



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – HIDRÁULICA

**ESTIMACIÓN REGIONAL DE GASTOS DE DISEÑO; APLICACIÓN A LAS RH 27, 28 Y 29
DE LA REPÚBLICA MEXICANA.**

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
VÍCTOR OMAR ALCALÁ ORDAZ

TUTOR PRINCIPAL
DR. RAMÓN DOMÍNGUEZ MORA, INSTITUTO DE INGENIERÍA

COMITÉ TUTOR
DRA. MARITZA LILIANA ARGANIS JUÁREZ, INSTITUTO DE INGENIERÍA
DR. ÓSCAR ARTURO FUENTES MARILES, INSTITUTO DE INGENIERÍA
DR. RAFAEL BERNARDO CARMONA PAREDES, INSTITUTO DE INGENIERÍA
M.I. VÍCTOR FRACO, INSTITUTO DE INGENIERÍA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX. NOVIEMBRE DE 2016

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Fuentes Mariles Óscar Arturo
Secretario: M.I. Franco Víctor
Vocal: Dr. Domínguez Mora Ramón
1^{er.} Suplente: Dra. Arganis Juárez Maritza Liliana
2^{d o.} Suplente: Dr. Carmona Paredes Rafael Bernardo

CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO, CD. MX.

TUTOR DE TESIS:
DR. RAMÓN DOMÍNGUEZ MORA

FIRMA

AGRADECIMIENTOS

A mis padres y hermanos, fuente de inspiración incondicional para la realización de este trabajo.

Al Dr. Ramón Domínguez Mora por su amabilidad, paciencia y tiempo dedicado a la enseñanza, que hicieron posible la culminación de esta tesis.

A la Dra. Maritza Liliana Arganis Juárez, al Dr. Víctor Franco, Dr. Oscar Arturo Fuentes Mariles y Dr. Rafael Bernardo Carmona Paredes por sus sugerencias y recomendaciones en la complementación de esta tesis.

A Nancy por su paciencia, apoyo y consejos en esta etapa de mi vida.

A CONACYT por el apoyo económico recibido, ya que sin ello no hubiera sido posible la elaboración de este trabajo.

CONTENIDO

1.- INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.- <i>Objetivos.....</i>	1
1.2.- <i>Estructura de la tesis.....</i>	2
1.3.- <i>Antecedentes.....</i>	2
2.- DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	4
2.1.- <i>Región hidrológica No. 27 Norte de Veracruz.....</i>	4
2.1.1.- <i>Climatología.....</i>	5
2.1.2.- <i>Obras de aprovechamiento y de control.....</i>	5
2.2.- <i>Región hidrológica No. 28 Papaloapan.....</i>	5
2.2.1.- <i>Climatología.....</i>	6
2.2.2.- <i>Obras de aprovechamiento y de control.....</i>	6
2.3.- <i>Región hidrológica No. 29 Coatzacoalcos.....</i>	7
2.3.1.- <i>Climatología.....</i>	7
2.3.2.- <i>Obras de aprovechamiento y de control.....</i>	7
3.- METODOLOGÍA EMPLEADA.....	8
3.1.- <i>Delimitación de regiones homogéneas.....</i>	8
3.1.1.- <i>Método del parámetro β de la distribución GVE.....</i>	8
3.1.2.- <i>Método de los Trazos multidimensionales.....</i>	12
3.1.3.- <i>Prueba de Fisher.....</i>	13
3.1.4.- <i>Prueba de homogeneidad regional.....</i>	16
3.1.5.- <i>Técnicas regionales.....</i>	17
3.2.- <i>Análisis de frecuencias.....</i>	19
3.2.1.- <i>Periodo de Retorno.....</i>	20
3.2.2.- <i>Distribución Gumbel.....</i>	20
3.2.3.- <i>Distribución GVE.....</i>	22
3.2.4.- <i>Distribución Doble Gumbel.....</i>	22
3.2.5.- <i>Error estándar de ajuste.....</i>	22
3.3.- <i>Ecuación regional Qmed*.....</i>	23
3.3.1.- <i>Cálculo de las características fisiográficas y climatológicas.....</i>	24
3.3.2.- <i>Optimización.....</i>	26

4.- CASOS DE APLICACIÓN.....	29
4.1.- <i>Análisis preliminar de series hidrométricas y climatológicas.....</i>	29
4.2.- <i>Análisis regional RH 27.....</i>	34
4.2.1.- <i>Delimitación de regiones homogéneas RH 27.....</i>	34
4.2.2.- <i>Análisis de frecuencias y gastos de diseño RH 27.</i>	47
4.3.- <i>Análisis regional RH 28 Parcial.....</i>	50
4.3.1.- <i>Delimitación de regiones homogéneas RH 28 Parcial.....</i>	50
4.3.2.- <i>Análisis de frecuencias y gastos de diseño RH 28 Parcial.</i>	60
4.4.- <i>Análisis regional RH 28 Papaloapan.</i>	63
4.4.1.- <i>Delimitación de regiones homogéneas RH 28 Papaloapan.</i>	63
4.4.2.- <i>Análisis de frecuencias y gastos de diseño RH 28 Papaloapan.</i>	71
4.5.- <i>Análisis regional RH 29.....</i>	75
4.5.1.- <i>Delimitación de regiones homogéneas RH 29.....</i>	75
4.5.2.- <i>Análisis de frecuencias y gastos de diseño RH 29.</i>	77
4.6.- <i>Breve comentario respecto a los efectos de los ciclones.....</i>	79
4.7.- <i>Ecuación regional zona de estudio.....</i>	81
4.7.1.- <i>Ecuación regional RH 27 Norte de Veracruz.....</i>	81
4.7.2.- <i>Ecuación regional RH 28 Parcial.....</i>	90
4.7.3.- <i>Ecuación regional RH 28 Papaloapan.</i>	96
4.7.4.- <i>Ecuación regional RH 29 Río Coatzacoalcos.....</i>	106
5.- EJEMPLO DE APLICACIÓN.	108
6.- CONCLUSIONES, COMENTARIOS Y RECOMENDACIONES.	111
7.- BIBLIOGRAFÍA.	114

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Zona de Estudio. Regiones Hidrológicas No. 27, 28 y 29.	4
Figura 3.1. Región de rechazo para la hipótesis nula. Distribución F.....	14
Figura 3.2. Comparación de los CV sintéticos con los observados.....	17
Figura 4.1. Región 27. Estaciones reguladas, presas y derivadoras.....	31
Figura 4.2. Región 28. Estaciones reguladas, presas y derivadoras.....	31
Figura 4.3. Región 29. Presa Yuribia y estación San José del Carmen.	32
Figura 4.4. Región 27. Regiones homogéneas con el método del parámetro β - GVE. Registros completos.....	39
Figura 4.5. Región 27. Regiones homogéneas - Fisher 5 %.....	41
Figura 4.6. Región 27. Curvas de Andrews-Grupo 1.	43
Figura 4.7. Región 27. Regiones homogéneas - trazos multidimensionales.	44
Figura 4.8. Región 27. Curvas características de Andrews.	45
Figura 4.9. Región 27. Distribuciones de mejor ajuste (a) Grupo 1, (b) Grupo 2 y (c) Grupo 3. .	48
Figura 4.10. Región 27. Prueba de homogeneidad regional (a) Grupo 1, (b) Grupo 2 y (c) Grupo 3.....	49
Figura 4.11. Región 28 Parcial. Regiones homogéneas con el método del parámetro β - GVE. Registros completos.....	52
Figura 4.12. Región 28 Parcial. Regiones homogéneas - Fisher 5 %.....	54
Figura 4.13. Región 28 Parcial. Distribuciones de mejor ajuste para las regiones homogéneas formadas con un nivel de significancia del 1 %. (a) Grupo 1 y (b) Grupo 2.....	55
Figura 4.14. Región 28 Parcial. Prueba de homogeneidad regional (a) Grupo 1 y (b) Grupo 2. Fisher 1%.....	56
Figura 4.15. Región 28 Parcial. Regiones homogéneas - trazos multidimensionales.	57
Figura 4.16. Región 28 Parcial. Curvas características de Andrews.....	58
Figura 4.17. Región 28 Parcial. Distribuciones de mejor ajuste (a) Actopan, (b) Grupo 2 y (c) Grupo 3.	61
Figura 4.18. Región 28 Parcial. Prueba de homogeneidad regional (a) Grupo 2 y (b) Grupo 3. Fisher 5%.....	62
Figura 4.19. Región 28 Parcial. Ajuste estación Actopan sin 1955 y 1974.....	63
Figura 4.20. Región 28 Papaloapan. Regiones homogéneas - Fisher 5 %.....	66
Figura 4.21. Región 28; Alto y Bajo Papaloapan. Regiones homogéneas - Fisher 5 %.....	68
Figura 4.22. Región 28 Papaloapan. Regiones Homogéneas - Trazos multidimensionales.	70
Figura 4.23. Región 28 Papaloapan. Curvas características de Andrews.....	71
Figura 4.24. Región 28 Papaloapan. Prueba de homogeneidad regional (a) Grupo 1, (b) Grupo 2, (c) Grupo 3 y (d) Grupo 4.	72
Figura 4.25. Región 28 Papaloapan. Prueba de homogeneidad regional (a) Grupo 1 sin La Junta y (b) Grupo 2 con La Junta.....	73

<i>Figura 4.26. Región 28 Papaloapan. Distribuciones de mejor ajuste (a) Grupo 1, (b) Grupo 2, (c) Grupo 3 y (d) Grupo 4.</i>	74
<i>Figura 4.27. Región 29 Coatzacoalcos. Regiones Homogéneas - Fisher 5 %.</i>	77
<i>Figura 4.28. Región 29 Coatzacoalcos. Distribuciones de mejor ajuste (a) Grupo 1 y (b) Grupo 2.</i>	78
<i>Figura 4.29. Región 29 Coatzacoalcos. Prueba de homogeneidad regional (a) Grupo 1 y (b) Grupo 2.</i>	78
<i>Figura 4.30. Trayectoria de la tormenta tropical Barry con datos del NOAA-NHC. Mapa de distribución de lluvias del 20 de Junio de 2013. Fuente: CONAGUA.</i>	80
<i>Figura 4.31. Mapa de lluvias registradas por el segundo impacto del Huracán "Dean" en el Golfo de México. Lluvias acumuladas en 24 hrs de los días 22 y 23 de Agosto de 2007. Fuente: CONAGUA.</i>	80
<i>Figura 4.32. Región 27 Norte de Veracruz. Ecuación regional en función del área drenada por la cuenca.</i>	81
<i>Figura 4.33. Región 27 Norte de Veracruz. Ecuación regional en función del volumen medio-máximo escurrido en 24 horas.</i>	82
<i>Figura 4.34. Región 27 Norte de Veracruz. (a) Ecuación regional en función del área y la precipitación efectiva media-máxima en 24 horas. (b) Ecuación regional en función del volumen medio-máximo escurrido y la pendiente media de la cuenca.</i>	83
<i>Figura 4.35. Región 27 Norte de Veracruz. Ecuación regional en función del área, precipitación media-máxima en 24 horas y la infiltración potencial máxima.</i>	84
<i>Figura 4.36. Región 27 Norte de Veracruz. Ecuación regional Grupo 2-Fisher en función del volumen medio-máximo escurrido en 24 horas.</i>	86
<i>Figura 4.37. Región 27 Norte de Veracruz. Subregiones Norte (Tecolutla-Tuxpan) y Sur (Colipa-Nautla).</i>	88
<i>Figura 4.38. Subregión 27 Sur. Ecuación regional en función del área y la precipitación media-máxima efectiva en 24 horas.</i>	88
<i>Figura 4.39. Región 28 Parcial. (a) Ecuación regional en función del área. (b) Ecuación regional en función del volumen medio-máximo precipitado.</i>	90
<i>Figura 4.40. Región 28 Parcial. (a) Ecuación regional en función del volumen medio-máximo y la pendiente media de la cuenca. (b) Ecuación regional en función del volumen medio-máximo escurrido y la pendiente media de la cuenca.</i>	91
<i>Figura 4.41. Región 28 Parcial. Subregiones Actopan - Nautla y La Antigua - Jamapa.</i>	93
<i>Figura 4.42. Región 28 Parcial. (a) Subregión La Antigua-Jamapa. (b) Subregión Actopan-Nautla.</i>	94
<i>Figura 4.43. Región 28 Papaloapan. (a) Ecuación regional en función del volumen medio-máximo. (b) Ecuación regional en función del volumen medio-máximo escurrido.</i>	96
<i>Figura 4.44. Región 28 Papaloapan. (a) Ecuación regional en función del área y la precipitación media-máxima en 24 horas. (b) Ecuación regional en función del área y la precipitación efectiva media-máxima en 24 horas.</i>	97
<i>Figura 4.45. Región 28 Papaloapan. (a) Ecuación regional en función del volumen medio-máximo escurrido y la pendiente media de la cuenca.</i>	98

<i>Figura 4.46. Región 28 Papaloapan. (a) Ecuación regional en función del área, precipitación media-máxima en 24 horas y pendiente media de la cuenca.</i>	<i>99</i>
<i>Figura 4.47. Región 28 Papaloapan. Ecuación regional grupo 2-Trazos Multidimensionales. .</i>	<i>102</i>
<i>Figura 4.48. Región 28 Papaloapan. Ecuación regional Alto Papaloapan.</i>	<i>103</i>
<i>Figura 4.49. Región 28 Papaloapan. (a) Ecuación regional Bajo Papaloapan con Tuxtepec y Cantón, (b) Ecuación regional Bajo Papaloapan sin Tuxtepec y Cantón.</i>	<i>104</i>
<i>Figura 4.50. Región 29 Coatzacoalcos. (a) Ecuación regional en función del área. (b) Ecuación regional en función del volumen medio-máximo precipitado en 24 horas.</i>	<i>106</i>
<i>Figura 5.1. Localización de la cuenca Naranjillo.</i>	<i>108</i>
<i>Figura 5.2. Localización hidrológica de la cuenca Naranjillo.</i>	<i>109</i>
<i>Figura 5.3. Curva de gastos estimados en la cuenca Naranjillo.</i>	<i>110</i>

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Valores inversos de la distribución F para un nivel de significancia del 1 %.....	15
Tabla 3.2. Valores inversos de la distribución F para un nivel de significancia del 5 %.....	15
Tabla 3.3. Características fisiográficas y climatológicas empleadas en el estudio.	24
Tabla 4.1. Región 27. Parámetros estadísticos.	34
Tabla 4.2. Región 27. Regiones homogéneas con el método del parámetro β - GVE. Periodo 1963 - 1975.....	36
Tabla 4.3. Región 27. Regiones homogéneas con el método del parámetro β - GVE. Periodo 1957 - 1967.....	36
Tabla 4.4. Región 27. Regiones homogéneas con el método del parámetro β - GVE. Periodo 1958 - 1967.....	37
Tabla 4.5. Región 27. Regiones homogéneas con el método del parámetro β - GVE. Registros completos.....	38
Tabla 4.6. Región 27. Regiones homogéneas - Fisher 5 %.....	40
Tabla 4.7. Región 27. Características fisiográficas y climatológicas.	42
Tabla 4.8. Región 27. Regiones homogéneas - trazos multidimensionales.	44
Tabla 4.9. Región 27. Delimitación de regiones homogéneas, 3 métodos.....	46
Tabla 4.10. Región 27. Parámetros estimados por la distribución de mejor ajuste.	47
Tabla 4.11. Región 27. Factores de ajuste de diseño.....	50
Tabla 4.12. Región 28 Parcial. Parámetros estadísticos.....	50
Tabla 4.13. Región 28 Parcial. Regiones homogéneas con el método del parámetro β - GVE. Registros completos.....	51
Tabla 4.14. Región 28 Parcial. Matriz de estadísticos F	52
Tabla 4.15. Región 28 Parcial. Matriz de valores críticos de Fisher para un nivel de significancia del 5 %.....	53
Tabla 4.16. Región 28 Parcial. Regiones homogéneas - Fisher 5 %.....	53
Tabla 4.17. Región 28 Parcial. Matriz de valores críticos de Fisher para un nivel de significancia del 1 %.....	54
Tabla 4.18. Región 28 Parcial. Parámetros estimados por la distribución de mejor ajuste para las regiones homogéneas formadas con un nivel de significancia del 1 %.....	55
Tabla 4.19. Región 28 Parcial. Características fisiográficas y climatológicas.	57
Tabla 4.20. Región 28 Parcial. Regiones homogéneas - trazos multidimensionales.	58
Tabla 4.21. Región 28 Parcial. Delimitación de regiones homogéneas, 3 métodos.	59
Tabla 4.22. Comparación de eventos de diseño en Actopan.....	60
Tabla 4.23. Región 28 Parcial. Parámetros estimados por la distribución de mejor ajuste.	60
Tabla 4.24. Región 28 Parcial. Factores de ajuste de diseño.....	62
Tabla 4.25. Región 28 Papaloapan. Parámetros estadísticos.....	64

<i>Tabla 4.26. Región 28 Papaloapan. Regiones homogéneas - Fisher 5 %.</i>	65
<i>Tabla 4.27. Región 28; Alto y Bajo Papaloapan. Regiones homogéneas - Fisher 5 %.</i>	67
<i>Tabla 4.28. Región 28 Papaloapan. Características fisiográficas y climatológicas.</i>	69
<i>Tabla 4.29. Región 28 Papaloapan. Regiones Homogéneas - Trazos multidimensionales.</i>	70
<i>Tabla 4.30. Región 28 Papaloapan. Parámetros estimados por la distribución de mejor ajuste.</i>	71
<i>Tabla 4.31. Región 28 Papaloapan. Parámetros estimados por la distribución de mejor ajuste Grupo 1 y Grupo 2.</i>	73
<i>Tabla 4.32. Región 28 Papaloapan. Factores de ajuste de diseño.</i>	74
<i>Tabla 4.33. Región 29 Coatzacoalcos. Parámetros estadísticos.</i>	75
<i>Tabla 4.34. Región 29. Características fisiográficas y climatológicas.</i>	75
<i>Tabla 4.35. Región 29 Coatzacoalcos. Regiones homogéneas con el método del parámetro β - GVE</i>	76
<i>Tabla 4.36. Región 29 Coatzacoalcos. Regiones homogéneas - Fisher 5 %.</i>	76
<i>Tabla 4.37. Región 29 Coatzacoalcos. Parámetros estimados por la distribución de mejor ajuste.</i>	77
<i>Tabla 4.38. Región 29 Coatzacoalcos. Factores de ajuste de diseño.</i>	79
<i>Tabla 4.39. Zona de estudio. Factores de ajuste de diseño.</i>	79
<i>Tabla 4.40. Región 27 Norte de Veracruz. Coeficientes de correlación respecto a la media de los gastos máximos anuales.</i>	82
<i>Tabla 4.41. Región 27 Norte de Veracruz. Media estimada de los gastos máximos anuales.</i>	84
<i>Tabla 4.42. Región 27 Norte de Veracruz. Errores estimados.</i>	85
<i>Tabla 4.43. Región 27. Grupo 2-Fisher media estimada de los gastos máximos anuales.</i>	87
<i>Tabla 4.44. Región 27 Sur. Media estimada de los gastos máximos anuales.</i>	89
<i>Tabla 4.45. Región 28 Parcial. Coeficientes de correlación respecto a la media de los gastos máximos anuales.</i>	90
<i>Tabla 4.46. Región 28 Parcial. Media estimada de los gastos máximos anuales.</i>	92
<i>Tabla 4.47. Región 28 Parcial. Errores estimados.</i>	92
<i>Tabla 4.48. Región 28 Parcial. Media estimada subregión Actopan-Nautla.</i>	94
<i>Tabla 4.49. Región 28 Parcial. Media estimada subregión La Antigua-Jamapa.</i>	95
<i>Tabla 4.50. Región 28 Papaloapan. Coeficientes de correlación respecto a la media de los gastos máximos anuales.</i>	96
<i>Tabla 4.51. Región 28 Papaloapan. Media estimada de los gastos máximos anuales.</i>	99
<i>Tabla 4.52. Región 28 Papaloapan. Errores estimados.</i>	100
<i>Tabla 4.53. Región 28 Papaloapan. Media estimada grupo 2 - Trazos multidimensionales.</i>	102
<i>Tabla 4.54. Región 28 Papaloapan. Media estimada Alto Papaloapan.</i>	103
<i>Tabla 4.55. Región 28 Papaloapan. Media estimada Bajo Papaloapan.</i>	105

<i>Tabla 4.56. Región 29 Coatzacoalcos. Coeficientes de correlación respecto a la media de los gastos máximos anuales.</i>	106
<i>Tabla 4.57. Región 29 Coatzacoalcos. Media estimada con la ecuación regional.</i>	107
<i>Tabla 4.58. Región 29 Coatzacoalcos. Errores estimados en porcentaje.</i>	107
<i>Tabla 5.1. Características y parámetros de la cuenca Naranjillo.</i>	108
<i>Tabla 5.2. Gastos de diseño cuenca Naranjillo.</i>	110
<i>Tabla 6.1. Factores de ajuste de diseño en la zona de estudio.</i>	111

RESUMEN

El estudio de los gastos máximos es de gran importancia, ya que es requerido en el diseño y planeación de numerosas obras de ingeniería civil. En el presente trabajo se analizan los gastos máximos anuales de las regiones hidrológicas: 27, Norte de Veracruz; 28, Parcial y Papaloapan, y 29, Coatzacoalcos. Este análisis sigue un enfoque regional, el cual se basa en el estudio de registros locales que permiten la construcción de curvas adimensionales para estimar los eventos de diseño dentro de una región homogénea.

Para desarrollar el estudio regional se obtuvieron los registros de gastos máximos anuales de 59 estaciones hidrométricas (actualizadas hasta el 31 de Diciembre del 2011), ubicadas dentro de las tres regiones hidrológicas. Se consideraron solo aquellas con un registro mayor o igual a 20 años.

Se delimitaron regiones homogéneas con los métodos de; las curvas de Andrews, prueba de Fisher y método del parámetro beta de la distribución General de Valores Extremos. Comparando las regiones encontradas en cada método, se eligieron las más convenientes tomando en cuenta los aspectos físicos y climatológicos de cada grupo, obteniendo 3 grupos homogéneos en la región hidrológica 27 y 3 más en la región 28 Parcial. En cuanto a la región 28 Papaloapan, se definieron 4 grupos homogéneos. Por otro lado, en la cuenca del Coatzacoalcos solo 2. Se obtuvo el registro poblacional de cada grupo con la técnica estaciones-año. A estos registros se les ajustaron las distribuciones General de Valores Extremos, Gumbel y Doble Gumbel. Con la distribución de mejor ajuste se probó la homogeneidad de cada grupo por medio de simulaciones. Posteriormente, se obtuvieron los factores de diseño en cada grupo.

Finalmente, se ajustaron curvas de regresión potenciales, relacionando las características fisiográficas y climatológicas, de cada cuenca drenada, con el gasto medio máximo anual de cada estación. Durante este proceso se lograron identificar comportamientos climatológicos diferentes en las regiones 27 y 28, lo que permitió reducir el error en el cálculo del gasto medio. Con estas curvas es posible encontrar la media de los máximos anuales en sitios donde no se tiene información.

1.- INTRODUCCIÓN.

Cuando se requiere estimar el caudal máximo que puede presentarse en el vertedor de una presa o la capacidad máxima de conducción de un río antes de desbordarse, se está hablando de la predicción del gasto máximo o gasto de diseño.

La determinación del gasto de diseño es necesaria para el dimensionamiento de obras de aprovechamientos hidráulicos, estructuras de cruce de caminos, obras para el control de avenidas, drenaje de aguas pluviales en pequeñas y grandes urbes, así como drenaje de planicies inundables, entre otros.

Para estimar el gasto de diseño es útil analizar los valores de escurrimientos máximos anuales registrados en el sitio de interés. Sin embargo, en México los registros hidrométricos que se tienen son pocos, además de que en la mayoría de los casos se tienen estaciones que no cuentan con un periodo amplio de los mismos y, generalmente, presentan interrupciones. A esto se aúna los casos, en los que no se cuenta con estaciones de aforo en el sitio deseado.

Un enfoque regional permite utilizar los aforos existentes en cuencas vecinas con el objetivo de identificar regiones homogéneas; es decir, sitios con un comportamiento estadístico similar de los escurrimientos máximos anuales. Todo ello con la finalidad de transferir información de sitios muestreados a los que no lo son. De este modo, se pueden construir curvas de distribución regionales adimensionales, cuyo objetivo es el de transferir información entre los registros hidrométricos que forman parte de una región homogénea. Esto permite estimar eventos de diseño más fiables y considerar periodos de retorno más altos en los sitios que conforman dicha región. En sitios donde no se tienen mediciones, se puede estimar la media de los gastos máximos anuales utilizando una regresión, la cual emplea las características fisiográficas o climatológicas más significativas en la producción de los escurrimientos.

1.1.- Objetivos.

- Obtener los registros de gastos máximos anuales que mejor representen la región en estudio, eliminando estaciones que cuenten con regulaciones en su cuenca y que no cumplan con un mínimo de 20 años de registro.
- Identificar los valores atípicos. Eliminar o sustituir aquellos mal capturados y justificar el cambio.
- Delimitar regiones homogéneas en cada región de estudio.
- Establecer un registro poblacional para cada grupo homogéneo.
- Encontrar la distribución de probabilidad que mejor describa el comportamiento aleatorio de los gastos máximos anuales en cada registro poblacional.
- Estimar los gastos de diseño para: 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000, 5000 y 10000 años periodo de retorno.
- Calcular las principales características de la cuenca. Determinar cuáles están relacionadas con el escurrimiento.

- Encontrar la mejor curva regional que permita estimar la media de los gastos máximos anuales en función de las características fisiográficas y climatológicas de la cuenca.
- Aplicar resultados a un caso real.

1.2.- Estructura de la tesis.

El presente estudio lo conforman 6 capítulos dedicados al análisis regional de los gastos máximos anuales en las regiones hidrológicas 27, 28 y 29; el primero hace referencia a los antecedentes, objetivos planteados e introducción. En el séptimo apartado se pueden consultar las referencias utilizadas para la elaboración del estudio. A continuación se muestra un breve resumen de cada capítulo.

Capítulo 2: En este capítulo se describe la zona de estudio. Se hace mención de la localización de la zona estudiada y de las principales características climatológicas e hidrométricas presentes en cada región hidrológica. En sus apartados "obras de aprovechamiento y de control" se hace referencia a las presas hidroeléctricas y de control más importantes, así como a los diferentes sistemas de riego.

Capítulo 3: El capítulo 3 detalla la metodología empleada. Se presentan 3 métodos de delimitación de regiones homogéneas y la prueba de homogeneidad regional mediante simulaciones muestrales. Explica brevemente las técnicas regionales más empleadas y 3 distribuciones de valores extremos, entre ellas una mixta. En cuanto a la ecuación regional, hace referencia a la metodología utilizada para la optimización de la ecuación, además de explicar la simbología y cálculo de las características empleadas.

Capítulo 4: Consiste en la aplicación de la metodología descrita en el capítulo 3 a las regiones hidrológicas en estudio. En este capítulo se aplican el método del parámetro β de la distribución General de Valores Extremos, prueba de Fisher y las curvas de Andrews para delimitar regiones homogéneas. Se utiliza la técnica de las estaciones año para obtener las curvas de distribución regionales, posteriormente, se obtienen los factores adimensionales de diseño para cada registro poblacional. En cuanto a las ecuaciones regionales, se analizan varias alternativas empleando 1, 2 y 3 características de la cuenca. Para cada región se define la mejor ecuación regional.

Capítulo 5: En este capítulo se aplican las ecuaciones regionales a un caso real en la región 27, Norte de Veracruz.

Capítulo 6: Se muestran algunas recomendaciones sobre el empleo de los factores de diseño, así como de las ecuaciones regionales. Finalmente, se pueden leer las conclusiones del trabajo.

1.3.- Antecedentes.

Uno de los enfoques mejor aceptados para la extensión de registros hidrométricos, y la creación de nuevos en la ausencia de los mismos, ha sido el regional. Numerosos investigadores han abordado este tema, por ejemplo, Domínguez, González y Arganis (2013), Lim y Lye (2003), Burn y Goel (2000), Pandey y Nguyen (1999), entre otros. En este enfoque se estiman los gastos de diseño en cualquier sitio, siempre y cuando se cuente con registros hidrométricos cercanos a la sección de interés. La metodología que se emplea es: una técnica regional; la cual, en la mayoría

de los casos, es el método de la avenida índice, seguido de una regresión no lineal que permite encontrar dicha avenida en sitios sin registros hidrométricos.

En el trabajo "Regional flood estimation for ungauged basins in Sarawak, Malaysia" presentado por Lim y Lye (2003), realizaron un estudio regional en el estado de Sarawak, Malasia, en el cual analizan 23 cuencas con registros hidrométricos aplicando la avenida índice, la prueba de homogeneidad regional de Hosking y Wallis (1993), basada en los momentos-L, y una curva regional que relaciona las características de la cuenca, la cual permite estimar la avenida índice en sitios no aforados. En este estudio se utilizó un análisis de racimo (cluster) para delimitar regiones homogéneas.

En México, Domínguez, González, y Arganis (2013) presentaron el trabajo "Regionalización de datos de escurrimiento de las regiones hidrológicas de México para la estimación de avenidas de diseño", en el cual analizaron las 37 regiones hidrológicas de la República Mexicana, aplicando la prueba de Fisher para delimitar regiones homogéneas, seguida de la técnica regional estaciones año. Para estimar la media de los gastos máximos instantáneos proponen diferentes ecuaciones, utilizando 1, 2 y 3 características, entre las cuales se encuentra el área, el tiempo de concentración, precipitación media máxima anual en 24 horas y el volumen precipitado, entre otras.

2.- DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.

El presente estudio se desarrolla dentro de las regiones hidrológicas No. 27 Norte de Veracruz (Tuxpan-Nautla); No. 28 Papaloapan y No. 29 Coatzacoalcos, localizadas dentro de la región hidrológica administrativa X Golfo Centro. Ver Figura 2.1.

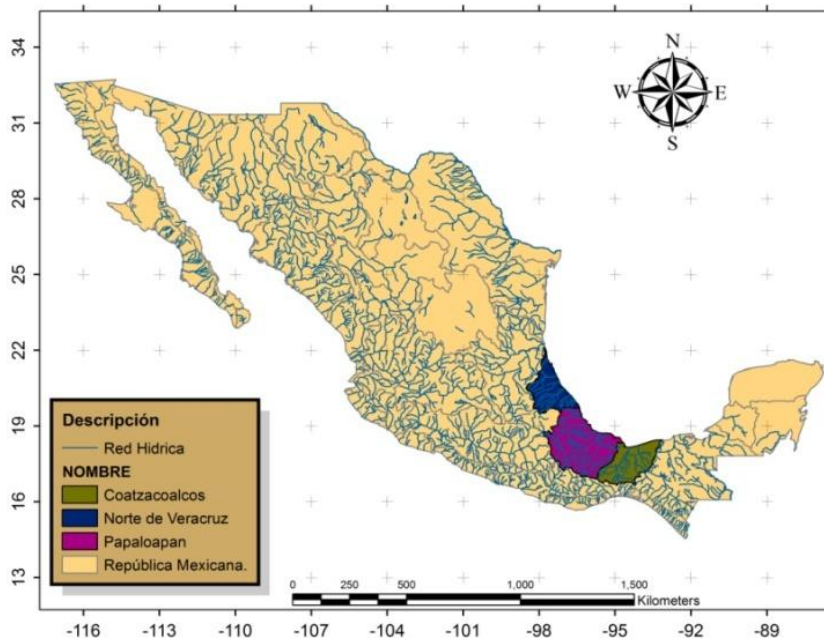


Figura 2.1. Zona de Estudio. Regiones Hidrológicas No. 27, 28 y 29.

2.1.- Región hidrológica No. 27 Norte de Veracruz.

La región hidrológica Norte de Veracruz (Tuxpan-Nautla) cuenta con una extensión territorial de aproximadamente 25,600 km², comprendidos entre los estados de Puebla y Veracruz con menores porciones en Tlaxcala e Hidalgo. Se localiza en la parte central del Golfo de México entre los 19°29' y 22°10' de latitud norte, y los 96°25' y 98°30' de longitud oeste, limitada por la región 26 al norte, al este con el Golfo de México y al oeste y sur por las regiones 18 y 28 respectivamente.

Su sistema fluvial está compuesto por las cuencas de los ríos Tuxpan, Cazones, Tecolutla, Nautla, Misantla y Colipa, además de algunas lagunas importantes como: Tamiahua, Laguna Chica, Laguna Grande, San Agustín y, por último, corrientes secundarias que forman pequeños grupos de arroyos, muchos de los cuales alimentan las lagunas y esteros antes mencionados. Cabe destacar que la laguna de Tamiahua, ubicada en el estado de Veracruz, entre las ciudades de Tampico y Tuxpan, es una de las más grandes del país, con una extensión territorial de aproximadamente 810 km².

Esta región presenta gran actividad de fenómenos ciclónicos, los cuales se originan en el océano Atlántico, mar Caribe o en el propio Golfo de México, con alta presencia durante el verano y principios de otoño.

2.1.1.- Climatología.

De acuerdo con la clasificación de Thornthwaite (1948) se encuentra dentro de los climas muy húmedo a húmedo sin estación seca bien definida; cálido en partes y en otras semiseco o templado (SRH, 1969a).

El régimen fluvial se presenta en el periodo junio - octubre, en el que ocurren los valores más altos, con un periodo entre junio - septiembre en la zona montañosa (SRH, 1969a).

Las precipitaciones más elevadas ocurren en la cuenca del río Tecolutla, con precipitaciones máximas en 24 horas del orden de los 300 mm y una máxima de 612 mm registrada en la estación Cuetzalan del Progreso, con medias anuales de más de 4,000 mm y un registro máximo de 6,017.5 mm (CLICOM, 2013).

Cuenta con una descarga fluvial de aproximadamente 14,193 millones de metros cúbicos al año.

La temperatura media anual oscila entre los 14°C en las partes más altas de la sierra, hasta los 24°C en la planicie costera (INEGI, 2000).

2.1.2.- Obras de aprovechamiento y de control.

En la parte alta de la cuenca del río Tuxpan y, específicamente en el río Chiflón, se sitúa la presa de almacenamiento la Mesilla, cerca de la confluencia con el río Vinazco.

En la parte alta de la cuenca del río Cazones, sobre el arroyo Chaltecontla, se localiza la presa Los Reyes (capacidad 26.1 Mm³), cuyo almacenamiento se integra a los de la presa Laguna (capacidad 43.5 Mm³) y Planta Texcapa del Sistema Necaxa, dentro de la cuenca del río Tecolutla. Esta integración se lleva a cabo por medio del túnel Tlalcoyunga y del canal Texcapa a la planta hidroeléctrica Texcapa, cuya capacidad de generación es de 5,650 kw. Otras presas importantes en el sistema Necaxa son la presa Acatlán, con un almacenamiento a la cresta del vertedor de 132,180 m³ y, por último, la presa Nexapa, con capacidad de 15.5 Mm³, que aporta sus aguas a la presa Necaxa, la cual cuenta con una capacidad de embalse de 43 Mm³ y una generación de energía de aproximadamente 75,000 kw (SRH, 1969a).

En el río Apulco se encuentra la presa La Soledad, la cual recibe aportaciones del mismo río y también del túnel proveniente de la presa derivadora Atexcaco, que a su vez recibe pequeñas aportaciones, por su margen derecha, de las aguas controladas por la derivadora Calapa. La presa La Soledad cuenta con capacidad para generar 208,800 kw (SRH, 1969a).

2.2.- Región hidrológica No. 28 Papaloapan.

Se localiza al este del país entre los 16°58' y 19°46' latitud norte, y 94°40' y 97°47' longitud oeste, limitada al norte por la región hidrológica 27 Norte de Veracruz, al sur con la región hidrológica 29 Coatzacoalcos, y al este y oeste por el Golfo de México y la región hidrológica 18 Balsas respectivamente. Tiene un área aproximada de 57,500 km² distribuida entre los estados de Oaxaca (39%), Veracruz (51%) y Puebla (10%). Del área total, aproximadamente el 45% corresponde a terrenos planos y ondulados de la planicie costera, y el resto están constituidos por la zona montañosa y quebradas de las sierras.

El sistema fluvial determinante, para esta región hidrológica, es la cuenca del río Papaloapan, y de manera secundaria los ríos Actopan, La Antigua y Jamapa. Su principal ecosistema estuario es la Laguna de Alvarado, que corresponde a la superficie de inundación costera más grande, pero también incluye otras lagunas de diversas magnitudes e importancia.

Los principales afluentes de la región son: Actopan, La Antigua, Jamapa, El Blanco, Tonto, Santo Domingo, Usila, Valle Nacional, Obispo, Tesechoacán y San Juan.

2.2.1.- Climatología.

De acuerdo con las condiciones climatológicas de la región se presentan dos variaciones: la primera, en el Valle del Salado, con la zona más árida y deforestada de la región hidrológica, y una precipitación media anual de 500 mm con temperaturas medias que oscilan entre los 10°C; y la segunda, que abarca la vertiente oriental de la sierra con precipitaciones anuales de 3,500 mm y una temperatura media de 24°C.

Las precipitaciones más altas se registran en las cuencas de los ríos Usila y Valle Nacional, con precipitaciones del orden de los 4,500 mm anuales y máximas de hasta 7,700 mm. En cuanto a las máximas en 24 horas, se tiene registrada una máxima de 512.5 mm en la estación climatológica La Estrella (cuenca del río Usila) y 380 mm en la estación Campamento Vista Hermosa (cuenca del río Valle Nacional).

Cuenta con un escurrimiento de 47,000 millones de metros cúbicos al año, ubicándose en la región más importante del país, solo después del sistema Grijalva-Usumacinta (Pereyra y Pérez, 2005).

2.2.2.- Obras de aprovechamiento y de control.

En la parte baja de la cuenca del río Actopan se localiza el distrito de riego No. 65, el cual inició sus operaciones en 1954 con una capacidad de riego de 9,979 Ha, utilizando un volumen anual aproximado de 496 Mm³, que son obtenidos a través de la derivación de corrientes (derivadoras La Esperanza y Santa Rosa, SRH, 1969b).

En el río La Antigua se encuentra el distrito de riego del mismo nombre, clasificado en el No. 35, construido en la parte baja de la cuenca con operaciones desde el año 1952, y capacidad para cubrir una superficie de 14,181 Ha (derivadora La Antigua, SRH, 1969b).

Sobre el río Ídolos, afluente del río Actopan, se localiza un vaso de almacenamiento conocido como presa Miradores, con capacidad de 1.24 Mm³, cuyas aguas son aprovechadas para regar 150 hectáreas aproximadamente.

En la parte alta de la cuenca del río Jamapa, sobre el río Atoyac, se sitúa la presa derivadora Santa Anita, que abastece el sistema de riego El Potrero.

Sobre el río Tonto se localiza la presa Miguel Alemán Valdés (inaugurada en 1958), construida en Temascal, Oaxaca, con capacidad de almacenamiento de 8,000 Mm³, siendo la cuarta más grande del país después de las presas La Angostura, Infiernillo y Malpaso. La construcción de

esta presa tuvo como objetivos: a) *controlar las avenidas del río Tonto*; b) *generar energía hidroeléctrica*; c) *mejorar la navegación del río Papaloapan* y d) *control de azolves*.

Construida sobre el río Santo Domingo, aguas abajo de su confluencia con el río Usila, se localiza la presa Cerro de Oro (Miguel de la Madrid), con una capacidad de 5,380 Mm³, y cuya construcción se llevó a cabo entre las décadas de los setenta y ochenta, la cual sirve para generar energía eléctrica (354 Mw), controlar avenidas y el azolve que arrastra el río Santo Domingo, al cual corresponde 60% del total que transporta el río Papaloapan (SARH, 1975).

Dentro de la cuenca del Papaloapan también se encuentra una pequeña hidroeléctrica denominada Chilapan, con capacidad instalada de 26 Mw, ubicada en el municipio de Catemaco, Veracruz.

2.3.- Región hidrológica No. 29 Coatzacoalcos.

La cuenca del río Coatzacoalcos se encuentra geográficamente entre los 16°37' y 18°20' latitud norte, y los 93°26' y 95°46' longitud oeste, limitando al norte con el Golfo de México, al sur con la región 22 Tehuantepec, y al este y oeste con la región 30 Grijalva - Usumacinta y región 28 Papaloapan respectivamente. Tiene un área aproximada de 29,800 km², distribuida entre los estados de Oaxaca, Veracruz y Tabasco (SRH, 1973). Presenta una planicie costera con terrenos bajos sujetos a frecuentes inundaciones, principalmente en la parte que comprende el estado de Tabasco.

El sistema hidrográfico de la región 29 Coatzacoalcos es el tercero en importancia del país por su caudal, después de los sistemas Grijalva-Usumacinta y Papaloapan. Los ríos más importantes son: el río Coatzacoalcos, que nace en la sierra atravesada a más de 2,000 m.s.n.m.; y el río Tonalá, que se origina en los límites de los estados de Veracruz, Tabasco y Chiapas, a unos 1,000 m de altitud en la sierra madre de este último (SRH, 1973).

2.3.1.- Climatología.

Cuenta con un clima cálido húmedo con abundantes lluvias en verano y cálido subhúmedo con lluvias en invierno. Su temperatura media anual oscila entre los 24°C con una precipitación media anual de 2,500 mm. Los meses de máxima precipitación son de junio a septiembre con valores mínimos en invierno (CONABIO, 2012).

2.3.2.- Obras de aprovechamiento y de control.

Esta región cuenta con dos pequeñas obras de aprovechamiento, las cuales se encuentran construidas dentro de la cuenca del río Calzadas. Una de ellas es la presa Yuribia, localizada sobre el río Texizapan y cuyo objetivo es abastecer a poco más de medio millón de habitantes entre los municipios de Coatzacoalcos, Minatitlán y Cosoleacaque. La segunda es una pequeña derivadora construida a unos 2.5 km de la localidad de Minzapan, sobre el río Calzada.

3.- METODOLOGÍA EMPLEADA.

El análisis probabilístico de gastos máximos en una región o sitio de estudio, permite predecir el caudal máximo que puede presentarse, con base en la información hidrométrica que se tenga del sitio. Sin embargo, cuando la información que se tiene presenta periodos de registro cortos o interrumpidos, conviene recurrir a los aforos de cuencas vecinas que cuenten con mejor calidad en las mediciones y que, además, tengan un comportamiento estadístico-hidrológico homogéneo. A estos análisis se les conoce como regionales.

El análisis de frecuencias regional está compuesto por dos etapas principales: la identificación de un grupo de cuencas aforadas con un régimen hidrológico similar al sitio no aforado o de poca información y la estimación de los gastos de diseño en el sitio no aforado a través de la inferencia de información entre los grupos de la etapa uno por medio de un método regional (Ouarda *et al.*, 2008). De acuerdo a esta definición es necesario tener en cuenta cuencas aforadas o contar con mediciones en las regiones que se quieren delimitar.

3.1.- Delimitación de regiones homogéneas.

El primer paso para desarrollar un análisis regional es la delimitación de regiones homogéneas desde un punto de vista hidrometeorológico, para ello existen dos enfoques: el cualitativo, basado en las características geográficas (clima, vegetación, geología, etc.); y el cuantitativo, que emplea pruebas estadísticas (Campos, 2006).

La formación de grupos homogéneos es una de las etapas más complicadas en un análisis regional, ya que la selección de las estaciones que forman una determinada región requiere de tomas de decisiones subjetivas (Hosking y Wallis, 1997).

En la literatura consultada¹ se ha encontrado que uno de los primeros pasos en un análisis regional es definir grupos de cuencas que presenten comportamientos hidrológicos similares al de la cuenca de interés. Partiendo de esto se analizaron varias metodologías que permitieran cuantificar la homogeneidad entre cuencas.

Para cada cuenca aforada y no aforada, las observaciones son independientes e idénticamente distribuidas, es decir, se supone que las observaciones son independientes, homogéneas y estacionarias.

En los siguientes apartados se muestran 3 de las metodologías encontradas y aplicadas a las regiones en estudio.

3.1.1.- Método del parámetro β de la distribución GVE.

En esta técnica se debe considerar periodos comunes entre estaciones de al menos 10 años. A estos registros se les aplica la distribución General de Valores Extremos y se obtienen los

¹Campos, A.D.F. (2006), *Análisis probabilístico univariado de datos hidrológicos*; México: AMH, IMTA.; Lim, Y.H., y Lye, L.M., (2003), *Regional flood estimation for ungauged basins in Sarawak, Malaysia*, Hydrological Sciences Journal, 48:1,79-84.; Dalrymple, T. (1960), *Flood-Frequency Analyses*, US Geological Survey water-supply paper 1543-A.

parámetros por momentos, máxima verosimilitud y momentos L. Se analiza el parámetro de forma de cada estación obtenido con el mejor ajuste.

Finalmente, se pueden formar 3 grupos donde $\beta = 0$, $\beta < 0$ y $\beta > 0$. De estos tres grupos se pueden conformar subregiones agrupando los parámetros β que se encuentre dentro de cierto intervalo, por ejemplo, pueden agruparse regiones con $0.15 < \beta < 0.30$, según sea el caso.

A continuación se muestra la distribución GVE (Escalante y Reyes, 2008).

$$F(x) = e^{-\left[1 - \left(\frac{x-v}{\alpha}\right)\beta\right]^{1/\beta}}; \beta \neq 0 \quad (3.1)$$

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} e^{-\left[1 - \left(\frac{x-v}{\alpha}\right)\beta\right]^{1/\beta}} \left[1 - \left(\frac{x-v}{\alpha}\right)\beta\right]^{\frac{1}{\beta}-1} \quad (3.2)$$

Si $\beta = 0$ $-\infty < x < \infty$, es distribución tipo I (Gumbel).

Si $\beta < 0$ $v + \frac{\alpha}{\beta} \leq x < \infty$, es distribución tipo II (Fréchet).

Si $\beta > 0$ $-\infty < x \leq v + \frac{\alpha}{\beta}$, es distribución tipo III (Weibull).

donde:

v : parámetro de ubicación.

α : parámetro de escala, $\alpha > 0$.

β : parámetro de forma.

La variable reducida de la distribución GVE es:

$$y = -\frac{1}{\beta} \ln \left[1 - \left(\frac{x-v}{\alpha}\right)\beta\right] \quad (3.3)$$

- Estimadores por momentos.

Para $-11.35 < g < 1.1396$

$$\beta = 0.279434 - 0.333535g + 0.048306g^2 - 0.023314g^3 + 0.00376g^4 - 0.000263g^5 \quad (3.4)$$

Para $1.14 < g < 18.95$

$$\beta = 0.25031 - 0.29219g + 0.075357g^2 - 0.010883g^3 + 0.000904g^4 - 0.000043g^5 \quad (3.5)$$

Donde g es el coeficiente de asimetría. Una vez estimado el parámetro de forma β , los parámetros de escala y ubicación se estiman con las ecuaciones 3.6 a 3.16.

$$A = \mu_x - BE[y] = \bar{x} - BE[y] \quad (3.6)$$

$$B = \left[\frac{Var(x)}{Var(y)} \right]^{1/2} \quad (3.7)$$

$$Var(x) = \sigma_x^2 = S_x^2 \quad (3.8)$$

$$E[y] = \Gamma(1 + \beta) \quad (3.9)$$

$$Var(y) = \Gamma(1 + 2\beta) - \Gamma^2(1 + \beta) \quad (3.10)$$

Para $\beta < 0$ distribución tipo II

$$\alpha = -\beta B \quad (3.11)$$

$$v = A + B \quad (3.12)$$

Para $\beta > 0$ distribución tipo III

$$\alpha = \beta B \quad (3.13)$$

$$v = A - B \quad (3.14)$$

Para $\beta = 0$ distribución tipo I

$$\alpha = \frac{\sqrt{6}}{\pi} S = 0.78 S \quad (3.15)$$

$$v = \bar{x} - 0.45 S \quad (3.16)$$

- Estimadores por máxima verosimilitud.

Los estimadores se obtienen mediante un proceso iterativo que considera la variable reducida, ecuación 3.3.

$$P = n - \sum_{i=1}^n e^{-y_i} \quad (3.17)$$

$$Q = \sum_{i=1}^n e^{(\beta-1)y_i} - (1 - \beta) \sum_{i=1}^n e^{\beta y_i} \quad (3.18)$$

$$R = n - \sum_{i=1}^n y_i + \sum_{i=1}^n y_i e^{-y_i} \quad (3.19)$$

El criterio de convergencia es

$$-\frac{\partial LL}{\partial v} = \frac{Q}{\alpha} \approx 0 \quad (3.20)$$

$$-\frac{\partial LL}{\partial \alpha} = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{P+Q}{\beta} \right) \approx 0 \quad (3.21)$$

$$-\frac{\partial LL}{\partial \beta} = \frac{1}{\beta} \left[R - \left(\frac{P+Q}{\beta} \right) \right] \approx 0 \quad (3.22)$$

con incrementos

$$\delta_{u_j} = -\frac{\alpha_j}{n} \left\{ bQ_j + \frac{h(P_j + Q_j)}{\beta_j} + \frac{f}{\beta_j} \left[R_j - \frac{(P_j + Q_j)}{\beta_j} \right] \right\} \quad (3.23)$$

$$\delta_{\alpha_j} = -\frac{\alpha_j}{n} \left\{ hQ_j + \frac{a(P_j + Q_j)}{\beta_j} + \frac{gs}{\beta_j} \left[R_j - \frac{(P_j + Q_j)}{\beta_j} \right] \right\} \quad (3.24)$$

$$\delta_{\beta_j} = -\frac{1}{n} \left\{ fQ_j + \frac{gs(P_j + Q_j)}{\beta_j} + \frac{c}{\beta_j} \left[R_j - \frac{(P_j + Q_j)}{\beta_j} \right] \right\} \quad (3.25)$$

Donde a , b , c , f , gs y h son los elementos de la matriz de varianza-covarianza de los parámetros de la distribución General de Valores Extremos para $-1.5 < \beta < 1.0$ (Raynal, 1982).

$$a = 0.661437 - 0.562798\beta + 0.985803\beta^2 - 0.059011\beta^3 \quad (3.26)$$

$$b = 1.235356 - 0.162161\beta - 0.115137\beta^2 + 0.009577\beta^3 \quad (3.27)$$

$$c = 0.4711 - 0.77627\beta + 0.295825\beta^2 - 0.009645\beta^3 \quad (3.28)$$

$$f = 0.244435 - 0.10287\beta - 0.19583\beta^2 - 0.016837\beta^3 \quad (3.29)$$

$$gs = 0.15373 - 0.411923\beta - 0.479209\beta^2 - 0.075004\beta^3 \quad (3.30)$$

$$h = 0.338937 - 1.209555\beta - 0.109822\beta^2 - 0.019801\beta^3 \quad (3.31)$$

Los nuevos parámetros estimados son:

$$v_{j+1} = v_j + \delta_{v_j} \quad (3.32)$$

$$\alpha_{j+1} = \alpha_j + \delta_{\alpha_j} \quad (3.33)$$

$$\beta_{j+1} = \beta_j + \delta_{\beta_j} \quad (3.34)$$

- Estimadores por momentos L.

$$E = \left[\frac{2M_{(1)} - M_{(0)}}{3M_{(2)} - M_{(0)}} \right] - \frac{\ln(2)}{\ln(3)} \quad (3.35)$$

$$\beta = 7.859E + 2.9554E^2 \quad (3.36)$$

$$A = \Gamma(1 + \beta) \quad (3.37)$$

$$B = 1 - 2^{-\beta} \quad (3.38)$$

$$C = (2M_{(1)} - M_{(0)})\beta \quad (3.39)$$

$$D = (A - 1)/\beta \quad (3.40)$$

$$\alpha = \frac{C}{AB} \quad (3.41)$$

$$v = M_{(0)} + D\alpha \quad (3.42)$$

$$M_{(0)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.43)$$

$$M_{(1)} = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^{n-1} x_i(n-i) \quad (3.44)$$

$$M_{(2)} = \frac{1}{n(n-1)(n-2)} \sum_{i=1}^{n-2} x_i(n-i)(n-i-1) \quad (3.45)$$

3.1.2.- Método de los Trazos multidimensionales.

Nathan y McMahan (1990) desarrollaron una técnica que permite delimitar regiones homogéneas definidas por la similitud hidrológica de las cuencas o las características de éstas, y que pueden no tener significancia geográfica, es decir, estas regiones existen en un espacio multidimensional de variables predictoras antes que en el espacio geográfico.

Este método emplea la regresión múltiple para identificar las características de la cuenca que resultan estadísticamente más significativas.

La técnica consiste en aplicar la gráfica de Andrews (1972), que permite representar un punto de un espacio multidimensional en una curva de dos dimensiones mediante la función:

$$f(t) = \frac{x_1}{\sqrt{2}} + x_2 \text{sen}(t) + x_3 \text{cos}(t) + x_4 \text{sen}(2t) + x_5 \text{cos}(2t) + \dots \quad (3.46)$$

donde:

$x_1, x_2, x_3, x_4, \dots$ representan las características fisiográficas o climatológicas estadísticamente más significativas de la cuenca, obtenidas de la regresión. La función se evalúa en el rango $-\pi \leq t \leq \pi$.

Con la finalidad de eliminar las unidades y reducir cualquier diferencia de escala, los atributos o características de la cuenca se estandarizan con la siguiente expresión (Paris y Zucarelli, 2004):

$$Y_{ij} = \frac{X_{ij} - \bar{X}_l}{S_x} \quad (3.47)$$

donde:

X_{ij} : representa el valor de la j-ésima estación de la i-ésima variable.

\bar{X}_l : es la media de la variable X_{ij} .

S_x : desviación estándar de X_{ij} .

Y_{ij} : es la variable estandarizada de la j-ésima estación de la i-ésima variable.

Andrews (1972) mostró que la diferencia entre dos curvas es proporcional a la distancia euclidiana², es por ello que esta técnica permite identificar visualmente los grupos homogéneos. Estos se presentan como una banda de curvas cercanas (Nathan *et al.*, 1990).

3.1.3.- Prueba de Fisher.

La distribución F de Fisher, llamada así por el profesor Sir Ronald A. Fisher, comúnmente utilizada en la teoría de probabilidad y estadística, es empleada cuando se requiere probar si las varianzas de dos poblaciones normales son iguales, partiendo de la comparación de la varianzas de dos muestras extraídas aleatoriamente de esas poblaciones. En otras palabras, su aplicación se basa en la comparación de varianzas muestrales.

En la hidrología se emplea la distribución F cuando se requiere probar si dos o más series climatológicas, o hidrométricas, pertenecen a una misma población, es decir, forman parte de la misma región homogénea.

La principal ventaja que se obtiene al utilizar la distribución F , es que resulta ser un buen indicador de la estabilidad de la varianza, aunque los datos no se apeguen a una distribución normal.

Para determinar si dos muestras pertenecen a la misma población, es necesario aplicar una prueba de significancia estadística o prueba de hipótesis. A la prueba que utiliza la distribución F se le denomina prueba de Fisher. En esta prueba se calcula el estadístico F , definido por el cociente (Walpole, Myers y Myers, 2007):

$$F = \frac{S_1^2 \sigma_2^2}{S_2^2 \sigma_1^2} \quad (3.48)$$

Donde S_1^2 y S_2^2 son las varianzas de las muestras aleatorias independientes de tamaño n_1 y n_2 tomadas de las poblaciones normales con varianza σ_1^2 y σ_2^2 , respectivamente, con $v_1 = n_1 - 1$ y $v_2 = n_2 - 1$ grados de libertad.

²Andrews, D. F., *Plots of High-Dimensional Data*, Biometrics 28.1 (1972): 125-36.

En esta prueba, la hipótesis nula a probar es: $H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$, con una hipótesis alternativa $H_1: \sigma_1^2 > \sigma_2^2$. Considerando la hipótesis nula el estadístico F se calcula:

$$F = \frac{S_1^2}{S_2^2} \quad (3.49)$$

Cuando se calcula el estadístico $\frac{S_2^2}{S_1^2}$, el recíproco de F , se tiene una distribución $1/F$ con $v_1 = n_2 - 1$ y $v_2 = n_1 - 1$. Como en ambos casos se tiene una distribución F , conviene tomar a la varianza mayor como el numerador y a la menor como el denominador.

Una forma rápida para poder aceptar que las muestras pertenecen a una misma población, es observar el estadístico de prueba F . Si este se encuentra cerca de 1, entonces se acepta que las muestras pertenecen a la misma población, si es considerablemente distinto de 1, se puede suponer que las muestras no pertenecen a una misma población o región homogénea, aunque la hipótesis nula no se rechaza.

Para aceptar o rechazar la hipótesis nula es necesario comparar el estadístico de prueba F con el valor F crítico (F_c) para un nivel de significancia dado (α), generalmente del 1 o 5 %. Ver Figura 3.1.

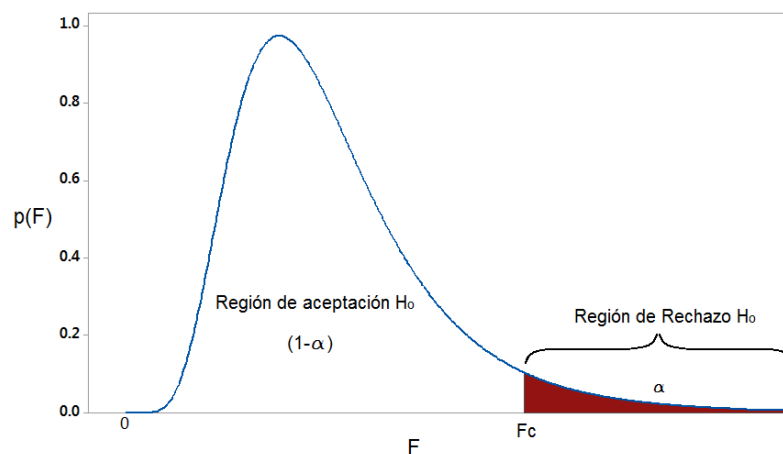


Figura 3.1. Región de rechazo para la hipótesis nula. Distribución F .

En la Tabla 3.1 y Tabla 3.2 se muestran algunos valores críticos de F para un nivel de significancia del 1 y 5 %, respectivamente.

Tabla 3.1. Valores inversos de la distribución F para un nivel de significancia del 1 %.

		Grados de libertad numerador																	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	16	18	20	40	60	80
Grados de libertad denominador	1	4052.2	4999.5	5403.4	5624.6	5763.6	5859.0	5928.4	5981.1	6022.5	6055.8	6106.3	6142.7	6170.1	6191.5	6208.7	6286.8	6313.0	6326.2
	2	98.5	99.0	99.2	99.2	99.3	99.3	99.4	99.4	99.4	99.4	99.4	99.4	99.4	99.4	99.4	99.5	99.5	99.5
	3	34.1	30.8	29.5	28.7	28.2	27.9	27.7	27.5	27.3	27.2	27.1	26.9	26.8	26.8	26.7	26.4	26.3	26.3
	4	21.2	18.0	16.7	16.0	15.5	15.2	15.0	14.8	14.7	14.5	14.4	14.2	14.2	14.1	14.0	13.7	13.7	13.6
	5	16.3	13.3	12.1	11.4	11.0	10.7	10.5	10.3	10.2	10.1	9.9	9.8	9.7	9.6	9.6	9.3	9.2	9.2
	6	13.7	10.9	9.8	9.1	8.7	8.5	8.3	8.1	8.0	7.9	7.7	7.6	7.5	7.5	7.4	7.1	7.1	7.0
	7	12.2	9.5	8.5	7.8	7.5	7.2	7.0	6.8	6.7	6.6	6.5	6.4	6.3	6.2	6.2	5.9	5.8	5.8
	8	11.3	8.6	7.6	7.0	6.6	6.4	6.2	6.0	5.9	5.8	5.7	5.6	5.5	5.4	5.4	5.1	5.0	5.0
	9	10.6	8.0	7.0	6.4	6.1	5.8	5.6	5.5	5.4	5.3	5.1	5.0	4.9	4.9	4.8	4.6	4.5	4.4
	10	10.0	7.6	6.6	6.0	5.6	5.4	5.2	5.1	4.9	4.8	4.7	4.6	4.5	4.5	4.4	4.2	4.1	4.0
	12	9.3	6.9	6.0	5.4	5.1	4.8	4.6	4.5	4.4	4.3	4.2	4.1	4.0	3.9	3.9	3.6	3.5	3.5
	14	8.9	6.5	5.6	5.0	4.7	4.5	4.3	4.1	4.0	3.9	3.8	3.7	3.6	3.6	3.5	3.3	3.2	3.1
	16	8.5	6.2	5.3	4.8	4.4	4.2	4.0	3.9	3.8	3.7	3.6	3.5	3.4	3.3	3.3	3.0	2.9	2.9
	18	8.3	6.0	5.1	4.6	4.2	4.0	3.8	3.7	3.6	3.5	3.4	3.3	3.2	3.1	3.1	2.8	2.7	2.7
	20	8.1	5.8	4.9	4.4	4.1	3.9	3.7	3.6	3.5	3.4	3.2	3.1	3.1	3.0	2.9	2.7	2.6	2.6
	40	7.3	5.2	4.3	3.8	3.5	3.3	3.1	3.0	2.9	2.8	2.7	2.6	2.5	2.4	2.4	2.1	2.0	2.0
	60	7.1	5.0	4.1	3.6	3.3	3.1	3.0	2.8	2.7	2.6	2.5	2.4	2.3	2.3	2.2	1.9	1.8	1.8
80	7.0	4.9	4.0	3.6	3.3	3.0	2.9	2.7	2.6	2.6	2.4	2.3	2.2	2.2	2.1	1.8	1.7	1.7	

Tabla 3.2. Valores inversos de la distribución F para un nivel de significancia del 5 %.

		Grados de libertad numerador																	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	16	18	20	40	60	80
Grados de libertad denominador	1	161.4	199.5	215.7	224.6	230.2	234.0	236.8	238.9	240.5	241.9	243.9	245.4	246.5	247.3	248.0	251.1	252.2	252.7
	2	18.5	19.0	19.2	19.2	19.3	19.3	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.5	19.5	19.5
	3	10.1	9.6	9.3	9.1	9.0	8.9	8.9	8.8	8.8	8.8	8.7	8.7	8.7	8.7	8.7	8.6	8.6	8.6
	4	7.7	6.9	6.6	6.4	6.3	6.2	6.1	6.0	6.0	6.0	5.9	5.9	5.8	5.8	5.8	5.7	5.7	5.7
	5	6.6	5.8	5.4	5.2	5.1	5.0	4.9	4.8	4.8	4.7	4.7	4.6	4.6	4.6	4.6	4.5	4.4	4.4
	6	6.0	5.1	4.8	4.5	4.4	4.3	4.2	4.1	4.1	4.1	4.0	4.0	3.9	3.9	3.9	3.8	3.7	3.7
	7	5.6	4.7	4.3	4.1	4.0	3.9	3.8	3.7	3.7	3.6	3.6	3.5	3.5	3.5	3.4	3.3	3.3	3.3
	8	5.3	4.5	4.1	3.8	3.7	3.6	3.5	3.4	3.4	3.3	3.3	3.2	3.2	3.2	3.2	3.0	3.0	3.0
	9	5.1	4.3	3.9	3.6	3.5	3.4	3.3	3.2	3.2	3.1	3.1	3.0	3.0	3.0	2.9	2.8	2.8	2.8
	10	5.0	4.1	3.7	3.5	3.3	3.2	3.1	3.1	3.0	3.0	2.9	2.9	2.8	2.8	2.8	2.7	2.6	2.6
	12	4.7	3.9	3.5	3.3	3.1	3.0	2.9	2.8	2.8	2.8	2.7	2.6	2.6	2.6	2.5	2.4	2.4	2.4
	14	4.6	3.7	3.3	3.1	3.0	2.8	2.8	2.7	2.6	2.6	2.5	2.5	2.4	2.4	2.4	2.3	2.2	2.2
	16	4.5	3.6	3.2	3.0	2.9	2.7	2.7	2.6	2.5	2.5	2.4	2.4	2.3	2.3	2.3	2.2	2.1	2.1
	18	4.4	3.6	3.2	2.9	2.8	2.7	2.6	2.5	2.5	2.4	2.3	2.3	2.2	2.2	2.2	2.1	2.0	2.0
	20	4.4	3.5	3.1	2.9	2.7	2.6	2.5	2.4	2.4	2.3	2.3	2.2	2.2	2.2	2.1	2.0	1.9	1.9
	40	4.1	3.2	2.8	2.6	2.4	2.3	2.2	2.2	2.1	2.1	2.0	1.9	1.9	1.9	1.8	1.7	1.6	1.6
	60	4.0	3.2	2.8	2.5	2.4	2.3	2.2	2.1	2.0	2.0	1.9	1.9	1.8	1.8	1.7	1.6	1.5	1.5
80	4.0	3.1	2.7	2.5	2.3	2.2	2.1	2.1	2.0	2.0	1.9	1.8	1.8	1.7	1.7	1.5	1.5	1.4	

Para aplicar esta técnica se estandarizan los valores de cada una de las muestras con la media (Carrizosa, 1997) mediante la ecuación 3.50. En esta estandarización lo que se busca es hacer la media igual a 1. Esto permite tener medias iguales en cada muestra, obteniendo como único parámetro de comparación a la varianza muestral.

$$X_i^S = \frac{X_i^m}{\overline{X^m}} \quad (3.50)$$

donde:

$\overline{X^m}$: es el promedio de los valores (gastos máximos anuales) en la estación m.

X_i^S : es el valor estandarizado registrado en el año i.

3.1.4.- Prueba de homogeneidad regional.

La pregunta de si los registros en un grupo son homogéneos puede ser respondida en un sentido estadístico si se determina que difieren entre sí por cantidades que no son debidas al azar (Dalrymle, 1960).

La hipótesis de homogeneidad, es que en una determinada región, que se supone como homogénea, la distribución de frecuencias en cada sitio es la misma excepto por un factor de escala (Hosking y Wallis, 1993).

Cuando se delimitan regiones homogéneas, ya sea empleando un enfoque cuantitativo o cualitativo, se supone que las estaciones que conforman dicha región se comportan de manera homogénea. Para determinar si este supuesto es verdadero, es necesario considerar una medida que permita conocer que tan homogénea o heterogénea es la región planteada, y si esta puede ser más (o menos) homogénea al quitar o agregar estaciones.

3.1.4.1.- Prueba de simulación muestral.

Al utilizar la prueba de Fisher, para delimitar regiones homogéneas, se supone que las muestras pertenecen a una población normal, lo cual ocurre muy pocas veces en los fenómenos climatológicos e hidrométricos. Sin embargo, una de las ventajas que se tiene con este método es que, aunque las muestras no provengan de una población normal, se obtienen buenos resultados en la delimitación de regiones, además de resultar una prueba muy conservadora. Otra ventaja que presenta este método frente a los demás, es que emplea una prueba de significancia estadística, lo cual da fuerza al supuesto. Por otro lado, una medida de homogeneidad o heterogeneidad puede sustentar aún más la hipótesis.

A continuación se plantea una prueba que permite evaluar la hipótesis de homogeneidad cuando las muestras no pertenecen a una población Normal.

Cuando las muestras, que se consideran como una región homogénea, provienen de una población que no se comporta como una Normal, pueden ser simuladas con el objetivo de probar si los datos en los sitios son consistentes con los generados para cada sitio, siguiendo una distribución de probabilidad determinada (Domínguez *et al.*, 2005). En otras palabras, cuando, por ejemplo, los sitios que conforman una supuesta región homogénea son representados por

una distribución de valores extremos tipo 1 (Gumbel), se estiman las variaciones en cada muestra realizando M simulaciones de la región N , con número de estaciones i , donde cada simulación tiene el tamaño original de las muestras que representan a la región homogénea supuesta.

Para cada simulación M se calcula el CV del conjunto de muestras simuladas. Este estadístico es comparado con el observado. Se considera que la región es homogénea si los CV simulados son consistentes con los observados, es decir, si la variación observada en cada muestra es debida al azar.

A continuación se presenta el procedimiento a seguir.

- Se obtienen los parámetros regionales de la función de distribución $F(x)$ que describe a la región homogénea a probar.
- Se simula M veces la región N a probar, con muestras de tamaño igual a las observadas. Estas simulaciones se realiza asignando una probabilidad de no excedencia $(1 - 1/T)$ aleatoria con función de densidad uniforme $Q(F), 0 \leq F \leq 1$.
- Para cada simulación M se determina el CV de las muestras generadas.
- Finalmente, se pueden graficar o comparar los CV generados de la simulación con los observados, ordenándolos de mayor a menor. Ver Figura 3.2.

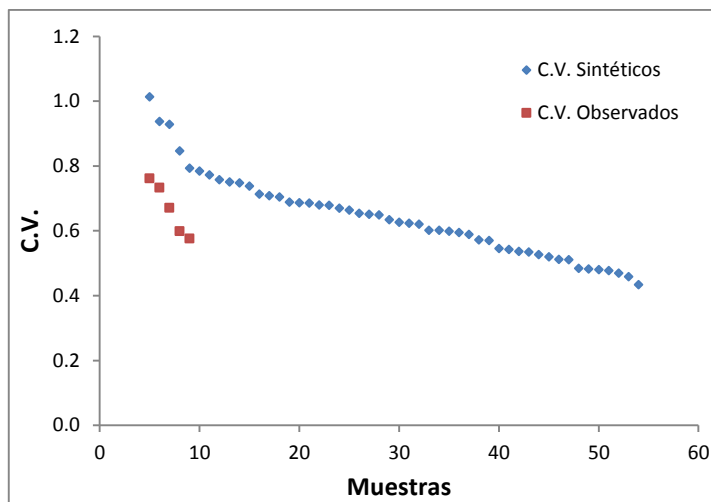


Figura 3.2. Comparación de los CV sintéticos con los observados.

Al estar los valores observados dentro de los puntos obtenidos de la simulación, la hipótesis de homogeneidad se puede aceptar, ya que las variaciones observadas son consistentes con las simuladas, es decir, los valores observados son debidos al azar y no dependen de una característica diferente a esta.

3.1.5.- Técnicas regionales.

Las técnicas regionales son utilizadas para transferir información entre las estaciones que conforman una determinada región homogénea, permitiendo incrementar el número de

mediciones, así como transmitir eventos importantes que no fueron medidos en determinado sitio, pero sí en estaciones cercanas. Estas técnicas permiten reducir la incertidumbre en la extrapolación de eventos a periodos de retorno altos, ya que aumentan la fiabilidad que se tiene de la extrapolación de un análisis local.

Dentro de las técnicas regionales más utilizadas se encuentran: la técnica de las estaciones-año, avenida índice, y técnicas de correlación y regresión múltiple.

Correlación y regresión múltiple. Esta técnica es empleada cuando los gastos máximos anuales pueden ser expresados en términos de más de una variable independiente que, generalmente, corresponden a las características fisiográficas o climatológicas de la cuenca, las cuales no están correlacionadas entre sí. En este método, tanto la variable dependiente como las independientes deben proceder de una población Normal (Gilroy, 1970; Salas *et al.*, 2008).

La regresión múltiple puede ser del tipo lineal

$$Y = a_1 + a_2X_1 + a_3X_2 + \dots + a_{n+1}X_n \quad (3.51)$$

o potencial

$$Y = a_1 * X_1^{a_2} * X_2^{a_3} * \dots * X_n^{a_{n+1}} \quad (3.52)$$

donde

Y : variable dependiente.

a_{n+1} : parámetros a estimar.

X_n : características fisiográficas o climatológicas de la cuenca.

Método de la Avenida Índice. El término "avenida índice" ó "índice de la avenida", fue utilizado por primera vez en el "*Flood-Frequency Analyses*", presentado por el U.S. Geological Survey (USGS) en el año de 1960, basado en el planteamiento de Tate Dalrymple. Este método establece que las muestras de gastos máximos anuales que conforman una determinada región homogénea siguen una misma distribución, excepto por un factor de escala, el cual es denominado avenida índice. Este factor refleja las características de los gastos máximos anuales de cada estación.

Considere una región homogénea con N estaciones, cada estación j con tamaño n_j y gastos máximos anuales Q_{jk} , $k=1, \dots, n_j$. Para cada estación los gastos máximos se estandarizan utilizando la avenida índice.

$$q_{jk} = \frac{Q_{jk}}{\mu_j} \quad (3.53)$$

Donde μ_j es la avenida índice en la estación j .

Dalrymple (1960) considera que las muestras se ajustan a una distribución de valores extremos tipo 1 (Gumbel), además de tomar registros con un periodo común. La avenida índice es la media de la distribución ajustada a cada estación, que corresponde al gasto asociado a un periodo de retorno de 2.33 años para una distribución Gumbel (Gumbel, 1945a). Hosking y Wallis (1997), por otro lado, utilizan la media de los gastos máximos anuales como la avenida índice. Robson y Reed (1999) a la mediana y, Smith (1989), al gasto asociado a una probabilidad de no excedencia del 90 % (T_{10}). En México, Carrizosa (1997) estudió 6 métodos de estandarización en la cuenca de la vertiente del pacífico centro de la República Mexicana³, utilizando como avenida índice a los gastos asociados a 2, 5 y 10 años de periodo de retorno, la desviación estándar de la muestra, el área drenada de la cuenca, la media de los gastos máximos anuales, entre otros, obteniendo los mejores resultados con este último.

Cuando se utiliza la media de la distribución Gumbel es común llamarlo como el método de Dalrymple.

Técnica regional estaciones-año. Este método es del tipo de la avenida índice. Consiste en formar un solo registro llamado estaciones-año, creado a partir de los valores estandarizados de cada grupo homogéneo, el cual una vez formado se le ajusta la mejor distribución de probabilidad. Las series son estandarizadas con la media de los gastos máximos de cada estación. Ver ecuación 3.50.

Una vez encontrada la distribución de mejor ajuste se estiman los factores de diseño regionales, los cuales son válidos en cualquier punto dentro de la región homogénea. Ver ecuación 3.54.

$$x_T^R = \frac{X_T^i}{\bar{X}_i} \quad (3.54)$$

donde:

x_T^R : factores de diseño regionales estimados para $T = 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000, 5000$ y 10000 años de periodo de retorno.

Cuando se requiera conocer un evento X_T^i en el sitio i , dentro de la región homogénea, basta multiplicar la relación obtenida en la ecuación 3.54 por la media de los gastos máximos anuales (\bar{X}_i) del sitio i de interés.

A diferencia de otras técnicas, esta no requiere periodos en común y es necesario que cada una de las estaciones tengan por lo menos 10 años de registro (Cunnane, 1988).

3.2.- Análisis de frecuencias.

Debido a la aleatoriedad que presentan los escurrimientos máximos anuales, estos tienen que ser analizados por medio de modelos probabilísticos, en los cuales se estudia su probabilidad de ocurrencia a través de un análisis de frecuencias que permite estimar eventos de diseño a diferentes periodos de retorno.

³ Carrizosa, E.E. (1997). *Regionalización de gastos máximos en la cuenca de la vertiente del pacífico centro de la República Mexicana*. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.

3.2.1.- Periodo de Retorno

En la hidrología el periodo de retorno se define como el promedio del número de años que transcurren para que un evento de determinada magnitud pueda ser igualado o excedido una vez (Stedinger *et al.*, 1993). Puede ser estimado con la fórmula empírica de Weibull (Benson, 1962), la cual permite encontrar el periodo de retorno de una muestra, de gastos máximos anuales, ordenada de mayor a menor. Se estima como sigue:

$$Tr = \frac{n + 1}{m} \quad (3.55)$$

donde:

n : número total de datos.

m : número de orden de la muestra de gastos máximos anuales ordenada de mayor a menor.

El periodo de retorno es utilizado para estimar la probabilidad de no excedencia de un evento.

$$P(X \leq x) = F(x) = 1 - \frac{1}{Tr} \quad (3.56)$$

3.2.2.- Distribución Gumbel

$$F(x) = e^{-e^{-\left(\frac{x-v}{\alpha}\right)}} - \infty < x < \infty, \quad \alpha > 0 \quad (3.57)$$

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} e^{-\left(\frac{x-v}{\alpha}\right)} e^{-e^{-\left(\frac{x-v}{\alpha}\right)}} - \infty < x < \infty, \quad \alpha > 0 \quad (3.58)$$

donde:

v : parámetro de ubicación

α : parámetro de escala

$$E(x) = v + 0.5772\alpha \quad (3.59)$$

$$\sigma^2 = \frac{\pi^2 \alpha^2}{6} \quad (3.60)$$

$$\gamma = 1.1396 \quad (3.61)$$

$$\kappa = 5.4002 \quad (3.62)$$

La variable reducida Gumbel es

$$y_i = \frac{x_i - v}{\alpha} \quad (3.63)$$

- Estimadores por momentos

$$v = \bar{x} - 0.45 S \quad (3.64)$$

$$\alpha = \frac{\sqrt{6}}{\pi} S = 0.78 S \quad (3.65)$$

- Estimadores por máxima verosimilitud

Los estimadores se obtienen mediante un proceso iterativo que considera la variable reducida y_i (ecuación 3.63).

$$P = n - \sum_{i=1}^n e^{-y_i} \quad (3.66)$$

$$R = n - \sum_{i=1}^n y_i + \sum_{i=1}^n y_i e^{-y_i} \quad (3.67)$$

El criterio de convergencia es:

$$\frac{P}{\alpha} \approx 0 \quad \text{y} \quad \frac{-R}{\alpha} \approx 0 \quad (3.68)$$

con incrementos

$$\delta_{v_j} = (1.11P_j - 0.26R_j) \frac{\alpha_j}{n} \quad (3.69)$$

$$\delta_{\alpha_j} = (0.26P_j - 0.61R_j) \frac{\alpha_j}{n} \quad (3.70)$$

Los nuevos estimados son:

$$v_{j+1} = v_j + \delta_{v_j} \quad (3.71)$$

$$\alpha_{j+1} = \alpha_j + \delta_{\alpha_j} \quad (3.72)$$

- Estimadores por momentos L.

$$v = \lambda_1 - 0.577216 \alpha \quad (3.73)$$

$$\alpha = \frac{\lambda_2}{\ln(2)} \quad (3.74)$$

$$\lambda_1 = M_{(0)} \quad (3.75)$$

$$\lambda_2 = 2 M_{(1)} - M_{(0)} \quad (3.76)$$

donde M_0 y M_1 son el primer y segundo momento de probabilidad pesada respectivamente (Greenwood *et al.*, 1979). Ver ecuaciones 3.43 y 3.44.

3.2.3.- Distribución GVE.

La metodología empleada en la distribución General de Valores Extremos (GVE) se ha explicado en el apartado 3.1.1.

3.2.4.- Distribución Doble Gumbel.

Las distribuciones mixtas o dobles se utilizan cuando se quiere predecir la ocurrencia de un fenómeno extraordinario, generalmente, producido por tormentas ciclónicas, deshielo de glaciares, entre otros (Domínguez *et al.*, 1980).

La presencia de tormentas ciclónicas y no ciclónicas indica la existencia de dos poblaciones, es decir, una segunda población que pertenece a los escurrimientos máximos extraordinarios producidos por los eventos ciclónicos y la primera a los no ciclónicos. En este caso, la función de distribución de probabilidad puede expresarse como:

$$F(x) = pF_1(x) + (1 - p)F_2(x) \quad (3.77)$$

donde $F_1(x)$ y $F_2(x)$ son, respectivamente, las funciones de distribución de probabilidad de los gastos máximos anuales no producidos por tormentas ciclónicas y de los producidos por ellas, p es la probabilidad de que en un determinado año el gasto máximo no sea producido por una tormenta ciclónica. La distribución Doble Gumbel se expresa como sigue:

$$F(x) = pe^{-e^{-\left(\frac{x-v_1}{\alpha_1}\right)}} + (1 - p)e^{-e^{-\left(\frac{x-v_2}{\alpha_2}\right)}} \quad (3.78)$$

$$f(x) = pe^{-e^{-\left(\frac{x-v_1}{\alpha_1}\right)}} e^{-\left(\frac{x-v_1}{\alpha_1}\right)} + (1 - p)e^{-e^{-\left(\frac{x-v_2}{\alpha_2}\right)}} e^{-\left(\frac{x-v_2}{\alpha_2}\right)} \quad (3.79)$$

con $x > 0$, $\alpha_1 > 0$, $\alpha_2 > 0$, $0 < p < 1$

donde:

v_1, v_2 : parámetro de ubicación de la primera y segunda población respectivamente.

α_1, α_2 : parámetro de escala de la primera y segunda población respectivamente.

p : parámetro de asociación.

3.2.5.- Error estándar de ajuste.

En teoría, una prueba de bondad de ajuste debe ser útil para discriminar entre diferentes modelos probabilísticos ajustados a una sola muestra (Campos, 2006).

Para definir la mejor distribución de ajuste en una serie de datos hidrométricos, es necesario contar con una medida cuantificable que permita encontrar la distribución que conduce a la mejor predicción.

El error estándar de ajuste permite seleccionar la función de probabilidades que mejor describe los gastos máximos instantáneos (Kite, 1988).

$$EEA = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \hat{X}_i)^2}{n - np}} \quad (3.80)$$

donde:

n : número de datos de la muestra.

np : número de parámetros de ajuste de la distribución utilizada.

X_i : son los gastos máximos anuales ordenados de mayor a menor.

\hat{X}_i : son los gastos estimados con la distribución que se prueba.

Finalmente, la distribución que mejor describe a los gastos máximos anuales es la que presenta el menor error estándar de ajuste.

3.3.- Ecuación regional Qmed*.

Las ecuaciones de regresión, basadas en las características fisiográficas o climatológicas de la cuenca, pueden ser construidas dentro de una región homogénea para predecir comportamientos hidrológicos (Nathan *et al.*, 1990; Lim y Lye, 2003; Dalrymple, 1960).

Cuando se quiere inferir información a una cuenca o región no aforada conviene desarrollar ecuaciones que involucren otras variables que puedan ser medidas, y que sean predictoras de los fenómenos hidrológicos, en este caso, la media de los gastos máximos anuales.

En el presente estudio se analiza la mejor relación entre las características de la cuenca y la media de los gastos máximos anuales utilizando una ecuación de tipo potencial, la cual se expresa de la siguiente forma:

$$Qmed * = a_1 X_1^{a_2} X_2^{a_3}, \dots, X_n^{a_{n+1}} \quad (3.81)$$

donde:

$Qmed *$: es la media estimada de los gastos máximos anuales en m³/s.

X_1, X_2, \dots, X_n : son las características fisiográficas o climatológicas de la cuenca (variables independientes). Estas características, por lo general, son: área (km²), pendiente media de la cuenca (%), tiempo de concentración (hrs), volumen medio-máximo precipitado en 24 horas (m³), precipitación media-máxima en 24 horas (mm), entre otras.

a_1, a_2, \dots, a_{n+1} : parámetros a estimar utilizando optimización no lineal. $a_1 \neq 0$.

3.3.1.- Cálculo de las características fisiográficas y climatológicas.

La selección y cálculo de las características fisiográficas y climatológicas debe realizarse considerando aquellas que puedan ser potencialmente útiles en la predicción de los escurrimientos (Domínguez, 1981), en este caso, la media de los gastos máximos anuales (Q_{med}). En la Tabla 3.3 se muestran las variables seleccionadas en este estudio.

Tabla 3.3. Características fisiográficas y climatológicas empleadas en el estudio.

Característica	Descripción	Unidades
A	Área drenada por la cuenca	Km ²
PMT	Perímetro de la cuenca	Km
X	Coordenada X del centroide de la cuenca	UTM
Y	Coordenada Y del centroide de la cuenca	UTM
Z	Coordenada Z del centroide de la cuenca	m.s.n.m.
PMC	Pendiente media de la cuenca	%
Lc	Longitud del cauce principal	Km
Sc	Pendiente del cauce principal (compensada)	%
Tc	Tiempo de concentración (Kirpich)	Horas
VT	Velocidad de Tránsito (Lc/Tc)	m/s
PM	Precipitación media-máxima en 24 horas (isoyetas)	mm
CN	Número de curva N (USSCS)	-
S	Infiltración potencial máxima (USSCS)	cm
Pe	Precipitación efectiva media- máxima en 24 hrs (USSCS)	mm
V	Volumen medio-máximo precipitado en 24 hrs ($PM*A$)	m ³
Ve	Volumen medio-máximo escurrido en 24 hrs ($Pe*A$)	m ³

Para obtener las características fisiográficas como el área, perímetro, pendiente media de la cuenca, longitud del cauce principal, centroide, pendiente del cauce principal, entre otras, es necesario contar con un Modelo Digital de Elevaciones (MDE), el cual puede ser tratado con ayuda de herramientas de procesamiento geoespacial. El MDE puede ser obtenido a través del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) con una resolución mínima de 15 x 15 m y una máxima de 120 x 120 m. Por otro lado, de no contar con dichos modelos, estas características pueden ser estimadas a través de cartas topográficas o por medio de levantamientos topográficos. En este estudio, para obtener las características antes mencionadas, se ha utilizado el software ArcMap 10.1® con un MDE de 15 x 15 m.

En el caso del centroide de la cuenca, solo se utilizó en la delimitación de regiones homogéneas.

El tiempo de concentración es estimado con la ecuación de Kirpich, la cual utiliza la longitud del cauce principal y la pendiente del mismo.

$$T_c = 0.000325 \frac{Lc^{0.77}}{Sc^{0.385}} \quad (3.82)$$

donde:

T_c : tiempo de concentración en horas.

Lc : longitud del cauce principal en metros.

Sc : pendiente del cauce, adimensional.

- Número de curva N.

Para estimar la infiltración se utilizó el método del número de escurrimiento N , propuesto por el United States Soil Conservation Service (USSCS, 1957), actualmente, Natural Resources Conservation Service (NRCS), el cual considera que el suelo retiene una cierta cantidad de agua al inicio de la precipitación.

Para calcular el número de curva correspondiente a cada cuenca es necesario determinar la permeabilidad del suelo, así como la cubierta vegetal y la pendiente del terreno. En la bibliografía⁴ se proponen diversos números de escurrimiento para cada caso. Sin embargo, en el presente trabajo se han empleado las tablas de número de escurrimiento publicadas en el "Manual del Modelo para Pronóstico de Escurrimiento"⁵, las cuales utilizan las definiciones de uso de suelo y cubierta vegetal empleadas por el INEGI. En todos los casos se consideró una condición hidrológica regular (referencia 5).

El INEGI ha publicado mapas de tipo de suelo (edafológicos), así como de uso de suelo y vegetación con escalas de 1:1 000 000 y 1:250 000. En este estudio se han empleado los mapas con escala 1: 250 000 y actualizados hasta el año 2013.

Como la mayoría de las cuencas constan de diferentes tipos y usos de suelo, es necesario determinar el valor de N mediante una media ponderada, calculada por medio de la expresión siguiente:

$$N = \frac{\sum_{i=1}^n N_i A_i}{A_T} \quad (3.83)$$

donde:

N : número de escurrimiento N de la cuenca.

A_T : área drenada por la cuenca.

⁴Aparicio, F.J. (1987), *Fundamentos de Hidrología de Superficie*; Chow, V.T., Maidment, D. y Mays (1994), *Hidrología Aplicada*; N.R.C.S. (2004), *Part 630 National Engineering Handbook Hydrology*, Chapter 9.

⁵ Domínguez, M.R., Arganis, J.M.L., Carrizosa, E.E., Esquivel, G.G., Méndez, A.B., y Mendoza R.A., (2008), *Manual del Modelo para Pronóstico de Escurrimiento*, Instituto de ingeniería, UNAM.

Una vez calculados el número de escurrimiento promedio de la cuenca y la lluvia total precipitada, es posible estimar la lluvia efectiva (Aparicio, 1989):

$$P_e = \frac{\left(P - \frac{508}{N} + 5.08\right)^2}{P + \frac{2032}{N} - 20.32} \quad (3.84)$$

donde:

P_e, P : son la precipitación efectiva y total respectivamente, dadas en centímetros.

En este estudio se utilizó una variación de la fórmula anterior, ya que se ha sustituido la precipitación total por la precipitación media-máxima en 24 horas (PM), dando como resultado una precipitación efectiva media-máxima (Pe) asociada a las precipitaciones medias-máximas en 24 hrs. La precipitación media-máxima en 24 horas fue calculada con la interpolación de Kriging ordinario ajustado a un semivariograma exponencial.

La infiltración potencial máxima es calculada con la siguiente ecuación:

$$S = \frac{2540}{N} - 25.4 \quad (3.85)$$

donde:

S : es la infiltración potencial máxima en centímetros.

3.3.2.- Optimización.

El mejor ajuste de la ecuación regional potencial es encontrado con metodologías de optimización no lineal con restricciones y múltiples variables. Entre estos modelos se encuentran seis importantes clases:

- Métodos de penalización exterior.
- Métodos de penalización interior.
- Métodos de proyección de gradiente.
- Método del gradiente reducido generalizado (GRG).
- Programación lineal sucesiva.
- Programación cuadrática sucesiva.

En todos los casos la idea básica, de los métodos de optimización con restricciones, es transformar el problema en otro sin restricciones, teniendo como objetivo común, obtener con el menor número de evaluaciones de la función objetivo una representación adecuada de la misma, permitiendo determinar la ubicación del punto óptimo. Entre los más utilizados se encuentra los de gradiente reducido y programación cuadrática sucesiva.

Para encontrar el ajuste óptimo de la ecuación regional fue necesario plantear una función objetivo, la cual permite evaluar qué tan dispersos son los valores estimados respecto a los valores medidos. Si la dispersión es grande, el ajuste obtenido no es un buen representante de

los valores medidos y las características utilizadas en dicho ajuste no tienen una alta relación con la media de los gastos máximos anuales, por otro lado, entre más pequeña resulte la dispersión, más cerca se está del ajuste óptimo.

Una forma de medir la dispersión es mediante la suma de los errores al cuadrado, es decir, la varianza residual (Campos, 2011). Esta ecuación permite medir la dispersión total entre la nube de puntos y el ajuste regional. Se calcula de la siguiente manera:

$$S_e^2 = \frac{\sum_{i=1}^n e_i^2}{n} \quad (3.86)$$

donde:

S_e^2 : varianza residual.

e_i : diferencia entre el valor medido y el calculado en el punto i ($y_i - y_i^*$).

n : tamaño de la nube de puntos.

Si la varianza residual es grande, el ajuste obtenido es malo, esto indica que la ecuación regional encontrada no puede aceptarse como una solución final, ya que no permite estimar la media de los gastos máximos anuales medidos en función de las características de la cuenca designadas para dicho ajuste.

Con la función objetivo establecida es necesario emplear un modelo de programación no lineal que permita minimizar el error, encontrando los parámetros (a_1, a_2, \dots, a_{n+1}) que mejor describan el ajuste, es decir, los parámetros óptimos. Uno de los métodos más utilizados en la programación no lineal con restricciones, es el del gradiente reducido. El algoritmo que mejor emplea esta metodología es el "Generalized Reduced Gradient (GRG2)" cuya estructura matemática fue desarrollada por Leon Lasdon (1978), University of Texas at Austin, y Alan Waren (1978), Cleveland State University, con las mejoras de Frontline Systems, Inc. Este algoritmo ha sido adoptado por la herramienta Solver®, incorporada en el software Excel®.

El criterio fijado para la selección del mejor ajuste ha sido el del *coeficiente de determinación*, que se denota con R^2 y resulta ser el coeficiente que mejor expresa el porcentaje de variaciones explicadas mediante el ajuste (Campos, 2011). Se calcula con la siguiente expresión:

$$R^2 = 1 - \frac{S_e^2}{S_y^2} \quad (3.87)$$

donde:

R^2 : coeficiente de determinación, $0 < R^2 < 1$.

S_y^2 : varianza de los gastos máximos anuales medidos.

Si el coeficiente de determinación es 0, entonces el modelo ajustado no explica ninguna de las variaciones de la variable medida, de tal modo que el modelo debe rechazarse. Si $R^2 = 1$,

entonces el modelo explica el 100% del valor de la variable, es decir, la varianza residual es 0 y no existen variaciones entre el valor medido y el calculado.

4.- CASOS DE APLICACIÓN.

En el presente estudio se han seleccionado tres regiones hidrológicas del territorio Mexicano, teniendo en cuenta la elección de regiones o cuencas geográficamente continuas. Las regiones a analizar son: RH 27 Norte de Veracruz; RH 28 Parcial-Papaloapan y, por último, la región hidrológica del río Coatzacoalcos o No. 29.

4.1.- Análisis preliminar de series hidrométricas y climatológicas.

La hidrología puede ser clasificada en forma amplia en dos fases: recolección de datos y métodos de análisis (Linsley *et al.*, 1975). De este modo, la recolección y medición de datos climatológicos e hidrométricos forma parte esencial de cualquier estudio hidrológico.

La recolección de datos climatológicos e hidrométricos, en nuestro país, se han utilizado para entender mejor los procesos hidrológicos en el diseño y operación de proyectos para el control y uso del agua. Sin embargo, las mediciones no siempre se realizan de la mejor forma, dando como resultado registros pocos confiables y en ocasiones inexistentes.

En los siguientes apartados se muestran algunas observaciones respecto a la selección de la mejor información hidrométrica y climatológica para el análisis.

- Series Hidrométricas

Por medio del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS, 2015), operado por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), a través del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), se obtuvo la información de 233 estaciones hidrométricas localizadas dentro de la región de estudio, actualizadas hasta el 31 de diciembre del 2011 y, distribuidas de la siguiente forma: 86 en la región Norte de Veracruz; 135 en la región 28 Papaloapan-Parcial y, finalmente, 12 en la región del río Coatzacoalcos.

Se obtuvieron las series de los gastos máximos anuales para cada estación y se añadieron los años que, aunque no presentaron valores en el año completo, sí tenían mediciones en los periodos de máxima precipitación.

Aquellas estaciones que no lograron tener 20 años de registro, como mínimo, no se tomaron en cuenta para el estudio, aunque se hicieron algunas excepciones:

- La estación Alseseca, en la región 27, con 18 años de registro. Se consideró en el análisis teniendo en cuenta que presenta información en un periodo de tiempo en el que se tienen mediciones en la mayoría de las estaciones de la región, además, no presenta interrupciones.

- Tuxtepec, en la región 28 Papaloapan. Cuenta con 18 años de registro continuo. Se tiene información en un tiempo en el que ocurrieron eventos importantes y presenta un periodo de registro común en la mayoría de las estaciones de la región. Solo se considera la serie hasta el año 1978, ya que en el año 1981 se inicia la construcción de la presa Cerro de Oro (Miguel de la Madrid), y en los años 1979 y 1980 no se tienen mediciones.

- Paso Arnulfo, en la región 29 Coatzacoalcos. Tiene 18 años de registro. Se utilizó en el estudio debido a que presenta mediciones en un periodo en el que ocurrieron eventos extraordinarios en la región, además de considerar el hecho de que solo se tienen 4 estaciones con buena información.

Se descartaron estaciones que tenían regulaciones en su cuenca por embalses o derivaciones importantes, así como las estaciones instaladas a una altitud menor a los 15 m.s.n.m. Esto debido a la posible regulación relacionada con los remansos producidos por las mareas.

- Estaciones reguladas en la región 27 Norte de Veracruz.

- Las estaciones Cazonas y El Raudal no se consideraron, ya que cuentan con posibles afectaciones por la marea. El Raudal cuenta con un área drenada de 456 km² y una media de los máximos anuales de 1,391.75 m³/s. Es una cuenca pequeña, pero con escurrimientos muy grandes. Por otro lado, se encuentra muy cerca del golfo de México, aproximadamente 1.5 km antes de su desembocadura, entre 7 y 10 m.s.n.m. Se cuenta con información de boletines hasta el año 1979 (SARH, 1979a), año en el cual alcanzó una media de 950.73 m³/s. Debido a que no se encontró más información que permita corroborar las mediciones posteriores, y a su posible regulación por mareas, no se consideró.

- La estación Coyutla se encuentra instalada en el río Nacaxa, en el cual operan las presas Laguna, Necaxa, Tenango y Nexapa.

- Las estaciones Paso Tenampulco y Las Minas, instaladas sobre el río Apulco, se encuentran aguas abajo de la presa La Soledad. Las estaciones Atexcaco dos Ríos y Colaxtitla se encuentran reguladas por la derivadora Atexcaco.

- La estación Remolino tiene regulaciones del sistema de presas Necaxa, presa La Soledad, y las derivadoras Atexcaco, Tetelilla y Calapa. Por último, las estaciones Borregos y Las Animas, reguladas por el sistema hidroeléctrico Las Minas.

- Estaciones reguladas en la región 28 Parcial y Papaloapan.

- Las estaciones Papaloapan y Chacaltianguis se encuentran operando aguas abajo de la presa Temascal y Cerro de Oro.

- Las estaciones Ángel R. Cabadas, Cuatutoloapan, Garro, Paso del Toro y el Tejar se encuentran instaladas a menos de 15 m.s.n.m.

- Estaciones reguladas en la región 29 Coatzacoalcos.

- La estación San José del Carmen se encuentra operando a una altitud menor a los 15 m, es por ello que no se considera.

En la Figura 4.1, Figura 4.2 y Figura 4.3 se muestran los casos antes mencionados para las regiones 27, 28 y 29 respectivamente.

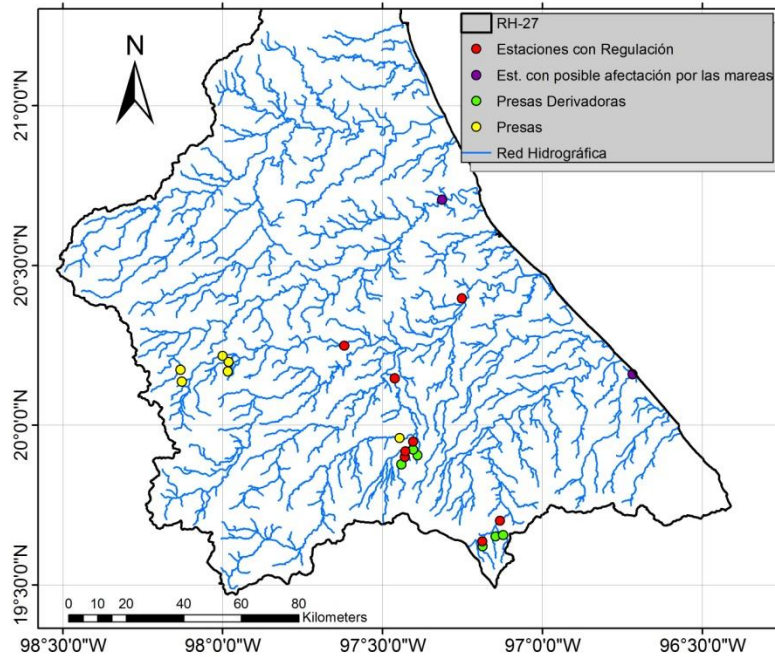


Figura 4.1. Región 27. Estaciones reguladas, presas y derivadoras.

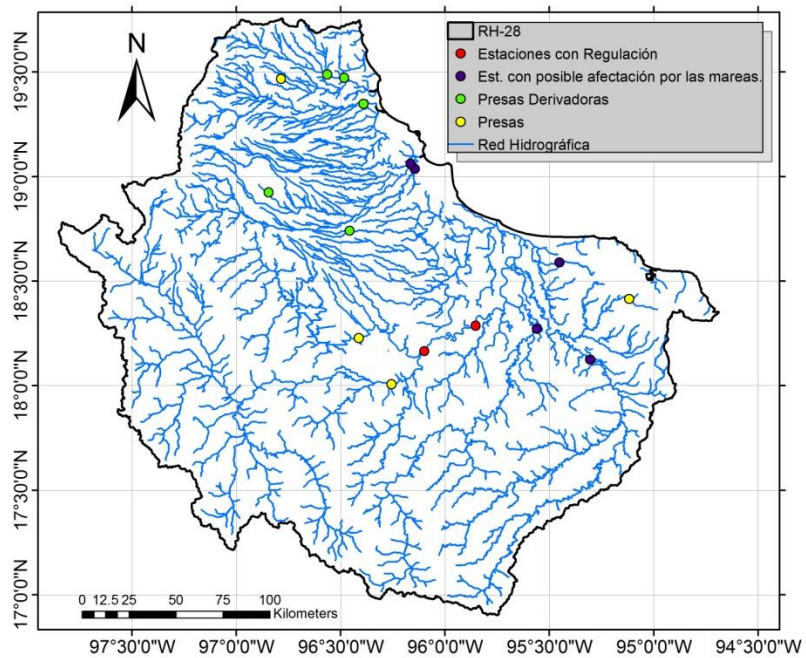


Figura 4.2. Región 28. Estaciones reguladas, presas y derivadoras.

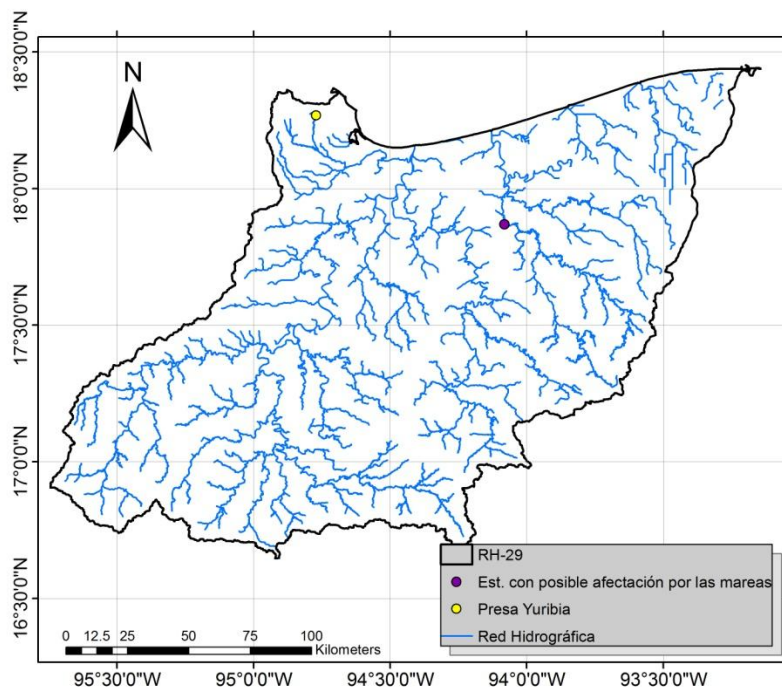


Figura 4.3. Región 29. Presa Yuribia y estación San José del Carmen.

Se identificaron los valores máximos y mínimos extraordinarios de cada serie. Se verificó si estaciones cercanas registraban comportamientos similares en el mismo año, de lo contrario, fue necesaria la validación de dicho año por medio del hidrograma de los gastos máximos instantáneos horarios obtenidos del BANDAS. En los casos en que no se contó con información sobre el hidrograma, se recurrió a los boletines hidrológicos publicados por la Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH) y la Comisión del Papaloapan. En las siguientes estaciones se encontraron inconsistencias en la serie de gastos máximos anuales:

- Región 27 Norte de Veracruz

- Estación La Gloria. Se eliminaron los años 1954 y 1955 con valores de 518.9 m³/s y 1675 m³/s respectivamente, ya que fueron años capturados erróneamente (SRH, 1969a). El año 1977 no se consideró debido a que presenta un valor muy pequeño en relación con los demás valores de la serie.

- Estación Puxtla. Se corrigió el año 1973 colocando el valor de 56.9 m³/s obtenido del boletín hidrológico número 42, tomo 5 (SARH, 1979a).

- Estación Buenos Aires. Se agrega el año 1968 con valor de 166 m³/s obtenido del boletín hidrológico número 42, tomo 5 (SARH, 1979a).

- Región 28 Papaloapan

- Estación Actopan. Se corrigió el año 1976 que presentaba error de captura. En su lugar se colocó el valor de 272 m³/s, el cual se encuentra en el boletín 43, tomo 2 (SARH, 1979b).

- Las estaciones Apoala, Dominguillo y Tomellin no se consideraron debido a la baja confiabilidad de la información, ya que presentan diferencias con la información publicada en los boletines de la Comisión del Papaloapan.
- En el periodo 1958 - 1964 de la estación Monte Rosa se realizaron correcciones, sustituyendo los valores obtenidos del BANDAS por los publicados en los boletines hidrológicos de la Comisión del Papaloapan.
- La estación Zapote presentó diferencias entre los datos obtenidos del BANDAS y los consultados en boletines. Los años que presentaron variación fueron: 1958, 1961, 1965, 1969. En este caso se sustituyeron los años mal capturados por los publicados en los boletines de la Comisión del Papaloapan.

La estación Lauchapan, instalada en el río San Andrés, aguas abajo de la presa Chilapan, se le restó el área de 255 km² que corresponde al área drenada por la presa antes mencionada. De este modo, solo se considera el área que produce escurrimiento. Esta estación se consideró en el estudio debido a que forma parte de una región muy lluviosa con precipitaciones que oscilan entre los 1,500 y 3,000 mm anuales.

Finalmente, quedaron fuera del estudio aquellas estaciones que no fue posible encontrar su ubicación.

- Series Climatológicas.

A través del CLImate COMputing project (CLICOM, 2013) se obtuvieron los registros de precipitación diaria de 795 estaciones climatológicas ubicadas dentro, y en las cercanías de la regiones hidrológicas en estudio.

Considerando el año completo con información, actualizada hasta el 31 de diciembre del 2011, se obtuvieron las series de lluvias máximas en 24 horas, tomando en cuenta las estaciones suspendidas y las que aún se encuentran en operación.

Se descartaron aquellas estaciones que no contaron con más de 20 años de registro, y las resultantes fueron analizadas encontrando valores extraordinarios máximos y mínimos. Algunas correcciones fueron necesarias:

- Las estaciones Cuetzalan del Progreso (1946 y 1954), Tenango de Dorian (1969, 1971 y 1973), La Fundición (1966), La Pagoda (1966), Ozuluama (1958, 1974 y 1976) y Las Vigas (1955), presentaron errores de captura en los años mostrados en paréntesis y se sustituyeron por los publicados en el boletín climatológico no. 7, tomo 1 (SARH, 1985).
- Se corrigió la ubicación en las siguientes estaciones: Tlatlauquitepec (CFE), Jopala (CFE), La Fundición (CFE), La Pagoda (CFE), Libres (SMN), Presa la Soledad (CFE) y Tamiahua (CFE) en la región hidrológica Norte de Veracruz (SRH, 1961a; SRH, 1961b; SRH, 1962c; SRH, 1963); Boca de Sochiapa, Campamento Vista Hermosa, Jocotipac y San Juan del Río, en la región 28 (SRH, 1962a; SRH, 1962b).

- Las estaciones Huehuetla, Presa la Esperanza, Nexapa (CLFC), Nuevo Necaxa (CLFC) y Laguna (CLFC) se complementaron con la información del boletín climatológico número 7, tomo 1 de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 1985.

-Se agregaron las estaciones Cuamanala, El Carmen y El Rosario (CFE) con información publicada en el Boletín climatológico no. 7, tomo 1 (SARH, 1985).

Finalmente, los eventos máximos y mínimos de cada serie fueron corroborados con estaciones cercanas y con la información disponible en boletines.

4.2.- Análisis regional RH 27.

En la región hidrológica número 27, Norte de Veracruz, se emplearon 22 estaciones en la regionalización, de las cuales 21 contienen al menos 20 años de registro, mientras que la estación Alseseca es la única que cuenta con 18 años.

4.2.1.- Delimitación de regiones homogéneas RH 27.

En la tabla siguiente se muestran las estaciones consideradas, así como sus estadísticos.

Tabla 4.1. Región 27. Parámetros estadísticos.

Código	Nombre	Máximo (m ³ /s)	Media (m ³ /s)	Mínimo (m ³ /s)	Desv. Estándar (m ³ /s)	C.V.	Tamaño
27001	MARTINEZ DE LA TORRE	4540.0	1205.6	321.6	809.3	0.671	58
27003	LA GLORIA	172.0	44.3	6.7	48.4	1.093	22
27005	LIBERTAD	1525.1	575.3	102.9	297.6	0.517	40
27007	VEGA DE ALATORRE	770.0	255.1	26.7	172.5	0.676	32
27008	ALSESECA	108.0	39.9	12.6	26.8	0.672	18
27020	PUENTE HENRIQUEZ	692.0	196.6	82.4	161.6	0.822	25
27021	RANCHO APULCO	288.0	131.6	20.7	64.1	0.487	27
27027	XILITA	158.0	35.5	7.5	33.1	0.933	23
27029	PUXTLA	57.2	19.8	5.0	14.2	0.716	36
27030	PUENTE XIUCAYUCAN	96.4	29.5	8.2	19.3	0.655	37
27031	JALACINGO	128.0	28.6	3.7	30.8	1.076	37
27034	NIXTAMALAPA	20.0	4.7	1.4	3.2	0.694	34
27036	ALTOTONGA	26.5	6.1	1.0	5.7	0.930	20
27037	TEPECAPAN	994.0	204.9	32.1	256.8	1.253	23
27038	MAPILCO	1277.0	267.8	51.0	255.5	0.954	23
27046	CHALAME	213.0	56.7	20.0	41.0	0.724	30
27049	TECUANTEPEC	4060.0	1114.7	377.0	676.2	0.607	46
27052	BUENOS AIRES	711.0	254.3	41.2	155.5	0.612	40
27055	SONTALACO	354.0	67.0	10.1	82.5	1.231	41
27002	POZA RICA	5412.5	1397.5	390.0	1138.2	0.814	58
27009	SOMBRETE	8514.2	2730.1	129.3	2559.7	0.938	20
27050	SANTA ANA	2252	1167.1	677.0	399.4	0.342	20

En la Tabla 4.1 se observa a la estación Santa Ana con el coeficiente de variación más bajo en toda la región hidrológica. Cuenta con registros hidrométricos en el periodo 1962 - 1981, los cuales fueron verificados con los publicados en el boletín hidrológico número 42, tomo 5, (SARH, 1979a) sin encontrarse diferencia entre ambos registros. Su precipitación media-máxima en 24 horas es de 88.36 mm, menor a la observada en las cuencas vecinas; Tecuantepec con 112.10 mm y Coyutla con 108.80 mm, colindando al sur y norte respectivamente. La baja variabilidad en los escurrimientos producidos en esta cuenca puede ser originada por las extracciones que se realizan en las tomas de los tributarios Hueyapan, Tepeixco, Tlaxco, Laguna, Zempoala y Tehuilzalco, las cuales contribuyen al sistema hidroeléctrico Necaxa. Considerando lo anterior, se ha decidido no incluirla en el estudio. Esto debido a las posibles regulaciones producidas por las extracciones.

Las estaciones La Gloria, Jalacingo, Tepecapan y Sontalaco, cuentan con coeficientes de variación por encima de uno, lo cual tiene sentido al ser cuencas de no más de 100 km².⁶ y estar ubicadas en una región altamente afectada por los ciclones con pendientes muy pronunciadas.

Para encontrar regiones homogéneas se aplicaron los métodos explicados en el apartado 3.1.

- Método del parámetro β de la distribución GVE

Para aplicar el método de la distribución GVE se encontraron 16 estaciones con un periodo común de 13 años, comprendido entre 1963 - 1975. Se propusieron un segundo y un tercer grupo; el segundo, con un periodo en común de 11 años y 13 estaciones, comprendido entre 1957 - 1967 y, el tercero, añadiendo una estación más al grupo anterior, pero disminuyendo a 10 años el periodo común (1958 - 1967). Considerando que no se tiene un periodo común entre todas las estaciones, se obtuvo el parámetro beta tomando en cuenta las series completas para formar grupos homogéneos.

Las estaciones Libertad, Vega de Alatorre y Sombrerete, no se incluyeron en los primeros 3 periodos, ya que no coincidieron en registros comunes.

En el primer periodo (1963 - 1975) se encontraron 3 regiones homogéneas. Se dividieron los betas en 2 regiones, las positivas y las negativas, posteriormente, se formaron subregiones considerando una separación no mayor a 0.25, salvo en el grupo 3 donde existe una separación entre Chalame y Jalacingo de 0.26. Ver Tabla 4.2. No se incluyeron las estaciones Puente Henríquez, Nixtamalapa, Libertad, Vega de Alatorre y Sombrerete, debido a no contar con información completa en el periodo utilizado.

⁶Dawdy, D. R. (1961). *Variation of flood ratios with size of drainage area*. US Geological Survey professional paper.

Tabla 4.2. Región 27. Regiones homogéneas con el método del parámetro β - GVE. Periodo 1963 - 1975.

Tamaño	Código	Nombre	β	Grupo Homogéneo
23	27027	XILITA	0.0080	1
37	27030	PUENTE XIUCAYUCAN	-0.0306	2
27	27021	RANCHO APULCO	-0.0448	
36	27029	PUXTLA	-0.0652	
41	27055	SONTALACO	-0.0990	
22	27003	LA GLORIA	-0.1078	
46	27049	TECUANTEPEC	-0.1098	
18	27008	ALSESECA	-0.1305	
40	27052	BUENOS AIRES	-0.1439	
58	27002	POZA RICA	-0.1488	
23	27038	MAPILCO	-0.1711	
20	27036	ALTOTONGA	-0.2069	
30	27046	CHALAME	-0.6174	3
58	27001	MARTINEZ DE LA TORRE	-0.7545	
23	27037	TEPECAPAN	-0.8056	
37	27031	JALACINGO	-0.8828	

Tabla 4.3. Región 27. Regiones homogéneas con el método del parámetro β - GVE. Periodo 1957 - 1967.

Tamaño	Código	Nombre	β	Grupo Homogéneo
34	27034	NIXTAMALAPA	0.1007	1
25	27020	PUENTE HENRIQUEZ	0.0773	
23	27038	MAPILCO	-0.0291	2
23	27027	XILITA	-0.0599	
23	27037	TEPECAPAN	-0.0770	
36	27029	PUXTLA	-0.1060	
27	27021	RANCHO APULCO	-0.1174	
37	27030	PUENTE XIUCAYUCAN	-0.1799	
58	27001	MARTINEZ DE LA TORRE	-0.1849	
58	27002	POZA RICA	-0.2096	
20	27036	ALTOTONGA	-0.5031	3
37	27031	JALACINGO	-0.5469	
22	27003	LA GLORIA	-0.6682	

En el periodo 1957 - 1967 se definieron 3 grupos homogéneos (Tabla 4.3); el primero, formado por las estaciones Nixtamalapa y Puente Henríquez, con betas positivos; el segundo, conformado por Mapilco, Xilita, Tepecapan, Puxtla, Rancho Apulco, Martínez de la Torre y Poza Rica, con betas entre 0 y -0.25 y; el tercero, compuesto por las estaciones Altotonga, Jalacingo y La Gloria. En cuanto a la estación Xilita, se observó un cambio de signo respecto al periodo 1963 - 1975, lo

que ocasionó que cambiara de grupo homogéneo. Estaciones como La Gloria, Tepecapan, Mapilco, Martínez de la Torre, Altotonga, Puente Xiuacayucan y Jalacingo presentaron un cambio significativo respecto a la beta estimada en la Tabla 4.2, sin embargo, solo Tepecapan, Altotonga, Martínez de la Torre y La Gloria cambiaron de grupo homogéneo. Las estaciones Alseseca, Libertad, Vega de Alatorre, Sombrerete, Chalame, Tecuantepec, Buenos Aires y Sontalaco no cuentan con información completa en el periodo 1957 - 1967, es por ello que no fueron seleccionadas.

Tabla 4.4. Región 27. Regiones homogéneas con el método del parámetro β - GVE. Periodo 1958 - 1967.

Tamaño	Código	Nombre	β	Grupo Homogéneo
25	27020	PUENTE HENRIQUEZ	0.1351	1
34	27034	NIXTAMALAPA	0.0789	
23	27038	MAPILCO	0.0447	
27	27021	RANCHO APULCO	-0.0130	2
18	27008	ALSESECA	-0.0139	
36	27029	PUXTLA	-0.0190	
23	27027	XILITA	-0.0418	
23	27037	TEPECAPAN	-0.0511	
22	27003	LA GLORIA	-0.1547	
58	27002	POZA RICA	-0.1634	
58	27001	MARTINEZ DE LA TORRE	-0.1796	
37	27030	PUENTE XIUCAYUCAN	-0.1808	3
37	27031	JALACINGO	-0.6000	
20	27036	ALTOTONGA	-0.6040	

En la Tabla 4.4 se muestran los tres grupos formados con el periodo 1958 - 1967. El primer grupo se formó con los betas positivos; el segundo, con betas entre 0 y -0.25 y; el tercero, con las estaciones Jalcingo y Altotonga. Al considerar este periodo la estación Mapilco cambia de signo al no tomar en cuenta el año 1957. Las estaciones Puxtla, Rancho Apulco y La Gloria presentan cambios en el valor de su beta, aunque la mayor variación se presenta en La Gloria, es por ello que cambia de grupo homogéneo. Las estaciones no consideradas son: Libertad, Vega de Alatorre, Sombrerete, Chalame, Tecuantepec, Buenos Aires y Sontalaco debido a que no cuentan con información en el periodo considerado.

En la Tabla 4.5 se muestran los grupos formados considerando los registros completos. Al obtener el parámetro beta del mejor ajuste, tomando las muestras completas, se obtienen grupos homogéneos con cuencas más cercanas (Ver Figura 4.4), mientras que para los periodos 1957 - 1967 y 1958 - 1967 se obtienen regiones que no representan cercanía geográfica. El periodo 1963 - 1975, que toma en cuenta la presencia de eventos máximos extremos, también forma grupos con cercanía entre sus cuencas, pero no incluye a todas las estaciones de la región.

Para esta región se consideró el periodo completo, ya que se han obtenido mejores resultados tomando en cuenta los eventos extraordinarios ocurridos en cada estación.

Tabla 4.5. Región 27. Regiones homogéneas con el método del parámetro β - GVE. Registros completos.

Tamaño	Código	Nombre	β	Grupo Homogéneo
20	27009	SOMBRETERE	-0.0108	
27	27021	RANCHO APULCO	-0.0183	
40	27005	LIBERTAD	-0.0320	
32	27007	VEGA DE ALATORRE	-0.0523	
40	27052	BUENOS AIRES	-0.1523	
41	27055	SONTALACO	-0.1534	1
25	27020	PUENTE HENRIQUEZ	-0.1584	
23	27037	TEPECAPAN	-0.1631	
23	27038	MAPILCO	-0.2002	
46	27049	TECUANTEPEC	-0.2119	
36	27029	PUXTLA	-0.2217	
37	27030	PUENTE XIUCAYUCAN	-0.2652	
58	27001	MARTINEZ DE LA TORRE	-0.2689	
34	27034	NIXTAMALAPA	-0.3141	2
58	27002	POZA RICA	-0.3333	
20	27036	ALTOTONGA	-0.4018	
37	27031	JALACINGO	-0.4068	
30	27046	CHALAME	-0.4589	
18	27008	ALSESECA	-0.5074	3
23	27027	XILITA	-0.5657	
22	27003	LA GLORIA	-0.7483	

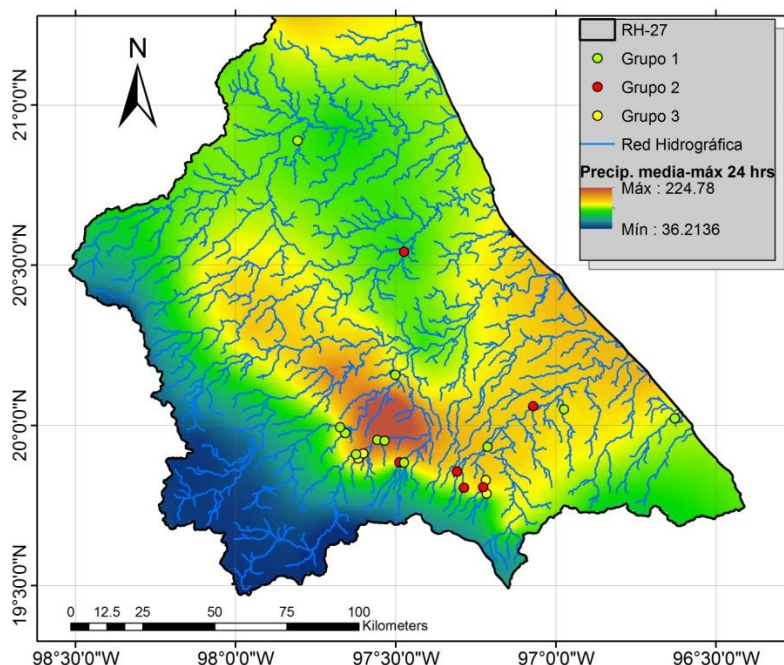


Figura 4.4. Región 27. Regiones homogéneas con el método del parámetro β - GVE. Registros completos.

- Prueba de Fisher para delimitar regiones homogéneas.

Aplicando la prueba de Fisher, con un nivel de significancia del 5 %, se logró identificar tres regiones homogéneas en la región 27. La primera, formada por las cuencas Tepecapan, Sontalaco, La Gloria, Jalacingo, Mapilco, Sombrerete, Xilita y Altotonga, cuyos parteaguas encierran cañadas con terrenos que van de fuertemente accidentados a muy escarpados y tiempos de concentración pequeños, a excepción de la cuenca Sombrerete, la cual cuenta con un tiempo de concentración de 23 hrs.

El segundo grupo está formado por las cuencas Puente Henríquez, Poza Rica, Chalame, Puxtla, Nixtamalapa, Vega de Alatorre, Alseseca, Martínez de la Torre y Puente Xiucayucan. Estas cuencas se desarrollan a través de terrenos fuertemente accidentados con un cauce muy pronunciado y tiempos de concentración entre 2 y 5 horas, a excepción de las cuencas Poza Rica y Martínez de la Torre, ya que presentan tiempos de concentración mucho mayores a los de su grupo, esto debido a que gran parte del cauce se desarrolla en las partes bajas de la cuenca provocando que la pendiente del mismo disminuya.

El tercer grupo lo conforman las estaciones Tecuantepec, Buenos Aires, Libertad y Rancho Apulco; con tiempos de concentración entre 5 y 12 horas, cuencas que drenan terrenos que van de accidentados a fuertemente accidentados y con cauces que se desarrollan entre zonas montañosas y la planicie.

En la Tabla 4.6 se muestran los grupos formados, así como su varianza estandarizada con la media de los gastos máximos anuales, la cual coincide con el coeficiente de variación de la muestra sin estandarizar.

Una de las primeras ventajas que se obtiene con este método es que incluye a todas las estaciones de la región, además, se consideran 20 años como mínimo, con lo cual se obtienen buenos resultados.

Tabla 4.6. Región 27. Regiones homogéneas - Fisher 5 %.

Tamaño	Código	Nombre	Cv	Cv ²	Grupo Homogéneo
23	27037	TEPECAPAN	1.253	1.57	
41	27055	SONTALACO	1.231	1.52	
22	27003	LA GLORIA	1.093	1.20	
37	27031	JALACINGO	1.076	1.16	
23	27038	MAPILCO	0.954	0.91	1
20	27009	SOMBRERETE	0.938	0.88	
23	27027	XILITA	0.933	0.87	
20	27036	ALTOTONGA	0.930	0.87	
25	27020	PUENTE HENRIQUEZ	0.822	0.68	
58	27002	POZA RICA	0.814	0.66	
30	27046	CHALAME	0.724	0.52	
36	27029	PUXTLA	0.716	0.51	
34	27034	NIXTAMALAPA	0.694	0.48	2
32	27007	VEGA DE ALATORRE	0.676	0.46	
18	27008	ALSESECA	0.672	0.45	
58	27001	MARTINEZ DE LA TORRE	0.671	0.45	
37	27030	PUENTE XIUCAYUCAN	0.655	0.43	
40	27052	BUENOS AIRES	0.612	0.37	
46	27049	TECUANTEPEC	0.607	0.37	
40	27005	LIBERTAD	0.517	0.27	3
27	27021	RANCHO APULCO	0.487	0.24	

En la Figura 4.5 se muestran los grupos homogéneos obtenidos con la prueba de Fisher para un nivel de significancia del 5 %.

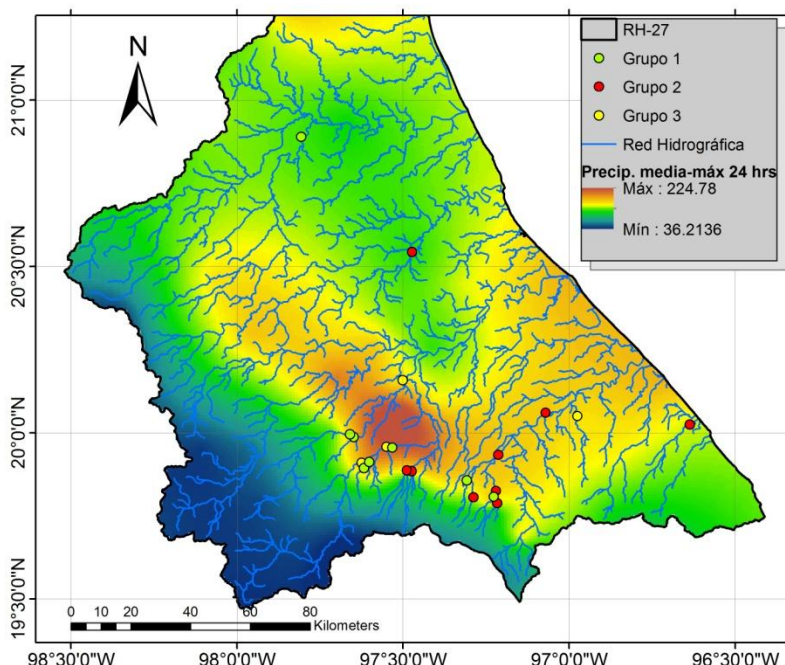


Figura 4.5. Región 27. Regiones homogéneas - Fisher 5 %.

Es importante resaltar que el grupo 1 corresponde a cuencas con respuesta rápida del escurrimiento, debida a las pendientes pronunciadas en la red de drenaje y a las áreas pequeñas de las cuencas. Estas características hacen que los coeficientes de variación sean mayores (Dawdy, 1961). En los grupos 2 y 3, los coeficientes de variación van descendiendo, al igual que la pendiente del cauce principal, caso contrario del área. Por otro lado, la estación Sombrerete, agrupada en la primera región homogénea, tiene la pendiente del cauce más chica de toda la región y es la segunda en tamaño, sin embargo, se encuentra en una zona con alta presencia de ciclones, lo cual proporciona la gran variación en los escurrimientos. En cuanto a Poza Rica, localizada al norte de la región, cuenta con la mayor área drenada de la región y es la segunda en importancia en cuanto a los escurrimientos y, aunque presenta afectaciones de ciclones, no se agrupa con la primera región homogénea.

Se delimitaron las regiones homogéneas utilizando un nivel de significancia del 1 %, lo cual aumento el número de estaciones del primer y segundo grupo a 9 y 10 estaciones respectivamente, pero el tercer grupo disminuyo a solo 2 estaciones. Si bien es deseable que un grupo contenga el mayor número de estaciones posible, también se debe considerar que la calidad en la transferencia de la información puede disminuir. Es por ello que se decidió utilizar la delimitación con un nivel del 5 %.

- Método de los trazos multidimensionales.

Para aplicar este método se eligieron aquellas características fisiográficas y climatológicas que pudieran ser predictoras de los escurrimientos (ver apartado 3.3.1). Se utilizó la regresión lineal múltiple para encontrar las características que son estadísticamente más significativas en dicha predicción.

Como variables independientes (características fisiográficas o climatológicas) se eligieron el área de la cuenca (Km²); precipitación media-máxima en 24 horas (mm); pendiente media de la cuenca (%); número de escurrimiento *N*; centroide de la cuenca (x,y,z), en coordenadas UTM; longitud del cauce principal (km); pendiente del cauce principal (%); tiempo de concentración (hrs); infiltración potencial máxima (cm) y el perímetro de la cuenca (km). Las variables a predecir son: la media de los gastos máximos instantáneos (m³/s) y los gastos asociados a 2, 5, 10, 20 y 50 años periodo de retorno obtenidos con la distribución General de Valores Extremos para cada estación. En la siguiente tabla se muestran las características fisiográficas y climatológicas empleadas.

Tabla 4.7. Región 27. Características fisiográficas y climatológicas.

Estación	Código	A (km ²)	PM (mm)	PMC (%)	CN	Centroide			Lc (Km)	Sc (%)	PMT (Km)
						X (utm)	Y (utm)	Z (msnm)			
MARTINEZ DE LA TORRE	27001	1524.8	118.6	31.0	76.1	690474.9	2188565.7	1921.5	88.1	2.1	221.8
LA GLORIA	27003	50.7	115.3	36.5	45.6	643750.5	2194170.8	2089.3	18.7	3.9	39.6
LIBERTAD	27005	163.0	133.7	24.9	84.6	713897.6	2204752.0	884.3	33.5	1.7	79.3
VEGA DE ALATORRE	27007	253.0	117.7	28.3	74.1	737059.5	2200391.1	1002.1	44.6	2.1	99.4
ALSESECA	27008	55.8	102.1	29.1	67.5	686572.5	2182804.1	2100.2	15.3	5.2	35.2
PUENTE HENRIQUEZ	27020	464.5	106.6	21.1	70.2	678916.9	2187049.6	1825.9	60.4	4.6	119.5
RANCHO APULCO	27021	1147.3	56.2	38.5	71.0	623508.0	2176915.0	2594.6	99.7	1.3	209.1
XILITA	27027	10.3	140.4	25.6	62.2	646588.1	2198524.5	1883.1	9.3	6.7	18.4
PUXTLA	27029	171.1	73.2	12.1	68.1	661527.1	2183358.0	2504.0	42.5	3.9	84.0
PUENTE XIUCAYUCAN	27030	167.2	81.7	19.6	64.8	652210.5	2188710.8	2366.0	30.8	3.5	78.4
JALACINGO	27031	74.8	96.9	13.4	65.9	672644.5	2185951.4	2325.0	23.7	5.2	55.8
ALTOTONGA	27036	155.0	83.3	10.9	69.3	677456.4	2179931.0	2282.1	38.3	4.5	84.0
TEPECAPAN	27037	97.2	119.4	63.2	66.8	635457.7	2203513.3	1771.6	21.2	4.0	49.5
MAPILCO	27038	610.4	74.8	51.9	78.8	621479.2	2196964.4	2106.1	68.1	2.6	141.4
CHALAME	27046	220.9	90.5	16.3	69.0	679695.2	2181248.8	2180.2	40.4	5.0	92.1
TECUANTEPEC	27049	1054.9	112.1	48.2	75.8	631586.7	2204532.6	1741.4	106.0	1.9	213.8
BUENOS AIRES	27052	1320.7	65.4	37.5	69.1	626848.7	2179590.9	2452.2	112.4	1.7	233.0
SONTALACO	27055	42.7	148.4	33.4	56.0	652948.1	2200971.3	1792.8	13.6	9.3	33.3
POZA RICA	27002	1603.6	118.4	26.9	83.0	619669.7	2247526.3	1234.1	139.5	0.5	332.1
SOMBRERETE	27009	1559.3	124.7	30.7	82.0	603323.9	2275759.1	1124.8	136.1	0.5	273.6

Se realizó el análisis de datos por medio de la regresión múltiple utilizando el software Excel®, dando las coordenadas del centroide (x, y, z); el perímetro; pendiente del cauce principal; precipitación media-máxima en 24 horas y la longitud del cauce principal como las características con mayor peso estadístico en la predicción de los escurrimientos.

La característica con mayor correlación resultó ser la coordenada y del centroide de la cuenca. El poder explicativo de esta característica se puede analizar comparando la incidencia de eventos ciclónicos en la región, ya que la parte norte es la más afectada por los ciclones. La segunda en

importancia es la longitud del cauce. La coordenada x , perímetro, coordenada z , precipitación media-máxima en 24 horas y la pendiente del cauce, son las que le siguen en importancia.

Para el cálculo de las curvas de Andrews se utilizaron las 5 características de mayor importancia: coordenada y ; longitud del cauce; coordenada x ; perímetro y la coordenada z , las cuales fueron estandarizadas con la ecuación 3.47.

En la Figura 4.6 se muestran las curvas de Andrews del grupo homogéneo formado por las estaciones La Gloria, Xilita, Tepecapan y Sontalaco (grupo 1).

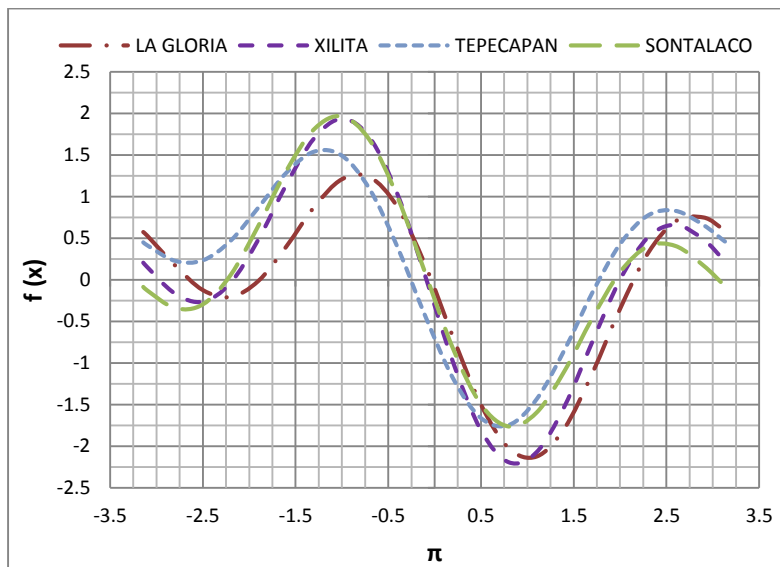


Figura 4.6. Región 27. Curvas de Andrews-Grupo 1.

Con las curvas restantes se formaron 4 grupos más, sin embargo, la estación Martínez de la Torre no fue posible ubicarla visualmente en ninguno, por otro lado, se puede utilizar el criterio de la suma de los cuadrados de la diferencia entre un determinado grupo y la estación a ubicar (Nathan *et al.*, 1990).

$$SS = \sum_{i=1}^n (S_{ji} - \bar{S}_{ki})^2 \quad (4.1)$$

Donde S_{ji} es la curva de la cuenca j que se quiere ubicar y \bar{S}_{ki} es la curva característica del grupo k ya identificado. Finalmente, la cuenca se ubica en el grupo k donde se haya obtenido el menor SS .

Aplicando el criterio antes mencionado a la estación Martínez de la Torre se encontraron los siguientes errores: $SS_{máx}$ de 107.78, que corresponde al grupo 5, y un $SS_{mín}$ de 47.6 con el grupo 2. Considerando que esta estación se encuentra instalada aguas abajo de las estaciones Alseseca, Jalacingo, Altotonga, Puente Henríquez, Chalame, Puxtla y Puente Xiucayucan (grupo 2), y que con este grupo se obtiene el mínimo SS , se decidió agregarla a este.

En la Figura 4.7 se muestran los grupos encontrados, así como la localización de la estación Martínez de la Torre.

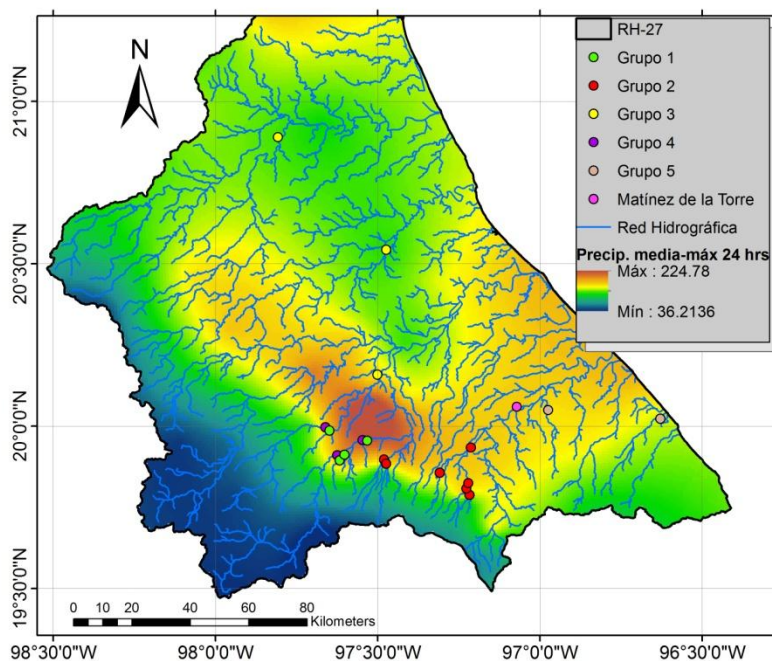


Figura 4.7. Región 27. Regiones homogéneas - trazos multidimensionales.

Los grupos encontrados con las curvas de Andrews presentan continuidad geográfica entre las estaciones que los conforman. En cuanto a los grupos 1 y 4, que son los más cercanos entre sí, se diferencian por su orden de corriente, es decir, el grupo 1 está formado por estaciones instaladas en tributarios de orden menor a los del grupo 4.

En la Tabla 4.8 se muestran las estaciones correspondientes a cada grupo homogéneo.

Tabla 4.8. Región 27. Regiones homogéneas - trazos multidimensionales.

Grupo	Estaciones	Tamaño
1	27037; 27055; 27003; 27027	109
2	27031; 27036; 27020; 27046; 27029; 27008; 27030; 27001	261
3	27009; 27002; 27049	124
4	27038; 27052; 27021	90
5	27007; 27005	72

La estación Nixtamalapa no se incluye en este método debido a que no se encontró su ubicación exacta, aunque se sabe que se localiza en el río Nixtamalapa, antes de su confluencia con el arroyo Cuartel Tercero.

En la Figura 4.8 se muestra las curvas características para cada grupo homogéneo.

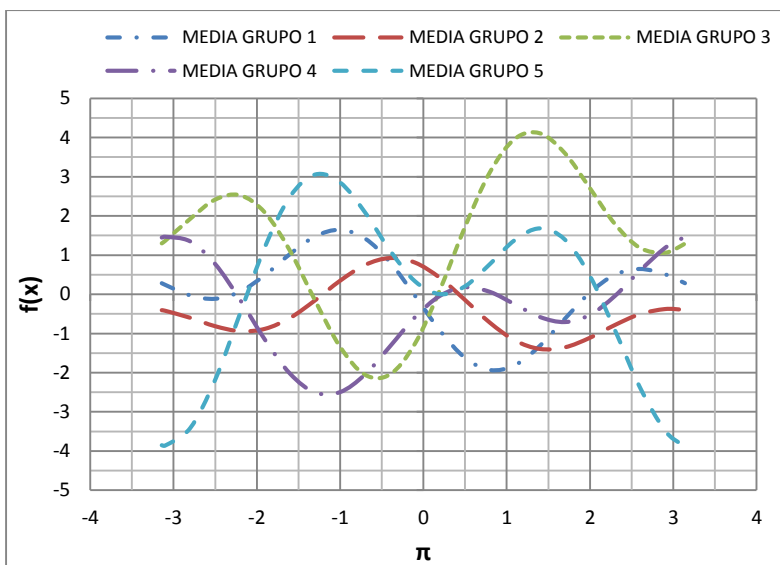


Figura 4.8. Región 27. Curvas características de Andrews.

- Mejor método de delimitación homogénea. RH 27.

Para determinar el método más conveniente fue necesario considerar aquel que tomara un mayor número de estaciones dentro de cada región homogénea, ya que, por lo general, se obtienen mejores transferencias de información, aunque la homogeneidad obtenida puede disminuir (Burn, 1990). Una manera rápida de identificar si los grupos encontrados son homogéneos, es verificar si la mayoría de las muestras que forman un determinado grupo se ajustan a la misma distribución a la que se ajustaría el registro poblacional, de lo contrario, puede considerarse que la región es heterogénea.

A continuación se muestra una comparación entre los 3 métodos utilizados. En el método del parámetro beta se consideraron los grupos formados utilizando los registros completos. En cada caso, los grupos han sido ordenados de acuerdo con la variación en sus eventos, es decir, los primeros grupos corresponden a estaciones con coeficientes de variación mayores a los ubicados al final de la tabla.

Tabla 4.9. Región 27. Delimitación de regiones homogéneas, 3 métodos.

Parámetro β , distribución GVE	Prueba de Fisher	Trazos Multidimensionales
CHALAME	TEPECAPAN	TEPECAPAN
ALSESECA	SONTALACO	SONTALACO
XILITA	LA GLORIA	LA GLORIA
LA GLORIA	JALACINGO	XILITA
SOMBRERETE	MAPILCO	JALACINGO
RANCHO APULCO	SOMBRERETE	ALTOTONGA
LIBERTAD	XILITA	PUENTE HENRIQUEZ
VEGA DE ALATORRE	ALTOTONGA	CHALAME
BUENOS AIRES	PUENTE HENRIQUEZ	PUXTLA
SONTALACO	POZA RICA	ALSESECA
PUENTE HENRIQUEZ	CHALAME	PUENTE XIUCAYUCAN
TEPECAPAN	PUXTLA	MARTINEZ DE LA TORRE
MAPILCO	NIXTAMALAPA	SOMBRERETE
TECUANTEPEC	VEGA DE ALATORRE	POZA RICA
PUXTLA	ALSESECA	TECUANTEPEC
PUENTE XIUCAYUCAN	MARTINEZ DE LA TORRE	MAPILCO
MARTINEZ DE LA TORRE	PUENTE XIUCAYUCAN	BUENOS AIRES
NIXTAMALAPA	BUENOS AIRES	RANCHO APULCO
POZA RICA	TECUANTEPEC	VEGA DE ALATORRE
ALTOTONGA	LIBERTAD	LIBERTAD
JALACINGO	RANCHO APULCO	-

De la tabla anterior se puede observar lo siguiente: Las estaciones Tepecapan, Sontalaco, La Gloria y Xilita coinciden en el método de Fisher y en el método de los trazos multidimensionales, pero solo La Gloria y Xilita coinciden en los tres métodos. En el grupo 2; Puente Henríquez, Chalame, Puxtla, Alse seca, Martínez de la Torre y Puente Xiucayucan coinciden en el método de Fisher y de trazos multidimensionales. Las estaciones Buenos Aires y Rancho Apulco también lo hacen. Los grupos 3 y 5 del método de los trazos multidimensionales no concurren con ningún grupo formado por el método de Fisher, por otro lado, el método del parámetro β los considera en un mismo grupo.

Algo que se puede observar entre el método del parámetro β y la prueba de Fisher, es que la agrupación se da de forma un poco similar, ya que las estaciones con coeficientes de variación grandes tienden a tener betas pequeños. Lo contrario sucede con los coeficientes de variación pequeños, aunque no en todos los casos se cumple esto. Por ejemplo, las estaciones Tepecapan y Sontalaco. Esta relación es de gran importancia, ya que coeficientes de variación muy altos están relacionados con dos poblaciones, en la mayoría de los casos, mientras que el parámetro β , o parámetro de forma, proporciona la concavidad a la distribución GVE, por lo tanto, tener betas muy chicos, o muy alejados de 0, indican la presencia de una segunda población, de ahí la

importancia y la similitud entre estos dos parámetros. No obstante, se decidió descartar el método del parámetro β debido a las siguientes observaciones:

- Los grupos formados por este método no tienen mayor relación con los formados por los otros métodos.
- La alta sensibilidad del parámetro beta lo hace un método inestable para la delimitación de regiones homogéneas.
- Se deben considerar periodos comunes entre estaciones para disminuir la sensibilidad en el cálculo de β , lo que implica que no todas las estaciones estén incluidas en el análisis.

Una desventaja que se observa con el método de los trazos multidimensionales, es la delimitación de 5 grupos, lo que da como resultado grupos formados por pocas estaciones y con registros regionales pequeños, sin embargo, los grupos formados se encuentran en cercanía geográfica. Por otro lado, en el método de Fisher se ha comprobado la homogeneidad de cada grupo utilizando los valores críticos de la distribución F con un nivel de significancia del 5 %. Es por ello que se decidió utilizar el método de Fisher como el que mejor representa a los grupos homogéneos en la región 27.

4.2.2.- Análisis de frecuencias y gastos de diseño RH 27.

Para estimar los gastos de diseño se obtuvieron los registros estaciones-año para cada grupo homogéneo. En cada caso, se encontró la distribución de mejor ajuste. Los parámetros estimados para cada distribución se muestran en la tabla siguiente.

Tabla 4.10. Región 27. Parámetros estimados por la distribución de mejor ajuste.

Región Homogénea	Tamaño	Distribución	Parámetros.					EEA
			α_1	ν_1	α_2	ν_2	P	
Grupo 1	209	Doble Gumbel mo	0.3239	0.4734	0.8455	3.1135	0.88	0.104
Grupo 2	328	Doble Gumbel mo	0.3749	0.6653	0.4086	3.1179	0.95	0.052
Grupo 3	153	Doble Gumbel mo	0.3363	0.7228	0.4421	2.4430	0.95	0.058

La región 27 es una zona con presencia de eventos ciclónicos, es por ello que los mejores ajustes son representados por una Doble Gumbel (por momentos, mo), es decir, se tienen dos poblaciones en cada grupo homogéneo.

En la Figura 4.9a, Figura 4.9b y Figura 4.9c se muestran las distribuciones de mejor ajuste para el grupo 1, grupo 2 y grupo 3 respectivamente.

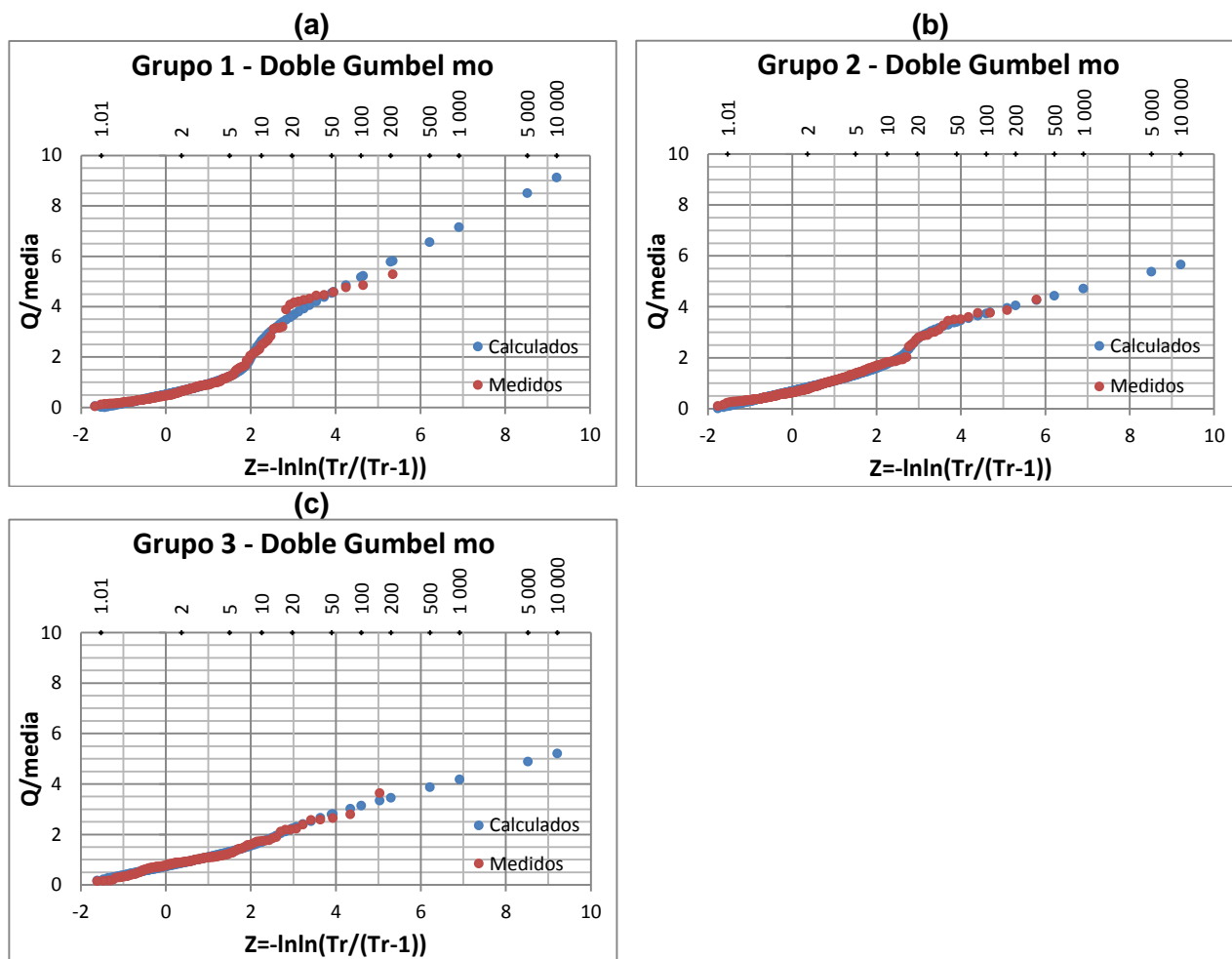


Figura 4.9. Región 27. Distribuciones de mejor ajuste (a) Grupo 1, (b) Grupo 2 y (c) Grupo 3.

Partiendo de las distribuciones de la Tabla 4.10, y Figura 4.9, se procedió a aplicar la prueba de homogeneidad regional, utilizando la simulación muestral. Para cada región homogénea encontrada se generaron 10 muestras tomando en cuenta el tamaño original de las observadas. En la Figura 4.10 se muestran los coeficientes de variación observados y sintéticos.

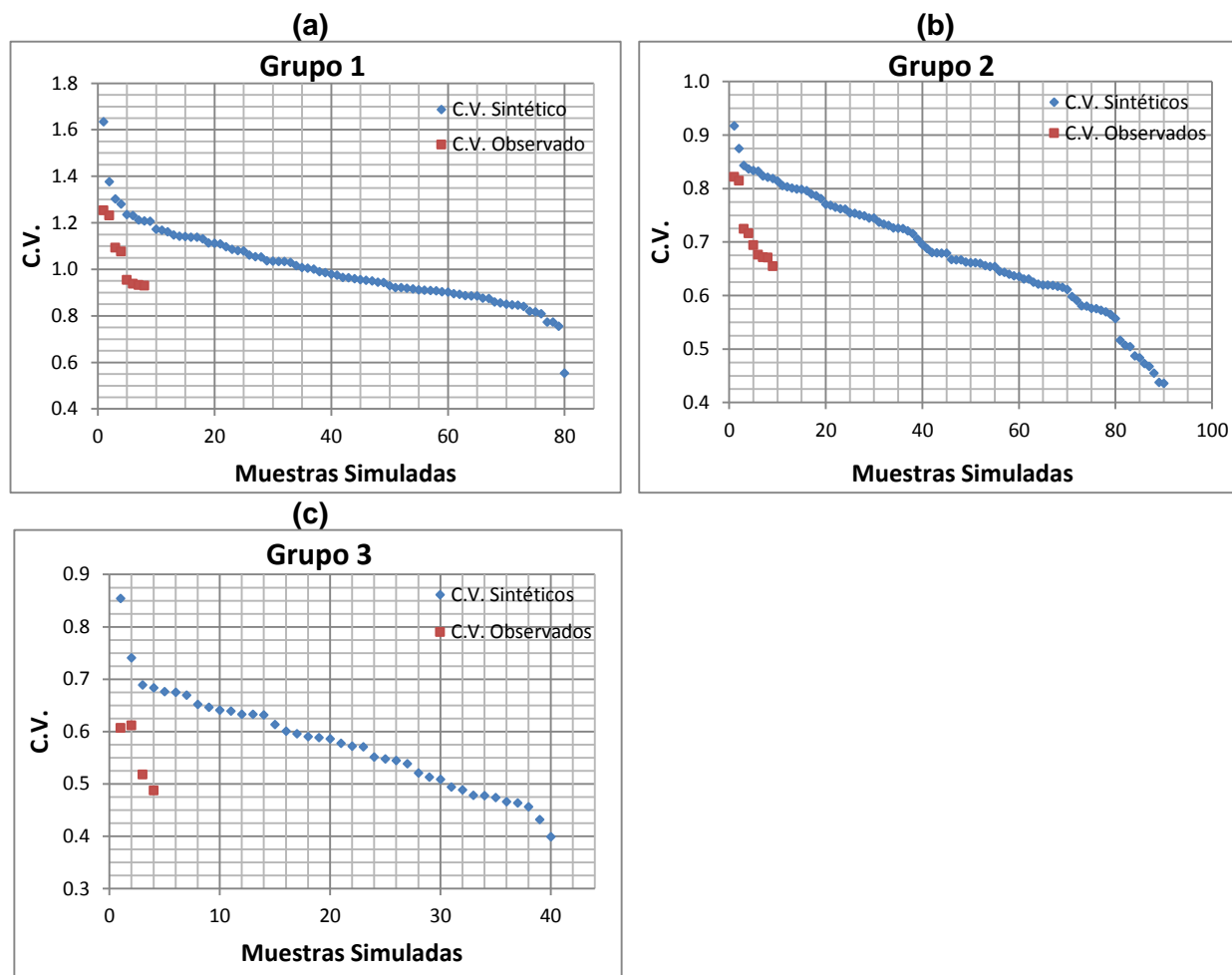


Figura 4.10. Región 27. Prueba de homogeneidad regional (a) Grupo 1, (b) Grupo 2 y (c) Grupo 3.

En los tres grupos los CV observados quedan dentro de la nube de los generados, por lo tanto, se demuestra la homogeneidad regional debido a que las variaciones son consistentes.

Una ventaja que se observa con esta prueba es que, al ser aplicada a regiones delimitadas con la prueba de Fisher, el número de simulaciones no es tan grande. Esto debido a que la prueba de Fisher es de significancia estadística, es decir, ya se ha medido la homogeneidad con anterioridad.

En la Tabla 4.11 se muestran los factores de ajuste de diseño obtenidos con las distribuciones de la Tabla 4.10.

Tabla 4.11. Región 27. Factores de ajuste de diseño.

Tr	Región hidrológica 27		
	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
2	0.66	0.83	0.87
5	1.23	1.33	1.32
10	2.65	1.76	1.70
20	3.64	2.73	2.24
50	4.55	3.41	2.80
100	5.18	3.74	3.14
200	5.78	4.05	3.46
500	6.57	4.43	3.87
1000	7.16	4.72	4.18
5000	8.51	5.38	4.89
10000	9.13	5.66	5.21

Algo que se puede observar de la tabla anterior, es la similitud que existe entre los factores estimados para el grupo 2 y el grupo 3. Esto da una ventaja al momento de definir a que grupo pertenece determinada cuenca en la que no se cuentan con registros hidrométricos, ya que de considerar que pertenece al grupo 3 cuando en realidad es del 2, o viceversa, solo se tendría un error muy pequeño en la estimación en los gastos de diseño.

4.3.- Análisis regional RH 28 Parcial.

Tratando de conservar continuidad geográfica entre las cuencas que conforman un grupo homogéneo, se optó por trabajar de forma independiente la región 28 Parcial.

4.3.1.- Delimitación de regiones homogéneas RH 28 Parcial.

En la Tabla 4.12 se muestran los parámetros estadísticos de la región hidrológica formada por los ríos Actopan, La Antigua y Jamapa.

Tabla 4.12. Región 28 Parcial. Parámetros estadísticos.

Código	Nombre	Máximo (m ³ /s)	Media (m ³ /s)	Mínimo (m ³ /s)	Desv. Estándar (m ³ /s)	C.V.	Tamaño
ACTOPAN	28030	1220	226.52	33.6	240.3	1.060	60
CAPULINES	28069	2024.7	821.5	144.1	473.0	0.576	48
SANTA ANITA	28119	200.2	106.8	48.5	35.1	0.329	33
IDOLOS	28111	800	334.2	44.6	200.0	0.598	48
EL NARANJILLO	28108	2583	630.1	63.4	504.8	0.801	51
AMATITLA	28133	1565	321.2	106.0	235.4	0.733	41
JALCOMULCO	28134	3314	738.5	239.0	494.9	0.670	46
CARRIZAL	28125	3906.1	865.9	250.0	669.5	0.773	45
CARDEL	28003	6482.7	1242.6	273.0	945.7	0.761	61

La estación Actopan cuenta con dos años en los que registró eventos extraordinarios; los años 1955 y 1974. En el año de 1974 también se registran incrementos en las estaciones Idolos, El Naranjillo, Amatitla, Jalcomulco, Carrizal y Cardel. El año 1955 solo es registrado por la estación Cardel, ya que las estaciones cercanas no cuentan con información en este año. La estación climatológica Las Minas (CFE) también registra un máximo extraordinario en el año 1955, siendo esta la única estación cercana que cuenta con mediciones en este año. Las estaciones climatológicas Naolinco de Victoria y Almolonga, operando dentro de la cuenca, registran el evento del año 1974. Estos dos eventos hacen que el coeficiente de variación de la estación Actopan sea el más alto de la región, ya que de no considerarlos se tendría un CV de 0.85. Es importante mencionar que el CV no cambia en las estaciones cercanas que registran estos eventos, cuando no se toman en cuenta.

Santa Anita cuenta con el coeficiente de variación y tiempo de concentración más bajos de toda la región. Su precipitación media-máxima en 24 horas es la mayor (111.45 mm). La cuenca de esta estación se desarrolla en la parte alta del río Atoyac, sin embargo, en los terrenos en los que se encuentra no son tan pronunciados, aunque la pendiente de su cauce es del 5.3 % (la mayor de la región hidrológica). Una posible explicación a la baja variabilidad en los escurrimientos de esta estación, es que se encuentra regulada por los remansos producidos en la presa derivadora del mismo nombre, ya que la estación se localiza aguas arriba de esta. Se sabe que se afora en el puente del camino Ojo de Agua Chico-Santa Anita, el cual se ubica cerca de la presa derivadora, pero no se logró encontrar información que permita verificar esta regulación. En los siguientes análisis no se consideró debido a la poca fiabilidad que aporta al estudio.

- Método del parámetro β de la distribución GVE

Para aplicar el método del parámetro β se consideraron los registros completos. En la Tabla 4.13 se muestran las regiones homogéneas delimitadas.

Tabla 4.13. Región 28 Parcial. Regiones homogéneas con el método del parámetro β - GVE. Registros completos.

Tamaño	Código	Nombre	β	Grupo Homogéneo
60	28030	ACTOPAN	-0.4012	
45	28125	CARRIZAL	-0.3604	
51	28108	EL NARANJILLO	-0.3173	1
46	28134	JALCOMULCO	-0.3138	
61	28003	CARDEL	-0.2789	
41	28133	AMATITLA	-0.2225	
48	28069	CAPULINES	0.0377	2
48	28111	IDOLOS	0.0655	

Para definir las regiones homogéneas se separaron los betas en dos; los positivos y los negativos. En la región 2 se tiene betas muy cercanos con una diferencia entre el mayor y el menor de

0.0278. En la región 1 se agruparon todos los betas negativos con un intervalo de selección entre -0.20 y -0.40. En la Figura 4.11 se muestra los grupos homogéneos obtenidos.

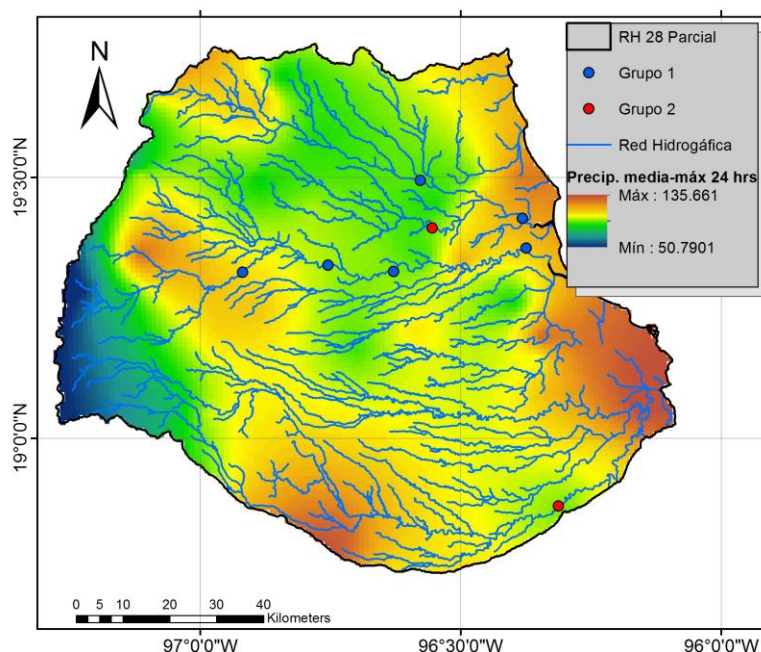


Figura 4.11. Región 28 Parcial. Regiones homogéneas con el método del parámetro β - GVE. Registros completos.

- Prueba de Fisher para delimitar regiones homogéneas.

En la delimitación se utilizaron 8 estaciones. Para cada par de estaciones se calculó el estadístico F . En la Tabla 4.14 se muestra la matriz de los estadísticos F obtenidos.

Tabla 4.14. Región 28 Parcial. Matriz de estadísticos F .

Estaciones	28030	28069	28111	28108	28133	28134	28125	28003
28030	1	3.39	3.14	1.75	2.09	2.51	1.88	1.94
28069	-	1	1.08	1.94	1.62	1.35	1.80	1.75
28111	-	-	1	1.79	1.50	1.25	1.67	1.62
28108	-	-	-	1	1.19	1.43	1.07	1.11
28133	-	-	-	-	1	1.20	1.11	1.08
28134	-	-	-	-	-	1	1.33	1.29
28125	-	-	-	-	-	-	1	1.03
28003	-	-	-	-	-	-	-	1

Para formar las regiones homogéneas se utilizó el valor crítico de Fisher para un nivel de significancia del 5 %. Esto se realizó para cada par de estaciones. Ver Tabla 4.15.

Tabla 4.15. Región 28 Parcial. Matriz de valores críticos de Fisher para un nivel de significancia del 5 %.

Grados de Libertad	59	47	47	50	40	45	44	60
Estaciones	28030	28069	28111	28108	28133	28134	28125	28003
28030	1.54	1.59	1.59	1.58	1.64	1.61	1.61	1.54
28069	-	1.62	1.62	1.61	1.65	1.63	1.63	1.59
28111	-	-	1.62	1.61	1.65	1.63	1.63	1.59
28108	-	-	-	1.60	1.66	1.63	1.63	1.56
28133	-	-	-	-	1.69	1.66	1.68	1.64
28134	-	-	-	-	-	1.64	1.64	1.60
28125	-	-	-	-	-	-	1.65	1.58
28003	-	-	-	-	-	-	-	1.53

De la Tabla 4.14 se observa que, el estadístico de Fisher para las estaciones Actopan (28030) y Capulines (28069), con el coeficiente de variación mayor y menor de la región hidrológica respectivamente, es el más grande de la región. Este valor, al ser comparado con el valor crítico de Fisher para un nivel de significancia del 5 % (Tabla 4.15), cae en la región de rechazo, es decir, no cumple con la hipótesis nula y no puede considerarse a la región hidrológica completa como una región homogénea. Lo anterior se realizó para cada par de estaciones. Dando como resultado 3 regiones homogéneas. En la tabla siguiente se muestran los grupos formados, así como la desviación estándar y varianza de las series estandarizadas con la media de los gastos máximos anuales, es decir, el coeficiente de variación de la muestra sin estandarizar y su cuadrado, respectivamente.

Tabla 4.16. Región 28 Parcial. Regiones homogéneas - Fisher 5 %.

Tamaño	Código	Nombre	Cv	Cv ²	Grupo Homogéneo
60	28030	ACTOPAN	1.061	1.13	1
51	28108	EL NARANJILLO	0.801	0.64	2
45	28125	CARRIZAL	0.773	0.60	
61	28003	CARDEL	0.761	0.58	
41	28133	AMATITLA	0.733	0.54	
46	28134	JALCOMULCO	0.670	0.45	3
48	28111	IDOLOS	0.598	0.36	
48	28069	CAPULINES	0.576	0.33	

Dentro de los 3 grupos encontrados, la estación Actopan se considera como un grupo homogéneo formado solo por ella misma.

Para el segundo grupo, formado por las estaciones El Naranjillo, Carrizal, Cardel, Amatitla y Jalcomulco, se encuentra compuesto por cuencas geográficamente continuas, además de ser estaciones instaladas en el río La Antigua, con excepción de El Naranjillo, instalada en el río Actopan.

El tercer grupo lo conforman 2 estaciones; Idolos y Capulines. Las cuencas formadas por estas estaciones no son contiguas, pero son cuencas que se desarrollan en terrenos accidentados, mientras que las cuencas del segundo grupo se encuentran en terrenos fuertemente accidentados. En la Figura 4.12 se muestran los grupos formados.

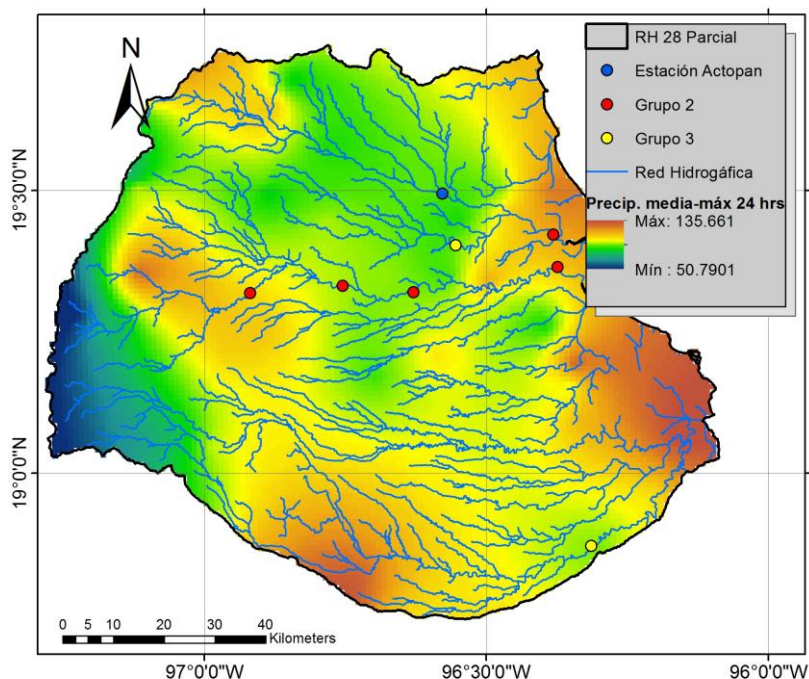


Figura 4.12. Región 28 Parcial. Regiones homogéneas - Fisher 5 %.

Con la finalidad de evitar que la estación Actopan quede sola en un grupo homogéneo, se aplicó nuevamente la prueba de Fisher utilizando un nivel de significancia del 1 %. Con esta consideración se logra agrupar a la estación Actopan con las estaciones El Naranjillo y El Carrizal y, en un segundo grupo, las estaciones Cardel, Amatitla, Jalcomulco, Idolos y Capulines. En la tabla siguiente se muestran los valores críticos de Fisher para una significancia del 1 %.

Tabla 4.17. Región 28 Parcial. Matriz de valores críticos de Fisher para un nivel de significancia del 1 %.

Grados de Libertad	59	47	47	50	40	45	44	60
Estaciones	28030	28069	28111	28108	28133	28134	28125	28003
28030	1.85	1.94	1.94	1.91	2.02	1.96	1.97	1.84
28069	-	1.99	1.99	1.98	2.03	2.00	2.01	1.94
28111	-	-	1.99	1.98	2.03	2.00	2.01	1.94
28108	-	-	-	1.95	2.06	2.00	2.01	1.88
28133	-	-	-	-	2.11	2.05	2.09	2.02
28134	-	-	-	-	-	2.02	2.03	1.96
28125	-	-	-	-	-	-	2.04	1.91
28003	-	-	-	-	-	-	-	1.84

A los grupos formados con la prueba de Fisher, utilizando un nivel de significancia del 1 %, se les aplicó la prueba de homogeneidad regional. Para cada grupo se ajustó la distribución de mejor ajuste. Con esta distribución se generaron 10 muestras sintéticas para cada registro observado, dando un total de 30 y 50 muestras generadas para el grupo 1 y 2 respectivamente. Para cada muestra simulada se calculó el coeficiente de variación. Finalmente, se compararon los CV simulados con los observados.

En la tabla siguiente se muestran los parámetros de mejor ajuste para cada región homogénea.

Tabla 4.18. Región 28 Parcial. Parámetros estimados por la distribución de mejor ajuste para las regiones homogéneas formadas con un nivel de significancia del 1 %.

Método	Región Homogénea	Tamaño	Distribución	Parámetros.					EEA
				α_1	ν_1	α_2	ν_2	P	
Fisher	Grupo 1	156	Doble Gumbel mo	0.3977	0.5619	1.0045	2.7570	0.91	0.091
	Grupo 2	244	Doble Gumbel mo	0.3633	0.6942	1.0359	2.1085	0.94	0.117

En la Figura 4.13a y Figura 4.13b se muestran las distribuciones de mejor ajuste para los grupos 1 y 2 respectivamente, considerando un nivel de significancia del 1 %.

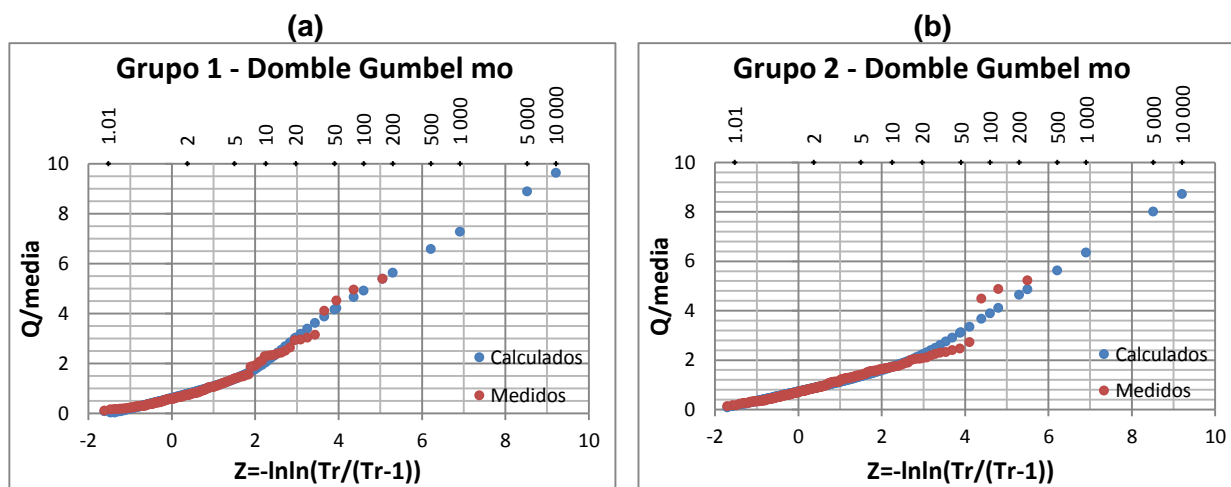


Figura 4.13. Región 28 Parcial. Distribuciones de mejor ajuste para las regiones homogéneas formadas con un nivel de significancia del 1 %. (a) Grupo 1 y (b) Grupo 2.

Los coeficientes de variación obtenidos de la simulación se ordenaron de mayor a menor, tanto los observados como los generados. En la Figura 4.14a y Figura 4.14b se muestran los coeficientes de variación sintéticos, y observados, para los grupos 1 y 2 respectivamente.

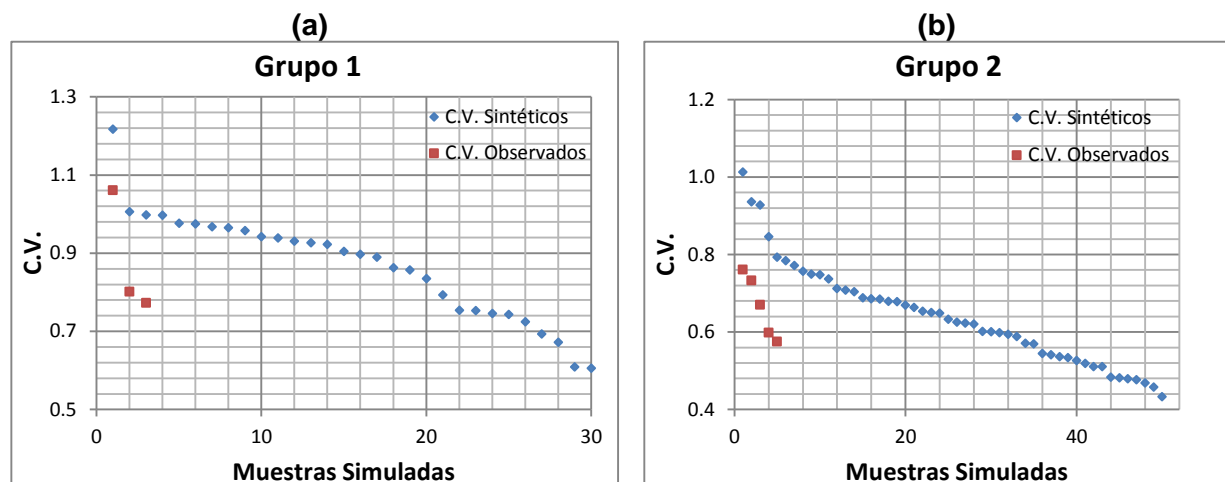


Figura 4.14. Región 28 Parcial. Prueba de homogeneidad regional (a) Grupo 1 y (b) Grupo 2. Fisher 1%.

De la figura anterior se observa que, para el caso del grupo 1, no se tiene consistencia con las variaciones simuladas, ya que la variación que presenta la estación Actopan es muy alta y no puede ser reproducida por la distribución, es decir, no puede ser debida a la aleatoriedad. En cuanto al grupo 2, los coeficientes de variación simulados presentan consistencia con los observados, por lo tanto, se puede considerar como una región homogénea. Teniendo en cuenta que la homogeneidad regional no puede aceptarse para el primer grupo, se desechó la delimitación obtenida con un nivel de significancia del 1 %.

Hosking y Wallis (1997); Lim y Lye (2003), entre otros, señalan que realizar pocas simulaciones podría ocasionar que la hipótesis sea rechazada cuando en realidad es verdadera. Recomiendan como mínimo 100 simulaciones con hasta un máximo de 10,000. Sin embargo, cuando se emplea la prueba de homogeneidad regional a regiones homogéneas presupuestas por la prueba de Fisher, se puede realizar un número pequeño de simulaciones. Esto considerando que la prueba de Fisher es de significancia estadística; en otras palabras, se están empleando dos pruebas de homogeneidad, con lo cual se esperaría encontrar buenos resultados con pocas simulaciones. Por ello, no puede aceptarse la hipótesis para el grupo 1.

- Método de los trazos multidimensionales.

Para esta región se empleó la herramienta computacional Minitab 17[®] 7, la cual permitió realizar la selección de las características más significativas con los métodos de selección paso a paso, selección hacia adelante y eliminación hacia atrás de las mejores características (Álvarez *et al.*, 2011). Las características de mayor significancia estadística fueron: área (km²); longitud del cauce principal (m); coordenada y del centroide de la cuenca (UTM) y, el perímetro de la cuenca (km). Para formar las curvas de Andrews se utilizaron el área, longitud del cauce y el perímetro, en ese orden de importancia.

⁷ Software diseñado para el análisis de funciones estadísticas básicas y avanzadas.

En la Tabla 4.19 se muestran las características fisiográficas y climatológicas de las cuencas de la región 28 Parcial.

Tabla 4.19. Región 28 Parcial. Características fisiográficas y climatológicas.

Estación	Código	A (km ²)	PM (mm)	PMC (%)	CN	Centroide			Lc (Km)	Sc (%)	PMT (Km)
						X (utm)	Y (utm)	Z (msnm)			
ACTOPAN	28030	782.1	181.1	25.0	68.0	724086.5	2171415.9	1694.4	75.8	2.4	181.1
CAPULINES	28069	1391.0	305.7	19.6	77.0	733762.9	2094142.5	1816.6	149.4	1.0	305.7
IDOLOS	28111	475.2	117.5	16.2	79.5	736922.8	2153220.2	818.3	56.4	1.9	117.5
EL NARANJILLO	28108	1847.9	264.9	21.3	75.6	735893.7	2163788.3	1415.3	103.0	1.6	264.9
AMATITLA	28133	629.4	137.9	44.8	58.4	698369.7	2134321.3	2358.3	56.6	3.4	137.9
JALCOMULCO	28134	1415.8	198.1	35.7	62.4	706560.9	2142281.3	2228.9	85.5	2.1	198.1
CARRIZAL	28125	1563.9	228.8	34.3	64.1	711450.3	2142252.2	2127.5	102.5	1.7	228.8
CARDEL	28003	2139.3	290.9	30.6	67.9	722439.1	2141157.1	1904.9	148.3	1.0	290.9

Al construir las curvas de Andrews se obtuvieron 3 grupos homogéneos. Las estaciones Actopan, Idolos, Amatitla y Jalcomulco en el grupo 1; Carrizal y El Naranjillo en el grupo 2 y, las estaciones Capulines y Cardel en el grupo 3. Algo que se puede observar en las regiones encontradas con este método, es que el orden de corriente de las cuencas que forman el grupo 1 es menor a los que forman el grupo 2 y 3, siendo el grupo 3 el de mayor orden de corriente.

En la Figura 4.15 se muestran los grupos homogéneos formados por las curvas de Andrews.

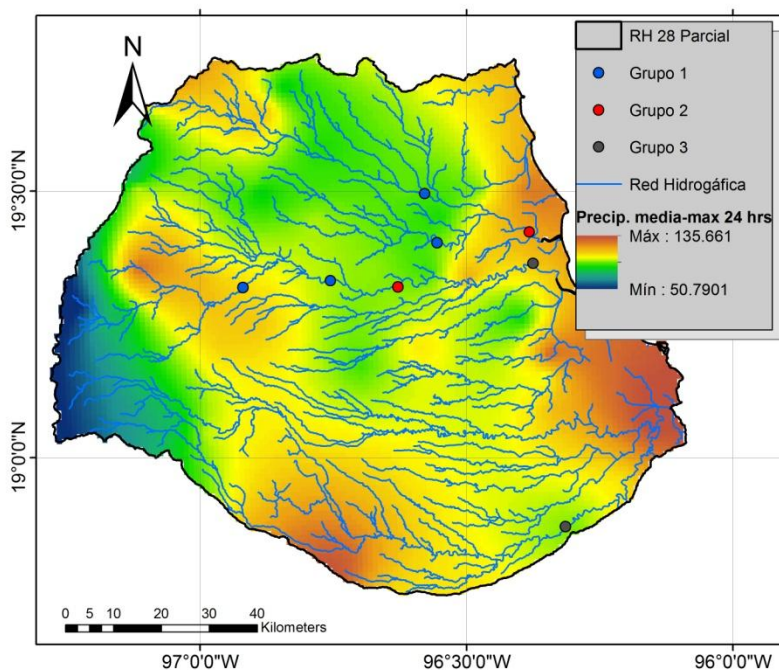


Figura 4.15. Región 28 Parcial. Regiones homogéneas - trazos multidimensionales.

Con este método se logró incluir a la estación Actopan en una región homogénea formada por 4 estaciones, con un tamaño de 195 datos. En la Tabla 4.20 se muestran los grupos formados con las curvas de Andrews y, en la Figura 4.16, las curvas características de cada grupo.

Tabla 4.20. Región 28 Parcial. Regiones homogéneas - trazos multidimensionales.

Grupo	Estaciones	Tamaño
1	28030; 28111; 28133; 28134	195
2	28108; 28125	96
3	28069; 28003	109

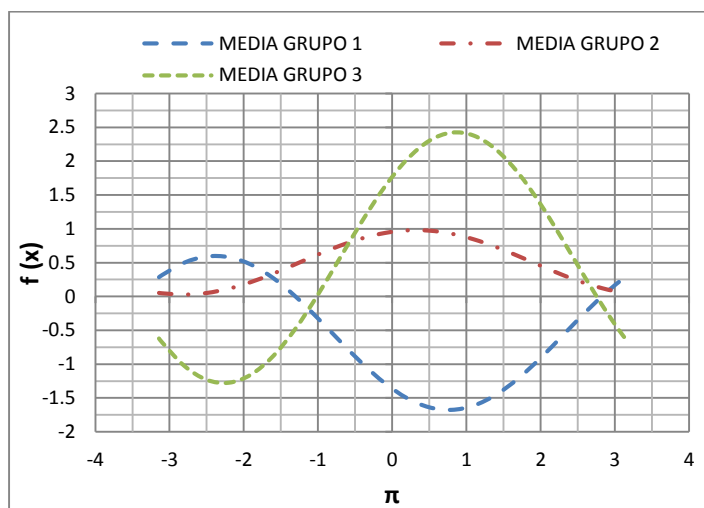


Figura 4.16. Región 28 Parcial. Curvas características de Andrews.

- Mejor método de delimitación homogénea. RH 28 Parcial.

Al descartar la estación Santa Anita se tienen 3 grupos con el método de Fisher y 2 con el método del parámetro β , aunque en este último la estación Actopan puede considerarse como un 3er grupo homogéneo. Esto tomando en cuenta la alta sensibilidad del parámetro beta y que este se sale del intervalo de selección para dicha estación. En la Tabla 4.21 se muestran las regiones homogéneas encontradas para cada método.

Tabla 4.21. Región 28 Parcial. Delimitación de regiones homogéneas, 3 métodos.

Parámetro β , distribución GVE	Prueba de Fisher 5%	Trazos Multidimensionales
ACTOPAN	ACTOPAN	ACTOPAN
CARRIZAL	CARRIZAL	AMATITLA
EL NARANJILLO	EL NARANJILLO	JALCOMULCO
JALCOMULCO	JALCOMULCO	IDOLOS
CARDEL	CARDEL	EL NARANJILLO
AMATITLA	AMATITLA	CARRIZAL
CAPULINES	CAPULINES	CARDEL
IDOLOS	IDOLOS	CAPULINES

Los métodos del parámetro β de la distribución GVE y la prueba de Fisher forman grupos similares, con excepción de la estación Actopan. En cuanto al método de los trazos multidimensionales, coincide en muy pocas estaciones con los métodos anteriores, por ejemplo, las estaciones Actopan, Amatitla y Jalcomulco coinciden con el grupo 1 del parámetro beta, pero solo Amatitla y Jalcomulco con el método de Fisher.

Anteriormente se hizo la observación entre el parámetro β de la distribución GVE y los coeficientes de variación empleados en la prueba de Fisher. En esta región se vuelve a dar un comportamiento similar. Los coeficientes de variación grandes están relacionados con betas pequeños.

La estación Actopan es una de las más importantes de la región hidrológica, ya que cuenta con información desde el año 1951 hasta la actualidad, con una única interrupción en el año de 1965, es decir, poco más de 60 años de registro, por ello la importancia de considerarla en el análisis. Por otro lado, como ya se mencionó anteriormente, cuenta con el coeficiente de variación más grande de la región. Esta variabilidad es debida, en gran medida, a los eventos de los años 1955 y 1974, los cuales han sido los únicos de tal magnitud que ha registrado la estación, con gastos máximos anuales de 1,220 y 1,122 m³/s respectivamente. Se sabe que el evento registrado en el año 1955 fue ocasionado por el ciclón Janet (SRH, 1969b) ocurrido entre los días 27 de Septiembre al 1ro de Octubre y, el de 1974, por el huracán FIFI, con inicio el 20 de Septiembre (SARH, 1979b). Se hace énfasis a esta estación debido a que es importante en la selección de los grupos homogéneos. Por un lado, si se utiliza el método del parámetro beta el error de ajuste es menor en la estación Actopan, comparado al ajuste que se tiene si se considerara de manera independiente (método de Fisher), pero mayor en relación al grupo 2 de Fisher, aunque los eventos de diseño no varían, significativamente, entre el grupo 2 de Fisher y el grupo 1 del parámetro beta, pero sí para el ajuste independiente de la estación Actopan, la cual es subestimada con el método del parámetro beta. Ver Tabla 4.22. Teniendo en cuenta lo anterior, se consideró a la estación Actopan como un grupo homogéneo, es decir, se descartan el método del parámetro β y el de los trazos multidimensionales, esto con la finalidad de no subestimar los gastos de diseño en la estación Actopan.

La estación Cardel, con mediciones desde el año 1951 hasta la actualidad, y sin ninguna interrupción, registró los eventos extraordinarios de los años 1955, 1960, 1961, 1972, 1974, 1993, 1999 y 2010, con lo cual, el evento del año 1955 se considera con la estación Cardel en el grupo 2. Otras estaciones como Jalcomulco, Carrizal, Amatitla, El Naranjillo e ídolos, también registraron eventos extraordinarios en los años 1961, 1972, 1974, 1993 y 1999. De este modo, además del año 1955, se logra transferir mayor número de eventos extraordinarios a los grupos 2 y 3, con lo cual no se tienen subestimaciones, en los grupos antes mencionados, al tomar a Actopan de manera independiente.

Tabla 4.22. Comparación de eventos de diseño en Actopan.

Tr	Actopan	Grupo 2 (Fisher)	Grupo 1 (GVE)
2	0.62	0.82	0.8
5	1.53	1.28	1.31
10	2.64	1.7	1.78
20	3.59	2.43	2.61
50	4.75	3.67	3.9
100	5.6	4.48	4.71
200	6.43	5.23	5.47
500	7.53	6.19	6.44
1000	8.36	6.91	7.15
5000	10.26	8.55	8.82
10000	11.13	9.25	9.5
EEA =	0.179	0.073	0.084

4.3.2.- Análisis de frecuencias y gastos de diseño RH 28 Parcial.

En la tabla siguiente se muestran los parámetros estimados para los registros regionales estaciones-año de los grupos formados con el método de Fisher, utilizando un nivel de significancia del 5 %.

Tabla 4.23. Región 28 Parcial. Parámetros estimados por la distribución de mejor ajuste.

Método	Región Homogénea	Tamaño	Distribución	Parámetros.					EEA
				α_1	ν_1	α_2	ν_2	P	
Fisher	Grupo 1	60	Doble Gumbel mo	0.2466	0.3943	1.1917	1.5647	0.70	0.181
	Grupo 2	244	Doble Gumbel mo	0.3402	0.6640	1.0196	2.7441	0.94	0.073
	Grupo 3	90	Gumbel mL	-	-	-	0.7234	0.4792	0.094

En el apartado anterior se hizo mención de la presencia de eventos ciclónicos en la región, es por ello que los mejores ajustes se dan con una distribución Doble Gumbel (por momentos, *mo*) en los grupos ubicados en el Norte de la región. En la Figura 4.17 se muestran las distribuciones de mejor ajuste para el grupo 1, grupo 2 y grupo 3.

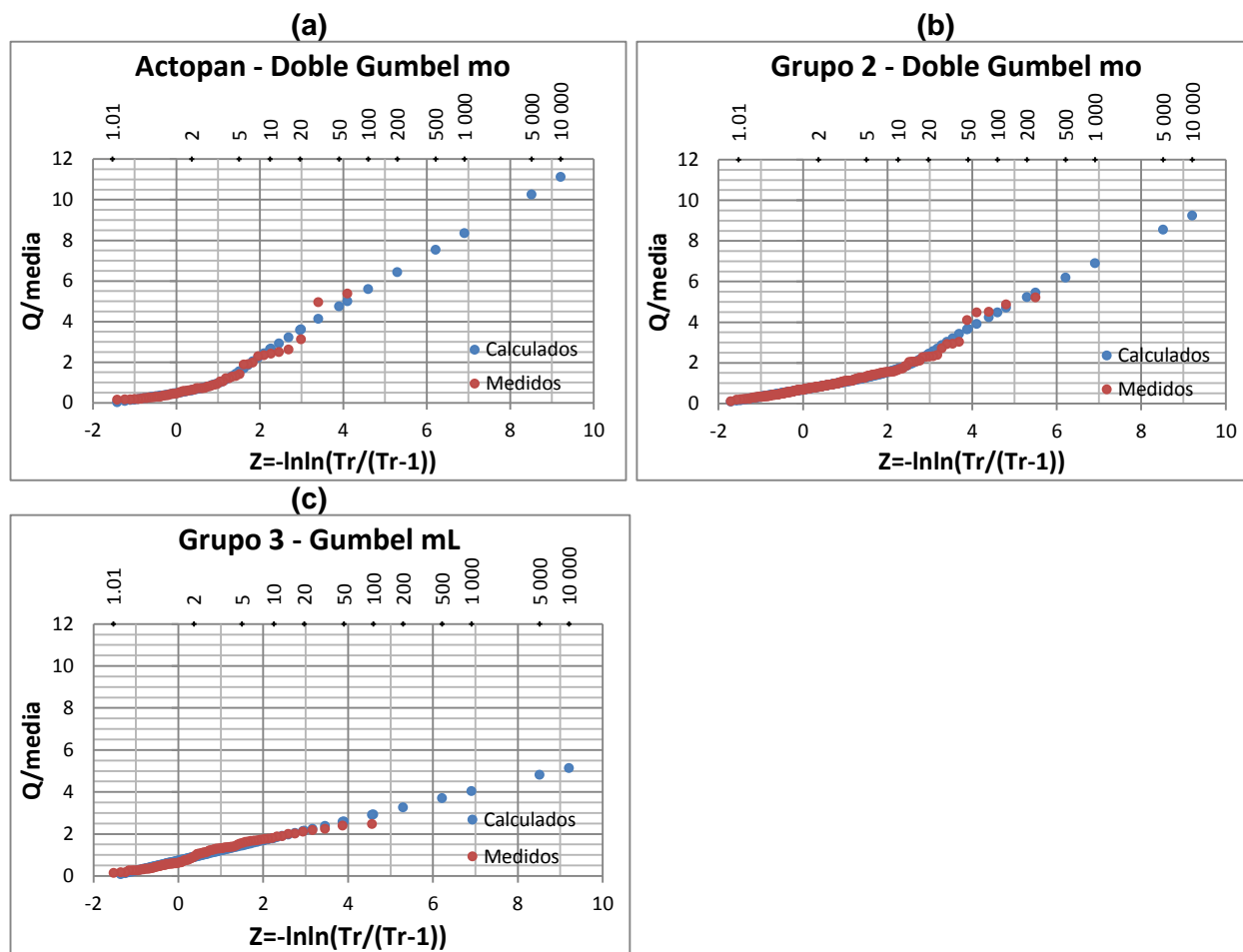


Figura 4.17. Región 28 Parcial. Distribuciones de mejor ajuste (a) Actopan, (b) Grupo 2 y (c) Grupo 3.

Con los parámetros estimados para cada distribución y para cada grupo, se probó la hipótesis de homogeneidad regional. Se simularon 10 regiones para los grupos 2 y 3. Para el grupo 1 (Actopan) no se realizaron simulaciones, ya que está formado solo por una estación.

En la Figura 4.18 se muestran los coeficientes de variación observados y los obtenidos de las simulaciones.

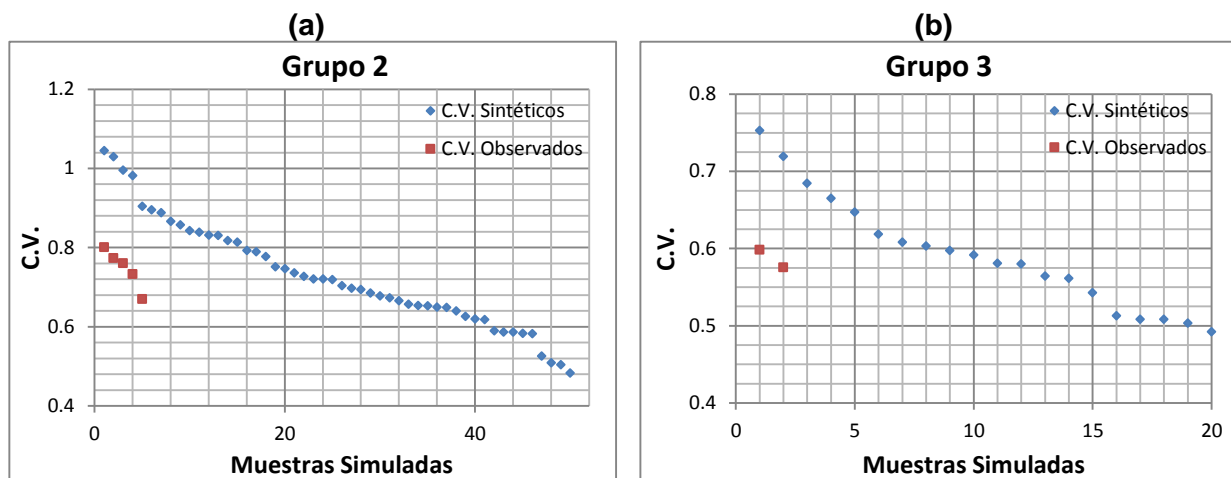


Figura 4.18. Región 28 Parcial. Prueba de homogeneidad regional (a) Grupo 2 y (b) Grupo 3. Fisher 5%.

De las figuras anteriores se puede observar que las variaciones son consistentes, por lo tanto, se acepta la homogeneidad en cada grupo.

En la Tabla 4.24 se muestran los factores de ajuste extrapolados hasta 10,000 años periodo de retorno.

Tabla 4.24. Región 28 Parcial. Factores de ajuste de diseño.

Tr	Región hidrológica 28 Parcial		
	Actopan	Grupo 2	Grupo 3
2	0.62	0.82	0.90
5	1.53	1.28	1.44
10	2.64	1.70	1.80
20	3.59	2.43	2.15
50	4.75	3.67	2.59
100	5.60	4.48	2.93
200	6.43	5.23	3.26
500	7.53	6.19	3.70
1000	8.36	6.91	4.03
5000	10.26	8.55	4.81
10000	11.13	9.25	5.14

En cuanto a los factores extrapolados de la Tabla 4.24, se puede estar teniendo una sobrestimación en el grupo 1 (Actopan), ya que los eventos ocurridos en los años 1955 y 1974 incrementan los valores extrapolados. Es importante mencionar que al no considerar estos años en la extrapolación, los factores de diseño se reducen a la mitad. También se obtiene un mejor

ajuste, sin embargo, se tiene documentado el daño que hicieron estas avenidas⁸ y se debe considerar su ocurrencia.

A modo de complemento se muestra la estación Actopan ajustada a una distribución Doble Gumbel, en el caso de no considerar los años 1955 y 1974. Ver Figura 4.19.

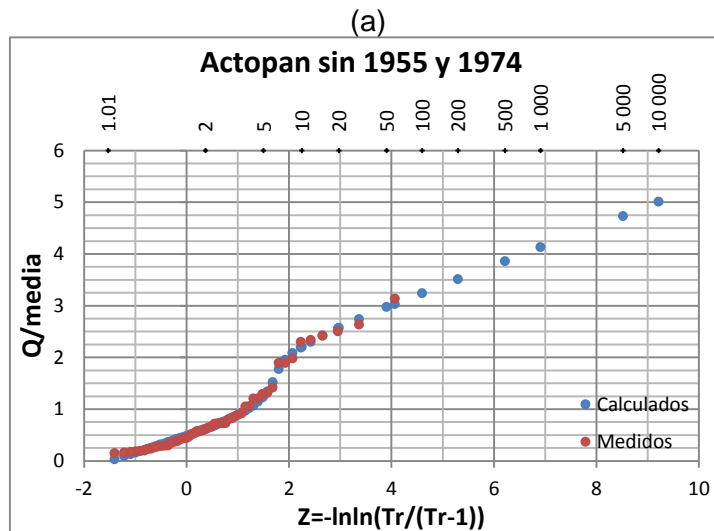


Figura 4.19. Región 28 Parcial. Ajuste estación Actopan sin 1955 y 1974.

El ajuste que se obtiene en la estación Actopan, cuando no se consideran los años 1955 y 1974, es muy bueno. Los valores estimados logran ajustarse muy cercanos a los observados. Sin embargo, este ajuste no sustituye al de la Figura 4.17a.

4.4.- Análisis regional RH 28 Papaloapan.

La región hidrológica del Papaloapan es una de las regiones más estudiadas del país, es por ello que presenta pocos problemas para trabajar con ella, además de la gran información que se puede obtener de las mediciones hidrométricas y climatológicas, así como cartografías de uso y tipo de suelo.

4.4.1.- Delimitación de regiones homogéneas RH 28 Papaloapan.

En la Tabla 4.25 se muestran las 23 estaciones hidrométricas utilizadas en el análisis regional, así como sus parámetros estadísticos.

⁸ S.R.H. (1969b). *Boletín hidrológico No. 43; Región hidrológica No. 28 (Parcial)*. Subsecretaría de planeación, dirección de hidrología; S.A.R.H. (1979b). *Boletín hidrológico No. 43; Región hidrológica No. 28 (Parcial)*. Subsecretaría de planeación, subdirección de hidrología.

Tabla 4.25. Región 28 Papaloapan. Parámetros estadísticos.

Código	Nombre	Máximo (m³/s)	Media (m³/s)	Mínimo (m³/s)	Desv. Estándar (m³/s)	C.V.	Tamaño
28001	SAN JUAN EVANGELISTA	3961.5	1420.60	634.80	687.97	0.484	37
28002	TUXTEPEC	5220	3402.17	1700.00	991.21	0.291	18
28013	AZUETA	2093	1053.09	543.08	378.31	0.359	64
28016	CANTON	5082	2358.61	900.30	999.03	0.424	40
28017	MONTE ROSA	2408	1178.77	430.00	574.40	0.487	22
28018	BELLACO	1950	728.52	400.00	306.16	0.420	32
28019	QUIOTEPEC	1430	509.95	93.50	346.16	0.679	31
28020	ACHOTAL	1110	610.63	327.00	192.43	0.315	30
28023	CUICHAPA	813	325.43	80.00	167.53	0.515	30
28025	LAUCHAPAN	1192	409.12	72.00	218.05	0.533	58
28026	LAS PRIETAS	694	318.76	70.40	176.73	0.554	27
28056	JACATEPEC	3399.1	1484.89	572.04	575.79	0.388	52
28062	LA ESTRELLA	3050	1468.97	534.00	576.13	0.392	29
28064	SANTO DOMINGO	1697	879.05	280.00	385.18	0.438	37
28066	LA JUNTA	1505	555.35	140.00	384.56	0.692	28
28072	XIQUILA	709.6	295.04	81.00	120.89	0.410	26
28074	LA ANGOSTURA	431	260.71	103.00	89.07	0.342	24
28075	ZAPOTE	1203	618.80	326.00	236.29	0.382	27
28077	TEPELMEME	346	148.43	53.00	68.61	0.462	23
28084	MATAMBA	1135	416.05	86.00	283.93	0.682	25
28102	AXUSCO	263	97.56	23.10	69.59	0.713	20
28103	AMAPA	400	154.29	36.82	88.80	0.576	23
28158	MARIA LOMBARDO	2181.2	1082.36	366.97	495.77	0.458	32

De la tabla anterior se puede observar a Tuxtepec con el coeficiente de variación más bajo en toda la región. No se encontraron regulaciones en esta cuenca a las cuales se les pudiera asociar su baja variación. Sin embargo, en la actualidad se tienen regulaciones, las cuales son producidas por la presa Cerro de Oro, inaugurada en el año 1988.

Esta región cuenta con una baja probabilidad de eventos ciclónicos, sin embargo, se han registrado algunos años más lluviosos que otros, por ejemplo, los años 1958, 1969, 1973, 1974 y 1975.

Debido a los resultados obtenidos en las regiones anteriores, el método del parámetro β de la distribución Generalizada de Valores Extremos no se utilizó, ya que el cálculo de dicho parámetro es muy sensible, además de no contar con un periodo común en todas las estaciones.

- Prueba de Fisher para delimitar regiones homogéneas.

Se delimitaron regiones homogéneas aplicando la prueba de Fisher, con un nivel de significancia del 5 %, a las 23 estaciones de la región hidrológica. Con este método se lograron encontrar 4 regiones homogéneas. Ver Tabla 4.26.

Tabla 4.26. Región 28 Papaloapan. Regiones homogéneas - Fisher 5 %.

Tamaño	Código	Nombre	Cv	Cv ²	Grupo Homogéneo
20	28102	AXUSCO	0.713	0.509	
28	28066	LA JUNTA	0.692	0.480	
25	28084	MATAMBA	0.682	0.466	
31	28019	QUIOTEPEC	0.679	0.461	1
23	28103	AMAPA	0.576	0.331	
27	28026	LAS PRIETAS	0.554	0.307	
58	28025	LAUCHAPAN	0.533	0.284	
30	28023	CUICHAPA	0.515	0.265	
22	28017	MONTE ROSA	0.487	0.237	
37	28001	SAN JUAN EVANGELISTA	0.484	0.235	
23	28077	TEPELMEME	0.462	0.214	
32	28158	MARIA LOMBARDO	0.458	0.210	2
37	28064	SANTO DOMINGO	0.438	0.192	
40	28016	CANTON	0.424	0.179	
32	28018	BELLACO	0.420	0.177	
26	28072	XIQUILA	0.410	0.168	
29	28062	LA ESTRELLA	0.392	0.154	
52	28056	JACATEPEC	0.388	0.150	
27	28075	ZAPOTE	0.382	0.146	
64	28013	AZUETA	0.359	0.129	3
24	28074	LA ANGOSTURA	0.342	0.117	
30	28020	ACHOTAL	0.315	0.099	
18	28002	TUXTEPEC	0.291	0.085	

El primer grupo homogéneo está formado por estaciones que se encuentran en la parte alta de la cuenca, en una zona semiárida con precipitaciones muy bajas, terrenos fuertemente accidentados y parcialmente deforestados, a excepción de las estaciones Amapa y Las Prietas, que se encuentran en la parte baja de la región, la cual presenta características diferentes a las de la parte alta, con precipitaciones mayores y pendientes no tan pronunciadas.

El segundo grupo, formado por las estaciones Lauchapan, Cuichapa, Monte Rosa, San Juan Evangelista, Tepelmeme, María Lombardo, Santo Domingo, Cantón, Bellaco y Xiquila, se encuentra en sitios con precipitaciones mayores a las del grupo uno, a excepción de las estaciones Cuichapa, Tepelmeme, Santo Domingo, Cantón y Xiquila. En cuanto a las estaciones

Cantón y Santo domingo, son estaciones que se encuentran en una región con lluvias abundantes, sin embargo, más de un 70 % del área que drenan se desarrolla en la parte alta de la región, donde las precipitaciones no sobrepasan los 2,000 mm anuales. Por otro lado, la estación Cantón recibe grandes aportaciones del río Usila, aunque son bajas si se comparan al tamaño de su cuenca. Esta región homogénea la conforman estaciones que no se encuentran en sitios cercanos, además de que no comparten características similares, es decir, existe gran variación entre las características climatológicas y fisiográficas de cada cuenca, por ejemplo, la precipitación.

El grupo 3 lo conforman estaciones más cercanas que las del grupo dos. La principal característica de este grupo es la precipitación, ya que está formado por cuencas con las mayores precipitaciones, salvo las estaciones Tuxtepec y La Angostura. La estación Tuxtepec, instalada aguas abajo de la estación Cantón, presenta grandes aportaciones de los ríos Usila y Valle nacional, sin embargo, son pequeñas en relación con el tamaño de su cuenca. Al igual que Santo Domingo y Cantón, también se localiza en una zona con altas precipitaciones.

En la Figura 4.20 se muestran los grupos formados con el método de Fisher, utilizando un nivel de significancia del 5 %, así como la distribución de la precipitación media-máxima diaria, o en 24 horas.

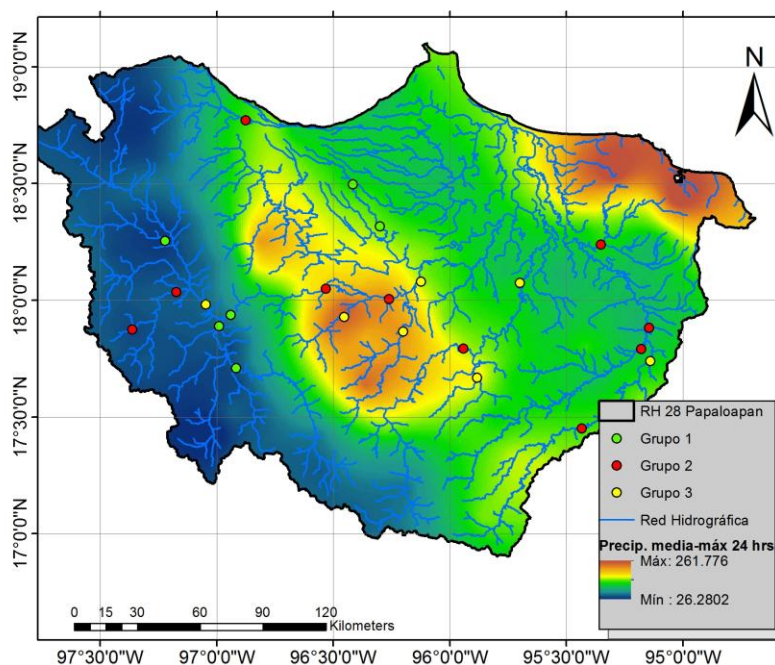


Figura 4.20. Región 28 Papaloapan. Regiones homogéneas - Fisher 5 %.

Observando la figura anterior se puede identificar dos comportamientos climatológicos diferentes. El primero, ubicado en la parte alta de la cuenca con precipitaciones medias-máximas en 24 horas del orden de los 40 a 80 mm y, el segundo en la zona baja con precipitaciones mayores que alcanzan medias-máximas entre 110 y 180 mm. Comparando estas dos subregiones con los grupos homogéneos formados anteriormente por la prueba de Fisher, se observó que no

corresponden a regiones con precipitaciones similares. Es por ello que, con el objetivo de lograr una mejor delimitación de las regiones, y que estas estén formadas por cuencas con comportamientos climatológicos similares, se dividió la cuenca en dos subregiones: Alto Papaloapan y Bajo Papaloapan. La primera, formada por la región semiárida con precipitaciones medias-máximas no mayores a los 80 mm, y la segunda con precipitaciones medias-máximas de hasta 180 mm, formando una zona más húmeda.

Las estaciones Quiotepec, Santo Domingo, La Junta, Xiquila, La Angostura, Tepelmeme, Matamba, Axusco y, las estaciones Tuxtepec y Cantón, que se encuentran en una zona de transición, conforman la parte Alta del Papaloapan, mientras que la parte Baja está formada por las estaciones San Juan Evangelista, Azueta, Monte Rosa, Bellaco, Achotal, Cuichapa, Lauchapan, Las Prietas, Jacatepec, La Estrella, Zapote, Amapa y María Lombardo.

A cada subregión se le aplicó la prueba de Fisher, utilizando un nivel de significancia del 5 %. Se obtuvieron 5 regiones homogéneas. Ver Tabla 4.27.

Tabla 4.27. Región 28; Alto y Bajo Papaloapan. Regiones homogéneas - Fisher 5 %.

Tamaño	Código	Nombre	Cv	Cv ²	Grupo Homogéneo
ALTO PAPALOAPAN					
20	28102	AXUSCO	0.713	0.509	1
28	28066	LA JUNTA	0.692	0.480	
25	28084	MATAMBA	0.682	0.466	
31	28019	QUIOTEPEC	0.679	0.461	
23	28077	TEPELMEME	0.462	0.214	2
37	28064	SANTO DOMINGO	0.438	0.192	
40	28016	CANTON	0.424	0.179	
26	28072	XIQUILA	0.410	0.168	
24	28074	LA ANGOSTURA	0.342	0.117	
18	28002	TUXTEPEC	0.291	0.085	3
BAJO PAPALOAPAN					
23	28103	AMAPA	0.576	0.331	4
27	28026	LAS PRIETAS	0.554	0.307	
58	28025	LAUCHAPAN	0.533	0.284	
30	28023	CUICHAPA	0.515	0.265	
22	28017	MONTE ROSA	0.487	0.237	
37	28001	SAN JUAN EVANGELISTA	0.484	0.235	
32	28158	MARIA LOMBARDO	0.458	0.210	
32	28018	BELLACO	0.420	0.177	
29	28062	LA ESTRELLA	0.392	0.154	
52	28056	JACATEPEC	0.388	0.150	
27	28075	ZAPOTE	0.382	0.146	5
64	28013	AZUETA	0.359	0.129	
30	28020	ACHOTAL	0.315	0.099	

Algo que se puede apreciar con esta delimitación, es que las estaciones que forman cada región se encuentran cercanas, con precipitaciones medias-máximas similares entre cada grupo, por ejemplo; el grupo 1, formado por cuencas cuya precipitación media-máxima se encuentra entre los 45 y 75 mm. Ver Figura 4.21.

Una desventaja que se tiene con esta propuesta, es la formación de un grupo homogéneo adicional, además de dar más peso a los fenómenos climatológicos, y no a los hidrométricos, para la delimitación.

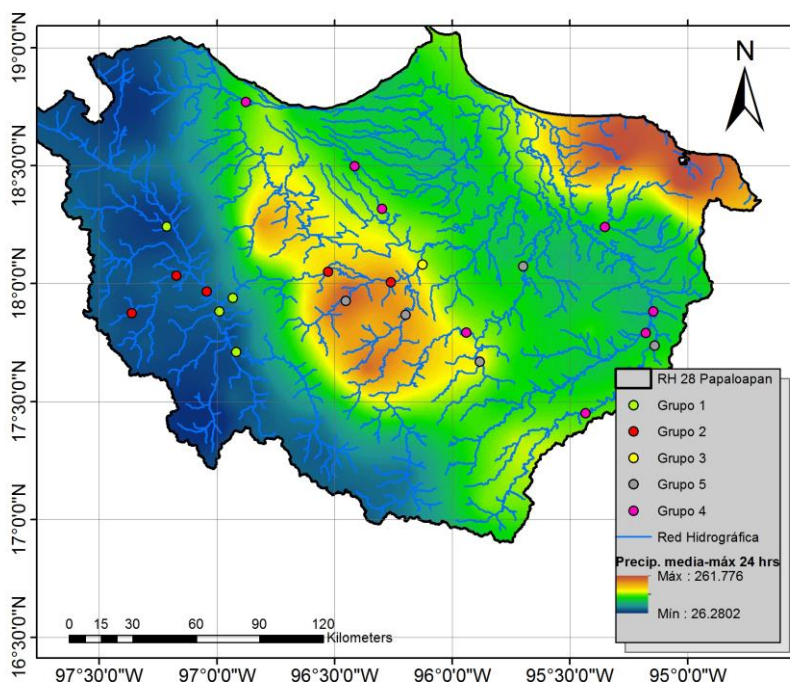


Figura 4.21. Región 28; Alto y Bajo Papaloapan. Regiones homogéneas - Fisher 5 %.

- Método de los trazos multidimensionales.

Para identificar las características de mayor significancia estadística en la producción del escurrimiento se empleó el modelo de regresión lineal múltiple. Las características utilizadas en el modelo fueron: el área de la cuenca (Km^2); precipitación media-máxima en 24 horas (mm); pendiente media de la cuenca (%); número de escurrimiento N ; centroide de la cuenca (x,y,z) en coordenadas UTM; longitud del cauce principal (km); pendiente del cauce principal (%); tiempo de concentración (hrs); infiltración potencial máxima (cm) y el perímetro de la cuenca (km). Ver Tabla 4.28.

Tabla 4.28. Región 28 Papaloapan. Características fisiográficas y climatológicas.

Estación	Código	A (km²)	PM (mm)	PMC (%)	CN	Centroide			Lc (Km)	Sc (%)	PMT (Km)
						X (utm)	Y (utm)	Z (msnm)			
SAN JUAN EVANGELISTA	28001	5731.8	119.1	24.6	79.3	864376.4	1931056.0	1190.6	231.8	0.2	521.1
TUXTEPEC	28002	15186.5	82.7	36.7	77.9	718906.1	1989381.4	2227.2	310.2	0.4	1013.4
AZUETA	28013	4653.4	117.2	18.5	83.6	814024.2	1938636.5	1467.9	271.3	0.3	519.4
CANTON	28016	13569.1	71.4	36.3	77.7	711346.3	1990334.5	2302.8	287.8	0.5	996.1
MONTE ROSA	28017	2742.8	107.2	47.4	84.3	797916.6	1924485.5	1736.8	188.4	0.6	394.7
BELLACO	28018	2831.9	114.4	22.7	80.9	856924.1	1940757.3	1126.0	208.0	0.2	382.7
QUIOTEPEC	28019	4897.4	58.1	42.2	81.0	731064.6	1938767.1	2098.6	173.7	0.7	445.2
ACHOTAL	28020	2396.2	127.2	30.8	77.8	860185.3	1917129.3	1304.9	246.1	0.2	418.8
CUICHAPA	28023	1647.8	68.9	40.1	76.9	696275.4	2079899.9	2801.3	85.7	2.3	221.5
LAUCHAPAN	28025	1309.9	149.3	13.7	77.5	907051.4	2031457.6	652.7	72.6	0.5	197.7
LAS PRIETAS	28026	268.7	120.7	5.0	85.4	753362.4	2060404.3	230.0	61.2	0.4	125.9
JACATEPEC	28056	1208.9	179.5	47.3	80.4	781969.5	1954429.4	1601.6	92.2	1.6	206.3
LA ESTRELLA	28062	746.3	166.7	53.1	81.9	756009.0	1970407.5	1677.6	53.5	1.7	145.7
SANTO DOMINGO	28064	12094.9	58.1	36.2	77.0	704326.9	1990638.0	2385.2	248.7	0.7	931.6
LA JUNTA	28066	11185.1	53.0	35.2	76.6	702885.4	1990362.2	2514.7	183.7	0.7	859.6
XIQUILA	28072	948.0	46.2	26.9	76.2	675926.5	1971948.4	2116.4	73.3	2.6	182.0
LA ANGOSTURA	28074	5952.7	48.7	29.3	72.8	673512.8	2022353.0	2519.8	157.8	1.2	571.8
ZAPOTE	28075	742.8	135.6	36.8	84.3	825045.2	1940590.8	1135.6	58.0	0.9	169.8
TEPELMEME	28077	152.6	45.6	16.7	77.5	665782.3	1973813.1	2348.4	20.4	0.7	60.5
MATAMBA	28084	2041.5	74.9	47.3	84.2	752345.4	1932330.0	2327.6	140.1	0.9	274.4
AXUSCO	28102	768.2	48.2	22.8	65.6	664698.2	2026341.6	1908.9	59.6	1.4	150.5
AMAPA	28103	415.9	122.4	4.2	85.4	760484.3	2051683.3	195.6	91.8	0.2	189.3
MARIA LOMBARDO	28158	1730.9	129.5	39.2	78.4	845718.2	1903714.7	1449.8	150.2	0.5	277.2

Las características de mayor significancia estadística hasta 50 años de periodo de retorno fueron: área de la cuenca, perímetro, precipitación media-máxima en 24 hrs, longitud del cauce, coordenada x e y del centroide y, finalmente, la pendiente media de la cuenca. En la construcción de las curvas de Andrews solo se emplearon las 5 más importantes, es decir, el área, perímetro, precipitación media-máxima en 24 horas, longitud del cauce y la coordenada x del centroide, en ese orden de importancia. En la figura siguiente se muestran los grupos homogéneos encontrados.

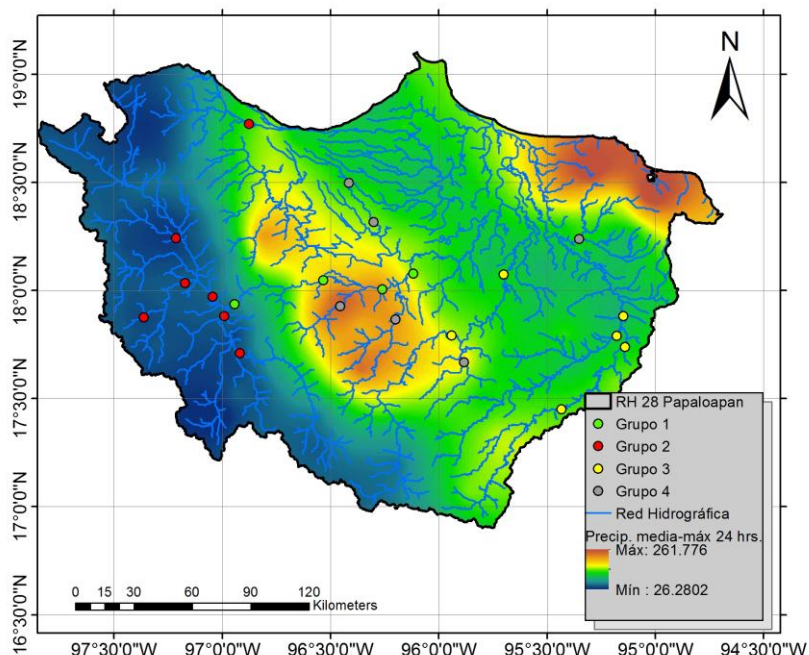


Figura 4.22. Región 28 Papaloapan. Regiones Homogéneas - Trazos multidimensionales.

Con este método se agrupan cuencas cercanas y en regiones de precipitación media-máxima similar. Las estaciones que conforman el grupo 1 se encuentran instaladas sobre el río Santo Domingo, mientras que el grupo 2 está compuesto por estaciones ubicadas en los tributarios del mismo río y con una precipitación media máxima anual entre los 40 y 80 mm. La estación Cuichapa, ubicada en la parte norte de la región, se agrupa con el grupo 2.

El grupo 3 está formado por cuencas contiguas y precipitaciones medias-máximas entre los 110 y 130 mm, con cuencas del orden de los 1,700 a los 5,700 km² de área drenada.

El grupo 4 lo forman las cuencas con mayor precipitación de la región del Papaloapan, con áreas drenadas menores a los 1,300 km². En la Tabla 4.29 se muestran las estaciones que conforman cada grupo homogéneo.

Tabla 4.29. Región 28 Papaloapan. Regiones Homogéneas - Trazos multidimensionales.

Grupo	Estaciones	Tamaño
1	28002; 28016; 28064; 28066	123
2	28023; 28072; 28077; 28102; 28074; 28084; 28019	179
3	28001; 28013; 28017; 28018; 28020; 28158	217
4	28026; 28056; 28062; 28075; 28103; 28025	216

En la figura siguiente se muestran las curvas características de Andrews para cada grupo homogéneo.

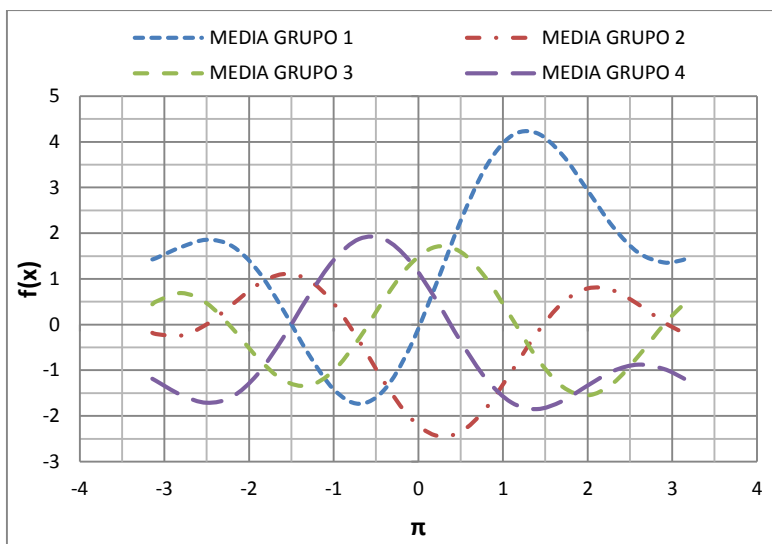


Figura 4.23. Región 28 Papaloapan. Curvas características de Andrews.

Para el análisis de frecuencias se decidió utilizar los grupos formados por el método de los trazos multidimensionales, ya que las regiones obtenidas han logrado describir mejor los fenómenos climatológicos ocurridos en la región.

4.4.2.- Análisis de frecuencias y gastos de diseño RH 28 Papaloapan.

A los registros estaciones-año formados con los grupos homogéneos del método de los trazos multidimensionales se le ajustaron las distribuciones Gumbel y GVE por momentos (mo), máxima verosimilitud (mv) y momentos-L (mL), así como la distribución Doble Gumbel por momentos (mo). En la tabla siguiente se muestran los parámetros de mejor ajuste.

Tabla 4.30. Región 28 Papaloapan. Parámetros estimados por la distribución de mejor ajuste.

Región Homogénea	Tamaño	Distribución	Parámetros.					EEA
			α_1	ν_1	α_2	ν_2	P	
Grupo 2	179	Doble Gumbel mo	0.2994	0.7081	0.3406	2.1202	0.91	0.0680
						ν	α	
Grupo 1	123	Gumbel mL	-	-	-	0.7820	0.3776	0.0563
Grupo 3	217	Gumbel mo	-	-	-	0.8152	0.3203	0.0550
Grupo 4	216	Gumbel mL	-	-	-	0.7884	0.3666	0.3031

La mejor distribución que representa al grupo 2 es una Doble Gumbel por momentos, con una segunda población debida los eventos extraordinarios ocurridos en la región y a la intensa deforestación que ha sufrido la zona. Los grupos 1 y 4 se ajustan a una distribución Gumbel por momentos-L (mL), mientras que el grupo 3 a una distribución Gumbel por momentos (mo).

Con las distribuciones de mejor ajuste se probó la homogeneidad regional para cada grupo. En la Figura 4.24 se muestran los coeficientes de variación observados y los obtenidos con 100 regiones simuladas en cada caso.

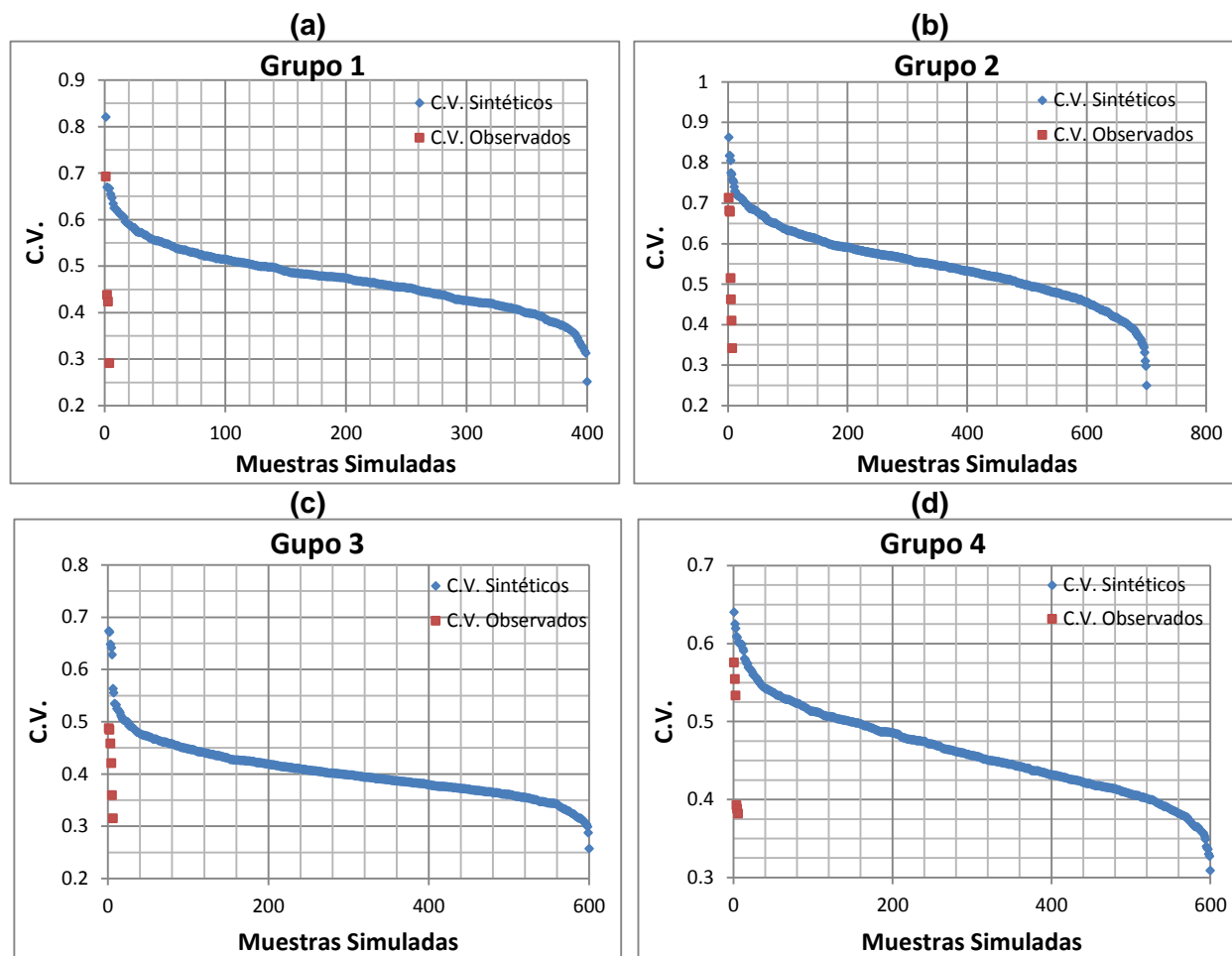


Figura 4.24. Región 28 Papaloapan. Prueba de homogeneidad regional (a) Grupo 1, (b) Grupo 2, (c) Grupo 3 y (d) Grupo 4.

Comparando los coeficientes de variación sintéticos y los observados, para cada grupo, se puede establecer que los grupos 3 y 4 presentan consistencia en las variaciones, por ello se acepta la condición de homogeneidad. Sin embargo, el grupo 1 se tienen variaciones que no corresponden a la distribución supuesta y se puede descartar como región homogénea. En cuanto a la región 2, los coeficientes de variación observados se encuentran dentro de los simulados, sin embargo, los coeficientes de variación pequeños están muy cerca de los observados. En estos dos casos se aumentó el número de simulaciones a 500. En el grupo 1 no se logró simular la aleatoriedad de los observados y, en el grupo dos, se continuó con problema en los coeficientes pequeños.

Como segunda alternativa se modificaron los grupos. La estación La Junta, que estaba en el grupo 1, se cambió al grupo 2. A estos grupos se les aplicó nuevamente la prueba de homogeneidad con 100 simulaciones. Ver Figura 4.25.

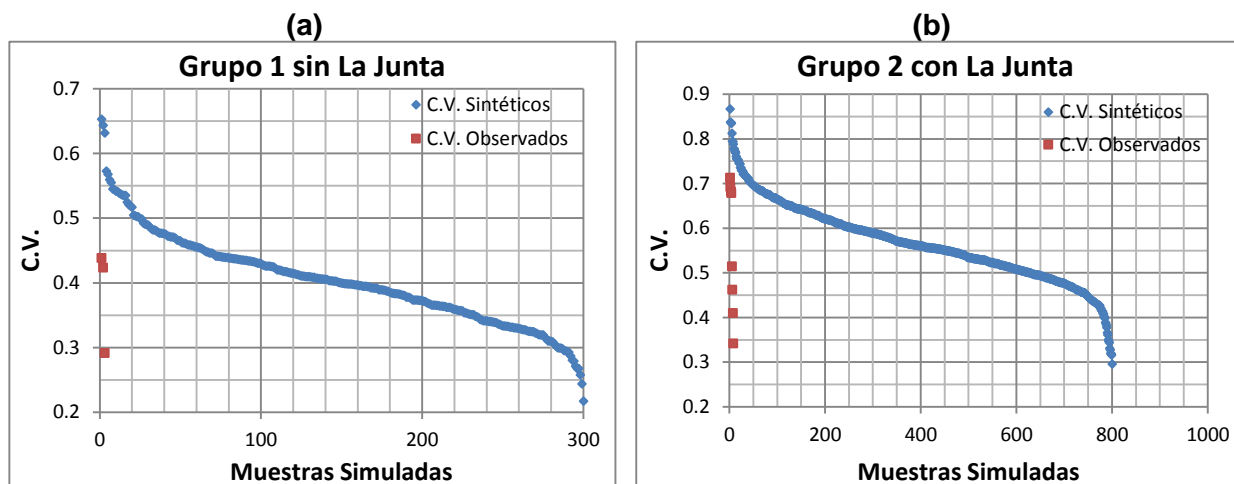


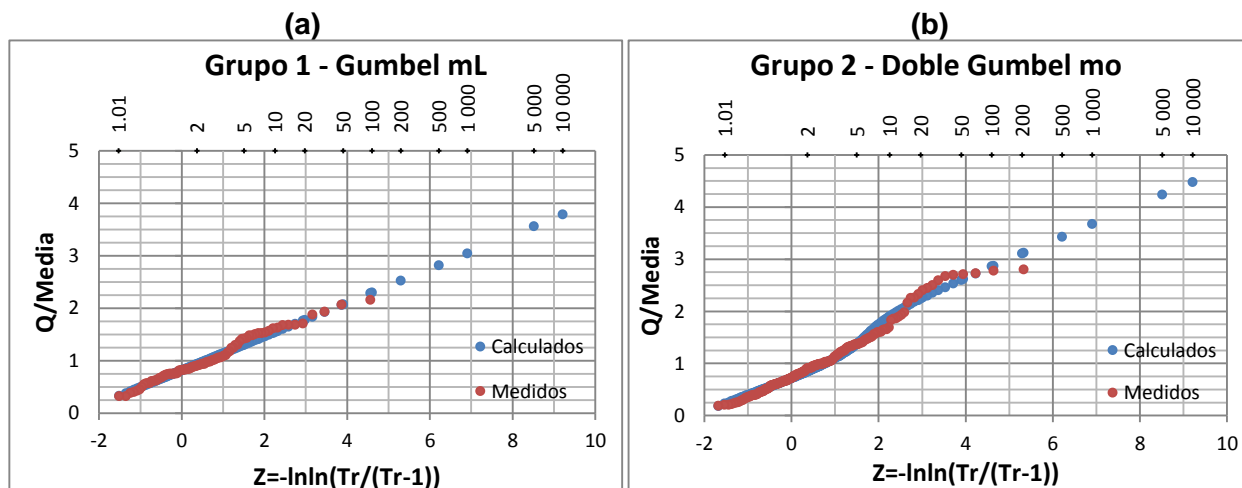
Figura 4.25. Región 28 Papaloapan. Prueba de homogeneidad regional (a) Grupo 1 sin La Junta y (b) Grupo 2 con La Junta.

Con los nuevos grupos formados se logró cumplir la hipótesis de homogeneidad. En la siguiente tabla se muestra los nuevos parámetros de cada distribución para los nuevos grupos.

Tabla 4.31. Región 28 Papaloapan. Parámetros estimados por la distribución de mejor ajuste Grupo 1 y Grupo 2.

Región Homogénea	Tamaño	Distribución	Parámetros.					EEA
			α_1	u_1	α_2	u_2	P	
Grupo 2	95	Doble Gumbel mo	0.2973	0.6744	0.3518	1.9775	0.88	0.0670
Grupo 1	207	Gumbel mL	-	-	-	0.8138	0.3226	0.0526

En la Figura 4.26 se muestran las distribuciones de mejor ajuste contra la variable reducida z para los grupos 1, 2, 3 y 4.



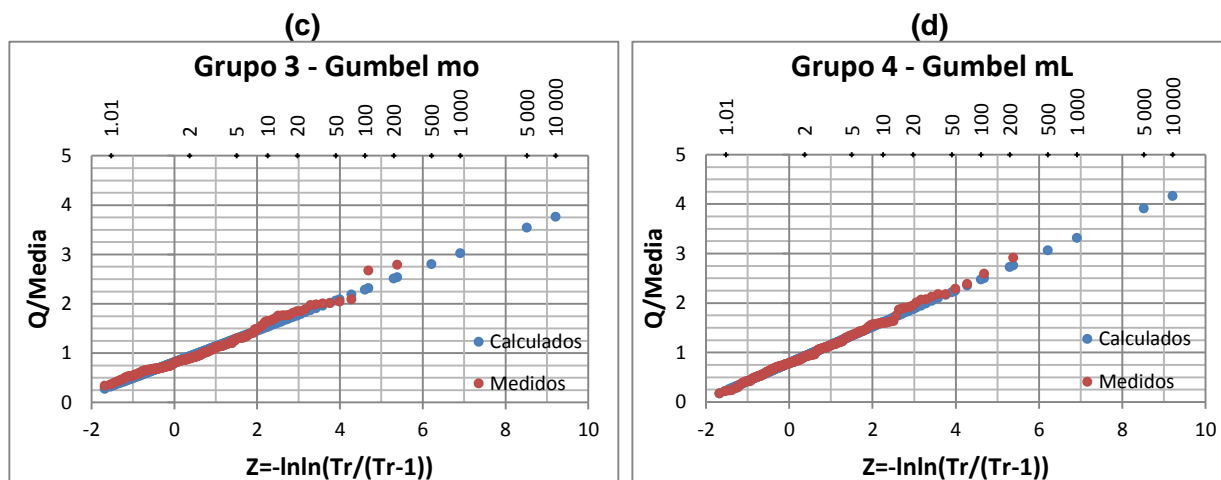


Figura 4.26. Región 28 Papaloapan. Distribuciones de mejor ajuste (a) Grupo 1, (b) Grupo 2, (c) Grupo 3 y (d) Grupo 4.

Los factores de ajuste extrapolados hasta 10,000 años periodo de retorno se muestran en la Tabla 4.32 para cada registro regional.

Tabla 4.32. Región 28 Papaloapan. Factores de ajuste de diseño.

Tr	Región hidrológica 28 Papaloapan			
	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
2	0.93	0.84	0.93	0.92
5	1.30	1.37	1.30	1.34
10	1.54	1.90	1.54	1.61
20	1.77	2.24	1.77	1.88
50	2.07	2.60	2.06	2.22
100	2.30	2.86	2.29	2.47
200	2.52	3.11	2.51	2.73
500	2.82	3.43	2.81	3.07
1000	3.04	3.67	3.03	3.32
5000	3.56	4.24	3.54	3.91
10000	3.79	4.48	3.77	4.16

Algo que se puede observar en los factores de diseño estimados para cada grupo, es la poca variación que existe en toda la región, por ejemplo, la diferencia máxima, para 10,000 años periodo de retorno, es de un 19 %, la cual se da entre el grupo 2 y 3. Con esta variación se logra tener una predicción de los eventos de diseño que dependen, en gran medida, de la magnitud de la media de los gastos máximos.

4.5.- Análisis regional RH 29.

La región 29 Coatzacoalcos cuenta con escasa información hidrométrica y climatológica, sin embargo, se ha logrado seleccionar la información necesaria para su estudio.

4.5.1.- Delimitación de regiones homogéneas RH 29.

La región hidrológica del río Coatzacoalcos cuenta con solo 5 estaciones para la delimitación de regiones; Minzapan, Paso Arnulfo, Jesús Carranza II, Las Perlas y Tierra Morada. En la Tabla 4.33 se muestran los parámetros estadísticos de cada estación.

Tabla 4.33. Región 29 Coatzacoalcos. Parámetros estadísticos.

Código	Nombre	Máximo (m³/s)	Media (m³/s)	Mínimo (m³/s)	Desv. Estándar (m³/s)	C.V.	Tamaño
29005	LAS PERLAS	7430	3523.9	1009.8	1514.1	0.430	52
29006	JESUS CARRANZA II	3150	1055.2	228.8	590.9	0.560	51
29007	PASO ARNULFO	2159.4	1212.6	680.6	473.6	0.391	18
29008	TIERRA MORADA	4050.49	1673.9	1034	558.9	0.334	33
29009	MINZAPAN	464.5	216.1	59.04	102.7	0.475	34

El método de los trazos multidimensionales no se aplicó en esta región debido a que se tiene un número pequeño de estaciones. En la tabla siguiente se muestran las principales características fisiográficas y climatológicas.

Tabla 4.34. Región 29. Características fisiográficas y climatológicas.

Estación	Código	A (km²)	PM (mm)	PMC (%)	CN	Centroide			Lc (Km)	Sc (%)	PMT (Km)
						X (utm)	Y (utm)	Z (msnm)			
LAS PERLAS	29005	8943.6	131.1	26.4	80.2	286174.2	1888782.3	926.0	257.1	0.1	659.8
JESUS CARRANZA II	29006	3006.3	128.2	29.7	81.1	243168.5	1895279.1	935.9	169.1	0.2	355.6
PASO ARNULFO	29007	1422.2	142.2	42.8	73.3	346420.2	1870170.7	1275.7	105.3	0.6	235.5
TIERRA MORADA	29008	3164.9	139.2	26.3	82.3	380284.5	1909107.4	750.5	158.9	0.1	396.8
MINZAPAN	29009	266.2	164.4	20.5	85.1	306578.3	2018092.1	749.1	45.8	1.5	91.6

- Método del parámetro β de la distribución GVE

Para aplicar el método del parámetro β se eligieron las estaciones Las Perlas, Jesús Carranza II, Tierra Morada y Minzapan con un periodo común entre 1993 y 2005, sin presencia de eventos máximos extraordinarios. Para incluir todas las estaciones en este método se obtuvieron los betas considerando todo el registro completo. En la Tabla 4.35 se muestran los betas estimados para los dos casos.

Tabla 4.35. Región 29 Coatzacoalcos. Regiones homogéneas con el método del parámetro β - GVE

Tamaño	Código	Nombre	β	
			Periodo 1993 - 2005	Registros completos
52	29005	LAS PERLAS	0.8438	-0.0438
51	29006	JESUS CARRANZA II	0.2100	-0.0214
34	29009	MINZAPAN	-0.0500	-0.0307
18	29007	PASO ARNULFO	-	-0.1190
33	29008	TIERRA MORADA	-0.1434	-0.3846

Con un periodo común entre 1993 y 2005 se pueden formar 3 grupos: el primero solo por la estación Las Perlas; el segundo por la estación Jesús Carranza II y, un tercero, formado por las estaciones Minzapan y Tierra Morada. Con los registros completos se forman 3 grupos; Las Perlas, Jesús Carranza II y Minzapan en uno; Paso Arnulfo en un segundo y Tierra Morada en el tercer grupo. Este método se desechó debido al gran cambio que presenta el parámetro beta entre cada periodo.

- Prueba de Fisher para delimitar regiones homogéneas.

Debido a la poca información hidrométrica que se tiene se optó por utilizar el método de Fisher para delimitar regiones homogéneas en esta región.

En la Tabla 4.36 se muestran las regiones homogéneas obtenidas con el método de Fisher, utilizando una significancia del 5 %.

Tabla 4.36. Región 29 Coatzacoalcos. Regiones homogéneas - Fisher 5 %.

Tamaño	Código	Nombre	Cv	Cv ²	Grupo Homogéneo
51	29006	JESUS CARRANZA II	0.560	0.314	1
34	29009	MINZAPAN	0.475	0.226	
52	29005	LAS PERLAS	0.430	0.185	2
18	29007	PASO ARNULFO	0.391	0.153	
33	29008	TIERRA MORADA	0.334	0.111	

La estación Jesús Carranza II se agrupa con la estación Minzapan, la cual se encuentra en el Río Calzadas, formado por la confluencia de los ríos Texizapan y Huazuntlán, que nacen en la Sierra de los Tuxtlas. Estas dos estaciones se encuentran muy distantes. Por otro lado, las estaciones Las Perlas, Paso Arnulfo y Tierra Morada forman una segunda región homogénea, con la media de los máximos anuales más grandes y en continuidad geográfica. En la Figura 4.27 se muestran las regiones homogéneas.

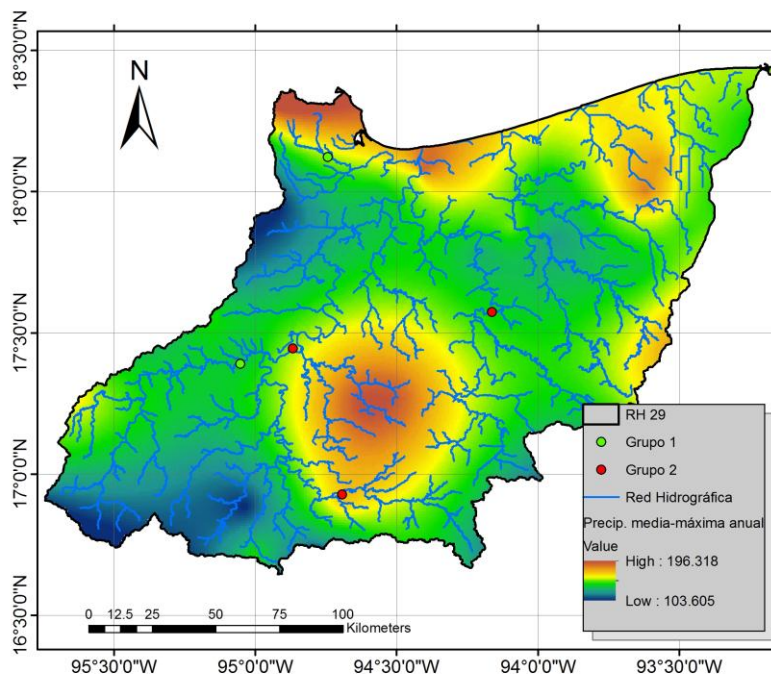


Figura 4.27. Región 29 Coahuila. Regiones Homogéneas - Fisher 5 %.

4.5.2.- Análisis de frecuencias y gastos de diseño RH 29.

A los registros regionales formados con la técnica estaciones-año se le aplicaron las distribuciones Doble Gumbel, Gumbel y GVE. En la Tabla 4.37 se muestran los parámetros de mejor ajuste estimados en cada registro regional.

Tabla 4.37. Región 29 Coahuila. Parámetros estimados por la distribución de mejor ajuste.

Método	Región Homogénea	Tamaño	Distribución	Parámetros		EEA
				ν	α	
Fisher	Grupo 1	85	Gumbel mL	0.7635	0.4098	0.0681
	Grupo 2	103	Gumbel mo	0.8241	0.3048	0.0621

La Figura 4.28 muestra las distribuciones de mejor ajuste contra la variable reducida z para los grupos homogéneos 1 y 2.

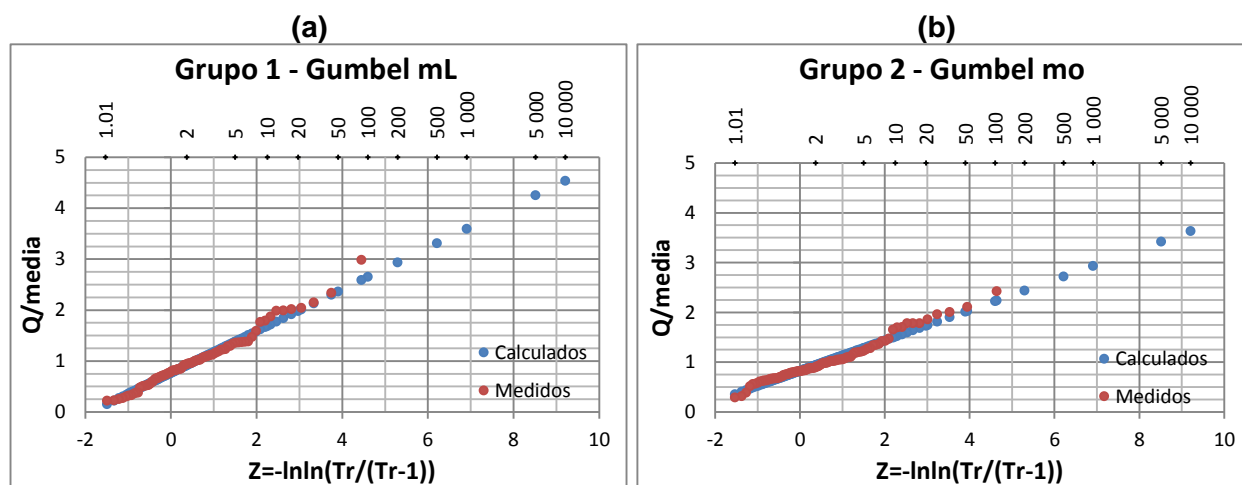


Figura 4.28. Región 29 Coatzacoalcos. Distribuciones de mejor ajuste (a) Grupo 1 y (b) Grupo 2.

Se emplearon las distribuciones de mejor ajuste para probar la homogeneidad regional. Se realizaron 10 simulaciones para cada región supuesta. En la figura siguiente se muestran los CV generados y los observados.

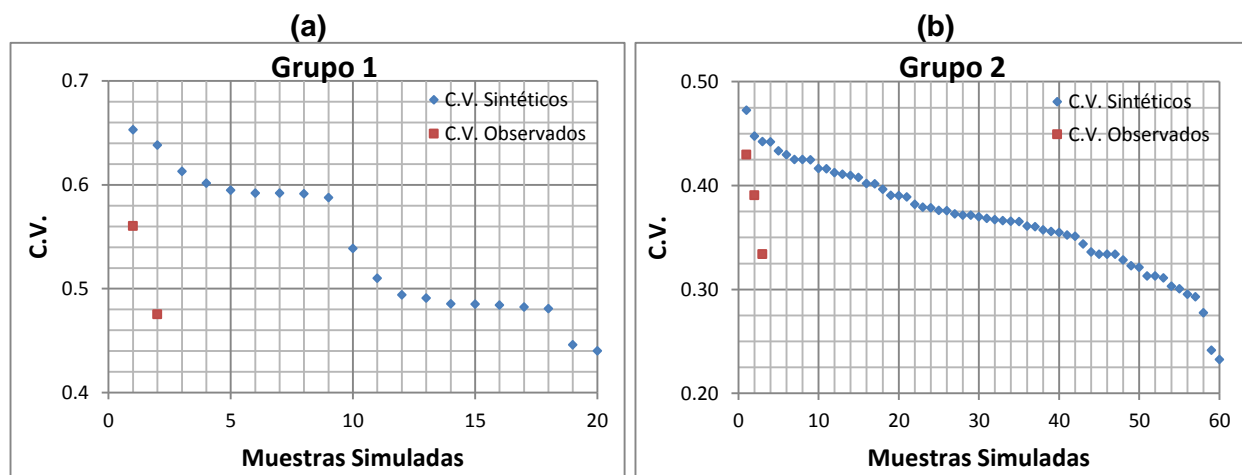


Figura 4.29. Región 29 Coatzacoalcos. Prueba de homogeneidad regional (a) Grupo 1 y (b) Grupo 2.

En ambos grupos los coeficientes de variación observados queda dentro de los sintéticos, por lo tanto, se acepta la homogeneidad regional.

Los factores de ajuste para los gastos de diseño se muestran en la Tabla 4.38 para cada registro regional.

Tabla 4.38. Región 29 Coatzacoalcos. Factores de ajuste de diseño.

Tr	Región hidrológica 29	
	Grupo 1	Grupo 2
2	0.91	0.94
5	1.38	1.28
10	1.69	1.51
20	1.98	1.73
50	2.36	2.01
100	2.65	2.23
200	2.93	2.44
500	3.31	2.72
1000	3.59	2.93
5000	4.25	3.42
10000	4.54	3.63

4.6.- Breve comentario respecto a los efectos de los ciclones.

Es común que en los casos donde se tiene alta incidencia de ciclones, los factores de ajuste de diseño sean mayores a las regiones que no la tienen. Esto ocurre en las regiones hidrológicas estudiadas, ya que los factores de diseño van disminuyendo conforme son estimados en regiones con baja probabilidad de ciclones. Como ejemplo tenemos a las regiones hidrológicas 27 y 28 Parcial, ubicadas al norte de la zona de estudio, en las cuales se tiene la mayor presencia de ciclones, es por ello que cuenta con los factores más grandes. Estos factores van disminuyendo conforme se avanza hacia las regiones hidrológicas ubicadas en la parte sur, es decir, en las regiones 28 y 29, localizadas en zonas con baja presencia de eventos ciclónicos. Ver Tabla 4.39.

Tabla 4.39. Zona de estudio. Factores de ajuste de diseño.

Tr	Región hidrológica 27			Región hidrológica 28 Parcial			Región hidrológica 28 Papaloapan				Región hidrológica 29	
	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Actopan	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 1	Grupo 2
2	0.66	0.83	0.87	0.62	0.82	0.90	0.93	0.84	0.93	0.92	0.91	0.94
5	1.23	1.33	1.32	1.53	1.28	1.44	1.30	1.37	1.30	1.34	1.38	1.28
10	2.65	1.76	1.70	2.64	1.70	1.80	1.54	1.90	1.54	1.61	1.69	1.51
20	3.64	2.73	2.24	3.59	2.43	2.15	1.77	2.24	1.77	1.88	1.98	1.73
50	4.55	3.41	2.80	4.75	3.67	2.59	2.07	2.60	2.06	2.22	2.36	2.01
100	5.18	3.74	3.14	5.60	4.48	2.93	2.30	2.86	2.29	2.47	2.65	2.23
200	5.78	4.05	3.46	6.43	5.23	3.26	2.52	3.11	2.51	2.73	2.93	2.44
500	6.57	4.43	3.87	7.53	6.19	3.70	2.82	3.43	2.81	3.07	3.31	2.72
1000	7.16	4.72	4.18	8.36	6.91	4.03	3.04	3.67	3.03	3.32	3.59	2.93
5000	8.51	5.38	4.89	10.26	8.55	4.81	3.56	4.24	3.54	3.91	4.25	3.42
10000	9.13	5.66	5.21	11.13	9.25	5.14	3.79	4.48	3.77	4.16	4.54	3.63

En las siguientes figuras se muestran dos eventos ciclónicos que han afectado a la costa del Golfo de México.

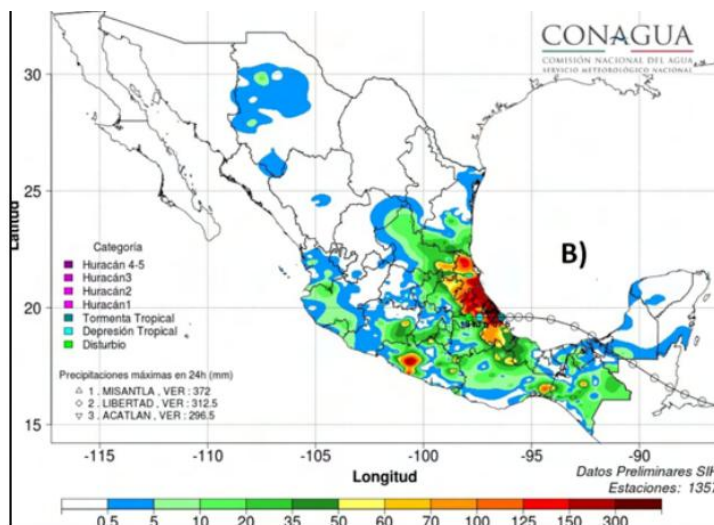


Figura 4.30. Trayectoria de la tormenta tropical Barry con datos del NOAA-NHC. Mapa de distribución de lluvias del 20 de Junio de 2013. Fuente: CONAGUA.

El paso de la tormenta tropical Barry dejó precipitaciones máximas entre los 296 y 372 mm en la región 27, medidas por las estaciones Misantla, Libertad y Acatlan, ubicadas cerca de la región 28 Parcial.

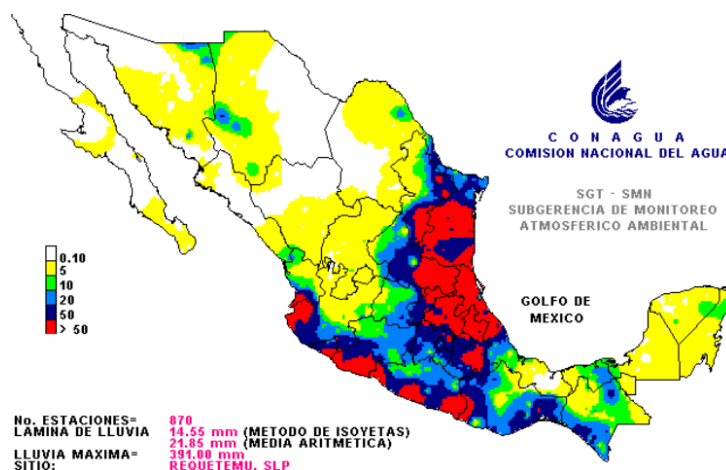


Figura 4.31. Mapa de lluvias registradas por el segundo impacto del Huracán "Dean" en el Golfo de México. Lluvias acumuladas en 24 hrs de los días 22 y 23 de Agosto de 2007. Fuente: CONAGUA.

4.7.- Ecuación regional zona de estudio.

- Introducción

La optimización de la ecuación regional, en cada región hidrológica, se realizó alternando una a una las características de la cuenca. Estas características, generalmente, son aquellas mejor correlacionadas con la variable dependiente. Si el coeficiente de determinación obtenido con una variable independiente no resulta ser satisfactorio, entonces se incrementa a dos el número de variables predictoras. En el nuevo ajuste se incluye la variable que mejor coeficiente de determinación obtuvo en la primera estimación, más una segunda que al ser incluida permita aportar nueva información y, que a la vez no se encuentre altamente correlacionada con la primera, de lo contrario su aportación sería pura redundancia. De este modo se trató de encontrar las características que mayor poder explicativo tienen con la media de los máximos anuales, además de tratar de comprender que porcentaje explica cada característica.

4.7.1.- Ecuación regional RH 27 Norte de Veracruz.

En esta región se emplearon 20 estaciones, una menos que en el apartado de regionalización, debido a que la estación Nixtamalapa presentó incertidumbre en cuanto a su ubicación exacta, por lo que no fue posible calcular sus características, sin embargo, se sabe que se encuentra instalada en el río tributario del mismo nombre. A continuación se muestran el primer ajuste utilizando el área drenada por la cuenca en una ecuación potencial de la forma:

$$Q_{med}^* = a_1 A^{a_2} \quad (4.2)$$

La ecuación obtenida, junto con el coeficiente de determinación, se muestran en la Figura 4.32.

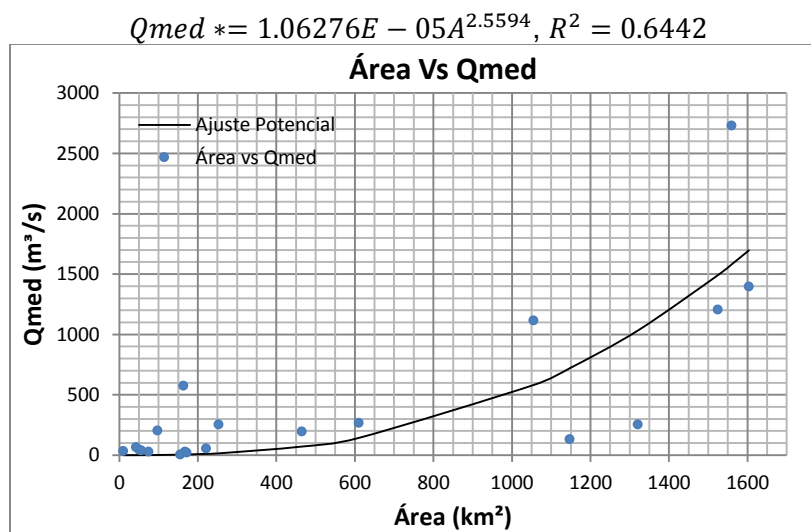


Figura 4.32. Región 27 Norte de Veracruz. Ecuación regional en función del área drenada por la cuenca.

Con un primer ajuste de la ecuación regional para la región No. 27, utilizando el área drenada por la cuenca, se obtuvo un coeficiente de determinación de 0.6442, es decir, la ecuación logró predecir un 64.4 % de la variabilidad de los gastos medios máximos anuales. Ver Tabla 4.41.

Para los siguientes ajustes se obtuvieron las correlaciones de las características fisiográficas y climatológicas mencionadas en el apartado 5.3.1, con respecto a la media de los gastos máximos anuales. Las características de mayor correlación lineal con la media (Q_{med}) fueron: el área, coordenada y del centroide de la cuenca, longitud del cauce principal, tiempo de concentración, perímetro, volumen medio-máximo precipitado en 24 horas y, finalmente, el volumen medio-máximo escurrido en 24 horas. En la Tabla 4.40 se muestran los coeficientes de correlación respecto a la media de los gastos máximos anuales.

Tabla 4.40. Región 27 Norte de Veracruz. Coeficientes de correlación respecto a la media de los gastos máximos anuales.

Característica	A	PM	PMC	CN	x	y	z	Lc	Sc	Tc	S	PMT	Pe	V	Ve	VT
Coefficiente de correlación R	0.76	0.32	0.16	0.61	-0.36	0.86	-0.57	0.75	-0.60	0.84	-0.51	0.75	0.69	0.89	0.94	-0.63

En un primer ajuste de la ecuación regional se emplearon, una a una, aquellas características de mayor correlación con la media de los gastos máximos anuales. La velocidad de tránsito, la coordenada x del centroide y la pendiente del cauce, con correlaciones negativas, se descartaron debido a que no aportan información a la ecuación regional. Por ejemplo, se espera que a mayor velocidad transite el gasto, mayor sea su magnitud, y no lo contrario. Las coordenadas del centroide restantes también se descartaron debido a que no proporcionan información en la predicción del escurrimiento.

En la figura siguiente se muestra el mejor ajuste obtenido considerando solo una característica, así como la ecuación regional y coeficiente de determinación.

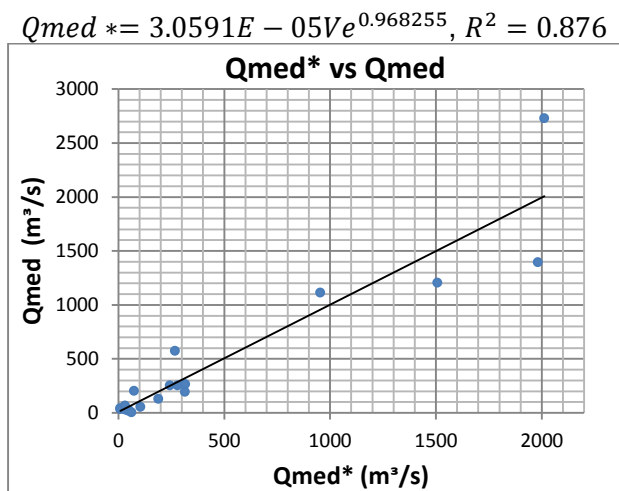


Figura 4.33. Región 27 Norte de Veracruz. Ecuación regional en función del volumen medio-máximo escurrido en 24 horas.

En la figura anterior se pueden observar los siguientes comportamientos; las estaciones La Gloria, Libertad, Xilita, Tepecapan, Sontalaco y Sombrerete, ubicadas arriba de la recta de 45°, no se ajustan a la ecuación regional, con medias subestimadas de al menos un 25 %. Las estaciones Martínez de la Torre, Puente Henríquez, Rancho Apulco, Puxtla, Puente Xiucayucan, Altotonga,

Chalame y Poza Rica, ubicadas abajo de la recta, tampoco se ajustan a la ecuación propuesta, ya que la media es sobrestimada. Sin embargo, los resultados son buenos considerando que solo se está empleando una variable, y que esta se encuentra en función de la precipitación media-máxima en 24 horas, el número de escurrimiento N y el área drenada por la cuenca.

Los ajustes mostrados en la Figura 4.32 y Figura 4.33 pueden ser mejorados considerando una variable más en el modelo. Como segunda variable se descartaron aquellas que fueran colineales con el área y por consiguiente con el volumen medio-máximo escurrido, o que presentaran alta correlación con la misma. Las variables descartadas fueron: el tiempo de concentración, perímetro, longitud del cauce y volumen medio-máximo precipitado. Los mejores ajustes para cada ecuación se muestran en la Figura 4.34.

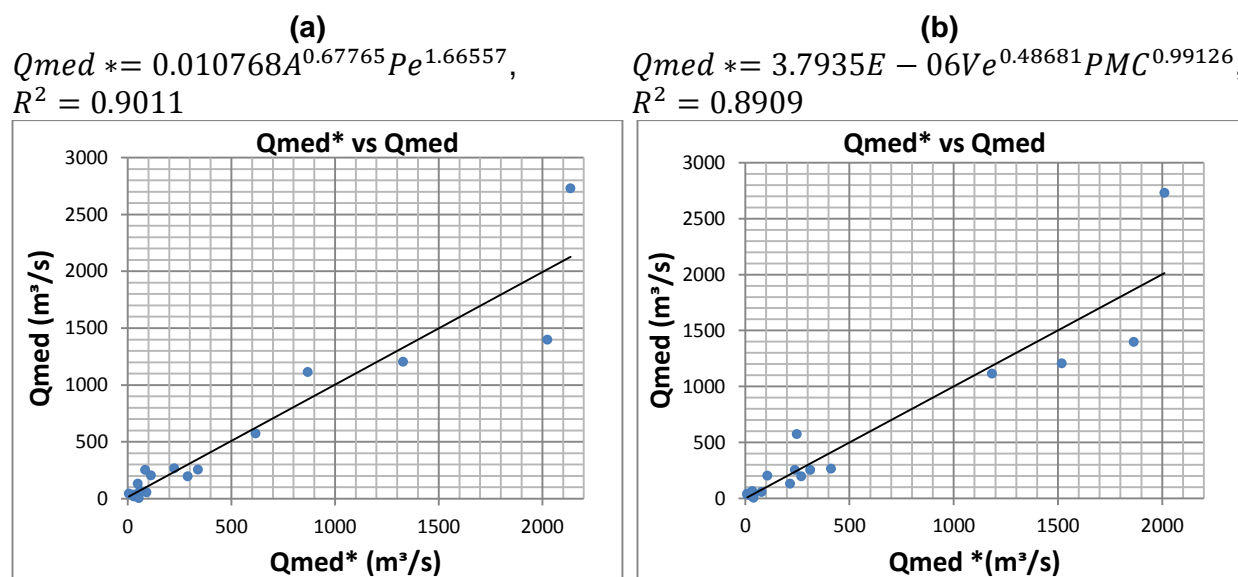


Figura 4.34. Región 27 Norte de Veracruz. (a) Ecuación regional en función del área y la precipitación efectiva media-máxima en 24 horas. (b) Ecuación regional en función del volumen medio-máximo escurrido y la pendiente media de la cuenca.

Las nuevas ecuaciones permitieron mejorar el coeficiente de determinación, sin embargo, se tienen algunas observaciones importantes; la ecuación de la Figura 4.34a subestima la media de las estaciones La Gloria, Rancho Apulco, Tepecapan, Tecuantepec, Buenos Aires y Sombrerete con al menos un 20 %, mientras que las estaciones con sobrestimación son: Vega de Alatorre, Puente Henríquez, Puxtla, Jalacingo, Altotonga, Chalame y Poza Rica. En cuanto a la ecuación de la Figura 4.34b, se tienen subestimaciones en las estaciones La Gloria, Libertad, Xilita, Tepecapan, Sontalaco y Sombrerete. Las estaciones con problemas de sobrestimación son: Martínez de la Torre, Puente Henríquez, Rancho Apulco, Altotonga, Mapilco y Poza Rica. Las estaciones La Gloria, Tepecapan y Sombrerete son subestimadas en las dos ecuaciones, mientras que las estaciones Puente Henríquez, Altotonga y Poza Rica sobrestimadas. Ver Tabla 4.41.

Finalmente, se obtuvo la mejor ecuación regional empleando tres variables. En la Figura 4.35 se muestra la ecuación potencial en función del área, la precipitación media-máxima en 24 horas y la infiltración potencial máxima.

$$Q_{med}^* = 2.6348E - 05A^{0.71796}PM^{2.94851}S^{-0.75364},$$

$$R^2 = 0.908$$

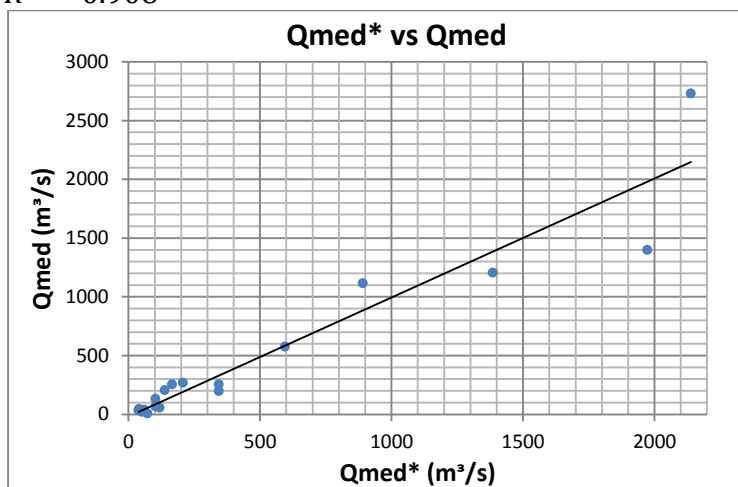


Figura 4.35. Región 27 Norte de Veracruz. Ecuación regional en función del área, precipitación media-máxima en 24 horas y la infiltración potencial máxima.

Las estaciones con mayor sobrestimación, empleando 3 variables, son: Vega de la Torre, Alseseca, Puente Henríquez, Puxtla, Puente Xiucayucan, Jalacingo, Altotonga, Chalame, y Poza Rica. Las estaciones subestimadas son: Tepecapan, Buenos Aires y Sombrerete.

Es importante resaltar que los mejores ajustes obtenidos, en esta región, involucran el área, la precipitación media-máxima en 24 horas y la infiltración potencial máxima, salvo en la ecuación-Figura 4.34b, donde, además de las anteriores, se incluye la pendiente media de la cuenca. En la ecuación-Figura 4.33 el área, la infiltración potencial máxima y la precipitación media-máxima son agrupadas con un mismo exponente, mientras que la ecuación de la Figura 4.34a solo agrupa a la precipitación media-máxima y a la infiltración potencial, por otro lado, la ecuación-Figura 4.35 las considera de forma independiente.

En las Tabla 4.41 y Tabla 4.42 se muestran las medias de los gastos máximos anuales estimadas y el error en porcentaje para cada ecuación respectivamente.

Tabla 4.41. Región 27 Norte de Veracruz. Media estimada de los gastos máximos anuales.

Estación	Código	Qmed (m³/s)	Qmed* (A) (m³/s)	Qmed* (Ve) (m³/s)	Qmed* (A,Pe) (m³/s)	Qmed* (Ve,PMC) (m³/s)	Qmed* (A,PM,S) (m³/s)
MARTINEZ DE LA TORRE	27001	1205.6	1491.59	1507.2	1328.3	1516.0	1386.0
LA GLORIA	27003	44.3	0.25	8.6	5.3	8.3	40.6
LIBERTAD	27005	575.3	4.88	267.5	617.9	232.1	596.0
VEGA DE ALATORRE	27007	255.1	15.04	243.2	339.9	223.8	344.2
ALSESECA	27008	39.9	0.31	32.7	47.9	29.1	60.1

Estación	Código	Qmed (m³/s)	Qmed* (A) (m³/s)	Qmed* (Ve) (m³/s)	Qmed* (A,Pe) (m³/s)	Qmed* (Ve,PMC) (m³/s)	Qmed* (A,PM,S) (m³/s)
PUENTE HENRIQUEZ	27020	196.6	71.2	314.02	289.4	252.4	343.9
RANCHO APULCO	27021	131.6	720.1	189.8	49.8	201.7	102.6
XILITA	27027	35.5	0.0042	9.5	30.3	7.7	38.5
PUXTLA	27029	19.8	5.5	47.6	30.2	27.9	51.5
PUENTE XIUCAYUCAN	27030	29.5	5.2	48.9	32.4	36.3	62.7
JALACINGO	27031	28.6	0.67	35.7	41.7	21.8	60.2
ALTOTONGA	27036	6.1	4.29	62.8	53.7	35.2	73.1
TEPECAPAN	27037	204.9	1.30	73.9	112.6	97.8	138.8
MAPILCO	27038	267.8	143.2	316.9	224.5	394.6	207.3
CHALAME	27046	56.7	10.6	104.1	90.2	71.7	119.3
TECUANTEPEC	27049	1114.7	580.9	953.4	869.5	1175.0	891.6
BUENOS AIRES	27052	254.3	1032.5	279.2	84.2	295.8	165.9
SONTALACO	27055	67.0	0.16	31.7	59.3	30.2	103.3
POZA RICA	27002	1397.5	1696.8	1982.2	2024.5	1872.8	1973.6
SOMBRERETE	27009	2730.1	1579.4	2012.5	2136.4	2027.0	2138.5

Tabla 4.42. Región 27 Norte de Veracruz. Errores estimados.

Estación	Código	Qmed (m³/s)	Qmed* (A)	Qmed* (Ve)	Qmed* (A,Pe)	Qmed* (Ve,PMC)	Qmed* (A,PM,S)
MARTINEZ DE LA TORRE	27001	1205.6	23.7%	25.0%	10.2%	25.7%	15.0%
LA GLORIA	27003	44.3	-99.4%	-80.5%	-87.9%	-81.2%	-8.3%
LIBERTAD	27005	575.3	-99.2%	-53.5%	7.4%	-59.7%	3.6%
VEGA DE ALATORRE	27007	255.1	-94.1%	-4.7%	33.2%	-12.3%	34.9%
ALSESECA	27008	39.9	-99.2%	-18.1%	20.1%	-27.1%	50.7%
PUENTE HENRIQUEZ	27020	196.6	-63.8%	59.7%	47.2%	28.4%	75.0%
RANCHO APULCO	27021	131.6	447.2%	44.2%	-62.2%	53.2%	-22.1%
XILITA	27027	35.5	-100.0%	-73.2%	-14.7%	-78.3%	8.3%
PUXTLA	27029	19.8	-72.0%	140.8%	52.9%	41.1%	160.5%
PUENTE XIUCAYUCAN	27030	29.5	-82.3%	65.8%	9.9%	22.8%	112.3%
JALACINGO	27031	28.6	-97.7%	24.8%	45.8%	-23.7%	110.4%
ALTOTONGA	27036	6.1	-30.0%	925.2%	776.5%	474.4%	1093.7%
TEPECAPAN	27037	204.9	-99.4%	-63.9%	-45.0%	-52.3%	-32.3%
MAPILCO	27038	267.8	-46.5%	18.4%	-16.2%	47.4%	-22.6%
CHALAME	27046	56.7	-81.3%	83.7%	59.3%	26.6%	110.5%
TECUANTEPEC	27049	1114.7	-47.9%	-14.5%	-22.0%	5.4%	-20.0%
BUENOS AIRES	27052	254.3	306.1%	9.8%	-66.9%	16.4%	-34.7%
SONTALACO	27055	67.0	-99.8%	-52.7%	-11.5%	-55.0%	54.1%
POZA RICA	27002	1397.5	21.4%	41.8%	44.9%	34.0%	41.2%
SOMBRERETE	27009	2730.1	-42.1%	-26.3%	-21.7%	-25.8%	-21.7%

En la Tabla 4.42 se ha obtenido el error de estimación expresado en porcentaje. El signo negativo indica que se ha subestimado la media de los gastos máximos, por otro lado, un porcentaje positivo indica lo contrario. Por ejemplo, en el caso de utilizar la ecuación de la Figura 4.35 ($Q_{med}^*(A, PM, S)$) para estimar la media de la estación Altotonga, esta es sobrestimada en un 1,094 %, mientras que para la estación La Gloria se subestima en un 8.3%. Algo que puede observarse respecto a esta ecuación, es que los errores más grandes corresponden a cuencas menores a los 500 km², aunque se tienen excepciones con las estaciones La Gloria, Libertad y Xilita, con 50.67, 163.05 y 10.34 km² respectivamente.

Tomando en cuenta las medias estimadas de la Tabla 4.41 y a las observaciones hechas para cada ecuación, se puede concluir que: la ecuación que mejor describe a la región 27 es la que relaciona el área de la cuenca, la precipitación media-máxima y la infiltración potencial máxima (Figura 4.35), la cual es válida en cuencas mayores a los 500 km².

Con la finalidad de mejorar las ecuaciones regionales obtenidas anteriormente, y encontrar una ecuación que permita estimar la media en cuencas menores de 500 km², se ajustaron dos ecuaciones más; la primera para cuencas menores a 500 km² y la segunda a las mayores. En el primer caso no se logró mejorar la media y, en el segundo, solo se mejoraron las estimaciones en la estación Buenos Aires, pero el error aumento en Rancho Apulco.

En una segunda alternativa se ajustaron ecuaciones por cada grupo homogéneo, sin embargo, solo se logró una mejora en las estaciones que forman el grupo 2. En la Figura 4.36 se muestra el mejor ajuste obtenido.

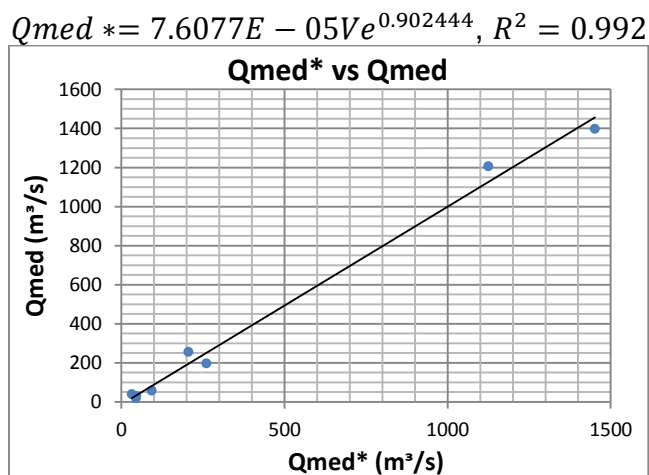


Figura 4.36. Región 27 Norte de Veracruz. Ecuación regional Grupo 2-Fisher en función del volumen medio-máximo escurrido en 24 horas.

Con esta ecuación se mejoró la media calculada en las estaciones del grupo homogéneo 2 respecto a considerar la ecuación de la Figura 4.35. Las mejoras más significativas ocurren en las estaciones Vega de Alatorre, Alseseca, Martínez de la Torre y Poza Riza, con errores de estimación menores al 20 % (Tabla 4.43). Por otro lado, Martínez de la Torre y Poza Rica son cuencas que cuentan con un área mayor a los 500 km², y para ellas ya se ha definido la ecuación regional. En cuanto a las estaciones Puente Henríquez, Puxtla, Puente Xiucayucan y Chalame,

con áreas menores a los 500 km², se logró reducir el error hasta en un 50 % respecto a la ecuación de la Figura 4.35, sin embargo, aún se cuentan con sobrestimaciones por arriba del 30 %. Ver Tabla 4.43.

Tabla 4.43. Región 27. Grupo 2-Fisher media estimada de los gastos máximos anuales.

Estación	Código	Qmed (m ³ /s)	Qmed* (Ve) (m ³ /s)
MARTINEZ DE LA TORRE	27001	1205.6	1124.5
VEGA DE ALATORRE	27007	255.1	205.4
ALSESECA	27008	39.9	31.6
PUENTE HENRÍQUEZ	27020	196.6	260.6
PUXTLA	27029	19.8	44.9
PUENTE XIUCAYUCAN	27030	29.5	46.1
CHALAME	27046	56.7	93.1
POZA RICA	27002	1397.5	1451.6

Debido a la poca mejora que se tuvo en las cuencas menores a los 500 km², se dividió la región hidrológica en 2 subregiones teniendo en cuenta comportamientos similares entre las cuencas, además de considerar cuencas geográficamente continuas. Se buscaron cuencas afectadas por ciclones, zonas muy áridas o muy húmedas, cuencas colindantes entre regiones hidrológicas que presentaran medias similares, entre otras.

Para poder identificar si la región era candidata a una subdivisión se partió del primer ajuste de la ecuación regional, es decir, ecuaciones en las que se observó una gran dispersión entre la media medida y la media estimada, indicaron comportamientos diferentes entre las cuencas consideradas, por ejemplo, las estaciones Chalame, Altotonga, Jalacingo, Puente Xiucayucan, Puxtla, Puente Henríquez, Alseseca, Vega de Alatorre, Poza Rica, Sombrerete y Sontalco, las cuales cuentan con los mayores errores de estimación. La mayoría de estas estaciones se encuentran instaladas en afluentes del río Nautla o en el río mismo. Teniendo en cuenta lo anterior, se dividió la región en dos subregiones; una formada por los ríos Colipa, Misantla y Nautla (subregión 27 Sur), y otra por los ríos Tecolutla, Cazones y Tuxpan (subregión 27 Norte). Estas subregiones fueron seleccionadas teniendo en cuenta la continuidad entre las cuencas. Ver Figura 4.37.

Para la subregión formada por los ríos Colipa, Misantla y Nautla se tomaron las estaciones Vega de Alatorre, Libertad, Martínez de la Torre, Puente Henríquez, Chalame, Alseseca, Altotonga y Jalacingo, en cuanto a la subregión formada por los ríos Tecolutla, Cazones y Tuxpan las estaciones; La Gloria, Rancho Apulco, Xilita, Puxtla, Puente Xiucayucan, Tepecapan, Mapilco, Tecantepec, Buenos Aires, Sontalaco, Poza Rica y Sombrerete.

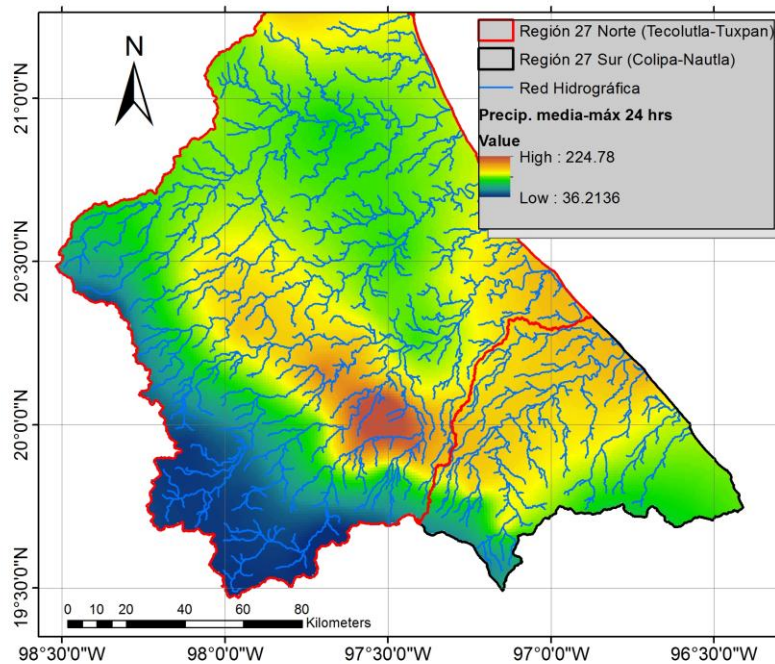


Figura 4.37. Región 27 Norte de Veracruz. Subregiones Norte (Tecolutla-Tuxpan) y Sur (Colipa-Nautla).

Se ajustaron curvas potenciales para cada subregión considerando una y dos características, pero solo se logró una mejoría en la región 27 sur o Colipa-Nautla. En la Figura 4.38 se muestra el mejor ajuste para la región 27 sur, considerando el área y la precipitación efectiva media-máxima en 24 horas.

$$Q_{med}^* = 8.918E - 04A^{0.756509}P_e^{2.1133}, R^2 = 0.999$$

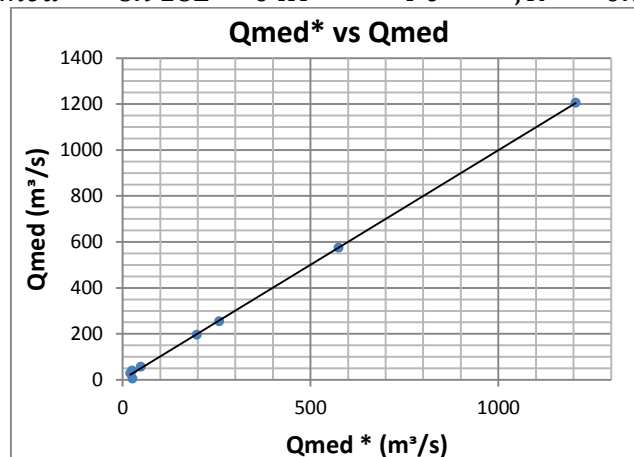


Figura 4.38. Subregión 27 Sur. Ecuación regional en función del área y la precipitación media-máxima efectiva en 24 horas.

Con esta propuesta se logró mejorar la media máxima anual en las estaciones Martínez de la Torre, Libertad, Vega de Alatorre, Puente Henríquez y Chalame. Sin embargo, las estaciones Jalacingo y Alseseca son subestimadas con más del 25%, mientras que la estación Altotonga es sobrestimada con un 325%. Ver Tabla 4.44.

Tabla 4.44. Región 27 Sur. Media estimada de los gastos máximos anuales.

Estación	Código	Qmed (m³/s)	Qmed* (A,Pe) (m³/s)
MARTINEZ DE LA TORRE	27001	1205.6	1205.5
LIBERTAD	27005	575.3	575.1
VEGA DE ALATORRE	27007	255.1	257.4
ALSESECA	27008	39.9	25.1
PUENTE HENRIQUEZ	27020	196.6	197.1
JALACINGO	27031	28.6	20.4
ALTOTONGA	27036	6.1	26.0
CHALAME	27046	56.7	48.5

- Resumen.

De las ecuaciones obtenidas para cada consideración se concluye lo siguiente:

Cuando se requiera estimar la media de los gastos máximos anuales en la subregión 27 Norte (Tecolutla- Tuxpan) se debe utilizar la ecuación de la Figura 4.35, la cual se muestra enseguida.

$$Q_{med} * = 2.6348E - 05A^{0.71796}PM^{2.94851}S^{-0.75364}; R^2 = 0.908 \quad (4.3)$$

La ecuación anterior solo es válida bajo las siguientes condiciones:

- La media de los gastos máximos anuales puede ser estimada en cuencas de tamaño mayor a los 500 km².
- La ecuación no es válida en los ríos Laxaxalpa, Necaxa y Jaloapan. Esto debido a que no se utilizaron registros hidrométricos de dichos ríos.
- En las estaciones Buenos Aires y Poza Rica se obtienen los mayores errores de estimación, por lo que se debe tener cuidado al utilizar la ecuación en estas cuencas.

Para estimar la media en la subregión Sur (Colipa - Nautla) se plantea una nueva ecuación en el siguiente apartado.

4.7.2.- Ecuación regional RH 28 Parcial.

En esta región se utilizaron ocho estaciones hidrométricas distribuidas en los 3 principales colectores que la conforman; los ríos Jamapa, La Antigua y Actopan.

En la Tabla 4.45 se muestran los coeficientes de correlación respecto a la media de los gastos máximos anuales.

Tabla 4.45. Región 28 Parcial. Coeficientes de correlación respecto a la media de los gastos máximos anuales.

Característica	A	PMT	Tc	PM	Lc	Sc	PMC	y	x	z	CN	S	V	Ve	VT	Pe
Coefficiente de correlación R	0.89	0.79	0.84	0.34	0.85	-0.74	0.08	-0.40	0.01	0.29	-0.03	-0.02	0.89	0.63	-0.55	0.01

Las características mejor correlacionadas con la media de los gastos máximos anuales son: el área, perímetro, tiempo de concentración, longitud del cauce y el volumen medio-máximo precipitado. Se ajustaron curvas regionales a estas características, obteniendo los mejores resultados para el área y el volumen medio-máximo precipitado. Ver Figura 4.39.

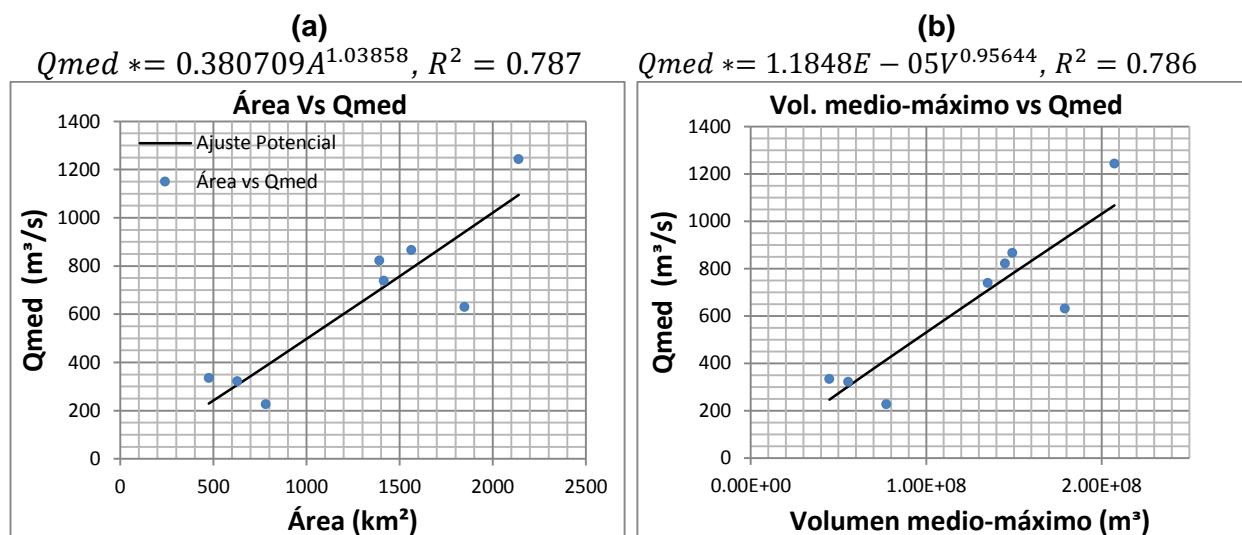


Figura 4.39. Región 28 Parcial. (a) Ecuación regional en función del área. (b) Ecuación regional en función del volumen medio-máximo precipitado.

Las estaciones sobrestimadas con las ecuaciones de las Figura 4.39a y Figura 4.39b son: Actopan y El Naranjillo, mientras que la estación con mayor subestimación es ídolos. Por otro lado, los coeficientes de determinación obtenidos no varían entre ecuación, esto se debe a que la precipitación media-máxima permanece casi constante en la región, con una mínima de 88.14 mm en la cuenca de la estación Amatitla y una máxima de 104.17 mm en la cuenca de la estación Capulines.

El comportamiento en los ajustes anteriores es muy cercano al lineal, sin embargo, es preferible utilizar ecuaciones potenciales, de este modo se elimina el término constante que no considera la variación entre las características utilizadas.

A la ecuación de la Figura 4.39a se le agregó la precipitación media-máxima y la precipitación efectiva media-máxima. Para el primer caso se obtuvo un coeficiente de determinación de 0.789, que no mejora comparado con las ecuaciones de la Figura 4.39a y Figura 4.39b y, en el segundo, se obtiene un exponente negativo en la precipitación efectiva media-máxima con coeficiente de determinación de 0.804. En el caso de la ecuación de la Figura 4.39b, se obtienen mejores resultados al considerar a la precipitación media-máxima y al área con un mismo exponente, además de reducirse la ecuación a una característica.

A continuación se muestran los mejores ajustes obtenidos con dos variables.

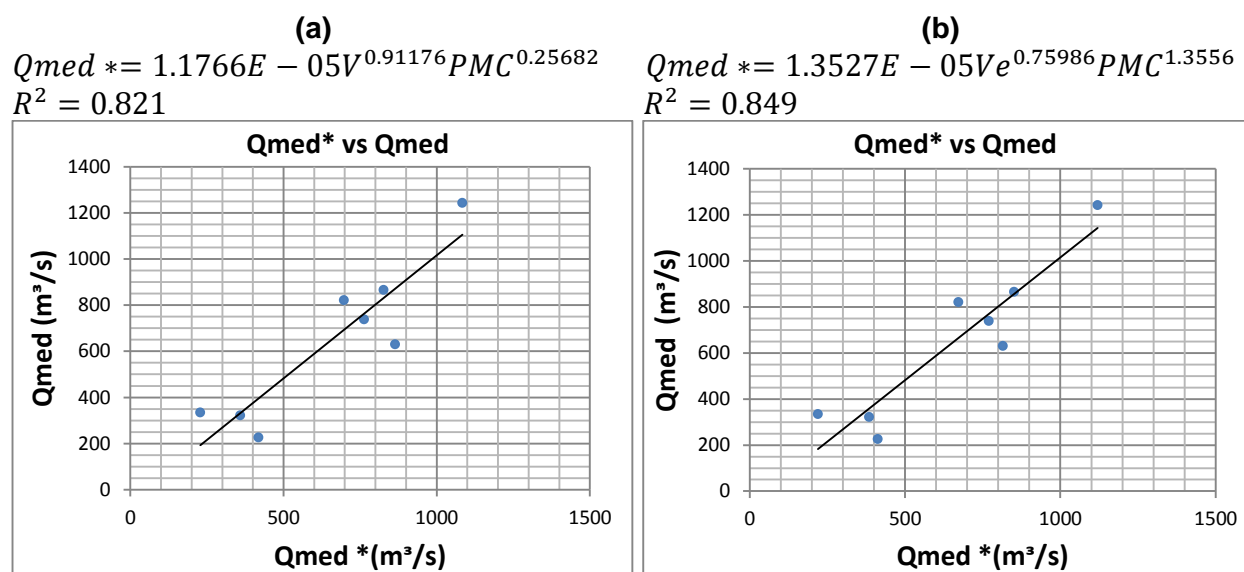


Figura 4.40. Región 28 Parcial. (a) Ecuación regional en función del volumen medio-máximo y la pendiente media de la cuenca. (b) Ecuación regional en función del volumen medio-máximo escurrido y la pendiente media de la cuenca.

El mejor ajuste con dos variables es el que incluye al volumen medio-máximo escurrido y la pendiente media de la cuenca, sin embargo, las estaciones Actopan, Ídolos y El Naranjillo aún presentan errores de ajuste muy grandes. Es importante señalar que en el caso de la ecuación de la Figura 4.40b se incluyen 4 variables; el área, la precipitación media-máxima, la pendiente media de la cuenca y la infiltración potencial máxima del suelo, lo que implica tener un modelo que depende de un mayor número de variables que no necesariamente describen mejor a la variable dependiente. Por otro lado, se tiene un número de observaciones relativamente pequeño, por lo cual, el mejor ajuste es aquel que utilice el menor número de variables. Tomando en cuenta lo anterior, se seleccionó a las ecuaciones de las Figura 4.39b y Figura 4.40a como las que mejor describen a la media de los gastos máximos anuales en la región 28 parcial.

En la Tabla 4.46 se muestra la media de los gastos máximos anuales estimada con las ecuaciones de la Figura 4.39b y Figura 4.40a.

Tabla 4.46. Región 28 Parcial. Media estimada de los gastos máximos anuales.

Estación	Código	Qmed (m ³ /s)	Qmed* (V) (m ³ /s)	Qmed* (V,PMC) (m ³ /s)
ACTOPAN	28030	226.5	415.1	418.6
CAPULINES	28069	821.5	757.2	696.9
IDOLOS	28111	334.2	246.6	227.9
EL NARANJILLO	28108	630.1	927.4	864.7
AMATITLA	28133	321.3	302.3	359.3
JALCOMULCO	28134	738.6	707.8	763.0
CARRIZAL	28125	865.9	778.2	826.5
CARDEL	28003	1242.7	1066.6	1084.1

En la tabla anterior se puede comparar la media medida contra la media estimada para cada estación, y para cada ecuación. En la Tabla 4.47 se muestran los errores en porcentaje para cada estimación.

Tabla 4.47. Región 28 Parcial. Errores estimados.

Estación	Código	Qmed (m ³ /s)	Qmed* (V) (m ³ /s)	Qmed* (V,PMC) (m ³ /s)
ACTOPAN	28030	226.5	83.2%	84.8%
CAPULINES	28069	821.5	-7.8%	-15.2%
IDOLOS	28111	334.2	-26.2%	-31.8%
EL NARANJILLO	28108	630.1	47.2%	37.2%
AMATITLA	28133	321.3	-5.9%	11.8%
JALCOMULCO	28134	738.6	-4.2%	3.3%
CARRIZAL	28125	865.9	-10.1%	-4.6%
CARDEL	28003	1242.7	-14.2%	-12.8%

La estación Actopan presenta una sobrestimación del 83.2 % utilizando el volumen medio-máximo y, del 84.8 % cuando se utiliza el volumen medio-máximo con la pendiente media de la cuenca, por otro lado, la estación Ídolos es subestimada en un 26.2 % al emplear la ecuación de la Figura 4.39b y un 31.8 % con la ecuación de la Figura 4.40a. Ver Tabla 4.47.

En esta región las estaciones que no se ajustan al modelo son: Actopan, ídolos y El Naranjillo. Las tres estaciones se encuentran instaladas en el río Actopan y en la parte norte de la región, colindando con la región hidrológica número 27.

Los coeficientes de determinación obtenidos sin considerar las estaciones Actopan, ídolos y El Naranjillo, son muy cercanos a 1, por ejemplo, considerando el área de la cuenca se obtiene un

$R^2 = 0.988$, mientras que con el volumen se obtiene un $R^2 = 0.979$. Esto ocurre debido a la alta correlación que existe entre el área de la cuenca y la media de los máximos anuales.

Para mejorar los ajustes presentados en las Figura 4.39 y Figura 4.40, se dividió la región 28 parcial en dos subregiones; la primera formada por las estaciones Capulines, Amatitla, Jalcomulco, Carrizal y Cardel; y la segunda por las estaciones Actopan, ídolos y El Naranjillo. Estas últimas se propuso formaran parte de la región 27 Sur, la cual colinda con la cuenca del río Actopan. Esta subregión la conforman los ríos Actopan, Copila, Misantla y Nautla. En la figura siguiente se muestra la conformación de las subregiones.

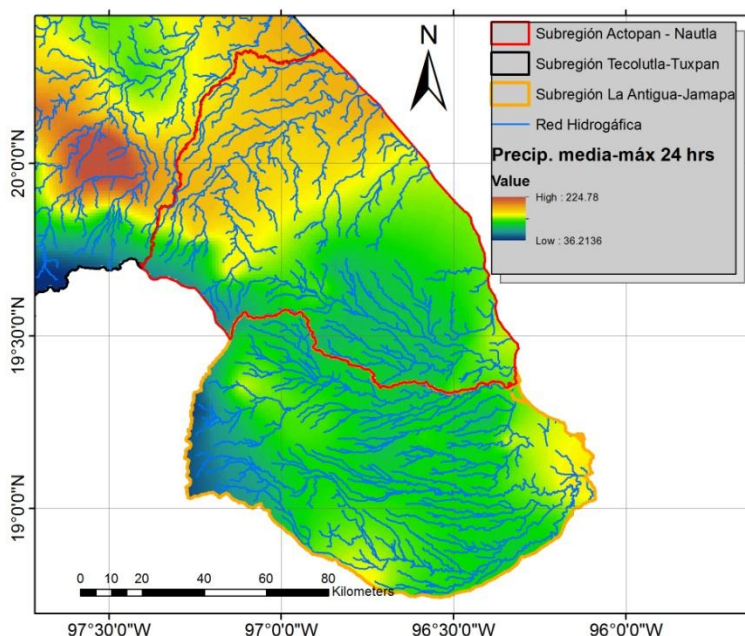


Figura 4.41. Región 28 Parcial. Subregiones Actopan - Nautla y La Antigua - Jamapa.

Algo que se puede observar de la figura anterior, es la diferencia que existe en la precipitación media máxima dentro de la subregión Actopan - Nautla, ya que las precipitaciones más altas pertenecen a la región 27. Sin embargo, esta diferencia no es tan grande. Ejemplo de ello se puede nombrar a la cuenca de la estación Martínez de la Torre, cuya precipitación media máxima es de 118 mm, mientras que para la cuenca de la estación El Naranjillo es de 97 mm. En cuanto a la subregión La Antigua - Jamapa, cuenta con una precipitación más uniforme y que no presenta problemas en la conformación de la subregión.

En la figura siguiente se muestran los mejores ajustes obtenidos para cada subregión.

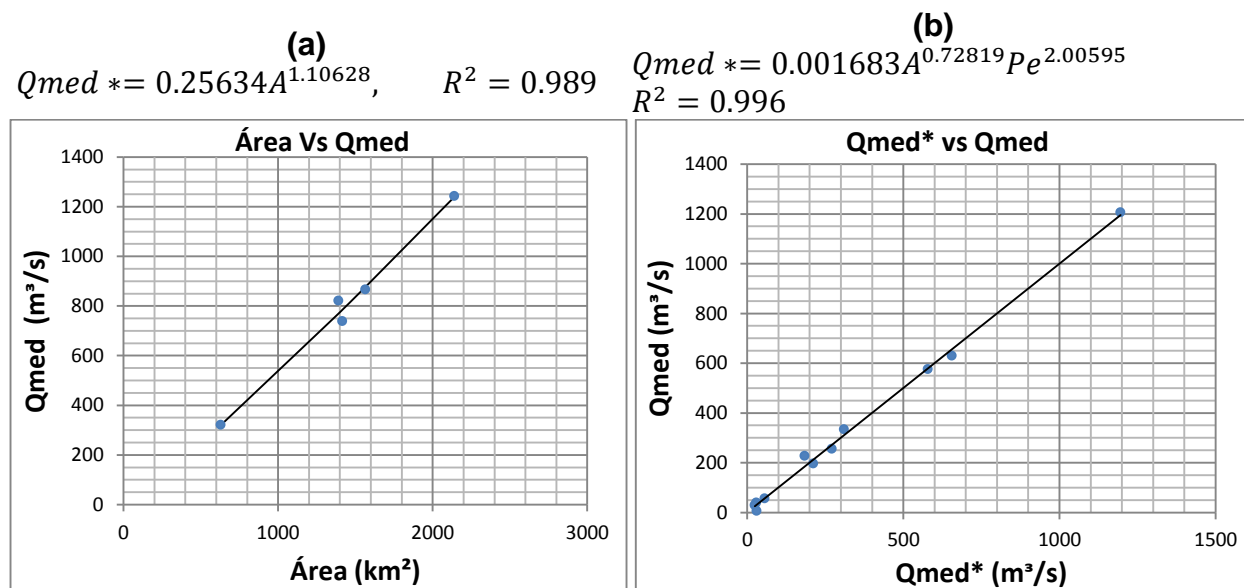


Figura 4.42. Región 28 Parcial. (a) Subregión La Antigua-Jamapa. (b) Subregión Actopan-Nautla.

Con estas subregiones se corrige en un 30% la estimación de la media en la estación Alseseca, en la región 27. En las estaciones Jalacingo y Chalame también disminuye el error de estimación respecto a la subregión 27 Sur. En cuanto a la región 28 parcial; las estaciones Actopan e ídolos disminuyen el error a 19 y 7 % con subestimaciones respectivamente. En la estación El Naranjillo se sobrestima la media en un 4%. Ver Tabla 4.48 y Tabla 4.49.

Tabla 4.48. Región 28 Parcial. Media estimada subregión Actopan-Nautla.

Estación	Código	Qmed (m³/s)	Qmed* (A,Pe) (m³/s)
MARTINEZ DE LA TORRE	27001	1205.6	1196.2
LIBERTAD	27005	575.3	579.2
VEGA DE ALATORRE	27007	255.1	271.3
ALSESECA	27008	39.9	29.3
PUENTE HENRIQUEZ	27020	196.6	211.9
JALACINGO	27031	28.6	24.1
ALTOTONGA	27036	6.1	30.7
CHALAME	27046	56.7	55.6
ACTOPAN	28030	226.5	183.7
IDOLOS	28111	334.2	309.9
EL NARANJILLO	28108	630.1	655.3

Tabla 4.49. Región 28 Parcial. Media estimada subregión La Antigua-Jamapa.

Estación	Código	Qmed (m³/s)	Qmed* (A) (m³/s)
CAPULINES	28069	821.5	769.5
AMATITLA	28133	321.3	320.1
JALCOMULCO	28134	738.6	784.7
CARRIZAL	28125	865.9	876.0
CARDEL	28003	1242.7	1238.9

Con esta propuesta se logró disminuir el error de estimación en la región 28 Parcial, además de mejorar la media estimada en las estaciones Alseseca, Jalacingo y Chalame en la región 27. La estación Altotonga, en la región 27, continúa con problemas en la estimación de la media.

- Resumen.

Teniendo en cuenta los ajustes obtenidos anteriormente, se hacen las siguientes recomendaciones.

Cuando se requiera estimar la media de los gastos máximos anuales en la subregión Actopan - Nautla, se debe utilizar la ecuación de la Figura 4.42b, la cual se muestra enseguida.

$$Q_{med} * = 0.001683A^{0.72819}Pe^{2.00595}; R^2 = 0.996 \quad (4.4)$$

La ecuación 4.3 es válida bajo las siguientes condiciones:

- Puede utilizarse para estimar la media en cuencas menores a los 1,900 km².
- La ecuación no puede utilizarse en el río Misantla, ya que no se emplearon registros de este río.
- La cuenca de la estación Altotonga presenta el mayor error de sobrestimación, se debe tener cautela al emplearla en esta cuenca.

Para estimar la media en la subregión La Antigua - Jamapa se debe emplear la siguiente ecuación:

$$Q_{med} * = 0.25634A^{1.10628}; R^2 = 0.989 \quad (4.5)$$

Debido a que el coeficiente de correlación entre la media y el área, en esta subregión, es muy aproximado a 1, la ecuación 4.4 puede ser empleada en toda la subregión para estimar la media. En seguida se dan algunas condiciones para su correcto empleo.

- No se recomienda utilizarla en el río Jamapa para cuencas mayores a los 1,000 km². Esto debido a los meandros que se originan en cuencas mayores, los cuales pueden ocasionar una regulación.

- En el río Cotaxtla es válida para cuencas menores a los 1,650 km².

4.7.3.- Ecuación regional RH 28 Papaloapan.

En la región 28 del Papaloapan se analizaron 23 estaciones distribuidas entre los ríos Salado, Santo Domingo, Río Grande, Valle Nacional, Usila, Playa Vicente, Amapa, Blanco y San Juan.

Se obtuvieron los coeficientes de correlación de cada característica con respecto a la media de los gastos máximos anuales. Ver Tabla 4.50.

Tabla 4.50. Región 28 Papaloapan. Coeficientes de correlación respecto a la media de los gastos máximos anuales.

Característica	A	PMT	x	y	z	PMC	Lc	Sc	Tc	VT	PM	CN	S	Pe	V	Ve
Coefficiente de correlación R	0.66	0.62	0.10	-0.25	0.15	0.39	0.63	-0.20	0.50	0.07	0.22	0.09	-0.12	0.17	0.82	0.86

En el primer ajuste de la ecuación regional se utilizaron las características de mayor correlación con la media de los gastos máximos anuales. En la Figura 4.43 se muestran las ecuaciones con el mejor ajuste considerando una variable.

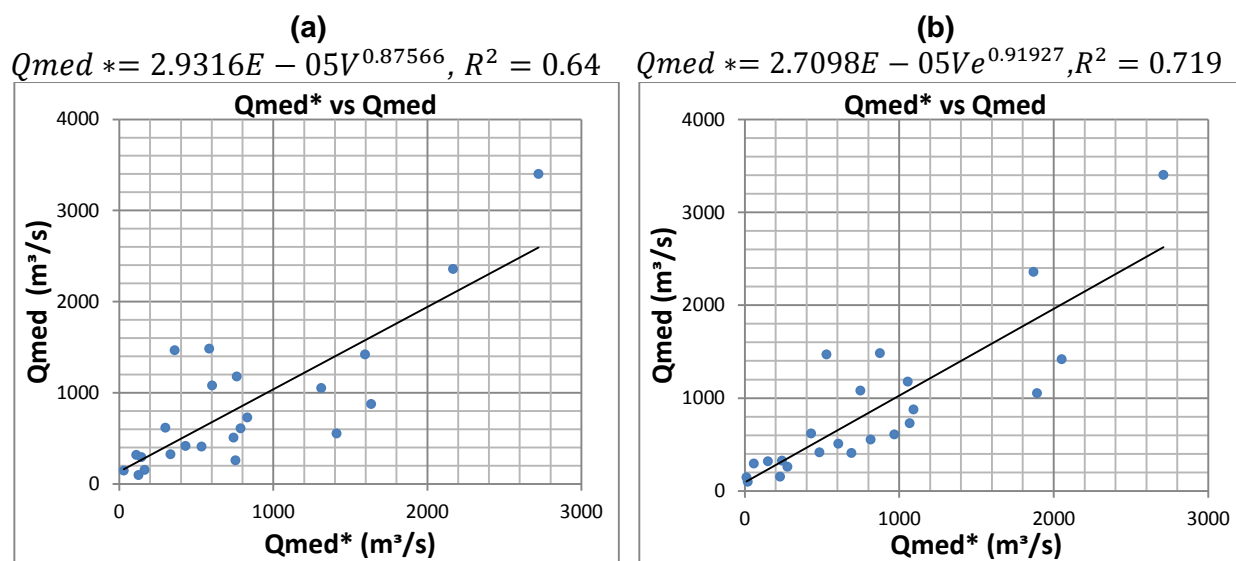


Figura 4.43. Región 28 Papaloapan. (a) Ecuación regional en función del volumen medio-máximo. (b) Ecuación regional en función del volumen medio-máximo escurrido.

Con la ecuación de la Figura 4.43a las estaciones Quiotepec, Achotal, Lauchapan, Santo Domingo, La Junta, La Angostura y Axusco presentan un error de sobrestimación muy grande y, las estaciones Tuxtepec, Monte Rosa, Las Prietas, Jacatepec, La Estrella, Xiquila, Zapote, Tepelmeme y María Lombardo tienen errores de subestimación del al menos un 20 %.

En cuanto a la ecuación mostrada en la Figura 4.43b, las estaciones San Juan Evangelista, Azueta, Bellaco, Achotal, Lauchapan, La Junta y Amapa son sobrestimadas, mientras que

Cuichapa, Las Prietas, Jacatepec, La Estrella, Xiquila, Zapote, Tepelmeme, Axusco y María Lombardo presentan los mayores errores de subestimación.

Se tomaron las ecuaciones anteriores, pero utilizando el área, la precipitación efectiva media-máxima y la precipitación media-máxima con exponentes independientes. En la Figura 4.44a y Figura 4.44b se muestran los ajustes obtenidos.

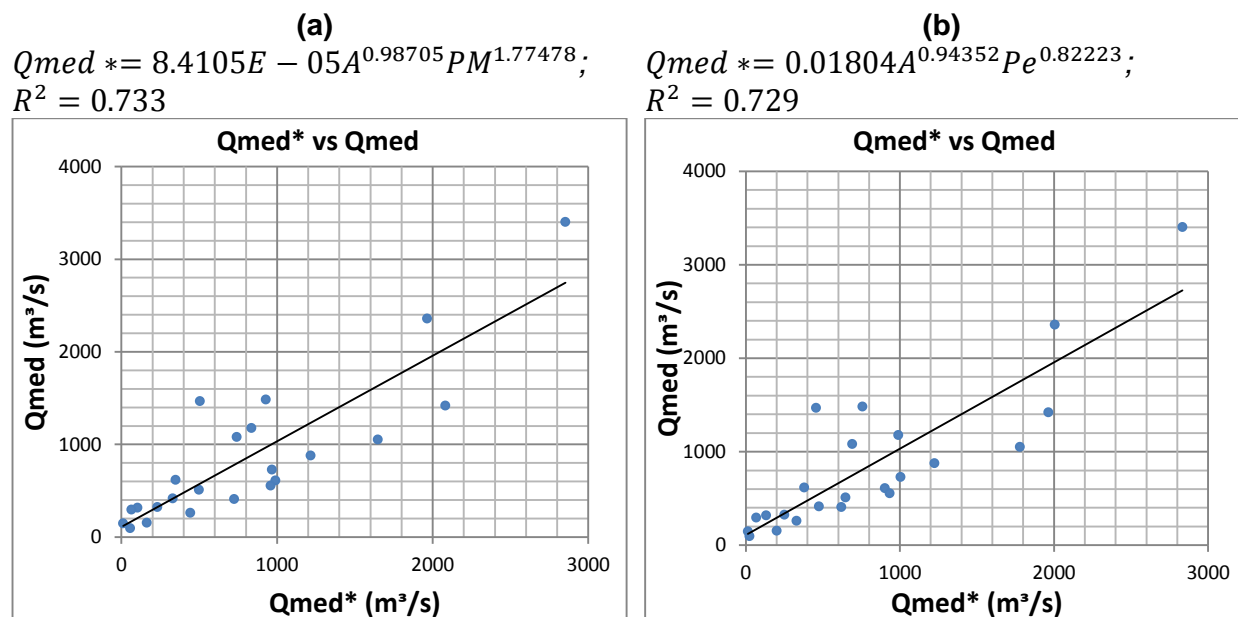


Figura 4.44. Región 28 Papaloapan. (a) Ecuación regional en función del área y la precipitación media-máxima en 24 horas. (b) Ecuación regional en función del área y la precipitación efectiva media-máxima en 24 horas.

En la ecuación de la Figura 4.44a se mejora el coeficiente de determinación al considerar el área y la precipitación media-máxima de forma independiente, sin embargo, se sigue teniendo subestimación en las estaciones Tuxtepec, Monte Rosa, Las Prietas, Jacatepec, La Estrella, Xiquila, Zapote, Tepelmeme y María Lombardo. En cuanto a las estaciones Achotal, Lauchapan, Santo Domingo, La Junta y La Angostura, no se corrige el problema de sobrestimación, además de presentar sobrestimación en las estaciones San Juan Evangelista, Azueta, Achotal y Bellaco. De este modo, se observa que se tiene mayor número de estaciones subestimadas y sobrestimadas al considerar la ecuación de la Figura 4.44a. Los valores estimados se pueden observar en la Tabla 4.51 y, en la Tabla 4.52, el porcentaje de sobrestimación y subestimación para cada estación.

En cuanto a la ecuación de la Figura 4.44b se sigue sobrestimando las estaciones San Juan Evangelista, Azueta, Bellaco, Achotal, Lauchapa, La Junta y Amapa con respecto a la ecuación de la Figura 4.43b, mientras que las estaciones Tuxtepec, Canton, Las Prietas, Jacatepec, La Estrella, Xiquila, Zapote, Tepelmeme, Axusco y María Lombardo cuentan con la mayor subestimación. Ver Tabla 4.51.

En el apartado 4.4.1 se hace mención de la diferencia que existe entre la parte alta de la cuenca del Río Papaloapan y la parte baja. La primera con una precipitación de menores magnitudes a la segunda. En este apartado se hace referencia de ello, ya que se observa que las estaciones con problemas de sobrestimación, en su mayoría, pertenecen a la región con las precipitaciones más bajas y, las subestimadas, a cuencas con las mayores precipitaciones. Con la finalidad de observar si estos efectos desaparecen, se obtuvo un tercer ajuste agregando una variable a la ecuación de la Figura 4.43b. En la Figura 4.45 se muestran el mejor ajuste utilizando dos variables.

$$Q_{med}^* = 4.4176E - 06V e^{0.82967 PMC^{1.02383}}; R^2 = 0.875$$

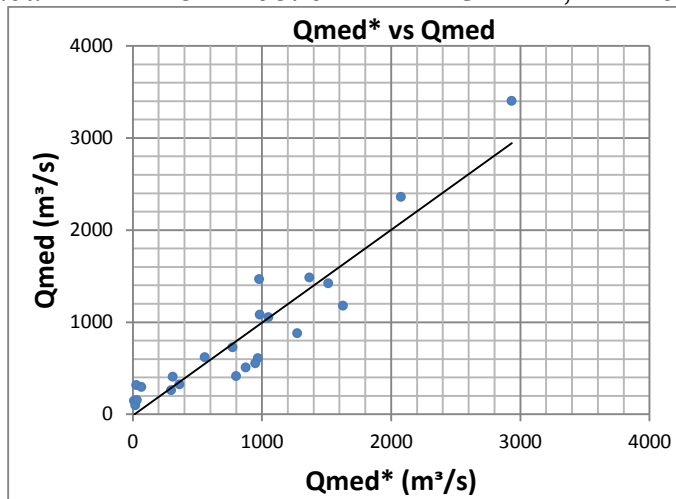


Figura 4.45. Región 28 Papaloapan. (a) Ecuación regional en función del volumen medio-máximo escurrido y la pendiente media de la cuenca.

Con la ecuación de la Figura 4.45 se logró mejorar la predicción de la media en un 15.5 % respecto a la ecuación de la Figura 4.43b. En cuanto a las estaciones que no se ajustan a este modelo se encuentran; Las Prietas, La Estrella, Xiquila, Tepelmeme, Axusco y Amapa con medias subestimadas. Las estaciones con sobrestimación son: Monte Rosa, Quiotepec, Achotal, Santo Domingo, La Junta y Matamba.

Al considerar el volumen medio-máximo escurrido de la Figura 4.45 como dos variables, es decir, tomando a la precipitación efectiva media-máxima y el área de forma independiente, se obtiene un coeficiente de determinación de 0.912, se logra mejorar la predicción en un 3.7%, sin embargo, el número de estaciones subestimadas y sobrestimadas no se reduce. Por otro lado, al ajustar una ecuación regional con el área, la precipitación media-máxima y la pendiente media de la cuenca se logra reducir el número de estaciones subestimadas respecto a considerar la ecuación de la Figura 4.45 y a considerar el área y la precipitación efectiva media-máxima con exponentes independientes. En la Figura 4.46 se muestra la ecuación regional considerando el área, la precipitación media-máxima y la pendiente media de la cuenca.

$$Q_{med}^* = 4.4301E - 05A^{0.92292}PM^{1.80407}PMC^{0.97415}; R^2 = 0.904$$

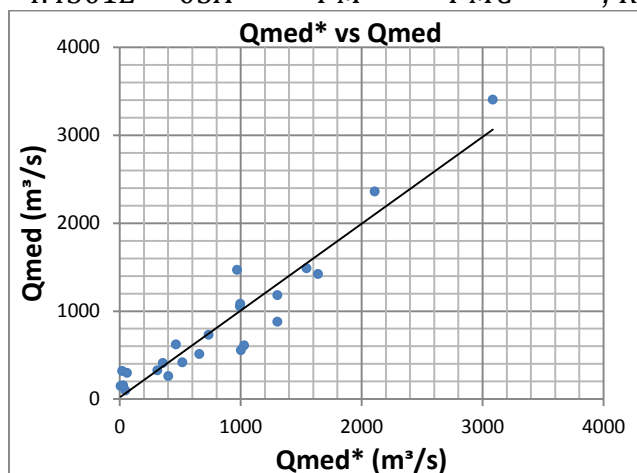


Figura 4.46. Región 28 Papaloapan. (a) Ecuación regional en función del área, precipitación media-máxima en 24 horas y pendiente media de la cuenca.

Las estaciones Quiotepec, Achotal, Santo Domingo, La Junta y La Angostura son las estaciones que presentan una sobrestimación mayor al 25 % de la media medida, mientras que las estaciones Las Prietas, La Estrella, Xiquila, La Angostura, Tepelmeme, Axusco y Amapa son subestimadas con al menos un 30 % por debajo de la media. A modo de observar mejor estos comportamientos, en la Tabla 4.51 se muestra la media estimada para cada estación y cada ecuación, mientras que la Tabla 4.52 se muestra el error en porcentaje.

Tabla 4.51. Región 28 Papaloapan. Media estimada de los gastos máximos anuales.

Estación	Código	Qmed (m³/s)	Qmed* (V) (m³/s)	Qmed* (Ve) (m³/s)	Qmed* (A,PM) (m³/s)	Qmed* (A,Pe) (m³/s)	Qmed* (Ve,PMC) (m³/s)	Qmed* (A,PM,PMC) (m³/s)
SAN JUAN EVANGELISTA	28001	1420.6	1594.9	2052.58	2081.8	1962.9	1515.7	1639.8
TUXTEPEC	28002	3402.2	2721.4	2710.52	2853.8	2832.9	2932.8	3083.8
AZUETA	28013	1053.1	1310.8	1891.49	1648.3	1779.0	1050.7	995.5
CANTON	28016	2358.6	2166.7	1870.40	1964.7	2005.3	2076.9	2108.5
MONTE ROSA	28017	1178.8	763.3	1055.11	835.5	989.9	1628.4	1304.1
BELLACO	28018	728.5	830.5	1067.29	966.7	1004.0	773.2	735.3
QUIOTEPEC	28019	510.0	741.7	606.48	499.3	647.2	875.5	657.5
ACHOTAL	28020	610.6	787.4	967.75	989.8	901.3	969.3	1029.7
CUICHAPA	28023	325.4	331.7	242.10	230.5	249.4	363.3	311.8
LAUCHAPAN	28025	409.1	533.9	689.96	724.7	618.9	310.3	356.2
LAS PRIETAS	28026	318.8	110.7	150.27	104.1	130.7	27.7	20.9
JACATEPEC	28056	1484.9	584.8	874.36	928.3	757.6	1368.9	1544.5
LA ESTRELLA	28062	1469.0	359.2	529.26	505.6	456.0	980.4	969.8
SANTO DOMINGO	28064	879.0	1636.0	1092.93	1217.2	1223.0	1274.5	1303.7
LA JUNTA	28066	555.4	1411.1	815.66	959.3	932.5	950.3	1001.6
XIQUILA	28072	295.0	144.0	59.79	65.6	66.8	68.3	61.6

Estación	Código	Qmed (m³/s)	Qmed* (V) (m³/s)	Qmed* (Ve) (m³/s)	Qmed* (A,PM) (m³/s)	Qmed* (A,Pe) (m³/s)	Qmed* (Ve,PMC) (m³/s)	Qmed* (A,PM,PMC) (m³/s)
LA ANGOSTURA	28074	260.7	753.8	277.19	442.4	329.0	297.2	401.1
ZAPOTE	28075	618.8	298.7	430.46	349.0	378.9	559.2	465.9
TEPELMEME	28077	148.4	28.7	11.98	10.6	12.7	9.8	7.0
MATAMBA	28084	416.1	430.4	483.52	330.2	475.2	802.4	518.0
AXUSCO	28102	97.6	124.3	19.04	57.5	23.4	20.5	46.5
AMAPA	28103	154.3	164.3	228.51	164.3	200.4	34.5	27.6
MARIA LOMBARDO	28158	1082.4	601.8	749.61	741.5	689.5	985.1	996.5

Tabla 4.52. Región 28 Papaloapan. Errores estimados.

Estación	Código	Qmed	Qmed* (V)	Qmed* (Ve)	Qmed* (A,PM)	Qmed* (A,Pe)	Qmed* (Ve,PMC)	Qmed* (A,PM,PMC)
SAN JUAN EVANGELISTA	28001	1420.6	12.3%	44.5%	46.5%	38.2%	6.7%	15.4%
TUXTEPEC	28002	3402.2	-20.0%	-20.3%	-16.1%	-16.7%	-13.8%	-9.4%
AZUETA	28013	1053.1	24.5%	79.6%	56.5%	68.9%	-0.2%	-5.5%
CANTON	28016	2358.6	-8.1%	-20.7%	-16.7%	-15.0%	-11.9%	-10.6%
MONTE ROSA	28017	1178.8	-35.2%	-10.5%	-29.1%	-16.0%	38.1%	10.6%
BELLACO	28018	728.5	14.0%	46.5%	32.7%	37.8%	6.1%	0.9%
QUIOTEPEC	28019	510.0	45.4%	18.9%	-2.1%	26.9%	71.7%	28.9%
ACHOTAL	28020	610.6	29.0%	58.5%	62.1%	47.6%	58.7%	68.6%
CUICHAPA	28023	325.4	1.9%	-25.6%	-29.2%	-23.4%	11.6%	-4.2%
LAUCHAPAN	28025	409.1	30.5%	68.6%	77.1%	51.3%	-24.2%	-12.9%
LAS PRIETAS	28026	318.8	-65.3%	-52.9%	-67.3%	-59.0%	-91.3%	-93.4%
JACATEPEC	28056	1484.9	-60.6%	-41.1%	-37.5%	-49.0%	-7.8%	4.0%
LA ESTRELLA	28062	1469.0	-75.5%	-64.0%	-65.6%	-69.0%	-33.3%	-34.0%
SANTO DOMINGO	28064	879.0	86.1%	24.3%	38.5%	39.1%	45.0%	48.3%
LA JUNTA	28066	555.4	154.1%	46.9%	72.7%	67.9%	71.1%	80.3%
XIQUILA	28072	295.0	-51.2%	-79.7%	-77.7%	-77.4%	-76.9%	-79.1%
LA ANGOSTURA	28074	260.7	189.1%	6.3%	69.7%	26.2%	14.0%	53.8%
ZAPOTE	28075	618.8	-51.7%	-30.4%	-43.6%	-38.8%	-9.6%	-24.7%
TEPELMEME	28077	148.4	-80.6%	-91.9%	-92.9%	-91.4%	-93.4%	-95.3%
MATAMBA	28084	416.1	3.5%	16.2%	-20.6%	14.2%	92.9%	24.5%
AXUSCO	28102	97.6	27.4%	-80.5%	-41.1%	-76.0%	-79.0%	-52.3%
AMAPA	28103	154.3	6.5%	48.1%	6.5%	29.9%	-77.6%	-82.1%
MARIA LOMBARDO	28158	1082.4	-44.4%	-30.7%	-31.5%	-36.3%	-9.0%	-7.9%

De la Tabla 4.52 se puede observar que, por ejemplo, cuando se utiliza la ecuación regional empleando el área de la cuenca, la precipitación media-máxima en 24 horas y la pendiente media de la cuenca (ecuación-Figura 4.46), la media de los gastos máximos anuales en la estación

Tuxtepec es subestimada en un 9.4 %, por otro lado, en la estación Bellaco se tiene una sobrestimación de 0.9%.

Tomando en cuenta que, con la ecuación de la Figura 4.46 se obtiene el mayor coeficiente de determinación, se tomó para hacer algunas observaciones.

Si bien la cuenca Tuxtepec, al igual que Cantón, cuenta con un error de estimación de la media bajo, al utilizar la ecuación de la Figura 4.46, las cuencas que se localizan dentro de ella, en su mayoría, presentan los mayores errores. Por ejemplo, las estaciones Quiotepec, La Estrella, Santo Domingo, La Junta, Xiquila, La Angostura, Tepelmeme, Matamba y Axusco, cuyos errores se encuentran por arriba del 20 %. Estos problemas de ajuste son debidos, en gran medida, a la gran diferencia que existe entre los fenómenos climatológicos de la parte alta y baja de la cuenca. En el apartado 4.4 se ha hecho alusión de este comportamiento. Por otro lado, las estaciones Las Prietas y Amapa, con errores mayores al 60 %, se encuentran en una zona con pendientes muy bajas (4.5%) que no varían entre cuenca, es por ello que relacionar su media con esta característica no es lo más adecuado.

Con la finalidad de mejorar el cálculo de la media se propuso dividir la región en dos o más subregiones. Se tomaron en cuenta las siguientes dos consideraciones:

- Una ecuación de regresión basada en las características fisiográficas o climatológicas de la cuenca puede ser usada dentro de una región homogénea para estimar la avenida índice. (Nathan et al., 1990; Dalrymple, 1960; Hosking y Wallis, 1993).
- Teniendo en cuenta que las estaciones subestimadas y sobrestimadas pertenecen a regiones con altas y bajas precipitaciones, respectivamente. Se propuso agrupar cuencas con precipitaciones medias-máximas en 24 horas similares, y que además se encontraran en cercanía geográfica.

En esta división se busca probar que la influencia de las cuencas con menor precipitación sobre las que tienen mayor precipitación, y viceversa, ocasionan que no se tengan los mejores ajustes en las estaciones antes mencionadas. Es por ello que la primera propuesta es ajustar una ecuación a cada grupo homogéneo encontrado. La segunda, consiste en ajustar dos ecuaciones; una en la parte Alta del Papaloapan y una segunda en la parte Baja. Ver Apartado 4.4.

Para la primera consideración se ajustaron regresiones potenciales a cada grupo encontrando, obteniendo como resultado que la media no se mejoró en ningún caso, salvo en la región homogénea 2. En la Figura 4.47 se muestra el mejor ajuste encontrado para el grupo 2 de la delimitación de los trazos multidimensionales.

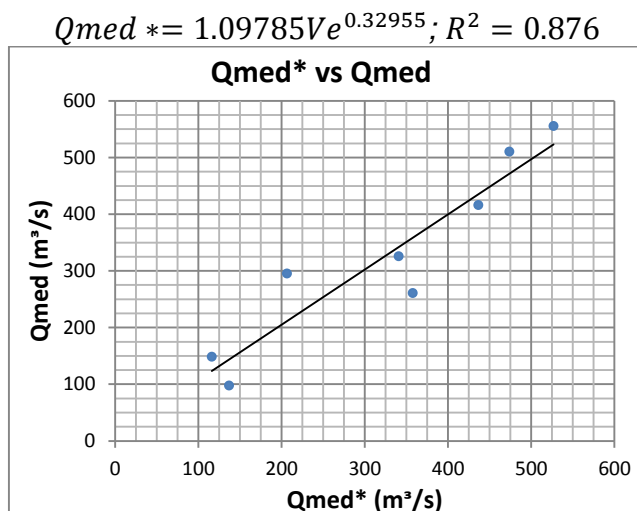


Figura 4.47. Región 28 Papaloapan. Ecuación regional grupo 2-Trazos Multidimensionales.

Las estaciones que cuentan con el mayor error de estimación son; Xiquila, La Angostura y Axusco, por otro lado, se tienen mejoras significativas en todas las estaciones respecto a la ecuación de la Figura 4.46, obtenida para la región completa. Ver Tabla 4.53

La ecuación de la figura anterior se consideró tomando al área y a la precipitación efectiva media-máxima en 24 horas con exponentes independientes. Se obtuvo un coeficiente de determinación de 0.88 que no aumenta, significativamente, respecto a considerar a la precipitación y el área con el mismo exponente. Por otro lado, el número de estaciones es pequeño, es por ello que se decidió utilizar solo una variable. En la tabla siguiente se muestran las medias estimadas con la ecuación de la Figura 4.47.

Tabla 4.53. Región 28 Papaloapan. Media estimada grupo 2 - Trazos multidimensionales.

Estación	Código	Qmed (m³/s)	Qmed* (Ve) (m³/s)
QUIOTEPEC	28019	510.0	473.6
CUICHAPA	28023	325.4	340.8
LA JUNTA	28066	555.4	526.7
XIQUILA	28072	295.0	206.4
LA ANGOSTURA	28074	260.7	357.7
TEPELMEME	28077	148.4	116.0
MATAMBA	28084	416.1	436.7
AXUSCO	28102	97.6	136.9

Debido a que los ajustes obtenidos para cada región homogénea no lograron mejorar la media, se obtuvieron ecuaciones regionales para la parte alta y baja del Papaloapan.

La subregión alto Papaloapan está formada por las estaciones: Quiotepec, Cuichapa, Santo Domingo, La Junta, Xiquila, La Angostura, Tepelmeme, Matamba y Axusco, mientras que la parte

baja por: Tuxtepec, Cantón, San Juan Evangelista, Azueta, Monte Rosa, Bellaco, Achotal, Lauchapan, Las Prietas, Jacatepec, La Estrella, Zapote, Amapa y Maria Lombardo. A diferencia del apartado de delimitación de regiones homogéneas, en esta división no se tomaron en cuenta a las estaciones Cantón y Tuxtepec dentro de la subregión del Alto Papaloapan. Para ellas se ha encontrado un mejor ajuste al considerarlas como parte de la subregión Bajo Papaloapan.

Se realizaron ajustes para cada subregión y fueron seleccionados los de menor error de ajuste. En la Figura 4.48 se muestra el mejor ajuste para la subregión alto Papaloapan.

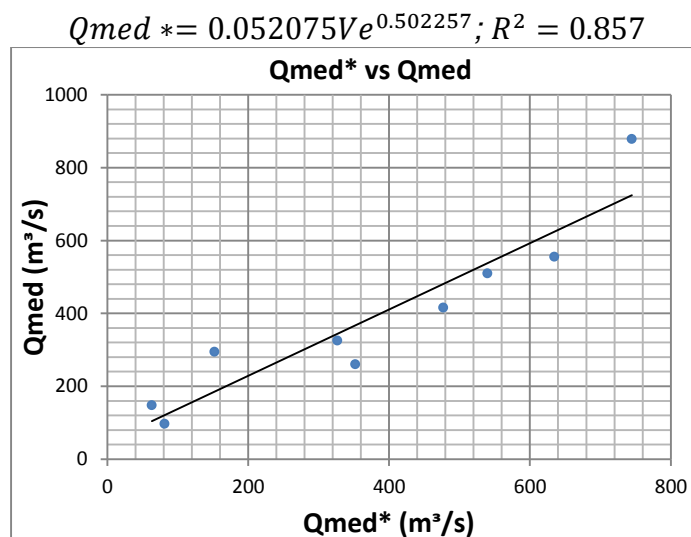


Figura 4.48. Región 28 Papaloapan. Ecuación regional Alto Papaloapan.

Con la ecuación anterior se mejoró la media en las estaciones Quiotepec, Cuichapa y Axusco con respecto a la ecuación de la Figura 4.47, pero aumentaron los errores en Xiquila, Tepelmeme, La Junta y Matamba. La Angostura continuó con el mismo error. En la siguiente tabla se muestran los valores calculados con la ecuación de la Figura 4.48.

Tabla 4.54. Región 28 Papaloapan. Media estimada Alto Papaloapan.

Estación	Código	Qmed (m³/s)	Qmed* (Ve) (m³/s)
QUIOTEPEC	28019	510.0	539.9
CUICHAPA	28023	325.4	326.9
SANTO DOMINGO	28064	879.0	744.9
LA JUNTA	28066	555.4	634.8
XIQUILA	28072	295.0	152.3
LA ANGOSTURA	28074	260.7	352.0
TEPELMEME	28077	148.4	63.3
MATAMBA	28084	416.1	477.1
AXUSCO	28102	97.6	81.5

Para la subregión del Bajo Papaloapan se obtuvieron dos ecuaciones, la primera considerando a las estaciones Tuxtepec y Cantón, y la segunda sin tomarlas en cuenta. En la siguiente figura se muestran los mejores ajustes obtenidos en cada caso.

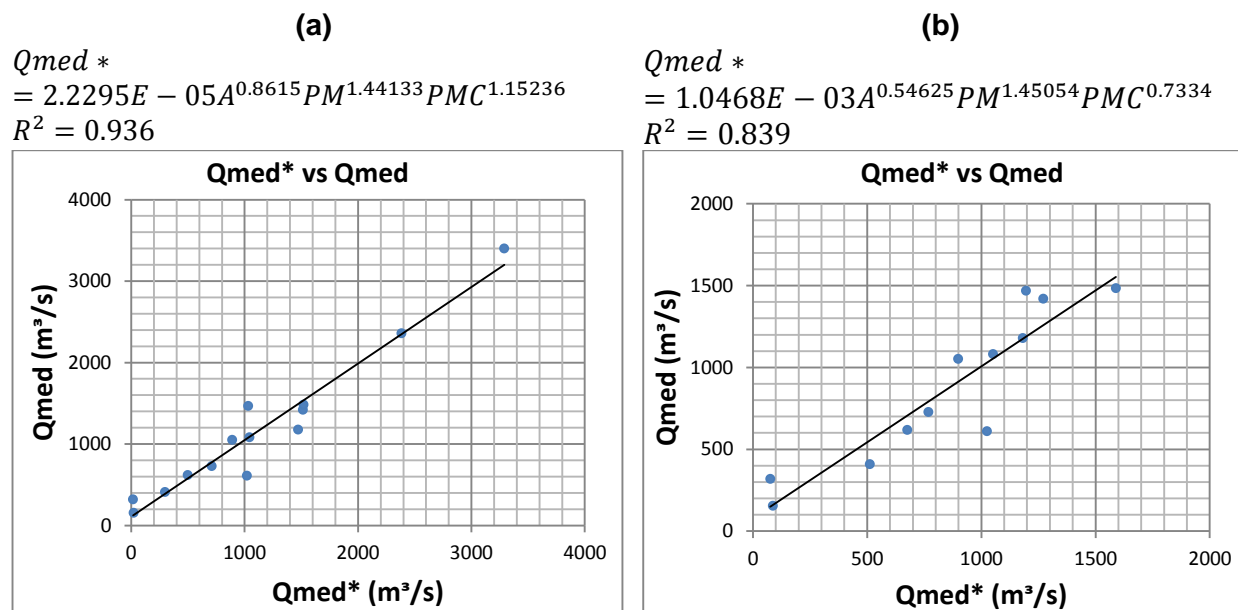


Figura 4.49. Región 28 Papaloapan. (a) Ecuación regional Bajo Papaloapan con Tuxtepec y Cantón, (b) Ecuación regional Bajo Papaloapan sin Tuxtepec y Cantón.

Con las ecuaciones de la Figura 4.49 se obtuvo una mejora en la estimación de la media con respecto a considerar la región completa. Las estaciones Las Prietas y Amapa cuentan con el mayor error en la media estimada. Estas estaciones se localizan en el río Amapa; Las Prietas aguas arriba de Amapa. Algo que se observa respecto a los gastos medidos, es que Las Prietas presenta mayores gastos a los de Amapa, lo cual implica que el área no puede ser utilizada para estimar la media en estas estaciones. En la Tabla 4.55 se muestran las medias estimadas para cada caso.

La ecuación de la Figura 4.49a no tiene aplicación en el río Santo Domingo, esto debido a que solo se puede emplear para estimar la media en el tramo comprendido entre la estación Cantón y Tuxtepec. Si se desea conocer la media aguas arriba de Cantón, se debe utilizar la ecuación de la Figura 4.48. Por otro lado, la ecuación regional de la Figura 4.49a ha servido para actualizar la media en Cantón y Tuxtepec, en otras palabras, se ha transferido información de cuencas cercanas a las estaciones antes mencionadas.

Tabla 4.55. Región 28 Papaloapan. Media estimada Bajo Papaloapan.

Estación	Código	Qmed (m³/s)	(a) Qmed* (A,PM,PMC) (m³/s)	(b) Qmed* (A,PM,PMC) (m³/s)
SAN JUAN EVANGELISTA	28001	1420.6	1515.9	1270.2
TUXTEPEC	28002	3402.2	3290.5	-
AZUETA	28013	1053.1	890.9	898.6
CANTON	28016	2358.6	2385.9	-
MONTE ROSA	28017	1178.8	1472.8	1181.3
BELLACO	28018	728.5	709.9	768.3
ACHOTAL	28020	610.6	1020.8	1024.9
LAUCHAPAN	28025	409.1	299.0	511.6
LAS PRIETAS	28026	318.8	17.5	75.2
JACATEPEC	28056	1484.9	1520.7	1589.3
LA ESTRELLA	28062	1469.0	1031.5	1194.5
ZAPOTE	28075	618.8	500.4	675.3
AMAPA	28103	154.3	21.7	86.9
MARIA LOMBARDO	28158	1082.4	1045.1	1051.2

- Resumen

A continuación se muestran algunas observaciones y las ecuaciones que deben utilizarse para estimar la media de los gastos máximos.

Cuando se requiera estimar la media de los gastos máximos anuales en sitios que se encuentren dentro de la cuenca formada por la estación Santo Domingo, se debe emplear la ecuación de la Figura 4.48, la cual se muestra a continuación.

$$Qmed * = 0.052075Ve^{0.502257}; R^2 = 0.857 \quad (4.6)$$

La ecuación anterior solo puede utilizarse bajo las siguientes condiciones:

- Se debe utilizar solo en cuencas mayores a los 700 km², pero menores a los 12,000 km².
- Debido a que la estación Xiquila y Tepelmeme, instaladas dentro de la cuenca del río Xiquila, presentan errores muy grandes, no es recomendable emplearla en dicha cuenca.
- Puede ser empleada en la cuenca de la estación La Angostura, teniendo en cuenta que se está estimando una media conservadora.

Para estimar la media en la región Bajo Papaloapan se debe utilizar la ecuación de la Figura 4.49b. Enseguida se muestra la ecuación.

$$Qmed * = 1.0468E - 03A^{0.54625}PM^{1.45054}PMC^{0.7334}; R^2 = 0.839 \quad (4.7)$$

La ecuación 4.6 solo puede utilizarse siguiendo las siguientes recomendaciones:

- Esta ecuación no puede utilizarse en la cuenca del río Amapa, debido a que las estaciones Las Prietas y Amapa cuentan con un error por arriba del 30 %.
- En el río Playa Vicente no puede emplearse para cuencas mayores a 4,700 km² y, en el río San Juan, a 5,750 km².

4.7.4.- Ecuación regional RH 29 Río Coatzacoalcos.

En la región hidrológica 29 Coatzacoalcos se analizaron cinco estaciones, 3 de ellas instaladas sobre el río Coatzacoalcos. Se buscó la característica que mayor correlación tuviera con la media de los máximos instantáneos para obtener la ecuación regional.

En la Tabla 4.56 se muestran los coeficientes de correlación respecto a la media de los gastos máximos anuales.

Tabla 4.56. Región 29 Coatzacoalcos. Coeficientes de correlación respecto a la media de los gastos máximos anuales.

Característica	A	PMT	x	y	z	PMC	Lc	Sc	Tc	VT	PM	CN	S	Pe	V	Ve
Coefficiente de correlación R	0.97	0.96	-0.05	-0.57	0.09	0.02	0.92	-0.67	0.82	-0.54	-0.64	-0.20	0.17	-0.54	0.98	0.97

En la Figura 4.50 se muestran los dos mejores ajustes, así como la ecuación regional para cada caso.

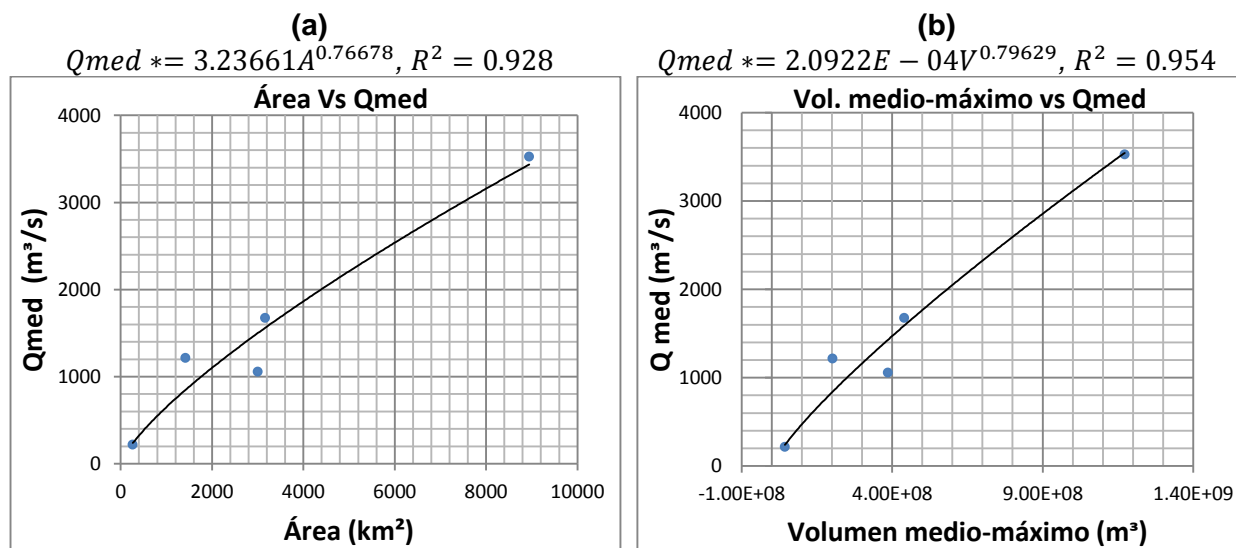


Figura 4.50. Región 29 Coatzacoalcos. (a) Ecuación regional en función del área. (b) Ecuación regional en función del volumen medio-máximo precipitado en 24 horas.

La media calculada para la estación Jesús Carranza II es sobrestimada en los dos casos; lo contrario sucede con la estación Paso Arnulfo.

En la tabla siguiente se muestran los estimados para las ecuaciones de las Figura 4.50a y Figura 4.50b.

Tabla 4.57. Región 29 Coatzacoalcos. Media estimada con la ecuación regional.

Estación	Código	Qmed (m ³ /s)	Qmed* (A) (m ³ /s)	Qmed* (V) (m ³ /s)
LAS PERLAS	29005	3523.93	3467.67	3485.22
JESUS CARRANZA II	29006	1055.19	1503.09	1437.24
PASO ARNULFO	29007	1212.56	846.71	859.95
TIERRA MORADA	29008	1673.91	1563.50	1598.43
MINZAPAN	29009	216.11	234.27	254.25

En la Tabla 4.58 se muestran los errores en porcentaje para cada estación y cada ecuación.

Tabla 4.58. Región 29 Coatzacoalcos. Errores estimados en porcentaje.

Estación	Código	Qmed (m ³ /s)	Qmed* (A) (m ³ /s)	Qmed* (V) (m ³ /s)
LAS PERLAS	29005	3523.93	-1.60%	-1.10%
JESUS CARRANZA II	29006	1055.19	42.45%	36.21%
PASO ARNULFO	29007	1212.56	-30.17%	-29.08%
TIERRA MORADA	29008	1673.91	-6.60%	-4.51%
MINZAPAN	29009	216.11	8.40%	17.65%

Los porcentajes negativos indican que la media es subestimada y, los porcentajes positivos que es sobrestimada, por ejemplo, la estación Jesús Carranza II se sobrestima en un 42.45% cuando se utiliza el área, y un 36.21% cuando se emplea el volumen medio-máximo precipitado en 24 horas.

Para estimar la media se debe utilizar la ecuación de la Figura 4.50a. Solo puede emplearse dentro de las cuencas de las estaciones Las Perlas, Tierra Morada y Minzapan.

5.- EJEMPLO DE APLICACIÓN.

Es este apartado se muestra un ejemplo del empleo de las ecuaciones regionales. Se estima la media de los gastos máximos anuales suponiendo que no se tiene información en el sitio. Posteriormente, se obtienen los gastos de diseño asociados a 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200 y 500 años periodo de retorno.

Para este ejemplo se seleccionó la estación Naranjillo, ubicada en la región 27 Norte de Veracruz. Esta estación no se consideró en el análisis regional, ya que cuenta con 17 años de registro y con dos interrupciones en los años 1968 y 1973. En la siguiente tabla se muestran algunas de sus características y parámetros, así como las coordenadas de su ubicación.

Tabla 5.1. Características y parámetros de la cuenca Naranjillo.

NARANJILLO - 27035													
A (km ²)	PMT (Km)	PM (mm)	PMC (%)	Pe (mm)	Latitud	Longitud	Lc (Km)	Sc (%)	S (cm)	Qmed (m ³ /s)	Qmin (m ³ /s)	Qmax (m ³ /s)	CV
11.53	22.87	126.95	25.04	36.95	19.862	-97.312	10.59	4.48	15.40	10.75	3.57	21.70	0.568

- Descripción de la cuenca Naranjillo.

La cuenca que drena esta estación se desarrolla en la parte intermedia de la región 27, en el estado de Puebla. Políticamente, se encuentra entre los municipios de Teziutlán y Xiutetelco, compartiendo el 31.5 y 68.5 % de su área, respectivamente. Ver Figura 5.1. De acuerdo con su pendiente media, se encuentra en terrenos fuertemente escarpados, los cuales drenan suelos con un alto contenido de andosoles y, que en su mayoría, son utilizados para la agricultura. El clima característico en esta región es el templado, con temperaturas medias anuales que van de 14 a 16 °C (CONABIO, 2008).

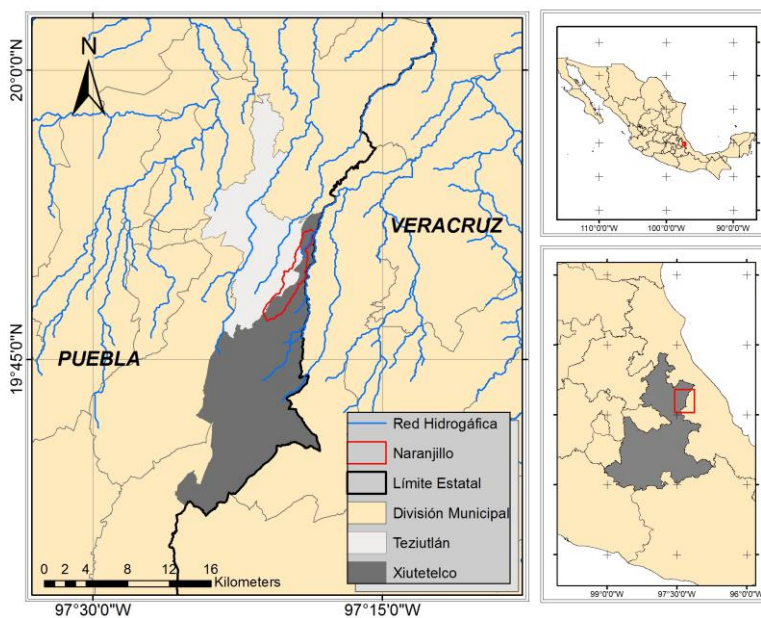


Figura 5.1. Localización de la cuenca Naranjillo.

- Estimación de los gastos de diseño.

Para aplicar las formulas propuestas en este estudio primero se debe establecer a que región hidrológica pertenece la cuenca de la estación Naranjillo.

Tomando en cuenta las subregiones propuestas en este estudio para la formación de las ecuaciones regionales, la cuenca Naranjillo se encuentra dentro de la subregión Actopan - Nautla (ver Figura 5.2), a la cual le corresponde la ecuación 4.4 para la estimación de la media de los gastos máximos anuales.

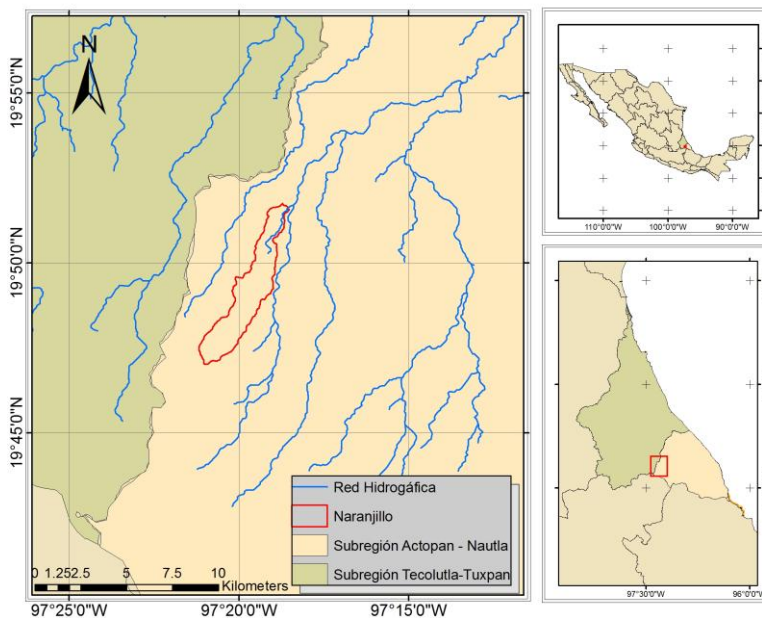


Figura 5.2. Localización hidrológica de la cuenca Naranjillo.

La ecuación regional se muestra enseguida:

$$Q_{med} * = 0.001683A^{0.72819}Pe^{2.00595}$$

Donde A es el área de la cuenca (km^2) y Pe la precipitación efectiva media - máxima en 24 hrs (mm).

Para la cuenca Naranjillo el área corresponde a $11.53 km^2$ con una precipitación efectiva de $36.95 mm$ (Tabla 5.1). De este modo, la media estimada para los gastos máximos anuales de la cuenca Naranjillo es de $13.93 m^3/s$, apenas $3.20 m^3/s$ por arriba de la media medida.

Para estimar los eventos de diseño se multiplica la media estimada con la curva adimensional del grupo homogéneo al que corresponde la cuenca Naranjillo, en este caso al grupo homogéneo 2 de la región hidrológica 27. En la siguiente figura se muestra la curva de gastos estimados con el análisis regional y los gastos máximos medidos en la estación Naranjillo.

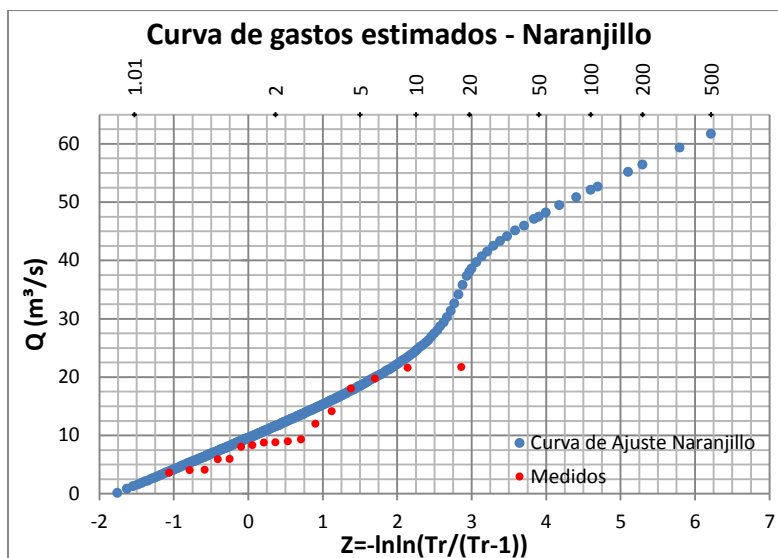


Figura 5.3. Curva de gastos estimados en la cuenca Naranjillo.

Al estimar los gastos de diseño con el análisis regional se obtiene un error de sobrestimación promedio del 25 % respecto a los medidos, el cual es atribuible a la estimación de la media y, en menor medida, al error estándar de ajuste de la curva regional. Por otro lado, de no contar con un análisis regional, estimaciones por arriba de los 20 años de periodo de retorno presentan mayor incertidumbre, debido a los pocos años con los que cuenta la estación Naranjillo. En la Tabla 5.2 se muestran los gastos de diseño para 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200 y 500 años periodo de retorno, obtenidos con el análisis regional bajo la suposición de no contar con mediciones en la estación Naranjillo.

Tabla 5.2. Gastos de diseño cuenca Naranjillo.

NARANJILLO	
Tr	Q (m³/s)
2	11.56
5	18.53
10	24.52
20	38.03
50	47.50
100	52.10
200	56.42
500	61.71

6.- CONCLUSIONES, COMENTARIOS Y RECOMENDACIONES.

El éxito en cualquier análisis regional viene dado por la confiabilidad de los datos que se analizan. En este estudio se ha demostrado que, el depurar y corregir valores atípicos, apoyados por la información disponible en los diferentes boletines, es de extrema importancia.

En la delimitación de regiones homogéneas, la verificación de homogeneidad regional con el coeficiente de variación, así como la prueba de significancia de Fisher, han demostrado ser buenos métodos para el procesamiento de gastos máximos.

Por otro lado, el método de los trazos multidimensionales junto con la simulación de regiones, han dado buenos resultados en el caso de la región hidrológica 28 Papaloapan.

Para realizar el análisis regional, se empleó como enfoque principal la estimación de la avenida índice, definida como la media de los gastos máximos anuales. Al formar muestras ampliadas con regiones estadísticamente homogéneas, se obtiene, para cada una, curvas de distribución adimensionales que permiten pasar de dicha media a gastos de diseño asociados a diferentes periodos de retorno.

En la tabla siguiente se muestran los factores de ajuste obtenidos (curvas adimensionales) para cada una de las regiones homogéneas definidas.

Tabla 6.1. Factores de ajuste de diseño en la zona de estudio.

Tr	Región hidrológica 27			Región hidrológica 28 Parcial			Región hidrológica 28 Papaloapan				Región hidrológica 29	
	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Actopan	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 1	Grupo 2
2	0.66	0.83	0.87	0.62	0.82	0.90	0.93	0.84	0.93	0.92	0.91	0.94
5	1.23	1.33	1.32	1.53	1.28	1.44	1.30	1.37	1.30	1.34	1.38	1.28
10	2.65	1.76	1.70	2.64	1.70	1.80	1.54	1.90	1.54	1.61	1.69	1.51
20	3.64	2.73	2.24	3.59	2.43	2.15	1.77	2.24	1.77	1.88	1.98	1.73
50	4.55	3.41	2.80	4.75	3.67	2.59	2.07	2.60	2.06	2.22	2.36	2.01
100	5.18	3.74	3.14	5.60	4.48	2.93	2.30	2.86	2.29	2.47	2.65	2.23
200	5.78	4.05	3.46	6.43	5.23	3.26	2.52	3.11	2.51	2.73	2.93	2.44
500	6.57	4.43	3.87	7.53	6.19	3.70	2.82	3.43	2.81	3.07	3.31	2.72
1000	7.16	4.72	4.18	8.36	6.91	4.03	3.04	3.67	3.03	3.32	3.59	2.93
5000	8.51	5.38	4.89	10.26	8.55	4.81	3.56	4.24	3.54	3.91	4.25	3.42
10000	9.13	5.66	5.21	11.13	9.25	5.14	3.79	4.48	3.77	4.16	4.54	3.63

Los factores de la tabla anterior son resultado de la distribución de mejor ajuste a cada región estadísticamente homogénea. Los mayores factores son obtenidos en las regiones 27 y 28 Parcial con una distribución Doble Gumbel, mientras que en las regiones 28 Papaloapan y 29 Coatzacoalcos, a excepción del grupo 2 de Papaloapan, son obtenidos con una distribución Gumbel.

Las relaciones encontradas pueden usarse también en sitios con muy pocos años de registro o en sitios sin aforos, pero en estos casos es necesario estimar la media de los gastos máximos

anuales (avenida índice), la cual es obtenida empleando una regresión potencial en función de las características de las cuencas, características que deben ser medibles y estar relacionadas con la producción de escurrimientos máximos.

En este estudio se utilizaron el área (km^2), la precipitación media-máxima en 24 horas (mm), pendiente media de la cuenca (%) y la infiltración potencial máxima (cm). La precipitación efectiva media-máxima en 24 horas (mm), volumen medio-máximo precipitado en 24 horas (m^3) y volumen medio-máximo escurrido en 24 horas (m^3) también fueron calculados en función de las primeras.

En el caso de la precipitación efectiva media-máxima se introdujo una variación en el método del United States Soil Conservation Service (USSCS), ya que en este estudio no se considera la humedad inicial del suelo, además de utilizar la media de las precipitaciones máximas anuales ocurridas en 24 horas, en lugar de la precipitación total para determinada tormenta. En cuanto a esta variación, se han obtenido buenos resultados al emplearla en conjunto con el área de la cuenca para estimar la media de los gastos máximos anuales.

Se introdujo la velocidad de tránsito, calculada como la longitud del cauce principal entre el tiempo de concentración; sin embargo, no fue un buen parámetro para incluirlo en la ecuación regional, debido a que presenta poca variación al calcularlo a partir de diferentes longitudes del cauce, en otras palabras, permanece casi constante en todo el trayecto.

A continuación se muestra como ejemplo la ecuación regional obtenida para la región 27 Norte de Veracruz.

$$Q_{med} = 2.6348E - 05A^{0.71796}PM^{2.94851}S^{-0.75364}; R^2 = 0.908 \quad (4.3)$$

Se observó que el exponente del área varía entre 0.6 y 1.0 cuando se acompaña con la precipitación media-máxima o la precipitación efectiva media-máxima, manteniéndose muy cerca del 0.75, y el exponente de la precipitación siempre fue mayor que 1.4, pero menor a 3, cuando se utilizó junto con el área.

Para encontrar mejores estimaciones de la media, en la región 28 Papaloapan, se propuso dividir a la región en 2 subregiones, tomando en cuenta cuencas con climatología similar, y conservando continuidad geográfica, con esta consideración se logró una mejoría en el cálculo de la media.

Existen diversos aspectos que podrían influir en la estimación de los gastos de diseño en sitios no aforados, así como en los aforados. A continuación se enlistan algunos.

- Cuando se realiza un análisis de frecuencias a las series locales, o se emplea un análisis regional, se espera encontrar la distribución de frecuencias que mejor reproduzca los eventos medidos; por lo que se busca que el error estándar de ajuste sea cercano a cero.

Por otro lado, cuando se tienen errores estándar de ajuste grandes, producidos por valores atípicos, surge la necesidad de elegir a la mejor distribución con cierta subjetividad, lo mismo sucede cuando se cuenta con errores iguales para dos o más distribuciones. Si bien en este estudio se ha elegido la mejor distribución considerando el mínimo error estándar

de ajuste, y seleccionando aquellas que estuvieran acorde a los valores observados, existe cierta incertidumbre al extrapolar eventos mayores al tamaño del registro regional.

- La elección de la mejor ecuación regional es tan importante como la selección de la distribución de frecuencias, ya que en esta se eligen aquellas características que son más significativas en la producción de los escurrimientos, considerando que sean características con peso causal y no casual. En otras palabras, se debe buscar que la variable independiente este dada primero que la dependiente; por ejemplo, la existencia del escurrimiento está condicionada a que primero ocurra la precipitación, lo cual no ocurre con variables como el centroide de la cuenca. En este estudio se seleccionaron las características considerando lo anterior, es decir, teniendo siempre en cuenta aquellas que están involucradas directamente con el escurrimiento; por ejemplo, la precipitación, infiltración, área de captación, pendiente media de la cuenca y del cauce. Sin embargo, aún con estas consideraciones, se contaron con errores de estimación que, sumados a los de la curva regional, pueden no dar muy buenos resultados en extrapolaciones a altos periodos de retorno. Es por ello que se considera poco confiable la estimación de eventos de diseño mayores a 500 años.

7.- BIBLIOGRAFÍA.

Álvarez, O.G., Salas, H.N., y Rivera, S.F. (2011). Identificación de regiones hidrológicas homogéneas mediante análisis multivariado. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 12(3), 277-284.

Andrews, D.F. (1972). Plots of High-Dimensional Data. *Biometrics*, 125-36.

Aparicio, F. (1989). Fundamentos de hidrología de superficie. Editorial Limusa; México.

BANDAS, (2015). Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales. Comisión Nacional del Agua. Subdirección general técnica, Gerencia de aguas superficiales e ingeniería de ríos (GASIR). México.

Benson, M.A. (1962). Plotting positions and economics of engineering planning. *J. Hydraulics Division* 88: 57-71.

Burn, D.H. (1990). Evaluation of regional flood frequency analysis with a region of influence approach. *Water Resources Research*, 26(10), 2257-2265.

Burn, D.H., y Goel, N.K. (2000). The formation of groups for regional flood frequency analysis. *Hydrological Sciences Journal*, 45(1), 97-112.

Campos, A.D.F. (2006). Análisis probabilístico univariado de datos hidrológicos. IMTA. México.

Campos, A.D.F. (2011). Transferencia de información hidrológica mediante regresión lineal múltiple, con selección óptima de regresores. *Agrociencia*, 45(8), 863-880.

Carrizosa, E.E. (1997). Regionalización de gastos máximos en la cuenca de la vertiente del pacífico centro de la República Mexicana. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.

Chow, V.T., Maidment, D.R. y Mays, L.W. (1994). Hidrología aplicada. McGraw-Hill, New York, USA.

CLICOM, (2013). Datos climáticos diarios. Comisión Nacional del Agua, Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional.

CONABIO, (2008). Regiones terrestres prioritarias de México. Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad. México.

CONABIO, (2012). Cuenca media y alta del río Coatzacoalcos. Universidad Veracruzana; Instituto de Ecología, A.C. Facultad de Ciencias e Instituto de Biología, UNAM.

- Cunnane, C. (1988). Methods and merits of regional flood frequency analysis. *Journal of Hydrology*, 100(1-4): 269-290.
- Dalrymple, T. (1960). Flood-frequency Analyses. US Geological Survey water-supply paper 1543-A.
- Dawdy, D. R. (1961). Variation of flood ratios with size of drainage area. US Geological Survey profesional paper.
- Domínguez, M.R. (1981). Análisis regional de tormentas y avenidas de diseño. Aplicación a la cuenca del Papaloapan. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- Domínguez, M.R., Arganis, J.M.L., y Carrizosa, E.E., (2008). Manual del Modelo para Pronóstico de Esguerrimiento. Instituto de ingeniería, UNAM.
- Domínguez, M. R., Bouvier, C., Neppel, L., y Niel, H. (2005). Approche régionale pour l'estimation des distributions ponctuelles des pluies journalières dans le Languedoc-Roussillon (France). *Hydrological sciences journal*, 50(1).
- Domínguez, M.R., Fuentes, O. y V. Franco., (1980). Manual de Diseño de Obras Civiles. Hidrotecnia. Capítulo A.1.6. Análisis Estadístico. Comisión Federal de Electricidad. México.
- Domínguez, M.R., González, V.F. y Arganis, J.L.M. (2013). Regionalización de datos de esguerrimiento de las regiones hidrológicas de México para la estimación de avenidas de diseño. Instituto de Ingeniería, UNAM, México.
- Escalante, C., y Reyes, L. (2008). Técnicas estadísticas en hidrología. Facultad de Ingeniería, UNAM. México.
- Gilroy, E.J. (1970). Reliability of a variance estimate obtained from a sample augmented by multivariate regression. *Water Resources Res.* 6: 1595–1600
- Greenwood, J.A., Landwehr, J.M., y Wallis, J.R. (1979). Probability weighted moments: Definition and relation to parameters of several distributions expressible in inverse form. *Water Resources Research.* 15(5), pp. 1049-1054.
- Gumbel (1945a), Floods estimated by probability method: *Bng. News-Rec.*, v. 134, no. 24, p. 833-837.
- Hosking, J.R.M. y Wallis, J.R. (1993). Some statistics useful in regional frequency analysis. *Water Resources Research*, 29(2), 271-281. Correction: *Water Resources Research*, 31 (1995), 251.
- Hosking, J.R.M. y Wallis, J.R. (1997). Regional Frequency Analysis: An Approach Based on L-moments. Cambridge University Press.
- INEGI, (2000). Estadísticas del medio ambiente. Dirección de Estadísticas.

Kite, G.W. (1988). Frequency and risk analysis in hydrology. Water Resources Publication, Colorado State, University Fort Collins.

Lasdon, L.S., Waren, A.D., Jain, A., y Ratner, M. (1978). Design and testing of a generalized reduced gradient code for nonlinear programming. *ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS)*, 4(1), 34-50.

Lim, Y.H., y Lye, L. M. (2003). Regional flood estimation for ungauged basins in Sarawak, Malaysia. *Hydrological sciences journal*, 48(1), 79-94.

Linsley, R.K., Kohler, M.A., y Paulhus, J.L. (1975). Hydrology for Engineers. McGraw-Hill; New York.

Nathan, R. y McMahon, T. (1990). Identification of homogeneous regions for the purposes of regionalization. *Journal Hydrology*. 121 (1-4), 217-238.

N.R.C.S. (2004). Part 630 National Engineering Handbook Hydrology. Chapter 9. *Natural Resources Conservation Service*.

Ouarda, T.B.M. J., Bâ, K.M., Diaz, D.C., Cârsteanu, A., Chokmani, K., Gingras, H. ... y Bobée, B. (2008). Intercomparison of regional flood frequency estimation methods at ungauged sites for a Mexican case study. *Journal of Hydrology*, 348(1), 40-58.

Pandey, G.R., y Nguyen, V.T.V. (1999). A comparative study of regression based methods in regional flood frequency analysis. *Journal of Hydrology*, 225(1), 92-101.

Paris, M.C. y Zucarelli, G.V. (2004). Regionalización de caudales. Propuesta metodológica para la identificación de regiones homogéneas. *Ingeniería hidráulica en México*, 19(4), 5-20.

Pereyra, D.D. y Pérez, S., (2005). Hidrología de superficie y precipitaciones Intensas 2005 en el Estado de Veracruz. Universidad Veracruzana, Xalapa, Veracruz.

Raynal, J.A. (1982). Parameter estimation efficiency in extreme value distribution type I and II. Report of a special study. Civil Engineering Department, Colorado State University, USA.

Robson, A. y Reed, D. (1999). Statistical procedures for flood frequency estimation. Flood estimation Handbook, Vol. 3. Institute of Hydrology. Wallingford, UK.

Salas, J.D., Raynal, J.A., Tarawneh, Z.S., Lee, T.S., Frevert, D., y Fulp, T. (2008). Extending short record of hydrologic data. Chapter 20. Hydrology and hydraulics, 717-760.

S.A.R.H. (1955-1975). Cuenca del río Papaloapan. Comisión del Papaloapan, Boletines Hidrométricos diversos.

S.A.R.H. (1979a). Boletín hidrológico No. 42; Región hidrológica No. 27. Subsecretaría de planeación, subdirección de hidrología. Tomos IV, V y VI.

S.A.R.H. (1979b). Boletín hidrológico No. 43; Región hidrológica No. 28 (Parcial). Subsecretaría de planeación, subdirección de hidrología.

S.A.R.H. (1985). Boletín climatológico No. 7; Regiones hidrológicas No. 27 (Tuxpan - Nautla) y No. 28 Parcial (Actopan - Jamapa). Subsecretaría de infraestructura hidráulica. Tomo I.

Smith, J.A. (1989). Regional flood frequency analysis using extreme order statistics of the annual peak record. *Water Resources Research*, 25, 311-7.

S.R.H. (1961a). Boletín hidrológico No. 14; Datos de los ríos Tula, San Juan del Río y Metztitlán (Alto Río Panuco). México, D.F.

S.R.H. (1961b). Boletín hidrológico No. 15; Datos de la región del bajo Panuco. Irrigación y control de ríos, México, D.F.

S.R.H. (1962a). Boletín hidrológico No. 17; Datos de la región Sureste. Irrigación y control de ríos, México, D.F.

S.R.H. (1962b). Boletín hidrológico No. 18; Datos de la región Sureste. Irrigación y control de ríos, México, D.F.

S.R.H. (1962c). Boletín hidrológico No. 19; Datos de la región del bajo Panuco. Irrigación y control de ríos y comisión de estudios de la cuenca del río Panuco, México, D.F.

S.R.H. (1963). Boletín hidrológico No. 20; Datos hidrométricos, climatológicos y de azolves de las regiones Golfo Centro y Valle Oriental, Libres y El Seco. Irrigación y control de Ríos.

S.R.H. (1969a). Boletín hidrológico No. 42; Región hidrológica No. 27. Subsecretaría de planeación, dirección de hidrología. Tomos I, II y III.

S.R.H. (1969b). Boletín hidrológico No. 43; Región hidrológica No. 28 (Parcial). Subsecretaría de planeación, dirección de hidrología.

S.R.H. (1973). Boletín hidrológico No. 37; Regiones hidrológicas No.23 (Costa Chiapas) y No. 29 (río Coatzacoalcos). Subsecretaría de planificación, dirección de hidrología. Tomo I y II.

Stedinger, J.R., Vogel, R.M., Foufoula, G.E., (1993). Frequency analysis of extreme events. In: Maidment, D.R. (Ed.) *Handbook of Hydrology*. McGraw-Hill, New York.

Thornthwaite, C. W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geographical review*, 38(1), 55-9

U. S. Soil Conservation Service, 1957. *National Engineering Handbook*. Sec. 4, Supplement A, Hydrology.

Walpole, R. E., Myers, R. H., Myers, S. L., y Ye, K. (2007). Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias. Pearson Educación.