2. TEORÍA DE REGIONALIZACIÓN

2.1 Introducción

Las mediciones hidrológicas se hacen con el fin de obtener información de los procesos hidrológicos. Esta información se utiliza para poder entender mejor estos procesos y para el diseño, análisis y toma de decisiones. Sin embargo en nuestro país gran parte del territorio no cuenta con equipo de medición o en ocasiones éste no opera de manera adecuada, lo que repercute directamente en la baja calidad o confiabilidad de la información o bien en la falta de esta. Eso trae como consecuencia que la estimación de una avenida de diseño sea poco confiable, por lo que se recurre al uso de coeficientes de seguridad grandes, provocando que el costo de las obras civiles sea muy alto.

Con el estudio regional que se plantea se pretende reunir los datos de varias estaciones climatológicas en una sola muestra de tal manera que se cuente con un mayor número de datos y con ellos estimar la lluvia esperada en un lugar donde la información climatológica es escaza o inexistente. De esta forma el resultado será más confiable que el que se tendría del estudio de cada una de las estaciones por separado.

Una de las formas más comunes para estimar la tormenta de diseño de las obras hidráulicas consiste en observar la tendencia que se define al dibujar las precipitaciones máximas anuales registrados en una determinada cuenca contra sus respectivos periodos de retorno; a estas precipitaciones máximas se les ajusta distintas distribuciones de probabilidad y se selecciona la que presente una mejor tendencia, para determinar la precipitación máxima anual con un determinado periodo de retorno.

Sin embargo, cuando se desea conocer la precipitación para un periodo de retorno mayor al número de años de registro, surge el problema de cómo extrapolar esa tendencia hasta el periodo de retorno deseado, particularmente en cuencas susceptibles de ser atacadas directamente por ciclones, donde la estadística de precipitaciones máximas anuales muestra la presencia de dos poblaciones: una con valores relativamente pequeños, que corresponde a años en los que ningún huracán incidió directamente, y otra, con valores grandes, que están relacionados con la incidencia directa de eventos extraordinarios en las cuencas.

Esto hace que la extrapolación de las precipitaciones sea poco confiable, debido a que la incidencia de huracanes no es frecuente, de tal forma que la muestra que representa a estos eventos queda integrada casi siempre por muy pocos valores. Lo que se pretende al integrar toda una región es conseguir una muestra de datos mucho mayor, sobre todo del tipo ciclónico.

Para una mejor comprensión de dicho procedimiento, se describe a continuación un ejemplo hipotético: supongamos que una extensa región que se ve sometida a eventos ciclónicos, está formada por cinco cuencas iguales, separadas entre sí una distancia tal que un ciclón solo puede entrar directamente a una de ellas. A la salida de cada cuenca se tienen estaciones hidrométricas las cuales tienen registros de 50 años, durante los cuales la región ha sido atacada directamente por ciclones 10 veces, lo cual indica que la probabilidad de que en un año dado se presente un ciclón que incida directamente en la región es de 0.2.

Si utilizáramos cada cuenca por separado, para cada una de ellas existirían 50 valores de lluvias máximas medidas diarias anuales registradas, de las cuales probablemente solo dos fueron ocasionados por algún ciclón, por lo que la estimación de lluvia correspondiente a periodos de retorno mayor al número de años de registro resulta poco confiable. En cambio, si se trabaja para el conjunto de los 250 datos registrados en las cinco cuencas, la estimación de la lluvia correspondiente a un periodo de retorno de 500 años, por ejemplo, será mucho más confiable.

Para poder comparar este ejemplo con la situación real, es importante considerar que la incidencia de ciclones no necesariamente es igualmente probable en las cuencas de la región.

Debido a esta situación es necesario ajustar los resultados que se obtengan del análisis regional, utilizando un factor de peso proporcional a la probabilidad de ocurrencia.

2.2 Métodos de transformación

En este trabajo se transformarán las precipitaciones máximas anuales registradas en cada una de las cuencas pertenecientes al río Grijalva, procurando eliminar el efecto de las características individuales de cada una de ellas, para cada cuenca *m* se transforman las precipitaciones máximas P_i^m registradas en el año *i*, a una nueva variable P_i^R representativa de toda la región, en la que se ha eliminado el efecto de las características individuales de cada cuenca.

La variable reducida puede deducirse al realizar diferentes métodos de transformación. Se describen algunos de ellos a continuación:

2.2.1 Primer Método

Se estandariza la variable mediante parámetros estadísticos de la función Gumbel.

$$P_i^R = \frac{P_i^m + a^m}{c^m}$$

Donde

P_i^R variable estandarizada

P Precipitación máxima anual

m cuenca

i año

a = -β

c= 1/α

β y α son los respectivos parámetros de la función Gumbel.

2.2.2 Segundo método

La variable reducida se obtiene a partir de las precipitaciones máximas anuales asociadas a un periodo de retorno.

$$P_i^R = \frac{P_i^m}{PTr^m}$$

Donde

PTr^m Precipitación asociada a un periodo de retorno.

2.2.3 Tercer método

Este método consiste en obtener la variable reducida con base en la diferencia entre precipitaciones máximas anuales asociadas a dos periodos de retorno prefijados. La ecuación de este método es la siguiente:

$$P_i^R = \frac{P_i^m}{PTr1^m - PTr2^m}$$

Donde

$PTr1^m$ Precipitación asociada a un periodo de retorno prefijado.

$PTr2^m$ Precipitación asociada a otro periodo de retorno fijo.

2.2.4 Cuarto método

Este método toma en consideración el área de la cuenca en análisis, la siguiente expresión representa el método.

$$P_i^R = \frac{P_i^m}{A^m}$$

Donde

A área de la cuenca

2.2.5 Quinto método

La variable reducida está en función de la desviación estándar de las precipitaciones máximas anuales.

$$P_i^R = \frac{P_i^m}{\sigma^m}$$

Donde

σ Desviación estándar de las precipitaciones máximas anuales.

2.2.6 Sexto método

$$P_i^R = \frac{P_i^m}{\overline{P}^m}$$

Donde

$\bar{P}^m$ es el promedio de las lluvias medias diarias máximas anuales, en la estación m

P_i^R es la lluvia máxima diaria regionalizada registrada en el año i.

Carrizosa (1997) aplica estos seis métodos de transformación a las cuencas de la región del Pacífico Centro, localizada en la vertiente del Océano Pacífico de la República Mexicana, teniendo como resultado a este análisis, que el sexto método de transformación da muy buenos resultados, además de tener la ventaja de ser muy sencillo de aplicar debido a que solo depende del promedio de la muestra de datos. Por esta razón en el análisis para las cuencas del río Grijalva, se realizó la transformación de las precipitaciones máximas anuales mediante el sexto método de transformación, el cual se mostrará en el siguiente capítulo.

2.3 Zonas Homogéneas

Se dice que una serie de datos climatológicos es homogénea o consistente si es una muestra de una única población.

Si la serie de datos pareciera ser heterogénea será necesario hacer un ajuste o las correcciones pertinentes para garantizar su homogeneidad y con esto tener resultados confiables en los análisis hidrológicos que se realicen utilizando esta serie de datos.

Para garantizar que los datos medidos en las estaciones climatológicas de una zona sean homogéneos, será necesario aplicarles alguno de los métodos de transformación mencionados anteriormente. De esta manera se tendrá una muestra de datos homogénea, estos serán confiables para cualquier análisis hidrológico que se realice con ellos. Sin embargo existen pruebas estadísticas donde se verifica si el método usado es el correcto para homogenizar los datos, de tal manera que podamos estar seguros de que el método de transformación fue el correcto.

2.4 Pruebas estadísticas de homogeneidad

2.4.1 Prueba de Fisher

Las pruebas de homogeneidad son las que se utilizan al estudiar una o más muestras y se desea averiguar si proceden de una misma población.

En hidrología una de las pruebas mayormente usada es la prueba de comparación de varianzas o prueba de Fisher. Esta prueba se emplea cuando se requiere probar si las varianzas de dos poblaciones normales son iguales, a partir de las variaciones estimadas de dos muestras independientes extraídas de esas poblaciones. Cuando se utiliza esta prueba, calculamos el estadístico F, que básicamente es el cociente de las dos estimaciones independientes de la misma varianza poblacional σ^2. Lo cual se representa con la siguiente ecuación.

$$F = \frac{Primera\ estimacion\ de\ la\ varianza\ \sigma^2}{Segunda\ estimacion\ de\ la\ varianza\ \sigma^2} = \frac{s_1^2}{s_2^2}$$

Las tablas donde se tienen los puntos críticos de *F* son complicadas de utilizar, debido a que se necesita una tabla para cada nivel de significancia *p*. Es por esto que se han hecho tablas con valores críticos superiores de las distribuciones F para *p*=0.10, 0.05, 0.025,0.01 y 0.001. Las tablas 2.1 y 2.2 muestran los valores para 5% y 1% de nivel de significancia.

Tabla 2.1 Valores de la distribución F al nivel de significancia de 5%

Grados de libertad en el denominador	Grados de libertad del numerador																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1 2	15	20	24	30	40	60	120	∞
1	161.4	199.5	215.7	224.6	230.2	234.0	236.8	238.9	240.5	241.9	243.9	245.9	248.0	249.1	250.1	251.1	252.2	253.3	254.3
2	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.35	19.37	19.38	19.40	19.41	19.43	19.45	19.45	19.46	19.47	19.48	19.49	19.50
3	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79	8.74	8.70	8.66	8,64	8.62	8.59	8.57	8.55	8.53
4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96	5.91	5.86	5.80	5.77	5.75	5.72	5.69	5.66	5.63
5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.68	4.62	4.56	4.53	4.50	4.46	4.43	4.40	4.36
6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	4.00	3.94	3.87	3.84	3.81	3.77	3.74	3.70	3.67
7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64	3.57	3.51	3.44	3.41	3.38	3.34	3.30	3.27	3.23
8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.35	3.28	3.22	3.15	3.12	3.08	3.04	3.01	2.97	2.93
9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14	3.07	3.01	2.94	2.90	2.86	2.83	2 79	2.75	2.71
10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98	2.91	2.85	2.77	2.74	2.70	2.66	2.62	2.58	2.54
11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90	2.85	2.79	2.72	2.65	2.61	2.57	2.53	2.49	2.45	2.40
12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80	2.75	2.69	2.62	2.54	2.51	2.47	2.43	2.38	2.34	2.30
13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67	2.60	2.53	2.46	2.42	2.38	2.34	2.30	2.25	2.21
14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65	2.60	2.53	2.46	2.39	2.35	2.31	2.27	1.22	2.18	2.13
15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54	2.48	2.40	2.33	2.29	2.25	2.20	2.16	2.11	2.07
16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54	2,49	2.42	2.35	2.28	2.24	2.19	2.15	2.11	2.06	2.01
17	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49	2.45	2.38	2.31	2.23	2.19	2.15	2.10	2.06	2.01	1.96
18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46	2.41	2.34	2.27	2.19	2.15	2.11	2.06	2.02	1.97	1.92
19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42	2.38	2.31	2.23	2.16	2.11	2.07	2.03	1.98	1.93	1.88
20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39	2.35	2.28	2.20	2.12	2.08	2.04	1.99	1.95	1.90	1.84
21	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.49	2.42	2.37	2.32	2.25	2.18	2.10	2.05	2.01	1.96	1.92	1.87	1.81
22	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34	2.30	2.23	2.15	2.07	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84	1.78
23	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53	2.44	2.37	2.32	2.27	2.20	2.13	2.05	2.01	1.96	1.91	1.86	1.81	1.76
24	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.42	2.36	2.30	2.25	2.18	2.11	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84	1.79	1.73
25	4.24	3.39	2.99	2.76	2.60	2.49	2.40	2.34	2.28	2.24	2.16	2.09	2.01	1.96	1.92	1.87	1.82	1.77	1.71
26	4.23	3.37	2.98	2.74	2.59	2.47	2.39	2.32	2.27	2.22	2.15	2.07	1.99	1.95	1.90	1.85	1.80	1.75	1.69
27	4.21	3.35	2.96	2.73	2.57	2.46	2.37	2.31	2.25	2.20	2.13	2.06	1.97	1.93	1.88	1.84	1.79	1.73	1.67
28	4.20	3.34	2.95	2.71	2.56	2.45	2.36	2.29	2.24	2.19	2,12	2.04	1.96	1.91	1.87	1.82	1.77	1.71	1.65
29	4.18	3.33	2.93	2.70	2.55	2.43	2.35	2.28	2.22	2.18	2.10	2.03	1.94	1.90	1.85	1.81	1.75	1.70	1.64
30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21	2.16	2.09	2.01	1.93	1.89	1.84	1.79	1.74	1.68	1.62
40	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.25	2.18	2.12	2.08	2.00	1.92	1.84	1.79	1.74	1.69	1.64	1.58	1.51
60	4.00	3.15	2.76	2.53	2.37	2.25	2.17	2.10	2.04	1.99	1.92	1.84	1.75	1.70	1.65	1.59	1.53	1.47	1.39
120	3.92	3.07	2.68	2.45	2.29	2.17	2.09	2.02	1.96	1.91	1.83	1.75	1.66	1.61	1.55	1.50	1.43	1.35	1.25
∞	3.84	3.00	2.60	2.37	2.21	2.10	2.01	1.94	1.88	1.83	1.75	1.67	1.57	1.52	1.46	1.39	1.32	1.22	1.00

Tabla 2.2 Valores de la distribución F al nivel de significancia de 1%

Grados de libertad del denominador	Grados de libertad del numerador																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1 2	15	20	24	30	40	60	120	∞
1	4052	4999.50	5403	5625	5764	5859	5928	5982	6022	6056	6106	6157	6209	6235	6261	6287	6313	6339	6366
2	98.50	99.00	99.17	99.25	99.30	99.33	99.36	99.37	99.39	99.40	99.42	99.43	99.45	99.46	99.47	99.47	99.48	99.49	99.50
3	34.12	30.82	29.46	28.71	28.24	27.91	27.67	27.49	27.35	27.23	27.05	26.87	26.69	26.60	26.50	26.41	26.32	26.22	26.13
4	21.20	18,00	16.69	15.98	15.52	15.21	14.98	14.80	14.66	14.55	14.37	14.20	14.02	13.93	13.84	13.75	13.65	13.56	13.46
5	16.26	13.27	12.06	11.39	10.97	10.67	10.46	10.29	10.16	10.05	9.89	9.72	9.55	9.47	9.38	9.29	9.20	9.11	9.02
6	13.75	10.92	9.78	9.15	8.75	8.47	8.26	8.10	7.98	7.87	7.72	7.56	7.40	7.31	7.23	7.14	7.06	6.97	6.88
7	12.25	9.55	8.45	7.85	7.46	7.19	6.99	6.84	6.72	6.62	6.47	6.31	6.16	6.07	5.99	5.91	5.82	5.74	5.65
8	11.26	8.65	7.59	7.01	6.63	6.37	6.18	6.03	5.91	5.81	5.67	5.52	5.36	5.28	5.20	5.12	5.03	4.95	4.86
9	10.56	8.02	6.99	6.42	6.06	5.80	5.61	5.47	5.35	5.26	5.11	4.96	4.81	4.73	4.65	4.57	4.48	4.40	4.31
10	10.04	7.56	6.55	5.99	5.64	5.39	5.20	5.06	4.94	4.85	4.71	4.56	4.41	4.33	4.25	4.17	4.08	4.00	3.91
11	9.65	7.21	6.22	5.67	5.32	5.07	4.89	4.74	4.63	4.54	4.40	4.25	4.10	4.02	3.94	3.86	3.78	3.69	3.60
12	9.33	6.93	5.95	5.41	5.06	4.82	4.64	4.50	4.39	4.30	4.16	4.01	3.86	3.78	3.70	3.62	3.54	3.45	3.36
13	9.07	6.70	5.74	5.21	4.86	4.62	4.44	4.30	4.19	4.10	3.96	3.82	3.66	3.59	3.51	3.43	3.34	3.25	3.17
14	8.86	6.51	5.56	5.04	4.69	4.46	4.28	4.14	4.03	3.94	3.80	3.66	3.51	3.43	3.35	3.27	3.18	3.09	3.00
15	8.68	6.36	5.42	4.89	4.56	4.32	4.14	4.00	3.89	3.80	3.67	3.52	3.37	3.29	3.21	3.13	3.05	2.96	2.87
16	8.53	6.23	5.29	4.77	4.44	4.20	4.03	3.89	3.78	3.69	3.55	3.41	3.26	3.18	3.10	3.02	2.93	2.84	2.75
17	8.40	6.11	5.18	4.67	4.34	4.10	3.93	3.79	3.68	3.59	3.46	3.31	3.16	3.08	3.00	2.92	2.83	2.75	2.65
18	8.29	6.01	5.09	4.58	4.25	4.01	3.84	3.71	3.60	3.51	3.37	3.23	3.08	3.00	2.92	2.84	2.75	2.66	2.57
19	8.18	5.93	5.01	4.50	4.17	3.94	3.77	3.63	3.52	3.43	3.30	3.15	3.00	2.92	2.84	2.76	2.67	2.58	2.49
20	8.10	5.85	4.94	4.43	4.10	3.87	3.70	3,56	3.46	3.37	3.23	3.09	2.94	2.86	2.78	2.69	2.61	2.52	2.42
21	8.02	5.78	4.87	4.37	4.04	3.81	3.64	3.51	3.40	3.31	3.17	3.03	2.88	2.80	2.72	2.64	2.55	2.46	2.36
22	7.95	5.72	4.82	4.31	3.99	3.76	3.59	3.45	3.35	3.26	3.12	2.98	2.83	2.75	2.67	2.58	2.50	2.40	2.31
23	7.88	5.66	4.76	4.26	3.94	3.71	3.54	3.41	3.30	3,21	3.07	2.93	2.78	2.70	2.62	2.54	2.45	2.35	2.26
24	7.82	5.61	4.72	4.22	3.90	3.67	3.50	3.36	3.26	3.17	3.03	2.89	2.74	2.66	2.58	2.49	2.40	2.31	2.21
25	7.77	5.57	4.68	4.18	3.85	3.63	3.46	3.32	3.22	3.13	2.99	2.85	2.70	2.62	2.54	2.45	2.36	2.27	2.17
26	7.72	5.53	4.64	4.14	3.82	3.59	3.42	3.29	3.18	3.09	2.96	2,81	2.66	2.58	2.50	2.42	2.33	2.23	2.13
27	7.68	5.49	4.60	4.11	3.78	3.56	3.39	3.26	3.15	3.06	2.93	2.78	2.63	2.55	2.47	2.38	2.29	2.20	2.10
28	7.64	5.45	4.57	4.07	3.75	3.53	3.36	3.23	3.12	3.03	2.90	2.75	2.60	2.52	2.44	2.35	2.26	2.17	2.06
29	7.60	5.42	4.54	4.04	3.73	3.50	3.33	3.20	3.09	3.00	2.87	2.73	2.57	2.49	2.41	2.33	2.23	2.14	2.03
30	7.56	5.39	4.51	4.02	3.70	3.47	3.30	3.17	3.07	2.98	2.84	2.70	2.55	2.47	2.39	2.30	2.21	2.11	2.01
40	7.31	5.18	4.31	3.83	3.51	3.29	3.12	2.99	2.89	2.80	2.66	2.52	2.37	2.29	2.20	2.11	2.02	1.92	1.80
60	7.08	4.98	4.13	3.65	3.34	3.12	2.95	2.82	2.72	2.63	2.50	2.35	2.20	2.12	2.03	1.94	1.84	1.73	1.60
120	6.85	4.79	3.95	3.48	3.17	2.96	2.79	2.66	2.56	2.47	2.34	2.19	2.03	1.95	1.86	1.76	1.66	1.53	1.38
∞	6.63	4.61	3.78	3.32	3.02	2.80	2.64	2.51	2.41	2.32	2.18	2.04	1.88	1.79	1.70	1.59	1.47	1.32	1.00

La prueba de hipótesis para conocer si dos muestras de tamaño n_1 y n_2 corresponden a datos homogéneos es la siguiente:

Si el estadístico s_1^2 / s_2^2 tiene una distribución muestral que es una distribución F con

$gl_1 = n_1 - 1$ y $gl_2 = n_2 - 1$, entonces la estadística s_2^2 / s_1^2, el recíproco de F, tiene una

distribución muestral que es una distribución F con $gl_1 = n_2 - 1$ y $gl_2 = n_1 - 1$.

Como ambos estadísticos tienen la distribución F, es práctica común colocar la varianza mayor muestral en el numerador de la razón F.

Si el cociente se acerca a 1, entonces podemos decir que la diferencia entre dichas varianzas son iguales, si el cociente de las varianzas muestrales es sensiblemente distinto de 1 entonces se dice que no pertenecen a la misma población.

$$\frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2} = 1 \; es \; equivalente \; a \; \sigma_1^2 = \sigma_2^2$$

Debido a que las distribuciones F no son simétricas, para formar la región de rechazo para una prueba de dos colas, se puede simplificar los cálculos asegurando que se va a usar la cola derecha de la distribución F. Se usa una prueba de cola derecha porque solo estas áreas están dadas en las tablas 2.1 y 2.2.

Como ejemplo de la aplicación de esta prueba se tomará una de las cuencas del rio Grijalva, la cuenca a analizar es Almandro la cual cuenta con 11 estaciones climatológicas con diferentes años de registro, en la tabla 2.3 se muestran los registros individuales de precipitaciones máximas anuales en mm para cada estación perteneciente a la cuenca.

Tabla 2.3. Precipitaciones máximas anuales cuenca Almandro.

ALMANDRO											
Clave / Año	7005	7033	7122	7125	7149	7160	7186	7192	7195	7207	7390
1927			93								
1928			73								
1929			84								
1930			61								
1931			80								
1932											
1933			100								
1934			66								
1935			92								
1936			75								
1939											
1940		40									
1941		65									
1942		86									
1943											

1944											
1945											
1946		49	48				57				
1947		51	77				95				
1948		52	81								
1949		57	70				92				
1950		50	80				127				
1951		60	85				311				
1952		100					227				
1953		75	83				273				
1954		70	169				274				
1955		64	260				288				
1956		72	183				128				
1957		80	72								
1958		60	60								
1959		84	35								
1960		220	60				148				
1961		100	70				200				
1962		60	87				141				
1963		50	69				89				
1964		55	108				40	95			
1965	68	65	58					35			
1966	60	100	123					73			
1967	159	247	122		87			100			
1968	64	107	162				157	60			
1969	81	96	169			51		66			
1970	117		79	78	88	108	202	68			
1971			198	78	91			78			
1972	78		110	67	56	70		61	137		
1973	100		97	60	70	86	322	70	165	95	
1974	130		58	61	100	80	321	68	133	117	
1975	121		60	80	82	98		69	146	98	
1976	68		98	37	43	71		86	100	67	
1977	57		68	70	63	80		61	93	48	
1978	85		41	80	91	60		58	120	44	
1979	71		42	67	60	67		96	106	35	
1980	84		104	51	69	80		61	96	48	
1981	72		90	56	48	70		54	80	61	
1982	57			32	49	80		42	60	35	
1983	63			52	100	66		35	80	150	
1984	96			56	70	86		63	99	61	
1985	52			60	51	59		39	32	95	93
1986	114			60	65	85		38		60	217
1987	107			46	83	164		38		67	175
1988	77			48	62	109		32		45	280
1989	96			63	69	70			100	50	162
1990	90			39	95	47			178	52	162
1991	60			51	59	121			80	58	110
1992	99			44	59	136			105		151
1993	95			47	57	98			65	44	134
1994	51			53	46	150			110	36	126
1995				89	68	180			94	59	160
1996				103	48	130			99	66	102
1997				62	55	95			220	53	104
1998				60	42	113			61	58	108
1999				65	62	100			88	65	150
2000				80	42	81				65	140
2001				57	65	134				93	117
2002			92	49	42	102				57	205
2003			93	67		94				57	115
2004			86	66	40	77				63	114
2005			114	68	46	61				70	238
2006			53	77		83				75	199
2007				63	124	209				111	160

En este trabajo, con el objeto de homogeneizar los datos, se transformarán las lluvias diarias máximas anuales registrada en cada una de las estaciones consideradas para tomar en cuenta las variaciones climáticas que influyen en magnitud de las lluvias a escurrimiento con el sexto método de transformación, descrito anteriormente, con el fin de eliminar el efecto de las características individuales de cada estación.

La variable reducida en función del promedio de las lluvias medias diarias máximas anuales se calculará con la ecuación:

$$P_i^R = \frac{P_i^m}{\overline{\bar{P}^m}}$$

Donde

$\bar{P}^m$ Es el promedio de las lluvias medias diarias máximas anuales, en la estación m

P_i^R Es la lluvia máxima diaria regionalizada registrada en el año i.

Aplicando este método a los registro de la cuenca Almandro se obtiene los siguientes valores estandarizados con sus respectivas varianzas. Tabla 2.4.

Tabla 2.4 Valores estandarizados por el sexo método para la cuenca de Almandro

VALORES ESTANDARIZADOS											
Clave / Año	7033	7125	7005	7122	7149	7160	7186	7192	7195	7207	7390
1	0.488	1.268	0.798	1.004	1.318	0.535	0.31	1.537	1.295	1.432	0.608
2	0.793	1.268	0.704	0.793	1.325	1.127	0.517	0.566	1.555	1.765	1.418
3	1.049	1.089	1.867	0.902	1.371	0.729	0.501	1.181	1.256	1.48	1.144
4	0.598	0.975	0.751	0.659	0.841	0.891	0.691	1.618	1.38	1.014	1.829
5	0.622	0.991	0.949	0.864	1.053	0.834	1.694	0.971	0.946	0.719	1.058
6	0.635	1.3	1.374	1.08	1.511	1.022	1.234	1.068	0.875	0.666	1.058
7	0.696	0.603	0.916	0.713	1.237	0.735	1.487	1.1	1.133	0.534	0.719
8	0.61	1.143	1.174	0.988	0.644	0.834	1.49	1.262	0.998	0.729	0.985
9	0.732	1.3	1.526	0.81	0.947	0.62	1.566	0.987	0.903	0.921	0.877
10	1.219	1.089	1.421	0.518	1.384	0.693	0.696	1.133	0.756	0.527	0.824
11	0.915	0.829	0.798	0.832	0.909	0.834	0.803	1.1	0.567	2.253	1.045
12	0.854	0.91	0.669	0.875	1.04	0.73	1.089	1.116	0.759	0.919	0.663
13	0.78	0.52	0.998	0.756	0.733	0.834	0.765	1.391	0.936	1.427	0.678
14	0.872	0.845	0.828	0.864	0.747	0.683	0.485	0.981	0.303	0.906	0.707
15	0.976	0.902	0.98	0.918	1.51	0.891	0.218	0.938	0.946	1.013	0.977
16	0.732	0.975	0.845	0.896	1.063	0.615	0.852	1.547	1.683	0.684	0.916
17	1.024	0.975	0.669	1.825	0.771	0.886	1.1	0.981	0.756	0.749	0.763
18	2.683	0.74	0.74	2.808	0.984	1.71	1.754	0.88	0.988	0.787	1.336
19	1.219	0.78	1.127	1.976	1.254	1.136	1.748	0.686	0.615	0.87	0.748
20	0.732	1.024	0.608	0.778	0.942	0.73		0.566	1.04	0.659	0.745
21	0.61	0.626	1.334	0.648	1.04	0.485		1.026	0.886	0.537	1.557
22	0.671	0.821	1.255	0.378	1.443	1.256		0.623	0.936	0.886	1.297
23	0.793	0.707	0.906	0.648	0.889	1.413		0.615	2.08	0.993	1.046

24	1.219	0.764	1.121	0.756	0.886	1.022		0.615	0.575	0.791	
25	3.012	0.861	1.055	0.94	0.86	1.564		0.511	0.832	0.867	
26	1.305	1.438	0.708	0.745	0.697	1.877				0.984	
27	1.165	1.666	1.16	1.166	1.03	1.355				0.974	
28		1.008	1.119	0.626	0.727	0.99				1.394	
29		0.975	0.6	1.328	0.833	1.173				0.859	
30		1.057		1.318	0.636	1.043				0.859	
31		1.3		1.749	0.939	0.844				0.943	
32		0.923		1.825	0.636	1.397				1.055	
33		0.792		0.853	0.984	1.058				1.129	
34		1.094		2.138	0.636	0.98				1.676	
35		1.065		1.188	0.606	0.798					
36		1.109		1.048	0.697	0.631					
37		1.243		0.626	1.878	0.865					
38		1.024		0.648		2.179					
39				1.058							
40				0.734							
41				0.443							
42				0.454							
43				1.123							
44				0.972							
45				0.998							
46				1							
47				0.926							
48				1.231							
49				0.575							
Media	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Des. Est.	**0.58**	**0.24**	**0.306**	**0.469**	**0.305**	**0.375**	**0.506**	**0.32**	**0.383**	**0.381**	**0.315**
Varianza	**0.336**	**0.058**	**0.093**	**0.22**	**0.093**	**0.14**	**0.257**	**0.102**	**0.147**	**0.145**	**0.099**

El siguiente paso es hacer la división entre varianzas para cada par de estaciones, tomando como numerador a la mayor. Los resultados de estos cálculos los muestra la tabla 2.5.

Tabla 2.5. Valores obtenidos de la división entre varianzas

No años de registro / Estaciones	**7033**	**7125**	**7005**	**7122**	**7149**	**7160**	**7186**	**7192**	**7195**	**7207**	**7390**
	27	**38**	**29**	**49**	**37**	**38**	**19**	**25**	**25**	**34**	**23**
7033	1	**5.8336**	**3.6051**	1.5273	**3.6100**	2.3958	1.3118	**3.2919**	2.2951	2.3192	**3.3980**
7125		1	1.6181	**3.8195**	1.6160	2.4349	**4.4471**	1.772	2.5417	2.5153	1.7168
7005			1	2.3604	0.9987	1.5047	2.7483	1.0951	1.5708	1.5544	1.0609
7122				1	2.3636	1.5687	1.1643	2.1554	1.5027	1.5185	2.2248
7149					1	1.5068	2.7520	1.0966	1.5729	1.5565	1.0624
7160						1	1.8264	1.3740	1.0439	1.0330	1.4183
7186							1	2.5095	1.7496	1.7680	2.5904
7192								1	1.4343	1.4194	1.0322
7195									1	1.0105	1.4805
7207										1	1.4651
7390											1

Se observa que los marcados son valores muy altos y corresponden a las estaciones 7125, 7005, 7122, 7149, 7186, 7192 y 7390 que tienen las variaciones más altas y más bajas, respectivamente (ver figura 3.11).

Se obtiene el valor de las tablas 2.1 y 2.2 (para este análisis se utilizó la tabla 2.2), el cual compararemos con el valor de la tabla 2.5. El valor de la tabla 2.5 tiene que ser menor o cuando mucho mayor en un 50% al valor de la tabla 2.2, si se llega a cumplir esta condición entonces las estaciones son homogéneas.

Para el caso de Almandro se analizará la homogeneidad entre los datos de las estaciones 7033 y la 7125. La estación 7033 tiene una varianza de 0.336 y la de la estación 7125 es 0.058 por lo que la división da 5.833, este valor lo comparamos con la tabla 2.2 tomando en cuenta el número de años de registro de cada estación, al hacer la comparación se puede ver que el valor leído en la tabla 2.2 haciendo la interpolación correspondiente es de 2.28 por lo tanto el valor es menor que el de la tabla 2.5, inclusive si lo multiplicáramos por 1.5 se obtiene un valor igual a 3.42 el cual sigue siendo menor a 5.833, por lo que se dice que la transformación a estas estaciones no cumplen con la prueba.

A continuación se hará la comparación para un caso que si cumpla con la restricción, se analizarán las estaciones 7192 y la 7125 cuyas varianzas son 0.102 y 0.058 respectivamente y cuyo cocientes es de 1.772, este valor se compara con la tabla 2.2, realizando la comparación se puede ver que el valor de 2.030 de la tabla 2.2 es mayor que el valor de 1.772 por lo que se pude afirmar que la transformación aplicada a las estaciones 7192 y 7125 si cumple con la prueba de Fisher.

2.4.2 Otra prueba alternativa

La prueba de Fisher llega a ser muy conservadora, debido a que se basa en la distribución normal, sin embargo difícilmente las precipitaciones presentan dicha tendencia.

Fisher presupone la forma de la función de distribución por lo que se efectuó una nueva prueba a los datos de la cuenca de Almandro; en esta se considera la función de distribución obtenida al ajustar los valores estandarizados de la cuenca, a partir de la cual se generan números aleatorios y se forman nuevos grupos del mismo tamaño de la muestra para cada estación, obteniendo sus coeficientes de variación y comparándolos con los de los valores estandarizados, de esta manera se puede observar si los datos de la muestra transformada pueden considerarse homogéneos. A continuación se muestra el procedimiento realizado para esta prueba.

Con los datos de la tabla 2.4 se hizo un análisis estadístico asociando a los datos medidos una función de distribución de ajuste, empleando el programa AX. Las funciones de distribución que se emplearon fueron Doble Gumbel y Gumbel, resultando la de mejor ajuste para los datos la distribución Doble Gumbel.

En las figuras 2.1 y la tabla 2.6 se presentan los resultados de la extrapolación de las precipitaciones máximas anuales estandarizadas para varios periodos de retorno.

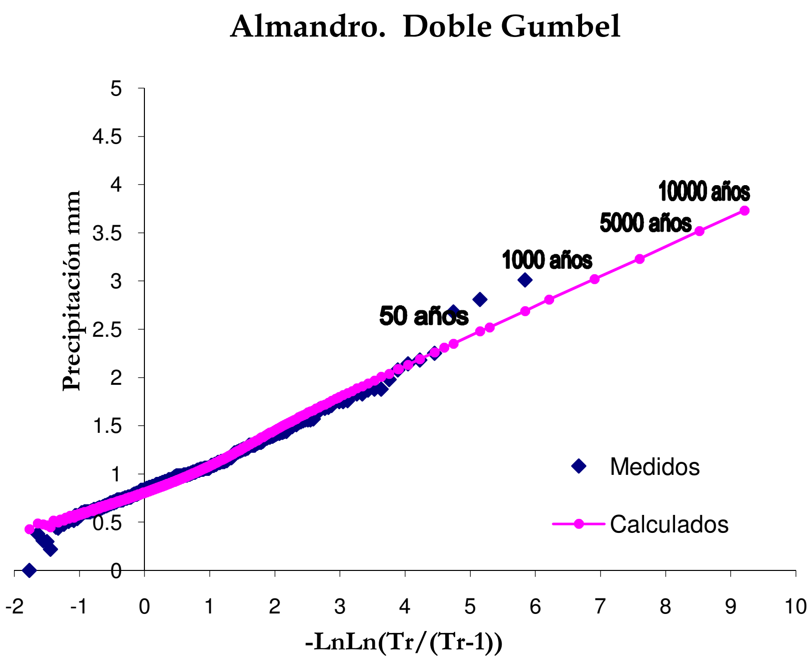

Figura 2.1 Función de distribución Doble Gumbel para la cuenca de Almandro.

Tabla 2.6 Extrapolación cuenca Almandro

Año	Tr
2	0.9
5	1.27
10	1.54
20	1.79
50	2.09
100	2.31
200	2.52
500	2.81
1000	3.02
2000	3.23
5000	3.52
10000	3.73

La ecuación obtenida para la función de distribución es la siguiente:

$$F(x) = 0.84\left(e^{-e^{-5.044(x-.770)}}\right) + (1-0.84)\left(e^{-e^{-3.235(x-1.449)}}\right)$$

A partir de la función de distribución resultante se generaron números aleatorios, con los cuales se formó un nuevo grupo de datos del mismo tamaño que la muestra original. La tabla 2.7 presenta los resultados; al final de cada columna se tiene el coeficiente de variación de los datos medidos y de los datos sintéticos.

Tabla 2.7. Valores sintéticos cuenca Almandro

VALORES SINTÉTICOS											
Estaciones / No años de registro	**7005**	**7033**	**7122**	**7125**	**7149**	**7160**	**7186**	**7192**	**7195**	**7207**	**7390**
1	1.765	0.815	0.993	1.149	1.308	0.725	0.776	0.840	0.813	1.045	0.849
2	0.750	1.745	0.644	0.802	0.480	0.838	1.008	1.184	1.130	2.223	1.076
3	0.512	0.780	0.858	0.773	0.912	1.460	0.706	0.588	1.312	0.607	0.993
4	0.588	1.009	0.831	1.182	1.996	1.529	1.417	1.295	1.942	1.259	0.834
5	1.185	0.785	0.847	0.830	0.631	0.744	1.653	0.922	0.850	0.626	0.754
6	0.633	0.929	0.963	1.055	1.558	1.353	0.525	1.006	1.268	0.899	0.642
7	1.638	0.850	0.990	1.131	1.463	0.756	0.947	0.596	0.634	0.804	1.058
8	0.811	1.409	0.879	0.993	0.396	1.408	0.832	0.738	1.385	1.211	0.870
9	0.497	0.701	1.121	1.127	1.685	0.641	1.088	0.647	1.386	2.000	1.027
10	0.603	0.898	0.832	0.756	1.606	0.770	1.237	0.856	0.949	1.087	1.029
11	0.630	0.634	0.739	0.818	0.963	0.607	0.744	0.664	2.065	0.909	0.819
12	1.332	0.842	0.876	0.894	1.678	0.684	0.942	1.162	0.520	0.767	1.045
13	1.477	0.541	0.706	1.387	0.759	0.783	1.149	1.097	0.718	1.079	0.782
14	1.741	1.138	1.273	1.398	1.088	0.910	0.835	1.075	0.621	1.875	0.476
15	0.778	0.849	1.174	0.546	1.990	0.686	0.851	1.000	1.175	1.129	0.828
16	2.003	0.992	0.568	1.011	1.213	1.707	0.727	1.426	1.411	1.479	0.966
17	0.803	0.705	0.869	0.828	1.617	0.641	0.822	1.719	0.855	0.898	1.608
18	0.592	0.706	0.784	0.993	0.918	0.638	1.075	0.885	0.888	0.629	0.838
19	0.960	0.792	0.980	1.436	0.939	1.132	0.695	0.482	1.099	1.500	1.478
20	0.954	0.700	0.959	0.574	0.647	0.882		1.028	1.447	1.668	0.765
21	1.066	1.220	1.703	0.979	1.578	0.640		2.480	0.590	0.517	0.914
22	0.470	1.143	1.644	1.439	1.148	0.917		0.803	1.433	1.263	1.030
23	0.724	0.666	1.701	1.147	0.975	0.909		0.899	0.506	0.727	0.748
24	0.832	1.232	0.839	1.188	0.693	0.776		0.616	1.284	1.233	
25	0.596	0.704	0.665	1.136	0.834	0.767		0.712	1.528	0.506	
26	0.874	0.652	0.837	1.497	0.872	0.654				0.799	
27	0.752	0.767	0.844	1.060	0.586	0.867				0.731	
28	0.757		0.834	0.728	0.673	0.868				0.620	
29	1.015		0.619	1.126	1.023	0.708				0.833	
30			0.579	1.735	0.926	1.017				0.943	
31			0.758	1.046	1.117	0.893				1.183	
32			1.046	0.603	1.208	1.599				0.787	
33			2.693	0.585	0.719	0.817				0.908	
34			0.900	1.034	1.144	1.132				2.248	
35			1.051	1.033	0.946	1.016					
36			0.967	2.310	0.677	0.868					

37			0.744	1.553	0.984	0.598					
38			1.519	0.951		1.819					
39			0.705								
40			0.630								
41			1.011								
42			0.754								
43			1.297								
44			0.709								
45			1.078								
46			0.721								
47			1.385								
48			1.119								
49			0.930								
Media	0.943	0.896	0.983	1.075	1.080	0.941	0.949	0.989	1.112	1.088	0.932
Desv. Est.	0.421	0.271	0.373	0.350	0.412	0.330	0.274	0.423	0.420	0.468	0.243
C.V. sintéticos	**0.446**	**0.302**	**0.380**	**0.326**	**0.381**	**0.350**	**0.289**	**0.428**	**0.378**	**0.430**	**0.261**
Varianza	0.177	0.073	0.139	0.122	0.170	0.109	0.075	0.179	0.177	0.219	0.059
C.V. medidos	**0.306**	**0.580**	**0.469**	**0.240**	**0.305**	**0.375**	**0.506**	**0.320**	**0.383**	**0.381**	**0.315**

Se ordena de mayor a menor los coeficientes de variación como lo muestra la tabla 2.8 y se obtiene la gráfica mostrada en la figura 2.2, en la cual podemos observar que los coeficientes de variación de los datos medidos como los de los sintéticos son muy similares, excepto para el caso de la estación 7033 para la cual el coeficiente medido de 0.58 se salen del patrón obtenido con los datos sintéticos, es por esto que podemos concluir que la muestra de los datos registrados en las estaciones presentes en la cuenca de Almandro son homogéneos entre sí.

Tabla 2.8 Comparación de los coeficientes de variación ordenados de mayor a menor

Estación	Coeficientes de variación	
	Sintéticos	**Medidos**
1	0.446	0.580
2	0.430	0.506
3	0.428	0.469
4	0.381	0.383
5	0.380	0.381
6	0.378	0.375
7	0.350	0.320
8	0.326	0.315
9	0.302	0.306
10	0.289	0.305
11	0.261	0.240

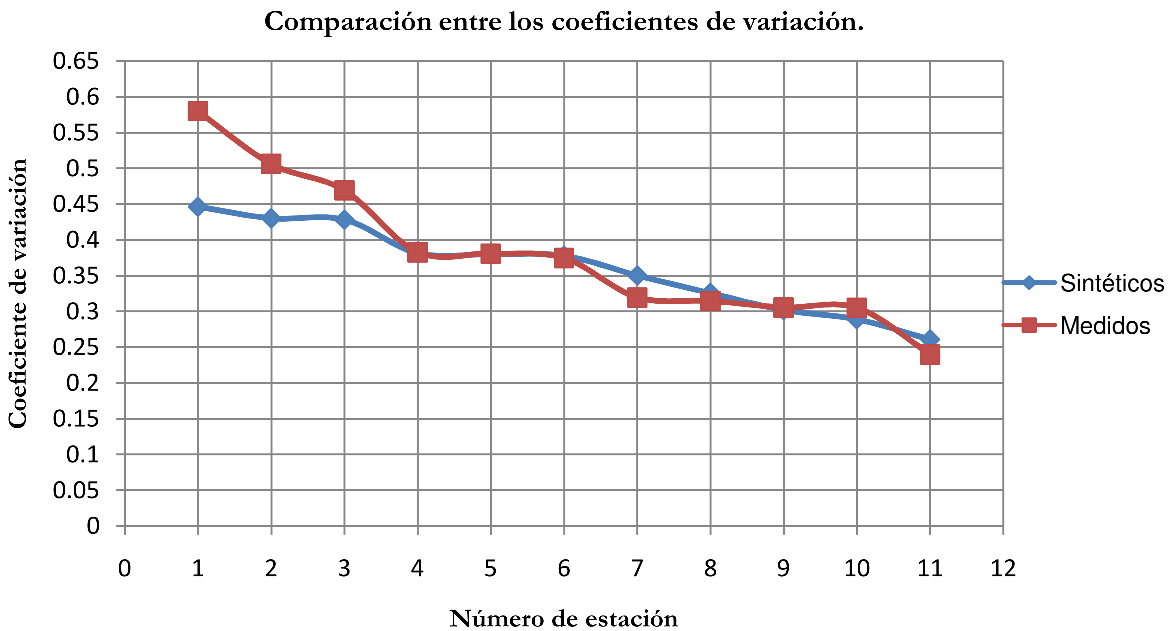

Figura 2.2. Comparación de los coeficientes de variación.

Las pruebas anteriores son ejemplos de las pruebas estadísticas que se podrían realizar a la hipótesis de que los datos correspondientes a varias estaciones una vez transformados pueden considerarse como pertenecientes a la misma población.

2.5 Resumen del proceso de Regionalización

Para el presente trabajo, se considera que, una región es la zona integrada por un determinado número de estaciones climatológicas. En el caso del análisis estadístico de precipitaciones máximas anuales, se denomina regionalización al proceso que se utiliza para que, con varios registros de precipitaciones máximas anuales tomados de distintas estaciones climatológicas localizadas en una determinada cuenca, se cree una nueva muestra de datos, representativa de toda la región, con mayor número de datos, con los cuales se realizan inferencias estadísticas más confiables. En este trabajo el proceso de regionalización corresponde a los siguientes pasos:

1) Se localizan las estaciones climatológicas que se encuentren en una cuenca en común, sin importar el área de influencia.
2) A continuación de procede a buscar la información climatológica en la base de datos CLICOM 2008 (SMN), para cada una de las estaciones.
3) Se realiza la selección de estaciones que se usarán para obtener los valores regionales de la cuenca. La selección de las estaciones que entraron en el estudio de

este trabajo se basó en la ubicación geográfica, y por el valor del coeficiente de variación de los registros de dichas estaciones.

4) Para cada estación se obtiene el valor máximo diario anual, al cual se le denomina 1 día de duración.
5) Con los datos anteriores se hace un análisis estadístico asociando a los datos medidos una función de distribución de ajuste. Las funciones de distribución que se emplearon fueron Gumbel y Doble Gumbel.
6) Con la extrapolación de las precipitaciones máximas anuales para varios periodos de retorno obtenida del paso anterior se dibuja la gráfica de ajuste para cada una de las estaciones.
7) Para obtener la gráfica regional de la cuenca y poder comparar con los datos individuales, la metodología utilizada se describe a continuación:

   a) Las precipitaciones máximas anuales registradas de cada estación es estandarizada mediante el método elegido.
   b) Con estos valores se corre el programa AX.EXE, para encontrar los valores extrapolados para diferentes periodos de retorno.
   c) Posteriormente se elabora con los datos estandarizados y los extrapolados, las gráficas que presentan los resultados del proceso de construcción de la curva regional. En el eje de las abscisas se presentan los valores de –LnLn(Tr/(Tr-1)) y en el de las ordenadas las precipitaciones estandarizadas y las precipitaciones extrapoladas para los diferentes periodos de retorno.
   d) Se comparan los valores de las precipitaciones para los periodos de retorno obtenidos del análisis individual contra el regional.
   e) Por último se realiza un análisis de estos resultados y se obtienen las conclusiones.