

## Análisis de estaciones climatológicas e hidrométricas de la presa Cointzio

Rosalva Mendoza Ramírez<sup>1</sup>, Josué Rojas Flores<sup>2</sup>, Maritza Liliana Arganis Juárez<sup>1,2</sup>, Ramón Domínguez Mora<sup>1</sup>, Eliseo Carrizosa Elizondo<sup>1</sup>,  
Universidad Nacional Autónoma de México Av. Universidad 3000 Col UNAM, C.P. 04510, Tel. 56233600 ext.8644

rmr@pumas.iingen.unam.mx, JRojasF@iingen.unam.mx, MArganisJ@iingen.unam.mx, rdm@pumas.iingen.unam.mx,  
ecae@pumas.iingen.unam.mx

Instituto de Ingeniería<sup>1</sup>, Facultad de Ingeniería<sup>2</sup>, Universidad Nacional Autónoma de México

### RESUMEN

Se obtuvieron precipitaciones y escurrimientos correspondientes a distintos periodos de retorno para el diseño de obras hidráulicas en la zona.

Los sistemas de información climatológica como el CLICOM y el sistema de información de las estaciones hidrométricas BANDAS tienen el objetivo de recabar datos precisos de los fenómenos naturales que existen en México y con estos, poder representarlos mediante modelos matemáticos y observar el comportamiento de las obras de ingeniería hidráulica que dan servicio a la población y que incrementan su calidad de vida. Se utilizó el programa Ax desarrollado por el Centro Nacional de Prevención de Desastres, para analizar la información obtenida de los sistemas de captura de datos, sin embargo, el factor humano influye en los registros y la información debe ser analizada minuciosamente y seleccionar aquella que cumpla con los requerimientos necesarios para el análisis hidrológico, tal como se ha realizado en la subcuenca Cointzio. La ayuda de herramientas como los Sistemas de Información Geográfica (SIG) es importante para el procesamiento de la información. Dentro de este estudio se utilizó también el programa Excel® de Microsoft Office®, cuyas características permitieron generar las tablas necesarias para el estudio.

**Palabras Claves:** Estaciones climatológicas, estaciones hidrométricas, subcuenca Cointzio, CLICOM, BANDAS, AX, programas SIG, Excel®.

### 1. INTRODUCCIÓN

El análisis de la información climatológica es necesario para establecer la veracidad de la información capturada en cada una de las estaciones que se han tomado por objeto de estudio debido a su influencia en el área que constituye la subcuenca Cointzio.

La distribución de las precipitaciones puede variar de acuerdo con factores físicos como la orografía, y características climatológicas (temperatura, presión atmosférica, altura sobre el nivel del mar, etc.) y según la época del año.

Las estaciones hidrométricas tienen mayor propensión a presentar

alteraciones en los registros, dado que la red de estaciones hidrométricas (BANDAS) en México es operada manualmente, es decir que los registros son tomados por un observador capacitado en el uso de estos instrumentos.

Por otro lado, la falta de mantenimiento de ambos sistemas ha llevado a la pérdida de estaciones disponibles para continuar recabando información, además, algunas de estas, aunque han sido reparadas, llegan a tener registros de años totalmente vacíos lo que dificulta el estudio de las precipitaciones y los escurrimientos, no solo en Cointzio, sino en todo el país.

En este trabajo se usaron las precipitaciones registradas por las estaciones climatológicas 16001, 16022, 16087, 16114, 16120, 16133 y 16139, además de los datos de escurrimientos de la estación hidrométrica 12347 Santiago Undameo de la región hidrológica número VIII de México, que recibe las aportaciones del río Grande formado por los ríos Tirio y Tiripetío [1] en la cuenca Cuitzeo en el estado de Michoacán (Figura 1).



Figura 1. Sitio de Estudio, Cointzio, Michoacán, México.

A continuación, se presenta la metodología considerada y los resultados obtenidos en el sitio de análisis.

## 2. METODOLOGÍA

### Estaciones climatológicas

La subcuenca Cointzio cuenta con 11 estaciones climatológicas de las cuales se han seleccionado 7 que cuentan con más de 20 años de registros completos.

Los datos de precipitaciones diarias fueron tomados de la base de datos CLICOM (las estaciones que conforman el sistema son automáticas). Se compararon las tablas de registros máximos anuales de cada estación; además, se realizó una inspección de eventos extremos, cuya altura de precipitación se eleva por encima de la media, con ayuda de los registros diarios, que se tomaron cinco días antes y después de la fecha en que ocurrió la precipitación más importante.

Una vez que los datos fueron seleccionados cuidadosamente, se introdujeron al programa AX [4] y se obtuvieron los eventos de precipitaciones máximas para 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000, 2000, 5000 y 10,000 años, con el fin de utilizar estos datos para generar la infraestructura hidráulica que se requiera en la zona.



Figura 2. Base de datos CLICOM, algunas estaciones climatológicas disponibles, Michoacán de Ocampo.

### Estaciones hidrométricas

A la salida de la presa Cointzio se encuentran cuatro estaciones hidrométricas que registran los gastos controlados del vaso de almacenamiento, por tal razón, se han desechado los datos de las mismas.

Por otro lado, a la entrada del embalse se localiza la estación 12347 cuyos registros no se encuentran afectados por un control del caudal. En la información descargada del BANDAS se obtuvieron 63 años de registros completos que fueron comparados con los registros de volúmenes de entrada obtenidos de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), que es el organismo regulador del uso y distribución del agua en México. Los volúmenes fueron transformados a gastos para poder generar una comparación.

Las duraciones de las lluvias tienen el periodo de un día.

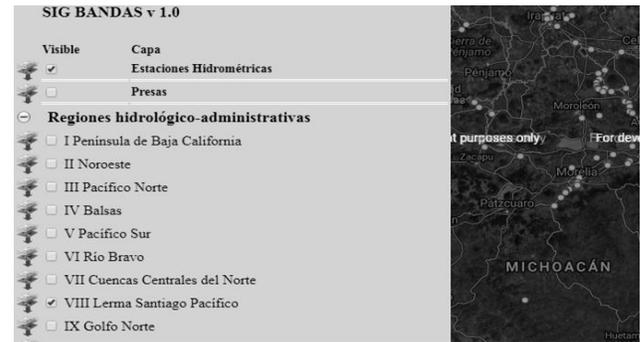


Figura 3. Bandas SIG, algunas estaciones hidrométricas disponibles Michoacán de Ocampo.

Al igual que las estaciones climatológicas, los datos fueron sometidos a un análisis; se compararon los eventos extremos contra los registros diarios y se observó la tendencia de los escurrimientos, es decir, si estos se incrementaban o si decrecían a partir de cinco días antes y cinco días después de que se registró el evento máximo anual.

Después de examinar la información de los registros, es necesario comprobar que los resultados sean independientes y que no puedan ser representados mediante una ecuación, por lo que se aplica una prueba de homogeneidad y otra de independencia; cuando los datos son homogéneos e independientes, se puede decir que se trata de una variable aleatoria y que estos pueden ser estudiados bajo los criterios de la estadística y la probabilidad empleados.

### Correlación

De los datos obtenidos de la estación hidrométrica y los de la CONAGUA se obtuvo una función de correlación.

La correlación permite generar una ecuación; esta se obtiene para que a partir de los datos que se seleccionen como la variable independiente, se obtengan los de la contraparte, lo cual llevaría a estimar datos faltantes en registros de años incompletos.

La prueba de independencia de eventos comprueba que cada dato de la muestra sea producto de un proceso estocástico. Para comprobar que la serie de datos contiene variables aleatorias se utiliza la prueba de Anderson [2], en la que se utiliza el coeficiente de correlación  $r_k$  para distintos tiempos de retraso "k".

$$r_k = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{x})(X_{i+k} - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{x})^2} \quad (1)$$

Los límites se calculan para un intervalo de confianza del 95% del coeficiente de correlación  $r_k$ :

$$r_k(95\%) = \frac{-1 \pm 1.96 \sqrt{(n-k-1)}}{n-k} \quad (2)$$

### Análisis estadístico de series de máximos anuales

A cada serie de precipitaciones y a los datos de la estación hidrométrica se les aplica un análisis estadístico para obtener

su periodo de retorno, para ello se utiliza, con frecuencia, la fórmula de Weibull del periodo de retorno que considera el número de orden  $m$  y el tamaño de la serie  $n$  [3]:

$$Tr = \frac{(n+1)}{m} \quad (3)$$

Con la información de la ecuación (3), es posible obtener los parámetros de varias de las funciones de distribución aplicables a las series de datos y que se ajustan mejor a la descripción del comportamiento de los datos extrapolados. Contar con los parámetros permite seleccionar la mejor de las funciones de ajuste, considerando el error estándar de ajuste como el parámetro principal a tomar en cuenta para poder aplicar el ajuste definitivo a la serie de datos.

El programa Ax cuenta con varios tipos de funciones de distribución cuyos parámetros se ajustan a través del método de momentos o de máxima verosimilitud. Entre las funciones de ajuste se encuentran: Normal, Exponencial Log normal, Gamma, Gumbel y doble Gumbel, sin embargo, solo se han considerado las funciones Gumbel y doble Gumbel en este estudio. La función de mejor ajuste fue de tipo doble Gumbel en la mayoría de los casos.

**Función Gumbel y doble Gumbel**

La función Gumbel de una variable aleatoria tiene la forma:

$$F(x) = \exp\{-\exp(-W)\} \quad (4)$$

donde:

$W$  es la variable reducida obtenida como:

$$W = \alpha(x - \beta) \quad (5),$$

$\alpha$  y  $\beta$  son los parámetros de escala y forma, respectivamente.

La función doble Gumbel de una variable aleatoria tiene la forma:

$$F(x) = p(e^{W_1}) + (1 - p)(e^{W_2}) \quad (6)$$

donde:

$$W_1 = -e^{-\alpha_1(x-\beta_1)} \quad (7)$$

y

$$W_2 = -e^{-\alpha_2(x-\beta_2)} \quad (8)$$

$\alpha_1, \beta_1$  y  $\alpha_2, \beta_2$  son parámetros de escala y forma de dos poblaciones de datos,  $p$  es la probabilidad de que el fenómeno meteorológico no sea producido por una tormenta ciclónica [5].

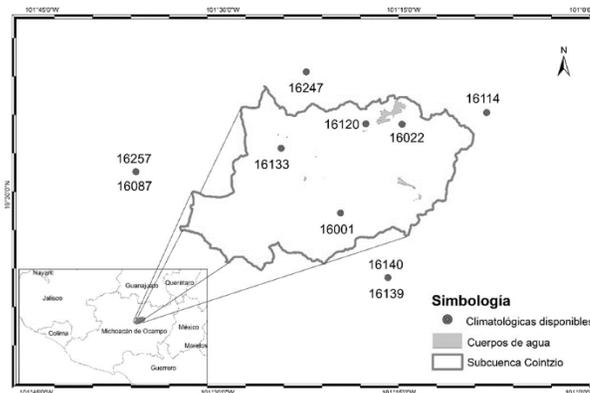
**3. APLICACIÓN Y RESULTADOS**

Para las estaciones climatológicas se analizaron datos de siete de las once disponibles y se completaron años de registros de estaciones que se encontraban muy cercanas entre sí, tal como se observa en figura 4.

Como se puede observar en la tabla 1, los datos de la estación 16247 y 16257 son descartados por contar con menos de 20 años de registros; mientras que dada la cercanía de las estaciones 16140 y 16139, se ha seleccionado la serie de mejores registros (16139) y ha sido completada con los datos de la otra estación.

**Tabla 1.** Climatológicas disponibles.

Estaciones climatológicas					
Estación	Nombre	Latitud	Longitud	Años efectivos	Periodo de mediciones
16001	Acutzio del Canje	19.5	-101.3	37	1961-1987 1991 1999-2007
16022	Cointzio	19.6	-101.3	56	1941-1945 1948 1950-1985 1993-2006
16087	Pátzcuaro	19.53	-101.62	36	1969-1991 1999-2008 2010-2011 2014
16114	San Miguel del Monte	19.6	-101.1	34	1964-1979 1981-1988 2000-2006 2011-2013
16120	Santiago Undameo	19.6	-101.3	51	1954-2001 2003-2005
16133	Turicato	19.1	-101.4	42	1969-1993 1995-1999 2001-2010 2012-2013
16139	Villa Madero	19.4	-101.3	37	1944-1951 1953-1954 1956-1967 1969-1983
16140	Villa Madero (CFE)	19.4	-101.3	24	1961-1968 1971-1982 1983-1987
16247	Capula	19.7	-101.4	15	1982-1988 1998-1999 2001-2006
16257	Santa Isabel de Ajuno	19.53	-101.62	3	1983-1985



**Figura 4.** Estaciones climatológicas en la subcuenca Cointzio.

Del análisis estadístico de los datos de precipitación se obtuvieron las funciones de distribución de mejor ajuste. La tabla 2 muestra los resultados de los análisis obtenidos del programa Ax.

**Tabla 2.** Mejor función de ajuste, estaciones climatológicas.

Resumen de periodos de retorno estaciones climatológicas Cointzio							
Estación	16001	16022	16087	16114	16120	16133	16139
Ajuste	Doble Gumbel	Doble Gumbel	Doble Gumbel	Gumbel Máxima verosimilitud	Gumbel Máxima verosimilitud	Doble Gumbel	Doble Gumbel

Las figuras 5 a la 11 muestran los resultados del ajuste para cada estación climatológica.

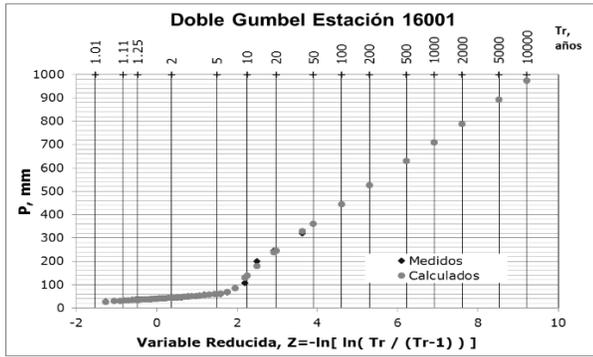


Figura 5. Resultados de la extrapolación. Estación 16001.

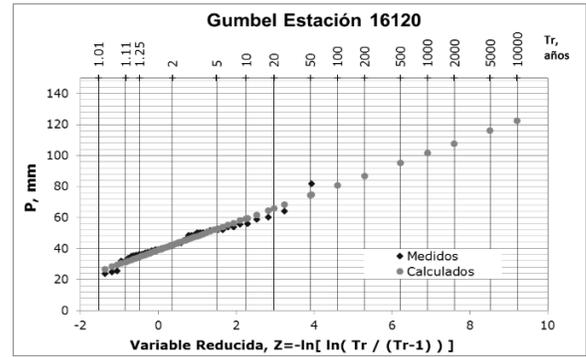


Figura 9. Resultados de la extrapolación. Estación 16120.

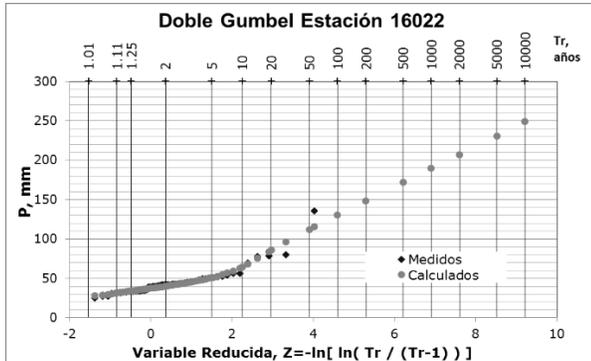


Figura 6. Resultados de la extrapolación. Estación 16022.

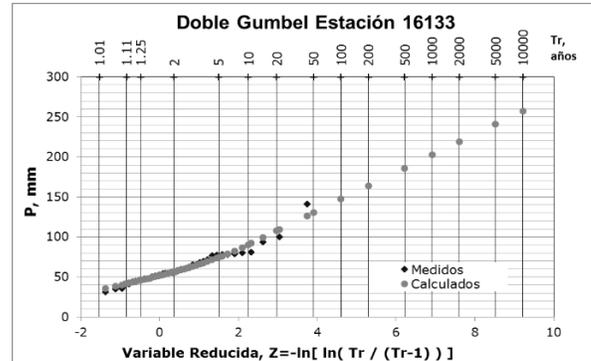


Figura 10. Resultados de la extrapolación. Estación 16133.

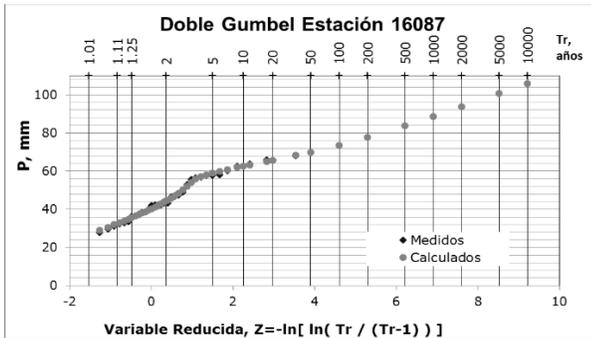


Figura 7. Resultados de la extrapolación. Estación 16087.

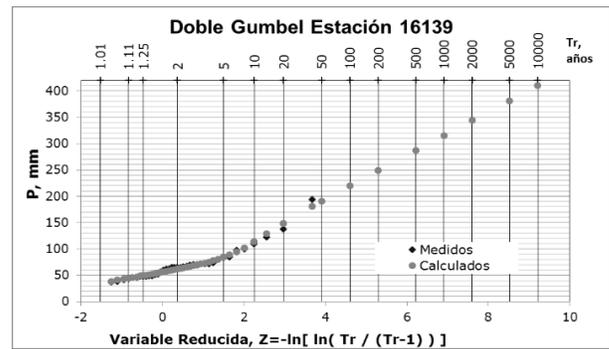


Figura 11. Resultados de la extrapolación. Estación 16139.

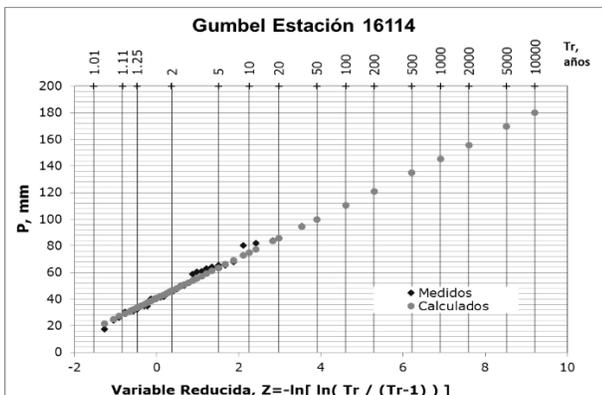


Figura 8. Resultados de la extrapolación. Estación 16114.

Para la estación hidrométrica fue necesario realizar un análisis de independencia y homogeneidad. La tendencia de los datos en el correlograma indica que menos del 10% de los datos de la serie se salen de los límites establecidos, por lo que se trata de una serie de datos estocásticos a los que se les puede aplicar la teoría de la estadística y la probabilidad y, por lo tanto, el programa Ax. La figura 12 muestra el análisis de independencia y homogeneidad resultado de la aplicación de la prueba de Anderson y el uso del coeficiente de autocorrelación de orden K, aplicado mediante el software Excel. Para la estación 12347, se muestra en la figura 13 la mejor función de ajuste dada por el programa Ax.

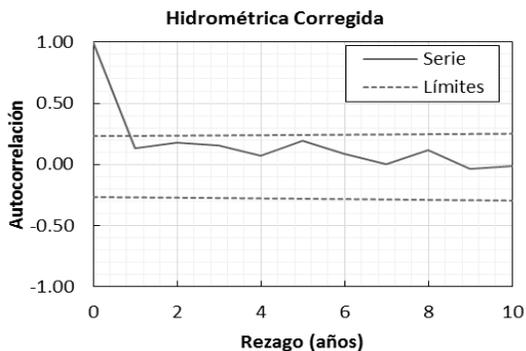


Figura 12. Correlograma. Hidrométrica corregida.

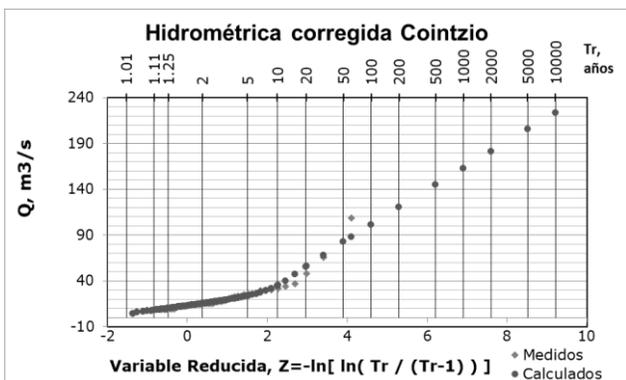


Figura 13. Resultados de la extrapolación. Estación hidrométrica 16247, datos corregidos.

**Eventos de diseño para distintos periodos de retorno**

Con las funciones de distribución que aplica el programa Ax se han obtenido las precipitaciones de diseño, como se observa en las Tablas 3 y 4 para las estaciones climatológicas y la estación hidrométrica.

**Tabla 3.** Precipitaciones de diseño para distintos periodos de retorno o de diseño. Estaciones climatológicas subcuenca Coitzio.

Resumen de periodos de retorno estaciones climatológicas Coitzio							
Estación	16001	16022	16087	16114	16120	16133	16139
Ajuste	Doble Gumbel	Doble Gumbel	Doble Gumbel	Gumbel Máxima verosimilitud	Gumbel Máxima verosimilitud	Doble Gumbel	Doble Gumbel
Tr	P mm	P mm	P mm	P mm	P mm	P mm	P mm
años	calculado	calculado	calculado	calculado	calculado	calculado	calculado
2	44.27	40.13	44.39	46.3	42.3	56.63	61.46
5	60.82	50.86	59.06	63.46	52.55	74.66	84.17
10	139.07	64.67	62.64	74.82	59.34	90.43	113.46
20	245.54	85.66	65.74	85.72	65.86	107.6	148.82
50	362.12	111.75	69.99	99.83	74.29	130.34	190.67
100	444.68	130.25	73.58	110.4	80.6	147.25	220.38
200	525.38	148.32	77.65	120.93	86.9	163.97	249.37
500	630.7	171.88	83.75	134.82	95.2	185.91	287.21
1000	709.95	189.6	88.72	145.32	101.48	202.44	315.65
2000	789.81	207.11	93.91	155.82	107.75	218.96	344.2
5000	892.23	230.63	100.63	169.69	116.05	241	381.1
10000	975.14	249.24	105.89	180.19	122.32	257.4	410.98

Para generar los datos de correlación, se han seleccionado los datos de la estación hidrométrica como la variable independiente y los datos de volúmenes registrados por CONAGUA y deducidos con la ecuación para funcionamiento de vasos y que

contempla la evaporación y las lluvias sobre el embalse (ecuación 9).

$$E_{ríos} = V_f - V_i + (-P + E) + S_{OT} + S_V \tag{9}$$

Siendo  $E_{ríos}$  los volúmenes de ingresos por ríos,  $V_f$  es el volumen final,  $V_i$  el inicial, P la precipitación, E la evaporación,  $S_{OT}$  las salidas por obras de toma y  $S_V$  las salidas por vertedor.

En la tabla 4 se pueden apreciar los gastos medios máximos obtenidos con el programa Ax, es decir, los periodos de retorno o gastos de diseño de la estación 12347.

**Tabla 4.** Gastos medios máximos de diseño para distintos periodos de retorno. Estación hidrométrica 12347.

Tr años	Q m³/s
2	15.1
5	23.62
10	34.64
20	55.45
50	82.49
100	101.63
200	120.29
500	144.69
1000	163
2000	181.16
5000	205.39
10000	223.41

Posteriormente se obtuvo la función de correlación con la que es posible estimar, a partir de datos de la estación hidrométrica, datos de gastos faltantes o erróneos. La figura 14 muestra la ecuación con la que es posible completar series de datos.

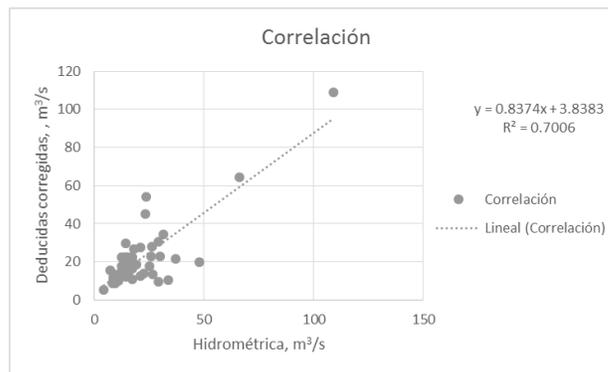


Figura 14. Cálculo de la ecuación de correlación.

$$Y = 0.8374x + 3.8383 \tag{9}$$

Donde, al sustituir, x deberán ser los gastos medios diarios medidos en la hidrométrica de análisis, en m³/s y Y serán los gastos obtenidos mediante la correlación, en m³/s.

La ecuación es útil para estimar datos anuales y diarios.

#### 4. CONCLUSIONES

Para cada estación climatológica se determinaron precipitaciones de diseño para distintos periodos de retorno con los datos de la plataforma CLICOM, cuyas estaciones automáticas registran datos de precipitaciones a cada día y con los que es posible diseñar obras de ingeniería hidráulica en la región.

Los caudales de diseño para distintos periodos de retorno de la estación hidrométrica también permiten generar infraestructura que propicie el bienestar social.

La falta de registros ha llevado a la utilización de métodos de probabilidad y estadística para estimar datos faltantes; en este trabajo se ha realizado la correlación de dos series de datos que permitirán completar registros de meses y/o años, dependiendo el estudio que se vaya a realizar.

Las funciones Gumbel y Doble Gumbel permiten simular mejor el comportamiento de fenómenos meteorológicos en la subcuenca Cointzio.

#### 9. REFERENCIAS

[1] García, A. R. (2011). “Simulación numérica del transporte de contaminantes, en el río Grande de Morelia”, Tesis de Maestría, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, U. Z. Secretaría de Investigación y Posgrado. Dirección de Posgrado. Instituto Politécnico Nacional. Ciudad de México.

[2] Salas, J. D., Delleur, J. W., Yevjevich, V. and Lane, W. L., (1980), Applied Modeling of Hydrologic Time Series, Water Resources Publications, Littleton, Colorado, 484 p. (2nd Printing 1985, 3rd Printing, 1988)

[3] Aparicio, F. J. (1992). Fundamentos de Hidrología de Superficie. (1ª reimpresión). México. Ed. Limusa

[4] Jiménez, E.M. (1997). Programa AX Centro Nacional de Prevención de desastres.

[5] Santana, A. O. (2016). “Regionalización para la obtención de lluvias de diseño en el Estado de Nuevo León”, Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería de la UNAM. Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.