

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA

XIX CONGRESO CHILENO DE HIDRAULICA

VARIABILIDAD DE LAS PRECIPITACIONES MAXIMAS DIARIAS EN FUNCION DE LA LONGITUD DEL REGISTRO

**RICARDO GONZÁLEZ.¹
SOLANGE DUSSAUBAT.²**

RESUMEN

En el presente trabajo se recopilan y analizan estadísticas de precipitaciones máximas diarias en distintas zonas de Chile, comprendidas entre las IV y IX regiones, con la finalidad de detectar posibles cambios de tendencia en las series de precipitaciones máximas diarias y en los coeficientes de frecuencia en función de la longitud del registro de medición, lo anterior relacionado con la potencial influencia del cambio climático global en eventos extremos.

La metodología adoptada consideró la selección de estaciones con una longitud mínima de 50 años, disponibles en la DGA (Dirección General de Aguas) y la DMC (Dirección Meteorológica de Chile) para posteriormente realizar análisis de frecuencias de las series anuales de precipitaciones máximas diarias y determinar coeficientes de frecuencia para distintos periodos de retorno en función de la longitud del registro de medición. Complementariamente, se efectuó el cálculo de los promedios móviles y se utilizó del test de Mann – Kendall para detectar cambios de tendencia en las estaciones analizadas.

Finalmente, en función de los resultados obtenidos, se presentan comentarios y/o recomendaciones de los autores de este trabajo.

¹Ingeniero de Proyectos, Ingendesa - mail: rjgv@ingendesa.cl

²Ingeniero de Proyectos, Golder Associates S. A. – mail: sdussaubat@golder.cl

1. INTRODUCCION

El presente trabajo tiene como principal objetivo analizar cambios de tendencia en las series de precipitaciones máximas diarias anuales producto del cambio climático global, para lo cual se intenta detectar si este fenómeno está presente en los registros recopilados en las estadísticas de las distintas zonas de Chile.

Relacionado con lo anterior, es importante destacar que los resultados obtenidos por el modelo PRECIS – DGF (Garreaud, 2008) mostrarían un aumento considerable en el número de las tormentas cálidas con precipitaciones diarias mayores a 30 mm y con temperaturas por sobre 12°C. Otros autores, como Sadri (2009), han detectado cambios en las tendencias de precipitaciones máximas en otras zonas del mundo.

El análisis realizado consideró la recopilación, análisis e interpretación de los registros pluviométricos (series de precipitaciones máximas diarias anuales) de 18 estaciones ubicadas en distintas zonas de Chile con registros de medición mayores a 50 años. Para cada serie se consideró la realización de múltiples análisis de frecuencia variando la longitud del registro disponible (por ejemplo 90 años, 80 años,..., 30 años).

Posteriormente, se analizaron las precipitaciones máximas diarias anuales y los coeficientes de frecuencias, obtenidos para distintos períodos de retorno, en función de la longitud del registro de medición. Lo anterior, buscando detectar un posible aumento y/o disminución de las precipitaciones máximas diarias (y coeficientes de frecuencia) en el último período de tiempo. Se destaca la importancia de estos valores considerando que son normalmente utilizados para fines de diseño y dimensionamiento de estructuras hidráulicas.

2. INFORMACIÓN UTILIZADA

La información utilizada en el presente estudio consistió en la recopilación de series de precipitaciones máximas diarias anuales de 18 estaciones pertenecientes a la Dirección General de Aguas y a la Dirección Meteorológica de Chile. Dichas estaciones, ubicadas entre la IV a la IX Región del país, fueron seleccionadas considerando una longitud mínima de medición de 50 años de registro.

Tabla 1: Estadísticas de precipitaciones máximas diarias utilizadas

Estación	Institución	Región	Latitud	Longitud	Inicio	Fin	N° Años
La Serena	DMC	IV	29 53 00	71 14 00	1918	2007	90
Cogotí 18	DGA	IV	31 05 00	70 57 00	1943	2007	65
Cogotí Embalse	DGA	IV	31 00 00	71 05 00	1943	2007	65
Recoleta Embalse	DGA	IV	30 30 00	71 05 00	1943	2007	65
Resguardo Los Patos	DGA	V	32 29 00	70 34 00	1940	2007	68
Riecillos	DGA	V	32 55 00	70 21 00	1929	2007	79
Valparaíso	DMC	V	33 05 00	71 40 00	1904	2007	104
Santiago, Quinta Normal	DMC	RM	33 28 00	70 38 00	1911	2007	97
La Rufina	DGA	VI	34 44 00	70 44 00	1929	2007	79

Estación	Institución	Región	Latitud	Longitud	Inicio	Fin	N° Años
Rapel	DGA	VI	33 56 00	71 44 00	1940	2007	68
Ancoa Embalse	DGA	VII	35 53 00	71 19 00	1957	2007	51
Los Queñes	DGA	VII	34 59 00	70 48 00	1938	2007	70
Armerillo	DGA	VII	35 42 00	71 04 00	1920	2007	88
Bullleo Embalse	DGA	VII	36 17 00	71 24 00	1930	2007	78
Concepción	DMC	VIII	36 47 00	73 04 00	1920	2007	88
Fundo Atacalco	DGA	VIII	36 54 00	71 34 00	1930	2007	78
Lumaco	DGA	IX	38 09 00	72 54 00	1948	2007	60
Pueblo Nuevo (Temuco)	DGA	IX	38 44 00	72 34 00	1954	2007	54

Tal y como se observa en la Tabla 1, las 18 estaciones utilizadas cuentan con registros de longitud de 51 a 104 años, siendo las estaciones de mayor longitud las pertenecientes a la Dirección Meteorológica de Chile. La longitud media de las estadísticas utilizadas es de 74,8 años, con una desviación estándar de 14,6 años.

La precipitación máxima diaria promedio de las estadísticas analizadas es de 79,2 mm/día con una desviación estándar de 29,1 mm/día.

3. ANALISIS DE LA INFORMACION Y METODOLOGÍA ADOPTADA.

3.1 ANÁLISIS DE FRECUENCIA

Se realizó un análisis de frecuencia a las series de precipitaciones máximas diarias con más de 50 años de registro, mostradas en la Tabla 1. Para esto se seleccionó la distribución de mejor ajuste, analizándose funciones de distribución Normal, LogNormal, Pearson III, LogPearson III y Gumbel, utilizándose para ello tanto criterios gráficos como analíticos (coeficiente de correlación R^2 y test de bondad de ajuste χ^2).

Una vez seleccionada la función de distribución para la longitud total del registro de cada estadística de precipitaciones máximas diarias, se procedió a realizar sucesivos análisis de frecuencia con dicha distribución pero para longitudes menores, de 10 en 10 años, hasta llegar a una longitud mínima de 30 años. En la Tabla 2 se presentan las funciones de distribución seleccionadas para cada estación y otros estadísticos de interés.

Tabla 2: Selección de función distribución de mejor ajuste y otros estadísticos

Estación	N° Años	Precipitación Media (mm/día)	Desv. Estándar (mm/día)	Máxima Media (mm / día)	Distribución Utilizada
La Serena	90	32.7	21.5	104.7	Gumbel
Cogotí 18	65	48.7	25.7	120	Gumbel
Cogotí Embalse	65	46.4	27.0	129	Gumbel
Recoleta Embalse	65	32.9	21.4	110	Gumbel
Resguardo LP	68	49.9	21.6	120	Gumbel
Riecillos	79	71.3	31.0	163.6	Pearson III
Valparaíso	104	65.5	32.1	190.6	Log Pearson III
Santiago, Qta N	97	46.8	18.3	111.1	Gumbel
La Rufina	79	96.6	30.8	179	Pearson III

Estación	N° Años	Precipitación Media (mm/día)	Desv. Estándar (mm/día)	Máxima Media (mm / día)	Distribución Utilizada
Rapel	68	68.7	25.7	147	Log Pearson III
Ancoa Embalse	51	111.7	37.6	260	Gumbel
Los Queñes	70	101.6	32.3	206	Gumbel
Armerillo	88	189.9	59.9	372.8	Gumbel
Bullileo Embalse	78	135.9	38.4	244.4	Gumbel
Concepción	88	81.8	27.2	162.4	Gumbel
Fundo Atacalco	78	127.9	33.7	233	Gumbel
Lumaco	60	58.6	20.4	151.5	Gumbel
Pueblo Nuevo	54	58.7	18.7	129.8	Log Pearson III

A partir de los análisis de frecuencias realizados se obtuvieron precipitaciones máximas diarias para distintos períodos de retorno y distintas longitudes de registro, además de esto, se calcularon coeficientes de frecuencias y estadísticos que dependen de esta misma variable.

3.2 ANALISIS DE TENDENCIA UTILIZANDO PROMEDIOS MOVILES

Para efectuar el análisis de las tendencias de las precipitaciones máximas diarias anuales, se requiere contar con registros de mayor longitud. Dado lo anterior, para este análisis se decidió utilizar sólo aquellas estaciones que cuenten con más de 80 años de información.

Para analizar la variación de las precipitaciones máximas diarias anuales en función del tiempo, se calcularon los promedios móviles de 20 y 30 años, los cuales permiten reducir el posible efecto de variaciones puntuales de los valores.

3.3 ANÁLISIS DE TENDENCIA UTILIZANDO EL TEST DE MANN - KENDALL

El test de Mann - Kendall se basa en el cálculo del estadístico S (ecuación 1), el cual mide la dependencia monótonica de y (variable en análisis) con respecto a x (tiempo). Este test se calcula como se indica a continuación:

$$S = P - M \quad (1)$$

Donde:

P = "número de aumentos", es el número de veces que y se incrementa cuando x se incrementa o el número de pares tal que $y_i < y_j$ para todo $i < j$,

M = "número de disminuciones," es el número de veces que y decrece cuando x decrece, o el número de pares tal que $y_i > y_j$ para todos $i < j$.

En las expresiones anteriores, se tiene $i = 1, \dots, (n - 1)$ y $j = (i + 1), \dots, n$.

Si el número de datos disponibles es mayor a 10, el test puede ser modificado para que se ajuste a una distribución normal mediante la definición del parámetro Z_s (ecuación 2), que se define a continuación:

$$Z_s = \begin{cases} \frac{S-1}{\sigma_s} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S-1}{\sigma_s} & S < 0 \end{cases} \quad (2), \text{ donde } \sigma_s = \sqrt{\frac{n}{18} \cdot (n-1) \cdot (2 \cdot n + 5)} \quad (3)$$

La hipótesis nula (H_0), de que no hay tendencia, se rechaza con un nivel de significancia α , si $|Z_s| < Z_{crit}$, donde Z_{crit} es el valor de la distribución normal estándar asociada a una probabilidad de excedencia de $\alpha/2$.

4. RESULTADOS OBTENIDOS

4.1 ANALISIS DE FRECUENCIA Y CARACTERIZACIÓN DE VALORES PARA PERIODOS DE RETORNO BAJOS Y ALTOS.

Tal y como fue presentado en la Sección 3, a las estadísticas de precipitaciones máximas diarias con más de 50 años de medición se les realizó un análisis de frecuencia variable dependiendo de la longitud de los registros. Como resumen, se presenta en la Tabla 3 las precipitaciones máximas diarias obtenidas para períodos de retorno de 2, 50 y 100 años para todas las estaciones analizadas.

De los resultados presentados en la Tabla 3 se puede observar que las precipitaciones máximas diarias obtenidas para los distintos períodos de retorno tienden, en general, a aumentar para los registros de los últimos 30 a 40 años, con respecto a las precipitaciones obtenidas para registros de mayor longitud. Esta condición, resulta más patente al observar las precipitaciones máximas diarias para períodos de retorno altos.

Para las estaciones pertenecientes a las Regiones V, Metropolitana, VIII y IX, se observa este mismo patrón de comportamiento, existiendo un aumento en función de la longitud del registro desde los últimos 80 años aproximadamente. En la Figura 1 se presentan las precipitaciones máximas diarias de 100 años de período de retorno para dichas estaciones.

Por otro lado, para las estaciones de la IV Región no se observa un aumento de la precipitación máxima diaria en función de la longitud del registro de medición, sin embargo, se observa igualmente un aumento de ésta en el último período de tiempo (ver Figura 2).

Para las estaciones de la VII Región, en cambio, no se observa un aumento en la precipitación dependiendo de la longitud del registro de medición (ver Figura 3).

Tabla 3: Precipitaciones Máximas Diarias para T = 2, 50 y 100 años

Est.	T (años)	Longitud del Registro (años)							Est.	T (años)	Longitud del Registro (años)											
		30	40	50	60	70	80	90			30	40	50	60	70	80	90	100	104			
La Serena	2	28	27	27	27	29	29	29	Recoleta	2	30	28	29	30								
	50	102	94	89	91	94	92	92		50	100	92	91	94								
	100	116	107	102	103	107	104	105		100	114	104	103	107								
	μ	31	30	30	31	33	33	33		μ	33	31	32	33								
Cogotí 18	2	43	41	43	44				Cogotí Emb.	2	42	40	41	42								
	50	135	122	122	122					50	134	123	123	124								
	100	153	138	138	137					100	152	139	139	141								
	μ	47	45	47	48					μ	46	44	45	46								
Resguardo LP	2	49	45	47	47				Valparaíso	2	64	57	56	56	54	55	56	57	58			
	50	129	120	117	114					50	183	169	156	148	143	141	151	159	157			
	100	145	135	131	128					100	217	200	184	172	167	163	175	186	183			
	μ	52	49	50	51					μ	74	65	64	63	61	61	64	65	65			
Stgo. Qta N	2	47	44	43	44	44	44	44	Riecillos	2	83	77	75	71	69							
	50	116	110	103	101	98	96	99		50	163	158	153	149	146							
	100	130	122	115	112	108	106	110		100	175	170	165	161	159							
	μ	50	47	47	47	47	47	47		μ	84	79	76	73	72							
La Rufina	2	103	103	102	100	98			Rapel	2	64	63	65	66								
	50	178	171	171	171	169				50	135	138	131	130								
	100	190	181	182	182	180				100	149	154	142	141								
	μ	105	104	103	102	100				μ	68	68	68	69								
Ancoa	2	113	112	107					Armerillo	2	182	184	178	174	178	179	181					
	50	205	230	221						50	340	356	344	354	353	349	358					
	100	224	254	243						100	372	390	377	390	387	383	393					
	μ	117	118	113						μ	190	192	187	184	187	188	190					
Bullileo	2	132	134	129	128	127			Queñes	2	101	100	100	97	96							
	50	241	254	248	241	240				50	189	192	191	184	193							
	100	262	278	271	263	262				100	206	210	209	201	212							
	μ	137	140	135	134	133				μ	105	105	105	101	102							
Atacalco	2	129	129	122	122	122			Concepcion	2	79	75	76	75	77	77						
	50	233	236	231	227	225				50	182	172	167	160	160	157						
	100	253	257	253	248	245				100	203	192	185	177	177	173						
	μ	134	135	128	128	127				μ	84	80	80	80	81	81						
Lumaco	2	59	56	55	55				Pueblo Nuevo	2	57	57	55									
	50	135	125	120	117					50	115	112	110									
	100	151	139	133	129					100	130	125	122									
	μ	63	59	59	59					μ	62	60	59									

μ: Promedio precipitaciones máximas diarias (mm)

Figura 1: Precipitaciones Máximas Diarias Regiones V-RM, VIII y IX (T = 100 años)

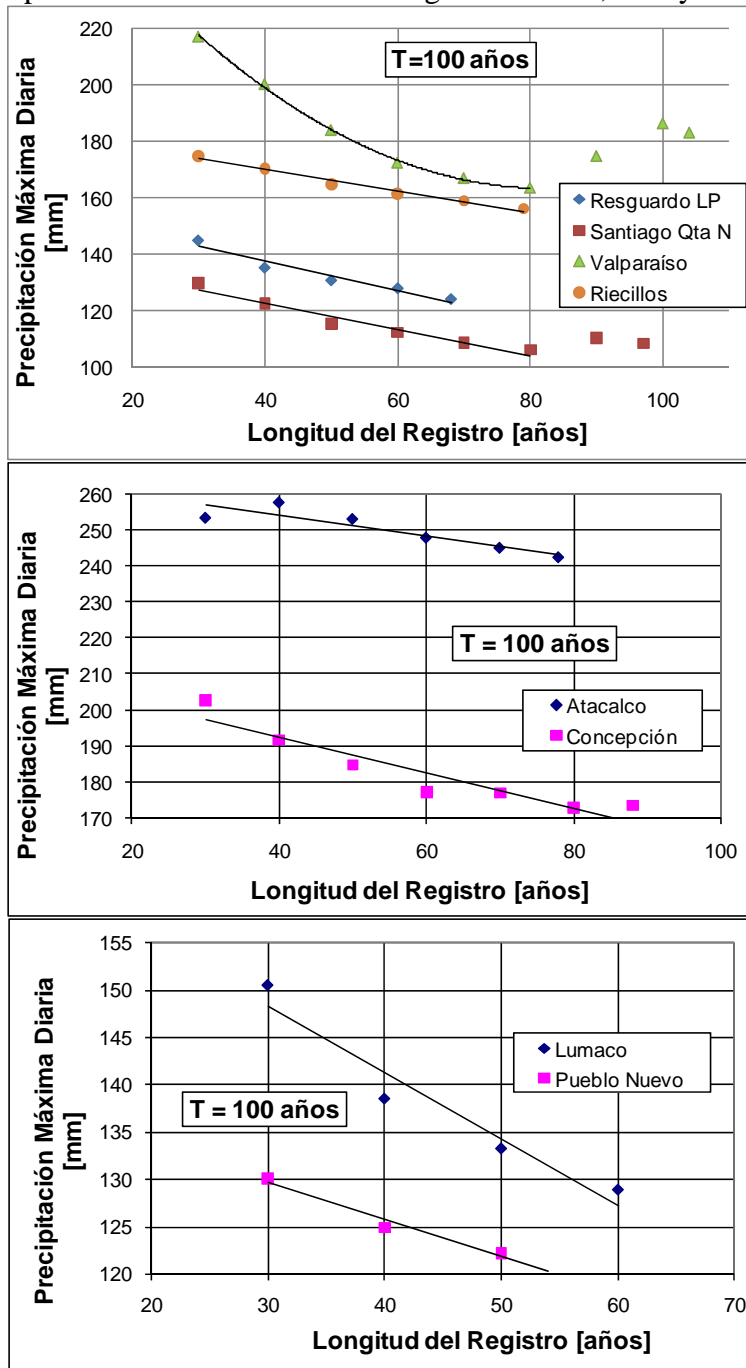


Figura 2: Precipitaciones Máximas Diarias IV Región (T = 100 años)

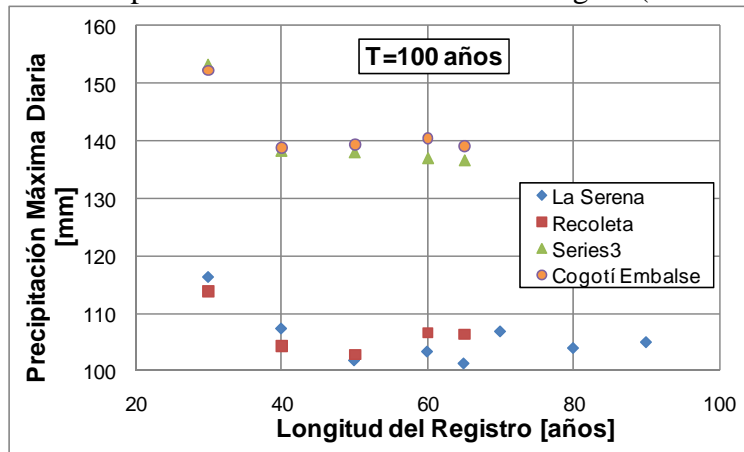
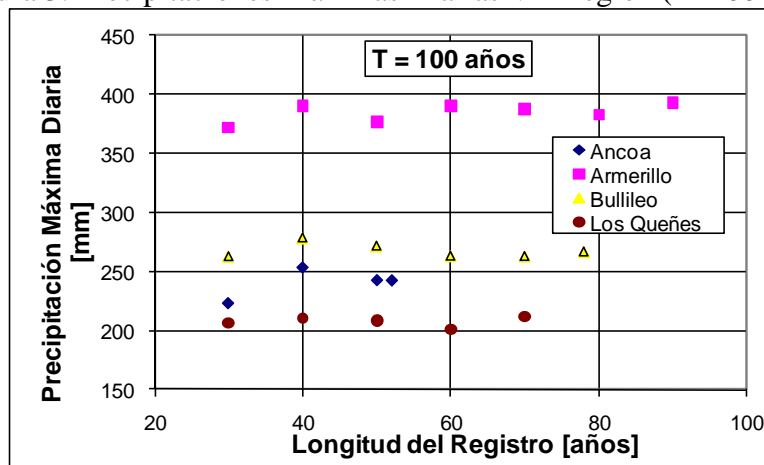


Figura 3: Precipitaciones Máximas Diarias VII Región (T=100 años)



Con respecto a los coeficientes de frecuencias se obtuvo un patrón común en el 50% de las estaciones, mostrándose una tendencia de aumento de los coeficientes al disminuir la longitud del registro para períodos de retorno por sobre 10 años y el efecto contrario, es decir una tendencia de disminución de los coeficientes de frecuencia al disminuir la longitud del registro para períodos de retorno inferiores a 10 años. En la Figura 4 se presentan los coeficientes de frecuencia para períodos de retorno de 2 y 200 años para dichas estaciones.

Para las estaciones de la VI y VII no se observa un comportamiento característico, pero sí una variación en los coeficientes, mientras que para la estación Riecillos se observa el comportamiento contrario al descrito anteriormente.

Con respecto a la precipitación media anual máxima diaria para las estaciones La Rufina, Valparaíso y Riecillos (y otras en menor proporción) se muestra una tendencia de aumento de las precipitaciones al disminuir la longitud del registro desde los últimos 80 años aproximadamente, lo cual es presentado en la Figura 5. Sin embargo, en general no se observa un patrón común de aumento o disminución de las precipitaciones dependiendo de la longitud del registro de medición.

Figura 4: Coeficientes de Frecuencia para T=2 y 200 años

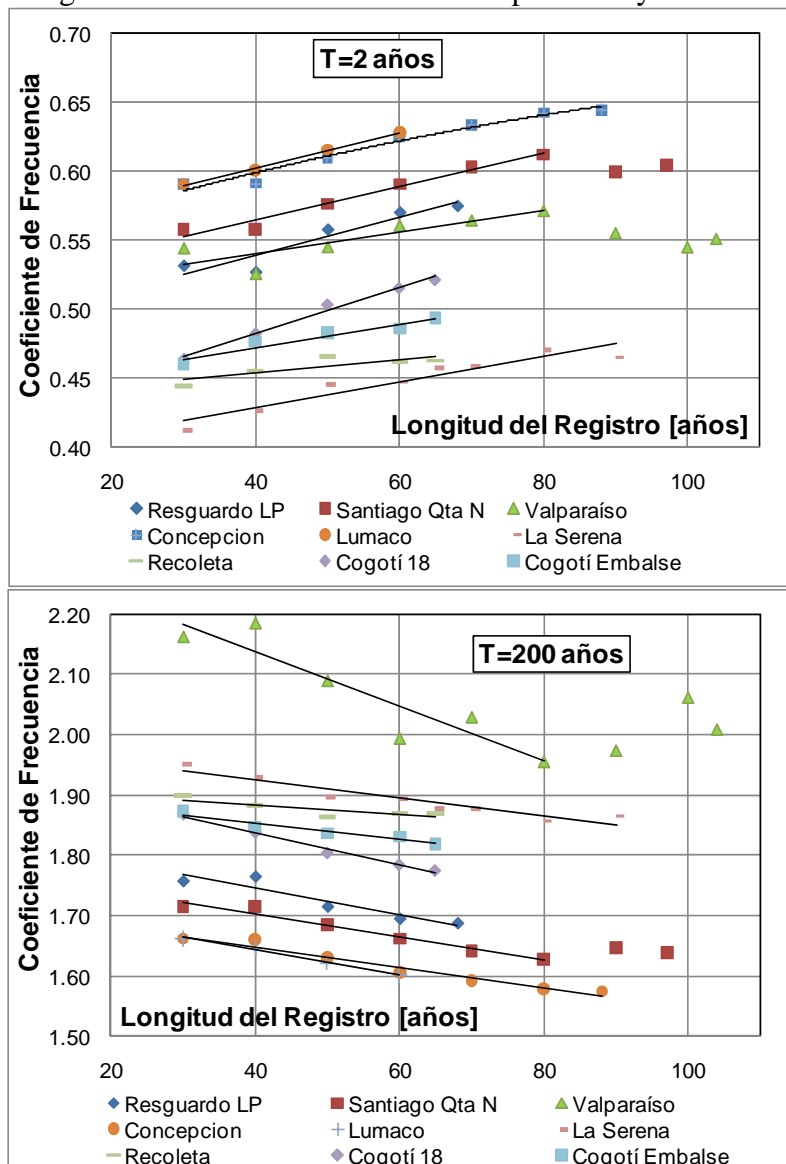
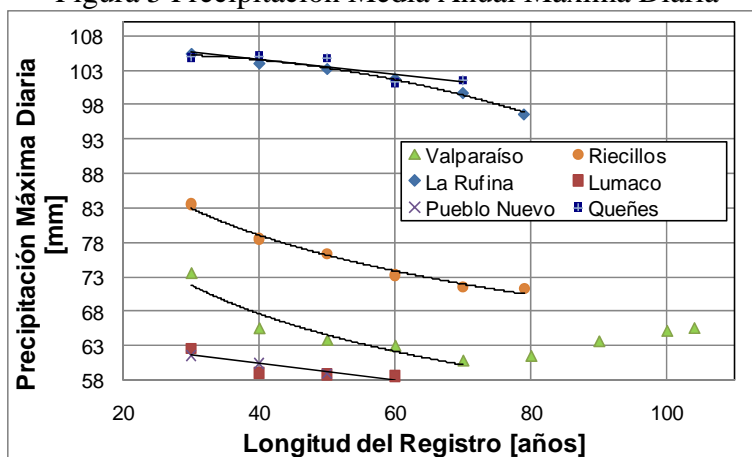


Figura 5 Precipitación Media Anual Máxima Diaria



4.2 ANALISIS DE TENDENCIA UTILIZANDO PROMEDIOS MOVILES

Para el estudio de promedios móviles se seleccionaron estaciones con registros de extensión del orden de 80 años, así, las estaciones consideradas fueron: La Serena (90 años), Riecillos (79 años), Valparaíso (104 años), Santiago (97 años), La Rufina (79 años), Armerillo (91 años) y Concepción (88 años).

Al analizar los promedios móviles de 20 y 30 años, que se presentan en las Figuras 6, 7 y 8, se aprecia para la estación La Serena una tendencia decreciente hasta 1970 y constante a partir de dicha década. Por otra parte, en las restantes estaciones para el mismo periodo se aprecia una tendencia marcadamente creciente a partir de los años 70 en adelante.

En las estaciones con registros de longitud del orden de 100 años, se observa una tendencia pronunciada decreciente entre la década del 30 al 70 aproximadamente, revirtiéndose dicha tendencia desde los 70 en adelante. En estas estaciones se obtienen promedios móviles similares para el periodo inicial y final registrado.

Figura 6: Promedios Móviles 20 y 30 años. Estaciones la Serena y Riecillos

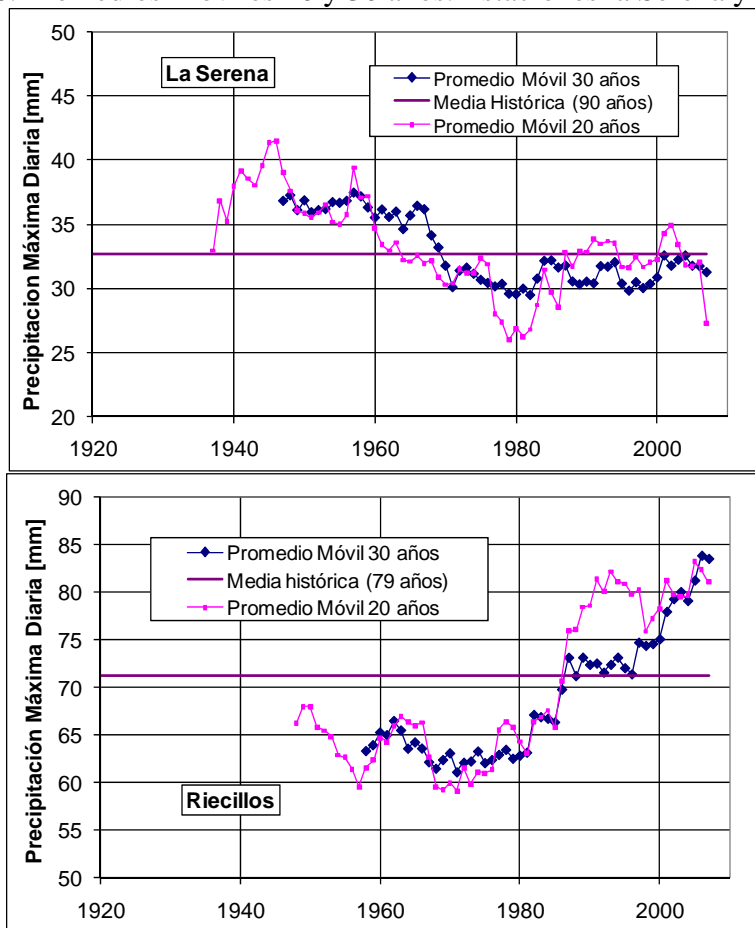


Figura 7: Promedios Móviles 20 y 30 años. Estaciones Valparaíso, Santiago y La Rufina

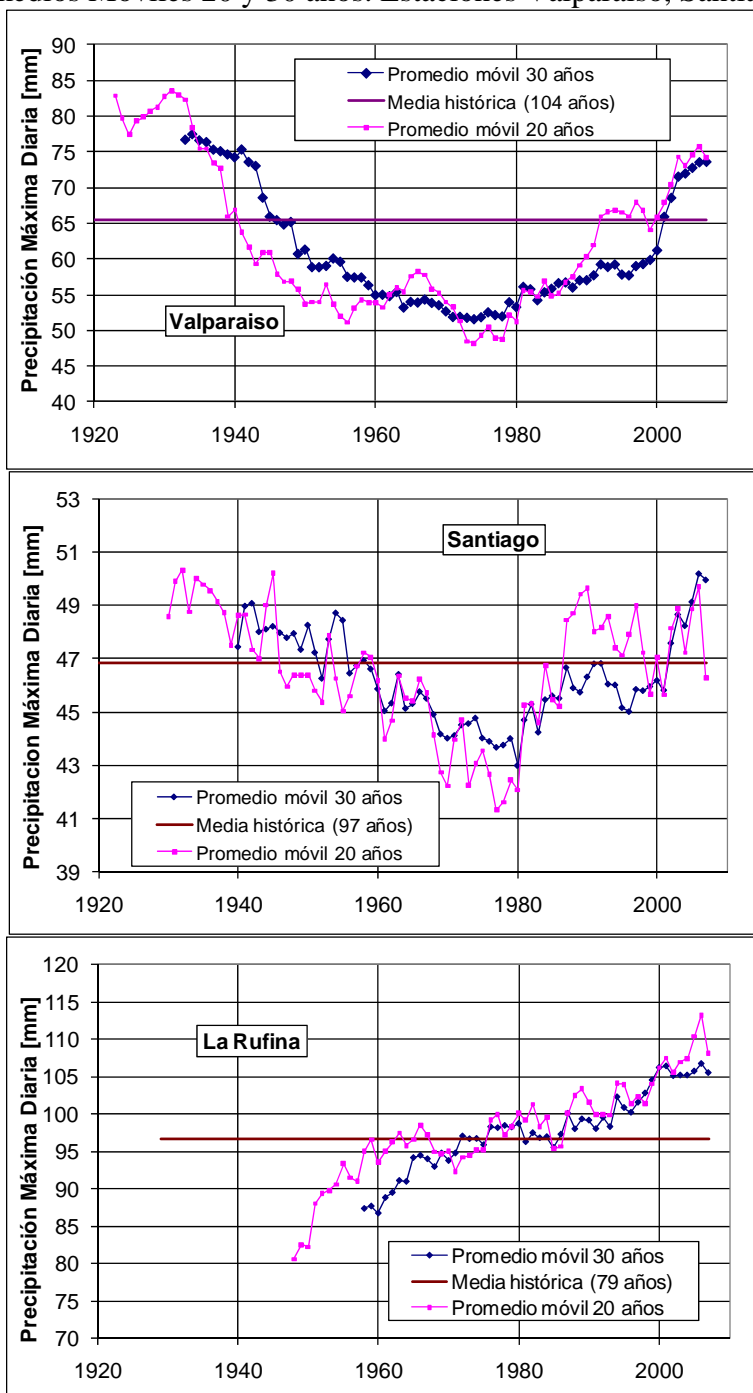
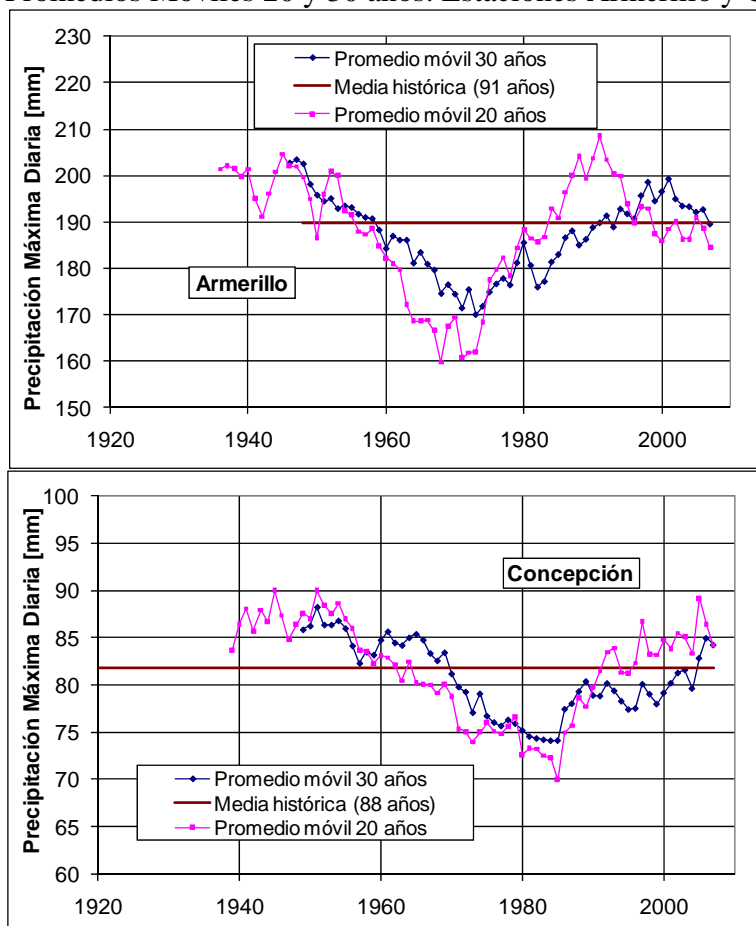


Figura 8: Promedios Móviles 20 y 30 años. Estaciones Armerillo y Concepción



4.3 ANÁLISIS DE TENDENCIA UTILIZANDO EL TEST DE MANN - KENDALL

En la Tabla 4 se presentan para niveles de significancia del 5% y 10% los resultados obtenidos al aplicar el test de Mann – Kendall.

Tabla 4: Resultados Test de Mann - Kendall

Región	Año	N	Z _s	Tendencia	Nivel de Significancia	
					5%	10%
					Rechazo Ho (Existe Tendencia)	
IV	LA SERENA	90	-1,39	-	-	-
	COGOTI 18	65	-1,50	-	-	-
	COGOTI EMBALSE	65	-0,64	-	-	-
	RECOLETA EMBALSE	65	-0,23	-	-	-
V – RM	RESGUARDO LOS PATOS	68	0,24	+	-	-
	RIECILLOS	79	1,94	+	-	Si
	VALPARAÍSO	104	-0,58	-	-	-
	SANTIAGO	97	-0,02	-	-	-
VI	LA RUFINA	79	3,06	+	Si	Si
	RAPEL	68	-0,25	-	-	-

Región	Año	N	Z_s	Tendencia	Nivel de Significancia	
					5%	10%
					Rechazo H_0 (Existe Tendencia)	
VII	ANCOA EMBALSE	51	2,21	+	Si	Si
	QUEÑES	70	1,21	+	-	-
	ARMERILLO	91	-0,50	-	-	-
VIII	BULLILEO EMBALSE	78	-0,10	-	-	-
	CONCEPCIÓN	88	-0,90	-	-	-
	FUNDO ATACALCO	78	1,00	+	-	-
IX	LUMACO	60	1,00	+	-	-
	PUEBLO NUEVO (TEMUCO)	54	1,63	+	-	-

Tendencia	Nº Estaciones	2	3
	% Estaciones	11%	17%

Del análisis de los valores obtenidos para niveles de significancia de 5% y 10% se puede colegir que entre un 10% y un 20% de las estaciones presentarían cambios de tendencia. Es importante destacar que para la IV región en todas las estaciones se observa una tendencia a la baja de las precipitaciones máximas diarias anuales ($Z_s < 0$).

5. CONCLUSIONES

Con respecto a las precipitaciones máximas diarias obtenidas para los distintos períodos de retorno se puede concluir que existe una tendencia general de aumento de éstas para los registros de los últimos 30 a 40 años.

Para las estaciones pertenecientes a las Regiones V, Metropolitana, VIII y IX, se observa un aumento de las precipitaciones máximas diarias (para distintos T) en función de la longitud del registro desde aproximadamente los últimos 80 años. Por otro lado, para las estaciones de la IV Región no se observa una tendencia constante de aumento de la precipitación máxima diaria en función de la longitud del registro, sin embargo, se muestra igualmente un aumento de ésta en el último período de tiempo (30-40 años). Para las estaciones de la VII Región, en cambio, no se observa aumento en la precipitación al aumentar la longitud del registro de medición (ver Figura 3).

Con respecto a los coeficientes de frecuencia se obtuvo un patrón común en el 50% de las estaciones, mostrándose un aumento de éstos al disminuir la longitud del registro para períodos de retorno por sobre 10 años y el efecto contrario, es decir una disminución de los coeficientes de frecuencia a menor longitud del registro para períodos de retorno inferiores a 10 años.

Para la precipitación media anual máxima diaria, en general, no se observa un patrón común de aumento o disminución de las precipitaciones dependiendo de la longitud del registro. Se destaca un aumento de las precipitaciones en función de la extensión del registro para las estaciones La Rufina, Valparaíso y Riecillos (Figura 5).

Al analizar los resultados obtenidos de los promedios móviles de 20 y 30 años, se aprecia para la estación La Serena una tendencia decreciente hasta 1970 y constante a partir de dicha década. En las restantes estaciones (Riecillos, Valparaíso, Santiago, La Rufina, Armerillo y Concepción) se detectó una tendencia marcadamente creciente, la cual se inició entre los años 1960 a 1980, dependiendo de la estación considerada.

No obstante lo anterior, se debe mencionar que en aquellas estaciones con registros de longitud del orden de 100 años (Valparaíso, Santiago, Armerillo y Concepción), es posible apreciar dos tendencias: una primera decreciente comprendida entre la década del 30 al 70 aproximadamente y una segunda creciente, obteniéndose promedios móviles del mismo orden de magnitud que los de inicios del siglo pasado (ver Figura 7 y 8).

En relación a los resultados obtenidos con el test de Mann – Kendall es importante destacar que en todas las estaciones de la IV región el parámetro Z_s es negativo, lo cual es un indicador de una tendencia a la disminución de las precipitaciones máximas diarias.

Por otra parte, es posible afirmar con un nivel de confianza mayor al 90% que las estaciones Riecillos, La Rufina y Ancoa Embalse presentan una tendencia creciente. Lo anterior, al ser interpretado en términos porcentuales, indicaría que entre un 10% y 20% de las estaciones utilizadas presentan dicha tendencia.

Se estima adecuado mantener esta línea de análisis, por la importancia que reviste la variable en estudio, precipitaciones máximas diarias, para fines de diseño y dimensionamiento de obras hidráulicas (estimación indirecta de caudales de diseño).

Como trabajo futuro se estima conveniente detectar cambios de tendencias en precipitaciones máximas asociadas a duraciones menores de 24 horas, en conjunto, con las temperaturas asociadas a dichas tormentas, por la importancia que tiene esta variable en cuencas de régimen nivo-pluvial.

REFERENCIAS

Chow, V.T. 1994. Hidrología Aplicada. Editorial Mc Graw – Hill Interamericana S.A.

Dirección General de Aguas. 2009. Banco Nacional de Aguas, series de precipitaciones máximas diarias anuales para distintas estaciones.

Dirección Meteorológica de Chile, “Anuarios Meteorológicos”, Varios Tomos 1904-2007

Garreaud, R. 2008. Aspectos Regionales del Cambio Climático Global. X Jornadas Francisco Javier Domínguez. Universidad de Chile.

Onoz,B., Bayazit, M. 2003. Power of the Statistical Tests for Trend Detection, Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences, Vol.27, p. 247-251.

Sadri, S., H. Madsen², P. S. Mikkelsen³, D. H. Burn¹.2009. Analysis of Extreme Rainfall Trends in Denmark. 33rd International Association of Hydraulic Engineering & Research (IAHR) Biennial Congress. Vancouver. Canada.

USGS, 2002. D.R. Helsel and R.M. Hirsch. Statistical Methods in Water Resources