



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

**“ACTUALIZACIÓN DE LOS FACTORES DE REDUCCIÓN POR ÁREA PARA DISTINTAS
REGIONES DE LA REPÚBLICA MEXICANA”**

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

PRESENTA:
SÁNCHEZ MARTÍNEZ SINUHÉ ALEJANDRO

TUTOR
RAMÓN DOMÍNGUEZ MORA-INSTITUTO DE INGENIERÍA

CIUDAD DE MÉXICO, NOVIEMBRE, 2017

JURADO ASIGNADO:

Presidente: **Dr. Fuentes Mariles Oscar Arturo**

Secretario: **M.I. Franco Víctor**

Vocal: **Dr. Domínguez Mora Ramón**

1 er. Suplente: **Dra. Arganis Juárez Maritza Liliana**

2 d o. Suplente: **Breña Naranjo José Agustín**

Ciudad Universitaria, CDMX, México

TUTOR DE TESIS:

Dr. Ramón Domínguez Mora

FIRMA

AGRADECIMIENTOS

A mi tutor de postgrado, Dr. Ramón Domínguez Mora y a mi tutora en el Instituto de Ingeniería, Dra. Maritza L. Arganis Juárez, agradezco su tiempo, sus conocimientos, su paciencia, pero sobre todo, su calidez humana.

A todos mis profesores y compañeros, quienes se convirtieron en grandes amigos en esta etapa de mi desarrollo profesional.

A la Facultad de Ingeniería y al Posgrado de Ingeniería, agradezco la formación académica que me han dado en mis estudios de licenciatura y de maestría.

Al Instituto de Ingeniería, por permitir mi formación y desarrollo dentro de sus instalaciones.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, mi eterno agradecimiento.

DEDICATORIA

A mis padres, María Elena y Alejandro.

A mis hermanos, Orlando, Irlis y Rodrigo.

A mi sobrino Braulio.

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS.....	6
ÍNDICE DE GRÁFICAS.....	7
ÍNDICE DE TABLAS.....	10
RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	2
INTRODUCCIÓN.....	3
CAPÍTULO 1 Estado del arte.....	5
Métodos para el cálculo de FRA.....	5
Métodos empíricos.....	6
Método del United States Weather Bureau (1958).....	6
Método del UK (NERK,1975).....	6
Método de Bell (1976).....	7
Método de Desbordes-Raous-Trévisiol (1984).....	7
Métodos teóricos.....	8
Método de Roche (1963).....	9
Método de Rodríguez y Mejía (1974).....	10
Método de Nguyen-Rousselle-McPherson (1980).....	11
Método de Asquith-Famiglietti (2000).....	12
Métodos teórico-prácticos.....	13
Método de Meyer-Zehr (1980).....	13
CAPÍTULO 2 METODOLOGÍA.....	14
Obtención de datos.....	14
Agrupación por círculos.....	14
Registro simultáneo.....	14
Registro no simultáneo.....	15
Obtención del Factor de reducción por Área.....	15
Ajuste de distribución de probabilidad.....	16
Periodo de retorno.....	17
Función de correlación.....	17

Procedimiento	17
CAPÍTULO 3 Aplicación al estado de Sonora.....	19
CAPÍTULO 4 Resultados.....	23
FRA por zonas	23
FRA extrapolado	33
Capítulo 5 Actualización de FRA para toda la República Mexicana	38
Cuenca del Valle de México	38
Cuenca del Pánuco	39
Región hidrológica 30 Grijalva-Usumacinta.	43
Región hidrológica 19 Costa Grande.....	48
Región hidrológica 25 San Fernando-Soto la Marina y Región hidrológica 26	
Río Pánuco	51
Durango y Tamaulipas	61
Sinaloa.....	69
Resumen de ecuaciones de ajuste	74
CONCLUSIONES.....	78
REFERENCIAS.....	78

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de las zonas norte, centro y sur.	19
Figura 2. Trazado de tres círculos en cada una de las zonas.	22
Figura 3 Gráficas de ajustes de distribución de probabilidad Doble Gumbel a los datos de precipitación, a) máximos simultáneos, b) máximos no simultáneos para el círculo 1 zona norte.....	24
Figura 4 Gráficas de ajustes de distribución de probabilidad Doble Gumbel a los datos de precipitación, a) máximos simultáneos, b) máximos no simultáneos para el círculo 2 zona norte.....	25
Figura 5 Gráficas de ajustes de distribución de probabilidad Doble Gumbel a los datos de precipitación, a) máximos simultáneos, b) máximos no simultáneos para el círculo 3 zona norte.....	26

Figura 6 Gráficas de ajustes de distribución de probabilidad Doble Gumbel a los datos de precipitación, a) máximos simultáneos, b) máximos no simultáneos para el círculo 1 zona centro.	27
Figura 7 Gráficas de ajustes de distribución de probabilidad Doble Gumbel a los datos de precipitación, a) máximos simultáneos, b) máximos no simultáneos para el círculo 2 zona centro	28
Figura 8 Gráficas de ajustes de distribución de probabilidad Doble Gumbel a los datos de precipitación, a) máximos simultáneos, b) máximos no simultáneos para el círculo 3 zona centro	29
Figura 9 Gráficas de ajustes de distribución de probabilidad Doble Gumbel a los datos de precipitación, a) máximos simultáneos, b) máximos no simultáneos para el círculo 1 zona sur	30
Figura 10 Gráficas de ajustes de distribución de probabilidad Doble Gumbel a los datos de precipitación, a) máximos simultáneos, b) máximos no simultáneos para el círculo 2 zona sur	31
Figura 11 Gráficas de ajustes de distribución de probabilidad Doble Gumbel a los datos de precipitación, a) máximos simultáneos, b) máximos no simultáneos para el círculo 2 zona sur	32

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1 Curvas de igual densidad de probabilidad	9
Gráfica 2 Altura de lluvia promedio entre dos puntos en función de la distancia entre ellos y de la probabilidad.	10
Gráfica 3 Reducción espacial de la lluvia puntual para la correlación exponencial, tomado de Guichard R. “Recopilación de métodos y obtención de factores empíricos”	11
Gráfica 4 Reducción espacial de la lluvia puntual para la correlación tipo Bessel, tomado de Guichard R. “Recopilación de métodos y obtención de factores empíricos”	11
Gráfica 5 FRA medios para distintas áreas en el estado de Sonora	33
Gráfica 6 FRA para diferentes áreas asociado a 2 años de periodo de retorno en el estado Sonora.	34
Gráfica 7 FRA para diferentes áreas asociado a 10 años de periodo de retorno en el estado Sonora.	35
Gráfica 8 FRA para diferentes áreas asociado a 50 años de periodo de retorno en el estado Sonora.	36

Gráfica 9 FRA asociados a 100 años de periodo de retorno para diferentes áreas en el estado de Sonora.	37
Gráfica 10. FRA para distintas áreas de la Cuenca del Valle de México.....	39
Gráfica 11. FRA medios para distintas áreas en la Cuenca del Río Pánuco.	40
Gráfica 12. FRA para diferentes áreas asociado a 2 años de periodo de retorno en la Cuenca del Río Pánuco.	40
Gráfica 13 FRA para diferentes áreas asociado a 5 años de periodo de retorno en la Cuenca del Río Pánuco.	41
Gráfica 14 FRA para diferentes áreas asociado a 10 años de periodo de retorno en la Cuenca del Río Pánuco.	41
Gráfica 15 FRA para diferentes áreas asociado a 20 años de periodo de retorno en la Cuenca del Río Pánuco.	42
Gráfica 16 FRA para diferentes áreas asociado a 50 años de periodo de retorno en la Cuenca del Río Pánuco.	42
Gráfica 17 FRA para diferentes áreas asociado a 100 años de periodo de retorno en la Cuenca del Río Pánuco.	43
Gráfica 18 FRA medios para distintas áreas en la Región Hidrológica 30 Grijalva-Usumacinta.....	45
Gráfica 19 FRA para diferentes áreas asociado a 2 años de periodo de retorno en la Región Hidrológica 30 Grijalva-Usumacinta.	45
Gráfica 20 FRA para diferentes áreas asociado a 5 años de periodo de retorno en la Región Hidrológica 30 Grijalva-Usumacinta.	46
Gráfica 21 FRA para diferentes áreas asociado a 10 años de periodo de retorno en la Región Hidrológica 30 Grijalva-Usumacinta.	46
Gráfica 22 FRA para diferentes áreas asociado a 50 años de periodo de retorno en la Región Hidrológica 30 Grijalva-Usumacinta.	47
Gráfica 23 FRA para diferentes áreas asociado a 100 años de periodo de retorno en la Región Hidrológica 30 Grijalva-Usumacinta.....	47
Gráfica 24 FRA medios para distintas áreas en la Región Hidrológica 19 Costa Grande.	49
Gráfica 25 FRA para diferentes áreas asociado a 10 años de periodo de retorno en la Región Hidrológica 19 Costa Grande.	50
Gráfica 26 FRA para diferentes áreas asociado a 50 años de periodo de retorno en la Región Hidrológica 19 Costa Grande.	50

Gráfica 27 FRA para diferentes áreas asociado a 100 años de periodo de retorno en la Región Hidrológica 19 Costa Grande.	51
Gráfica 28 FRA medios para distintas áreas en la Región Hidrológica 25 Soto-La Marina.	54
Gráfica 29 FRA para diferentes áreas asociado a 2 años de periodo de retorno en la Región Hidrológica 25 Soto-La Marina.	54
Gráfica 30 FRA para diferentes áreas asociado a 5 años de periodo de retorno en la Región Hidrológica 25 Soto-La Marina.	55
Gráfica 31 FRA para diferentes áreas asociado a 10 años de periodo de retorno en la Región Hidrológica 25 Soto-La Marina.	55
Gráfica 32 FRA para diferentes áreas asociado a 20 años de periodo de retorno en la Región Hidrológica 25 Soto-La Marina.	56
Gráfica 33 FRA para diferentes áreas asociado a 50 años de periodo de retorno en la Región Hidrológica 25 Soto-La Marina.	56
Gráfica 34 FRA para diferentes áreas asociado a 100 años de periodo de retorno en la Región Hidrológica 25 Soto-La Marina.....	57
Gráfica 35 FRA medios para distintas áreas en la Región Hidrológica 26 Río Pánuco.	59
Gráfica 36 FRA para diferentes áreas asociado a 10 años de periodo de retorno en la Región Hidrológica 26 Río Pánuco.	59
Gráfica 37 FRA para diferentes áreas asociado a 50 años de periodo de retorno en la Región Hidrológica 26 Río Pánuco.	60
Gráfica 38 FRA para diferentes áreas asociado a 100 años de periodo de retorno en la Región Hidrológica 26 Río Pánuco.....	60
Gráfica 39 FRA medios para distintas áreas en el estado de Durango.....	61
Gráfica 40 FRA para diferentes áreas asociado a 5 años de periodo de retorno en el estado de Durango.....	62
Gráfica 41 FRA para diferentes áreas asociado a 10 años de periodo de retorno en el estado de Durango.....	62
Gráfica 42 FRA para diferentes áreas asociado a 50 años de periodo de retorno en el estado de Durango.....	63
Gráfica 43 FRA para diferentes áreas asociado a 100 años de periodo de retorno en el estado de Durango.	63
Gráfica 44 FRA para diferentes áreas asociado a 1000 años de periodo de retorno en el estado de Durango.	64

Gráfica 45 FRA para diferentes áreas asociado a 10000 años de periodo de retorno en el estado de Durango.	64
Gráfica 46 FRA medios para distintas áreas en el estado de Tamaulipas.	65
Gráfica 47 FRA para diferentes áreas asociado a 5 años de periodo de retorno en el estado de Tamaulipas.	66
Gráfica 48 FRA para diferentes áreas asociado a 10 años de periodo de retorno en el estado de Tamaulipas.	66
Gráfica 49 FRA para diferentes áreas asociado a 50 años de periodo de retorno en el estado de Tamaulipas.	67
Gráfica 50 FRA para diferentes áreas asociado a 100 años de periodo de retorno en el estado de Tamaulipas.	67
Gráfica 51 FRA para diferentes áreas asociado a 1000 años de periodo de retorno en el estado de Tamaulipas.	68
Gráfica 52 FRA para diferentes áreas asociado a 10000 años de periodo de retorno en el estado de Tamaulipas.	68
Gráfica 53 FRA medios para distintas áreas en el estado de Sinaloa.	70
Gráfica 54 FRA para diferentes áreas asociado a 2 años de periodo de retorno en el estado de Sinaloa.	70
Gráfica 55 FRA para diferentes áreas asociado a 5 años de periodo de retorno en el estado de Sinaloa.	71
Gráfica 56 FRA para diferentes áreas asociado a 10 años de periodo de retorno en el estado de Sinaloa.	71
Gráfica 57 FRA para diferentes áreas asociado a 50 años de periodo de retorno en el estado de Sinaloa.	72
Gráfica 58 FRA para diferentes áreas asociado a 100 años de periodo de retorno en el estado de Sinaloa.	72
Gráfica 59 FRA para diferentes áreas asociado a 1000 años de periodo de retorno en el estado de Sinaloa.	73
Gráfica 60 FRA para diferentes áreas asociado a 1000 años de periodo de retorno en el estado de Sinaloa.	73

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Promedio de máximos diarios para un año de registro.	15
Tabla 2 Obtención de máximos no simultáneos para un año en común de registro	15

Tabla 3 Ejemplo de Máximos diarios simultáneos y no simultáneos y FRA para cada año de registro en común, este ejemplo se realiza para únicamente 5 años....	20
Tabla 4 Extrapolación círculo 1 zona norte.	23
Tabla 5 Extrapolación círculo 2 zona norte.	24
Tabla 6 Extrapolación círculo 3 zona norte.	25
Tabla 7 Extrapolación círculo 1 zona centro.	26
Tabla 8 Extrapolación círculo 2 zona centro.	27
Tabla 9 Extrapolación círculo 3 zona centro.	28
Tabla 10 Extrapolación círculo 1 zona sur.	29
Tabla 11 Extrapolación círculo 2 zona sur.	30
Tabla 12 Extrapolación círculo 3 zona sur.	31
Tabla 13 FRA medios el estado de Sonora.	32
Tabla 14 FRA asociados a 2 años de periodo de retorno para diferentes áreas en el estado de Sonora.	34
Tabla 15 FRA asociados a 10 años de periodo de retorno para diferentes áreas en el estado de Sonora.	34
Tabla 16 FRA asociados a 50 años de periodo de retorno para diferentes áreas en el estado de Sonora.	35
Tabla 17 FRA asociados a 100 años de periodo de retorno para diferentes áreas en el estado de Sonora.	36
Tabla 18 FRA para diferentes áreas obtenidos con las ecuaciones de correlación en el estado de Sonora	37
Tabla 19. FRA medios pala la Cuenca del Valle de México.	38
Tabla 20. FRA medios y FRA asociados a 2,5,10,20,50 y 100 años de periodo de retorno para diferentes áreas en la Cuenca del Río Pánuco.	39
Tabla 21 . FRA medios y FRA asociados a 2,5,10,50 y 100 años de periodo de retorno para diferentes áreas en la Región Hidrológica 30 Grijalva-Usumacinta...	45
Tabla 22 FRA medios y FRA asociados a 2,5,10,50 y 100 años de periodo de retorno para diferentes áreas en la Región Hidrológica 19 Costa Grande.....	49
Tabla 23 FRA medios para diferentes áreas en la Región Hidrológica 25 Soto-La Marina.	53
Tabla 24 FRA asociados a 2,5,10,20,50 y 100 años de periodo de retorno para diferentes áreas en la Región Hidrológica 25 Soto-La Marina.....	53

Tabla 25 FRA medios y FRA asociados a 10,50 y 100 años de periodo de retorno para diferentes áreas en la Región Hidrológica 26 Río Pánuco.....	58
Tabla 26 FRA medios y FRA asociados a 5,10,50,100,1000 y 10000 años de periodo de retorno para diferentes áreas en el estado de Durango.	61
Tabla 27 FRA medios y FRA asociados a 5,10,50,100,1000 y 10000 años de periodo de retorno para diferentes áreas en el estado de Tamaulipas.	65
Tabla 28 FRA medios y FRA asociados a 2,5,10,50,100,1000 y 10000 años de periodo de retorno para diferentes áreas en el estado de Sinaloa.	69
Tabla 29 Ecuaciones de ajuste para las distintas regiones analizadas para los FRA medios	74
Tabla 30 FRA medios en las distintas zonas de México y para diferentes áreas. ..	75
Tabla 31 Ecuaciones de ajuste para las distintas regiones analizadas para $Tr=10$ años	75
Tabla 32 Ecuaciones de ajuste para las distintas regiones analizadas para $Tr=50$ años	76
Tabla 33 Ecuaciones de ajuste para las distintas regiones analizadas, $Tr=100$ años.	76
Tabla 34 FRA para áreas deseadas en las distintas regiones analizadas, $Tr=10$ años.	76
Tabla 35 FRA para áreas deseadas en las distintas regiones analizadas, $Tr=10$ años.	77
Tabla 36 FRA para áreas deseadas en las distintas regiones analizadas, $Tr=100$ años.	77



RESUMEN

La falta de información meteorológica es un problema frecuente en México. Por esta razón es necesario optimizar los escasos datos históricos que se tienen medidos dentro de una Región Hidrológica, a fin de garantizar una base de datos confiable en los proyectos de Ingeniería. Esto requiere del uso de extrapolaciones de los fenómenos para caracterizarlos. Un método frecuentemente utilizado para determinar la lluvia de diseño en grandes áreas, es el cálculo de los Factores de Reducción por Área (FRA) de zonas definidas, que considera la relación entre las lluvias máximas anuales simultáneas y las máximas anuales para las mediciones puntuales de precipitación.

En este trabajo se realiza la determinación de los Factores de Reducción por Área para estado de Sonora en la República Mexicana. La elección este sitio es debido a que, en él, así como en Baja California Norte y Sur, se presentan eventos extremos de invierno, es decir, precipitaciones durante los meses de diciembre, enero y/o febrero, lo cual difiere de las demás regiones del país, en el cual, las mayores precipitaciones se presentan de junio a octubre. De esta manera, los factores obtenidos para Sonora son representativos de la región noroeste de México.

El método utilizado en este trabajo para la determinación del Factor de Reducción por Área es un método empírico que relaciona las precipitaciones máximas anuales con las precipitaciones máximas simultáneas ocurridas en estaciones que cuenten con cuando menos 15 años de registros en común. Finalmente, se realiza un ajuste a una distribución de probabilidad para determinar los factores para distintos periodos de retorno.

Adicionalmente, se realiza una revisión y comparativa de los FRA calculados por diferentes autores en distintas zonas de la República Mexicana, a fin de contar con el FRA para la zona sur, la zona norte, la zona de la meseta central, zona del Pacífico, zona del Atlántico, la zona noroeste y, por último, el objeto de este trabajo: la zona noreste.

Palabras clave: Factor de Reducción por Área, Eventos Extremos de Invierno, Estaciones Climatológicas, Distribuciones de Probabilidad, Periodo de Retorno.



ABSTRACT

The lack of meteorological information is a frequent issue in Mexico. Due to this, it is necessary to optimize the few measured historic data within a Hydrologic Region, in order to guarantee a reliable data base in engineering projects. This requires the using of extrapolations of the phenomenon to characterize them. One of the most used methods to get a design rainfall on large areas, is the calculation of the Reduction Factors by Area (RFA) of bounded zones, it considers the ratio among the annual maximum rainfalls simultaneous, and the annual maximum rainfalls for punctual measurements of precipitation.

This paper gets to the determination of the Areal Reduction Factors for Sonora state in the Mexican Republic. The main reason for choosing this site is because on it, as well as in Baja California Norte and Sur, extreme winter events take place on it, that is, rainfall occurring during the months of December, January and / or February, which differs from other regions of the country in which the highest rainfall occur from June to October. Thus, the factors obtained for Sonora are representative of the northwestern region of Mexico.

The method used in this paper for the determination of the Areal Reduction Factor is an empiric method that relates annual maximum rainfalls with the annual maximum rainfalls simultaneous occurred in climatological stations with no less than 15 years data commonly to each other. Finally, an adjustment to a probability distribution is performed to determine the factors for different return periods.

In addition, a review and comparison of the FRA calculated by different authors in different areas of the Mexican Republic is carried out, in order to have the FRA for the southern zone, the northern zone, the central plateau area, the Pacific zone, Zone of the Atlantic, the northwest zone and, finally, the object of this work: the northeast area.

Key Words: Reduction Factor by Area, Extreme Winter Events, Climatological Stations, Probability Distributions, Return Periods.



INTRODUCCIÓN

En un área determinada no se presentan, generalmente, las lluvias máximas en diferentes puntos al mismo tiempo, es decir, de forma simultánea. La simultaneidad se define como la correcta medición de un evento hidrológico máximo en un mismo tiempo y en diferentes lugares. (Torres, 2013) Esto se acentúa con áreas muy grandes.

Los modelos hidrológicos tradicionales consideran los máximos anuales puntuales, lo cual lleva a sobreestimar la precipitación.

El FRA es un coeficiente que sirve para convertir precipitaciones puntuales con una duración y un período de retorno, dando como resultado precipitaciones areales de la misma duración y período de retorno de una región específica.

Este factor define la magnitud de la altura de lluvia como una función del área donde ocurre, y se utiliza cuando se desea conocer la precipitación media del área de estudio (Mena, 2004). Esta precipitación se obtiene al aplicar el FRA de la siguiente manera:

$$P_a = FRA \times P_p \dots \dots \dots (1)$$

P_a precipitación areal en mm en la zona para la duración y el período de retorno en estudio.

FRA Factor de Reducción por Área en función de la duración de la lluvia, área de interés y periodo de retorno.

P_p Precipitación media en mm de los valores puntuales para el área, el período de retorno y la duración de interés.

El Instituto de Ingeniería de la UNAM ha realizado estudios de regionalización de lluvias máximas anuales para toda la república mexicana. Los resultados permiten estimar de manera muy confiable lluvias puntuales para cualquier cuenca de México. Asimismo, existen estudios elaborados por diversos autores en los que han estimado el FRA en diferentes zonas de la República Mexicana. Esto permite pasar de hietogramas puntuales a hietogramas promedio de cada cuenca para obtener los valores de precipitación asociados a cualquier periodo de retorno para duraciones de un día para cualquier sitio del territorio mexicano (Carrizosa, et al, 2016).

Los FRA han sido determinados para sitios que son representativos de sus regiones. Los estados de Sinaloa (Mena, 2004) y Guerrero (Canavese, 2015) para la zona del pacífico; Cuenca del Pánuco (González, 2012) y Cuenca del Valle de México (Franco,1998) para la zona de la meseta central; la Cuenca del Grijalva (Sánchez, 2015 y Guichard, et al, 1998) para la zona sureste; la



región hidrológica Soto la Marina (Acuña, 2015) y el estado de Tamaulipas (Severiano, 2014) para la zona del golfo; finalmente el estado de Durango (Severiano, 2014) para la zona de la comarca lagunera.

El primer objetivo de esta tesis es presentar los resultados del cálculo del FRA para el estado de Sonora como representativo de la zona noroeste, la cual se caracteriza por la presencia de eventos extremos de invierno, es decir, precipitaciones máximas durante los meses de diciembre, enero y febrero. El segundo objetivo es realizar una revisión y actualización de los FRA a través de los resultados obtenidos por los autores antes descritos en las regiones analizadas en sus respectivos trabajos.

CAPÍTULO 1 Estado del arte

Métodos para el cálculo de FRA

El caudal de diseño del cual depende el dimensionamiento de obras hidráulicas puede estimarse mediante métodos hidrometeorológicos o a través del análisis estadístico de caudales máximos. En el primer caso debe calcularse la tormenta de diseño asociada a un periodo de retorno y convertirla en avenida a través de algún modelo de lluvia-escorrentamiento. En el segundo, deben ser analizados datos de caudales máximos registrados en una estación hidrométrica ubicada en la zona de estudio.

En la mayoría de las ocasiones no se cuenta con información suficiente de caudales en el sitio de estudio, y en el caso de contar con ellos, éstos no son los suficientemente extensos y confiables. Por esta razón, es común la utilización de modelos lluvia-escorrentamiento. Para la aplicación de estos modelos se utilizan máximos anuales puntuales lo cual tiende a sobre estimar la precipitación al no considerar el efecto de la no simultaneidad de las lluvias, es decir, el hecho de que las lluvias máximas no se presentan al mismo tiempo en todas las estaciones consideradas (Guichard et al., 2006). Los Factores de Reducción por área son utilizados para convertir una lluvia puntual en una lluvia aerea a fin de obtener los eventos de diseño necesarios para la construcción de estructuras hidráulicas.

El concepto del FRA surge en los Estados Unidos, en la década de los años 60 (US Weather Bureau, 1957; Hershfield, 1962). En los años 70, dichos factores empezaron a utilizarse en el Reino Unido (NERC, 1975; Bell, 1976). Hershfield en 1962 identificó dos tipos de FRA, los de centro de tormenta y los de área geográfica fija.

Los FRA de centro de tormenta fueron usados inicialmente para convertir valores puntuales en aereales de Precipitación Máxima Probable (PMP). Estos factores se obtienen para cada evento y el área representativa es el centro de tormenta el cual es el punto de máxima precipitación. En contraste, los FRA de área geográfica fija se obtienen usando valores de precipitaciones máximas.

Asimismo, diversos métodos han sido propuestos para la obtención de los FRA, éstos pueden considerarse como empíricos (U. S. Weather Bureau, 1957; Bell, 1976; Desbordes, Raous, & Trévisiol, 1984), teóricos (Roche, 1963; Rodríguez Iturbe & Mejía, 1974; Nguyen, Rousselle, & McPhearson, 1980; Bacchi & Ranzi, 1995; Sivapalan & Blóshl, 1998; y De Michelle, Kottegoda & Rosso, 2001) o teórico-empíricos (Myers & Zehr, 1980).

Métodos empíricos

En esta clase de métodos el FRA se obtiene de la relación entre la precipitación máxima areal y el valor de la media de las máximas puntuales. Generalmente, se utiliza el método de los polígonos de Thiessen para asignar el área correspondiente a cada estación. En esta clasificación se encuentran los métodos propuestos por el US Weather Bureau (1958), el de NERC (1975) y el de Bell (1976)

Método del United States Weather Bureau (1958)

Este método tiene su origen en un estudio de siete redes de estaciones densas en el este de los Estados Unidos, el cual relaciona las máximas tormentas registradas.

Inicialmente, para cada año se la calcula la máxima media y se identifica la lluvia máxima de cada estación. El FRA será entonces el resultado de dividir la media de la serie anual entre la media de todas las estaciones y de todos los años.

$$FRA_{USWB} = \frac{N \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^n w_i P'_{ij}}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^n w_i P_{ij}} \dots \dots \dots (2)$$

Donde

N Número de estaciones dentro de la cuenca

n Años de registro

P_{ij} Precipitación máxima anual ocurrida en la estación i en el año j .

P'_{ij} Precipitación puntual en la estación i el día que ocurrió la máxima precipitación media en la cuenca en el año j .

w_j Factor de Thiessen asociado a cada estación

Método del UK (NERK,1975)

En este método se obtienen las precipitaciones para cada año de toda la zona de estudio, a fin de identificar el día de ocurrencia el evento máximo. De estos valores, se seleccionan las precipitaciones puntuales para cada día (P_{ij}). Además, se obtienen las precipitaciones máximas para cada año (P'_{ij}). El cociente de los dos valores obtenidos en el FRA para cada año j y para cada estación i ($\frac{P'_{ij}}{P_{ij}}$). El FRA será el promedio para todos los años y para todas las estaciones.

$$FRA_{UK} = \frac{1}{nN} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^n \frac{P'_{ij}}{P_{ij}} \dots \dots \dots (3)$$

Donde

N Número de estaciones dentro de la cuenca

n Años de registro

P_{ij} Precipitación máxima anual ocurrida en la estación i en el año j .

P'_{ij} Precipitación puntual en la estación i el día que ocurrió la máxima precipitación media en la cuenca en el año j .

Método de Bell (1976)

La metodología desarrollada por Bell es la siguiente: Se obtiene la precipitación máxima areal para cada año P' utilizando polígonos de Thiessen; para cada estación i se elige el valor máximo de precipitación anual y se les calcula la media, P ; Se obtiene el FRA para cada año realizando el cociente de la precipitación máxima anual de la estación i del año j entre la precipitación media. El FRA será la media de los FRA de todos los años, el cual se obtiene a través de la siguiente ecuación

$$FRA_{Bell} = \frac{\sum_{i=1}^N (w_i P'_{ij})_m}{\sum_{i=1}^N (w_i P_{ij})_m} \dots \dots \dots (4)$$

Donde

N Número de estaciones dentro de la cuenca

P_{ij} Precipitación máxima anual ocurrida en la estación i en el año j

P'_{ij} Precipitación puntual en la estación i el día que ocurrió la máxima precipitación media en la cuenca en el año j .

w_j Proporción de la precipitación areal de rango m del promedio ponderado Thiessen de lluvia puntual del mismo rango

m Valor del rango

Método de Desbordes-Raous-Trévisiol (1984)

Esta metodología considera dos procedimientos para la obtención de FRA denominados α y αd .

La primera toma en cuenta la relación del valor de la intensidad media de la totalidad de la cuenca, $iA(dt)$, para una cierta área A y duración dt , con la intensidad máxima, $iM(dt)$ para la misma duración ubicada en el centro de tormenta mediante la ecuación

$$\alpha(A, dt, iM) = \frac{iA(dt)}{iM(dt)} \dots \dots \dots (5)$$

Donde

$iA(dt)$ Intensidad media de la cuenca

$iM(dt)$ Intensidad máxima en el centro de tormenta

dt Duración

La segunda forma de obtener el FRA es relacionando la intensidad local $i(d,dt)$ con la intensidad máxima $iM(dt)$, a una distancia d del centro de tormenta, a saber

$$\alpha(d, dt, iM) = \frac{i(d, dt)}{iM(dt)} \dots \dots \dots (6)$$

Donde

$i(d, dt)$ Intensidad local

$iM(dt)$ Intensidad máxima

Las ecuaciones 5 y 6 se relacionan mediante la expresión

$$\alpha(A, dt, iM) = \frac{1}{A} \int_A \alpha(d, dt, iM) dA \dots \dots \dots (7)$$

Métodos teóricos

Estos métodos tienen fundamentos teóricos y siguen, generalmente, una ley de probabilidad. Entre ellos destacan los métodos de Roche (1963), Rodríguez y Mejía (1974), Nyguyen-Rouselle-McPherson (1980) y Asquith Famiglietti (2000).

Método de Roche (1963)

Roche considera la lluvia como un proceso isótropo suponiendo que siguen una misma ley de probabilidad en diferentes puntos de la zona de estudio.

Suponiendo que se tiene una superficie S , en la cual se encuentra una serie de puntos $1, 2, \dots, n$, repartidos de forma homogénea y se encuentran asociados a una altura de precipitación h_1, h_2, \dots, h_n , donde estas alturas son variables aleatorias que siguen la función de probabilidad $\rho(h_1, h_2, \dots, h_n)$. La probabilidad de que el promedio de altura de precipitación sobre el área S sea mayor que el valor h , está dado por

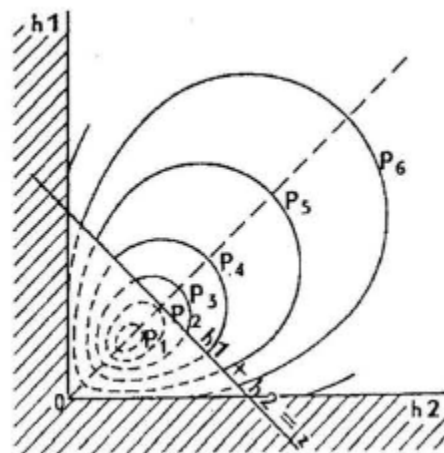
$$P = \int_1 \int_1 \dots \int_n \rho(h_1, h_2, \dots, h_n) dh_1, \dots, dh_n \dots \dots \dots (8)$$

Para toda la región, se calcula la integral con la siguiente condición

$$\frac{h_1 + h_2 + h_n}{n} \geq h$$

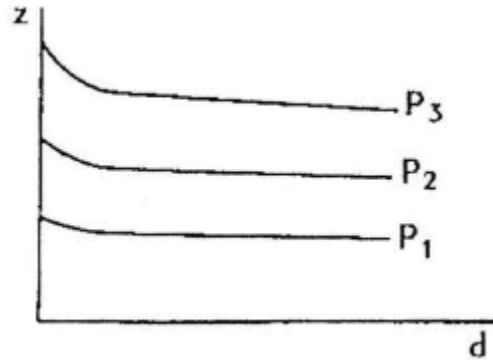
El valor exacto de esta probabilidad se obtiene cuando $n \rightarrow \infty$

Al inicio de su método, Roche (1963) consideró dos puntos 1 y 2 sobre la superficie S , separados una distancia $X_{1,2}$. Si $r(h_1, h_2)$ es la densidad de probabilidad para (h_1, h_2) y $z = (h_1 + h_2)/2$ es la lluvia media para los dos puntos considerados, es posible construir las curvas mostradas en la gráfica 1, las cuales, representan las líneas de igual densidad de r_1, r_2, \dots, r_n . Estas curvas son simétricas respecto a la bisectriz del plano (h_1, h_2) .



Gráfica 1 Curvas de igual densidad de probabilidad

Si se repite este procedimiento para más valores y variando la distancia entre los puntos, es posible construir una curva como la mostrada en la gráfica 2



Gráfica 2 Altura de lluvia promedio entre dos puntos en función de la distancia entre ellos y de la probabilidad.

Método de Rodríguez y Mejía (1974)

Estos autores proponen una extensión del método de Roche, con base en la correlación espacio-temporal de la lluvia y suponiendo que la lluvia es un proceso estacionario e isotrópico.

El proceso puntual de lluvia es distribuido con media cero y varianza σ_p^2 , mientras que el proceso total de lluvia tiene media cero y varianza $A^2 \sigma_p^2 \bar{r}(\bar{x}_1 - \bar{x}_2 | A)$. La lluvia se transforma en lluvia total, para un periodo de retorno, multiplicándola por la desviación estándar.

El factor de corrección K , que relaciona las alturas de lluvia para el área en estudio es

$$K = A^2 (\bar{r}(\bar{x}_1 - \bar{x}_2 | A))^{\frac{1}{2}} \dots \dots \dots (9)$$

Donde

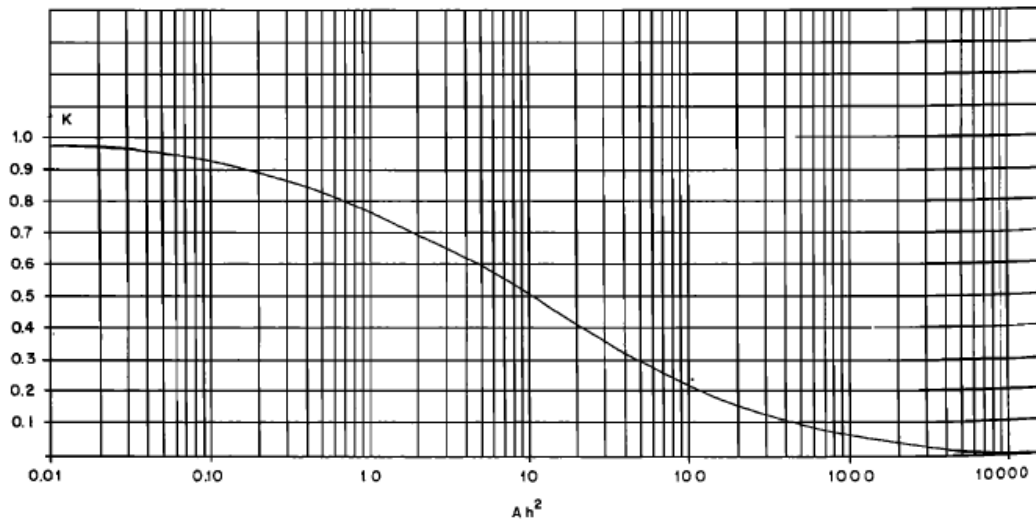
A es el área considerada

K Factor que relaciona alturas de lluvias para el área de estudio.

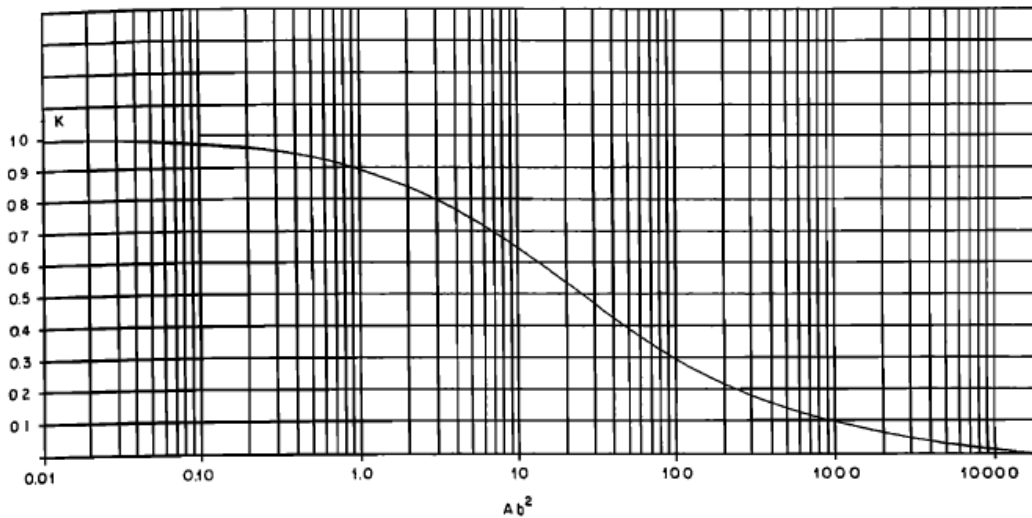
\bar{x}_1 y \bar{x}_2 son puntos en los que se considera la precipitación puntual.

Para toda área, los autores indican dos tipos de estructura espacial de correlación, una exponencial decreciente y la función tipo Bessel. Las gráficas 3 y 4 se muestra la variación del factor K , para las funciones exponencial decreciente y Bessel respectivamente. Asimismo,

encontraron que la forma geométrica del área de estudio tiene poca importancia en el factor **K**, exceptuando formas muy alargadas.



Gráfica 3 Reducción espacial de la lluvia puntual para la correlación exponencial.



Gráfica 4 Reducción espacial de la lluvia puntual para la correlación tipo Bessel.

Método de Nguyen-Rousselle-McPherson (1980)

Estos autores consideran la lluvia como un proceso estocástico, intermitente y positivo, consideran también, que la distribución de frecuencias de las lluvias horarias en un punto y en un área son de tipo exponencial.



Al considerar que las lluvias en toda la región son variables aleatorias, entonces pueden tomar cualquier valor, incluyendo el cero. Esto indica que hay una probabilidad finita para la que la altura de lluvia X sea cero, y para valores mayores que cero, se puede usar la función de probabilidad $\phi(x)$.

Entonces, la probabilidad de que la precipitación sea mayor a cero, puede ser expresada a través de la siguiente ecuación

$$F(x) = P\{X \leq x\} = F_0 + (1 - F_0)\phi(x) \dots \dots \dots (10)$$

Donde

$$F_0 = P\{X = 0\} \text{ y } \phi(x) = P\{X \leq x | X > 0\}$$

De esta manera, suponiendo que las lluvias siguen una distribución exponencial, la función de probabilidad de excedencia es

$$F_1 = (1 - F_0)e^{-\lambda x} \dots \dots \dots (11)$$

Para $x \geq 0$

Asimismo, para las precipitaciones areales se considera el área obtenida a partir de los polígonos de Thiessen considerando las lluvias aleatorias, independientes y exponencialmente distribuidas quedando la ecuación de excedencia en función de las medias areales

$$G_1(x) = 1 - G(x) = (1 - G_0)[1 - F_n(x)] \dots \dots \dots (12)$$

Donde

G_0 representa la probabilidad de obtener lluvias areales iguales a 0

G_1 representa la probabilidad de excedencias de dichas medias areales

Método de Asquith-Famiglietti (2000)

Estos autores proponen un método llamado *máximo anual centrado*, que considera específicamente la distribución de precipitaciones simultáneas alrededor a la precipitación máxima anual. El método supone un proceso espacial isótropo y que el volumen potencial de la tormenta de diseño ocurre cuando el centro de tormenta coincide con el centroide de la cuenca (Guichard 2006).

Se recomienda esta metodología para regiones que cuenten con datos de estaciones climatológicas por lo que no se requiere de inferencia estadística.

Para obtener el FRA, primeramente, se determinan con los valores máximos de la base de datos las relaciones entre el máximo y el simultáneo que corresponda a las estaciones circundantes y se considera en cada relación de datos la distancia entre las estaciones correspondientes; se escogen las relaciones que cumplan con un periodo de retorno para encontrar una relación preliminar entre los cocientes seleccionados y las distancias correspondientes; se define una función o un conjunto de funciones entre los cocientes y las distancias seleccionadas anteriormente. Cuando la distancia es cero, las curvas deben ser igual a la unidad; se calculan los FRA para el área de interés y el criterio de diseño integrando espacialmente la función estimada (Asquith et al. 2000).

Métodos teórico-prácticos

Método de Meyer-Zehr (1980)

Esta propuesta consiste en obtener los estadísticos de cada estación por separado de dos estaciones y después cinco estaciones. A través de estos estadísticos se obtienen los FRA.

Inicialmente, para los pares de estaciones, se obtienen todos los parámetros estadísticos de todas las series de datos anuales, se representan los primeros y segundos momentos en un plano distancia-momento, ajustándolos a una ecuación de tipo exponencial; Se obtienen ecuaciones de ajuste para cinco estadísticos distintos: primero y segundo momento para los máximos anuales, del promedio de dos estaciones, primero y segundo momento de la lluvia ocurrida en la segunda estación de manera simultánea al máximo de la primera y finalmente, la covarianza entre los máximos de la estación cuando se presentó lluvia simultánea; Se realizan distintas combinaciones de estos estadísticos a fin de estimar los límites inferior y superior del primer y segundo momento de las precipitaciones máximas de toda la región; En el último paso, se obtienen las relaciones precipitación-área a través del procedimiento del primer y segundo momento de la zona, utilizando la ecuación de frecuencia generalizada de Chow.

Son varios factores los que afectan la relación de la precipitación media en un área y en un punto, entre otros las características de la propia lluvia y las características de la cuenca. Diferentes climas producen diferentes lluvias.



CAPÍTULO 2 METODOLOGÍA

En este trabajo se propuso obtener factores de reducción por área (FRA) considerando un método empírico de análisis de frecuencias, el cual consiste en relacionar las lluvias máximas anuales en cada estación, sin tomar en cuenta el día en que se presenta cada máximo, con las lluvias simultáneas ocurridas el día en el que el promedio es máximo. Estas áreas están determinadas por círculos que encierren al menos tres estaciones con 15 años de registro en común

Obtención de datos

Los datos de lluvia fueron obtenidos a través de la base de datos CLICOM (CLImate COMputing Project), en la que es posible realizar una depuración de ellos la cual consiste en hacer una revisión de los meses de registro para cada año con los que cuenta cada estación.

Debido a que, en la región noroeste de México, pueden presentarse lluvias en dos épocas del año, la primera de ellas en la época típica de lluvias del país, es decir, de mayo a octubre y la segunda en los meses de noviembre a febrero ocasionados por eventos extremos de invierno, para la depuración de datos en CLICOM se revisó que cada estación climatológica contara con registros de lluvia para estos meses para la totalidad de años de registro de la estación. En caso de que la estación no cuente con registro de lluvia para esos meses en un año cualquiera, ese año en particular se desecha. De no hacerlo se corre el riesgo de obtener máximos de precipitación anuales menores a la lluvia real lo cual afectaría los resultados en la obtención de FRA.

Agrupación por áreas circulares o elípticas

Este método consiste en agrupar estaciones climatológicas mediante círculos o elipses que contengan como mínimo tres estaciones dentro de su área. Estas estaciones deben tener 15 años de registro en común. Este proceso también puede realizarse mediante polígonos de Thiessen considerando el área de cada polígono y el número de estaciones que queden dentro de la misma; sin embargo, la utilización de círculos permite agrupar de mejor manera las estaciones y hacer muchas combinaciones de ellas.

Registro simultáneo

Se promedian las precipitaciones de cada día del año de las estaciones que están dentro del círculo (mínimo tres estaciones), como se muestra en la tabla 1, en seguida, se obtiene el valor máximo de estos promedios. Este procedimiento se repite para cada año de registro en común con el que cuenten las estaciones. El valor obtenido será el registro simultáneo para cada año.

Estación	Día 1	Día 1	...	Día 365
1	x_i	x_i	...	x_i
2	x_i	x_i	...	x_i
3	x_i	x_i	...	x_i
	$\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n}$	$\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n}$...	$\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n}$

Tabla 1 Promedio de máximos diarios para un año de registro

Donde **n** es el número de estaciones contenidas en el círculo.

Registro no simultáneo

Para cada estación se obtiene el máximo anual. El registro no simultáneo, se obtiene al promediar los máximos anuales para cada estación. Este proceso se repite para cada año de registro en común.

Estación	Día 1	Día 1	...	Día 365	Máximo
1	x_i	x_i	...	x_i	Máx (x_1, x_2, \dots, x_{365})
2	x_i	x_i	...	x_i	Máx (x_1, x_2, \dots, x_{365})
3	x_i	x_i	...	x_i	Máx (x_1, x_2, \dots, x_{365})
					$\sum_{i=1}^m \frac{\text{Máx} (x_1, x_2, \dots, x_{365})}{m}$

Tabla 2 Obtención de máximos no simultáneos para un año en común de registro

Donde **m** es el número de estaciones contenidas en el círculo

Obtención del Factor de reducción por Área

Una vez obtenidos los registros simultáneos y los registros no simultáneos, se obtiene un FRA' para cada año de registro con el siguiente cociente

$$FRA' = \frac{P_s}{P_{ns}} \dots \dots \dots (13)$$

FRA' Factor de Reducción por Área para cada año de registro en común.

P_s Promedios máximos simultáneos. Se obtienen al promediar las precipitaciones máximas diarias de cada estación para cada año de registro en común.

P_{ns} Promedios máximos no simultáneos. Se obtienen al promediar las precipitaciones diarias máximas (sin importar si se presentan en diferentes días) para cada año de registro en común.

Ajuste de distribución de probabilidad.

El programa AX, desarrollado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM y el CENAPRED (Jiménez, 1992) permite realizar ajustes de algunas funciones de distribuciones de probabilidad. El programa muestra cual es el mejor ajuste mostrando la distribución de menor error cuadrático. Asimismo, muestra una gráfica con los datos y la distribución de probabilidad asignada.

Con ayuda de este programa se realiza un ajuste de probabilidad a los promedios máximos simultáneos y a los datos de promedios máximos no simultáneos. Como ya se mencionó, en la zona noroeste de México se pueden presentar lluvias en dos épocas del año, por esta razón, el ajuste de probabilidad se realiza utilizando la función Doble Gumbel, la cual considera datos máximos para dos poblaciones.

La distribución Doble Gumbel está definida por:

$$F(x) = p \left[e^{-e^{\alpha_1(x-\beta_1)}} \right] + \left[(1 - p) e^{-e^{-\alpha_2(x-\beta_2)}} \right] \dots \dots \dots (14)$$

Donde :

- α_1 parámetro de forma de la primera población
- β_1 parámetro de escala de la primera población
- α_2 parámetro de forma de la segunda población
- β_2 parámetro de escala de la segunda población

p es el parámetro de asociación (probabilidad de que existan eventos no ciclónicos)



$$p = \frac{\text{número de lluvias no ciclónicas}}{\text{número total de datos}} = \frac{N_n}{N_t}$$

Periodo de retorno

El periodo de retorno se define como el número de años que transcurren en promedio para que un evento de magnitud dada x sea igualado o excedido por lo menos una vez en ese periodo de tiempo (Escalante, 2002).

$$Tr = \frac{1}{P(X > x)} = \frac{1}{[1 - P(X \leq x)]} \dots \dots \dots (15)$$

Con este procedimiento, obtenemos los FRA asociados a distintos periodos de retorno.

Función de correlación

Uno de los modelos más simples y comunes en hidrología, está basado en la suposición de que dos variables se relacionan en forma lineal o no lineal. El objetivo de un modelo de este tipo es poder estimar el valor de una variable dependiente, a partir de la independiente (Aparicio, 2005).

Una vez obtenidos varios FRA para diferentes zonas y diferentes áreas, se busca una función que correlacione los valores del área considerada con los FRA correspondientes. En este caso, es una función de correlación no lineal de tipo logarítmica la que tiene un mejor ajuste a los FRA como variable dependiente del área que es la variable independiente, a saber

$$y = a \ln(x) + b \dots \dots \dots (16)$$

Procedimiento

El procedimiento para la obtención de los FRA y sus correspondientes funciones de correlación a distintos periodos de retorno consta de los siguientes pasos.

- 1.- Se trazan círculos o elipses que contengan al menos tres estaciones con 15 años de registro en común.
- 2.- Se obtienen los promedios de los registros de lluvia máxima anual simultánea y no simultánea para cada año de registro en común de las estaciones contenidas en el área del círculo.



3.-Se realiza el cociente entre promedios simultáneos y promedios no simultáneos (ecuación 13), con esto se obtiene un FRA' para cada año analizado (mínimo 15 años).

4.-Se obtiene la media los del FRA obtenidos en el paso anterior, este será en FRA medio para las estaciones seleccionadas en función del área del círculo o elipse que las contiene.

$$FRA = \frac{\sum_i^n FRA'}{n} \dots \dots \dots (17)$$

FRA es el Factor de Reducción por área para el círculo en estudio

FRA' es el Factor de Reducción por área para cada año de registro en común.

n es el número de años de registro en común (quince años como valor mínimo)

5.-Se realiza un ajuste de probabilidad tanto a los datos de lluvia máxima anual simultánea y no simultánea. Con esto, se obtienen FRA extrapolados a distintos periodos de retorno para cada serie de datos. Se realiza el cociente de los máximos simultáneos entre sus correspondientes valores extrapolados de máximos simultáneos con la finalidad de obtener los FRA a distintos periodos de retorno.

6.-En toda el área de estudio se trazan más círculos de distintas áreas y estaciones.

7.-A los nuevos círculos se les aplican los pasos 2, 3, 4 y 5.

8.- Se obtiene una ecuación que correlacione los FRA medios y los FRA extrapolados en función de las áreas obtenidos en los pasos anteriores.

CAPÍTULO 3 Aplicación al estado de Sonora

El estado de Sonora se dividió en tres zonas trazando tres círculos con la finalidad de cubrirlo todo; para trazarlos se usó el criterio de que existieran estaciones climatológicas muy cercanas a fin de que los círculos de menor área pudieran contar con la condición necesaria para este estudio, es decir, el mínimo de tres estaciones con 15 años de registro en común. En cada zona se trazaron tres círculos dando un total de nueve en todo el estado.

Una vez definidas las zonas en que se trazarán círculos de áreas pequeñas, a partir de ellos se trazan círculos de áreas mayores y que contengan al primero. Esto tiene como consecuencia que las estaciones contenidas en los círculos pequeños estarán contenidas también en los círculos grandes ampliando del mínimo de tres estaciones a más de veinte con un mínimo de 15 años de registro.

El proceso desarrollado consta de los siguientes pasos

1.- Se trazan círculos que encierren mínimo tres estaciones climatológicas que cuenten con, por lo menos, 15 años de registros simultáneos en distintos puntos del estado de Sonora (figura 1)

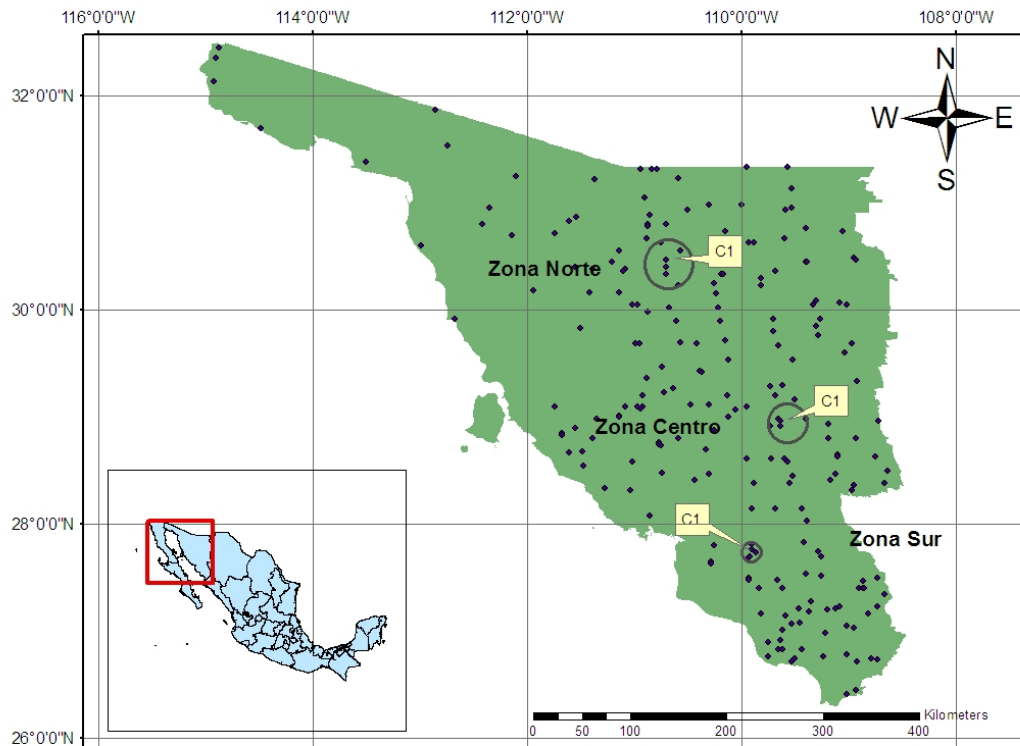


Figura 1. Ubicación de las zonas norte, centro y sur.

2.-Se obtienen los promedios de las lluvias máximas diarias simultáneas de cada estación y los promedios de las lluvias máximas diarias.

3.- Para cada año de registro simultáneo se obtiene un FRA' dividiendo el promedio de lluvia máxima diaria de las tres estaciones entre el promedio de las lluvias máximas diarias simultáneas (ecuación 13)

En la siguiente tabla se muestra un ejemplo del cálculo del FRA para 5 años de registro en común de las estaciones 26007, 26025 y 26164. En el año 2008, por ejemplo, las lluvias diarias máximas en estas estaciones fueron, respectivamente, de 50.4mm el día 6 de julio del año, de 75,5mm el día 24 de junio y de 40.0mm el día 14 de febrero. Por otro lado, para cada día del año se calculó el promedio diario de las lluvias registradas en las tres estaciones y se encontró que el máximo de esos promedios ocurrió el día 24 de junio y fue de 27.63mm. El FRA para 2008 se encontró dividiendo el promedio simultáneo (27.63) entre 55,3 (promedio de 50.4, 75.5 y 40)

AÑO	ESTACION	NO. ESTACIONES	MÁX.ANUAL	PROMEDIO S/Sim	FRA
2008	26007		50,4		
2008	26025		75,5		
2008	26164		40		
2008	PROMEDIO	3	27,63	55,30	0,50
2010	26007		43,8		
2010	26025		65		
2010	26164		47		
2010	PROMEDIO	3	38,67	51,93	0,74
2011	26007		29,8		
2011	26025		30		
2011	26164		34		
2011	PROMEDIO	3	14,67	31,27	0,47
2012	26007		26,5		
2012	26025		85		
2012	26164		33		
2012	PROMEDIO	3	33,10	48,17	0,69
2013	26007		44,5		
2013	26025		30		
2013	26164		28		
2013	PROMEDIO	3	21,83	34,17	0,64

Tabla 3 Ejemplo de Máximos diarios simultáneos y no simultáneos y FRA para cada año de registro en común, este ejemplo se realiza para únicamente 5 años.



4.-Se obtiene FRA como el promedio de los FRA'(ecuación 17).

Tomando los datos de la tabla 3 y considerando únicamente 5 años de registro en común, el FRA estará dado por

$$FRA = \frac{0.5 + 0.74 + 0.47 + 0.69 + 0.64}{5} = 0.61$$

5.-A través del programa AX, se obtuvo que la función de mejor ajuste fue Doble Gumbel para los valores máximos diarios simultáneos de precipitación y a los valores máximos diarios. Con ayuda de la función anterior se hicieron extrapolaciones para distintos periodos de retorno de los datos de lluvia. Cada valor extrapolado de precipitación máxima diaria simultánea se divide entre su correspondiente extrapolación de precipitación diaria máxima a fin de obtener el FRA para diferentes periodos de retorno para el área del círculo en estudio.

6.- Se trazan círculos con áreas mayores que contengan los círculos del punto 1. Estos círculos contendrán más de tres estaciones (figura 2). De la misma forma que en el punto 1, debe cumplirse que tengan, por lo menos, 15 años de registros simultáneos.

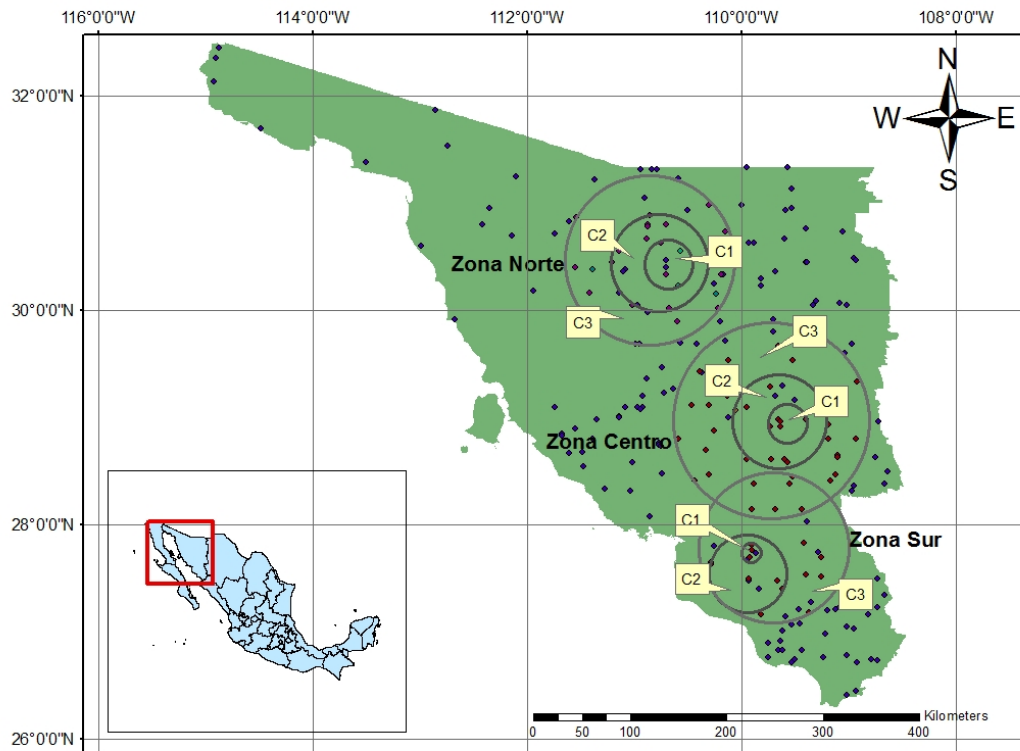


Figura 2. Trazado de tres círculos en cada una de las zonas.

7.- A cada círculo del punto 6 se aplican los puntos 2 al 5 descritos en “Procedimiento”.

8.-Una vez obtenidos varios FRA para diferentes zonas y diferentes áreas, se obtiene una ecuación que correlacione el área con los FRA. En este caso es una ecuación de correlación logarítmica la que presenta el menor error cuadrático. Con esta ecuación se podrá obtener el FRA representativo para diferentes periodos de retorno del estado de Sonora y de la zona noreste de la República Mexicana.

CAPÍTULO 4 Resultados

Con el propósito de obtener el FRA representativo de la zona noroeste de la república mexicana, se dividió al estado de Sonora en tres zonas: norte, centro y sur. En cada una de ellas se dibujaron tres círculos con áreas distintas que contuvieran, al menos, tres estaciones con 15 años de registro en común. Para cada uno de los círculos se obtuvo un FRA con el método descrito anteriormente. En las tablas 4 a 12, se presenta el promedio de los FRA obtenidos para cada año de registro en común (FRA') así como una extrapolación para 2, 5, 10, 20, 50, 100, 500, 1000, 2000, 5000 y 10000 años para cada círculo y para cada una de las zonas. Asimismo, en las figuras 3 a 11 se muestran las gráficas del ajuste de probabilidad Doble Gumbel de los círculos 1 al 3 para la zona norte, centro y sur respectivamente.

FRA por zonas

Zona Norte

ZNC1	Promedio	0.6156	
Tr	Doble Gumbel		FRA
	Simultáneos	Máximos	
2	31.3	46.65	0.6776
5	46.7	60.14	0.7742
10	60.73	75.46	0.7957
20	72.99	94.72	0.7691
50	87.49	119.43	0.7463
100	97.93	137.36	0.7358
200	108.17	154.95	0.7281
500	121.58	177.98	0.7208
1000	131.67	195.41	0.7158
2000	141.76	212.57	0.7121
5000	155.21	235.63	0.7064
10000	164.59	252.79	0.7039

Tabla 4 Extrapolación círculo 1 zona norte.

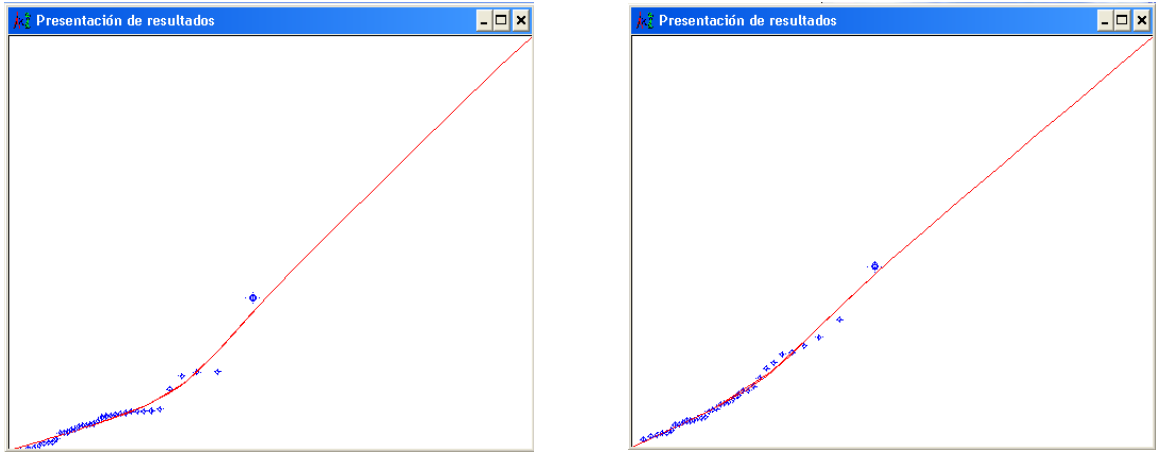


Figura 3 Gráficas de ajustes de distribución de probabilidad Doble Gumbel a los datos de precipitación, a) máximos simultáneos, b) máximos no simultáneos para el círculo 1 zona norte

ZNC2	Promedio	0.6156	
Tr	Doble Gumbel		FRA
	Simultáneos	Máximos	
2	28.29	49.48	0.5717
5	38.53	62.29	0.6186
10	67.66	81.71	0.8281
20	106.67	117.14	0.9106
50	150.22	159.3	0.943
100	181.22	189.06	0.9585
200	211.5	218.07	0.9699
500	251.11	255.95	0.9811
1000	280.96	284.39	0.9879
2000	310.81	312.93	0.9932
5000	350.76	349.83	1.0027
10000	378.31	377.93	1.001

Tabla 5 Extrapolación círculo 2 zona norte.

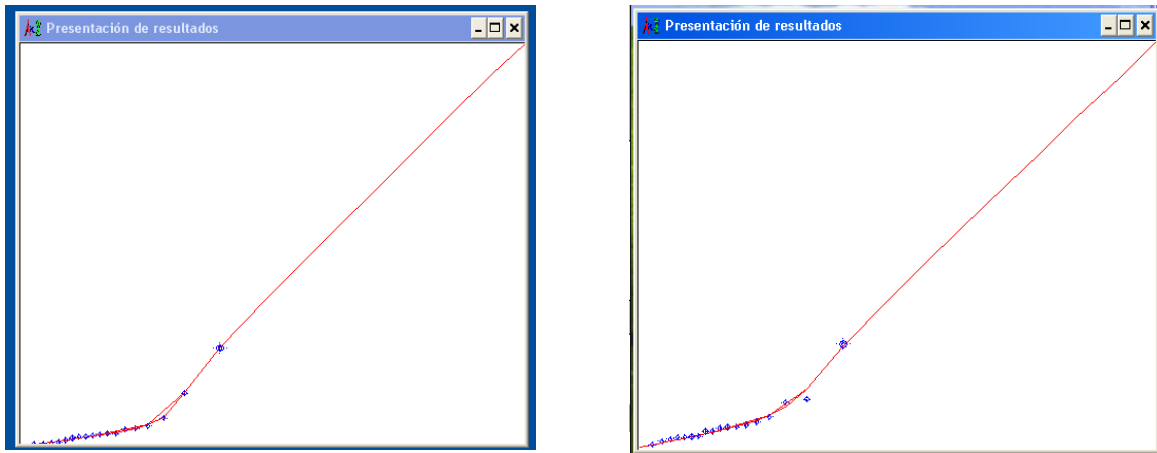


Figura 4 Gráficas de ajustes de distribución de probabilidad Doble Gumbel a los datos de precipitación, a) máximos simultáneos, b) máximos no simultáneos para el círculo 2 zona norte

ZNC3	Promedio	0.5360	
Tr	Doble Gumbel		FRA
	Simultáneos	Máximos	
2	22.58	45.7	0.4941
5	31.55	58.19	0.5422
10	47.93	72.05	0.6652
20	73.78	91.42	0.807
50	102.76	117.01	0.8782
100	123.18	135.37	0.91
200	143.09	153.34	0.9332
500	169.13	176.81	0.9566
1000	188.69	194.34	0.9709
2000	208.41	212.01	0.983
5000	234.3	234.84	0.9977
10000	253.56	252.23	1.0053

Tabla 6 Extrapolación círculo 3 zona norte.

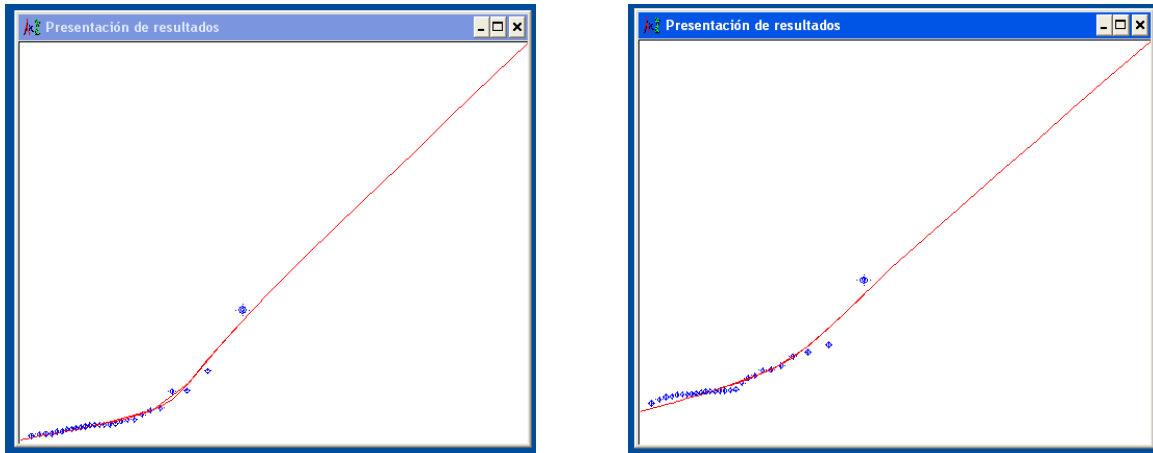


Figura 5 Gráficas de ajustes de distribución de probabilidad Doble Gumbel a los datos de precipitación, a) máximos simultáneos, b) máximos no simultáneos para el círculo 3 zona norte.

Zona Centro

ZCC1	Promedio	0.7794	
Tr	Doble Gumbel		FRA
	Simultáneos	Máximos	
2	42.8	57.01	0.7507
5	55.72	72.76	0.7658
10	83.79	98.33	0.8521
20	109.53	120.73	0.9072
50	138.32	145.35	0.9516
100	158.79	162.74	0.9757
200	178.83	179.69	0.9952
500	205.04	201.86	1.0158
1000	224.77	218.5	1.0287
2000	244.43	235.15	1.0395
5000	270.94	256.57	1.056
10000	290.44	274.13	1.0595

Tabla 7 Extrapolación círculo 1 zona centro.

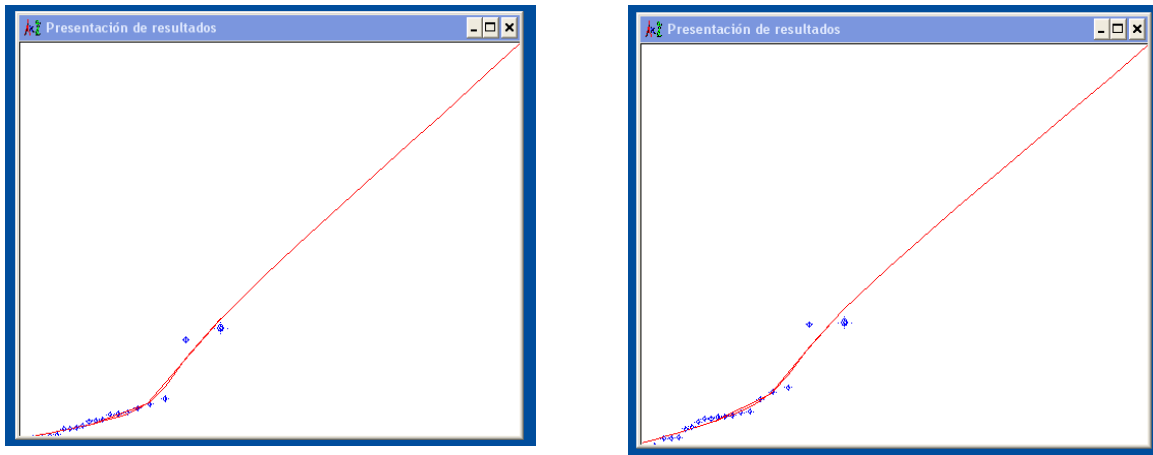


Figura 6 Gráficas de ajustes de distribución de probabilidad Doble Gumbel a los datos de precipitación, a) máximos simultáneos, b) máximos no simultáneos para el círculo 1 zona centro.

ZCC2	Promedio	0.6180	
Tr	Doble Gumbel		FRA
	Simultáneos	Máximos	
2	35.25	62.42	0.5647
5	44.83	72.79	0.6159
10	51.04	83.26	0.613
20	56.97	93.24	0.611
50	64.62	105.39	0.6132
100	70.35	114.21	0.616
200	76.05	122.88	0.6189
500	83.59	134.27	0.6226
1000	89.25	142.81	0.625
2000	94.95	151.32	0.6275
5000	102.58	162.67	0.6306
10000	108.28	171.58	0.6311

Tabla 8 Extrapolación círculo 2 zona centro.

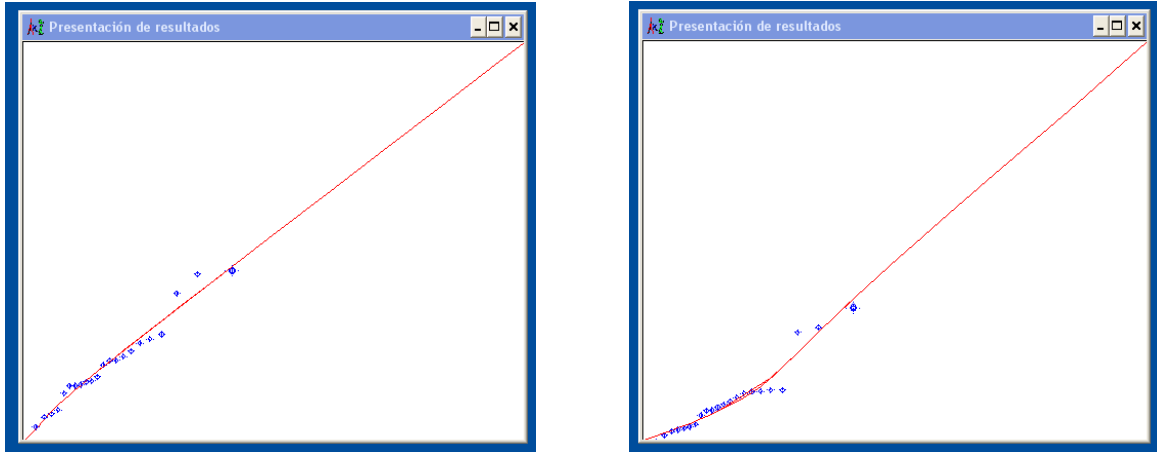


Figura 7 Gráficas de ajustes de distribución de probabilidad Doble Gumbel a los datos de precipitación, a) máximos simultáneos, b) máximos no simultáneos para el círculo 2 zona centro

ZCC3	Promedio	0.4359	
Tr	Doble Gumbel		FRA
	Simultáneos	Máximos	
2	25.09	61.03	0.4111
5	33.48	69.55	0.4814
10	40.77	74.6	0.5465
20	47.73	79.35	0.6015
50	56.44	85.43	0.6607
100	62.83	89.98	0.6983
200	69.14	94.49	0.7317
500	77.44	100.45	0.7709
1000	83.68	104.93	0.7975
2000	89.96	109.45	0.8219
5000	98.28	115.25	0.8528
10000	104.07	120.01	0.8672

Tabla 9 Extrapolación círculo 3 zona centro.

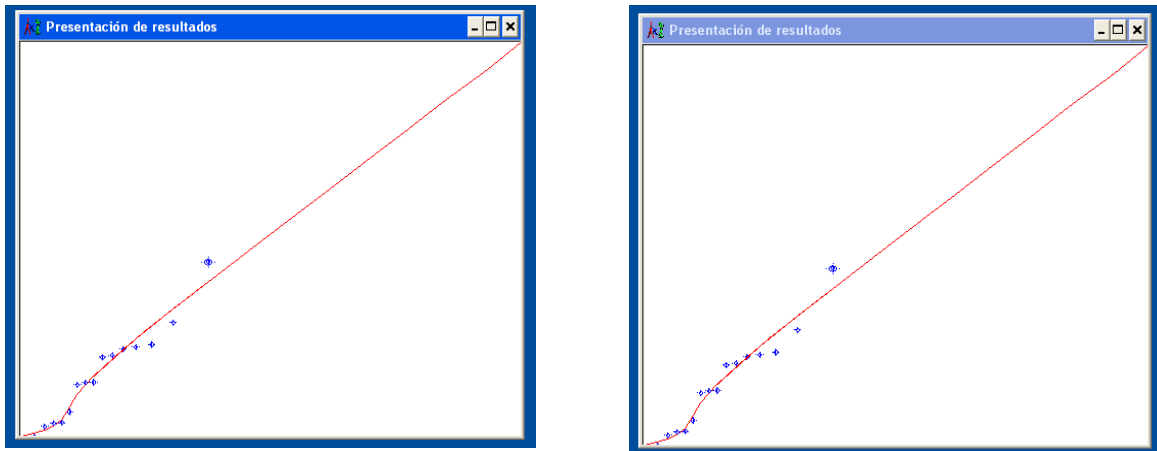


Figura 8 Gráficas de ajustes de distribución de probabilidad Doble Gumbel a los datos de precipitación, a) máximos simultáneos, b) máximos no simultáneos para el círculo 3 zona centro

Zona Sur

ZSC1	Promedio	0.8374	
Tr	Doble Gumbel		FRA
	Simultáneos	Máximos	
2	56.32	67.83	0.8303
5	74.95	85.93	0.8722
10	87.29	97.91	0.8915
20	99.12	109.41	0.906
50	114.44	124.29	0.9207
100	125.92	135.44	0.9297
200	137.35	146.55	0.9372
500	152.44	161.2	0.9457
1000	163.85	172.28	0.9511
2000	175.24	183.35	0.9558
5000	190.31	197.99	0.9612
10000	201.71	209.06	0.9648

Tabla 10 Extrapolación círculo 1 zona sur.

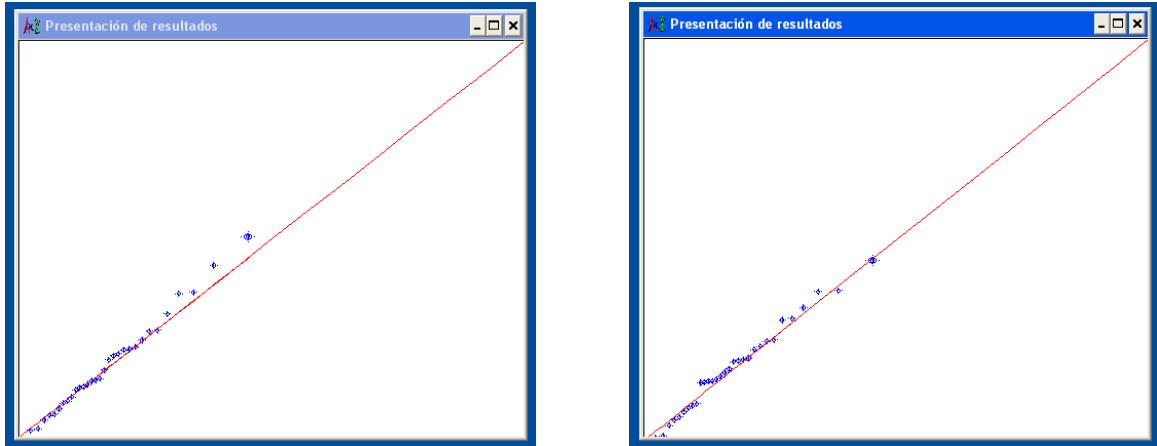


Figura 9 Gráficas de ajustes de distribución de probabilidad Doble Gumbel a los datos de precipitación, a) máximos simultáneos, b) máximos no simultáneos para el círculo 1 zona sur

ZSC2	Promedio	0.7149	
Tr	Doble Gumbel		FRA
	Simultáneos	Máximos	
2	43.99	65.02	0.6766
5	72.77	83.86	0.8678
10	101.25	108.05	0.9371
20	118.42	126.91	0.9331
50	137.83	147.93	0.9317
100	151.68	162.81	0.9316
200	165.24	177.34	0.9318
500	182.98	196.3	0.9321
1000	196.29	210.62	0.932
2000	209.75	224.94	0.9325
5000	227.57	244.04	0.9325
10000	240.82	258.25	0.9325

Tabla 11 Extrapolación círculo 2 zona sur.

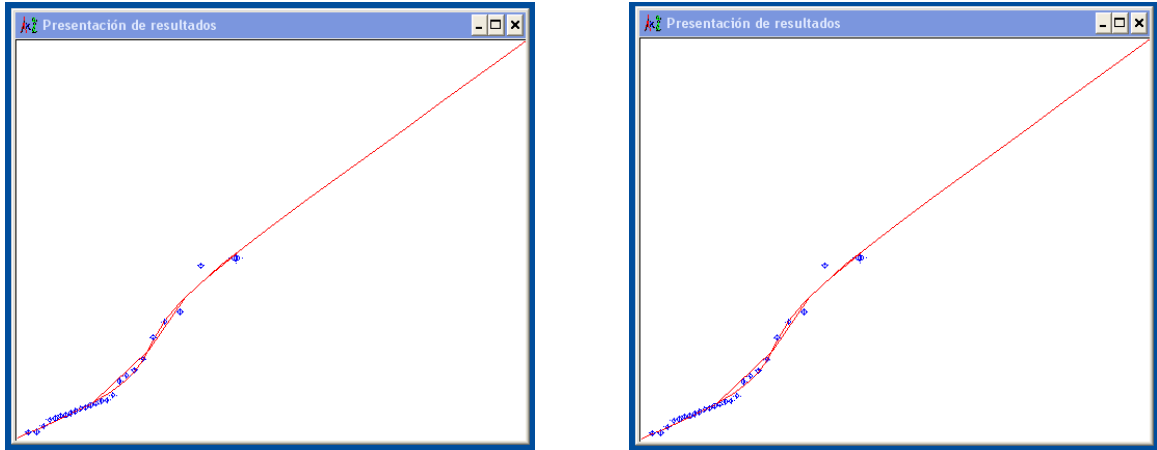


Figura 10 Gráficas de ajustes de distribución de probabilidad Doble Gumbel a los datos de precipitación, a) máximos simultáneos, b) máximos no simultáneos para el círculo 2 zona sur

ZSC3	Promedio	0.6282	
Tr	Doble Gumbel		FRA
	Simultáneos	Máximos	
2	42.82	68.08	0.6290
5	66.88	86.41	0.7740
10	85.87	103.85	0.8269
20	104.1	121.69	0.8555
50	127.17	144.13	0.8823
100	144.24	160.56	0.8984
200	161.14	176.77	0.9116
500	183.37	198.01	0.9261
1000	200.13	214	0.9352
2000	216.83	229.99	0.9428
5000	239.26	251.46	0.9515
10000	256.08	267.33	0.9579

Tabla 12 Extrapolación círculo 3 zona sur.

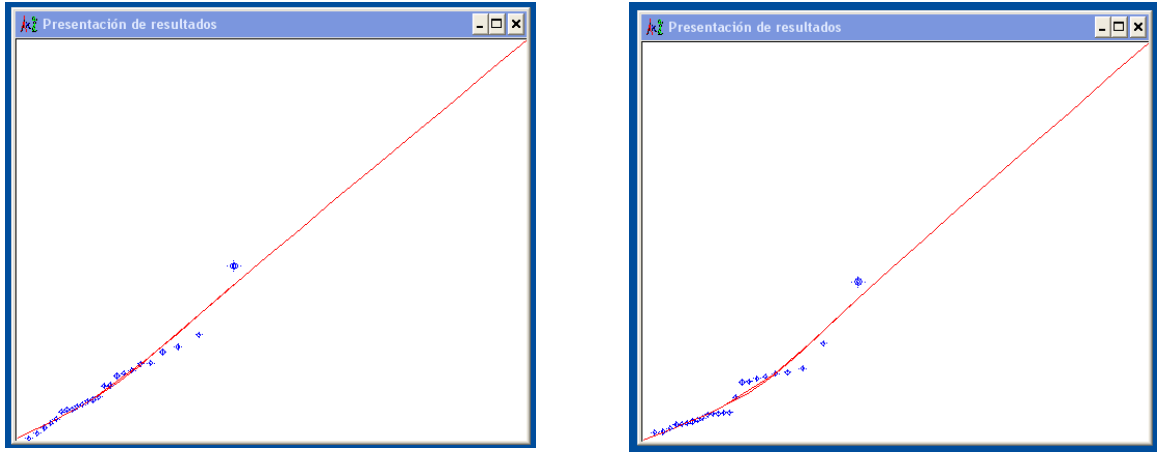
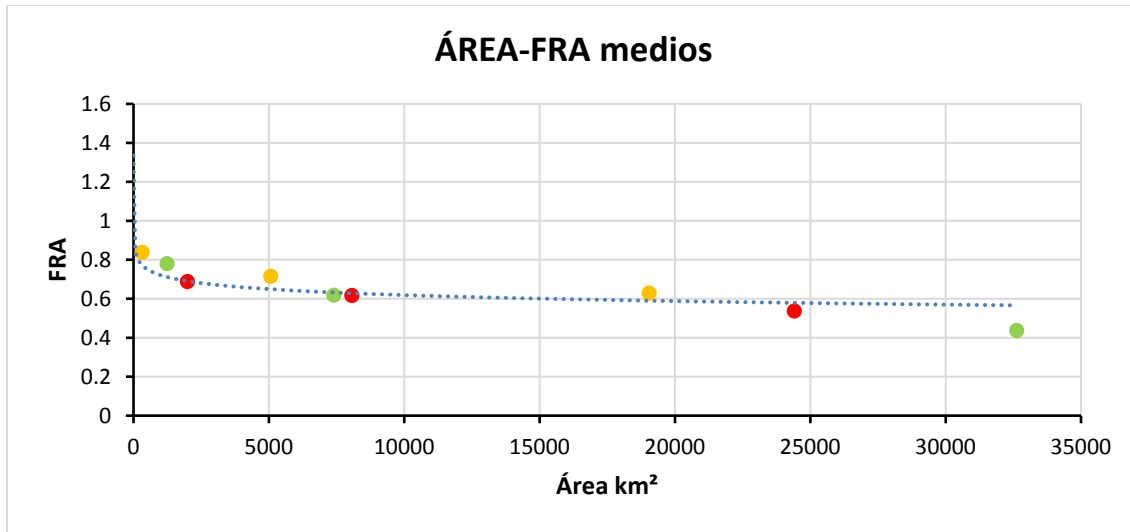


Figura 11 Gráficas de ajustes de distribución de probabilidad Doble Gumbel a los datos de precipitación, a) máximos simultáneos, b) máximos no simultáneos para el círculo 2 zona sur

Una vez obtenidos los FRA para los nueve círculos, se agrupan en la tabla 13 y se dibuja una gráfica Área-FRA para obtener una ecuación de correlación que relacione a los FRA en función del área (gráfica 5).

		Área	Medios
		km ²	
Zona norte	C1	1994.16	0.6877
	C2	8069.46	0.6156
	C3	24417.13	0.5360
Zona centro	C1	1247.00	0.7794
	C2	7405.82	0.6180
	C3	32627.79	0.4359
Zona sur	C1	322.34	0.8374
	C2	5075.82	0.7149
	C3	19052.15	0.6282

Tabla 13 FRA medios el estado de Sonora.



Gráfica 5 FRA medios para distintas áreas en el estado de Sonora. Los puntos en rojo, verde y amarillo representan las zonas norte, centro y sur respectivamente

La ecuación de ajuste que correlaciona los FRA medios con el área en la zona de estudio es

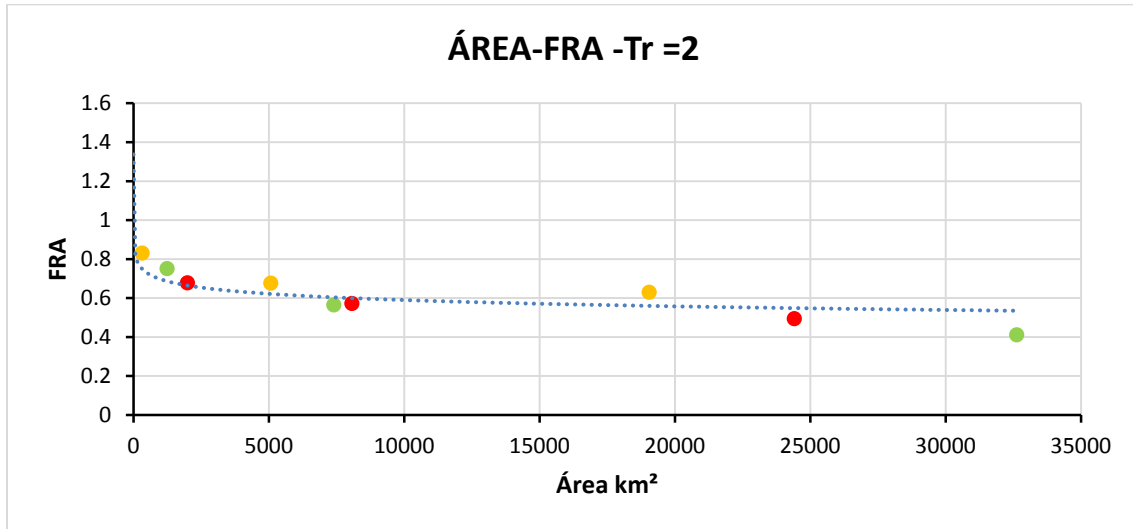
$$y = -0.044 \ln(x) + 1.0282 \dots \dots \dots (18)$$

De la misma manera en las tablas 14, 15, 16 y 17 se agrupan los FRA extrapolados a los diferentes periodos de retorno en función del área de su correspondiente círculo. Los resultados correspondientes 2, 10, 50, y 100 años se muestran en las gráficas 6, 7, 8 y 9. Además, se presentan las ecuaciones de ajuste que correlacionan los FRA con el área para los mismos periodos de retorno.

FRA extrapolado

		Área	Tr=2
		km²	años
Zona norte	C1	1994.16	0.6776
	C2	8069.46	0.5717
	C3	24417.13	0.4941
Zona centro	C1	1247.00	0.7507
	C2	7405.82	0.5647
	C3	32627.79	0.4111
Zona sur	C1	322.34	0.8303
	C2	5075.82	0.6766
	C3	19052.15	0.6290

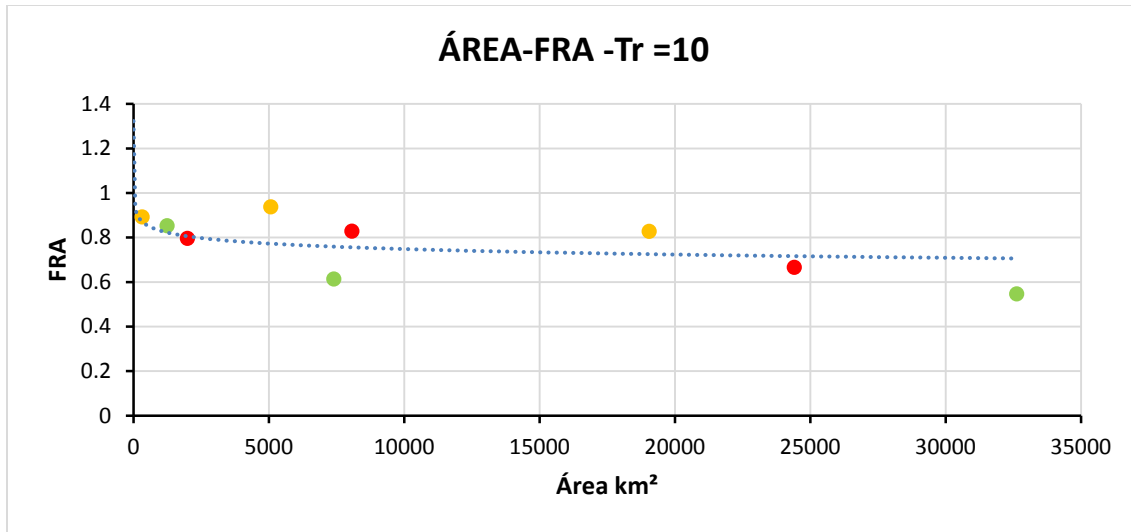
Tabla 14 FRA asociados a 2 años de periodo de retorno para diferentes áreas en el estado de Sonora.



Gráfica 6 FRA para diferentes áreas asociado a 2 años de periodo de retorno en el estado Sonora. Los puntos en rojo, verde y amarillo representan las zonas norte, centro y sur respectivamente

		Área	Tr=10
		km ²	años
Zona norte	C1	1994.16	0.7957
	C2	8069.46	0.8281
	C3	24417.13	0.6652
Zona centro	C1	1247.00	0.8521
	C2	7405.82	0.6130
	C3	32627.79	0.5465
Zona sur	C1	322.34	0.8915
	C2	5075.82	0.9371
	C3	19052.15	0.8269

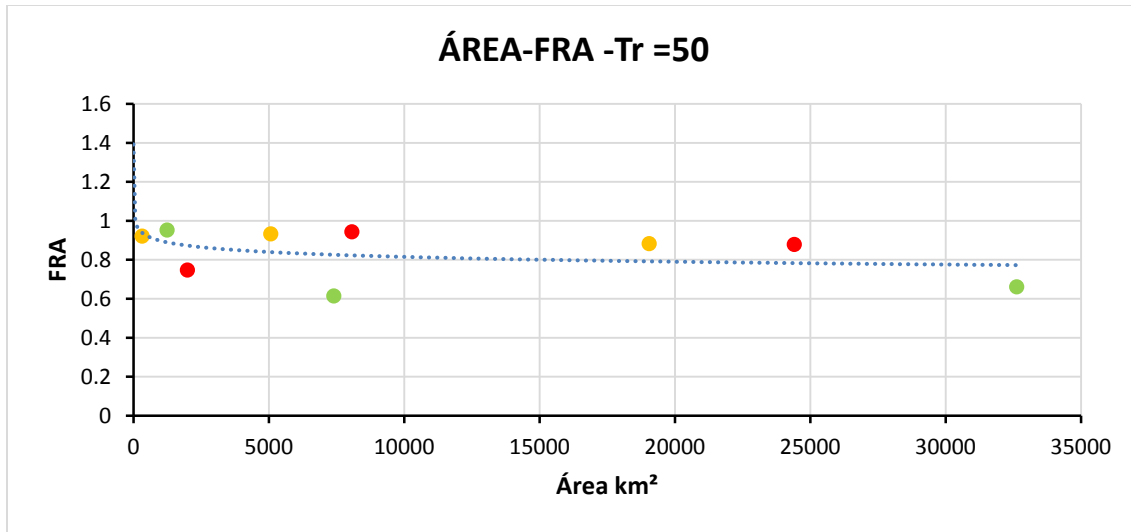
Tabla 15 FRA asociados a 10 años de periodo de retorno para diferentes áreas en el estado de Sonora.



Gráfica 7 FRA para diferentes áreas asociado a 10 años de periodo de retorno en el estado Sonora. Los puntos en rojo, verde y amarillo representan las zonas norte, centro y sur respectivamente

		Área	Tr=50
		km²	años
Zona norte	C1	1994.16	0.7463
	C2	8069.46	0.9430
	C3	24417.13	0.8782
Zona centro	C1	1247.00	0.9516
	C2	7405.82	0.6132
	C3	32627.79	0.6607
Zona sur	C1	322.34	0.9207
	C2	5075.82	0.9317
	C3	19052.15	0.8823

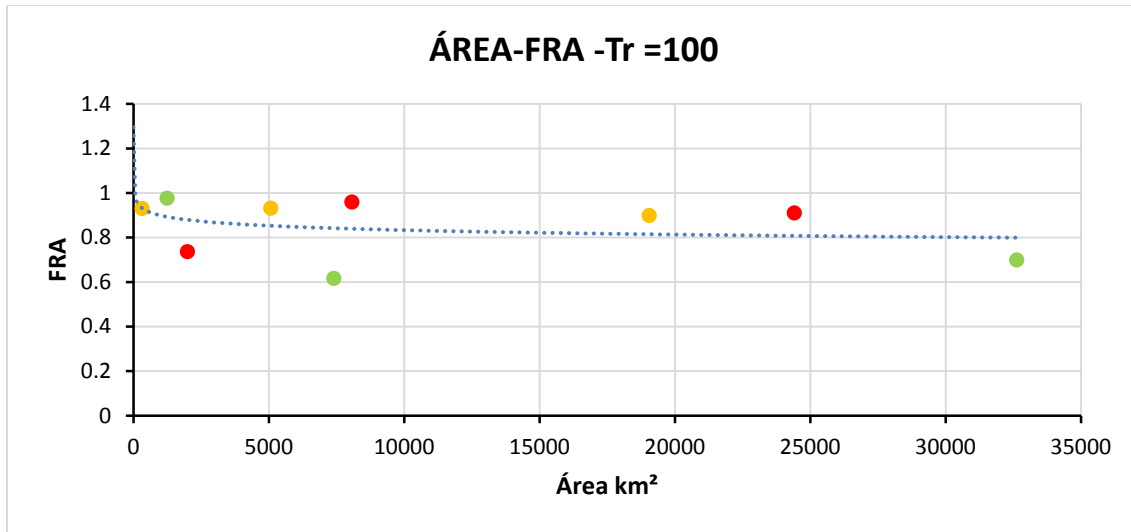
Tabla 16 FRA asociados a 50 años de periodo de retorno para diferentes áreas en el estado de Sonora.



Gráfica 8 FRA para diferentes áreas asociado a 50 años de periodo de retorno en el estado Sonora. Los puntos en rojo, verde y amarillo representan las zonas norte, centro y sur respectivamente

		Área	Tr=100
		km ²	años
Zona norte	C1	1994.16	0.7358
	C2	8069.46	0.9585
	C3	24417.13	0.9100
Zona centro	C1	1247.00	0.9757
	C2	7405.82	0.6160
	C3	32627.79	0.6983
Zona sur	C1	322.34	0.9297
	C2	5075.82	0.9316
	C3	19052.15	0.8984

Tabla 17 FRA asociados a 100 años de periodo de retorno para diferentes áreas en el estado de Sonora.



Gráfica 9 FRA asociados a 100 años de periodo de retorno para diferentes áreas en el estado de Sonora.

Las ecuaciones de ajuste que correlaciona el FRA con el área y periodo de retorno en la zona de estudio son

Para $Tr= 2$ años

$$y = -0,046\ln(x) + 1,0171 \dots \dots \dots (19)$$

Para $Tr = 10$ años

$$y = -0,036\ln(x) + 1,0766 \dots \dots \dots (20)$$

Para $Tr = 50$ años

$$y = -0,036\ln(x) + 1,145 \dots \dots \dots (21)$$

Para $Tr= 100$ años

$$y = -0,029\ln(x) + 1,0971 \dots \dots \dots (22)$$

Área	Tr=2	Tr=10	Tr=50	Tr=100
km ²	años	años	años	años
10	0.9112	0.9937	1.0621	1.0303
50	0.8371	0.9358	1,0042	0.9837
100	0.8053	0.9108	0.9792	0.9636
500	0.7312	0.8529	0.9213	0.9169
1000	0.6993	0.8279	0.8963	0.8968
5000	0.6253	0.7700	0.8384	0.8501
10000	0.5934	0.7450	0.8134	0.8300
100000	0.4875	0.6621	0.7305	0.7632

Tabla 18 FRA para diferentes áreas obtenidos con las ecuaciones de correlación en el estado de Sonora

Capítulo 5 Actualización de FRA para toda la República Mexicana

Existen diferentes trabajos realizados que han calculado el FRA para distintas regiones de la República Mexicana. Estos trabajos se dividieron en zonas distintas tomando en cuenta la distribución de las lluvias en el país.

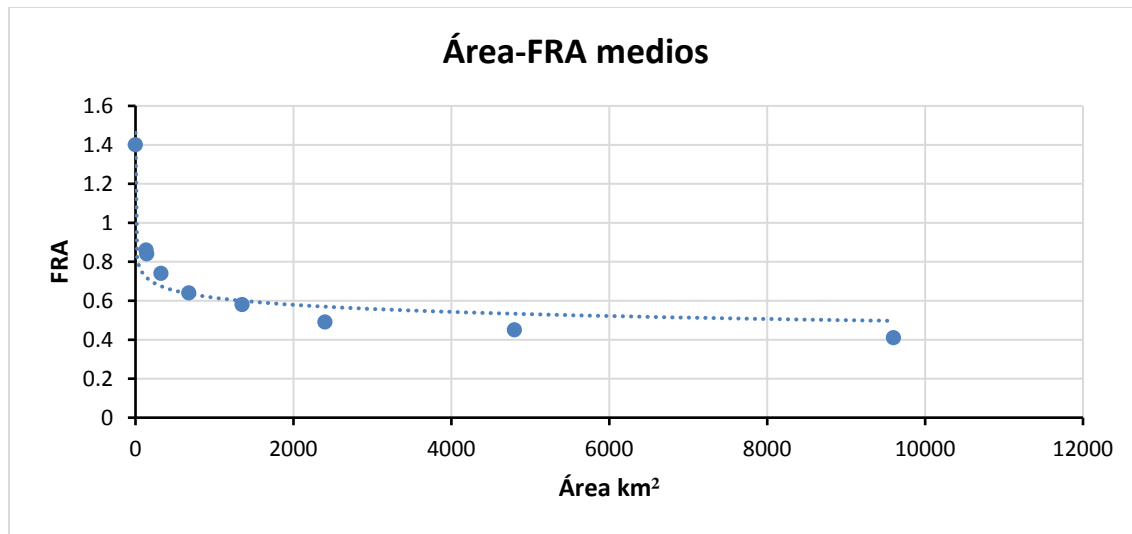
En esta tesis, se presentan los resultados obtenidos en estos trabajos, es decir, los FRA medios y los FRA extrapolados para diferentes áreas. Asimismo, se realizan las gráficas de ellos en función del área a fin de obtener una ecuación que correlacione los FRA obtenidos por diferentes autores con el objetivo de obtener los FRA asociados a un área deseada en cualquier cuenca ubicada dentro del territorio mexicano.

Cuenca del Valle de México

Franco (1998), en su tesis de maestría titulada “Análisis Regional de Lluvias Convectivas. Aplicación al Valle de México”, realizó el cálculo de los FRA medios para la Cuenca del Valle de México. En la tabla 19 y en la gráfica 10 se muestran los resultados. Asimismo, se presenta la ecuación de correlación Área-FRA.

Área (km ²)	FRA
0.0	1.4
135	0.86
143	0.84
323	0.74
676	0.64
1352	0.58
2400	0.49
4800	0.45
9600	0.41

Tabla 19. FRA medios para la Cuenca del Valle de México.



Gráfica 10. FRA para distintas áreas de la Cuenca del Valle de México

La ecuación de ajuste que correlaciona los FRA medios con el área es

$$y = -0.052 \ln(x) + 0.9782 \dots \dots \dots (23)$$

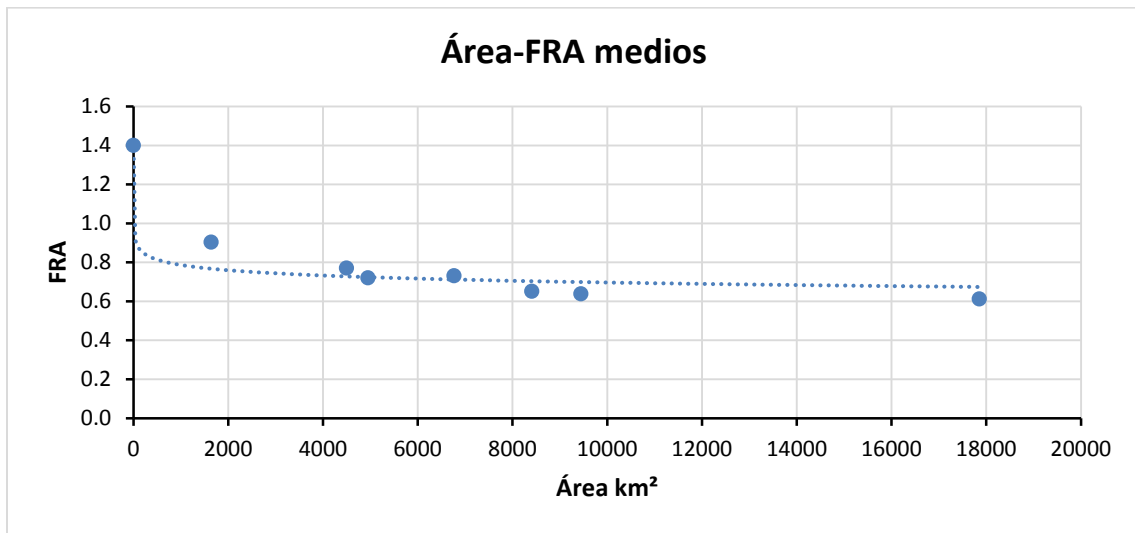
Cuenca del Pánuco

González (2012), obtuvo los FRA para la Cuenca del río Pánuco en su tesis “Estimación de Factores de Reducción por Área. Aplicación a la cuenca del río Pánuco”.

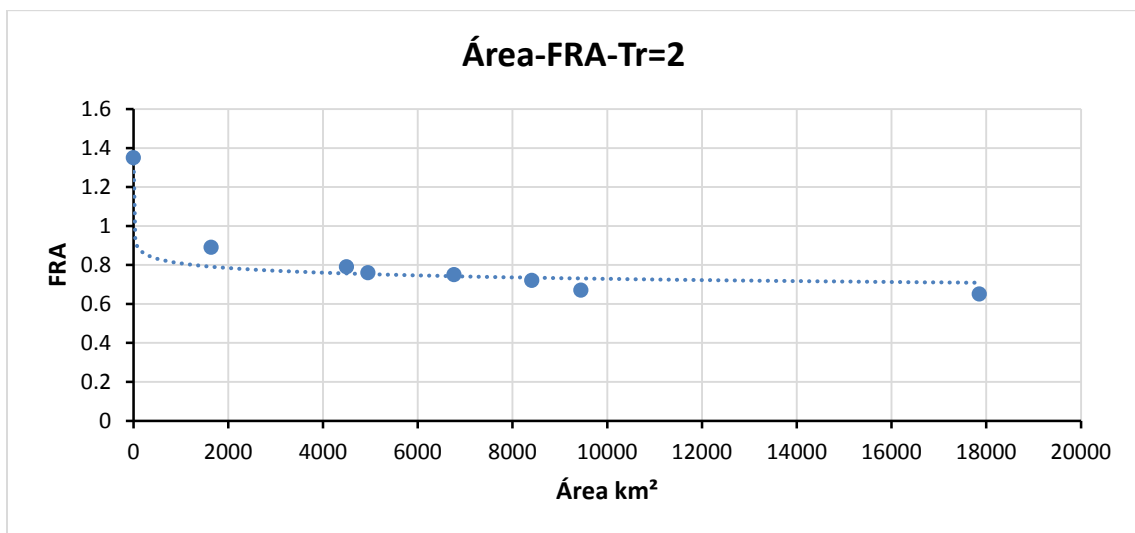
Este trabajo presenta, en la tabla 20, los resultados obtenidos por González (2012). En esta tabla se muestran los FRA medios y los FRA asociados a 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años de periodo de retorno. Además, en las gráficas 11 a 17 muestran las relaciones Área-FRA de la tabla 20.

Área (km ²)	Medios	Tr=2	Tr=5	Tr=10	Tr=20	Tr=50	Tr=100
0,00	1.4	1.35	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
17855.71	0.61	0.65	0.63	0.62	0.61	0.61	0.6
9446.98	0.63	0.67	0.64	0.63	0.62	0.61	0.61
8408.73	0.65	0.72	0.67	0.65	0.64	0.63	0.62
6766.91	0.73	0.75	0.71	0.7	0.69	0.68	0.67
4950.63	0.72	0.76	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77
4496.34	0.77	0.79	0.75	0.73	0.72	0.70	0.70
1641.81	0.90	0.89	0.88	0.87	0.87	0.87	0.86

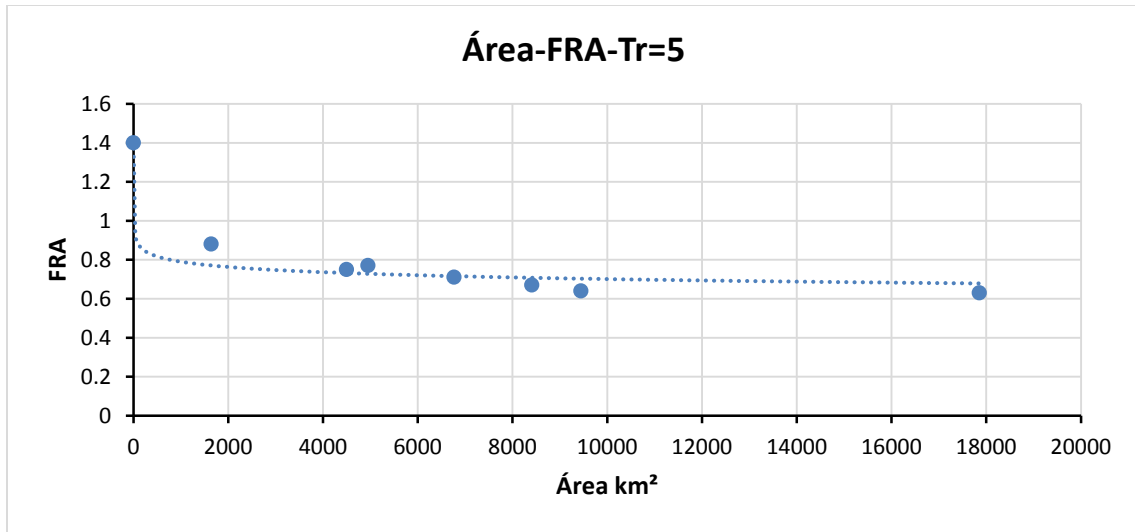
Tabla 20. FRA medios y FRA asociados a 2,5,10,20,50 y 100 años de periodo de retorno para diferentes áreas en la Cuenca del Río Pánuco.



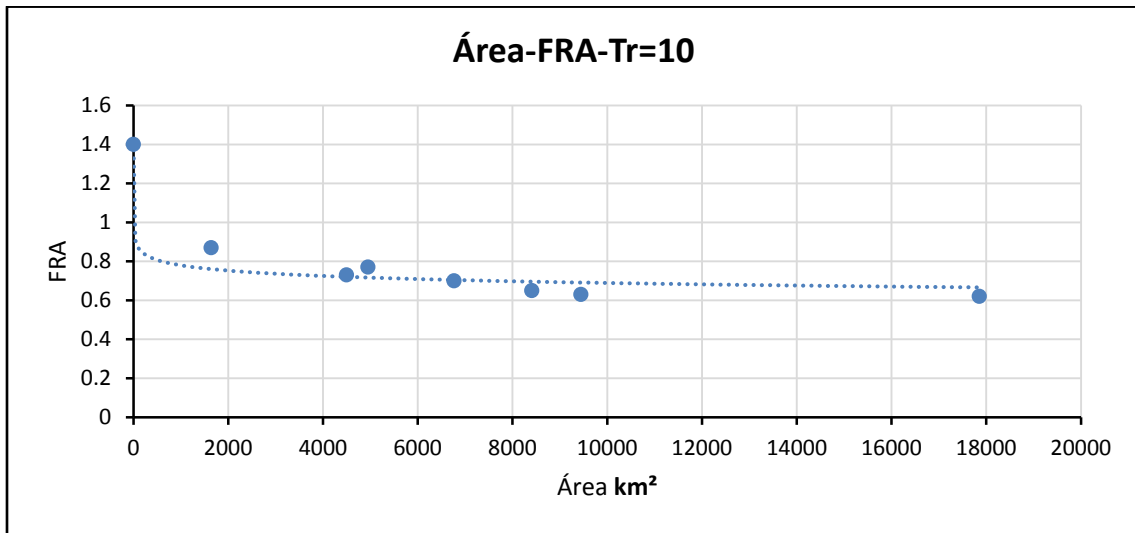
Gráfica 11. FRA medios para distintas áreas en la Cuenca del Río Pánuco.



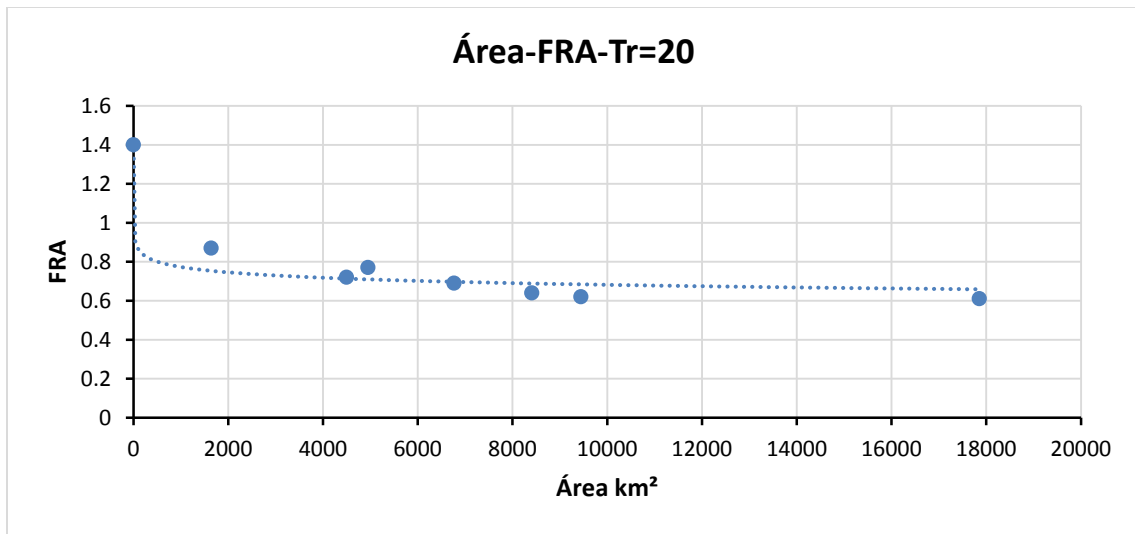
Gráfica 12. FRA para diferentes áreas asociado a 2 años de periodo de retorno en la Cuenca del Río Pánuco.



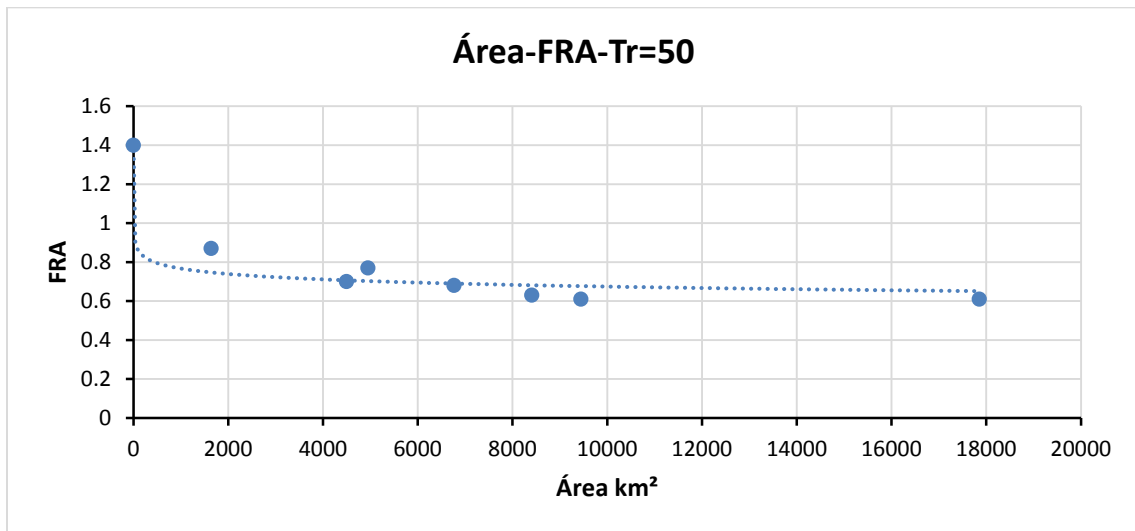
Gráfica 13 FRA para diferentes áreas asociado a 5 años de periodo de retorno en la Cuenca del Río Pánuco.



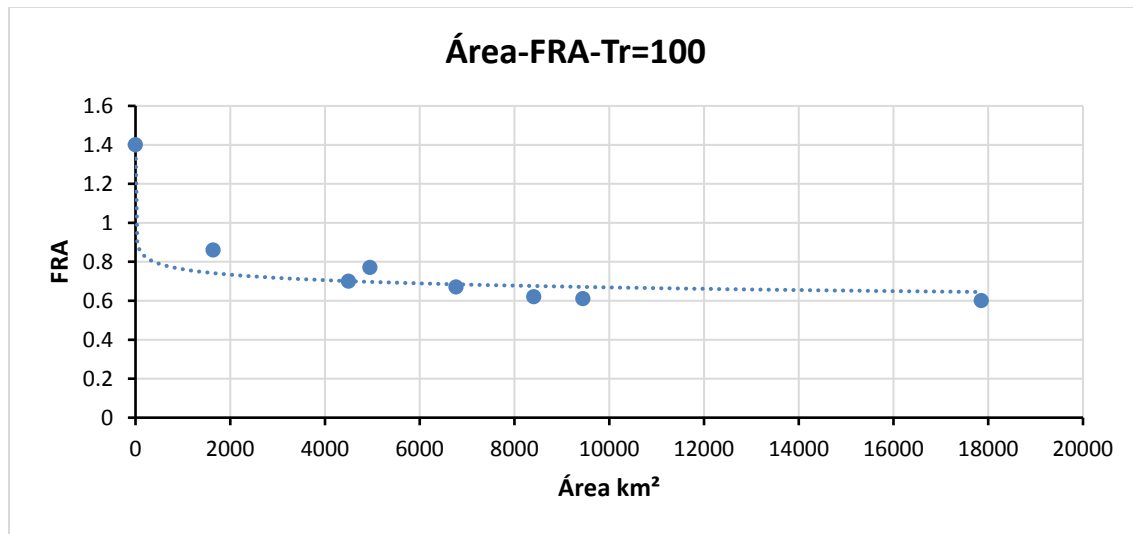
Gráfica 14 FRA para diferentes áreas asociado a 10 años de periodo de retorno en la Cuenca del Río Pánuco.



Gráfica 15 FRA para diferentes áreas asociado a 20 años de periodo de retorno en la Cuenca del Río Pánuco.



Gráfica 16 FRA para diferentes áreas asociado a 50 años de periodo de retorno en la Cuenca del Río Pánuco.



Gráfica 17 FRA para diferentes áreas asociado a 100 años de periodo de retorno en la Cuenca del Río Pánuco.

Las ecuaciones de ajuste que correlaciona el FRA con el área y periodo de retorno en la Cuenca del Río Pánuco son

Medios

$$y = -0,039\ln(x) + 1,0567 \dots \dots \dots (24)$$

Para Tr= 2 años

$$y = -0,034\ln(x) + 1,0460 \dots \dots \dots (25)$$

Para Tr = 5 años

$$y = -0,039\ln(x) + 1,0574 \dots \dots \dots (26)$$

Para Tr = 10 años

$$y = -0,039\ln(x) + 1,0516 \dots \dots \dots (27)$$

Para Tr = 20 años

$$y = -0,04\ln(x) + 1,0482 \dots \dots \dots (28)$$

Para Tr = 50 años

$$y = -0,04\ln(x) + 1,0446 \dots \dots \dots (29)$$

Para Tr= 100 años

$$y = -0,024\ln(x) + 1,0416 \dots \dots \dots (30)$$

Región hidrológica 30 Grijalva-Usumacinta.

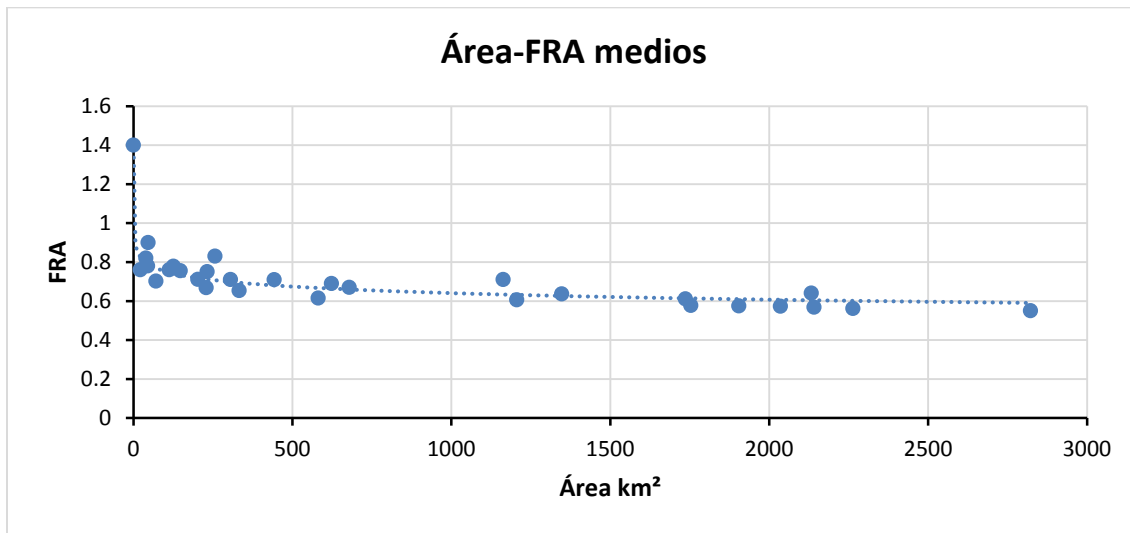
Sánchez et al (2015), realizaron el cálculo de los FRA para la Región Hidrológica 30 Grijalva-Usumacinta como proyecto de investigación en el Posgrado de Ingeniería, UNAM, en el trabajo titulado “Aplicación de Métodos para la Determinación del Factor de Reducción por Área (FRA)

Región Hidrológica 30". En esta tesis se muestran los resultados obtenidos por Sánchez et al en la tabla 21, en la cual, se presentan los FRA medios y los FRA asociados a distintos de periodo de retorno. Cabe mencionar que, de las 29 áreas de círculos y elipses usadas en este estudio, los autores presentan en 8 de ellas las extrapolaciones únicamente para 10, 50 y 100 años, mientras que, para las 21 áreas restantes, se presentas extrapolaciones para 2, 5, 10, 50 y 100 años de periodo de retorno. Las gráficas 18 a 23, muestran las relaciones Área-FRA de la tabla 21.

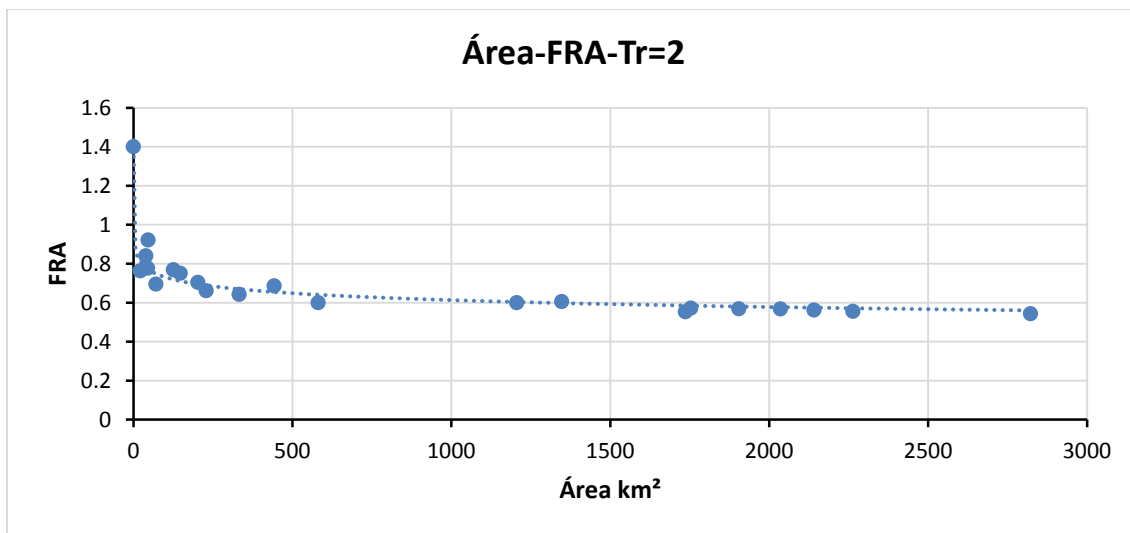
Área km ²	FRA medios	Tr=2 años	Tr=5 años	Tr=10 años	Tr=50 años	Tr=100 años
0.00	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
112.58	0.76			0.9230	0.99	1
232.13	0.75			0.8541	0.92	0.93
256.59	0.83			0.8445	0.85	0.85
305.32	0.71			0.8275	0.87	0.88
623.07	0.69			0.7651	0.89	0.93
679.14	0.67			0.7639	0.86	0.89
1163.28	0.71			0.8603	0.92	0.94
2132.78	0.64			0.6852	0.7	0.71
44.55	0.78	0.7768	0.8323	0.8573	0.8946	0.9059
39.02	0.82	0.8399	0.8795	0.8501	0.7605	0.7379
21.45	0.76	0.7624	0.8220	0.8504	0.895	0.909
46	0.90	0.9214	0.9741	0.9106	0.909	0.9094
147.39	0.76	0.7501	0.7409	0.7426	0.7183	0.7122
442.62	0.71	0.6853	0.7249	0.7929	0.9797	1.0388
202.84	0.71	0.7032	0.72195	0.7242	0.7393	0.743
70.99	0.70	0.6943	0.7443	0.7694	0.8108	0.8243
125.62	0.78	0.7686	0.8432	0.8351	0.8371	0.8391
1205.78	0.61	0.5996	0.6330	0.6510	0.6825	0.6934
228.98	0.67	0.6611	0.6927	0.7089	0.7362	0.7453
581.09	0.62	0.5989	0.6065	0.6101	0.6156	0.6173
1347.54	0.64	0.6049	0.6699	0.7614	0.7961	0.8012
332.65	0.65	0.6417	0.6858	0.7098	0.752	0.766
1736.35	0.61	0.5521	0.6935	0.7943	0.8265	0.8301
1753.58	0.58	0.5717	0.6205	0.6444	0.6828	0.6951
1904.79	0.57	0.5683	0.6175	0.6424	0.6836	0.6971
2035.62	0.57	0.5669	0.6080	0.2940	0.6657	0.6777

2141.19	0.57	0.5617	0.6154	0.6429	0.689	0.7043
2263.47	0.56	0.5545	0.6072	0.6349	0.6819	0.6977
2822.52	0.55	0.5422	0.5896	0.6147	0.6577	0.6722

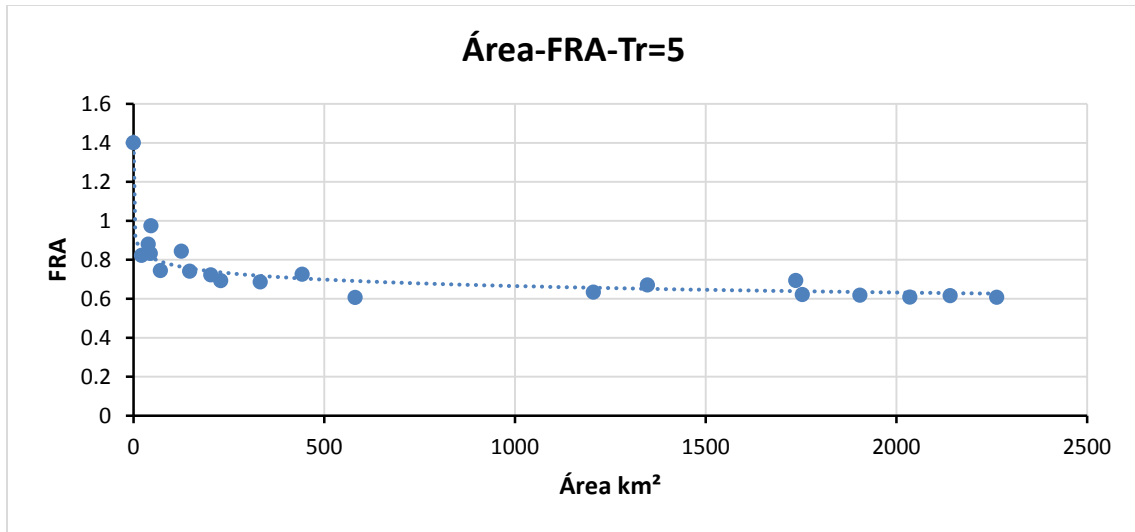
Tabla 21 . FRA medios y FRA asociados a 2,5,10,50 y 100 años de periodo de retorno para diferentes áreas en la Región Hidrológica 30 Grijalva-Usumacinta



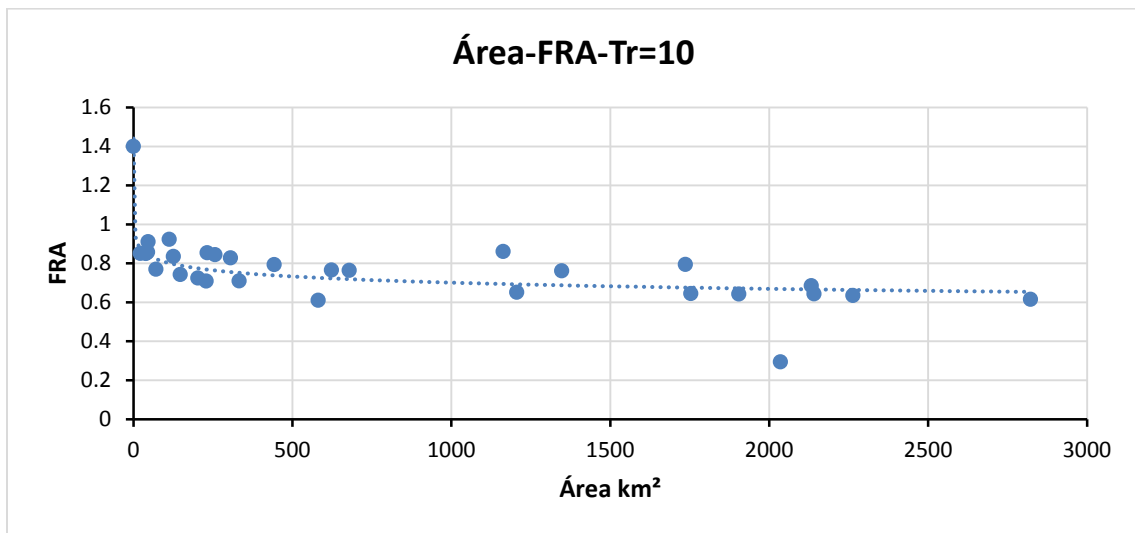
Gráfica 18 FRA medios para distintas áreas en la Región Hidrológica 30 Grijalva-Usumacinta



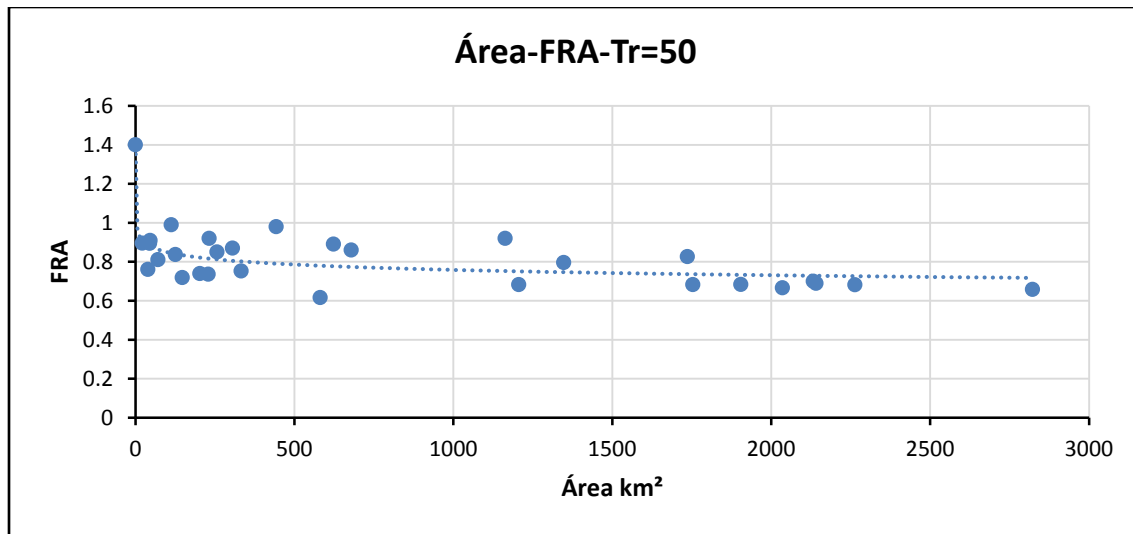
Gráfica 19 FRA para diferentes áreas asociado a 2 años de periodo de retorno en la Región Hidrológica 30 Grijalva-Usumacinta.



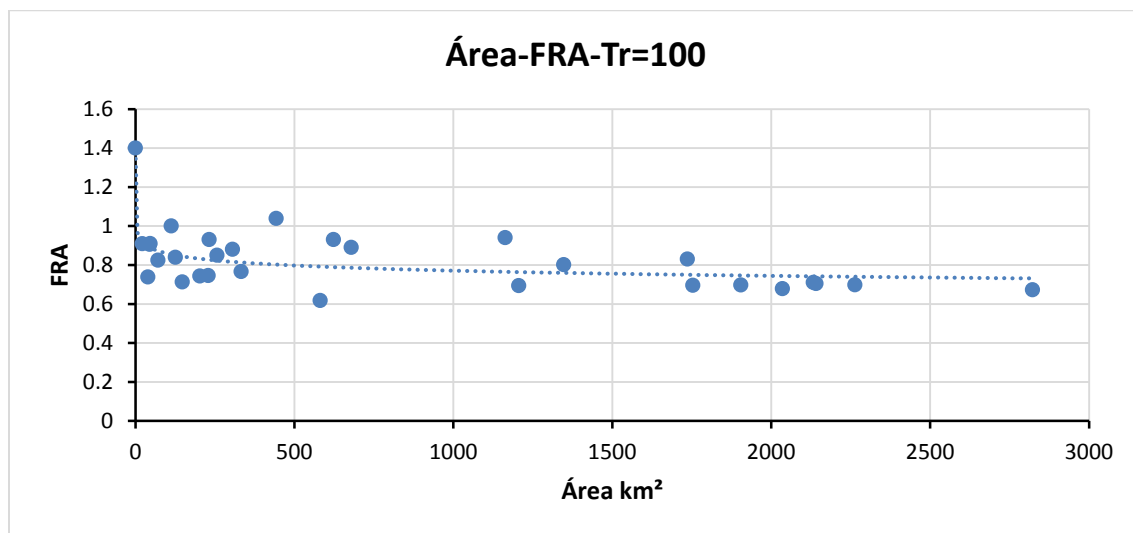
Gráfica 20 FRA para diferentes áreas asociado a 5 años de periodo de retorno en la Región Hidrológica 30 Grijalva-Usumacinta.



Gráfica 21 FRA para diferentes áreas asociado a 10 años de periodo de retorno en la Región Hidrológica 30 Grijalva-Usumacinta.



Gráfica 22 FRA para diferentes áreas asociado a 50 años de periodo de retorno en la Región Hidrológica 30 Grijalva-Usumacinta.



Gráfica 23 FRA para diferentes áreas asociado a 100 años de periodo de retorno en la Región Hidrológica 30 Grijalva-Usumacinta

Las ecuaciones de ajuste que correlaciona el FRA con el área y periodo de retorno en la Región Hidrológica 30 Grijalva-Usumacinta son

Medios

$$y = -0,048 \ln(x) + 0,9755 \dots \dots \dots (31)$$

Para Tr= 2 años

$$y = -0,048 \ln(x) + 0,9755 \dots \dots \dots (32)$$

Para Tr = 5 años

$$y = -0,048 \ln(x) + 0,9944 \dots \dots \dots (33)$$

Para $Tr = 10$ años

$$y = -0,046 \ln(x) + 1,0181 \dots \dots \dots (34)$$

Para $Tr = 50$ años

$$y = -0,04 \ln(x) + 1,0313 \dots \dots \dots (35)$$

Para $Tr = 100$ años

$$y = -0,038 \ln(x) + 1,0358 \dots \dots \dots (36)$$

Región hidrológica 19 Costa Grande

Otras de las regiones a las cuales se les ha realizado el cálculo de los FRA es la Región Hidrológica 19 Costa Grande. La obtención de los FRA fue hecha por Canavese et al. (2015) en su trabajo “Estimación de Factores de Reducción por Área (FRA) en Región Hidrológica 19 (RH19)” como proyecto de investigación en el Posgrado de Ingeniería, UNAM.

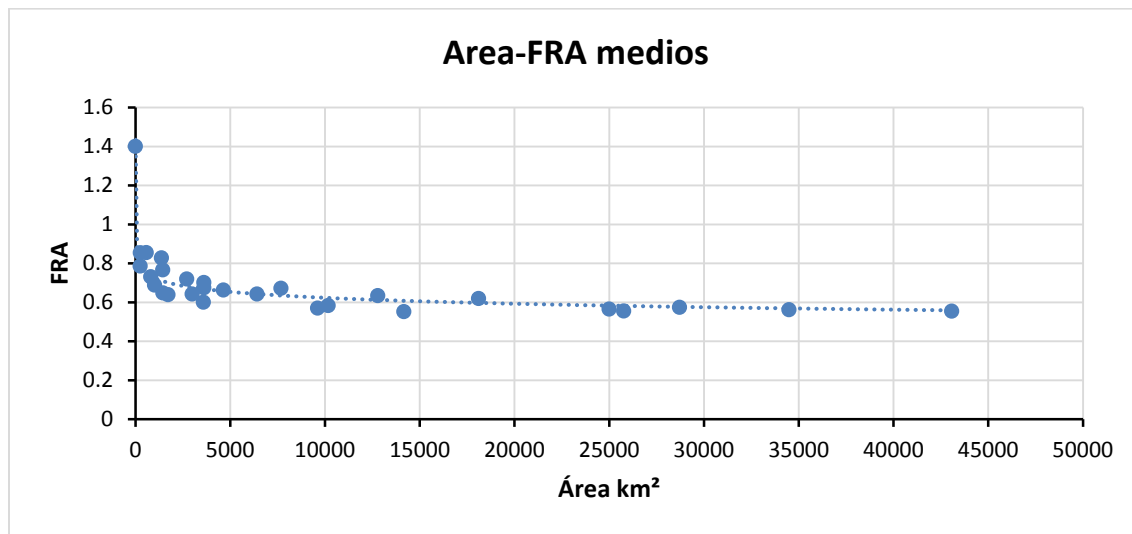
Como parte de la actualización de los FRA para la república mexicana, esta tesis muestra los resultados obtenidos por Canavese et al a fin de obtener las gráficas y las ecuaciones que correlacionan los FRA asociados a distintos periodos de retorno con las áreas de esta región.

En la tabla 22 se muestran FRA medios y los FRA asociados a 10, 50 y 100 años de periodo de retorno. En las gráficas 24 a 27, se muestra la relación Área-FRA de la tabla 22.

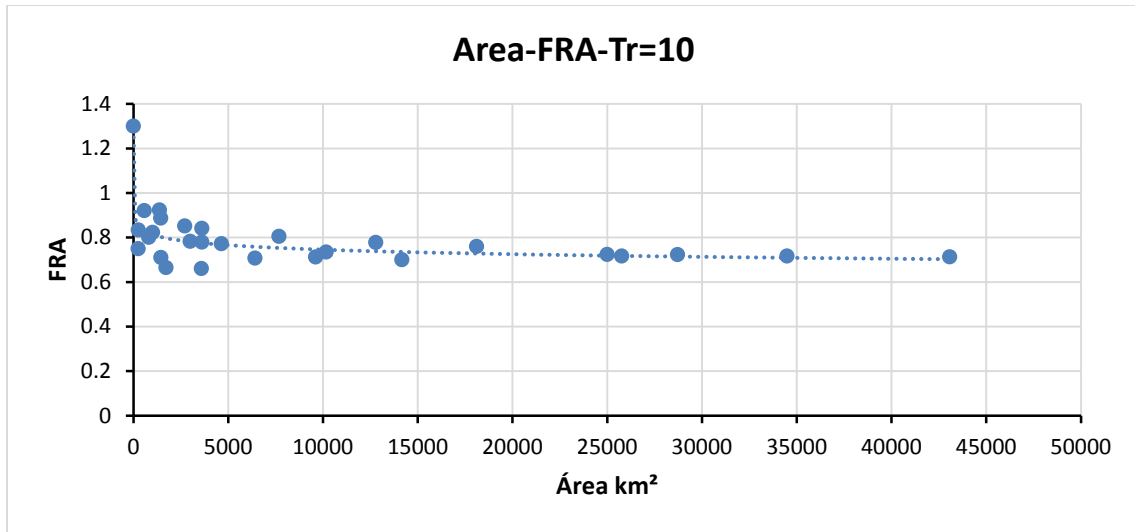
Área (km ²)	FRA medios	Tr=10 años	Tr=50 años	Tr=100 años
0.0	1.4	1.3	1.3	1.3
255.5	0.786	0.7494	0.9198	0.8757
258.1	0.854	0.8337	0.819	0.8355
573.4	0.855	0.9206	0.9349	0.9387
808.6	0.731	0.8004	0.9287	0.9553
1012.6	0.688	0.8226	0.8857	0.8971
1374.5	0.828	0.9237	0.8381	0.8112
1437.7	0.766	0.8868	0.9362	0.9505
1450.8	0.648	0.7097	0.8722	0.8374
1721.6	0.639	0.6648	0.6803	0.685
2704.3	0.719	0.8515	0.9053	0.921
2998.6	0.642	0.7822	0.7761	0.7696
3584.1	0.6	0.6603	0.8051	0.8606
3612	0.701	0.8406	0.9201	0.9394
3615.4	0.674	0.7786	0.9635	1.0271
4638	0.663	0.7719	0.9323	0.9645

6416.2	0.642	0.7074	0.8624	0.893
7682.3	0.672	0.8049	0.8604	0.8767
9617.5	0.57	0.7121	0.7797	0.8003
10168.8	0.583	0.7347	0.7579	0.7605
12790.6	0.634	0.7777	0.8366	0.8539
14163.1	0.552	0.6997	0.7641	0.7834
18112	0.619	0.7598	0.818	0.8352
24997	0.565	0.7237	0.7961	0.816
25769.4	0.555	0.7161	0.784	0.8043
28716.5	0.574	0.7229	0.7885	0.8083
34486.2	0.562	0.7161	0.784	0.8043
43072.2	0.554	0.7128	0.7833	0.8032

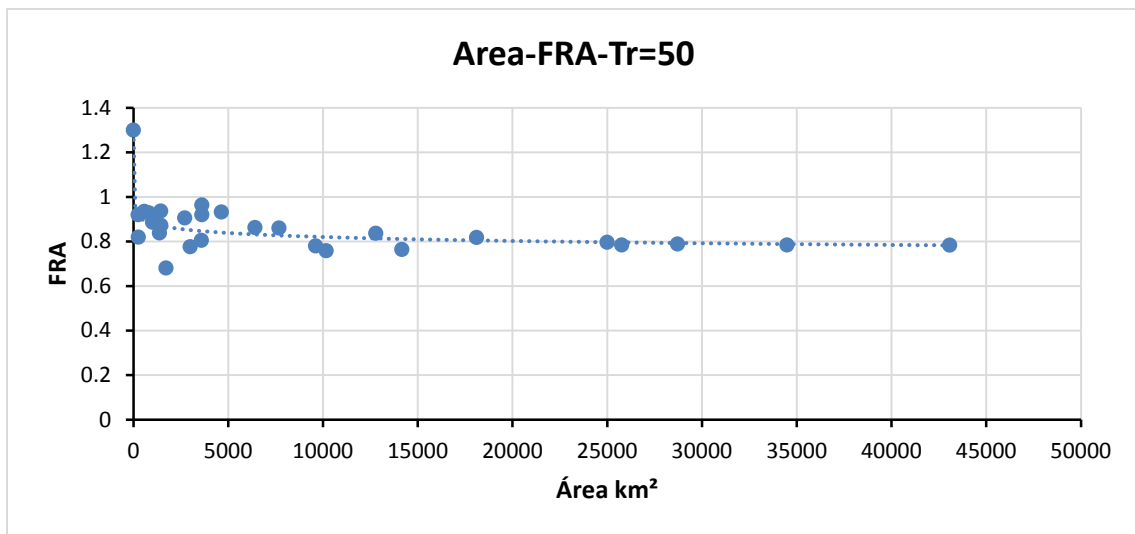
Tabla 22 FRA medios y FRA asociados a 2,5,10,50 y 100 años de periodo de retorno para diferentes áreas en la Región Hidrológica 19 Costa Grande.



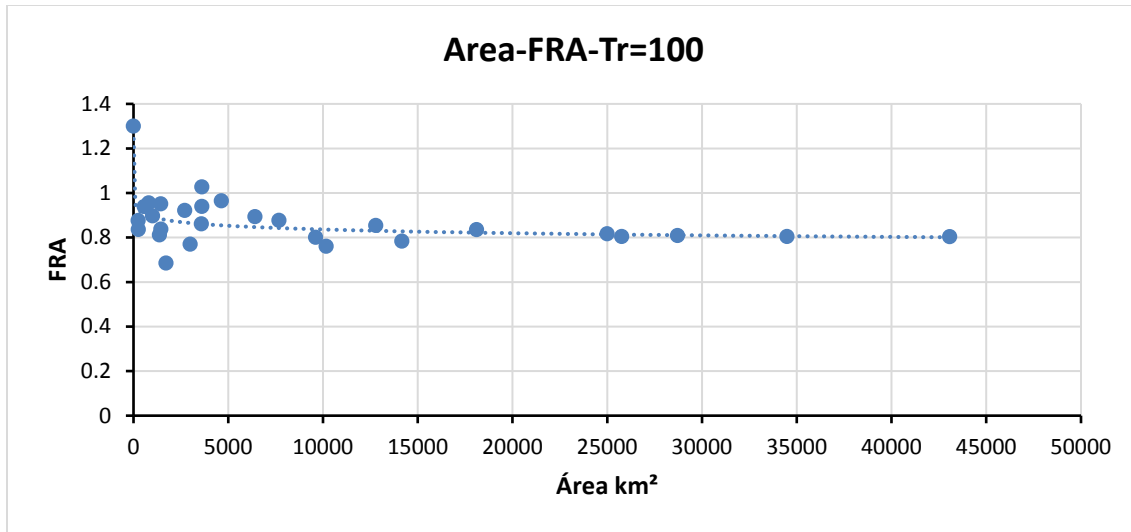
Gráfica 24 FRA medios para distintas áreas en la Región Hidrológica 19 Costa Grande.



Gráfica 25 FRA para diferentes áreas asociado a 10 años de periodo de retorno en la Región Hidrológica 19 Costa Grande.



Gráfica 26 FRA para diferentes áreas asociado a 50 años de periodo de retorno en la Región Hidrológica 19 Costa Grande.



Gráfica 27 FRA para diferentes áreas asociado a 100 años de periodo de retorno en la Región Hidrológica 19 Costa Grande.

Las ecuaciones de ajuste que correlaciona el FRA con el área y periodo de retorno en la Región Hidrológica 19 Costa Grande son

Medios

$$y = -0,044 \ln(x) + 1,0291 \dots \dots \dots (37)$$

Para Tr = 10 años

$$y = -0,029 \ln(x) + 1,0161 \dots \dots \dots (38)$$

Para Tr = 50 años

$$y = -0,026 \ln(x) + 1,0574 \dots \dots \dots (39)$$

Para Tr= 100 años

$$y = -0,024 \ln(x) + 1,0583 \dots \dots \dots (40)$$

Región hidrológica 25 San Fernando-Soto la Marina y Región hidrológica 26 Río Pánuco

Acuña et al (2015), en su trabajo “Factor de Reducción por Área Regiones Hidrológicas: 25.- San Fernando-Soto la Marina 26.- Río Pánuco”, realizaron el cálculo de los FRA para estas dos regiones hidrológicas.

De igual manera que en las secciones anteriores, en este trabajo se presentan los resultados obtenidos por Acuña et al, a fin de obtener las gráficas y las ecuaciones que correlacionen los FRA con el área en esta zona de estudio.

Primeramente, se muestran en las tablas 23 y 24 los resultados para Área-FRA medios y Área FRA extrapolados para la Región Hidrológica Soto-la Marina. En seguida se presentan las gráficas Área-FRA medios y Área FRA extrapolados (gráficas 28 a 34)

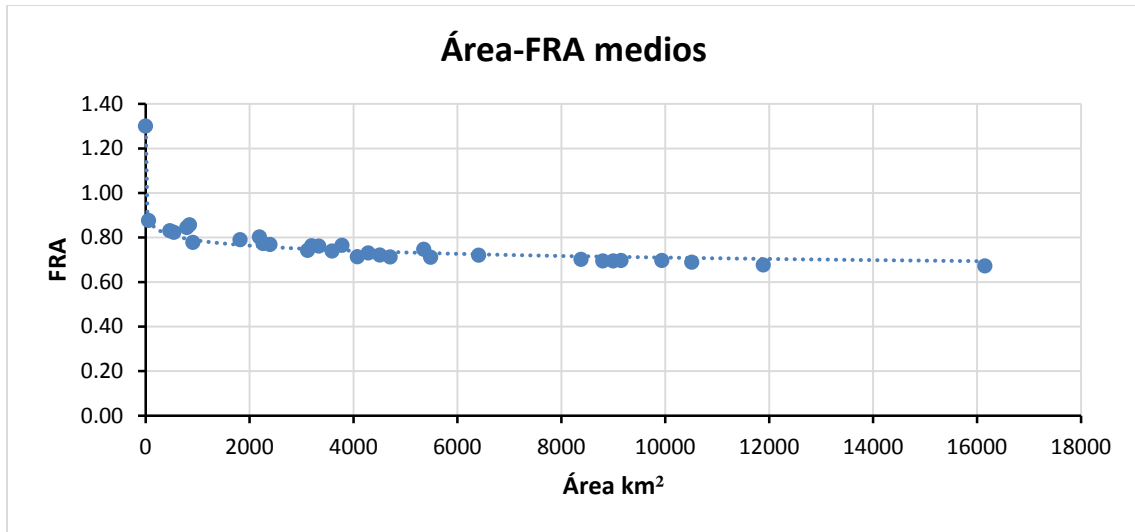
Área km ²	FRA medios
0.00	1.30
2190.40	0.80
3333.18	0.76
5353.20	0.75
8380.06	0.70
9000.77	0.69
9935.51	0.70
10511.99	0.69
16153.53	0.67
792.53	0.84
543.14	0.82
1819.39	0.79
3196.10	0.76
466.64	0.83
910.43	0.78
2396.07	0.77
4285.32	0.73
8799.67	0.69
11886.88	0.68
58.84	0.88
3780.27	0.76
2262.60	0.77
3117.37	0.74
4706.14	0.71
4076.59	0.71
5487.40	0.71
6409.92	0.72
9150.64	0.70
845.01	0.86
3589.80	0.74

4506.78	0.72
---------	------

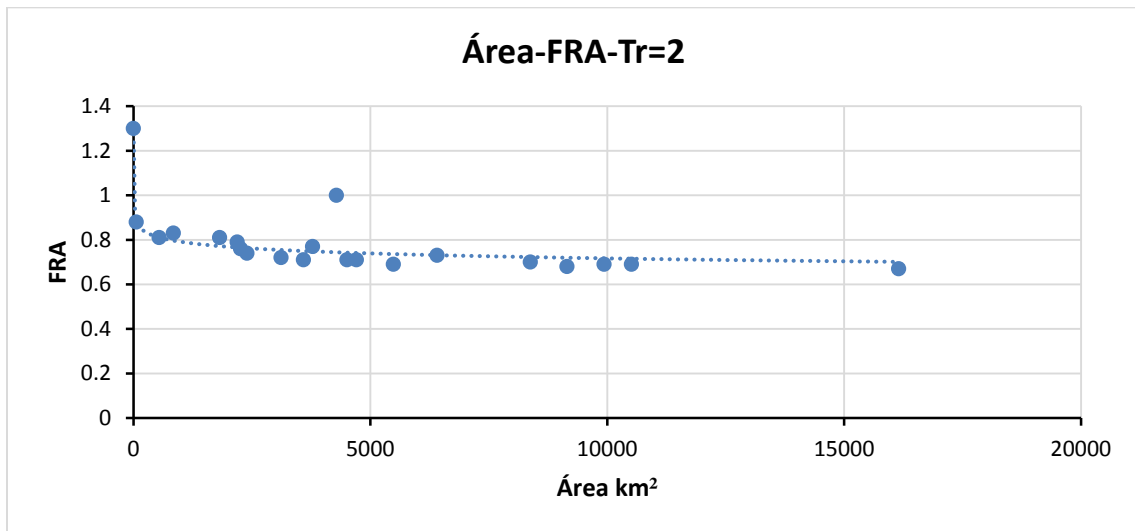
Tabla 23 FRA medios para diferentes áreas en la Región Hidrológica 25 Soto-La Marina.

Área	TR=2	TR=5	TR=10	TR=20	TR=50	TR=100
km ²	años	años	años	años	años	años
0.00	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3
58.84	0.88	0.90	0.91	0.92	0.93	0.94
543.14	0.81	0.85	0.89	0.93	0.96	0.98
2190.40	0.79	0.85	0.85	0.81	0.78	0.77
1819.39	0.81	0.86	0.91	0.96	1.00	1.01
2396.07	0.74	0.82	0.94	0.97	0.99	1.00
3589.80	0.71	0.85	0.92	0.93	0.94	0.95
4706.14	0.71	0.79	0.86	0.91	0.95	0.97
4285.32	1.00	0.98	1.01	1.02	1.02	1.02
8380.06	0.70	0.81	0.89	0.93	0.96	0.98
5487.40	0.69	0.77	0.84	0.88	0.92	0.94
9150.64	0.68	0.77	0.80	0.85	0.88	0.90
9935.51	0.69	0.81	0.85	0.85	0.86	0.86
16153.53	0.67	0.76	0.81	0.85	0.89	0.91
845.01	0.83	0.89	0.97	0.99	1.01	1.01
3780.27	0.77	0.74	0.76	0.79	0.82	0.83
2262.60	0.76	0.83	0.92	0.96	0.99	1.01
3117.37	0.72	0.84	0.89	0.87	0.85	0.84
4506.78	0.71	0.80	0.86	0.89	0.91	0.92
6409.92	0.73	0.81	0.84	0.86	0.88	0.89
10511.99	0.69	0.80	0.84	0.86	0.88	0.89

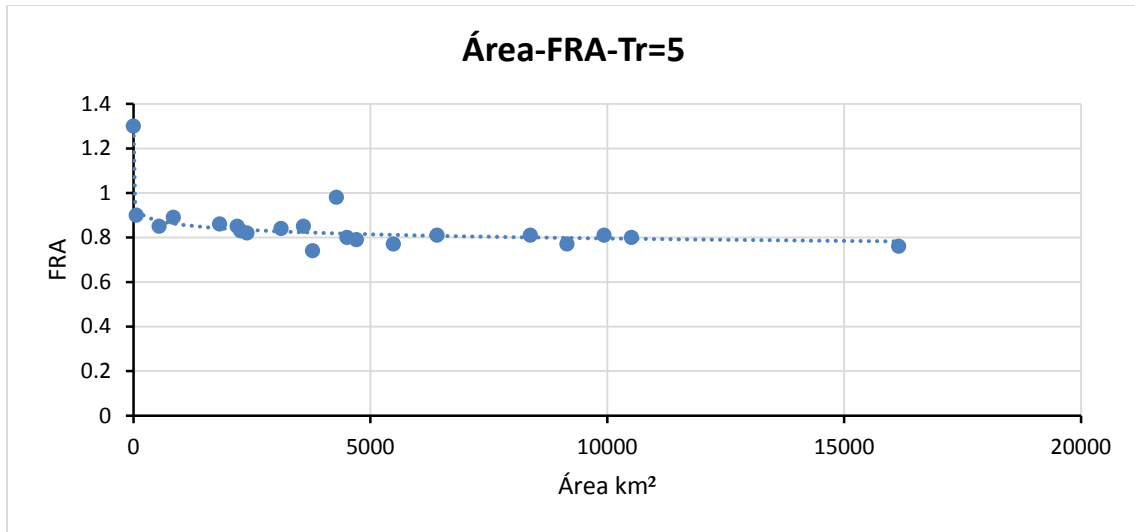
Tabla 24 FRA asociados a 2,5,10,20,50 y 100 años de periodo de retorno para diferentes áreas en la Región Hidrológica 25 Soto-La Marina.



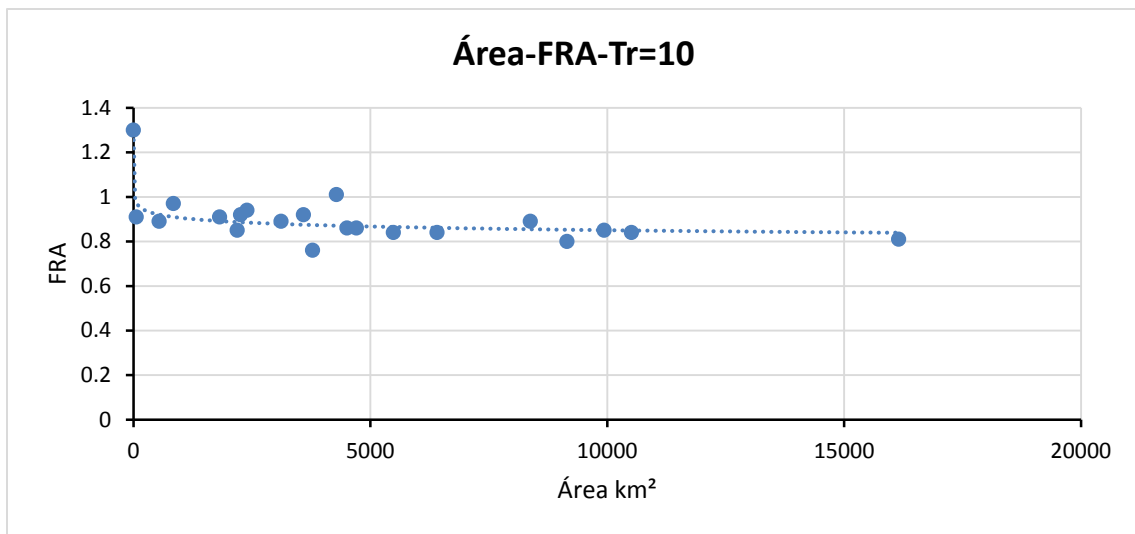
Gráfica 28 FRA medios para distintas áreas en la Región Hidrológica 25 Soto-La Marina.



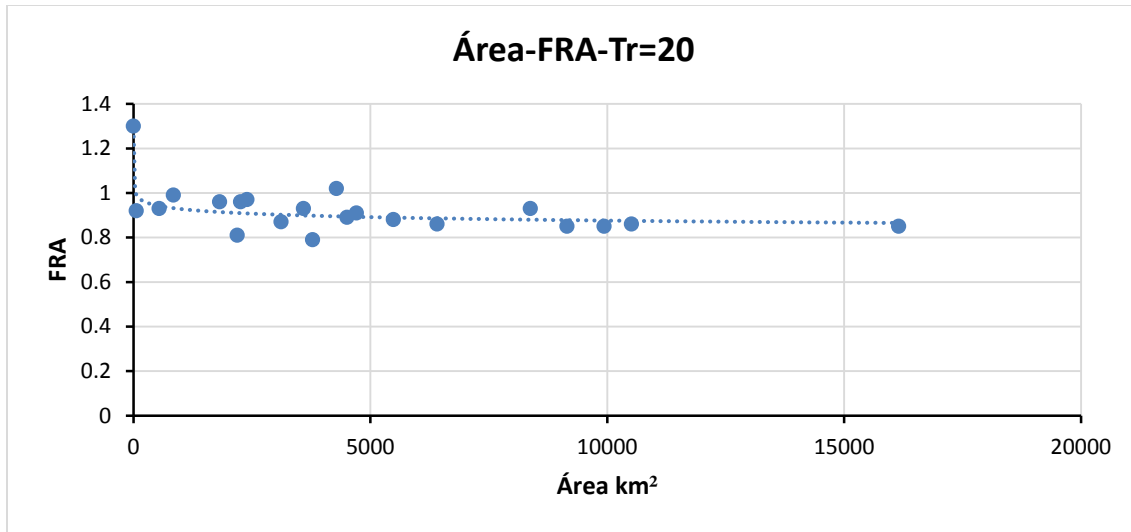
Gráfica 29 FRA para diferentes áreas asociado a 2 años de periodo de retorno en la Región Hidrológica 25 Soto-La Marina.



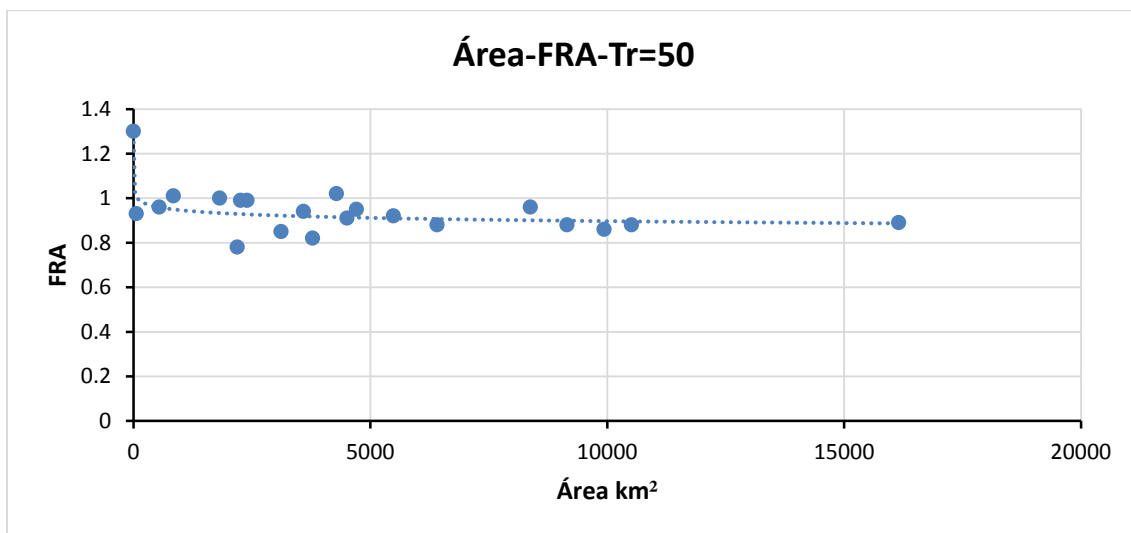
Gráfica 30 FRA para diferentes áreas asociado a 5 años de periodo de retorno en la Región Hidrológica 25 Soto-La Marina.



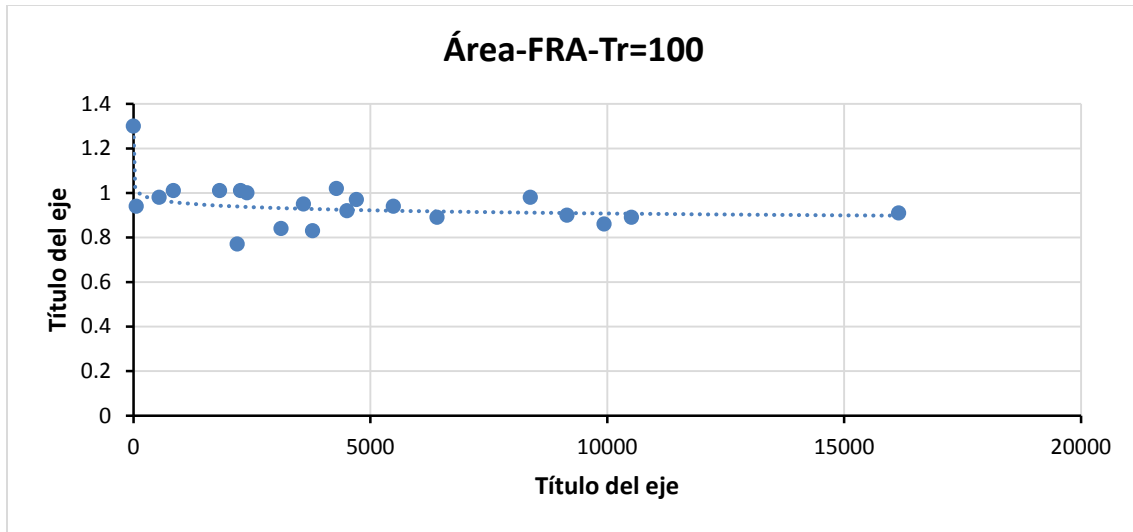
Gráfica 31 FRA para diferentes áreas asociado a 10 años de periodo de retorno en la Región Hidrológica 25 Soto-La Marina.



Gráfica 32 FRA para diferentes áreas asociado a 20 años de periodo de retorno en la Región Hidrológica 25 Soto-La Marina.



Gráfica 33 FRA para diferentes áreas asociado a 50 años de periodo de retorno en la Región Hidrológica 25 Soto-La Marina.



Gráfica 34 FRA para diferentes áreas asociado a 100 años de periodo de retorno en la Región Hidrológica 25 Soto-La Marina.

Las ecuaciones de ajuste que correlaciona el FRA con el área y periodo de retorno en la Región Hidrológica 25 Soto-La Marina son

Medios

$$y = -0,033\ln(x) + 1,0172 \dots \dots \dots (41)$$

Para Tr = 2 años

$$y = -0,032\ln(x) + 1,0143 \dots \dots \dots (42)$$

Para Tr = 5 años

$$y = -0,027\ln(x) + 1,0449 \dots \dots \dots (43)$$

Para Tr = 10 años

$$y = -0,024\ln(x) + 1,072 \dots \dots \dots (44)$$

Para Tr = 20 años

$$y = -0,023\ln(x) + 1,0835 \dots \dots \dots (45)$$

Para Tr = 50 años

$$y = -0,021\ln(x) + 1,0928 \dots \dots \dots (46)$$

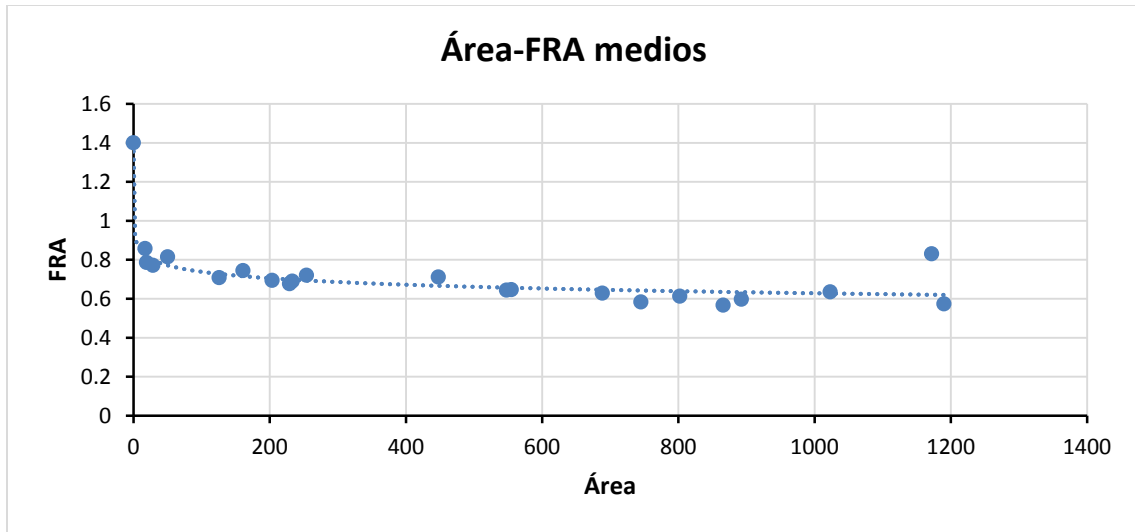
Para Tr= 100 años

$$y = -0,021\ln(x) + 1,0978 \dots \dots \dots (47)$$

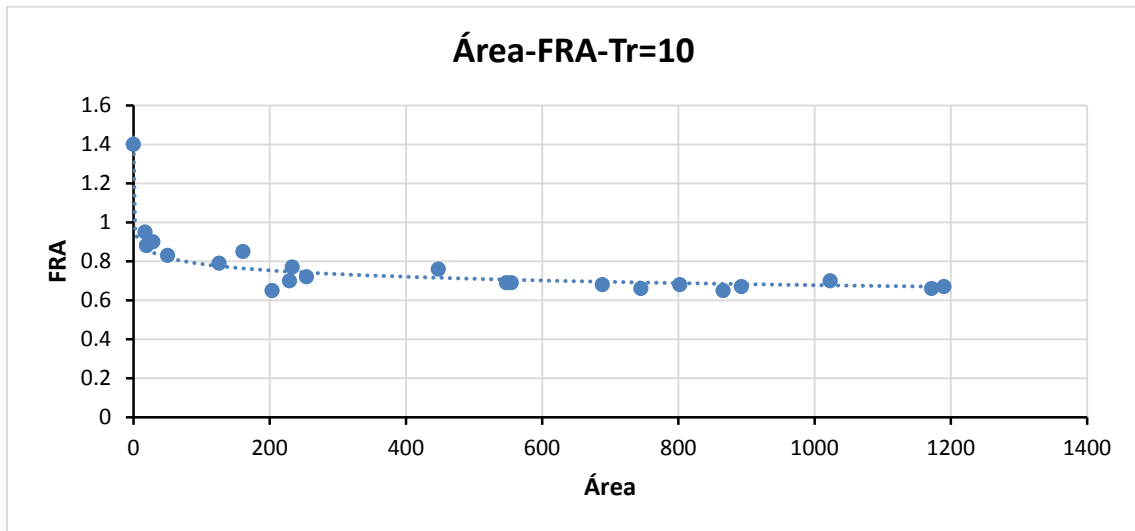
Una vez obtenidas las ecuaciones de ajuste para la Región Hidrológica 30 Soto-La Marina, se realiza el mismo procedimiento para la Región Hidrológica 26 Río Pánuco con los FRA obtenidos en el mismo trabajo de Acuña et al. (2015). La tabla 25 muestra los FRA medios y los FRA para 10,50 y 100 años de periodo de retorno. Las gráficas 35 a 38 presentan la relación Área-FRA con los datos de la tabla 25.

ÁREA	FRA medios	Tr=10	Tr=50	Tr=100
km ²		años	años	años
0,00	1,4	1,4	1,4	1,4
19,18	0,786	0,88	0,94	0,96
28,63	0,771	0,9	0,98	1
125,87	0,708	0,79	0,84	0,86
233,23	0,69	0,77	0,82	0,83
554,89	0,646	0,69	0,71	0,72
744,98	0,583	0,66	0,71	0,73
865,84	0,567	0,65	0,71	0,73
1189,94	0,573	0,67	0,75	0,77
17,16	0,857	0,95	1	1,01
203,53	0,694	0,65	0,63	0,63
254,22	0,72	0,72	0,73	0,73
547,68	0,644	0,69	0,72	0,75
802,18	0,613	0,68	0,73	0,75
50,24	0,815	0,83	0,84	0,85
229,17	0,677	0,7	0,72	0,73
160,90	0,744	0,85	0,92	0,94
688,53	0,628	0,68	0,72	0,74
447,59	0,711	0,76	0,8	0,81
1022,92	0,635	0,7	0,76	0,78
892,50	0,597	0,67	0,73	0,75
1171,97	0,83	0,66	0,72	0,74

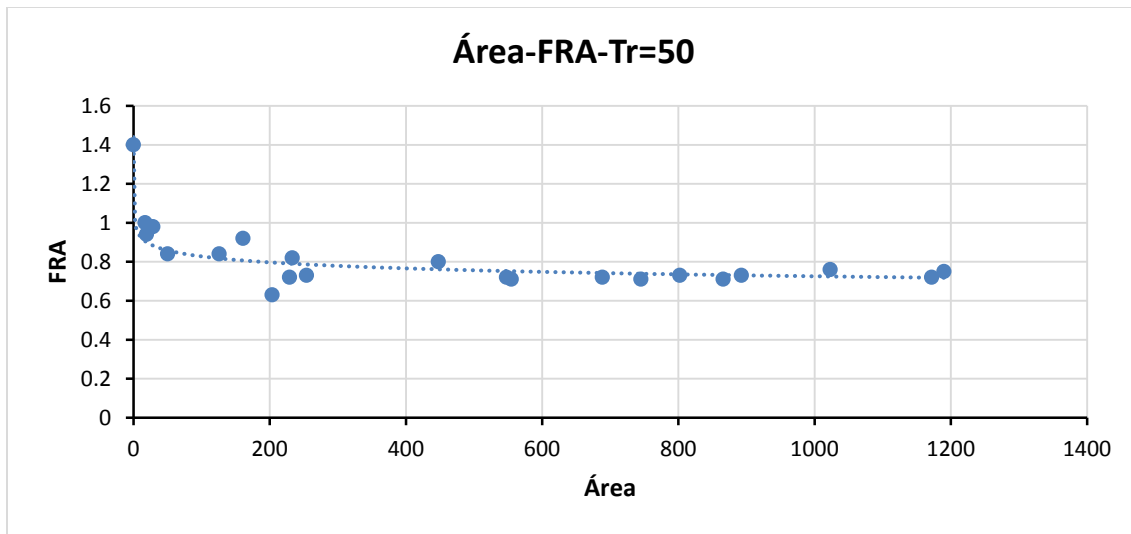
Tabla 25 FRA medios y FRA asociados a 10,50 y 100 años de periodo de retorno para diferentes áreas en la Región Hidrológica 26 Río Pánuco.



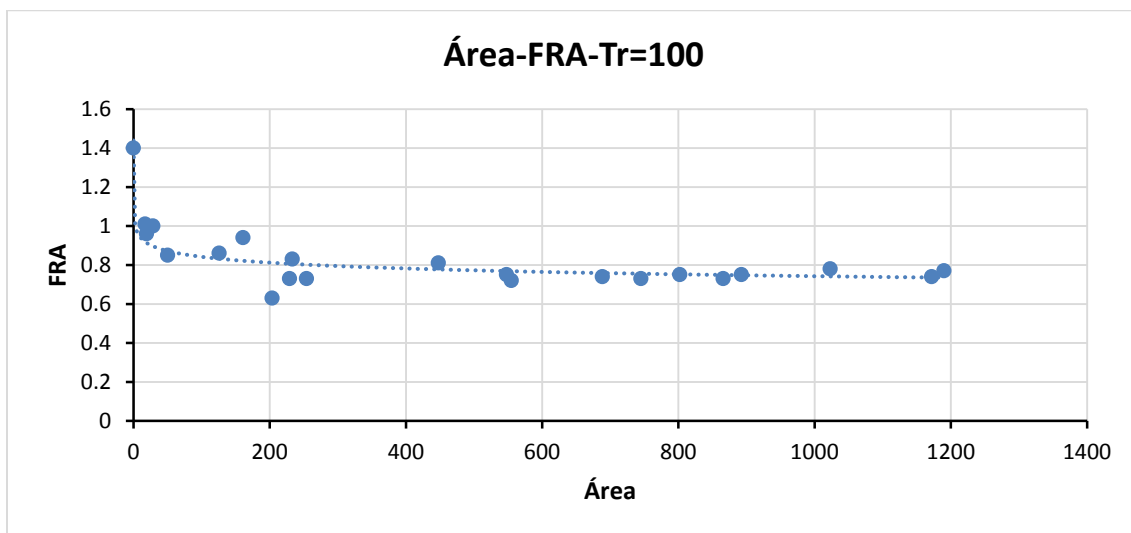
Gráfica 35 FRA medios para distintas áreas en la Región Hidrológica 26 Río Pánuco.



Gráfica 36 FRA para diferentes áreas asociado a 10 años de periodo de retorno en la Región Hidrológica 26 Río Pánuco.



Gráfica 37 FRA para diferentes áreas asociado a 50 años de periodo de retorno en la Región Hidrológica 26 Río Pánuco.



Gráfica 38 FRA para diferentes áreas asociado a 100 años de periodo de retorno en la Región Hidrológica 26 Río Pánuco.

Las ecuaciones de ajuste que correlaciona el FRA con el área y periodo de retorno en la Región Hidrológica 26 Río Pánuco son

Medios

$$y = -0,048 \ln(x) + 0,9587 \dots \dots \dots (48)$$

Para Tr = 10 años

$$y = -0,047 \ln(x) + 1,0027 \dots \dots \dots (49)$$

Para Tr = 50 años

$$y = -0,044 \ln(x) + 1,0316 \dots \dots \dots (50)$$

Para Tr= 100 años

$$y = -0,043 \ln(x) + 1,0412 \dots \dots \dots (51)$$

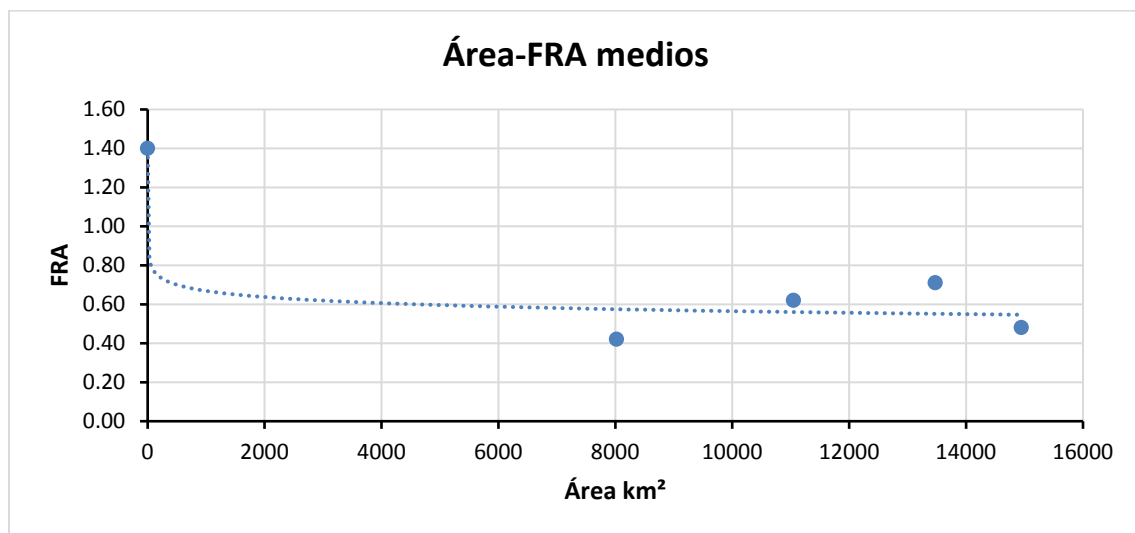
Durango y Tamaulipas

Severiano (2014), realizó el cálculo de los FRA para los estados de Durango y Tamaulipas en su tesis de maestría “Estimación de Factores de Reducción Areal. Aplicación a los Estados de Durango y Tamaulipas”. Con los datos obtenidos por Severiano, en este trabajo se obtienen las gráficas y las ecuaciones de ajuste que correlacionan los FRA con las áreas de estos estados.

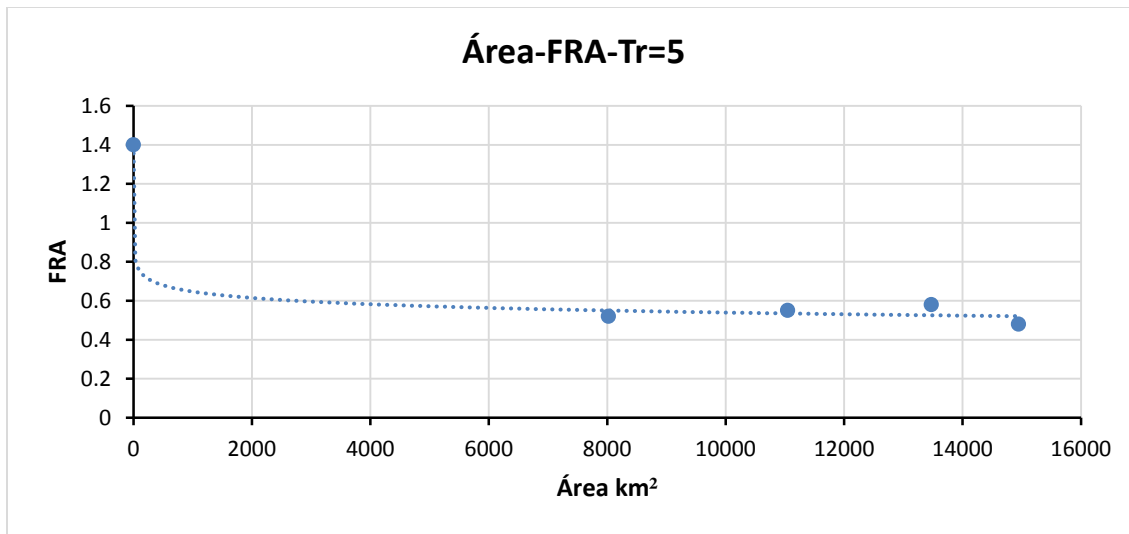
En la tabla 26 y en las gráficas 39 a 45, se presentan los FRA para el estado de Durango

Area km ²	FRA medios	Tr=5 años	Tr=10 años	Tr=50 años	Tr=100 años	Tr=1000 años	Tr=10000 años
0.00	1.40	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
14947	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.47	0.47
13475	0.71	0.58	0.62	0.72	0.74	0.79	0.83
11048	0.62	0.55	0.57	0.62	0.63	0.65	0.67
8022	0.42	0.52	0.49	0.41	0.39	0.36	0.34

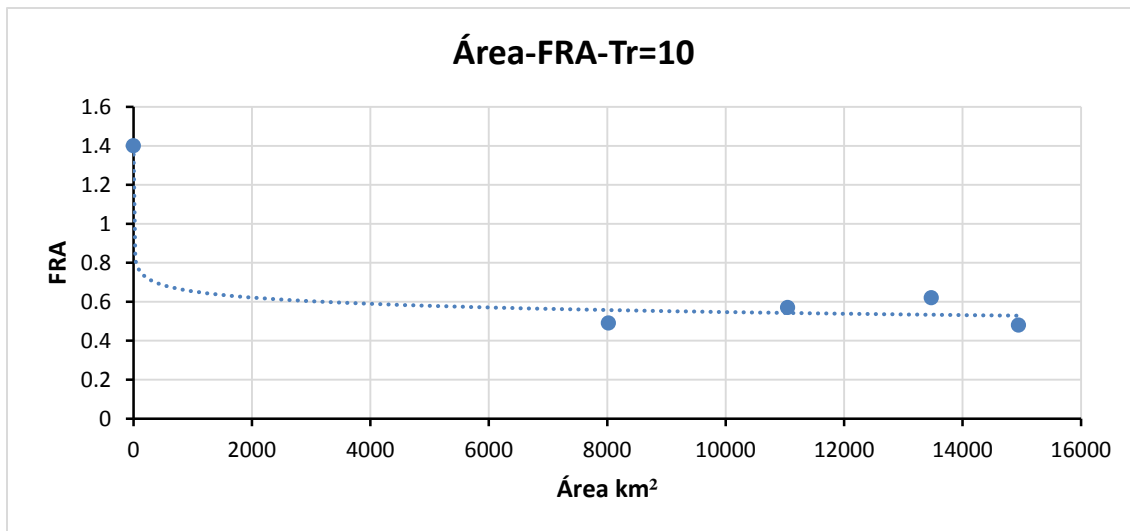
Tabla 26 FRA medios y FRA asociados a 5,10,50,100,1000 y 10000 años de periodo de retorno para diferentes áreas en el estado de Durango.



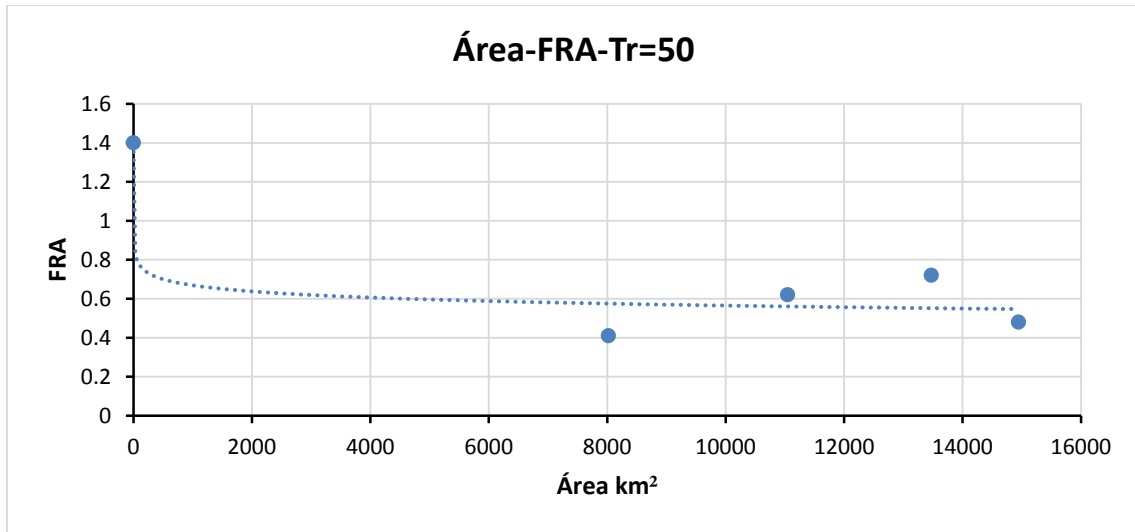
Gráfica 39 FRA medios para distintas áreas en el estado de Durango.



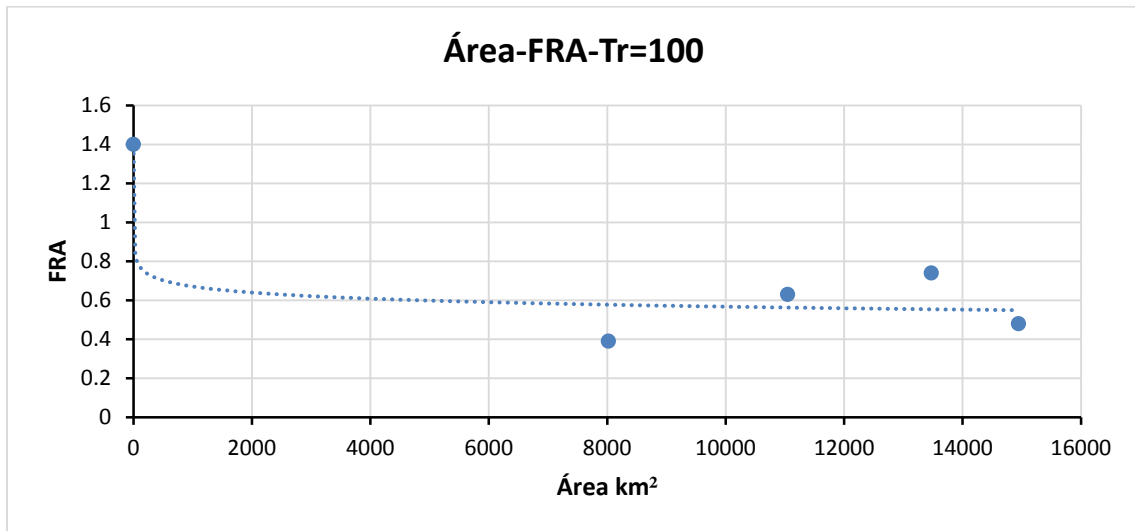
Gráfica 40 FRA para diferentes áreas asociado a 5 años de periodo de retorno en el estado de Durango.



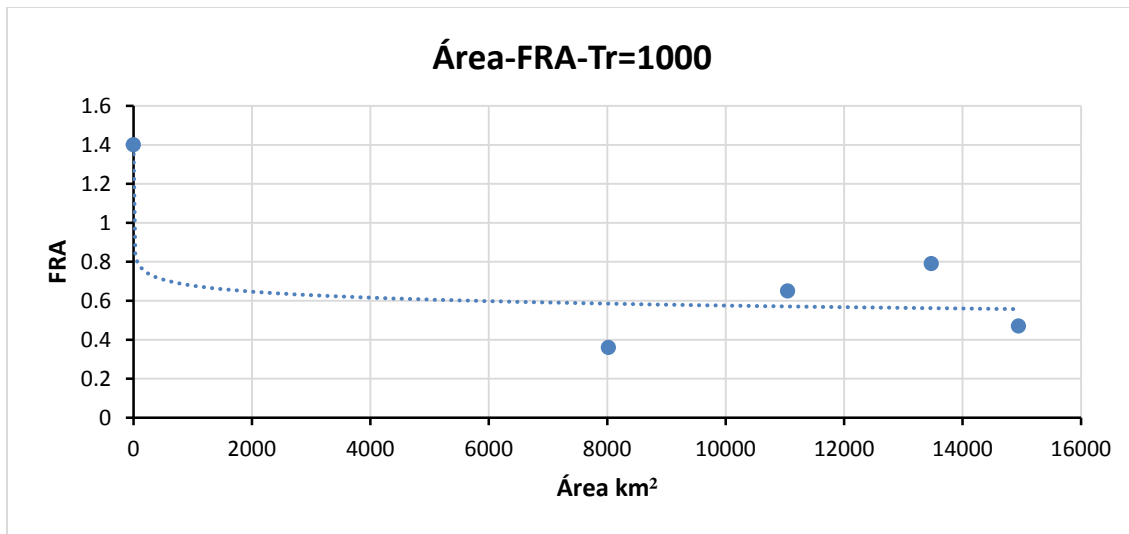
Gráfica 41 FRA para diferentes áreas asociado a 10 años de periodo de retorno en el estado de Durango.



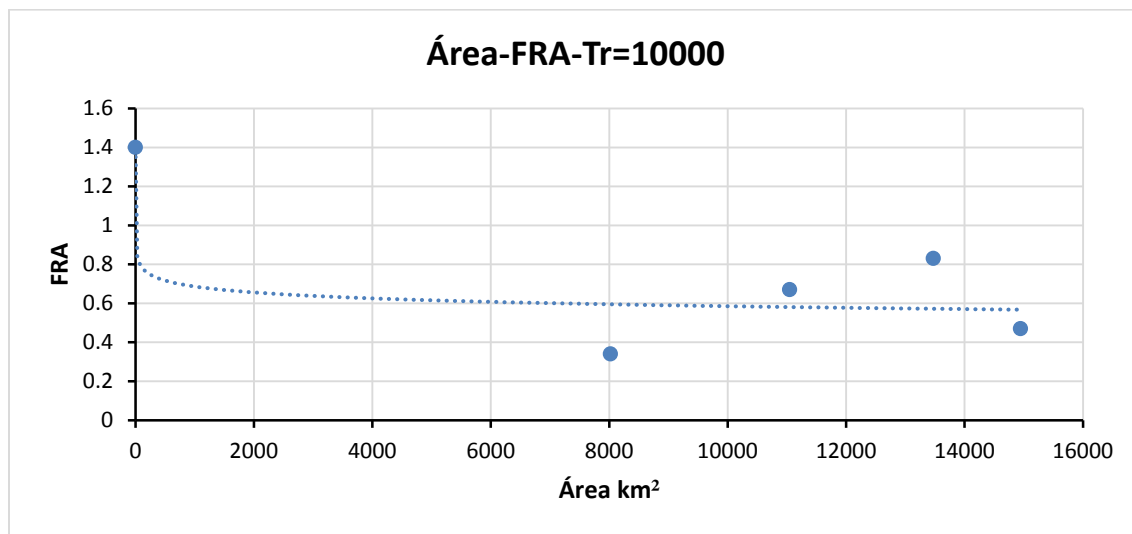
Gráfica 42 FRA para diferentes áreas asociado a 50 años de periodo de retorno en el estado de Durango.



Gráfica 43 FRA para diferentes áreas asociado a 100 años de periodo de retorno en el estado de Durango.



Gráfica 44 FRA para diferentes áreas asociado a 1000 años de periodo de retorno en el estado de Durango.



Gráfica 45 FRA para diferentes áreas asociado a 10000 años de periodo de retorno en el estado de Durango.

Las ecuaciones de ajuste que correlaciona el FRA con el área y periodo de retorno el estado de Durango son

Medios

$$y = -0,045 \ln(x) + 0,9808 \dots \dots \dots (52)$$

Para Tr = 5 años

$$y = -0,047 \ln(x) + 0,9695 \dots \dots \dots (53)$$

Para Tr = 10 años

$$y = -0,046 \ln(x) + 0,9729 \dots \dots \dots (54)$$

Para $Tr = 50$ años

$$y = -0,045 \ln(x) + 0,9807 \dots \dots \dots (55)$$

Para $Tr = 100$ años

$$y = -0,045 \ln(x) + 0,9817 \dots \dots \dots (56)$$

Para $Tr = 1000$ años

$$y = -0,045 \ln(x) + 0,9851 \dots \dots \dots (57)$$

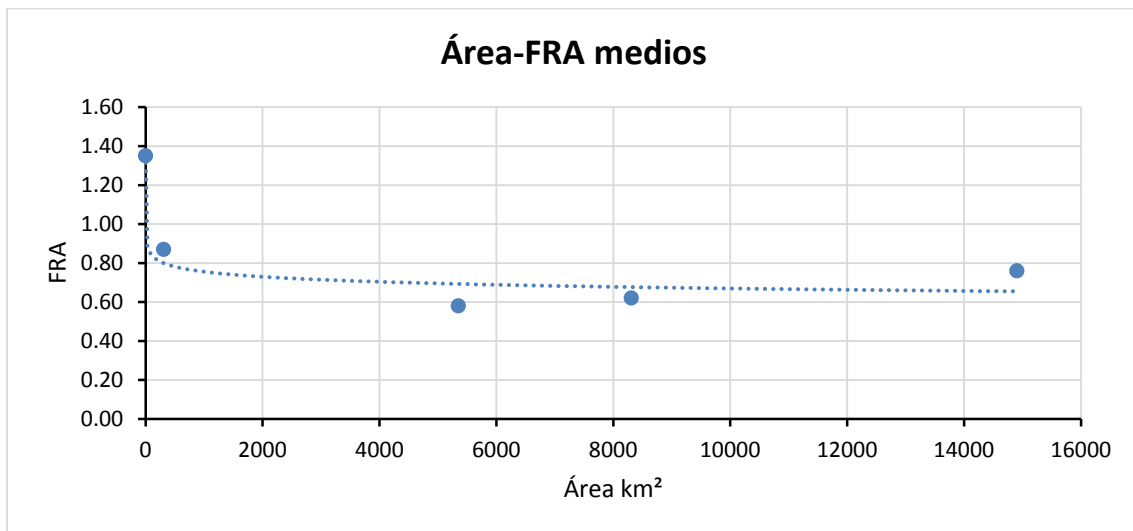
Para $Tr = 10000$ años

$$y = -0,044 \ln(x) + 0,9898 \dots \dots \dots (58)$$

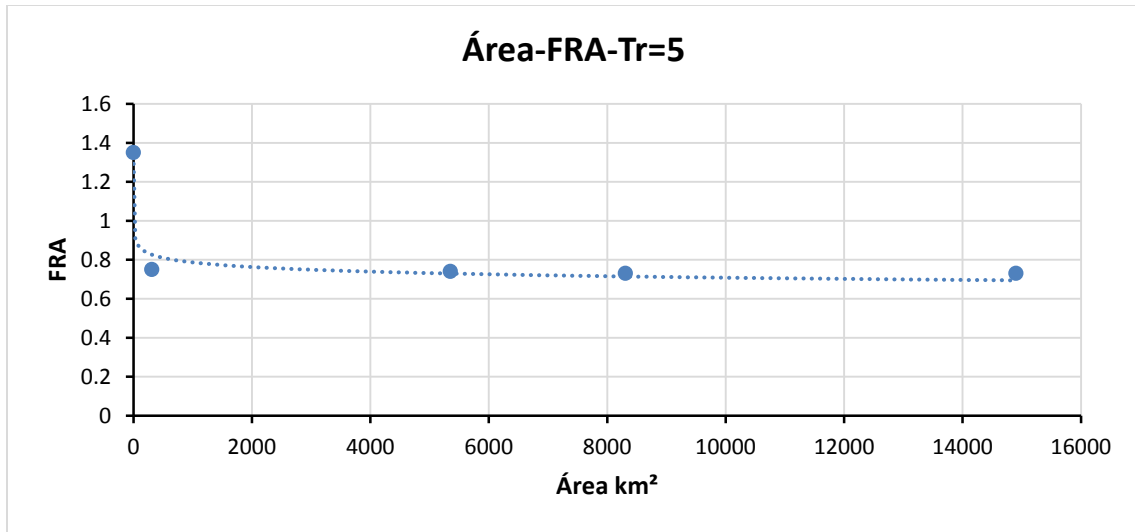
Asimismo, de la tesis de Marcela Severiano se toman los FRA obtenidos para el estado de Tamaulipas (tabla 27) a fin de obtener las gráficas y ecuaciones de ajuste para los FRA medios y los FRA extrapolados a 5,10,50,100,1000 y 10000 años de periodo de retorno (gráficas 46 a 52).

Área km ²	FRA medios	Tr=5 años	Tr=10 años	Tr=50 años	Tr=100 años	Tr=1000 años	Tr=10000 años
0.00	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35
14904	0.76	0.73	0.75	0.77	0.77	0.76	0.76
8309	0.62	0.73	0.66	0.61	0.59	0.56	0.54
5351	0.58	0.74	0.66	0.57	0.55	0.5	0.46
309	0.87	0.75	0.82	0.9	0.91	0.93	0.94

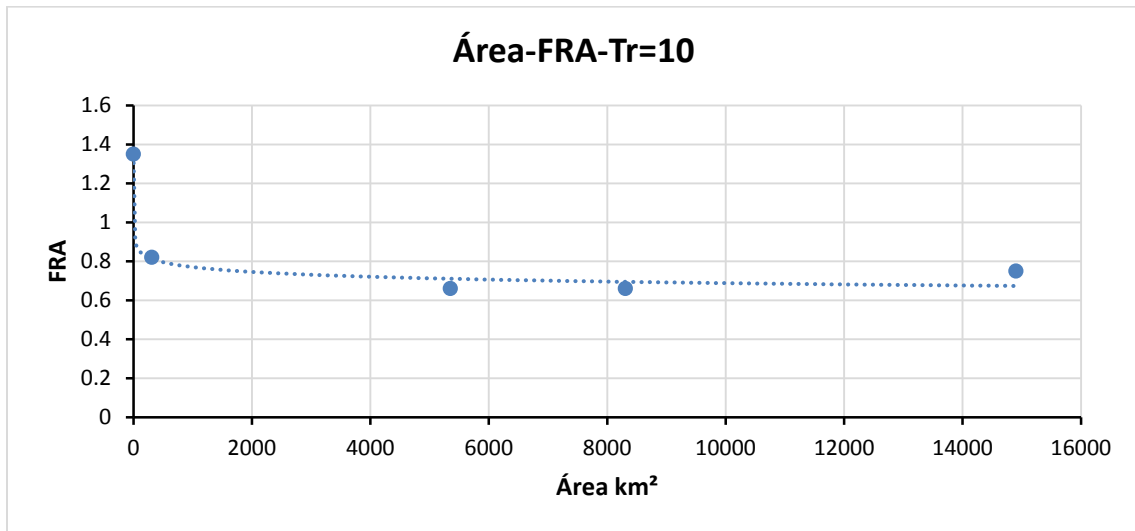
Tabla 27 FRA medios y FRA asociados a 5,10,50,100,1000 y 10000 años de periodo de retorno para diferentes áreas en el estado de Tamaulipas.



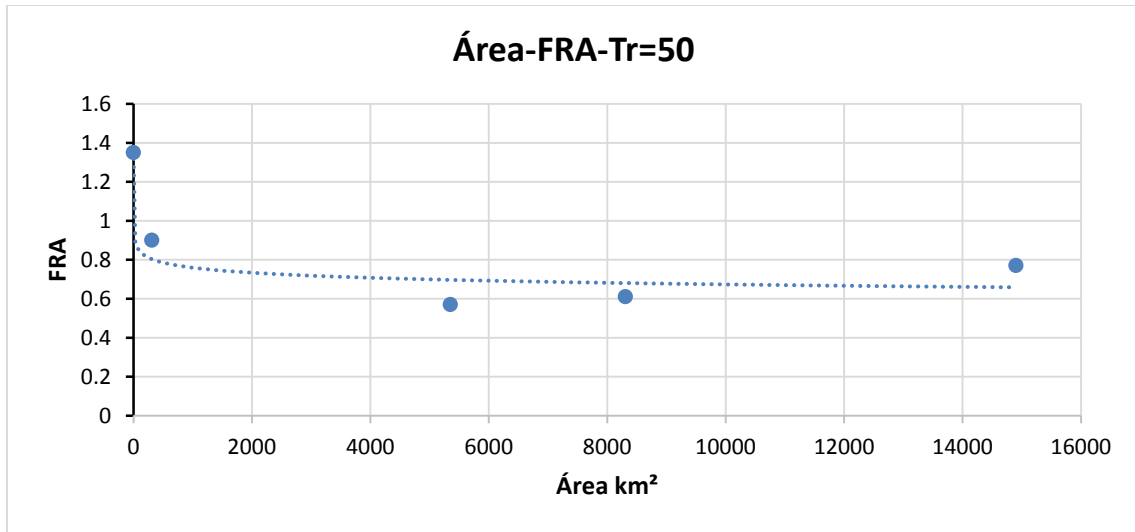
Gráfica 46 FRA medios para distintas áreas en el estado de Tamaulipas.



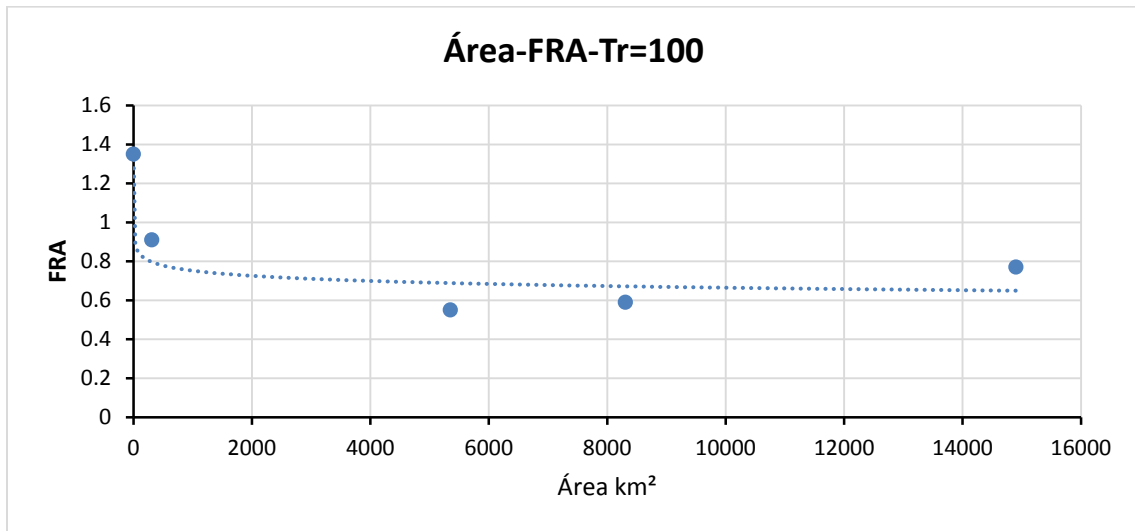
Gráfica 47 FRA para diferentes áreas asociado a 5 años de periodo de retorno en el estado de Tamaulipas.



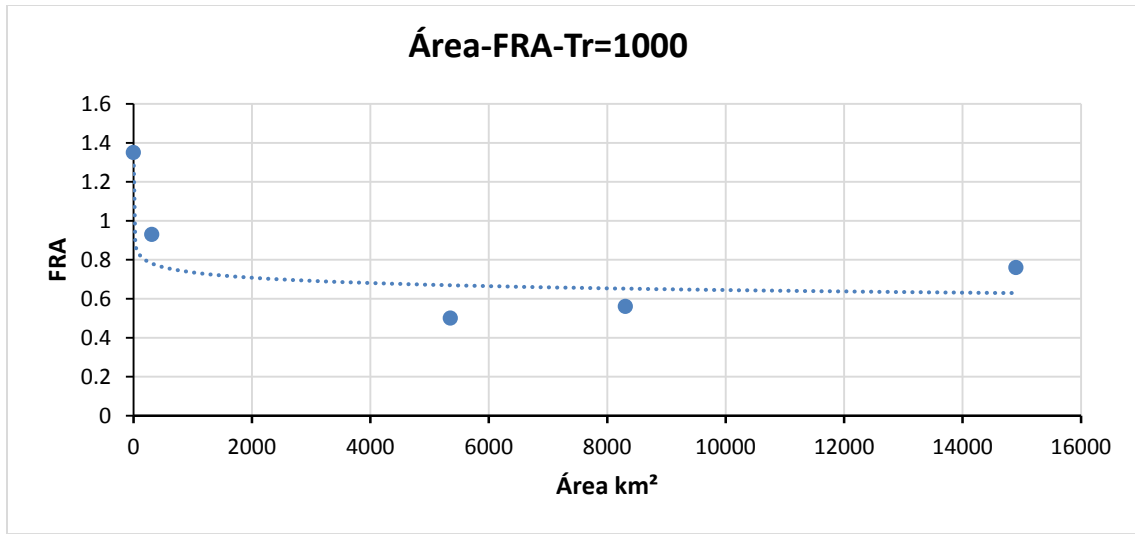
Gráfica 48 FRA para diferentes áreas asociado a 10 años de periodo de retorno en el estado de Tamaulipas.



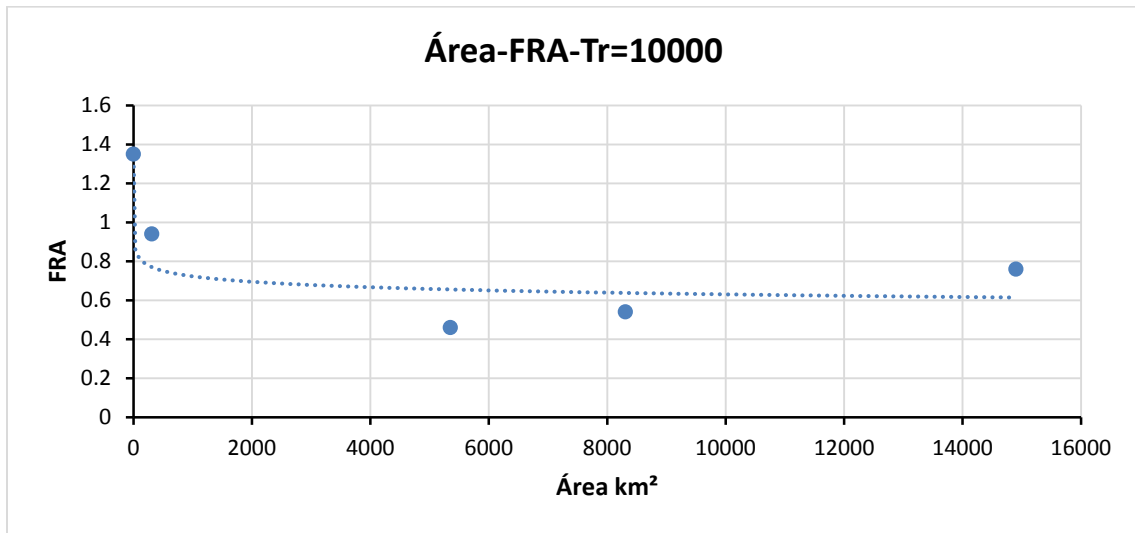
Gráfica 49 FRA para diferentes áreas asociado a 50 años de periodo de retorno en el estado de Tamaulipas.



Gráfica 50 FRA para diferentes áreas asociado a 100 años de periodo de retorno en el estado de Tamaulipas.



Gráfica 51 FRA para diferentes áreas asociado a 1000 años de periodo de retorno en el estado de Tamaulipas.



Gráfica 52 FRA para diferentes áreas asociado a 10000 años de periodo de retorno en el estado de Tamaulipas.

Las ecuaciones de ajuste que correlaciona el FRA con el área y periodo de retorno el estado de Tamaulipas son

Medios

$$y = -0,037 \ln(x) + 1,0131 \dots \dots \dots (59)$$

Para Tr = 5 años

$$y = -0,034 \ln(x) + 1,0217 \dots \dots \dots (60)$$

Para Tr = 10 años

$$y = -0,046 \ln(x) + 0,9729 \dots \dots \dots (61)$$



Para Tr = 50 años

$$y = -0,037 \ln(x) + 1,0172 \dots \dots \dots (62)$$

Para Tr= 100 años

$$y = -0,038 \ln(x) + 1,014 \dots \dots \dots (63)$$

Para Tr= 1000 años

$$y = -0,039 \ln(x) + 1,0067 \dots \dots \dots (64)$$

Para Tr= 10000 años

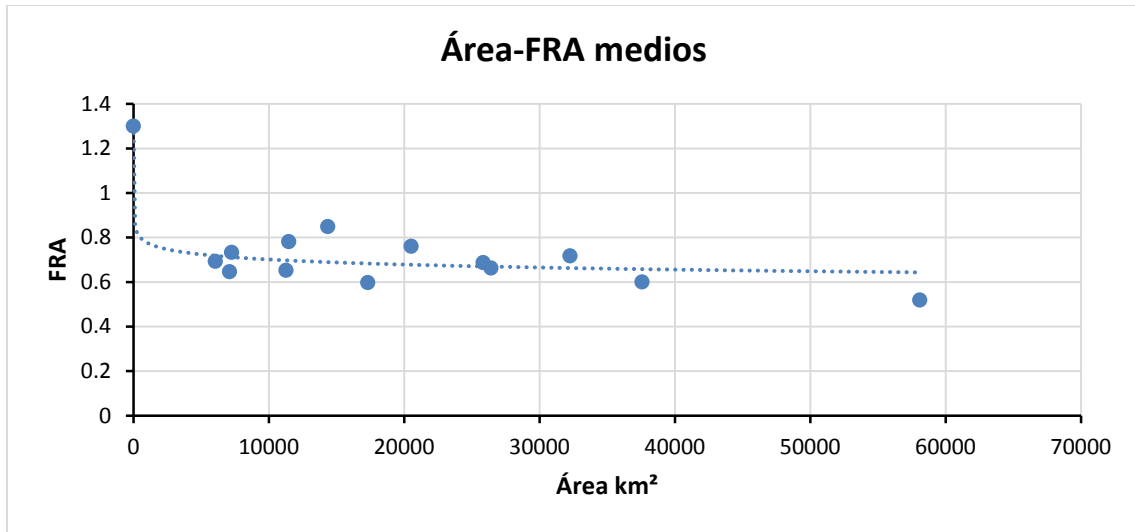
$$y = -0,04 \ln(x) + 1,0009 \dots \dots \dots (65)$$

Sinaloa

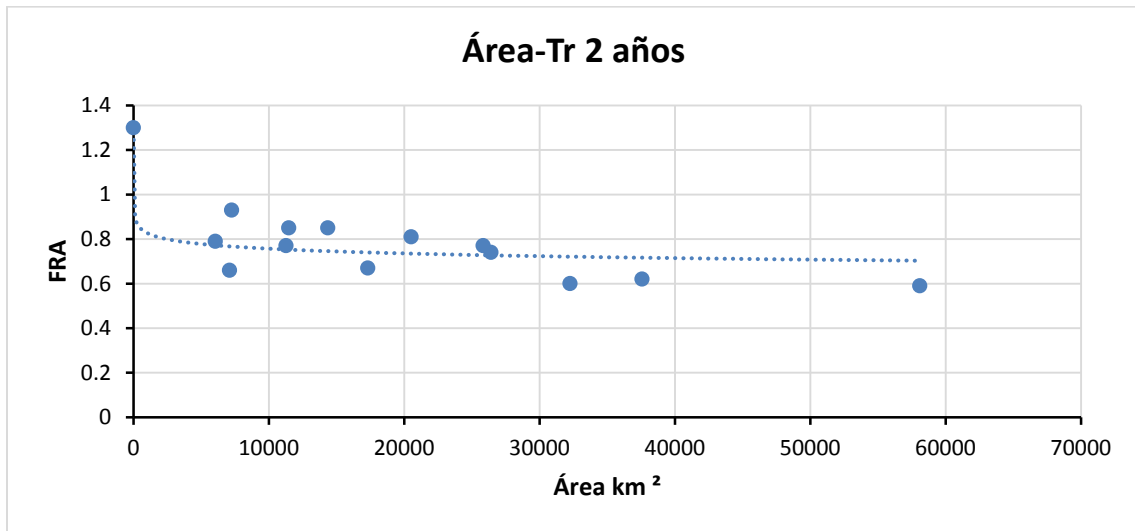
Mena (2004), en su tesis de maestría con título “Factores de Reducción por Área para el cálculo de lluvias de diseño. Aplicación al estado de Sinaloa”, obtuvo los FRA para este estado. En la siguiente tabla se muestran los FRA obtenidos por Mena para el estado de Sinaloa. Esta tesis, se realizan las gráficas Área-FRA medios y Área-FRA (gráfica 53 a 60) extrapolados a destinos periodos de retorno tomando los datos obtenidos por Mena (tabla 28).

Área km ²	FRA medios	Tr=2 años	Tr=5 años	Tr=10 años	Tr=50 años	Tr=100 años	Tr=1000 años	Tr=10000 años
0.00	1.3	1.3	1.3	13	1.3	1.3	1.3	1.3
6049.13	0.69	0.79	0.74	0.7	0.67	0.66	0.65	0.64
7102.43	0.65	0.66	0.66	0.62	0.63	0.64	0.65	0.66
7257.35	0.73	0.93	0.84	0.75	0.68	0.67	0.64	0.62
11271	0.65	0.77	0.78	0.7	0.61	0.59	0.57	0.55
11475.69	0.78	0.85	0.83	0.62	0.71	0.74	0.83	0.89
14359.78	0.85	0.85	0.88	0.83	0.83	0.84	0.85	0.86
17320.12	0.60	0.67	0.68	0.63	0.57	0,56	0.54	0.53
20522	0.76	0.81	0.79	0.74	0.73	0.74	0.75	0.76
25835	0.69	0.77	0.74	0.63	0.64	0.65	0.68	0.7
26412.1	0.66	0.74	0.67	0.58	0.63	0.64	0.68	0.7
32257	0.72	0.6	0.68	0.7	0.74	0.75	0.77	0.78
37570	0.60	0.62	0.63	0.57	0.58	0.59	0.6	0.61
58092	0.52	0.59	0.56	0.5	0.49	0.49	0.5	0.5

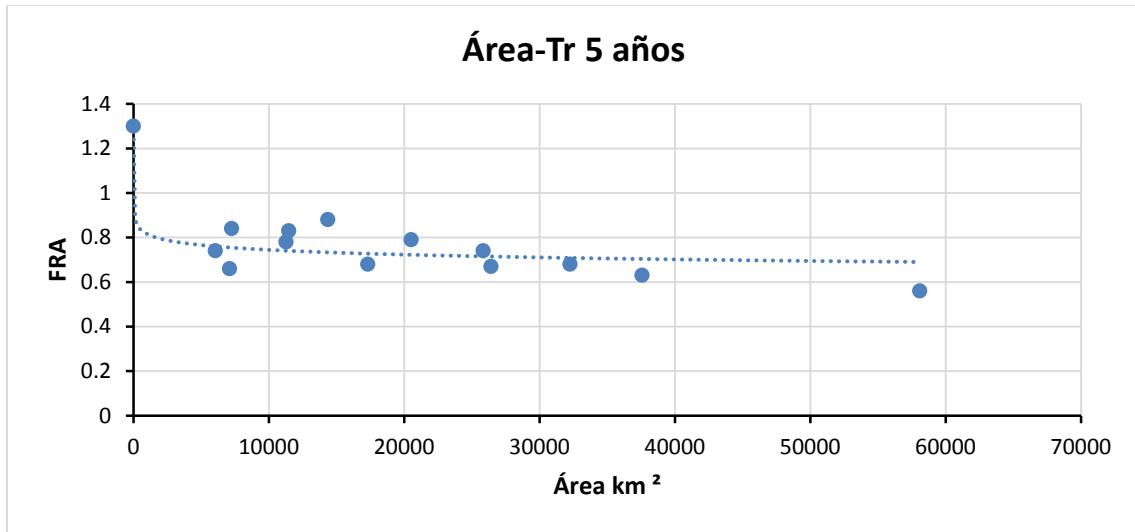
Tabla 28 FRA medios y FRA asociados a 2,5,10,50,100,1000 y 10000 años de periodo de retorno para diferentes áreas en el estado de Sinaloa.



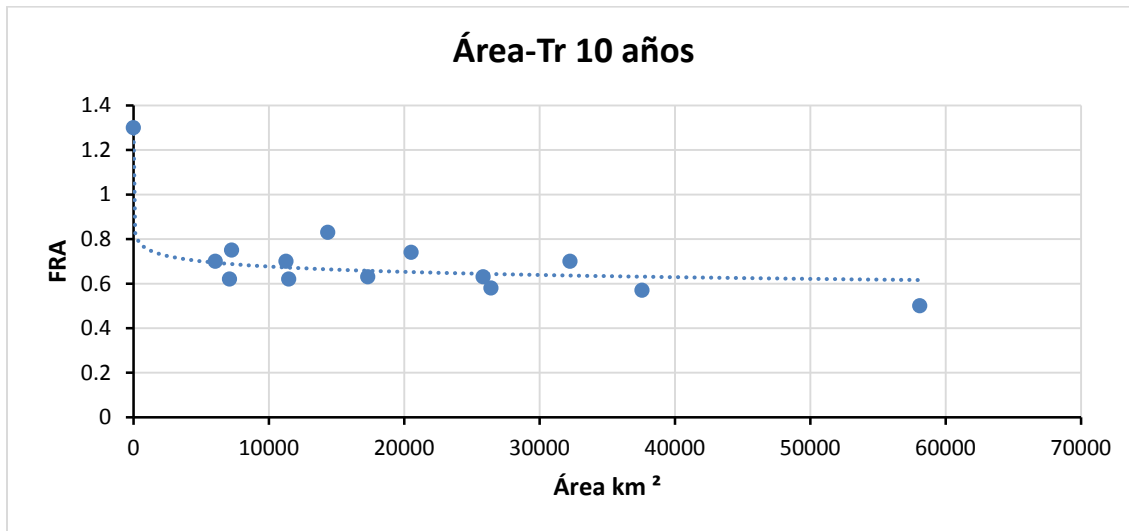
Gráfica 53 FRA medios para distintas áreas en el estado de Sinaloa.



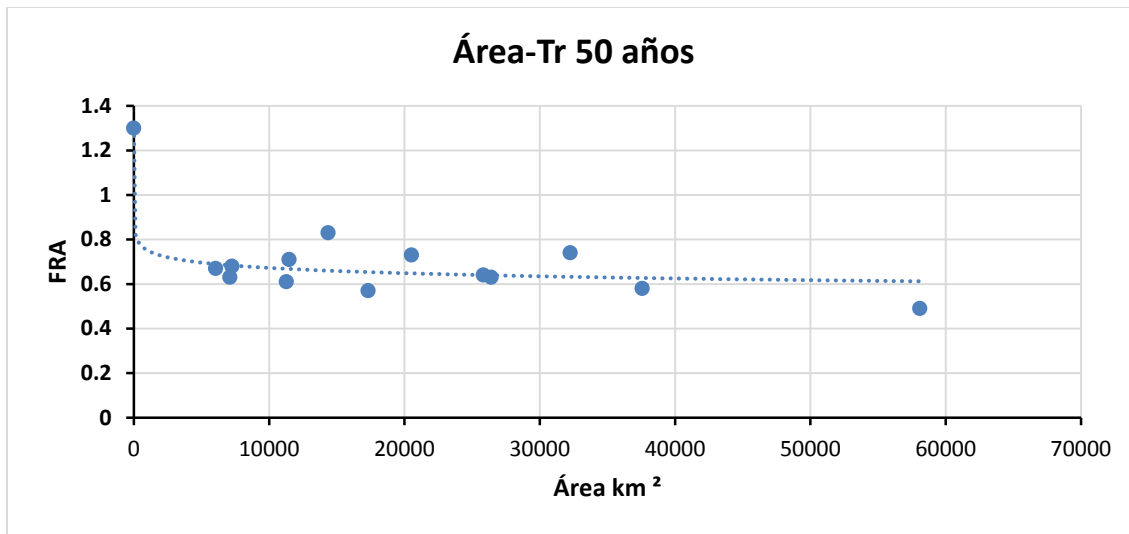
Gráfica 54 FRA para diferentes áreas asociado a 2 años de periodo de retorno en el estado de Sinaloa.



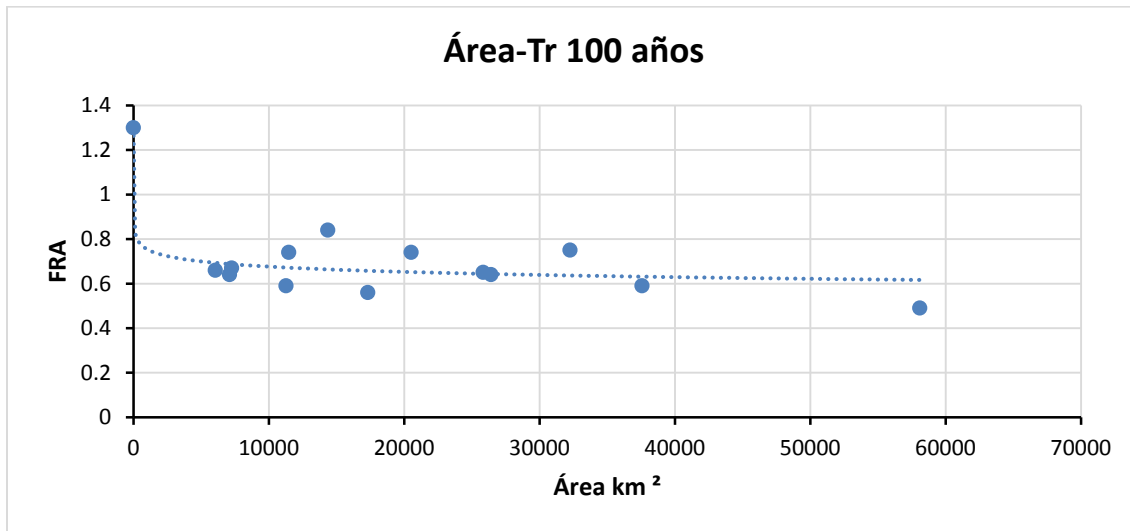
Gráfica 55 FRA para diferentes áreas asociado a 5 años de periodo de retorno en el estado de Sinaloa.



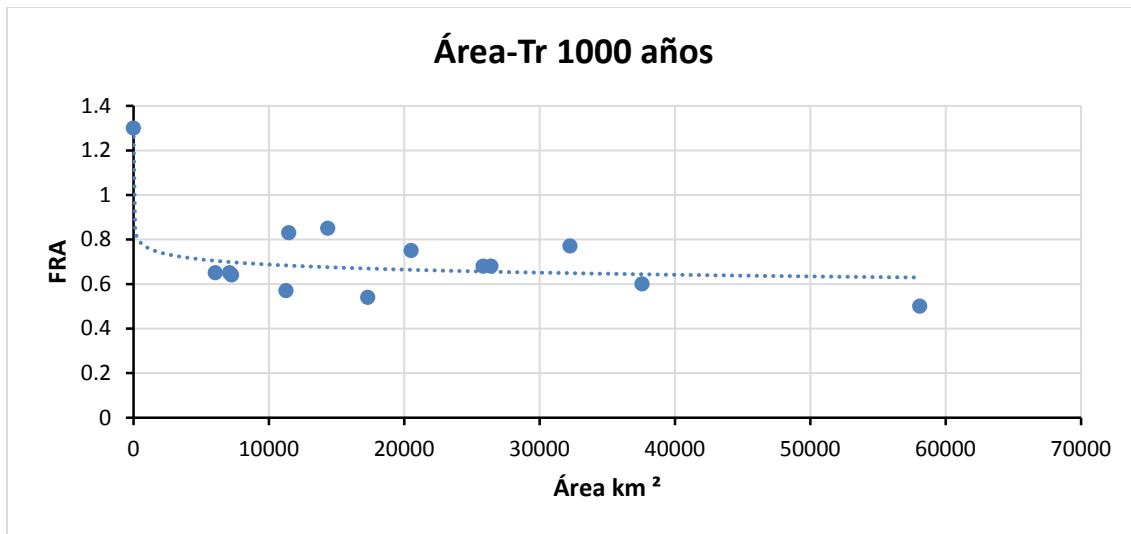
Gráfica 56 FRA para diferentes áreas asociado a 10 años de periodo de retorno en el estado de Sinaloa.



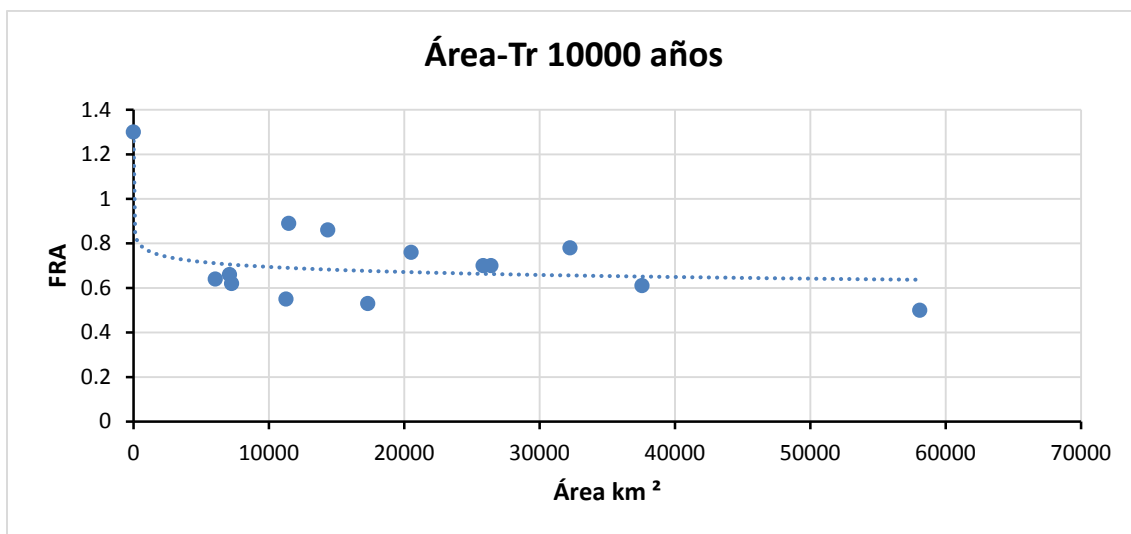
Gráfica 57 FRA para diferentes áreas asociado a 50 años de periodo de retorno en el estado de Sinaloa.



Gráfica 58 FRA para diferentes áreas asociado a 100 años de periodo de retorno en el estado de Sinaloa.



Gráfica 59 FRA para diferentes áreas asociado a 1000 años de periodo de retorno en el estado de Sinaloa.



Gráfica 60 FRA para diferentes áreas asociado a 1000 años de periodo de retorno en el estado de Sinaloa.

Las ecuaciones de ajuste que correlaciona el FRA con el área y periodo de retorno el estado de Sinaloa son

Medios

$$y = -0,033 \ln(x) + 1,0039 \dots \dots \dots (66)$$

Para Tr = 2 años

$$y = -0,031 \ln(x) + 1,0386 \dots \dots \dots (67)$$

Para Tr = 5 años



$$y = -0,031 \ln(x) + 1,0296 \dots \dots \dots (68)$$

Para Tr = 10 años

$$y = -0,034 \ln(x) + 0,9933 \dots \dots \dots (69)$$

Para Tr = 50 años

$$y = -0,034 \ln(x) + 0,9878 \dots \dots \dots (70)$$

Para Tr= 100 años

$$y = -0,034 \ln(x) + 0,989 \dots \dots \dots (71)$$

Para Tr= 1000 años

$$y = -0,033 \ln(x) + 0,9931 \dots \dots \dots (72)$$

Para Tr= 10000 años

$$y = -0,033 \ln(x) + 0,9957 \dots \dots \dots (73)$$

Resumen de ecuaciones de ajuste

Con estas ecuaciones de ajuste Área-FRA obtenidas, es posible calcular el FRA medio o extrapolado para cualquier área que se encuentre ubicada dentro del territorio mexicano. En la tabla 29, se presentan las ecuaciones de ajuste para los FRA medios para las distintas regiones estudiadas.

Zona	Ecuación	R ²
RH 26	y=-0.048ln(A)+0.9587	0.8951
Cuenca del Valle de México	y=-0.052ln(A)+0.9782	0.9145
RH 30	y=-0.048ln(A)+0.9755	0.9104
Durango	y=-0.045ln(A)+0.9808	0.9078
Sonora	y=-0.044ln(A)+1.0282	0.9434
RH 19	y=-0.044ln(A)+1.0291	0.9163
Tamaulipas	y=-0.037ln(A)+1.0131	0.9163
Sinaloa	y=-0.033ln(A)+1.0039	0.8272
RH 25	y=-0.033ln(A)+1.0172	0.9563
Cuenca Río Panuco	y=-0.039ln(A)+1.0567	0.9332

Tabla 29 Ecuaciones de ajuste para las distintas regiones analizadas para los FRA medios

La tabla 30 se muestran los FRA medios para áreas de 10, 50,100, 500, 1000, 5000, 10000 y 100000 km².

Zona	Área km ²							
	10	50	100	500	1000	5000	10000	100000
RH 26	0.8482	0.7709	0.7377	0.6604	0.6271	0.5499	0.5166	0.4061
Cuenca del Valle de México	0.8585	0.7748	0.7387	0.6550	0.6190	0.5353	0.4993	0.3795
RH 30	0.8650	0.7877	0.7545	0.6772	0.6439	0.5667	0.5334	0.4229
Durango	0.8772	0.8048	0.7736	0.7011	0.6700	0.5975	0.5663	0.4627
Sonora	0.9269	0.8561	0.8256	0.7548	0.7243	0.6534	0.6229	0.5216
RH 19	0.9278	0.8570	0.8265	0.7557	0.7252	0.6543	0.6238	0.5225
Tamaulipas	0.9279	0.8684	0.8427	0.7832	0.7575	0.6980	0.6723	0.5871
Sinaloa	0.9279	0.8748	0.8519	0.7988	0.7759	0.7228	0.7000	0.6240
RH 25	0.9412	0.8881	0.8652	0.8121	0.7892	0.7361	0.7133	0.6373
Cuenca Río Panuco	0.9669	0.9041	0.8771	0.8143	0.7873	0.7245	0.6975	0.6077

Tabla 30 FRA medios en las distintas zonas de México y para diferentes áreas.

Cabe aclarar que en los trabajos que se han analizado en esta tesis, en el caso de los FRA extrapolados, los años utilizados como periodo de retorno no son los mismos. En general, los autores no presentan los resultados para todos los perdidos de retorno más comunes, por esta razón, en este trabajo únicamente se presentan los FRA para áreas definidas para periodos de retorno de 10, 50 y 100 años.

En las tablas 31, 32 y 33 se presentan las ecuaciones para 10, 50 y 100 años, respectivamente, de periodos de retorno para las distintas regiones de estudio.

Zona	Ecuación	R ²
Durango	$y = -0.046 \ln(x) + 0.9729$	0.9750
RH 26	$y = -0.047 \ln(x) + 1.0027$	0.9330
RH 30	$y = -0.046 \ln(x) + 1.0181$	0.6877
Sinaloa	$y = -0.034 \ln(x) + 0.9933$	0.8448
Tamaulipas	$y = -0.036 \ln(x) + 1.0180$	0.9711
RH 19	$y = -0.029 \ln(x) + 1.0161$	0.7526
Cuenca Río Panuco	$y = -0.039 \ln(x) + 1.0516$	0.9500
Sonora	$y = -0.036 \ln(x) + 1.0760$	0.7600
RH 25	$y = -0.024 \ln(x) + 1.0720$	0.7665

Tabla 31 Ecuaciones de ajuste para las distintas regiones analizadas para $T_r=10$ años

Zona	Ecuación	R ²
Durango	$y = -0.045 \ln(x) + 0.9807$	0.8984

Sinaloa	$y=-0.034\ln(x)+0.9878$	0.8326
RH 26	$y=-0.044\ln(x)+1.0316$	0.8578
Tamaulipas	$y=-0.037\ln(x)+1.0172$	0.8911
RH 30	$y=-0.040\ln(x)+1.0313$	0.6569
Cuenca Río Panuco	$y=-0.040\ln(x)+1.0446$	0.9500
RH 19	$y=-0.026\ln(x)+1.0574$	0.6988
RH 25	$y=-0.021\ln(x)+1.0928$	0.6453
Sonora	$y=-0.036\ln(x)+1.1450$	0.7600

Tabla 32 Ecuaciones de ajuste para las distintas regiones analizadas para $T_r=50$ años

Zona	Ecuación	R ²
RH 19	$y=-0.024\ln(x)+1.0583$	0.6025
RH 25	$y=-0.021\ln(x)+1.0978$	0.6006
RH 26	$y=-0.043\ln(x)+1.0412$	0.8357
RH 30	$y=-0.038\ln(x)+1.0358$	0.5990
Cuenca Río Panuco	$y=-0.041\ln(x)+1.0416$	0.9425
Durango	$y=-0.045\ln(x)+0.9817$	0.8760
Sinaloa	$y=-0.034\ln(x)+0.9890$	0.8061
Sonora	$y=-0.029\ln(x)+1.0971$	0.6033
Tamaulipas	$y=-0.038\ln(x)+1.0140$	0.8718

Tabla 33 Ecuaciones de ajuste para las distintas regiones analizadas, $T_r=100$ años.

Finalmente, con las ecuaciones de las tablas 31 a 33, se obtienen los FRA para áreas 10, 50, 100, 500, 1000, 5000, 10000 y 100000 km² (tablas 34 a 36).

Zona	Área km ²							
	10	50	100	500	1000	5000	10000	100000
Durango	0.8691	0.7950	0.7632	0.6891	0.6572	0.5832	0.5513	0.4454
RH 26	0.8945	0.8188	0.7863	0.7106	0.6780	0.6024	0.5698	0.4616
RH 30	0.9122	0.8381	0.8063	0.7322	0.7003	0.6263	0.5944	0.4885
Sinaloa	0.9150	0.8603	0.8367	0.7820	0.7584	0.7037	0.6801	0.6019
Tamaulipas	0.9351	0.8772	0.8522	0.7943	0.7693	0.7114	0.6864	0.6035
RH 19	0.9493	0.9027	0.8826	0.8359	0.8158	0.7691	0.7490	0.6822
Cuenca Río Panuco	0.9669	0.9041	0.8771	0.8143	0.7873	0.7245	0.6975	0.6077
Sonora	0.9931	0.9352	0.9102	0.8523	0.8273	0.7694	0.7444	0.6615
RH 25	1.0167	0.9781	0.9615	0.9228	0.9062	0.8676	0.8510	0.7957

Tabla 34 FRA para áreas deseadas en las distintas regiones analizadas, $T_r=10$ años.

Zona	Área km ²							
	10	50	100	500	1000	5000	10000	100000
Durango	0.8771	0.8047	0.7735	0.7010	0.6699	0.5974	0.5662	0.4626
Sinaloa	0.9095	0.8548	0.8312	0.7765	0.7529	0.6982	0.6746	0.5964
RH 26	0.9303	0.8188	0.7863	0.7106	0.6780	0.6024	0.5698	0.4616
Tamaulipas	0.9320	0.8725	0.8468	0.7873	0.7616	0.7021	0.6764	0.5912
RH 30	0.9392	0.8748	0.8471	0.7827	0.7550	0.6906	0.6629	0.5708
Cuenca Río Panuco	0.9525	0.8881	0.8604	0.7960	0.7683	0.7039	0.6762	0.5841
RH 19	0.9975	0.9557	0.9377	0.8958	0.8778	0.8360	0.8179	0.7581
RH 25	1.0444	1.0106	0.9961	0.9623	0.9477	0.9139	0.8994	0.8510
Sonora	1.0621	1.0042	0.9792	0.9213	0.8963	0.8384	0.8134	0.7305

Tabla 35 FRA para áreas deseadas en las distintas regiones analizadas, Tr=50 años

Zona	Área km ²							
	10	50	100	500	1000	5000	10000	100000
Durango	0.8781	0.8057	0.7745	0.7020	0.6709	0.5984	0.5672	0.4636
Sinaloa	0.9107	0.8560	0.8324	0.7777	0.7541	0.6994	0.6758	0.5976
Tamaulipas	0.9265	0.8653	0.8390	0.7778	0.7515	0.6903	0.6640	0.5765
RH 26	0.9422	0.8730	0.8432	0.7740	0.7442	0.6750	0.6452	0.5461
Cuenca Río Panuco	0.9472	0.8812	0.8528	0.7868	0.7584	0.6924	0.6640	0.5696
RH 30	0.9483	0.8871	0.8608	0.7996	0.7733	0.7121	0.6858	0.5983
RH 19	1.0030	0.9644	0.9478	0.9091	0.8925	0.8539	0.8373	0.7820
Sonora	1.0303	0.9837	0.9636	0.9169	0.8968	0.8501	0.8300	0.7632
RH 25	1.0494	1.0156	1.0011	0.9673	0.9527	0.9189	0.9044	0.8560

Tabla 36 FRA para áreas deseadas en las distintas regiones analizadas, Tr=100 años.

CONCLUSIONES

En este trabajo, se obtuvieron los FRA para el estado de Sonora como representativo de la zona noroeste de la república mexicana. Asimismo, se obtuvieron ecuaciones de correlación para los FRA en función del área para distintos periodos de retorno. En los resultados obtenidos, se puede observar que el FRA disminuye al aumentar el área, sin embargo, ésta disminución no es proporcional, esto puede ser debido a la orografía de la zona. Otro aspecto a señalar es el aumento en el FRA al aumentar el periodo de retorno, esto significa que, para periodos de retornos grandes, la lluvia puntual debe disminuirse en menor medida que para periodos de retorno pequeños.

Asimismo, se realizó una revisión de los FRA obtenidos por distintos autores para diferentes zonas de México. Con los datos de estos trabajos, se obtuvieron ecuaciones de correlación a fin de obtener FRA para distintas áreas en las zonas estudiadas. Con base en estos resultados mostrados en la tabla 30, podemos concluir que en el caso de los FRA medios para todas las áreas, los factores (de convectividad) van de menor (más convectivo) a mayor (menos convectivo). Es decir, que en Valle de México y en la RH 26(casi lo mismo), además de la RH 30 y Durango, predomina un comportamiento convectivo (tormentas concentradas). Para RH 19, Sonora, Tamaulipas, Sinaloa y Pánuco, los factores aumentan sensiblemente, sobre todo para áreas grandes. Para RH 25 aumentan todavía más, es decir que las tormentas son muy extensas.

En el caso de los factores para un periodo de retorno de 10 años, en Durango y la RH 26, sigue predominando un comportamiento convectivo, sin embargo, el factor aumenta en la RH 26 para periodos de retorno de 50 y 100 años evidenciando tormentas menos concentradas.

Para la Región 30, Sinaloa, Región 19 y Pánuco y la RH 25 los factores también aumentan para periodos de retorno 10, 50 y 100 años. El Aumento más significativo en el factor, puede verse en Sonora en donde, para estos periodos de retorno, las tormentas son muy extensas.

REFERENCIAS

- 1.-Acuña, G. (2015). “Factor de reducción por área regiones hidrológicas: 25.- San Fernando-Soto la Marina, 26.- Río Pánuco”. Proyecto de Investigación, Posgrado de Ingeniería, UNAM, México.
- 2.-Asquith, W. H., Famiglietti, J. S., (2000). “Precipitation areal reduction factor estimation using an annual maxima centered approach”. Journal of Hydrology, 230: 55-69
- 3.-Aparicio, F. J. (2012). “Fundamentos de hidrología de superficie”, Editorial Limusa, México.



- 4.-Canavese, N. (2015). “Estimación de Factores de Reducción por Área (FRA) en Región Hidrológica 19 (RH19)”. Proyecto de Investigación, Posgrado de Ingeniería, UNAM, México
- 5.-Domínguez, R. y Carrizosa, E. (2016). “Análisis regional para la estimación de precipitaciones de diseño en la república mexicana”, CDMX, MÉXICO
- 6.-Franco, C., (1998). “Análisis regional de lluvias Convectivas. Aplicación al Valle de México”. Tesis de maestría, Posgrado de Ingeniería, UNAM, México.
- 7.-Escalante, C. y Reyes, L. (2002). “Técnicas Estadísticas en Hidrología”. Facultad de Ingeniería, UNAM, México.
- 8.-González, S. (2012). “Estimación de Factores de Reducción por Área. Aplicación a la cuenca del río Pánuco”. Tesis de maestría, Posgrado de Ingeniería, UNAM, México.
- 9.-Guichard, D. y Domínguez, R. (1998). “Regionalización de lluvias en la cuenca del alto río Grijalva”. Quehacer científico en Chiapas, vol. 1 No.2
- 10.-Guichard, D. (2002). “Factores de reducción areal: recopilación de métodos y obtención de factores empíricos para episodios convectivos en la comunidad de Valencia”
- 11.-Jiménez, M. (1992). “Manual de operación del programa AX”, CENAPRED, México.
- 12.-Mena, S. (2004). “Factores de Reducción por Área para el cálculo de lluvias de diseño. Aplicación al estado de Sinaloa”, Tesis de maestría, Posgrado de Ingeniería, UNAM, México.
- 13.-Pietersen, J., Gericke, O., Smithers, J., Woyessa Y. (2015). “Review of current methods for estimating areal reduction factors applied to South African design point rainfall and preliminary identification of new methods”, Journal of the South African intitution of civil engineering.
- 14.-Rodríguez Iturbe, I., Mejía, J. M., 1974, “On the transformation of point rainfall to areal rainfall”, Water Resources Research,
- 15.-Sánchez, S. (2015). “Aplicación de métodos para la determinación del Factor de Reducción por área (FRA), Región hidrológica 30”. Proyecto de Investigación, Posgrado de Ingeniería, UNAM, México.
- 16.-Severiano, M. (2014), “Estimación de Factores de Reducción Areal. Aplicación a los Estados de Durango y Tamaulipas”, Tesis de maestría, Posgrado de Ingeniería, UNAM, México.



17-Torres, N. (2013), “Obtención de Factores de Reducción por Área usando el método de Regionalización. Aplicación a la Cuenca del Río Sonora”. Tesis de maestría, Posgrado de Ingeniería, UNAM, México.