	0,021	-1,870	0,031	0,020	0,005	1,031
3	1,544	0,031	-1,865	0,031	0,010	0,000	1,032
4	1,682	0,042	-1,709	0,044	0,012	0,000	1,045
5	1,720	0,052	-1,667	0,048	0,006	0,000	1,049
6	1,904	0,063	-1,460	0,072	0,020	0,001	1,075
7	1,948	0,073	-1,411	0,079	0,017	0,001	1,082
8	1,968	0,083	-1,388	0,083	0,010	0,000	1,086
9	2,027	0,094	-1,323	0,093	0,010	0,000	1,097
10	2,032	0,104	-1,317	0,094	0,010	0,001	1,099
11	2,202	0,115	-1,126	0,130	0,026	0,002	1,139
12	2,225	0,125	-1,100	0,136	0,021	0,001	1,145
13	2,269	0,135	-1,051	0,147	0,022	0,001	1,158
14	2,331	0,146	-0,981	0,163	0,028	0,002	1,177
15	2,336	0,156	-0,976	0,165	0,019	0,000	1,179
16	2,340	0,167	-0,971	0,166	0,009	0,000	1,180
17	2,355	0,177	-0,954	0,170	0,007	0,000	1,185
18	2,365	0,188	-0,944	0,173	0,015	0,001	1,189
19	2,403	0,198	-0,900	0,184	0,014	0,001	1,202
20	2,411	0,208	-0,892	0,186	0,022	0,002	1,205
21	2,414	0,219	-0,888	0,187	0,031	0,005	1,206
22	2,425	0,229	-0,876	0,191	0,039	0,006	1,210
23	2,427	0,240	-0,874	0,191	0,048	0,010	1,211
24	2,507	0,250	-0,784	0,217	0,033	0,004	1,242
25	2,550	0,260	-0,736	0,231	0,029	0,003	1,260
26	2,553	0,271	-0,732	0,232	0,039	0,006	1,261
27	2,583	0,281	-0,698	0,243	0,039	0,005	1,274

N°	Ln(P24) ordenados	PoccWeibull	zi	Pocc Log Normal	D	χ^2	Exp(Pocc LogNormal)
28	2,594	0,292	-0,686	0,246	0,045	0,007	1,279
29	2,632	0,302	-0,644	0,260	0,042	0,006	1,297
30	2,672	0,313	-0,598	0,275	0,038	0,005	1,316
31	2,700	0,323	-0,567	0,285	0,038	0,004	1,330
32	2,700	0,333	-0,567	0,285	0,048	0,007	1,330
33	2,707	0,344	-0,559	0,288	0,056	0,009	1,334
34	2,734	0,354	-0,529	0,298	0,056	0,009	1,348
35	2,786	0,365	-0,471	0,319	0,046	0,006	1,375
36	2,808	0,375	-0,447	0,328	0,047	0,006	1,388
37	2,837	0,385	-0,414	0,339	0,046	0,005	1,404
38	2,844	0,396	-0,406	0,342	0,053	0,007	1,408
39	2,950	0,406	-0,287	0,387	0,019	0,001	1,473
40	2,992	0,417	-0,240	0,405	0,011	0,000	1,500
41	3,009	0,427	-0,220	0,413	0,014	0,000	1,511
42	3,018	0,438	-0,211	0,416	0,021	0,001	1,517
43	3,022	0,448	-0,207	0,418	0,030	0,002	1,519
44	3,031	0,458	-0,196	0,422	0,036	0,003	1,526
45	3,035	0,469	-0,191	0,424	0,045	0,004	1,528
46	3,234	0,479	0,031	0,512	0,044	0,002	1,669
47	3,247	0,490	0,046	0,518	0,039	0,002	1,679
48	3,267	0,500	0,068	0,527	0,038	0,001	1,694
49	3,271	0,510	0,073	0,529	0,029	0,001	1,697
50	3,271	0,521	0,073	0,529	0,019	0,000	1,697
51	3,274	0,531	0,076	0,530	0,009	0,000	1,699
52	3,290	0,542	0,094	0,537	0,006	0,000	1,712
53	3,312	0,552	0,119	0,547	0,006	0,000	1,729
54	3,374	0,563	0,189	0,575	0,023	0,000	1,777
55	3,411	0,573	0,230	0,591	0,028	0,001	1,805
56	3,545	0,583	0,380	0,648	0,075	0,007	1,912
57	3,574	0,594	0,413	0,660	0,077	0,007	1,935
58	3,618	0,604	0,463	0,678	0,084	0,009	1,970
59	3,639	0,615	0,486	0,687	0,082	0,008	1,987
60	3,647	0,625	0,495	0,690	0,075	0,007	1,993
61	3,690	0,635	0,543	0,707	0,082	0,008	2,027
62	3,708	0,646	0,563	0,713	0,078	0,007	2,041
63	3,710	0,656	0,565	0,714	0,068	0,005	2,042
64	3,712	0,667	0,568	0,715	0,059	0,003	2,044
65	3,722	0,677	0,578	0,719	0,052	0,003	2,051
66	3,727	0,688	0,585	0,721	0,044	0,002	2,056
67	3,729	0,698	0,586	0,721	0,034	0,001	2,057
68	3,739	0,708	0,598	0,725	0,027	0,000	2,065
69	3,755	0,719	0,615	0,731	0,023	0,000	2,077
70	3,758	0,729	0,619	0,732	0,013	0,000	2,080
71	3,833	0,740	0,703	0,759	0,030	0,001	2,136
72	3,852	0,750	0,725	0,766	0,026	0,000	2,151
73	3,880	0,760	0,756	0,775	0,025	0,000	2,171
74	3,898	0,771	0,777	0,781	0,021	0,000	2,184
75	3,908	0,781	0,787	0,784	0,014	0,000	2,191
76	3,934	0,792	0,817	0,793	0,012	0,000	2,210
77	3,942	0,802	0,826	0,796	0,007	0,000	2,216
78	4,037	0,813	0,932	0,824	0,022	0,000	2,281
79	4,056	0,823	0,953	0,830	0,017	0,000	2,293
80	4,064	0,833	0,963	0,832	0,009	0,000	2,298

N°	Ln(P24) ordenados	PoccWeibull	zi	Pocc Log Normal	D	χ^2	Exp(Pocc LogNormal)
81	4,127	0,844	1,033	0,849	0,016	0,000	2,338
82	4,133	0,854	1,040	0,851	0,007	0,000	2,342
83	4,182	0,865	1,095	0,863	0,009	0,000	2,371
84	4,255	0,875	1,177	0,880	0,016	0,000	2,412
85	4,267	0,885	1,190	0,883	0,008	0,000	2,418
86	4,317	0,896	1,246	0,894	0,008	0,000	2,444
87	4,350	0,906	1,284	0,900	0,006	0,000	2,461
88	4,488	0,917	1,438	0,925	0,019	0,000	2,521
89	4,506	0,927	1,459	0,928	0,011	0,000	2,529
90	4,628	0,938	1,595	0,945	0,018	0,000	2,572
91	4,632	0,948	1,599	0,945	0,008	0,000	2,573
92	4,669	0,958	1,641	0,950	0,009	0,000	2,585
93	4,784	0,969	1,770	0,962	0,007	0,000	2,616
94	4,907	0,979	1,908	0,972	0,007	0,000	2,643
95	5,662	0,990	2,755	0,997	0,018	0,000	2,710

10.6.4.1.2. RCP8.5

Tabla F-38: Resumen Parámetros de Análisis, Estación Cuncumén, Proyección ESM2M RCP8.5.

Distribución Gumbel		Kolmogorov Smirnov			χ^2		
μ	3,1	α	0,05	SE ACEPTA?	α	0,05	SE ACEPTA?
σ	0,9	D(N, α)	0,140	SI	v	4,603	SI
N	95	D(N, α)-Max(D)	0,048		$\chi^2_{v(1-\alpha)}$	10,443	

Tabla F-39: Detalle Análisis de Frecuencia con Log Normal, Estación Cuncumén, Proyección ESM2M RCP8.5.

N°	Ln(P24) ordenados	PoccWeibull	zi	Pocc Log Normal	D	χ^2	Exp(Pocc Log Normal)
1	1,033	0,010	-2,274	0,011	0,011	0,000	1,012
2	1,114	0,021	-2,186	0,014	0,006	0,002	1,015
3	1,658	0,031	-1,594	0,055	0,035	0,019	1,057
4	1,726	0,042	-1,521	0,064	0,033	0,012	1,066
5	1,764	0,052	-1,479	0,070	0,028	0,006	1,072
6	1,879	0,063	-1,354	0,088	0,036	0,010	1,092
7	1,920	0,073	-1,310	0,095	0,033	0,007	1,100
8	1,999	0,083	-1,224	0,111	0,038	0,009	1,117
9	2,055	0,094	-1,163	0,122	0,039	0,009	1,130
10	2,055	0,104	-1,163	0,122	0,029	0,003	1,130
11	2,063	0,115	-1,154	0,124	0,020	0,001	1,132
12	2,127	0,125	-1,084	0,139	0,025	0,002	1,149
13	2,150	0,135	-1,059	0,145	0,020	0,001	1,156
14	2,155	0,146	-1,054	0,146	0,011	0,000	1,157
15	2,183	0,156	-1,023	0,153	0,007	0,000	1,166
16	2,200	0,167	-1,005	0,157	0,009	0,001	1,171
17	2,251	0,177	-0,950	0,171	0,006	0,000	1,187
18	2,260	0,188	-0,939	0,174	0,014	0,001	1,190
19	2,294	0,198	-0,902	0,183	0,014	0,001	1,201
20	2,313	0,208	-0,882	0,189	0,020	0,002	1,208
21	2,339	0,219	-0,853	0,197	0,022	0,002	1,218
22	2,394	0,229	-0,793	0,214	0,015	0,001	1,238
23	2,411	0,240	-0,776	0,219	0,021	0,002	1,245
24	2,504	0,250	-0,675	0,250	0,010	0,000	1,284
25	2,507	0,260	-0,670	0,251	0,009	0,000	1,286

N°	Ln(P24) ordenados	PoccWeibull	zi	Pocc Log Normal	D	χ^2	Exp(Pocc Log Normal)
26	2,526	0,271	-0,650	0,258	0,013	0,001	1,294
27	2,573	0,281	-0,599	0,275	0,007	0,000	1,316
28	2,601	0,292	-0,568	0,285	0,007	0,000	1,330
29	2,641	0,302	-0,525	0,300	0,008	0,000	1,349
30	2,644	0,313	-0,521	0,301	0,011	0,000	1,351
31	2,663	0,323	-0,501	0,308	0,015	0,001	1,361
32	2,677	0,333	-0,485	0,314	0,020	0,001	1,368
33	2,680	0,344	-0,482	0,315	0,029	0,002	1,370
34	2,685	0,354	-0,477	0,317	0,037	0,004	1,373
35	2,690	0,365	-0,471	0,319	0,046	0,006	1,375
36	2,713	0,375	-0,447	0,328	0,047	0,006	1,388
37	2,740	0,385	-0,417	0,338	0,047	0,006	1,403
38	2,754	0,396	-0,402	0,344	0,052	0,007	1,410
39	2,775	0,406	-0,380	0,352	0,054	0,007	1,422
40	2,792	0,417	-0,360	0,359	0,057	0,008	1,432
41	2,858	0,427	-0,289	0,386	0,041	0,004	1,471
42	2,866	0,438	-0,280	0,390	0,048	0,005	1,477
43	2,868	0,448	-0,278	0,390	0,058	0,007	1,477
44	2,868	0,458	-0,278	0,391	0,068	0,010	1,478
45	2,874	0,469	-0,271	0,393	0,076	0,012	1,481
46	2,875	0,479	-0,270	0,393	0,086	0,015	1,482
47	2,899	0,490	-0,244	0,404	0,086	0,015	1,497
48	2,921	0,500	-0,220	0,413	0,087	0,015	1,511
49	2,936	0,510	-0,204	0,419	0,091	0,016	1,521
50	2,990	0,521	-0,145	0,442	0,078	0,012	1,556
51	3,044	0,531	-0,087	0,465	0,066	0,008	1,593
52	3,078	0,542	-0,050	0,480	0,062	0,007	1,616
53	3,167	0,552	0,048	0,519	0,033	0,002	1,680
54	3,267	0,563	0,157	0,562	0,010	0,000	1,755
55	3,298	0,573	0,190	0,576	0,013	0,000	1,778
56	3,320	0,583	0,214	0,585	0,012	0,000	1,795
57	3,322	0,594	0,216	0,585	0,008	0,000	1,796
58	3,369	0,604	0,267	0,605	0,011	0,000	1,832
59	3,394	0,615	0,294	0,616	0,012	0,000	1,851
60	3,414	0,625	0,316	0,624	0,009	0,000	1,866
61	3,452	0,635	0,358	0,640	0,015	0,000	1,896
62	3,456	0,646	0,361	0,641	0,006	0,000	1,899
63	3,474	0,656	0,381	0,648	0,008	0,000	1,913
64	3,478	0,667	0,386	0,650	0,016	0,000	1,916
65	3,481	0,677	0,389	0,652	0,026	0,001	1,918
66	3,483	0,688	0,391	0,652	0,035	0,002	1,920
67	3,490	0,698	0,399	0,655	0,043	0,003	1,925
68	3,565	0,708	0,480	0,685	0,024	0,001	1,983
69	3,745	0,719	0,677	0,751	0,042	0,001	2,119
70	3,760	0,729	0,692	0,756	0,037	0,001	2,129
71	3,760	0,740	0,693	0,756	0,027	0,000	2,129
72	3,793	0,750	0,729	0,767	0,027	0,000	2,153
73	3,795	0,760	0,731	0,768	0,018	0,000	2,154
74	3,808	0,771	0,745	0,772	0,011	0,000	2,164
75	3,862	0,781	0,804	0,789	0,018	0,000	2,202
76	3,880	0,792	0,823	0,795	0,014	0,000	2,214
77	3,952	0,802	0,902	0,816	0,025	0,000	2,263
78	4,033	0,813	0,989	0,839	0,037	0,001	2,314

N°	Ln(P24) ordenados	PoccWeibull	zi	Pocc Log Normal	D	χ^2	Exp(Pocc Log Normal)
79	4,040	0,823	0,997	0,841	0,028	0,000	2,318
80	4,172	0,833	1,141	0,873	0,050	0,002	2,394
81	4,181	0,844	1,151	0,875	0,042	0,001	2,399
82	4,264	0,854	1,241	0,893	0,049	0,002	2,442
83	4,265	0,865	1,242	0,893	0,039	0,001	2,442
84	4,345	0,875	1,329	0,908	0,044	0,001	2,480
85	4,356	0,885	1,341	0,910	0,035	0,001	2,484
86	4,356	0,896	1,342	0,910	0,025	0,000	2,485
87	4,457	0,906	1,451	0,927	0,031	0,000	2,526
88	4,530	0,917	1,530	0,937	0,031	0,000	2,552
89	4,541	0,927	1,543	0,939	0,022	0,000	2,556
90	4,555	0,938	1,558	0,940	0,013	0,000	2,561
91	4,582	0,948	1,587	0,944	0,006	0,000	2,570
92	4,802	0,958	1,826	0,966	0,018	0,000	2,628
93	5,067	0,969	2,115	0,983	0,024	0,000	2,672
94	5,135	0,979	2,189	0,986	0,017	0,000	2,680
95	5,671	0,990	2,773	0,997	0,018	0,000	2,711

10.6.4.1.3. Análisis gráfico

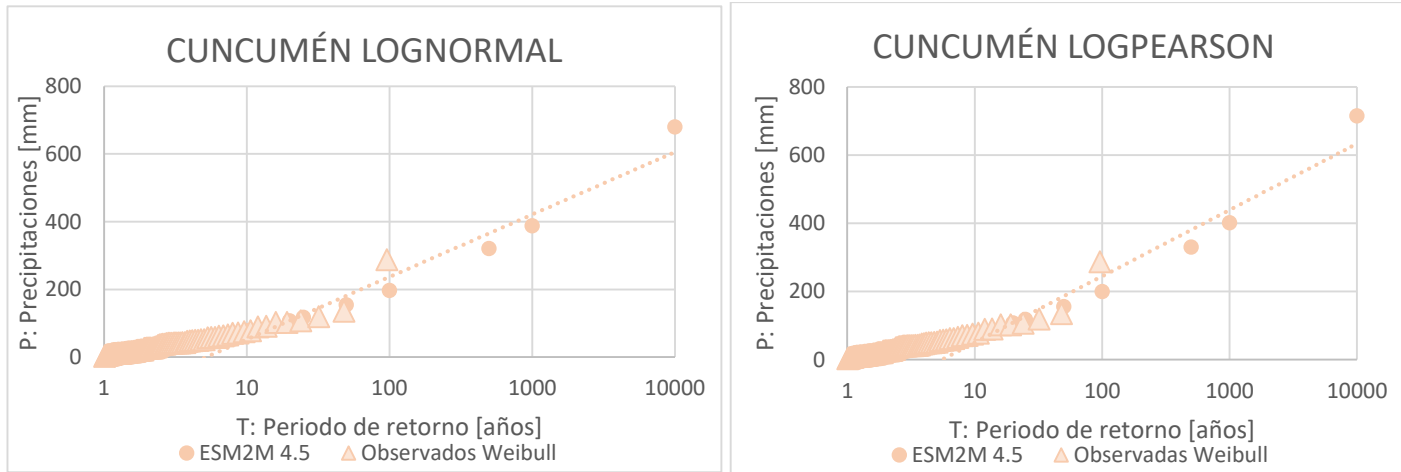


Figura F-15: Comparación entre los análisis de frecuencia de las distribuciones de probabilidad, estación Cuncumén DGA, proyección RCP 4.5

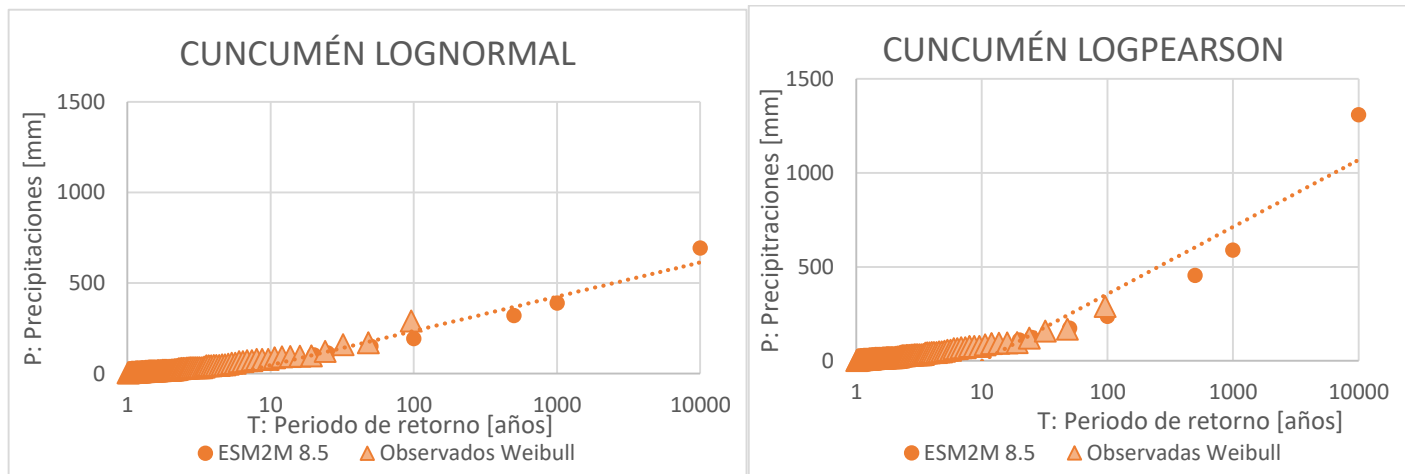


Figura F-16: Comparación entre los análisis de frecuencia de las distribuciones de probabilidad, estación Cuncumén DGA, proyección RCP 8.5

10.6.4.2. Estación La Tranquilla

10.6.4.2.1. RCP4.5

Tabla F-40: Resumen Parámetros de Análisis, Estación La Tranquilla, Proyección ESM2M RCP4.5.

Distribución LogNormal		Kolmogorov Smirnov			χ^2		
μ	3,2	α	0,05	SE ACEPTA?	α	0,05	SE ACEPTA?
σ	0,9	D(N, α)	0,140	SI	v	4,603	SI
N	95	D(N, α)-Max(D)	0,055		$\chi^2_{v(1-\alpha)}$	10,443	

Tabla F-41: Detalle Análisis de Frecuencia con Log Normal, Estación La Tranquilla, Proyección ESM2M RCP4.5.

Nº	Ln(P24) ordenados	PoccWeibull	zi	Pocc Log Normal	D	χ^2	Exp(Pocc LogNormal)
1	0,892	0,010	-2,596	0,005	0,006	0,003	1,005
2	1,539	0,021	-1,870	0,031	0,020	0,005	1,031
3	1,544	0,031	-1,865	0,031	0,010	0,000	1,032
4	1,682	0,042	-1,709	0,044	0,012	0,000	1,045
5	1,720	0,052	-1,667	0,048	0,006	0,000	1,049
6	1,904	0,063	-1,460	0,072	0,020	0,001	1,075
7	1,948	0,073	-1,411	0,079	0,017	0,001	1,082
8	1,968	0,083	-1,388	0,083	0,010	0,000	1,086
9	2,027	0,094	-1,323	0,093	0,010	0,000	1,097
10	2,032	0,104	-1,317	0,094	0,010	0,001	1,099
11	2,202	0,115	-1,126	0,130	0,026	0,002	1,139
12	2,225	0,125	-1,100	0,136	0,021	0,001	1,145
13	2,269	0,135	-1,051	0,147	0,022	0,001	1,158
14	2,331	0,146	-0,981	0,163	0,028	0,002	1,177
15	2,336	0,156	-0,976	0,165	0,019	0,000	1,179
16	2,340	0,167	-0,971	0,166	0,009	0,000	1,180
17	2,355	0,177	-0,954	0,170	0,007	0,000	1,185
18	2,365	0,188	-0,944	0,173	0,015	0,001	1,189
19	2,403	0,198	-0,900	0,184	0,014	0,001	1,202
20	2,411	0,208	-0,892	0,186	0,022	0,002	1,205
21	2,414	0,219	-0,888	0,187	0,031	0,005	1,206
22	2,425	0,229	-0,876	0,191	0,039	0,006	1,210
23	2,427	0,240	-0,874	0,191	0,048	0,010	1,211
24	2,507	0,250	-0,784	0,217	0,033	0,004	1,242
25	2,550	0,260	-0,736	0,231	0,029	0,003	1,260
26	2,553	0,271	-0,732	0,232	0,039	0,006	1,261
27	2,583	0,281	-0,698	0,243	0,039	0,005	1,274
28	2,594	0,292	-0,686	0,246	0,045	0,007	1,279
29	2,632	0,302	-0,644	0,260	0,042	0,006	1,297
30	2,672	0,313	-0,598	0,275	0,038	0,005	1,316
31	2,700	0,323	-0,567	0,285	0,038	0,004	1,330
32	2,700	0,333	-0,567	0,285	0,048	0,007	1,330
33	2,707	0,344	-0,559	0,288	0,056	0,009	1,334
34	2,734	0,354	-0,529	0,298	0,056	0,009	1,348
35	2,786	0,365	-0,471	0,319	0,046	0,006	1,375
36	2,808	0,375	-0,447	0,328	0,047	0,006	1,388
37	2,837	0,385	-0,414	0,339	0,046	0,005	1,404
38	2,844	0,396	-0,406	0,342	0,053	0,007	1,408
39	2,950	0,406	-0,287	0,387	0,019	0,001	1,473
40	2,992	0,417	-0,240	0,405	0,011	0,000	1,500
41	3,009	0,427	-0,220	0,413	0,014	0,000	1,511

N°	Ln(P24) ordenados	PoccWeibull	zi	Pocc Log Normal	D	χ^2	Exp(Pocc LogNormal)
42	3,018	0,438	-0,211	0,416	0,021	0,001	1,517
43	3,022	0,448	-0,207	0,418	0,030	0,002	1,519
44	3,031	0,458	-0,196	0,422	0,036	0,003	1,526
45	3,035	0,469	-0,191	0,424	0,045	0,004	1,528
46	3,234	0,479	0,031	0,512	0,044	0,002	1,669
47	3,247	0,490	0,046	0,518	0,039	0,002	1,679
48	3,267	0,500	0,068	0,527	0,038	0,001	1,694
49	3,271	0,510	0,073	0,529	0,029	0,001	1,697
50	3,271	0,521	0,073	0,529	0,019	0,000	1,697
51	3,274	0,531	0,076	0,530	0,009	0,000	1,699
52	3,290	0,542	0,094	0,537	0,006	0,000	1,712
53	3,312	0,552	0,119	0,547	0,006	0,000	1,729
54	3,374	0,563	0,189	0,575	0,023	0,000	1,777
55	3,411	0,573	0,230	0,591	0,028	0,001	1,805
56	3,545	0,583	0,380	0,648	0,075	0,007	1,912
57	3,574	0,594	0,413	0,660	0,077	0,007	1,935
58	3,618	0,604	0,463	0,678	0,084	0,009	1,970
59	3,639	0,615	0,486	0,687	0,082	0,008	1,987
60	3,647	0,625	0,495	0,690	0,075	0,007	1,993
61	3,690	0,635	0,543	0,707	0,082	0,008	2,027
62	3,708	0,646	0,563	0,713	0,078	0,007	2,041
63	3,710	0,656	0,565	0,714	0,068	0,005	2,042
64	3,712	0,667	0,568	0,715	0,059	0,003	2,044
65	3,722	0,677	0,578	0,719	0,052	0,003	2,051
66	3,727	0,688	0,585	0,721	0,044	0,002	2,056
67	3,729	0,698	0,586	0,721	0,034	0,001	2,057
68	3,739	0,708	0,598	0,725	0,027	0,000	2,065
69	3,755	0,719	0,615	0,731	0,023	0,000	2,077
70	3,758	0,729	0,619	0,732	0,013	0,000	2,080
71	3,833	0,740	0,703	0,759	0,030	0,001	2,136
72	3,852	0,750	0,725	0,766	0,026	0,000	2,151
73	3,880	0,760	0,756	0,775	0,025	0,000	2,171
74	3,898	0,771	0,777	0,781	0,021	0,000	2,184
75	3,908	0,781	0,787	0,784	0,014	0,000	2,191
76	3,934	0,792	0,817	0,793	0,012	0,000	2,210
77	3,942	0,802	0,826	0,796	0,007	0,000	2,216
78	4,037	0,813	0,932	0,824	0,022	0,000	2,281
79	4,056	0,823	0,953	0,830	0,017	0,000	2,293
80	4,064	0,833	0,963	0,832	0,009	0,000	2,298
81	4,127	0,844	1,033	0,849	0,016	0,000	2,338
82	4,133	0,854	1,040	0,851	0,007	0,000	2,342
83	4,182	0,865	1,095	0,863	0,009	0,000	2,371
84	4,255	0,875	1,177	0,880	0,016	0,000	2,412
85	4,267	0,885	1,190	0,883	0,008	0,000	2,418
86	4,317	0,896	1,246	0,894	0,008	0,000	2,444
87	4,350	0,906	1,284	0,900	0,006	0,000	2,461
88	4,488	0,917	1,438	0,925	0,019	0,000	2,521
89	4,506	0,927	1,459	0,928	0,011	0,000	2,529
90	4,628	0,938	1,595	0,945	0,018	0,000	2,572
91	4,632	0,948	1,599	0,945	0,008	0,000	2,573
92	4,669	0,958	1,641	0,950	0,009	0,000	2,585
93	4,784	0,969	1,770	0,962	0,007	0,000	2,616
94	4,907	0,979	1,908	0,972	0,007	0,000	2,643

N°	Ln(P24) ordenados	PoccWeibull	zi	Pocc Log Normal	D	χ^2	Exp(Pocc LogNormal)
95	5,662	0,990	2,755	0,997	0,018	0,000	2,710

10.6.4.2.2. RCP8.5

Tabla F-42: Resumen Parámetros de Análisis, Estación La Tranquilla, Proyección ESM2M RCP8.5.

Distribución Gumbel		Kolmogorov Smirnov			χ^2		
μ	3,1	α	0,05	SE ACEPTA?	α	0,05	SE ACEPTA?
σ	0,9	D(N, α)	0,140	SI	v	4,603	SI
N	95	D(N, α)-Max(D)	0,048		$\chi^2v(1-\alpha)$	10,443	

Tabla F-43: Detalle Análisis de Frecuencia con Log Normal, Estación La Tranquilla, Proyección ESM2M RCP8.5.

N°	Ln(P24) ordenados	PoccWeibull	zi	Pocc Log Normal	D	χ^2	Exp(Pocc Log Normal)
1	1,033	0,010	-2,274	0,011	0,011	0,000	1,012
2	1,114	0,021	-2,186	0,014	0,006	0,002	1,015
3	1,658	0,031	-1,594	0,055	0,035	0,019	1,057
4	1,726	0,042	-1,521	0,064	0,033	0,012	1,066
5	1,764	0,052	-1,479	0,070	0,028	0,006	1,072
6	1,879	0,063	-1,354	0,088	0,036	0,010	1,092
7	1,920	0,073	-1,310	0,095	0,033	0,007	1,100
8	1,999	0,083	-1,224	0,111	0,038	0,009	1,117
9	2,055	0,094	-1,163	0,122	0,039	0,009	1,130
10	2,055	0,104	-1,163	0,122	0,029	0,003	1,130
11	2,063	0,115	-1,154	0,124	0,020	0,001	1,132
12	2,127	0,125	-1,084	0,139	0,025	0,002	1,149
13	2,150	0,135	-1,059	0,145	0,020	0,001	1,156
14	2,155	0,146	-1,054	0,146	0,011	0,000	1,157
15	2,183	0,156	-1,023	0,153	0,007	0,000	1,166
16	2,200	0,167	-1,005	0,157	0,009	0,001	1,171
17	2,251	0,177	-0,950	0,171	0,006	0,000	1,187
18	2,260	0,188	-0,939	0,174	0,014	0,001	1,190
19	2,294	0,198	-0,902	0,183	0,014	0,001	1,201
20	2,313	0,208	-0,882	0,189	0,020	0,002	1,208
21	2,339	0,219	-0,853	0,197	0,022	0,002	1,218
22	2,394	0,229	-0,793	0,214	0,015	0,001	1,238
23	2,411	0,240	-0,776	0,219	0,021	0,002	1,245
24	2,504	0,250	-0,675	0,250	0,010	0,000	1,284
25	2,507	0,260	-0,670	0,251	0,009	0,000	1,286
26	2,526	0,271	-0,650	0,258	0,013	0,001	1,294
27	2,573	0,281	-0,599	0,275	0,007	0,000	1,316
28	2,601	0,292	-0,568	0,285	0,007	0,000	1,330
29	2,641	0,302	-0,525	0,300	0,008	0,000	1,349
30	2,644	0,313	-0,521	0,301	0,011	0,000	1,351
31	2,663	0,323	-0,501	0,308	0,015	0,001	1,361
32	2,677	0,333	-0,485	0,314	0,020	0,001	1,368
33	2,680	0,344	-0,482	0,315	0,029	0,002	1,370
34	2,685	0,354	-0,477	0,317	0,037	0,004	1,373
35	2,690	0,365	-0,471	0,319	0,046	0,006	1,375
36	2,713	0,375	-0,447	0,328	0,047	0,006	1,388
37	2,740	0,385	-0,417	0,338	0,047	0,006	1,403

N°	Ln(P24) ordenados	PoccWeibull	zi	Pocc Log Normal	D	χ^2	Exp(Pocc Log Normal)
38	2,754	0,396	-0,402	0,344	0,052	0,007	1,410
39	2,775	0,406	-0,380	0,352	0,054	0,007	1,422
40	2,792	0,417	-0,360	0,359	0,057	0,008	1,432
41	2,858	0,427	-0,289	0,386	0,041	0,004	1,471
42	2,866	0,438	-0,280	0,390	0,048	0,005	1,477
43	2,868	0,448	-0,278	0,390	0,058	0,007	1,477
44	2,868	0,458	-0,278	0,391	0,068	0,010	1,478
45	2,874	0,469	-0,271	0,393	0,076	0,012	1,481
46	2,875	0,479	-0,270	0,393	0,086	0,015	1,482
47	2,899	0,490	-0,244	0,404	0,086	0,015	1,497
48	2,921	0,500	-0,220	0,413	0,087	0,015	1,511
49	2,936	0,510	-0,204	0,419	0,091	0,016	1,521
50	2,990	0,521	-0,145	0,442	0,078	0,012	1,556
51	3,044	0,531	-0,087	0,465	0,066	0,008	1,593
52	3,078	0,542	-0,050	0,480	0,062	0,007	1,616
53	3,167	0,552	0,048	0,519	0,033	0,002	1,680
54	3,267	0,563	0,157	0,562	0,010	0,000	1,755
55	3,298	0,573	0,190	0,576	0,013	0,000	1,778
56	3,320	0,583	0,214	0,585	0,012	0,000	1,795
57	3,322	0,594	0,216	0,585	0,008	0,000	1,796
58	3,369	0,604	0,267	0,605	0,011	0,000	1,832
59	3,394	0,615	0,294	0,616	0,012	0,000	1,851
60	3,414	0,625	0,316	0,624	0,009	0,000	1,866
61	3,452	0,635	0,358	0,640	0,015	0,000	1,896
62	3,456	0,646	0,361	0,641	0,006	0,000	1,899
63	3,474	0,656	0,381	0,648	0,008	0,000	1,913
64	3,478	0,667	0,386	0,650	0,016	0,000	1,916
65	3,481	0,677	0,389	0,652	0,026	0,001	1,918
66	3,483	0,688	0,391	0,652	0,035	0,002	1,920
67	3,490	0,698	0,399	0,655	0,043	0,003	1,925
68	3,565	0,708	0,480	0,685	0,024	0,001	1,983
69	3,745	0,719	0,677	0,751	0,042	0,001	2,119
70	3,760	0,729	0,692	0,756	0,037	0,001	2,129
71	3,760	0,740	0,693	0,756	0,027	0,000	2,129
72	3,793	0,750	0,729	0,767	0,027	0,000	2,153
73	3,795	0,760	0,731	0,768	0,018	0,000	2,154
74	3,808	0,771	0,745	0,772	0,011	0,000	2,164
75	3,862	0,781	0,804	0,789	0,018	0,000	2,202
76	3,880	0,792	0,823	0,795	0,014	0,000	2,214
77	3,952	0,802	0,902	0,816	0,025	0,000	2,263
78	4,033	0,813	0,989	0,839	0,037	0,001	2,314
79	4,040	0,823	0,997	0,841	0,028	0,000	2,318
80	4,172	0,833	1,141	0,873	0,050	0,002	2,394
81	4,181	0,844	1,151	0,875	0,042	0,001	2,399
82	4,264	0,854	1,241	0,893	0,049	0,002	2,442
83	4,265	0,865	1,242	0,893	0,039	0,001	2,442
84	4,345	0,875	1,329	0,908	0,044	0,001	2,480
85	4,356	0,885	1,341	0,910	0,035	0,001	2,484
86	4,356	0,896	1,342	0,910	0,025	0,000	2,485
87	4,457	0,906	1,451	0,927	0,031	0,000	2,526
88	4,530	0,917	1,530	0,937	0,031	0,000	2,552
89	4,541	0,927	1,543	0,939	0,022	0,000	2,556
90	4,555	0,938	1,558	0,940	0,013	0,000	2,561

N°	Ln(P24) ordenados	PocWeibull	zi	Poc Log Normal	D	χ^2	Exp(Poc Log Normal)
91	4,582	0,948	1,587	0,944	0,006	0,000	2,570
92	4,802	0,958	1,826	0,966	0,018	0,000	2,628
93	5,067	0,969	2,115	0,983	0,024	0,000	2,672
94	5,135	0,979	2,189	0,986	0,017	0,000	2,680
95	5,671	0,990	2,773	0,997	0,018	0,000	2,711

10.6.4.2.3. Análisis gráfico

Como el modelo ESM2M arroja exactamente la misma proyección de precipitaciones para las estaciones Cuncumén y La Tranquilla, el análisis gráfico de esta última estación corresponde al del acápite 10.6.4.1.3.

10.6.4.3. Resumen Precipitaciones Análisis de Frecuencia

Tabla F-44: Resumen de Precipitaciones en las dos Estaciones, Modelo ESM2M en mm.

RCP	T [años]	5	10	20	25	50	100	500	1,000	10,000
4,5	Cuncumén	52	77	107	118	154	196	321	388	679
8,5		49	74	103	114	150	193	320	389	693
4,5	La Tranquilla	52	77	107	118	154	196	321	388	679
8,5		49	74	103	114	150	193	320	389	693

10.7. ANEXO G: Respuesta Hidrológica de las Cuencas Estero Alhué

Se presentan las precipitaciones efectivas para los datos históricos, escenario RCP4.5 y escenario RCP8.5:

Tabla G-1: Precipitación efectiva para las Precipitaciones de la línea base, según su Periodo de Retorno.

Periodo de Retorno T [años]	Precipitación en 24 horas [mm]	Infiltración potencial S [mm]	Infiltración inicial Io [mm]	Precipitación Efectiva en 24 hrs [mm]
5	129	50	10	84
10	155		10	108
20	179		10	131
50	211		10	161
100	234		10	184
500	289		10	237
1.000	312		10	260
10.000	390		10	336
PMP	465		10	410

Tabla G-2: Precipitación efectiva para las Precipitaciones del Escenario RCP4.5, según su Periodo de Retorno.

Periodo de Retorno T [años]	Precipitación en 24 horas [mm]	Infiltración potencial S [mm]	Infiltración inicial Io [mm]	Precipitación Efectiva en 24 hrs [mm]
5	145	50	10	98
10	176		10	128
20	206		10	157
50	245		10	194
100	275		10	223
500	342		10	289
1.000	371		10	317
10.000	467		10	412
PMP	550		10	494

Tabla G-3: Precipitación efectiva para las Precipitaciones del Escenario RCP8.5, según su Periodo de Retorno.

Periodo de Retorno T [años]	Precipitación en 24 horas [mm]	Infiltración potencial S [mm]	Infiltración inicial Io [mm]	Precipitación Efectiva en 24 hrs [mm]
5	176	50	10	128
10	217		10	167
20	257		10	206
50	308		10	255
100	346		10	293
500	434		10	379
1.000	472		10	417
10.000	597		10	541
PMP	602		10	546

Se presenta el hidrograma unitario sintético adimensional:

Tabla G-4: HUS sin corregir por precipitación de 1 [mm]

t/tp'	q/qp	t [horas]	q [lts/s*mm*km ²]	Área bajo curva
0,0	0	0,00	0,00	0,000
0,3	0,2	1,59	7,65	0,022
0,5	0,4	2,65	15,30	0,044
0,6	0,6	3,18	22,95	0,036
0,8	0,8	3,97	30,60	0,077
1,0	1	5,29	38,25	0,164
1,3	0,8	6,88	30,60	0,197
1,5	0,6	7,94	22,95	0,102
1,8	0,4	9,53	15,30	0,109
2,3	0,2	12,18	7,65	0,109
2,7	0,1	14,29	3,83	0,044
3,0	0	15,88	0,00	0,011
Suma				0,915

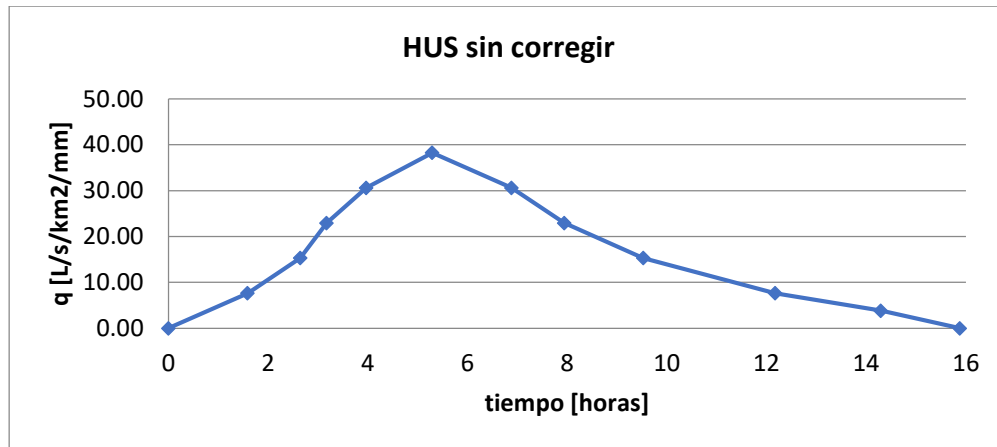


Figura G-1: HUS y sin corregir por lluvia de 1 [mm]

Se presenta el hidrograma unitario sintético corregido para una lluvia de 1 [mm]:

Tabla G-5: HUS corregido, Cuenca Estero Alhué.

t/tp'	q/qp'	t [horas]	q [lts/s*mm*km ²]	Área bajo curva
0,0	0,0	0,00	0,00	0,000
0,3	0,2	1,59	8,56	0,024
0,5	0,4	2,65	17,12	0,049
0,6	0,6	3,18	25,68	0,041
0,8	0,8	3,97	34,25	0,086

t/tp'	q/qp'	t [horas]	q [lts/s*mm*km ²]	Área bajo curva
1,0	1,0	5,29	38,25	0,173
1,3	0,8	6,88	34,25	0,207
1,5	0,6	7,94	25,68	0,114
1,8	0,4	9,53	17,12	0,122
2,3	0,2	12,18	8,56	0,122
2,7	0,1	14,29	4,28	0,049
3,0	0,0	15,88	0,00	0,012
Suma				1,00
Factor de corrección				1,1191

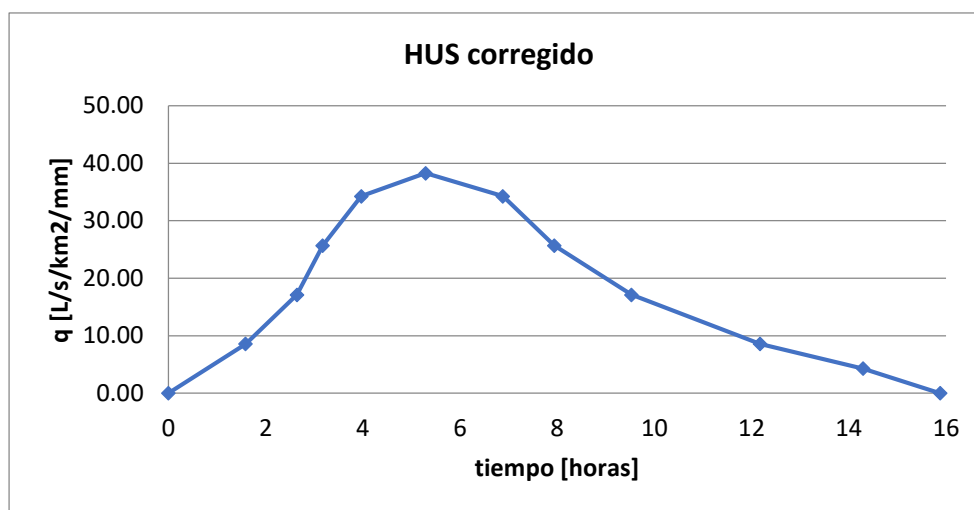


Figura G-2: HUS y sin corregir por lluvia de 1 [mm]

Se presentan los hietogramas de diseño para los datos históricos, escenario RCP4.5 y escenario RCP8.5 según cada periodo de retorno:

Tabla G-6: Hietograma de diseño según cada periodo de retorno para las precipitaciones de la línea base.

t [horas]	T [años]								
	5	10	20	50	100	500	1.000	10.000	PMP
	P acum [mm]								
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2,4	9	11	12	15	16	20	22	27	32
4,8	20	24	27	32	36	44	47	59	71
7,2	33	40	46	54	60	74	80	100	119
9,6	49	59	68	80	89	110	119	149	178
12	67	80	93	109	122	150	162	203	241
14,4	85	102	118	139	155	191	206	258	307

t [horas]	T [años]								
	5	10	20	50	100	500	1.000	10.000	PMP
	P acum [mm]								
16,8	100	120	139	164	182	224	243	303	361
19,2	113	135	156	184	204	252	272	340	405
21,6	122	147	170	199	222	274	296	370	440
24	129	155	179	211	234	289	312	390	465

Tabla G-7: Hietograma de diseño según cada periodo de retorno para las precipitaciones del escenario RCP4.5.

t [horas]	T [años]								
	5	10	20	50	100	500	1.000	10.000	PMP
	P acum [mm]								
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2,4	10	12	14	17	19	24	26	32	38
4,8	22	27	31	37	42	52	56	71	84
7,2	37	45	53	63	70	88	95	120	141
9,6	55	67	79	94	105	131	142	178	210
12	75	92	107	127	143	177	193	242	285
14,4	96	117	136	162	182	226	245	309	363
16,8	112	137	160	191	213	266	288	363	427
19,2	126	154	180	214	239	298	323	407	479
21,6	137	167	195	232	260	324	351	442	520
24	145	176	206	245	275	342	371	467	550

Tabla G-8: Hietograma de diseño según cada periodo de retorno para las precipitaciones del escenario RCP8.5.

t [horas]	T [años]								
	5	10	20	50	100	500	1.000	10.000	PMP
	P acum [mm]								
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2,4	12	15	18	21	24	30	33	41	42
4,8	27	33	39	47	53	66	72	91	92
7,2	45	56	66	79	89	111	121	153	154
9,6	67	83	98	118	132	166	180	228	230
12	91	113	133	160	180	225	245	310	313
14,4	116	144	170	204	229	287	312	394	398
16,8	137	169	200	239	269	337	366	464	468
19,2	153	190	224	269	302	378	411	520	525
21,6	167	206	243	292	328	411	447	565	570

t [horas]	T [años]								
	5	10	20	50	100	500	1.000	10.000	PMP
	P acum [mm]								
24	176	217	257	308	346	434	472	597	602

Se presentan los hidrogramas de crecidas para los datos históricos, escenario RCP4.5 y escenario RCP8.5 según cada periodo de retorno:

Tabla G-9: Hidrogramas de crecidas según cada periodo de retorno de las precipitaciones de la línea base.

Tiempo [hr]	Caudal Total [m³/s]			
	T=100	T=1,000	T=10,000	T=PMP
0,00	0,00	0,0	0,00	0,00
1,00	0,76	1,3	1,97	2,71
2,00	3,66	6,2	9,12	12,33
3,00	10,88	18,0	26,26	35,09
4,00	24,92	40,6	58,52	77,42
5,00	46,98	75,4	107,30	140,47
6,00	77,66	122,6	172,20	223,03
7,00	115,61	179,6	249,17	321,08
8,00	160,47	245,4	337,92	432,98
9,00	210,51	318,1	435,41	555,51
10,00	263,86	395,9	539,68	685,57
11,00	320,62	479,0	650,63	820,34
12,00	378,71	564,6	761,10	951,84
13,00	437,16	648,9	866,39	1075,35
14,00	495,58	729,0	964,22	1187,82
15,00	548,98	798,6	1046,25	1281,18
16,00	594,23	854,3	1110,21	1353,07
17,00	627,69	892,0	1152,07	1398,86
18,00	645,54	908,8	1168,02	1413,90
19,00	650,03	908,4	1162,77	1404,15
20,00	641,49	891,1	1136,89	1370,18
21,00	622,32	860,1	1094,33	1316,47
22,00	596,07	820,3	1041,03	1250,22
23,00	562,95	771,8	976,99	1172,10
24,00	525,87	718,2	907,68	1088,16
25,00	480,91	654,7	826,65	990,45
26,00	428,47	582,2	734,57	879,74
27,00	368,45	500,1	630,63	754,99
28,00	300,99	408,2	514,53	615,85
29,00	236,45	320,5	403,82	483,25

Tiempo	Caudal Total [m ³ /s]			
	[hr]	T=100	T=1,000	T=10,000
30,00	179,21	242,8	305,84	365,94
31,00	130,07	176,2	221,85	265,41
32,00	93,04	126,0	158,61	189,73
33,00	64,76	87,6	110,34	131,99
34,00	43,33	58,6	73,80	88,26
35,00	27,25	36,9	46,38	55,47
36,00	15,77	21,3	26,84	32,10
37,00	7,77	10,5	13,21	15,79
38,00	2,55	3,4	4,33	5,18
39,00	0,00	0,0	0,00	0,00

Tabla G-10: Hidrogramas de crecidas según cada periodo de retorno de las precipitaciones del escenario RCP4.5.

Tiempo	Caudal Total [m ³ /s]			
	[hr]	T=100	T=1,000	T=10,000
0,00	0,00	0,0	0,00	0,00
1,00	1,03	1,8	2,73	3,65
2,00	4,89	8,3	12,42	16,36
3,00	14,39	24,1	35,34	46,02
4,00	32,69	53,9	77,94	100,51
5,00	61,13	99,1	141,38	180,50
6,00	100,16	159,5	224,42	284,90
7,00	147,83	231,5	323,04	407,87
8,00	203,41	314,3	435,57	547,16
9,00	264,63	405,6	558,77	698,36
10,00	330,28	503,2	689,50	855,37
11,00	400,28	607,2	824,89	1015,05
12,00	472,36	711,9	956,93	1168,90
13,00	545,01	812,2	1080,92	1311,18
14,00	615,51	905,7	1193,76	1439,85
15,00	677,82	984,9	1287,42	1546,00
16,00	729,18	1046,8	1359,52	1626,83
17,00	765,03	1087,7	1405,41	1676,89
18,00	782,23	1103,8	1420,43	1690,98
19,00	784,12	1099,8	1410,55	1676,19
20,00	771,07	1076,0	1376,37	1632,96
21,00	745,72	1036,3	1322,36	1566,63
22,00	712,43	986,4	1255,77	1486,33
23,00	671,38	926,2	1177,28	1392,53
24,00	625,78	860,7	1092,95	1292,11

Tiempo	Caudal Total [m ³ /s]			
	[hr]	T=100	T=1,000	T=10,000
25,00	571,02	784,0	994,80	1175,60
26,00	508,09	696,8	883,59	1043,84
27,00	436,63	598,3	758,30	895,60
28,00	356,52	488,2	618,54	730,41
29,00	279,97	383,2	485,35	573,06
30,00	212,13	290,2	367,54	433,91
31,00	153,93	210,5	266,57	314,68
32,00	110,09	150,5	190,56	224,93
33,00	76,61	104,7	132,56	156,46
34,00	51,25	70,0	88,65	104,62
35,00	32,22	44,0	55,71	65,75
36,00	18,65	25,5	32,24	38,04
37,00	9,18	12,5	15,86	18,72
38,00	3,01	4,1	5,20	6,14
39,00	0,00	0,0	0,00	0,00

Tabla G-11: Hidrogramas de crecidas según cada periodo de retorno de las precipitaciones del escenario RCP8.5.

Tiempo	Caudal Total [m ³ /s]			
	[hr]	T=100	T=1,000	T=10,000
0,00	0,00	0,0	0,00	0,00
1,00	1,58	2,8	4,23	4,30
2,00	7,38	12,6	18,76	19,06
3,00	21,42	35,9	52,47	53,25
4,00	48,07	79,2	114,03	115,66
5,00	88,75	143,6	203,75	206,54
6,00	143,48	227,7	320,82	325,12
7,00	209,03	327,7	457,85	463,82
8,00	284,28	441,7	612,65	620,45
9,00	367,58	566,5	779,75	789,43
10,00	456,51	698,9	951,12	962,48
11,00	551,67	835,7	1124,21	1137,16
12,00	648,69	969,1	1290,17	1304,54
13,00	742,45	1094,2	1442,40	1457,94
14,00	830,46	1207,9	1580,06	1596,66
15,00	905,88	1302,3	1693,25	1710,67
16,00	965,05	1374,9	1779,02	1797,02
17,00	1004,59	1421,0	1831,38	1849,66
18,00	1020,97	1436,0	1844,96	1863,18
19,00	1018,51	1425,8	1827,37	1845,26

Tiempo	Caudal Total [m³/s]			
	T=100	T=1,000	T=10,000	T=PMP
20,00	997,45	1391,1	1778,97	1796,24
21,00	961,45	1336,4	1705,63	1722,08
22,00	915,87	1269,0	1617,66	1633,20
23,00	860,63	1189,6	1515,16	1529,67
24,00	800,06	1104,4	1405,59	1419,02
25,00	728,99	1005,2	1278,63	1290,82
26,00	648,04	892,8	1135,18	1145,99
27,00	556,50	766,2	973,87	983,13
28,00	454,15	624,9	794,18	801,73
29,00	356,49	490,4	623,06	628,98
30,00	270,03	371,3	471,74	476,22
31,00	195,89	269,3	342,11	345,36
32,00	140,06	192,5	244,53	246,85
33,00	97,45	133,9	170,09	171,70
34,00	65,18	89,6	113,73	114,81
35,00	40,97	56,3	71,47	72,15
36,00	23,71	32,6	41,35	41,74
37,00	11,67	16,0	20,35	20,54
38,00	3,83	5,3	6,67	6,73
39,00	0,00	0,0	0,00	0,00