

**DETERMINACIÓN DE UN ÍNDICE DE “ANTICIPACIÓN”, APLICADO A
ESTIMACIONES DE CAUDAL BASE. CASO DE ESTUDIO CUENCA SUPERIOR
DEL RÍO DE ORO Y CUENCA DEL RÍO SURATÁ, SANTANDER**

**MARIO LÓPEZ NIÑO
ALVARO RAFAEL MOLINA BEJARANO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2015

**DETERMINACIÓN DE UN ÍNDICE DE “ANTICIPACIÓN”, APLICADO A
ESTIMACIONES DE CAUDAL BASE. CASO DE ESTUDIO CUENCA SUPERIOR
DEL RÍO DE ORO Y CUENCA DEL RÍO SURATÁ, SANTANDER**

**MARIO LÓPEZ NIÑO
ALVARO RAFAEL MOLINA BEJARANO**

**Proyecto de Grado presentado como requisito para optar al título de
Ingeniero Civil**

**Director
SULLY GÓMEZ ISIDRO
Ingeniera Civil, Ph.D**

**Codirector
GUILLERMO MEJÍA AGUILAR
Ingeniero Civil, Ph.D**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2015

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	13
1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	15
2. OBJETIVOS	16
2.1 OBJETIVO GENERAL	16
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3. METODOLOGÍA	17
3.1 DISEÑO Y MUESTRA DE LA INVESTIGACIÓN	17
3.2 LOCALIZACIÓN	17
3.5 VARIABLES A UTILIZAR	20
3.5.1 Índice de anticipación	20
3.5.2 Índice de precisión	20
3.6 PROGRAMA G2	21
3.7 ERROR Y PRECISIÓN	22
3.7.1 Raíz de error medio cuadrado (RMSE)	22
3.7.2 Error relativo [%E]	22
3.7.3 Precisión	22
3.7.4 Coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe	23
3.8 ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA	23
4. RESULTADOS	24
4.1 ÍNDICE DE ANTICIPACIÓN	24
4.2 ÍNDICE DE PRECISIÓN	34
5. DISCUSIÓN	40
5.1 MEDIDAS DE ANTICIPACIÓN	40
5.2 MEDIDAS DE PRECISIÓN	41
6. CONCLUSIONES	42
7. RECOMENDACIONES	44
ANEXOS	48

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Muestra de caudales mínimos por año río Suratá [m ³ /s].	24
Tabla 2. Resumen estadístico de los datos. Río Suratá y Río de Oro.	25
Tabla 3. Índice cada año y cada dos años, Río Suratá [m ³ /s].	25
Tabla 4. Índice organizados por cuartiles, para cada año y cada dos años, Río Suratá.	26
Tabla 5. Probabilidad de que aumente o disminuya el caudal cada año. Río Suratá.	32
Tabla 6. Probabilidad de que aumente o disminuya el caudal cada dos años. Río de Oro.	33
Tabla 7. Coeficiente de eficiencia de Nash- Sutcliffe. Resultados. Río Suratá.	36
Tabla 8. Raíz del error medio cuadrado. Río de Oro	37
Tabla 9. Error relativo datos Río Suratá (%E).	37

LISTA DE GRÁFICOS

	pág.
Gráfico 1. Histogramas de la muestra de caudales mínimos de cada año. Río Suratá.	28
Gráfico 2. Histogramas de la muestra de caudales mínimos de cada dos años. Río Suratá	29
Gráfico 3. Prueba de normalidad índice cada año río Suratá. Distribución Loglogística. Minitab17.	30
Gráfico 4. Prueba de normalidad índice cada dos años río de Oro. Distribución Gamma. Minitab17.	30
Gráfico 5. Histogramas de la muestra de caudales mínimos de cada año, con su respectiva distribución. Río de Oro.	31
Gráfico 6. Histogramas de la muestra de caudales mínimos de cada dos años, con su respectiva distribución. Río de Oro	31
Gráfico 7. Error de los datos. Línea de tendencia. Río Suratá	35
Gráfico 8. Estimaciones caudal base algoritmo Smakhtin & Watkins graficado sobre los datos reales. Río Suratá	39

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Ubicación estaciones Café Madrid y Majadas	19
Figura 2. Fragmento Tabla 5.	34

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Muestra de caudales mínimos por año río de Oro [m ³ /s]	49
Anexo B. Índice cada año y cada dos años, Río de Oro	50
Anexo C. Índice en porcentaje de cada año y cada dos años, Río de Oro	51
Anexo D. Pruebas de aleatoriedad cada año y cada dos años río Suratá y río de Oro, hecha con Minitab17	52
Anexo E. Histogramas de la muestra de la muestra de caudales mínimos de cada año. Río de Oro	53
Anexo F. Histogramas de la muestra de caudales mínimos de cada dos años. Río de Oro	54
Anexo G. Prueba de normalidad índice cada dos años río Suratá. Distribución Gamma. Minitab17	55
Anexo H. Prueba de normalidad índice cada año río de Oro. Distribución Lognormal. Minitab17	56
Anexo I. Histogramas de la muestra de caudales mínimos de cada año, con su respectiva distribución. Río Surata	57
Anexo J. Histogramas de la muestra de caudales mínimos de cada dos años, con su respectiva distribución. Río Surata	58
Anexo K. Probabilidad de que aumente o disminuya el caudal cada año. Río de Oro	59
Anexo L. Probabilidad de que aumente o disminuya el caudal cada dos años. Río Surata.	60
Anexo M. Error de los datos. Regresión lineal. Río Surata	61
Anexo N. Coeficiente de eficiencia de Nash. Resultados. Río de Oro	62
Anexo O. Raíz del error medio cuadrado. Río Surata	63
Anexo P. Error relativo datos río de Oro (%E).	64
Anexo Q. Precisión datos río de Oro.	65

RESUMEN

TÍTULO: DETERMINACIÓN DE UN ÍNDICE DE “ANTICIPACIÓN”, APLICADO A ESTIMACIONES DE CAUDAL BASE. CASO DE ESTUDIO CUENCA SUPERIOR DEL RÍO DE ORO Y CUENCA DEL RÍO SURATÁ, SANTANDER

**AUTORES: MARIO LOPEZ NIÑO
ÁLVARO RAFAEL MOLINA BEJARANO****

PALABRAS CLAVE: Índice de Anticipación, Error y Precisión en Modelos Estimativos de Flujo Base, Caudal Mínimo Estimado.

La estimación de caudales base en ríos cobra cada vez más importancia ya que los fenómenos macroclimáticos han provocado un aumento en el impacto de las estaciones climáticas, luego el conocimiento anticipado de los caudales mínimos que se puedan presentar es una ventaja importante tanto para la mitigación del impacto ambiental, social y económico, como para la búsqueda de estrategias que permitan un continuo abastecimiento del preciado líquido a la población, siendo este último un factor de gran importancia para el normal desarrollo de los seres humanos. En el presente artículo se evalúan los métodos numéricos utilizados en el programa G2 para la estimación de caudal base, calculando el error y la precisión respecto a los valores reales presentados en las estaciones Café Madrid y Majadas de los ríos de Oro y Suratá respectivamente, ubicados en la ciudad de Bucaramanga. También se define y calcula un índice de anticipación de caudales mínimos utilizando los datos disponibles de las mismas estaciones Café Madrid y Majadas, se tomaron los caudales mínimos cada año y cada dos años y se analizó su distribución de probabilidad para determinar la normalidad o no normalidad de la distribución de datos, para este caso ninguna fue una distribución normal por lo que se utilizó una herramienta electrónica para determinar el mejor ajuste de densidad de probabilidad para posteriormente hacer una anticipación probabilística anual o bienal de la presentación de un caudal mínimo.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Sully Gómez Isidro. Codirector: Guillermo Mejía Aguilar

ABSTRACT

TÍTULO: DETERMINATION OF AN INDEX OF "ADVANCE" APPLIED TO BASE RATE ESTIMATES. UPPER CASE STUDY RIVER BASIN GOLD AND RIVER BASIN SURATA, SANTANDER*

**AUTORES: MARIO LOPEZ NIÑO
ÁLVARO RAFAEL MOLINA BEJARANO****

KEYWORDS: Anticipation Index, error and accuracy for estimating base flow models, estimated minimum flow.

The estimate base flows in rivers is becoming increasingly important as the macroclimatic phenomena have caused an increase in the impact of seasons, then the anticipated knowledge of the minimum flows that may arise is an important advantage for impact mitigation environmental, social and economic as for finding strategies that allow a continuous supply of the precious liquid to the population, the latter being a major factor for the normal development of human beings In this paper the numerical methods used in the G2 [1] program for estimating base flow are evaluated, calculating the error and accuracy compared to the real values presented in the Café Madrid and Majadas stations of the rivers Oro and Suratá respectively located in the city of Bucaramanga. It also defines and calculates an index of anticipation of minimum flows using data from the same stations Café Madrid and Majadas available, minimum flows every year and every two years were taken and its probability distribution was analyzed for normal or not normal distribution of data, in this case none were normally distributed so that an electronic tool was used to determine the best fit probability density later make an annual or biannual probabilistic anticipation of the presentation of a minimum flow.

* Work Degree

** Civil Engineering, UIS. Head Teacher: Sully Gomez Isidro. Codirector: Guillermo Mejia Aguilar

INTRODUCCIÓN

El manejo adecuado de la explotación y protección del recurso agua requiere herramientas que orienten la toma de decisiones. En un caso específico, para tomar decisiones sobre la administración del recurso hídrico que abastecen acueductos y represas se requiere conocer y estudiar la frecuencia y magnitud de los caudales mínimos de los afluentes respectivos.

La estimación de los caudales mínimos de los afluentes es crucial para el manejo de la calidad y planificación del suministro de agua para los núcleos poblacionales. La magnitud, frecuencia y duración de dicho caudales están definidos por la dinámica del agua subterránea y su interacción con las corrientes superficiales durante periodos secos prolongados.¹

Dicha estimación se hace compleja con la aparición de fenómenos macro climáticos como El Niño y La Niña, ya que estos fenómenos originan anomalías en la regularidad del clima. El fenómeno del Niño en particular se relaciona con la prolongación del periodo de estiaje acompañado de vientos calientes,² lo que disminuye considerablemente la disponibilidad de agua para consumo.

La escasez de agua tiene un impacto con dimensiones económicas, sociales y ecológicas, como por ejemplo: la pérdida de cultivos debido a la falta de agua para los riegos y, la alta mortandad de animales a causa de la baja disponibilidad del líquido vital (agua). La disminución de cultivos genera escasez de alimentos lo cual hace que la economía se afecte y suban los precios desmedidamente. El fenómeno del niño en 1997-1998 dejó pérdidas por más de 564 millones de

¹ RORABAUGH, M. Estimating changes in bank storage and ground-water contribution to streamflow. Investigation report: USGS, 1964.

² POVEDA, G. Caudales mínimos en Colombia: relaciones macroclimáticas, escalonamiento y balances hidrológicos [en línea]. Seminario internacional, 2004 [citado 5 nov 2014]. Disponible en Internet: <URL:<http://www.bdigital.unal.edu.co/>> (4086)

dólares debido a sequias fuertes, daños evaluados entre producción agrícola, energética, infraestructura, maquinarias y viviendas.³

³ RIVERA, H., GONZÁLES, H., MARTÍNEZ, Ó., DOMÍNGUEZ, E., ROMERO, H., FAJARDO, M., ZAMUDIO, E., GONZÁLES, Y., CARVAJAL, M. Protocolo para la emisión de los pronósticos hidrológicos [en línea]. 2008. [Citado 10 nov 2014] Disponible en Internet: <URL:<https://www.siac.gov.co/documentos/Protocolo%20emision.pdf>>

1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Colombia es un país con topografía muy diversa y con variedad climatológica amplia, lo cual torna su hidrología en compleja. El Estado colombiano, responsable de velar por el suministro constante del recurso agua, durante los últimos decenios ha buscado administrar eficaz y eficientemente los recursos naturales renovables, debido al constante crecimiento poblacional en centros urbanos.

Así como las temporadas de lluvia traen problemas para las naciones, el caso contrario, las sequias prolongadas son también un problema latente para todas las zonas habitadas del planeta. Las temporadas de estiaje muy intensas ocasionan daños ecológicos y económicos en las regiones donde se presentan. Con toda la problemática que se desarrolla debido a la falta de agua, cobra importancia la estimación de caudales mínimos para poder hacer una mejor administración del recurso agua y minimizar el impacto económico y social de las temporadas prolongadas de verano.⁴

En consecuencia, el abastecimiento de agua en acueductos es un tema de mucho interés, ya que con base en los caudales mínimos que se presenten en las bocatomas, se hace el diseño de toda la infraestructura del acueducto y se proyecta el servicio para un determinado número de habitantes. Un buen pronóstico de caudales mínimos con cierto tiempo de anticipación ayudaría a la mitigación del impacto de sequias fuertes y prolongadas en cualquier región y serviría como alarma para diseñar e implementar planes de contingencia y mitigación.⁵

⁴ POVEDA, Op. Cit.

⁵ RIVERA, et al. Op. Cit.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Con el propósito de contribuir al entendimiento y solución del problema identificado, el presente estudio tuvo como objetivo general definir y calcular la anticipación y la precisión de los modelos de estimación de caudales mínimos, como instrumentos de prevención para mitigar el impacto adverso de los caudales críticos en abastecimiento de acueductos.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Definir y proponer un índice de anticipación aplicado a los modelos de estimación de caudales mínimos en los ríos de Oro y Suratá.
- b) Estimar la precisión de los modelos de estimación de caudal base calculados con el programa **G2**.

3. METODOLOGÍA

Para lograr los objetivos propuesto, a continuación se describen las características principales de la metodología empleada en el estudio.

3.1 DISEÑO Y MUESTRA DE LA INVESTIGACIÓN

En el estudio se llevó a cabo una investigación descriptiva, en la que se mide a lo largo del tiempo repetidas veces un fenómeno, procurando mostrar la evolución del comportamiento de las variables investigadas.

Para ello se utilizó información de los caudales medios diarios [m^3/s] de dos fuentes hídricas: el río Suratá y el río de Oro. Para el caso del río Suratá se empleó información de caudales medidos en campo desde 1 enero 1990 hasta 31 diciembre de 2013. Por su parte, para el caso del río de Oro los datos se tomaron desde 1 enero de 1988 hasta 31 diciembre de 2004.

3.2 LOCALIZACIÓN

Los datos analizados fueron tomados en dos estaciones meteorológicas del IDEAM: Café Madrid y Majadas, cuya ubicación geográfica se muestra en la Figura 2.

La estación **Café Madrid** es una estación limnigráfica instalada y operada por el IDEAM. Esta estación está ubicada sobre el río Lebrija a pocos metros aguas

debajo de la unión de los cauces de los ríos de Oro y Suratá, con una altura de 600 msnm.⁶

La estación **Majadas** es una estación de tipo limnigráfica, ubicada aguas abajo de la confluencias de los Ríos Suratá y Tona, y kilómetros antes del punto de salida de la cuenca en la que se escurren las aguas de las micro cuencas que la conforman (Surata, Charta, Vetas y Tona)⁷.

3.3 CAUDALES MÍNIMOS

El caudal mínimo, que se encuentra implícito en el caudal base de un afluente hídrico, es tenido en cuenta para el diseño de bocatomas en acueductos y embalses. Con base en este caudal de agua se debe hacer la máxima captación posible dejando un caudal ecológico,⁸ aguas abajo de la estructura, que sirva para sostener el equilibrio ecológico y satisfaga la demanda de agua por parte de los humanos que viven en el entorno del río. En temporadas de estiaje se manifiesta el caudal base de los ríos ya que la recarga por escorrentía superficial es insignificante o nula y el caudal es significativamente aportado por acuíferos que se encuentren en contacto con el lecho de los ríos.⁹

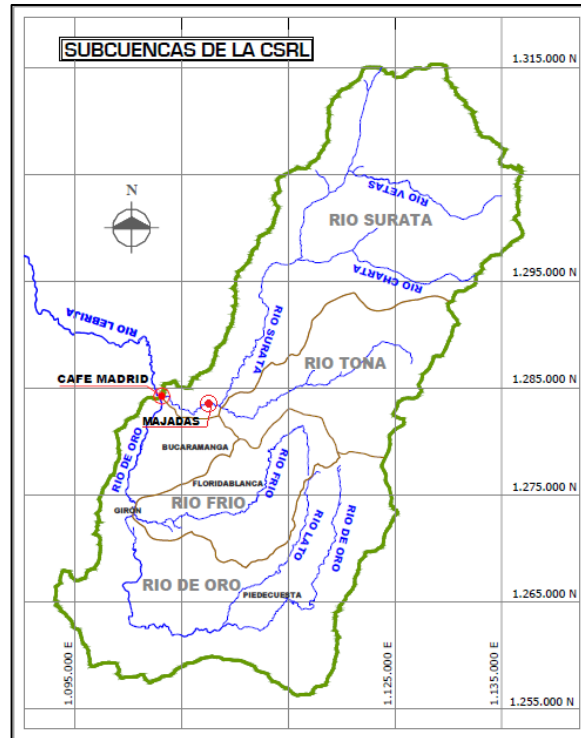
⁶ SERRANO SANTIAGO, A. Y BALAGUERA PADILLA, G. Separación de flujo base en la estación Café Madrid (C.S.R.L.). Tesis de pregrado. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 2006.

⁷ LEÓN CARVAJAL, N. Y ROMERO CAYACHOA, T. Modelamiento de los caudales de escorrentía p las cuencas de los ríos Suratá y Tona mediante el modelo conceptual agregado NAM. (Tesis de pregrado). Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 2006.

⁸ RÍOS ROJAS, L. Y VÉLEZ UPEGUI, J. Corrientes naturales intervenciones y condiciones ecológicas. [En línea]. Seminario Internacional sobre Eventos Extremos Mínimos en Regímenes de Caudales: Diagnóstico, Modelamiento y Análisis, 2004 [Citado 8 dic 2014] Disponible en Internet: <URL:<http://www.bdigital.unal.edu.co/4336/1/DA3751.pdf>>

⁹ SMAKHTIN, V. U. Low flow hydrology; a review. Journal Of Hydrology, 2001, p. 240(3-4), 147-186.

Figura 1. Ubicación estaciones Café Madrid y Majadas



Fuente: modificado por los autores.¹⁰

3.4 INDICADORES E ÍNDICES

Para poder definir indicador e índice, se debe entender primero el significado de “parámetro” ya que estos están interrelacionados. Un parámetro es un dato aislado el cual no expresa una idea ni características particulares de lo que representa el dato. El indicador por su parte está formado por parámetros, los cuales están correlacionados linealmente con operaciones aritméticas sencillas, el indicador responde linealmente al incremento o decremento de los parámetros que lo componen, dando una información cuantitativa para una interpretación cualitativa de los datos. El índice en cambio, es una relación que responde a algoritmos matemáticos o ecuaciones que opera parámetros e indicadores,

¹⁰ SERRANO SANTIAGO, A. Y BALAGUERA PADILLA, G., Op. Cit.

tratando de explicar un fenómeno con una interfaz amigable y un poco más entendible al lector.¹¹

3.5 VARIABLES A UTILIZAR

3.5.1 Índice de anticipación. El índice de anticipación se define como un coeficiente que expresa la relación de un caudal mínimo en un tiempo futuro con respecto a un caudal determinado, que para este caso, se calcularon con base en una diferencia de un año y de dos años.

El “caudal mínimo” [**Qmin**] por su parte, es una variable cuantitativa independiente cuya unidad de medida esta expresada en (m^3/s). Los caudales mínimos analizados para este estudio correspondieron a aquellos identificados dentro de cada periodo anual de la serie total de datos.

De la muestra de caudales mínimos, se calculó la relación del caudal del siguiente año con respecto al anterior, para el índice anual de caudales [**Índice c/a**], y para el índice bienal [**Índice c/2a**], la relación del caudal cada dos años.

3.5.2 Índice de precisión. El índice de precisión es un coeficiente que indica el grado de error de los métodos de estimación de caudal base. En este caso la estimación de caudal base se hace utilizando el programa G2.

Los datos utilizados para definir este índice fueron tomados de las épocas de recesión de la serie total de caudales, para el Río de Oro (estación Café Madrid) los datos de caudales en época de recesión se tomaron de la Curva Maestra de

¹¹ BLANQUERO, R., CARRIZOSA, E., PITA, M., CAMARRILLO, J. & ÁLVAREZ-FRANCOSO, J. Modelo estadístico para la predicción del índice estandarizado de sequía pluviométrica (IESP) en Andalucía [en línea]. 2012 [Citado 10 dic 2014]. Disponible en Internet: <URL:<http://fundacion.usal.es/conaec/pendrive/ficheros/ponencias/ponencias2/02-Extremos.pdf>>

Recesión (CMR) calculada en (6), mientras que los datos de caudales de épocas de recesión se tomaron de la CMR hallada en (11).

Caudal real [Q_{real}]: es la variable cuantitativa independiente cuya unidad es (m³/s), Para este índice se tomó la serie de caudal, leídos en campo.

Caudal base estimado [Q_{est}]: Es la serie de caudales que arroja el programa G2 por cada uno de sus métodos de estimación de caudal base.

Caudal real promedio [\bar{Q}]: Es el promedio de la serie de caudales reales, utilizado solamente en el cálculo del coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe.

Error: se utilizaron tres métodos para hallar el error, raíz del error medio cuadrado (**RMSE**), error relativo y el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe.

3.6 PROGRAMA G2

El programa G2 es un programa de computador que facilita la estimación de caudal base mediante la metodología de algoritmos numéricos.¹² Los parámetros que se ingresan al programa son criterio del usuario y la metodología de calibración de parámetros está descrita de manera detallada en [11].

Se usan cinco (5) algoritmos como son: algoritmo de separación de un parámetro (**1P**); algoritmo de separación de dos parámetros (**2P**); algoritmo de separación de tres parámetros (**3P**); algoritmo de Nathan & McMahon (**N&M**) Paso1, paso2 y paso3 (**P1, P2, P3**) respectivamente; y algoritmo de Smakhtin & Watkins (**S&W**).

¹² GÓMEZ GARCÍA, D., GÓMEZ MOGOLLÓN, L., Op. Cit.

3.7 ERROR Y PRECISIÓN

Para el estudio se ha definido error como la diferencia de caudales (m^3/s) entre el dato leído en campo y el dato estimado por cada algoritmo numérico usado en el programa **G2**.

La precisión es un indicador de la variabilidad de las estimaciones del programa con respecto a los datos reales de caudal. A continuación se explican los tres métodos empleados en este estudio.

3.7.1 Raíz de error medio cuadrado (RMSE). RMSE es la raíz del promedio de los cuadrados del error de cada estimación de caudal.¹³

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{real} - Q_{est})^2}{n}} \quad (1)$$

3.7.2 Error relativo [%E]. Es la relación entre la diferencia del valor de la lectura de caudal medio diario en campo y el valor estimado por medio de G2 de caudal base. Este tipo de error es adimensional y puede ser dado en porcentaje.¹⁴

$$\%E = \frac{Q_{real} - Q_{est}}{y_i} * 100 \quad (2)$$

3.7.3 Precisión. Es una medida que describe que tan cerca está el valor estimado del valor real.¹⁵

¹³ YANG, J., YU, S., & LIU, G. Multi-step-ahead predictor design for effective long-term forecast of hydrological signals using a novel wavelet neural network hybrid model. *Hydrology And Earth System Sciences*, 17(12), 2013, p. 4981-4993.

¹⁴ SPIEGEL, M. & STEPHENS, L. *Estadística*. (3a ed.) México D.F: McGraw-Hill, 2012.

¹⁵ *Ibíd.*

$$\text{Precisión} = (1 - \%E) * 100 \quad (3)$$

3.7.4 Coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe. El coeficiente de Eficiencia de Nash-Sutcliffe puede ir desde $-\infty$ a 1. Una eficiencia de 1 ($E = 1$), corresponde a un ajuste perfecto de los datos modelados a los datos observados. Una eficiencia de 0 ($E = 0$) indica que las predicciones de los modelos son tan precisos como la media de los datos observados.¹⁶

Esencialmente, cuanto más cerca la eficiencia del modelo es a 1, más preciso será la estimación de caudal base.

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{real} - Q_{est})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{real} - \bar{Q})^2} \quad (4)$$

3.8 ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA

La estadística descriptiva se ha utilizado en el estudio con el objetivo de ordenar, analizar y representar la serie de datos de caudal para describir apropiadamente sus características.¹⁷ Los estadísticos utilizados fueron: coeficiente de regresión (R), media, error típico, mediana, moda desviación estándar, varianza, curtosis, coeficiente de asimetría, entre otros.

El software o paquete estadístico usado para el estudio fue **Minitab17**. Entre sus muchas funciones el programa se usó para realizar la estadística descriptiva de las muestras, para realizar pruebas de ajuste de bondad de las curvas de probabilidad y chequear supuestos de normalidad y aleatoriedad.

¹⁶ KELSEY, P., HALL, J., KITSIOS, A., QUINTON, B. & SHAKYA, D. Hydrological and nutrient modeling of the Swan-Canning coastal catchments [en línea]. Reporte No. 14. Department of water. Western Australia, 2010. [Citado 20 ene 2015]. Disponible en Internet: <URL:<http://www.water.wa.gov.au/PublicationStore/first/86565>>

¹⁷ YANG, J., YU, S., Y LIU, G. Op. Cit.

4. RESULTADOS

4.1 ÍNDICE DE ANTICIPACIÓN

Del registro de caudales de cada cuenca se tomó la muestra de caudales mínimos de cada año mostrados en la Tabla 1, cuyos estadísticos resumidos se muestran en la Tabla 2.

Tabla 1. Muestra de caudales mínimos por año río Suratá [m³/s].

Río Suratá			
Año	Qmin	Año	Qmin
1990	2,46	2002	1,83
1991	3,07	2003	1,83
1992	1,80	2004	2,91
1993	2,53	2005	2,66
1994	2,67	2006	1,79
1995	2,53	2007	2,48
1996	5,49	2008	2,55
1997	2,85	2009	2,74
1998	3,92	2010	1,80
1999	4,12	2011	7,10
2000	2,98	2012	3,50
2001	1,65	2013	2,24

Tabla 2. Resumen estadístico de los datos. Río Suratá y Río de Oro.

Estadístico	Río Suratá	Río de Oro
Media (m³/s)	2,89	4,55
Error típico	0,2557	0,5201
Mediana (m³/s)	2,60	5,02
Desv. Estándar	1,2527	2,1444
Curtosis	5,05	-0,99
Coe. Asimetría	2,07	-0,27
Mínimo (m³/s)	1,65	1,14
Máximo (m³/s)	7,10	8,2
Cuenta	24	17

De esta muestra de datos mostrados en las Tablas 1 se calcularon los índices de anticipación indicados en la Tabla 3. Una vez calculados los índices se organizaron en orden descendente, como se muestra en la Tabla 4 para el río Suratá.

Tabla 3. Índice cada año y cada dos años, Río Suratá [m³/s].

Año	Qmin	Índice c/a	Índice c/2a
1990	2,46		
1991	3,07	1,25	
1992	1,80	0,59	0,73
1993	2,53	1,40	0,82
1994	2,67	1,06	1,48
1995	2,53	0,95	1,00
1996	5,49	2,17	2,06
1997	2,85	0,52	1,13
1998	3,92	1,37	0,71
1999	4,12	1,05	1,44

Año	Qmin	Índice c/a	Índice c/2a
2000	2,98	0,72	0,76
2001	1,65	0,55	0,40
2002	1,83	1,11	0,61
2003	1,83	1,00	1,11
2004	2,91	1,59	1,59
2005	2,66	0,91	1,45
2006	1,79	0,67	0,61
2007	2,48	1,38	0,93
2008	2,55	1,03	1,42
2009	2,74	1,08	1,11
2010	1,80	0,66	0,71
2011	7,10	3,93	2,59
2012	3,50	0,49	1,94
2013	2,24	0,64	0,32

Los datos de la **Tabla 4** fueron sometidos a un análisis de aleatoriedad y normalidad. A esta muestra de datos se aplicó la prueba de aleatoriedad para ver si el orden de los datos sigue un comportamiento aleatorio.

Tabla 4. Índice organizados por cuartiles, para cada año y cada dos años, Río Suratá.

	Río Suratá
	Índice c/a
q1	0,49
	0,52
	0,55
	0,59
	0,64

	Río Suratá
	Índice c/2a
q1	0,32
	0,40
	0,61
	0,61
	0,71

	Río Suratá
	Índice c/a
	0,66
q2	0,67
	0,72
	0,91
	0,95
	1,00
	1,03
q3	1,05
	1,06
	1,08
	1,11
	1,25
	1,37
q4	1,38
	1,40
	1,59
	2,17
	3,93

	Río Suratá
	Índice c/2a
	0,71
q2	0,73
	0,76
	0,82
	0,93
	1,00
	1,11
q3	1,11
	1,13
	1,42
	1,44
	1,45
q4	1,48
	1,59
	1,94
	2,06
	2,59

Los resultados de la prueba de aleatoriedad desarrollados con el programa **Minitab17**, se muestran en el **Anexo 4**.

Los resultados mostraron que la muestra de datos tomada es aleatoria, ya que todos los valores de “p” son pequeños. Para el río Suratá el índice anual ($p=0,052$), el índice bienal ($p=0,774$); para el río de Oro el índice anual ($p=0,939$) y el índice bienal ($p=0,073$).

Adicionalmente para los índices mostrados en Tabla 4, se aplicó la prueba de normalidad la cual arrojó que la distribución es no normal, como se observa en Grafica 1 y Grafica 2.

Como los resultados de normalidad indicaron que las distribuciones son no normales, se procedió, a establecer qué tipo de distribución de probabilidad se ajustaban a los datos de la muestra.

Con el software **Minitab17** se logró determinar la distribución de cada muestra (caudales mínimos por año) por cada río.

Gráfico 1. Histogramas de la muestra de caudales mínimos de cada año. Río Suratá.

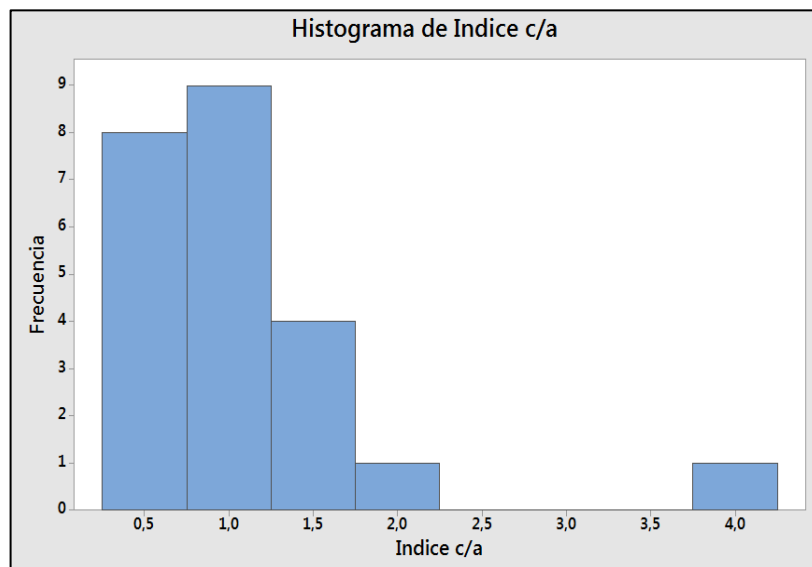
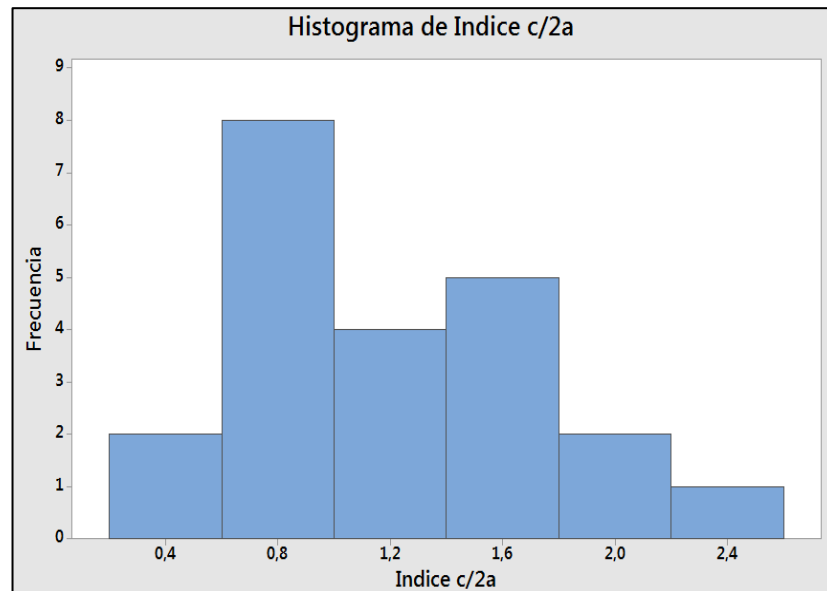


Gráfico 2. Histogramas de la muestra de caudales mínimos de cada dos años. Río Suratá



Las distribuciones se seleccionaron revisando de manera visual todas las gráficas y se escogieron en las que mejor se correlacionaron los datos.

En las **Gráficas 3**, y **4** se muestra cómo quedan los datos dentro de las gráficas que representan cada distribución.

Para los datos del índice de cada año se obtuvo que la distribución que se ajustaba para **Majadas** fue Loglogística y para Café Madrid Lognormal.

En el índice de cada dos años los datos se adaptaron mejor a la distribución Gamma.

Gráfico 3. Prueba de normalidad índice cada año río Suratá. Distribución Loglogística. Minitab17.

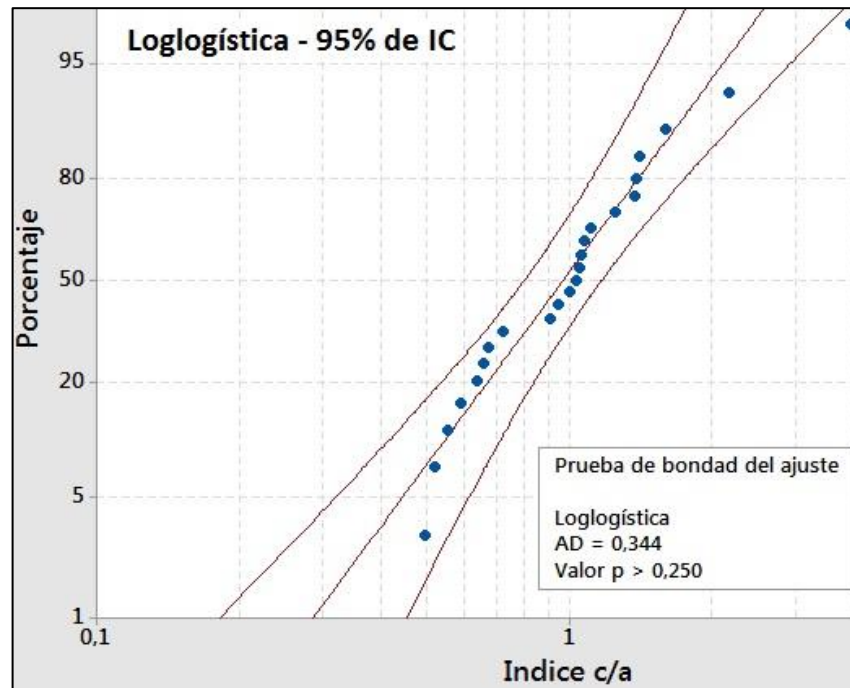
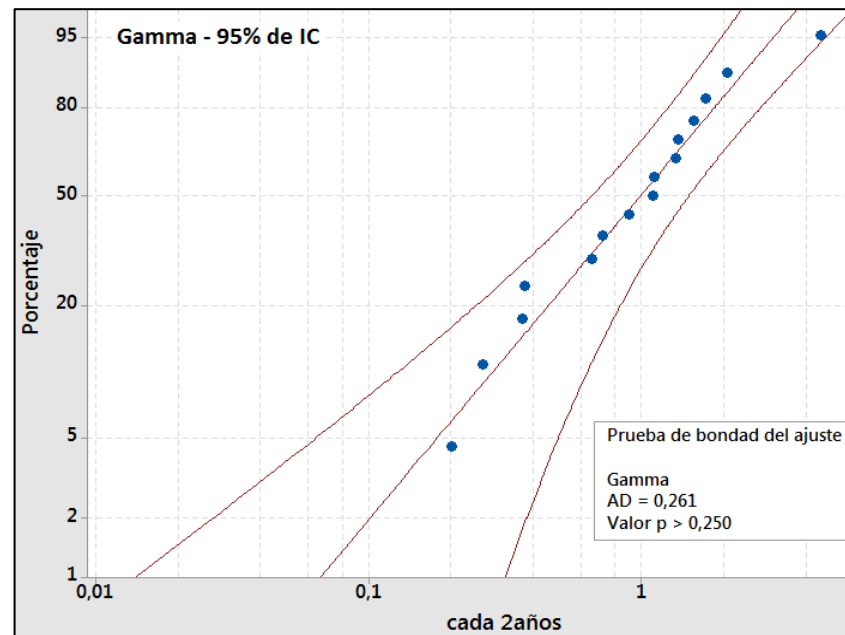


Gráfico 4. Prueba de normalidad índice cada dos años río de Oro. Distribución Gamma. Minitab17.



Las **Gráficas 5 y 6** se muestran los histogramas realizados con los datos de cada río, y la forma como se ajusta el trazado de las distribuciones seleccionadas.

Gráfico 5. Histogramas de la muestra de caudales mínimos de cada año, con su respectiva distribución. Río de Oro.

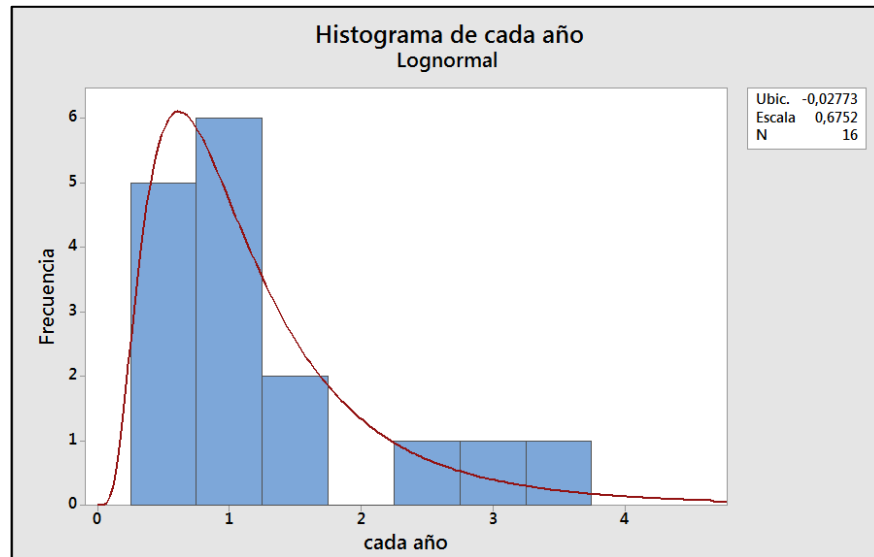
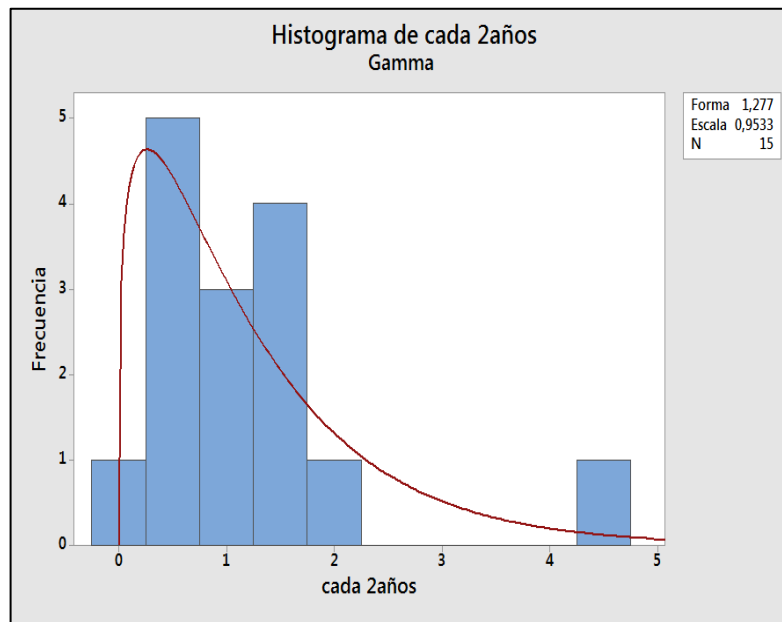


Gráfico 6. Histogramas de la muestra de caudales mínimos de cada dos años, con su respectiva distribución. Río de Oro



Con la información anterior se calculó la probabilidad de que se presente una disminución o un aumento en el caudal cada año o cada dos años según el índice del año siguiente, como se muestra en la Tabla 5, y Tabla 6.

Tabla 5. Probabilidad de que aumente o disminuya el caudal cada año. Río Suratá.

índice cada año-Río Suratá-Estación Majadas					
Qmin	Índice c/a	disminuye↓	aumenta↑	Dist: Log-Logistic	
				Prob (X < x)	prob (X > x)
2,46					
3,07	1,25		24,72%	72,04%	27,96%
1,80	0,59	41,33%		13,05%	86,95%
2,53	1,40		40,28%	80,06%	19,94%
2,67	1,06		5,74%	58,04%	41,96%
2,53	0,95	5,24%		47,77%	52,23%
5,49	2,17		117,15%	95,43%	4,57%
2,85	0,52	48,07%		8,65%	91,35%
3,92	1,37		37,33%	78,75%	21,25%
4,12	1,05		5,03%	57,41%	42,59%
2,98	0,72	27,65%		24,85%	75,15%
1,65	0,55	44,54%		10,82%	89,18%
1,83	1,11		10,84%	62,29%	37,71%
1,83	1,00			52,84%	47,16%
2,91	1,59		59,02%	86,56%	13,44%
2,66	0,91	8,76%		44,23%	55,77%
1,79	0,67	32,61%		20,19%	79,81%
2,48	1,38		38,36%	79,22%	20,78%
2,55	1,03		2,83%	55,46%	44,54%
2,74	1,08		7,71%	59,72%	40,28%

índice cada año-Río Suratá-Estación Majadas					
Qmin	Índice c/a	disminuye↓	aumenta↑	Dist: Log-Logistic	
1,80	0,66	34,18%	293,19%	18,79%	81,21%
7,10	3,93			99,49%	0,51%
3,50	0,49	50,63%		7,26%	92,74%
2,24	0,64	36,19%		17,08%	82,92%

Tabla 6. Probabilidad de que aumente o disminuya el caudal cada dos años. Río de Oro.

Índice cada año-Río de Oro-Estación Café Madrid					
Qmin	Índice c/2a	disminuye↓	aumenta↑	Dist: Lognormal	
				Prob (X < x)	prob (X > x)
6,98			221,21%	48,78%	51,22%
6,65	0,95	4,73%		71,07%	28,93%
5,02	0,75	24,51%		44,37%	55,63%
2,48	0,49	50,60%		4,99%	95,01%
1,32	0,53	46,77%		257,02%	3,97%
4,24	3,21			154,55%	4,53%
6,00	1,42				95,47%
5,68	0,95	5,33%			94,67%
8,20	1,44				5,33%
6,34	0,77	22,68%			77,32%
5,41	0,85	14,67%			85,33%
5,68	1,05				14,67%
1,97	0,35	65,32%			34,68%
1,14	0,58	42,13%			57,87%
4,07	3,57				92,13%
1,76	0,43	56,76%			43,24%
4,48	2,55			56,76%	

Con las Tablas 5, y 6 se puede calcular una anticipación al analizar la probabilidad de que se presente un caudal mínimo en las épocas de sequía de los próximos años.

Para esto habría que tener en cuenta los resultados críticos obtenidos, por ejemplo las probabilidades más altas de que el caudal disminuya, las disminuciones con valores altos, las disminuciones con menor porcentaje ya que tienen probabilidades de ocurrencia mayores y sería importante revisarlo si se tiene en el año actual un caudal demasiado bajo.

Entonces por ejemplo según la Tabla 5 la probabilidad de que el caudal actual de 3,2 m³/s en la estación **Majadas** pueda disminuir a 2,16 (32,61%) el próximo año sería de un 20,19%; como se muestra en la Figura 3.

Figura 2. Fragmento Tabla 5.

2,91	1,59		59,02%	86,56%	13,44%
2,66	0,91	8,76%		44,23%	55,77%
1,79	0,67	32,61%		20,19%	79,81%
2,48	1,38		38,36%	79,22%	20,78%

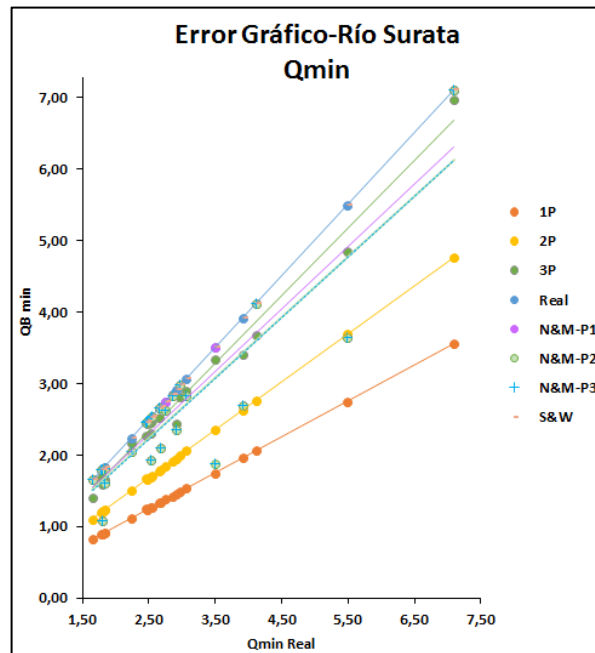
4.2 ÍNDICE DE PRECISIÓN

Al estudiar los errores de los resultados arrojados por **G2**, implícitamente se está analizando la precisión del software, lo que sirve para comprobar que algoritmo es más eficiente a la hora de estimar el caudal base. Teniendo en cuenta las variables y los conceptos que cada algoritmo maneja podría ser de gran ayuda para obtener otros resultados que serían de gran aporte para este trabajo.

Para este estudio se usaron métodos que son utilizados frecuentemente para calcular índices de error y precisión del estudio. Los métodos utilizados en este

trabajo fueron el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (**E**), el método de la raíz del error medio cuadrado (**RMSE**) y el error relativo (**%E**).

Gráfico 7. Error de los datos. Línea de tendencia. Río Suratá



Adicionalmente se utilizó un método donde gráficamente se comparan los valores de los datos observados y los resultados arrojados por **G2** para cada algoritmo (Gráfica 7).

Los valores reales se muestran representados por círculos y una línea de tendencia de cuarenta y cinco grados (45°) y los demás van variando la inclinación según sea el error que presente con respecto a los datos reales.

Este análisis se hizo para la muestra de caudales mínimos de cada año. Según la Gráfica 7 se puede observar que la línea que representa el método **S&W** es exactamente igual a la de los datos reales, siendo esta correlación la que más se ajusta a cuarenta y cinco grados (45°), lo que indica que entre este método y los valores reales medidos en campo, el error es mínimo y la precisión es máxima.

El valor del coeficiente de Nash puede estar entre el intervalo de $-\infty$ a uno. Si E es igual a uno ($E = 1$) corresponde a una combinación perfecta entre los datos modelados y los datos observados. Una eficiencia de cero ($E = 0$) indica que las estimaciones del modelo son precisas. Mientras que E menor que cero ($E < 0$) se produce cuando los valores observados están muy por encima de los valores que nos ofrece el modelo. (Ver Tabla 7).

Tabla 7. Coeficiente de eficiencia de Nash- Sutcliffe. Resultados. Río Suratá.

Coeficiente de Nash-Sutcliffe	
Algoritmo	E
1P	0,95
2P	0,98
3P	0,98
N&M-P1	0,99
N&M-P2	0,98
N&M-P3	0,97
S&W	0,98

Con base en este coeficiente se puede observar que para el Río Suratá el método más eficiente es Nathan & McMahon paso1 (**N&M-P1**) pues su coeficiente es el más cercano a 1 (**Tabla 7**), coincidiendo el resultado para el Río de Oro, donde dos métodos tienen el mismo valor y uno de los cuales es **N&M-P1** y el otro es **S&W**.

Por su parte, los resultados que se obtuvieron utilizando el método **RMSE** dados en $[m^3/s]$, como se observa en la **Tabla 8**, muestran que para el Río de Oro, el algoritmo con menos error en las temporadas de recesión es el de Nathan & McMahon paso 1 (**N&M-P1**), con un valor de 1,61. Para Suratá el algoritmo que presenta menos error según **RMSE** es **N&M-P1** cuyos cálculos se encuentran en el **Anexos**.

Tabla 8. Raíz del error medio cuadrado. Río de Oro

Raíz del error medio cuadrado	
Algoritmo	RMSE
1P	5,95
2P	3,56
3P	2,58
N&M-P1	1,61
N&M-P2	3,31
N&M-P3	3,55
S&W	1,65

Finalmente el error relativo calculado para caudales mínimos anuales (**Tabla 9**), arroja como resultado un error muy bajo en cada uno de los datos anuales para el método **S&W**, ya que este método se ajusta casi perfectamente a los datos de caudales reales en época de recesión.

Tabla 9. Error relativo datos Río Suratá (%E).

Error relativo (%E)	
Algoritmo	%E
1P	30,20%
2P	11,69%
3P	11,86%
N&M-P1	5,53%
N&M-P2	17,91%
N&M-P3	18,92%
S&W	5,48%

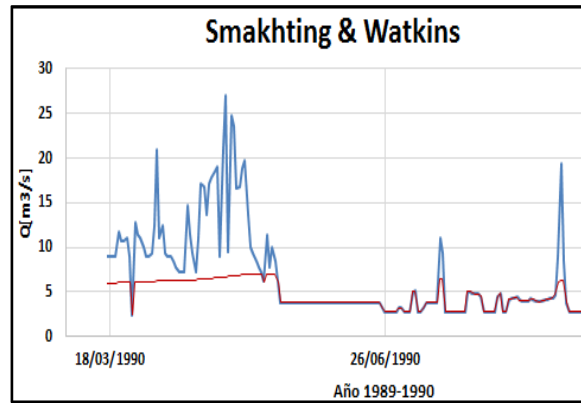
Luego de obtener el error relativo, se calculó la precisión, con la ecuación (8). Los resultados se presentan en la **Tabla 10**, siendo consecuente con los resultados de error de la **Tabla 9** el método más preciso es **S&W** al analizar los caudales mínimos anuales solamente. En **Anexos** se encuentran las tablas para las series de caudal completas para el Río Suratá y el para el Río de Oro.

Tabla 10. *Precisión datos Río Suratá.*

Precisión	
Algoritmo	Precisión
1P	69,80%
2P	88,31%
3P	88,14%
N&M-P1	94,47%
N&M-P2	82,09%
N&M-P3	81,08%
S&W	94,52%

Los resultados de la estimación de caudal base hecha con el método de **Smakhtin & Watkins (S&W)**, presentan errores muy altos en los días de caudales máximos y errores mínimos o nulos en las épocas de verano (**Anexos**); esto gracias a que la estimación permanece aproximadamente constante a lo largo de la serie de tiempo (**Grafica 8**). Al contrario la precisión (**Tabla 10**) presenta sus valores máximos en las épocas de recesión.

Gráfico 8. Estimaciones caudal base algoritmo Smakhtin & Watkins graficado sobre los datos reales. Río Suratá



Fuente: Gómez Ríos, V.¹⁸

¹⁸ GÓMEZ RÍOS, V., Op. Cit.

5. DISCUSIÓN

5.1 MEDIDAS DE ANTICIPACIÓN

El índice de anticipación ofrece una metodología para lograr conocer las condiciones de sequía a futuro, que puede ser aplicada en todas las fuentes hídricas siempre y cuando se tengan los suficientes registros históricos de caudal.

El índice de anticipación es una metodología que da como resultado las curvas de probabilidad que mejor se ajustan a la distribución de caudales para las estaciones Majadas y Café Madrid de los ríos Suratá y de Oro respectivamente, de esta manera se puede anticipar la existencia de un caudal mínimo a futuro, información invaluable para poder mitigar el impacto de épocas de estiaje prolongadas.

Al avanzar en la investigación se notó que existe poca o ninguna información acerca del tema de anticipación de caudales mínimos, así como la falta de información de caudales de fuentes hídricas en el país, que permitirían una aplicación de metodologías para anticipar caudales mínimos.

La mayoría de los pronósticos hidrológicos se dan con días o semanas de anticipación según documento emitido por el **IDEAM**,¹⁹ con este estudio se da una alarma con un año de anticipación de caudales mínimos y la metodología de éste es fácilmente aplicada como estudio preliminar del comportamiento a futuro de los caudales en un río cualquiera, lo que es una ventaja a la hora prevención y mitigación de daños por sequias.

Con la ayuda de las **Tablas 5 y 6 y Anexos 11 y 12** se facilita la interpretación del índice de anticipación pues si se quiere conocer la probabilidad que un caudal

¹⁹ PUENTES, D., Op. Cit.

aumente o disminuya un determinado porcentaje, se busca dicho porcentaje en las columnas (**disminuye** o **augmenta**) y asociado a este porcentaje esta su respectiva probabilidad de ocurrencia en la columna (**Prob (X<x)**), o si se tiene un caudal y se quiere saber el próximo año cual sería el caudal esperado con cierta probabilidad dada, se busca en la columna (**Prob (X<x)**) dicha probabilidad y posteriormente se encuentra en la misma línea en las columnas (**disminuye** o **augmenta**) el porcentaje que este caudal aumenta o disminuye, según sea el caso. Los datos que no se encuentren en la tabla pueden ser interpolados para hallarlos o se puede usar la distribución de probabilidad encontrada para cada río.

Utilizando la información que arroja el índice de anticipación se puede mitigar el impacto que causan los caudales muy bajos pues se conoce una probabilidad de ocurrencia con un año o dos de anticipación.

5.2 MEDIDAS DE PRECISIÓN

La precisión fue hallada restándole a 1 el valor del error, siendo el más preciso el valor más cercano a 1, conociendo el valor más preciso se pudo establecer el mejor método para determinación de caudal base.

Al existir diferentes métodos de estimación de caudal base, el hecho de conocer cuál es el más efectivo para cada caso particular, es vital para la elección del mejor método a utilizar.

En proyecto de grado²⁰ se calcularon las curvas de caudal base por medio del programa **G2** para los ríos Suratá y Oro respectivamente, la elección del algoritmo numérico que mejor se adapte a las condiciones de cada río, es logrado por medio del índice de precisión, el cual es un método cuantitativo confiable.

²⁰ GÓMEZ RÍOS, V., Op. Cit.

6. CONCLUSIONES

El índice de anticipación es una metodología innovadora para lograr predecir el comportamiento de los caudales mínimos por medio de la probabilidad de ocurrencia; metodología que puede ser aplicada para cualquier río que tenga suficiente información de series de caudal, ya que su aplicación es sencilla y sus resultados fácil de interpretar.

Comparando los resultados del índice de anticipación obtenidos en la **Tabla 5** (Majadas) y en el **Anexo 11** (Café Madrid) se pudo observar que en Café Madrid se presentan datos mucho más críticos, teniendo en cuenta que la información que interesa para este estudio son las probabilidades de que el caudal disminuya.

En **Anexo 11** (Café Madrid) se encontraron probabilidades mucho más altas y porcentajes de disminución elevados de manera consecutiva lo que hace que se presente mayor cantidad de caudales mínimos críticos. En cambio para la estación Majadas los porcentajes de disminución pueden ser altos pero presentan probabilidades bajas **Tabla 5**.

Al observar las **Tablas 5 y 6** se puede ver que las probabilidades de disminución de caudal mínimo son más bajas comparada con las probabilidades de que estos aumenten, entre años consecutivos.

Al existir una serie de datos de caudal muy corta como se puede apreciar en el Río de Oro, los índices de anticipación no son tan acertados como sucede con los del Río Suratá, pues éste posee una serie de datos de caudal más extensa y sin sesgos.

Partiendo de la suposición que el caudal base de los ríos en época de verano es solamente debido al aporte de los acuíferos, se puede concluir, que el coeficiente de eficiencia de **Nash-Sutcliffe** da como el método más efectivo, aquel donde el coeficiente sea igual o cercano a 1, y para el Río Suratá, se observa que el método de Nathan & McMahon paso 1 (**N&M-P1**) es el más eficiente, siendo 0,99 su valor, mientras que para el Río de Oro el método más efectivo según Nash-Sutcliffe son **S&W** y **N&M** con 0,92 para los dos métodos como coeficiente.

El error medio cuadrado **RMSE** para el Río Suratá dice que el método de **N&M-P1** es el que presenta menor error con un valor de 1.61 y para el Río de Oro **N&M-P1** presenta el menor error con un valor de 3,17.

El cálculo del error relativo y de precisión arroja que el método Smakhtin & Watkins (**S&W**) es el método de separación de flujo base más preciso, con un valor de 94,52% para el Río Suratá, discrepando de la deducción que se hace en [11], que dice que el método más preciso era el de tres parámetros (**3P**).

Para el caso del Río de Oro el algoritmo más preciso fue el de Smakhtin & Watkins (**S&W**) con un valor de es de 97,75%.

7. RECOMENDACIONES

Al hacer la investigación sobre índices de anticipación, no se encontraron trabajos relacionados con el tema, por lo que este documento sirve como punto de partida para futuros estudios relacionados con éste.

Como se concluyó anteriormente, mientras más datos existan en la serie de caudales más confiable serán las probabilidades del índice de anticipación, por lo que se recomienda mayor monitoreo en las fuentes hídricas del país.

El presente trabajo se limitó al análisis de precisión aplicado a los métodos de estimación de caudal base, usados en el programa **G2**, sin embargo existen otros métodos para estimar este caudal a los que se debería aplicar el índice de precisión y así obtener el más apto para los dos ríos analizados.

El índice de anticipación se calculó con intervalos de 1 y 2 años, para obtener resultados con los que se pudiera hacer una comparación. Este índice podría ser calculado con intervalos de tiempo diferentes y así poder determinar cuál periodo de tiempo sería más efectivo para el cálculo del índice de anticipación.

BIBLIOGRAFÍA

BLANQUERO, R., CARRIZOSA, E., PITA, M., CAMARRILLO, J. & ÁLVAREZ-FRANCOSO, J. Modelo estadístico para la predicción del índice estandarizado de sequía pluviométrica (IESP) en Andalucía [en línea]. 2012 [Citado 10 dic 2014]. Disponible en Internet: <URL:<http://fundacion.usal.es/conaec/pendrive/ficheros/ponencias/ponencias2/02-Extremos.pdf>>

GÓMEZ GARCÍA, D., GÓMEZ MOGOLLÓN, L. Separación de flujo base en la cuenca del río de oro en la estación conquistador alto mediante la programación de algoritmos de no linealidad [recurso electrónico]. (Tesis de pregrado). Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 2012.

KELSEY, P., HALL, J., KITSIOS, A., QUINTON, B. & SHAKYA, D. Hydrological and nutrient modeling of the Swan-Canning coastal catchments [en línea]. Reporte No. 14. Department of water. Western Australia, 2010. [Citado 20 ene 2015]. Disponible en Internet: <URL:<http://www.water.wa.gov.au/PublicationStore/first/86565>>

LEÓN CARVAJAL, N. Y ROMERO CAYACHOA, T. Modelamiento de los caudales de escorrentía p las cuencas de los ríos Suratá y Tona mediante el modelo conceptual agregado NAM. (Tesis de pregrado). Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 2006.

POVEDA, G. Caudales mínimos en Colombia: relaciones macroclimáticas, escalonamiento y balances hidrológicos [en línea]. Seminario internacional, 2004 [citado 5 nov 2014]. Disponible en Internet: <URL:<http://www.bdigital.unal.edu.co/>> (4086)

PUENTES, D. Alerta por sequía en seis municipios de Santander [en línea]. En: Vanguardia Liberal, 2014. [Citado 2 nov 2014]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.vanguardia.com/santander/bucaramanga/252750-alerta-por-sequia-en-seis-municipios-de-santander>>

RÍOS ROJAS, L. Y VÉLEZ UPEGUI, J. Corrientes naturales intervenciones y condiciones ecológicas. [En línea]. Seminario Internacional sobre Eventos Extremos Mínimos en Regímenes de Caudales: Diagnóstico, Modelamiento y Análisis, 2004 [Citado 8 dic 2014] Disponible en Internet: <URL:<http://www.bdigital.unal.edu.co/4336/1/DA3751.pdf>>

RIVERA, H., GONZÁLES, H., MARTÍNEZ, Ó., DOMÍNGUEZ, E., ROMERO, H., FAJARDO, M., ZAMUDIO, E., GONZÁLES, Y., CARVAJAL, M. Protocolo para la emisión de los pronósticos hidrológicos [en línea]. 2008. [Citado 10 nov 2014] Disponible en Internet: <URL:<https://www.siac.gov.co/documentos/Protocolo%20emision.pdf>>

RORABAUGH, M. Estimating changes in bank storage and ground-water contribution to streamflow. Investigation report: USGS, 1964.

SERRANO SANTIAGO, A. Y BALAGUERA PADILLA, G. Separación de flujo base en la estación Café Madrid (C.S.R.L.). Tesis de pregrado. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 2006.

SMAKHTIN, V. U. Low flow hydrology; a review. Journal Of Hydrology, 2001, p. 240(3-4), 147-186.

SPIEGEL, M. & STEPHENS, L. Estadística. (3a ed.) México D.F: McGraw-Hill, 2012.

YANG, J., YU, S., & LIU, G. Multi-step-ahead predictor design for effective long-term forecast of hydrological signals using a novel wavelet neural network hybrid model. *Hydrology And Earth System Sciences*, 17(12), 2013, p. 4981-4993.

ANEXOS

Anexo A. Muestra de caudales mínimos por año río de Oro [m3/s]

Río de Oro			
Año	Qmin	Año	Qmin
1988	6,98	1997	6,34
1989	6,65	1998	5,41
1990	5,02	1999	5,68
1991	2,48	2000	1,97
1992	1,32	2001	1,14
1993	4,24	2002	4,07
1994	6,00	2003	1,76
1995	5,68	2004	4,48
1996	8,20		

Anexo B. Índice cada año y cada dos años, Rio de Oro

Qmin		
6,98	cada año	
6,65	0,953	cada 2años
5,02	0,755	0,719
2,48	0,494	0,373
1,32	0,532	0,263
4,24	3,212	1,710
6,00	1,415	4,545
5,68	0,947	1,340
8,20	1,444	1,367
6,34	0,773	1,116
5,41	0,853	0,660
5,68	1,050	0,896
1,97	0,347	0,364
1,14	0,579	0,201
4,07	3,570	2,066
1,76	0,432	1,544
4,48	2,545	1,101

Anexo C. Índice en porcentaje de cada año y cada dos años, Rio de Oro

	Río de oro
	Índice c/a
c1	0,35
	0,43
	0,49
	0,53
c2	0,58
	0,75
	0,77
c3	0,85
	0,95
	0,95
	1,05
c4	1,42
	1,44
	2,55
	3,21
	3,57

	Río de oro
	Índice c/2a
c1	0,20
	0,26
	0,36
	0,37
c2	0,66
	0,72
	0,90
c3	1,10
	1,12
	1,34
	1,37
c4	1,54
	1,71
	2,07
	4,55

Anexo D. Pruebas de aleatoriedad cada año y cada dos años río Suratá y río de Oro, hecha con Minitab17

Prueba de aleatoriedad: cada año RO

Prueba de corridas para cada año RO

Corridas por encima y por debajo de $K = 1,24384$

El número observado de corridas = 8

El número esperado de corridas = 7,875

5 observaciones por encima de K . 11 por debajo

* N es pequeño, por lo tanto la siguiente aproximación puede ser no válida.

Valor $p = 0,939$

Prueba de aleatoriedad: cada 2años RO

Prueba de corridas para cada 2años RO

Corridas por encima y por debajo de $K = 1,21759$

El número observado de corridas = 5

El número esperado de corridas = 8,2

6 observaciones por encima de K . 9 por debajo

* N es pequeño, por lo tanto la siguiente aproximación puede ser no válida.

Valor $p = 0,073$

Prueba de aleatoriedad: cada año RS

Prueba de corridas para cada año RS

Corridas por encima y por debajo de $K = 1,05744$

El número observado de corridas = 12

El número esperado de corridas = 8,5

6 observaciones por encima de K . 10 por debajo

* N es pequeño, por lo tanto la siguiente aproximación puede ser no válida.

Valor $p = 0,052$

Prueba de aleatoriedad: cada 2años RS

Prueba de corridas para cada 2años RS

Corridas por encima y por debajo de $K = 1,06140$

El número observado de corridas = 9

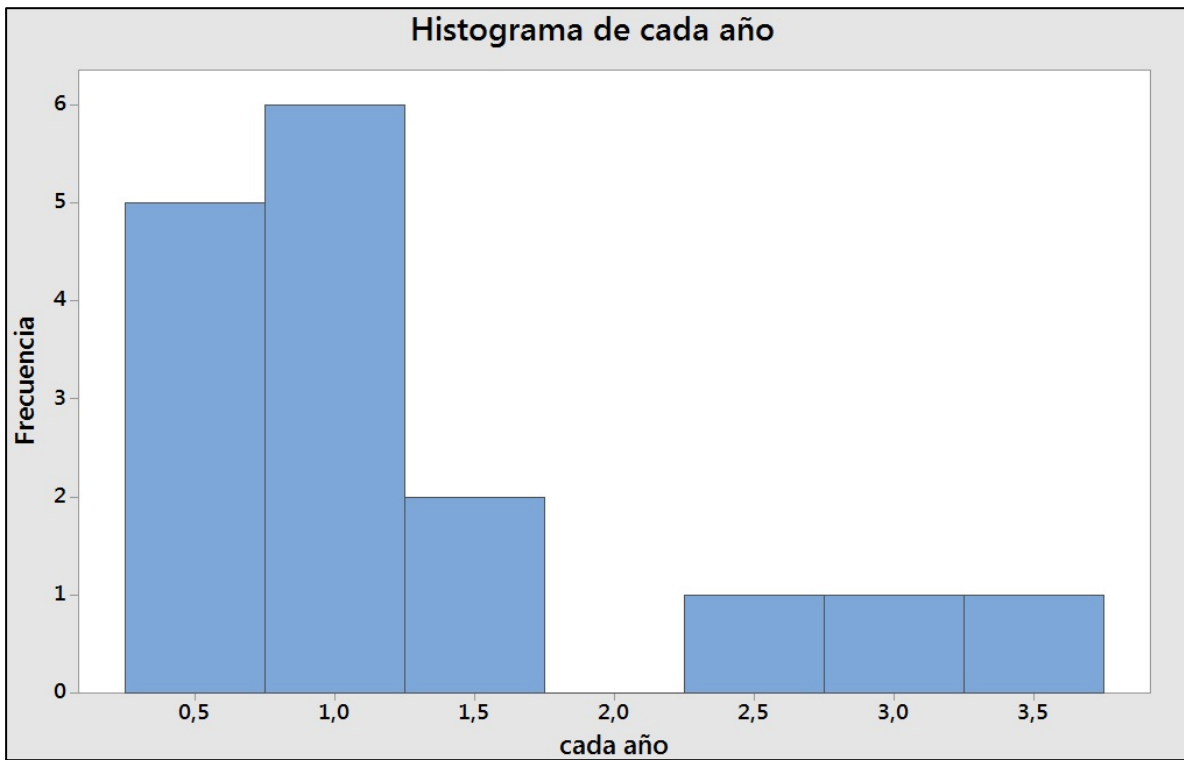
El número esperado de corridas = 8,46667

7 observaciones por encima de K . 8 por debajo

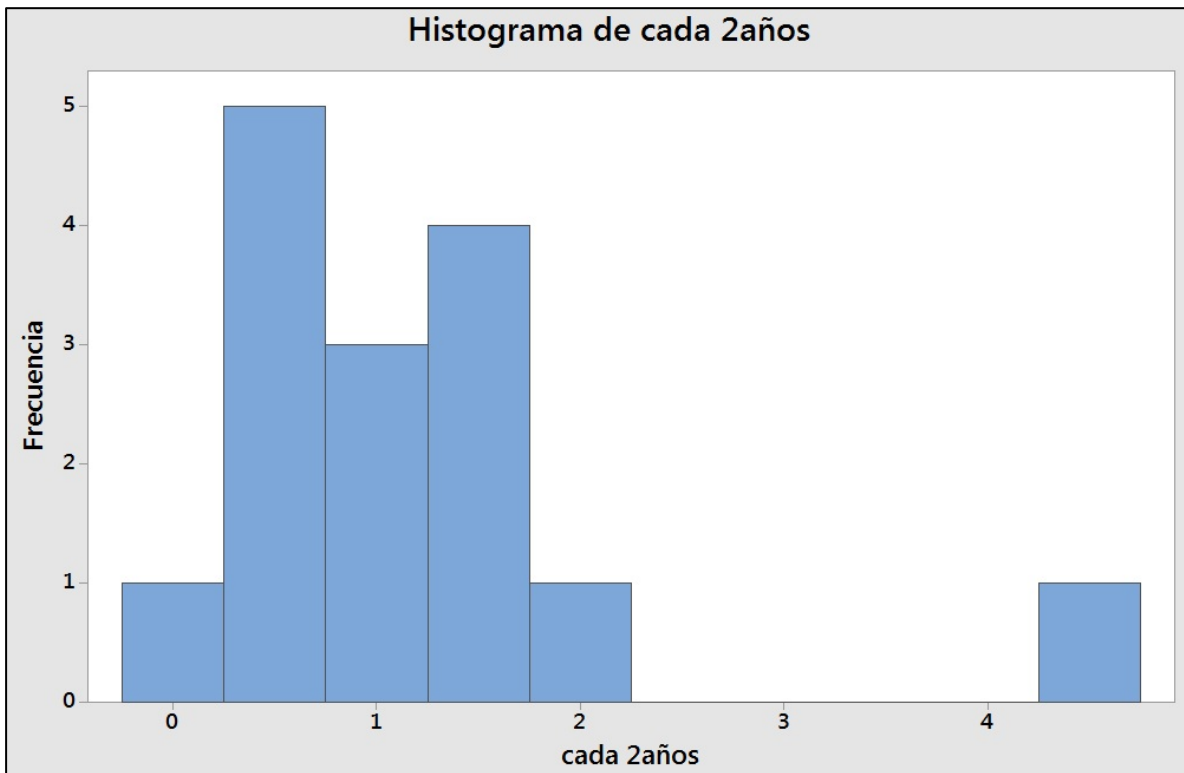
* N es pequeño, por lo tanto la siguiente aproximación puede ser no válida.

Valor $p = 0,774$

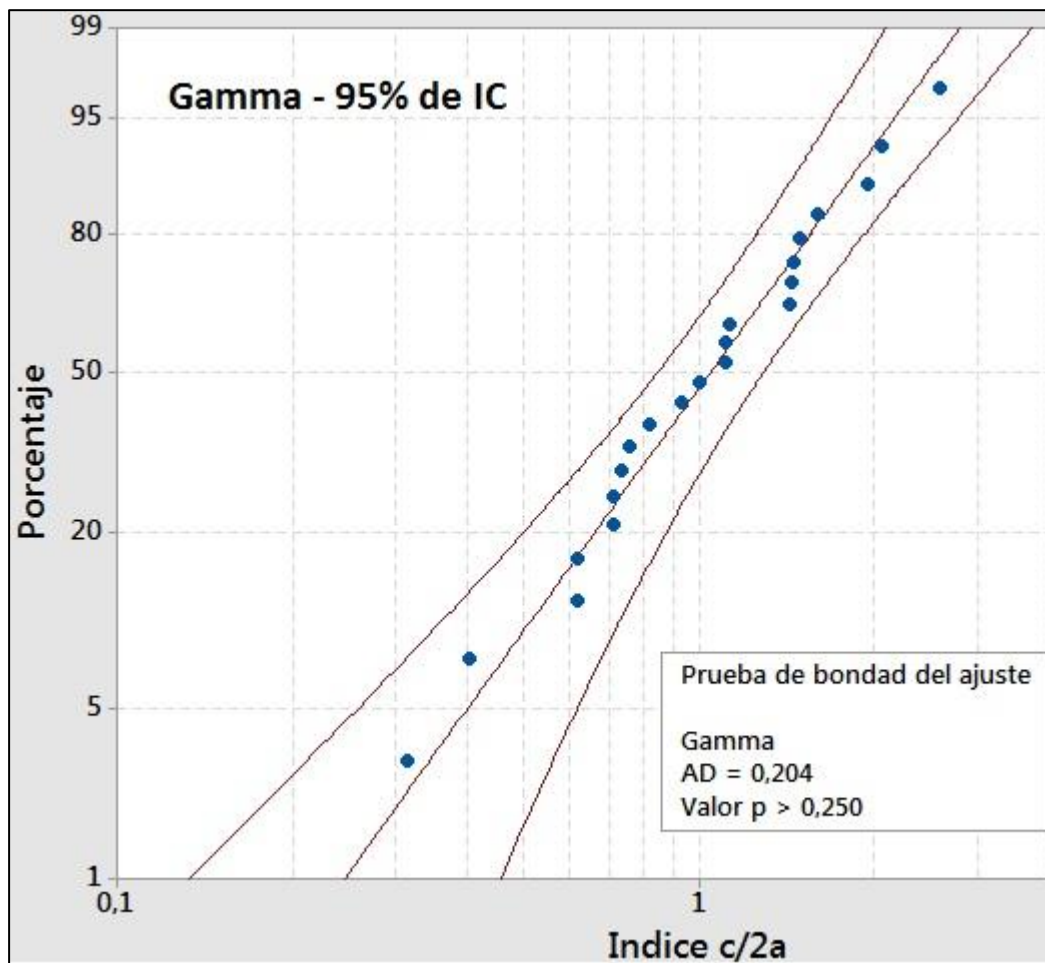
Anexo E. Histogramas de la muestra de la muestra de caudales mínimos de cada año. Rio de Oro



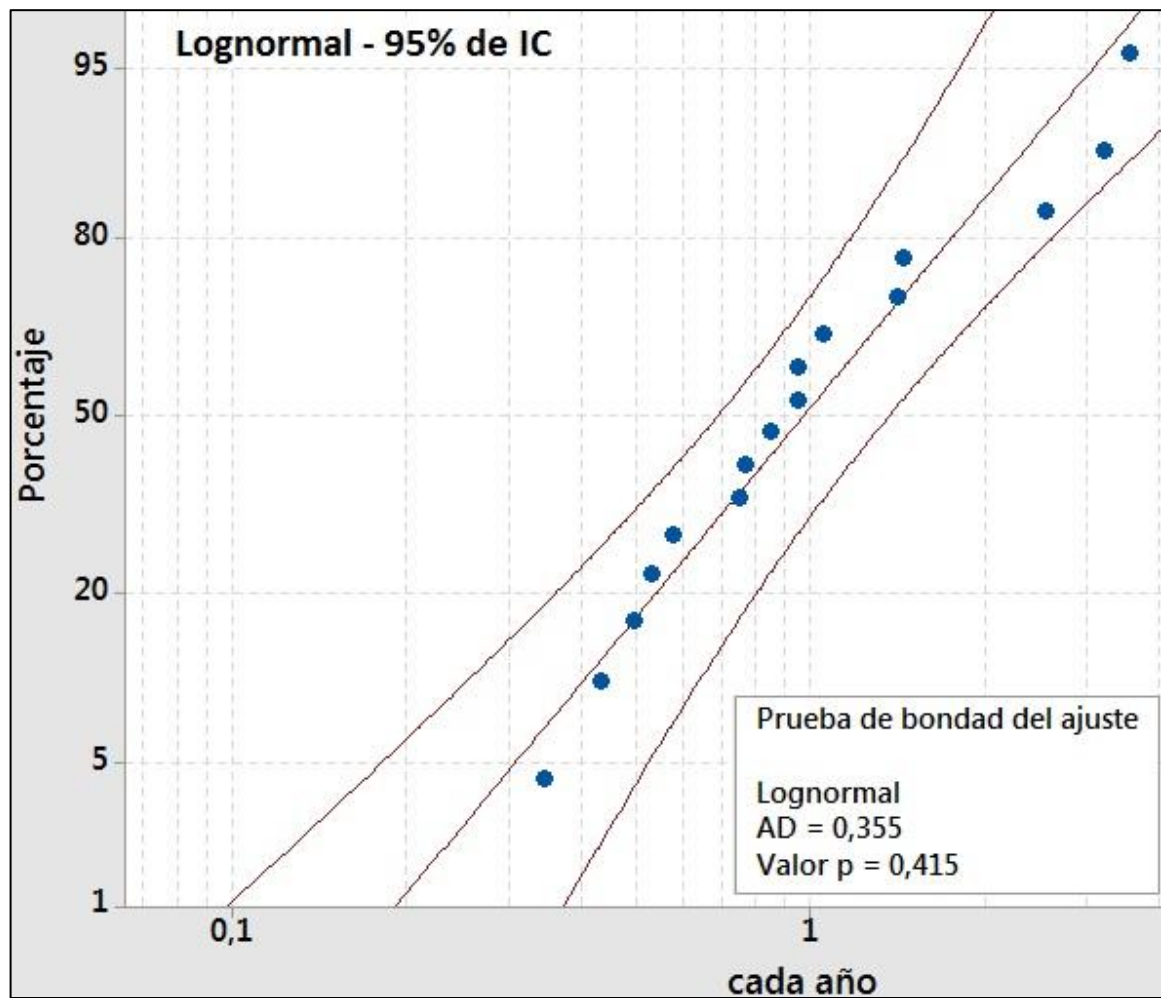
**Anexo F. Histogramas de la muestra de caudales mínimos de cada dos años.
Rio de Oro**



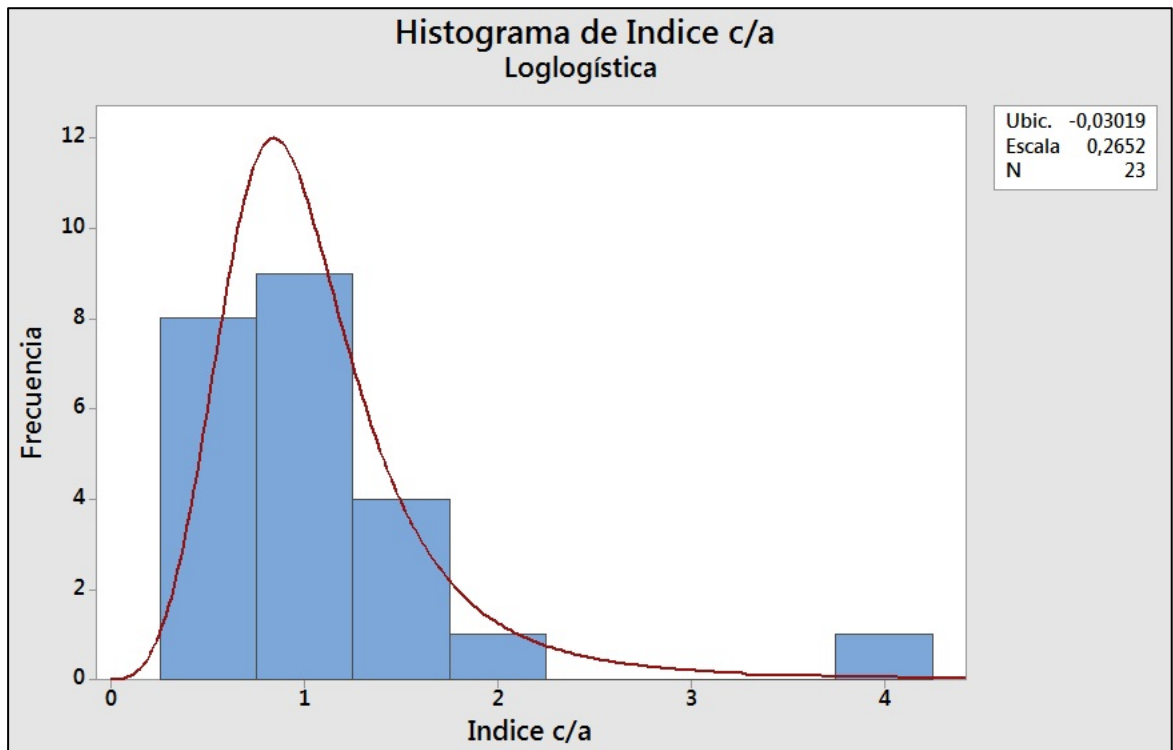
Anexo G. Prueba de normalidad índice cada dos años río Suratá.
Distribución Gamma. Minitab17



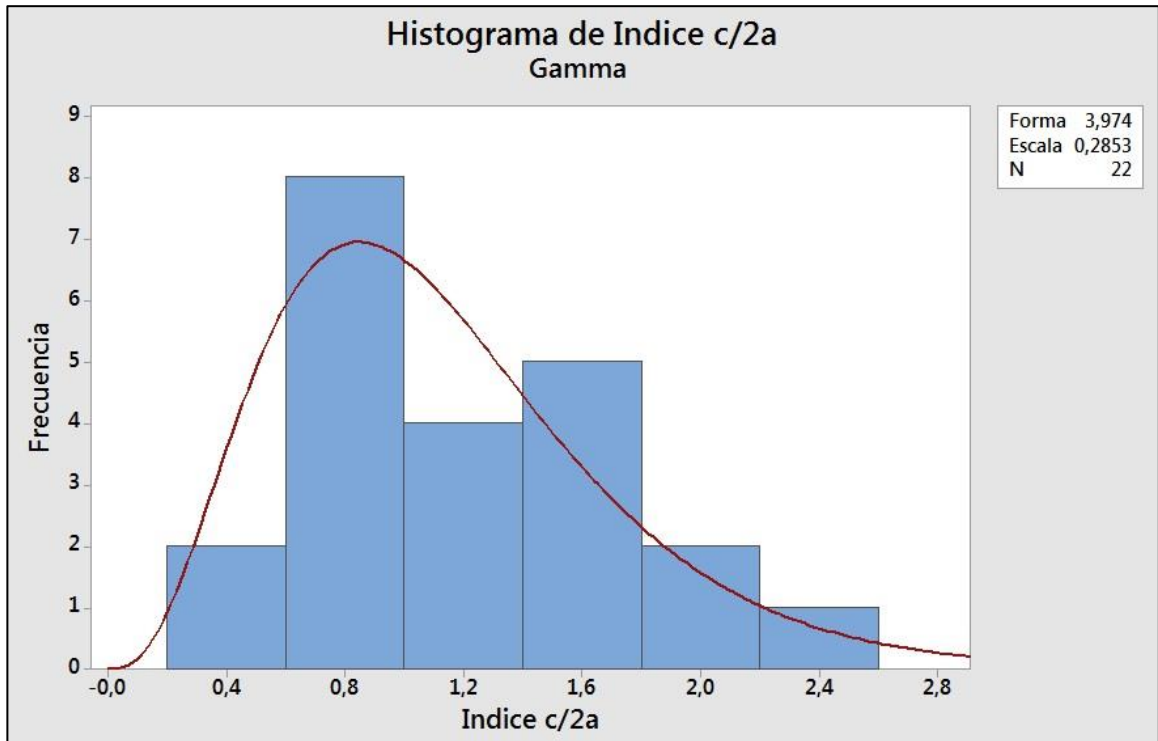
Anexo H. Prueba de normalidad índice cada año río de Oro. Distribución Lognormal. Minitab17



Anexo I. Histogramas de la muestra de caudales mínimos de cada año, con su respectiva distribución. Rio Surata



Anexo J. Histogramas de la muestra de caudales mínimos de cada dos años, con su respectiva distribución. Rio Surata



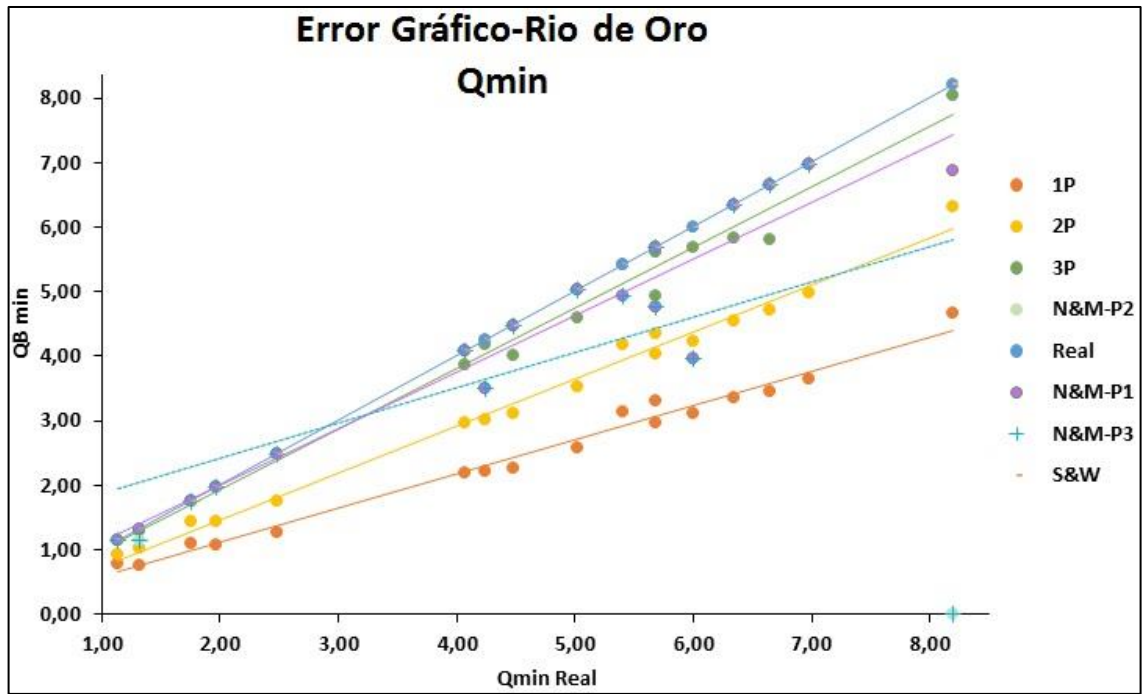
Anexo K. Probabilidad de que aumente o disminuya el caudal cada año. Río de Oro

Índice cada año-Río de Oro-Estación Café Madrid					
Qmin-real	Índice c/a	disminuye↓	aumenta↑	Dist: Lognormal	
				Prob (X < x)	prob (X > x)
6,98					
6,65	0,95	4,73%		48,78%	51,22%
5,02	0,75	24,51%		35,37%	64,63%
2,48	0,49	50,60%		15,79%	84,22%
1,32	0,53	46,77%		18,59%	81,41%
4,24	3,21		221,21%	96,16%	3,84%
6,00	1,42		41,51%	71,07%	28,93%
5,68	0,95	5,33%		48,40%	51,60%
8,20	1,44		44,37%	72,07%	27,93%
6,34	0,77	22,68%		36,70%	63,31%
5,41	0,85	14,67%		42,31%	57,69%
5,68	1,05		4,99%	54,51%	45,49%
1,97	0,35	65,32%		6,33%	93,67%
1,14	0,58	42,13%		22,09%	77,91%
4,07	3,57		257,02%	97,29%	2,71%
1,76	0,43	56,76%		11,50%	88,50%
4,48	2,55		154,55%	92,29%	7,71%

**Anexo L. Probabilidad de que aumente o disminuya el caudal cada dos años.
Río Surata.**

Índice cada 2 años-Río Surata-Estación Majadas					
Qmin- real	Índice c/2a	disminuye↓	aumenta↑	Dist: Gamma	
				Prob (X < x)	prob (X > x)
2,46					
3,07					
1,80	0,73	26,83%		26,10%	73,90%
2,53	0,82	17,70%		33,21%	66,79%
2,67	1,48		48,33%	76,58%	23,42%
2,53	1,00		0,20%	47,14%	52,86%
5,49	2,06		105,77%	93,03%	6,97%
2,85	1,13		12,77%	56,25%	43,75%
3,92	0,71	28,68%		24,69%	75,31%
4,12	1,44		44,23%	74,68%	25,32%
2,98	0,76	24,02%		28,27%	71,73%
1,65	0,40	59,88%		5,62%	94,38%
1,83	0,61	38,53%		17,56%	82,44%
1,83	1,11		10,84%	54,91%	45,09%
2,91	1,59		59,02%	81,00%	19,00%
2,66	1,45		45,09%	75,09%	24,91%
1,79	0,61	38,51%		17,57%	82,43%
2,48	0,93	6,76%		41,80%	58,20%
2,55	1,42		42,27%	73,74%	26,26%
2,74	1,11		10,76%	54,86%	45,14%
1,80	0,71	29,11%		24,37%	75,63%
7,10	2,59		158,78%	98,04%	1,96%
3,50	1,94		94,11%	90,94%	9,06%
2,24	0,32	68,50%		2,71%	97,29%

Anexo M. Error de los datos. Regresión lineal. Río Surata



Anexo N. Coeficiente de eficiencia de Nash. Resultados. Rio de Oro

Coeficiente de Nash-Sutcliffe	
Algoritmo	E
1P	-0,07
2P	0,62
3P	0,80
N&M-P1	0,92
N&M-P2	0,67
N&M-P3	0,67
S&W	0,92

Anexo O. Raíz del error medio cuadrado. Rio Surata

Raíz del error medio cuadrado	
Algoritmo	RMSE
1P	6,06
2P	3,99
3P	3,88
N&M-P1	3,17
N&M-P2	4,37
N&M-P3	4,93
S&W	4,35

Anexo P. Error relativo datos rio de Oro (%E).

Error relativo (%E)	
Algoritmo	%E
1P	46,66%
2P	27,83%
3P	11,29%
N&M-P1	3,88%
N&M-P2	19,68%
N&M-P3	20,68%
S&W	2,25%

Anexo Q. Precisión datos rio de Oro.

Precisión	
Algoritmo	Precisión
1P	53,34%
2P	72,17%
3P	88,71%
N&M-P1	96,12%
N&M-P2	80,32%
N&M-P3	79,32%
S&W	97,75%