

EVALUACIÓN ESTADÍSTICA DEL RÉGIMEN DE CAUDALES, PRECIPITACIÓN Y TENDENCIAS DE LOS INDICADORES DE CALIDAD DEL AGUA DEL RÍO CURUBITAL - CUNDINAMARCA

Blanco Bonilla Carlos Manuel¹

¹ Estudiante pregrado/ Ingeniería Civil, Universidad La Gran Colombia, Colombia, carlosmanuel.blanco@ulagrancolombia.edu.co

Resumen– Las fuentes hídricas son hoy en día objetos de estudio debido al comportamiento dinámico que tienen, a partir de esto se puede relacionar en función a los cambios climáticos que se han presentado en los últimos años que pueden poner en vulnerabilidad las cuencas generando alteraciones que afectan su comportamiento y calidad. El río Curubital se encuentra ubicado en la ciudad de Bogotá que desemboca al embalse La Regadera donde se abastece la población del suroriente de la capital, adicionalmente las zonas aledañas hacen uso del río para la agricultura, piscicultura, uso pecuario entre otras. En referencia a las acciones y eventualidades a nivel global del cambio climático la investigación hizo énfasis en evaluar de una forma estadística el comportamiento de las precipitaciones, caudales y calidad de la cuenca Curubital, con el fin de identificar cual ha sido el comportamiento histórico de la cuenca, adicionalmente, se estudió la calidad determinando parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del agua que conllevaron a generar un índice de calidad del agua bajo criterios normativos que permite hacer una señal de alerta del recurso. Debido al uso de la estadística para explicar el comportamiento dinámico del río en la investigación se hizo un enfoque cuantitativo que permite obtener una mayor precisión de la variabilidad de caudales, precipitación y calidad. En consecuencia el río Curubital es una cuenca estable donde sus precipitaciones han sido constantes y sus caudales no han presentado cambios representativos esto instruye a relacionarla con el cambio climático donde estadísticamente no ha intervenido las consecuencias de estos fenómenos, finalmente se identificó que el agua se encuentra en general en un buen estado con un índice de calidad de 0.782, aunque la característica microbiológica tiene un índice de calidad 0.648 teniendo una calificación regular que genera una señal de alerta al usar este recurso.

Palabras clave– Caudal, Precipitación, Calidad del agua, Cambio climático, Índice de calidad, Fuentes hídricas.

Abstract– Water sources are today objects of study due to the dynamic behavior, from this can be related to the climatic changes that have occurred in the last years that can put in vulnerability watersheds generating alterations that affect their behavior and quality. The Curubital River is located in the city of Bogota that supplies the reservoir La Regadera where the population of the southeast of the capital is supplied, in addition the areas surrounding the resort make use of it for agriculture, fish farming, livestock use among others. In reference to the actions and eventualities at a global level of climate change, the research emphasized the statistical evaluation of the behavior of precipitations, flows and quality of the Curubital basin, in order to identify the historical behavior of the Basin, in addition the quality was studied by determining the physicochemical and microbiological parameters of the water that led to generate a water quality index under normative criteria that allow to make an alert signal of the resource. Due to the use of the statistic to explain the dynamic behavior of the river in the research, a quantitative approach was made that allows a greater precision of the variability of flows, precipitation and quality. Consequently the Curubital River is a stable basin where its precipitations have been constant and its flows have not presented representative changes this instructs to relate it to the climatic change where statistically has not intervened the consequences of these phenomena, finally it was identified that the water is found Generally in a good condition with a quality index of 0.782, although the microbiological feature has a quality index of 0.648 having a regular rating that generates an alert signal when using this resource.

Keywords-- Flow, Precipitation, Water quality, Climate change, Quality index, Water sources.

I. INTRODUCCIÓN

La densidad de drenaje en Colombia es bastante amplia debido a su ubicación en el hemisferio ecuatorial que lo caracteriza por ser una zona lluviosa durante todo el año. Debido a esto, las variabilidades en los factores climáticos son más perjudiciales, en los últimos años han dado origen a fenómenos naturales como crecidas súbitas y tiempos mayores de estiaje que generan alteraciones en los ciclos hidrológicos y aumenta la vulnerabilidad a las diferentes poblaciones.

Para ello se ha formulado una metodología que pretende evaluar el estado y el comportamiento histórico del río Curubital ubicado en la ciudad de Bogotá y hace parte de la zona rural de la localidad de Usme y la localidad del Sumapaz, a partir de un análisis estadístico de los caudales y precipitaciones. Adicionalmente la disponibilidad y calidad del agua está debidamente relacionada con algunos factores importantes como el aumento en la población, la industrialización y urbanización que perjudican su calidad. Para evaluar la contaminación del agua se implementó un índice de contaminación que minimiza en gran medida el volumen de datos y expresiones del estado de calidad del agua. Este índice se basa en el número de factores físico-químicos y bacteriológicos.

II. METODOLOGÍA

La metodología de esta investigación tuvo un enfoque CUANTITATIVO, debido a que la determinación por medio de métodos estadísticos establece la variabilidad de los caudales y la precipitación en diferentes períodos de tiempos y así poder analizar el aumento o disminución del río con el fin de obtener una mayor precisión y así dar una visión mucho más profunda a las eventualidades que se han presentado en la zona de estudio. Además, para contemplar la investigación se realiza una explicación desde un aspecto objetivo, experimental y estadístico de la calidad del agua.

A. Tipo de Investigación. La investigación es de tipo EX-POS-FACTO y DESCRIPTIVA, a causa que la investigación busca evaluar la variación de los

caudales del río Curubital a partir de registros históricos que permiten interpretar cuales son los períodos que generan alteraciones en el cauce como la disminución de caudal o aumento de este, así mismo examinar las correlaciones con las precipitaciones ocurridas en la zona de estudio, de modo que esto permita aclarar las causas y efecto en la cuenca. Por otra parte, el estudio descriptivo permite analizar qué cambios ha presentado la calidad del agua en el río Curubital y como es el estado actual con respecto a las variaciones climáticas en el tiempo que permita aclarar que acciones pueden generar el deterioro de la cuenca hidrográfica.

B. Población. Para la realización de la investigación se utilizó los datos correspondientes a estaciones meteorológicas del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y la empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá D.C. (EAAB), ubicadas en la zona de estudio. El tamaño se determina teniendo en cuenta los registros de las estaciones y así poder cumplir la evaluación de régimen de caudales, la siguiente tabla representa los períodos de cada estación:

Tabla 1 Períodos de registro estaciones meteorológicas

Nº	Tipo de Estación	Nombre Estación	PERÍODO	
20019	PM	BOCAGRANDE - SALITRE	ENERO 1963	DICIEMBRE 2015
20020	PG	EL HATO	SEPTIEMBRE 1941	AGOSTO 2016
20509	PG	LA REGADERA	ENERO 1970	MAYO 2016
21201300	PM	AUSTRALIA	ABRIL 1985	MARZO 2016
20954	LM	PTE CARRETERA-CHISACA	AGOSTO 1992	SEPTIEMBRE 2015
20746	LM	LA TOMA - CHISACA	ENERO 2006	ENERO 2016
20725	LM	PTE AUSTRALIA	ENERO 1971	ENERO 2016

Hay que mencionar que las estaciones de tipo (PM y PG) corresponde a pluviométricas y pluviográficas donde se determinó un intervalo de tiempo de 1970 a 2015, sin embargo, la estación Pte. Australia solo cuenta con datos desde 1985 lo que con llevo a pronosticar el período faltante, realizando una correlación lineal en función con las otras estaciones de estudio. En cuanto a las estaciones limnimétricas no se puedo efectuar un rango de tiempo debido a que estas no contaban con registros completos, sin embargo, se evaluó la estación Pte. Australia que era

contaba con un registro mucho mejor a las otras dos y además está ubicada en el río Curubital.

Con respecto a la calidad del agua en el río Curubital se realizaron la toma de muestras puntuales en tres puntos determinados los días 4, 18 y 24 del mes de octubre del año 2016 y el volumen total a analizar fue de 15.75 Litros. La siguiente tabla e imagen ilustra las coordenadas y lugar de la toma de muestras puntuales:

Tabla 2 Localización de la toma de muestras

Muestra	Coordenada	
	Norte	Este
Parte Alta	971136.285	992952.381
Parte Media	973527.794	993172.937
Parte Baja	977364.083	992935.389

Fuente Propia

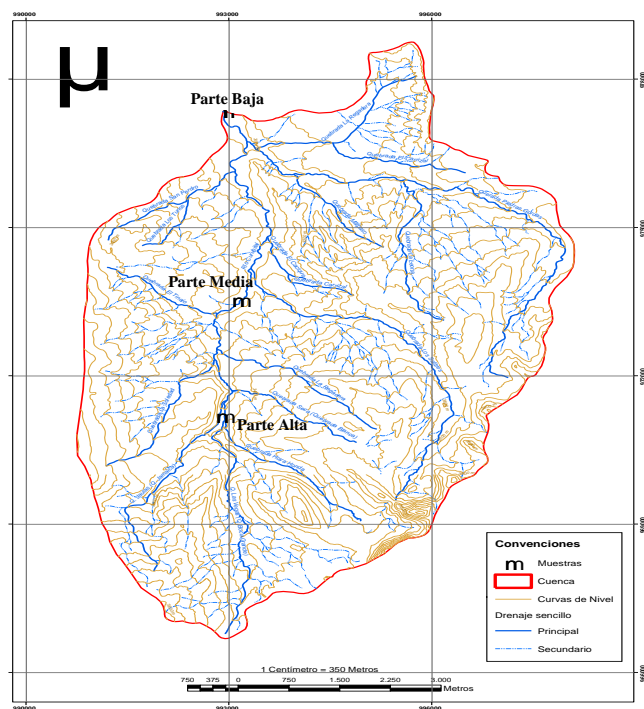


Fig.1 Toma de muestras / Fuente Propia

C. Entorno. El río Curubital se encuentra ubicada en la ciudad de Bogotá en el sector oriental de la cuenca del río Tunjuelo, además hace parte de la zona rural de la localidad de Usme, también se sitúa en la localidad del Sumapaz, la cuenca hidrográfica nace en las lagunas de Bocagrande y el Rincón aproximadamente a una coordenada geográfica 3700 m.s.n.m., y desemboca sus aguas al embalse La Regadera a los 3000 m.s.n.m.,

también abarca las veredas Arrayanes, Curubital, Curubital Bajo, El tabaco y una parte de la vereda El Destino y El Hato.

D. Intervenciones. En la siguiente tabla se describe las variables que fueron evaluadas en la investigación, su unidad de medida, una prevé explicación del concepto:

Tabla 3 Parámetros evaluados

VARIABLE	INDICADOR	UNIDAD
Precipitación	Medida de la cantidad de agua que cae en la corteza terrestre.	mm
Turbidez	Capacidad de transparencia en el agua.	UNT
Color	Presencia de iones metálicos naturales entre otros.	UC
pH	Concentración de iones de hidrógeno.	pH
Temperatura	Medida del calor de las partículas en una sustancia.	°C
Sólidos suspendidos totales	Cantidad de sólidos retenidos.	mg/L
Oxígeno Disuelto	Contenido de oxígeno en el agua.	mg O ₂ / L
Demanda química de oxígeno	Cantidad de materia orgánica presente en el agua.	mg O ₂ / L
Coliformes Totales	Medida de bacterias de origen fecal y natural.	UFC
Caudal	Cantidad de agua máxima, media y mínima de la corriente superficial.	m ³ /s
Índice de calidad	Cuantifica el estado de la calidad del agua.	Adimensional

Fuente: Propia

Para la evaluación de la precipitación se realizó sus respectivos hidrogramas y a partir de estos se analizaron para identificar cuáles son las variabilidades de estas y el comportamiento en el tiempo.

Las ecuaciones utilizadas para el análisis de los caudales fueron las siguientes:

- *Ecuación de Gumbel:* Esta ecuación ha sido utilizado para representar el comportamiento de crecientes.

$$X = X_m + D_x^{-1} \quad (1)$$

Donde:

X: Valor máximo (caudal o precipitación) para un período de retorno T.

X_m: Media de la serie dada de valores máximos.

D_x: Desviación respecto a la media, que se estima mediante el producto (K*S_n-1).

En la cita podemos encontrar el paso a paso para la ejecución de este método.

¹ UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID. Método de Gumbel [En línea]. [citado 12 nov. 2016]. Disponible en: <http://ocw.upm.es/ingenieria-agroforestal/climatologia-aplicada-a-la-ingenieria-y-medioambiente/contenidos/tema-7/METODO-DE-GUMBEL.pdf>

- *Ecuación de Prueba de bondad de ajuste de Smirnov – Kolmogorov:* Esta prueba de bondad se emplea a los métodos de distribución de probabilidad en hidrología, para aprobar o rechazar la hipótesis de los resultados obtenidos para diferentes períodos de retorno, también para verificar si una distribución se ajusta o no a una distribución esperada.

$$F(x) = e^{-e^{-a*(X-X_0)}} \quad (2)$$

Donde:

e: Base de los logaritmos neperianos.

a: $\frac{1}{0,78 S_n}$, en el cual S_n es la desviación estándar.

X₀: $\bar{X} - \frac{0,577}{a}$, \bar{X} es el promedio de los caudales máximos registrados

X: Valor de caudal máximo instantáneo anual, ordenado de menor a mayor

Con relación a la prueba de bondad de ajuste de *Smirnov – Kolmogorov* se debe considerar un valor de cuartiles que está en función de los datos registrados (n) y un nivel de significación (1- α). La siguiente imagen permite calcular este valor de cuartil.

n	1- α				
	0.8	0.85	0.9	0.95	0.99
1	0.900	0.925	0.950	0.975	0.995
2	0.684	0.726	0.776	0.842	0.929
3	0.565	0.597	0.642	0.708	0.828
4	0.494	0.525	0.564	0.624	0.733
5	0.446	0.474	0.510	0.565	0.669
6	0.410	0.436	0.470	0.521	0.618
7	0.381	0.405	0.438	0.486	0.577
8	0.358	0.381	0.411	0.457	0.543
9	0.339	0.360	0.388	0.432	0.514
10	0.322	0.342	0.368	0.410	0.490
11	0.307	0.326	0.352	0.391	0.468
12	0.295	0.313	0.338	0.375	0.450
13	0.284	0.302	0.325	0.361	0.433
14	0.274	0.292	0.314	0.349	0.418
15	0.266	0.283	0.304	0.338	0.404
16	0.258	0.274	0.295	0.328	0.392
17	0.250	0.266	0.286	0.318	0.381
18	0.244	0.259	0.278	0.309	0.371
19	0.237	0.252	0.272	0.301	0.363
20	0.231	0.246	0.264	0.294	0.356
25	0.21	0.22	0.24	0.27	0.32
30	0.19	0.20	0.22	0.24	0.29
35	0.18	0.19	0.21	0.23	0.27
Fórmula para una n mayor	$\frac{1,07}{\sqrt{n}}$	$\frac{1,14}{\sqrt{n}}$	$\frac{1,22}{\sqrt{n}}$	$\frac{1,36}{\sqrt{n}}$	$\frac{1,63}{\sqrt{n}}$

Fig. 1. Valores de cuartiles superiores de la distribución de Kolmogorov – Smirnov/ Fuente: Propia

Al respecto de la calidad del agua se implementó la ecuación general:

$$ICA = \sum_{i=1}^m W_i * I \quad (3)$$

Dónde:

W_i: Es el ponderado o peso relativo de cada uno de los términos considerados en la ecuación.

I: Son los valores calculados de índice de calidad de cada variable que están entre cero y uno (0 y 1).

Para cada **I** corresponde una ecuación dependiendo el parámetro a evaluar, las siguientes ecuaciones fueron las utilizadas en la investigación donde cada valor del parámetro medido en campo o en el laboratorio son reemplazos en cada formulada y así se procede a obtener un índice de calidad de cada variable:

- *Ecuación índice de calidad conductividad:*

$$IC = 1 - 10^{[-3.26 + (1.34 \log_{10} * CE)]} \quad (4)$$

- *Ecuación índice de calidad pH:*

Tabla 4 Índice de calidad del pH.

Intervalo pH	Índice de calidad	Ecuación índice pH
pH < 4	0.1	
4 ≤ pH ≤ 7		$pH = 0.02628419 * [e^{(pH * 0.520025)}]$
7 < pH ≤ 8	1	
8 < pH ≤ 11		$pH = 1 * e^{[(pH - 8) * 0.5187742]}$
pH > 11	0.1	

Fuente: Propia

- *Ecuación índice de calidad Solidos suspendidos totales:*

$$ISST = 1 - (-0.02 + 0.003 * SST) \quad (5)$$

- *Ecuación de índice de calidad Demanda Bioquímica de Oxígeno*

$$IDBO = -0.05 + 0.70 \log_{10} DBO \quad (6)$$

- Ecuación de índice de calidad Coliformes Totales:

$$ICT = -1.44 + 0.56 \log_{10} CT \quad (7)$$

- Ecuación de índice de calidad Oxígeno disuelto

$$IOx = 1 - (1 - 0.01 * PSOD) \quad (8)$$

Dónde:

PSOD= Porcentaje de saturación de oxígeno disuelto.

Este porcentaje de saturación está en función de la temperatura y su altitud que puede hallarse por medio de dos métodos: el método gráfico y método estandarizado. Luego de obtener este resultado se implementa la siguiente fórmula para calcular el porcentaje de saturación de oxígeno:

$$PSOD = \frac{OX}{Cp} * 100 \quad (9)$$

Donde:

OX: Es el oxígeno disuelto medido en campo (mg/l).

Cp: Es la concentración de saturación del oxígeno (mg/l).

E. Análisis estadístico. Para la realización de la investigación se implementaron los siguientes métodos estadísticos de evaluación:

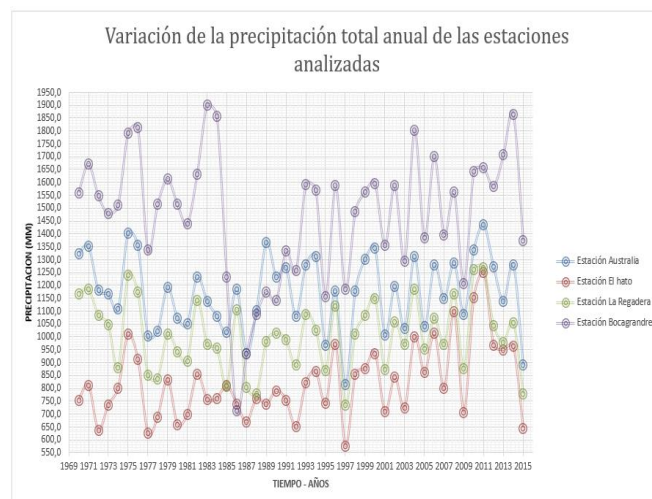
- *Método de Gumbel:* Este método fue utilizado para estimar la frecuencia de ocurrencia o probabilidad de los caudales, el cual ha sido utilizado para representar el comportamiento de crecientes, hay que mencionar que solo es posible ejecutar este método para valores de caudales máximos.
- *Método de estadígrafo de Smirnov – Kolmogorov:* Este método está determinado a partir de la (ecuación 2) $F(x)$; donde se calcula la frecuencia acumulada absoluta teniendo en cuenta los posibles datos repetidos, para así

calcular la frecuencia acumulada relativa. Luego se hace la diferencia entre la función de distribución acumulada (ecuación 2) y la frecuencia acumulada relativa. Si el valor máximo es menor igual (\leq) al valor de cuartiles superiores de la distribución de Kolmogorov – Smirnov (imagen 2) la hipótesis se aprueba. El ajuste es bueno y los resultados de Gumbel se pueden aplicar a diseños y estudios. Pero si el valor máximo es mayor ($>$) al valor de cuartiles superiores de la distribución de Kolmogorov – Smirnov (imagen 2) la hipótesis se rechaza.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. *Regímenes de Precipitación:* A partir de la información recopilada y al intervalo de tiempo estimado de 45 años (1970 a 2015) se analizaron los hidrogramas de cada estación ubicada en la zona de estudio.

Gráfica 1 Variación de la precipitación total anual de las estaciones estudiadas.



Fuente: Propia

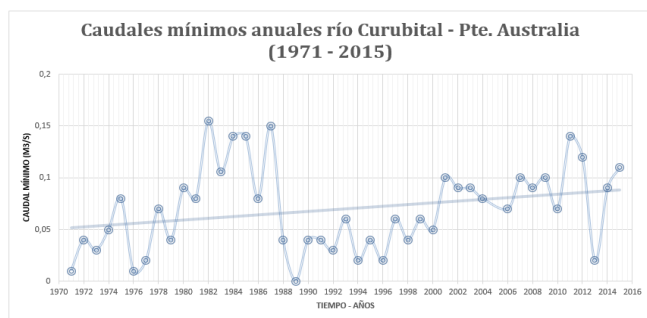
Como se puede ilustrar en la gráfica 1 hay una tendencia en las precipitaciones similares durante el tiempo, así mismo la estación Bocagrande ubicada en la parte alta de la cuenca Curubital posee los valores máximos esto a causa de que se encuentra a una mayor altitud de las otras estaciones. También se evidencia una disminución significativa en las precipitaciones en

el año 1997, esto se encuentra asociado a los efectos climáticos como anuncio la Estrategia Internacional para la reducción de desastres Las Américas (EIRD), don el fenómeno de El Niño en 1997 – 1998 afecto significativamente a países suramericanos. Otro punto de análisis es la precipitación total mensual anual en las estaciones se presentó un periodo de lluvia máximas de Abril a Julio y una disminución en las precipitaciones de Diciembre a Marzo en todas las estaciones de estudio.

2. **REGÍMENES DE CAUDALES:** Como anteriormente se ha mencionado la evaluación de los caudales se realizó a la estación Pte. Australia a causa que tenía una amplia información recopilada donde se obtiene una mayor exactitud y precisión en los métodos estadísticos y se encontraba ubicada en la parta baja del río Curubital que desemboca al embalse La Regadera.

2.1 **Caudales Mínimos (1971 – 2015):** En los datos registrados de caudales mínimos se puede demostrar que el valor máximo de los mínimos se encuentra en el mes de junio con un caudal mínimo de 2,86 m³/del mismo modo los caudales mínimos anuales (gráfica 2) muestran un aumento lo que representa que el río Curubital no ha estado expuesto a grandes tiempos de sequias, aunque en el año 1989 se registró un mínimo valor de 0 m³/s y un máximo valor mínimo en el año 1982 de 0,15 m³/s, también en el último quinquenio se observa una variabilidad en el año 2013 con un caudal mínimo de 0,02 m³/s.

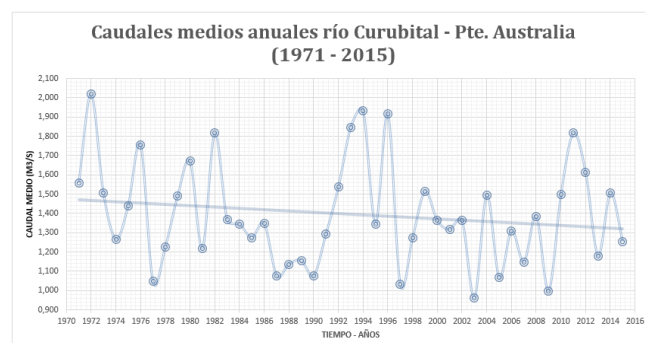
Gráfica 2 Caudales mínimos anuales estación Pte. Australia río Curubital



Fuente: Propia

2.2 **Caudales Medios (1971 – 2015):** Con respecto a los caudales medios se observa un periodo máximo en los meses de Abril a Agosto y unos mínimos en los meses de Diciembre a Marzo. Además, los valores anuales la gráfica 38 ilustra que los caudales medios han presentado una disminución en el transcurso del tiempo, también se muestra el valor máximo anual de los caudales medios en el año 1972 con un valor de 2,017 m³/s y un mínimo de 0,962 m³/s del año 2003.

Gráfica 3 Caudales medios anuales estación Pte. Australia río Curubital

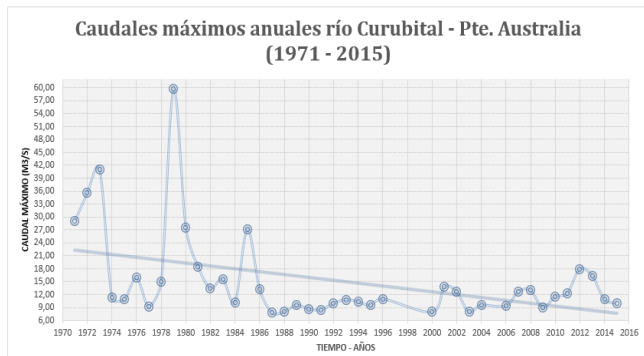


Fuente: Propia

2.3 **Caudales Máximos (1971 – 2015):** Se realizó el análisis al registro de datos, donde el máximo valor registrado de los caudales máximos se presenta en el mes de octubre con una medida de 59,75 m³/s, no obstante, los meses de abril, mayo, junio y julio siguen conservando un caudal elevado. Igualmente, el período de diciembre a marzo acontece a los mínimos valores máximos registrados. Otro aspecto son los valores máximos anuales (gráfica 4) encontrando una disminución en sus caudales máximos, posiblemente a la demanda del recurso hídrico para sus diferentes usos debido a que sus precipitaciones en la zona han permanecido constantes. A su vez se observó un alza en el hidrograma en el año 1972, hay que indicar que en los años 1997 a 1999 y 2005 no se encontró un

registro de datos, lo que genera una menor claridad en el hidrograma.

Grafica 4 Caudales máximos anuales estación Pte. Australia río Curubital



Fuente: Propia

3. Análisis de distribución de probabilidad

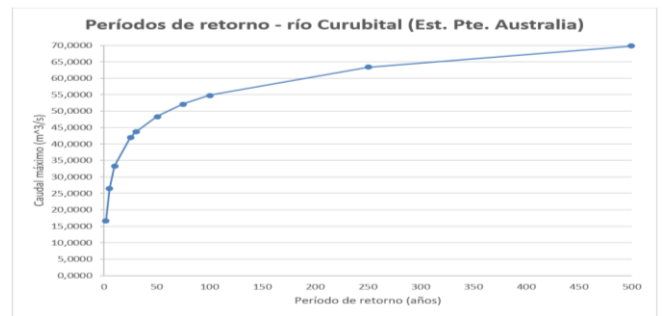
La frecuencia de ocurrencias o probabilidad de un determinado caudal de un río es bastante dinámica, por consiguiente, no puede predecirse exactamente cuál será su valor en un período de tiempo cualquiera, por tanto, se efectúan estaciones limnigráfica y limnigráfica con el fin de medir los caudales de una cuenca hidrográfica para obtener un registro histórico de datos y así aplicar métodos estadísticos que permitan predecir dichas eventualidades. Como anteriormente se ha mencionado el método utilizado fue el de Gumbel, obteniendo como resultado a la evaluación de frecuencias para distintos periodos de retorno la siguiente tabla y gráfica:

Tabla 5 Análisis de frecuencia para distintos períodos de retorno del río Curubital

Período de retorno	Xm	Yt	Yn	Sn	S	K	tc	M	X ⁰ (m ³ /s)
2	16,2229	0,3665	0,55146	1,17218	8,8321	-0,1578	1,6450	1,0676	16,5857
5	16,2229	1,4999	0,55146	1,17218	8,8321	0,8092	1,6450	1,8853	26,4708
10	16,2229	2,2504	0,55146	1,17218	8,8321	1,4494	1,6450	2,5836	33,2738
25	16,2229	3,1985	0,55146	1,17218	8,8321	2,2582	1,6450	3,5145	41,9495
30	16,2229	3,3843	0,55146	1,17218	8,8321	2,4167	1,6450	3,7001	43,6545
50	16,2229	3,9019	0,55146	1,17218	8,8321	2,8583	1,6450	4,2207	48,4112
75	16,2229	4,3108	0,55146	1,17218	8,8321	3,2071	1,6450	4,6346	52,1725
100	16,2229	4,6001	0,55146	1,17218	8,8321	3,4540	1,6450	4,9285	54,8364
250	16,2229	5,5195	0,55146	1,17218	8,8321	4,2383	1,6450	5,8667	63,3064
500	16,2229	6,2136	0,55146	1,17218	8,8321	4,8304	1,6450	6,5781	69,7069

Fuente: Propia

Grafica 5 Análisis de frecuencia de caudales para diferentes períodos de retorno



Fuente: Propia

No solo se realizó el análisis de frecuencia de caudales si no también se ejecutó la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov -Smirnov para corroborar la información obtenida por el método de Gumbel.

La prueba de ajuste se realizó con un registro histórico de la estación Pte. Australia de (1946 a 2015), sin embargo, los años (1967 a 1970 y 1997 a 1999), no se hallaban datos registrados, pero estos métodos solo toman en cuenta los años registrados sin importar el número de datos.

Tabla 6 Prueba de bondad de ajuste Kolmogorov - Smirnov

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
N	Xi	(Xi-Xi)²	-a*(Xi-X)	-e^(-a*(Xi-X))	F(x)	a	r	F(x) - a	Valor Abs F(x) - a
1	6,86	87,66	0,68	-1,97	0,14	1,00	0,02	0,12	0,12
2	7,4	77,84	0,61	-1,84	0,16	2,00	0,03	0,13	0,13
3	7,84	70,27	0,55	-1,73	0,18	3,00	0,05	0,13	0,13
4	7,95	68,44	0,53	-1,70	0,18	4,00	0,07	0,11	0,11
5	7,97	68,11	0,53	-1,70	0,18	5,00	0,09	0,10	0,10
6	8,04	66,96	0,52	-1,68	0,19	6,00	0,10	0,08	0,08
56	35,6	374,31	-3,17	-0,04	0,96	56,00	0,97	-0,01	0,01
57	41,08	617,87	-3,91	-0,02	0,98	57,00	0,98	0,00	0,00
58	59,75	1894,61	-6,42	0,00	1,00	58,00	1,00	0,00	0,00

En la tabla podemos observar la diferencia entre la función de distribución acumulada (ecuación 2) y la frecuencia acumulada relativa y el valor absoluto de esta diferencia obteniendo como un máximo de **0.13**. Este valor se compara con el valor de cuartil de Kolmogorov -Smirnov implementando la ecuación de la figura 2:

$$C = \frac{1,22}{\sqrt{n}} = \frac{1,22}{\sqrt{58}} = 0.16 \quad (10)$$

El anterior coeficiente estadígrafo crítico de Kolmogorov - Smirnov (C) es mayor que el valor máximo de 0.13, esto quiere decir que los resultados obtenidos por el método de Gumbel son confiables y se pueden emplear en diseños y estudios bajo estos resultados.

4. Índices de calidad del agua

Los índices de calidad del agua del río Curubital fueron calculados y analizados por medio muestras de tipo puntual en diferentes intervalos del cauce en el mes de octubre como anteriormente sea mencionado, los registros se realizaron a partir de trabajo de campo y laboratorio. A partir de las visitas realizadas se lograron obtener los siguientes resultados:

- Parte Alta

Tabla 7 Parámetros de calidad del agua parte alta

Parámetro	Temperatura Ambiente	Temperatura Cauce	Color	Olor	pH	Conductividad	Turbidez	OD	SST	SDT	DBO	Coliformes Totales
Unidad	°C	°C	UPC	-----	Uni pH	usiemens/cm	UNT	mg/L	mg/L	mg/L	mgO2/L	UFC
Muestra 1	12	9,7	25	Inobjetable	7,78	5,18	2,67	7,8	0	3,24	<21,3	43000
Muestra 2	27,5	10,8	25	Inobjetable	8,06	7,29	2,53	7,42	5	4,56	<21,3	500
Muestra 3	18	10,8	25	Inobjetable	7,56	6,91	2,57	6,4	5	4,32	<21,3	550
Promedio	19,17	10,43	25,00	Inobjetable	7,80	6,46	2,59	7,21	3,33	4,04	<21,3	44050,00

Fuente: Propia

- Parte Media

Tabla 8 Parámetros de calidad del agua parte media

Parámetro	Temperatura Ambiente	Temperatura Cauce	Color	Olor	pH	Conductividad	Turbidez	OD	SST	SDT	DBO	Coliformes Totales
Unidad	°C	°C	UPC	-----	Uni pH	usiemens/cm	UNT	mg/L	mg/L	mg/L	mgO2/L	UFC
Muestra 1	20,3	12,1	25	Inobjetable	7,36	12,73	5,01	6,98	0	7,96	<21,3	50000
Muestra 2	23,2	12,7	23	Inobjetable	7,8	13,96	3,59	7,8	0	8,73	<21,3	1100
Muestra 3	19,3	12,6	25	Inobjetable	7,36	15,74	3,16	7,75	0	9,84	<21,3	200
Promedio	20,93	12,47	24,33	Inobjetable	7,51	14,14	3,82	7,51	0,00	8,84	<21,3	17100,00

Fuente: Propia

- Parte Baja

Tabla 9 Parámetros de calidad del agua parte baja

Parámetro	Temperatura Ambiente	Temperatura Cauce	Color	Olor	pH	Conductividad	Turbidez	OD	SST	SDT	DBO	Coliformes Totales
Unidad	°C	°C	UPC	-----	Uni pH	usiemens/cm	UNT	mg/L	mg/L	mg/L	mgO2/L	UFC
Muestra 1	19,7	14,2	26	Inobjetable	7,18	12,37	7,62	6,22	5	7,73	<21,3	3800
Muestra 2	14,9	14,6	23	Inobjetable	7,65	18,75	5,96	6,88	5	11,7	<21,3	800
Muestra 3	22,4	12,8	25	Inobjetable	7,57	12,6	6,04	6,92	5	7,88	<21,3	100
Promedio	19,00	13,87	24,67	Inobjetable	7,47	14,57	6,54	6,67	5,00	9,11	<21,3	1566,67

Fuente: Propia

Con respecto a generar un índice de calidad del agua general del río Curubital se unifico la información de las tablas anteriores, excepto el de Coliformes totales, a causa de que los resultados tienen una desviación considerable, no obstante, este parámetro se evaluó independientemente.

Una vez descrito las variables involucradas en el cálculo del indicador de calidad, en este caso 6 variables el ponderado (Wi) tiene un valor descrito en la siguiente tabla:

Tabla 10 Variables y ponderados

Variable	Unidad de medida	Ponderado (Wi)
Oxígeno Disuelto (OD)	mg/L	0,17
Solidos Suspendidos totales (SST)	mg/L	0,17
Conductividad Eléctrica (C.E)	µSiemens/cm	0,17
pH	Unidades pH	0,15
Demanda Bioquímica de Oxígeno	UFC	0,17
Turbidez	UNT	0,17
Σ		1

Fuente: IDEAM. Índice de calidad del agua en corrientes superficiales. 2005

Hay que mencionar que estos ponderados son valores cualitativos que se obtienen realizando encuestas a expertos en calidad del agua en los cuales los encuestados le determinan un valor a cada parámetro, luego se realiza un promedio de los valores de cada encuestado y se obtienen dicho valor, además la suma del ponderado o peso relativo debe ser igual al máximo valor del rango en el cual está variando el índice de calidad del agua. Es decir, si se toma un rango de 1 a 100 la suma del ponderado debe ser igual a 100.

A continuación, se realizó un promedio de los índices obtenidos al reemplazar los resultados de los parámetros de las tablas 7,8,9 para establecer un único valor y así implementar la ecuación 3.

Tabla 11 Promedio índices de calidad del agua río Curubital

INDICES DE CALIDAD						
CONDUCTIVIDAD	pH	SST	OD	DBO	TURBIDEZ	
0,995	1	1	0,68	0,12	1	
0,992	0,632	1	0,67	0,12	1	
0,993	1	1	0,57	0,12	1	
0,983	1	1	0,65	0,12	0,998	
0,981	1	1	0,69	0,12	1	
0,978	1	1	0,73	0,12	1	
0,984	1	1	0,6	0,12	0,948	
0,972	1	1	0,67	0,12	0,981	
0,984	1	1	0,65	0,12	0,972	
PROMEDIO	0,985	0,959	1	0,657	0,12	0,989

Fuente: Propia

Ya determinado los valores calculados de índice de calidad y los ponderados se puede calcular el índice de calidad del agua del río Curubital.

$$ICA = (0.985 * 0.17) + (0.959 * 0.15) + (1 * 0.17) + (0.657 * 0.17) + (0.12 * 0.17) + (0.989 * 0.17) = \mathbf{0.782}$$

El índice de calidad de coliformes totales fue determinado independientemente como anteriormente sea mencionado debido a sus valores irregulares, teniendo como resultado un índice de 0.648.

4.1 Diagnóstico de la calidad del agua de los puntos de captación

En este punto se analizó la calidad del agua en los puntos de captación del río Curubital, para establecer los usos más favorables del agua para la población aledaña, con respecto a la normatividad nacional. Se generó la siguiente tabla con el fin de identificar la señal de alerta del río Curubital y hacer la respectiva calificación a los diversos usos del agua.

Tabla 12 Criterio de calificación del uso del río Curubital

Calificación del uso del agua río Curubital	Señal de alerta
Mala	Rojo
Regular	Amarillo
Buena	Azul

Fuente: Propia

Podemos concentrar la calificación del río Curubital a partir de la anterior tabla, identificando sus respectivos usos, calificación y la señal de alerta, hay que decir que los espacios vacíos significan que el parámetro no es significativo para el uso o no esta requerido en la normatividad. Del mismo modo se pueden generar mapas en base a la tabla 13 para tener una representación en el espacio.

Tabla 13 Calificación del uso del agua del río Curubital

Punto de captación	Color (UNP)	Olor	Turbidez (UNT)	Temperatura (°C)	pH (pH)	Conductividad (µsiemens/cm)	OD (ppm)	SST (ppm)	SD (ppm)	DBO (mg O2/L)	Coliformes Totales (UFC)
Consumo Humano											
Parte Alta	MALA	BUENA	MALA		BUENA	BUENA			BUENA		MALA
Parte Media	MALA	BUENA	MALA		BUENA	BUENA			BUENA		MALA
Parte Baja	MALA	BUENA	MALA		BUENA	BUENA			BUENA		MALA
Preservación de Flora y Fauna											
Parte Alta	MALA	BUENA	MALA		BUENA			REGULAR			
Parte Media	MALA	BUENA	MALA		BUENA			REGULAR			
Parte Baja	MALA	BUENA	MALA		BUENA			REGULAR			
Agrícola											
Parte Alta				BUENA	BUENA	BUENA		BUENA	BUENA	BUENA	MALA
Parte Media				BUENA	BUENA	BUENA		BUENA	BUENA	BUENA	MALA
Parte Baja				BUENA	BUENA	BUENA		BUENA	BUENA	BUENA	MALA
Pecuario											
Parte Alta									BUENA		
Parte Media									BUENA		
Parte Baja									BUENA		
Piscicultura											
Parte Alta				BUENA				REGULAR			REGULAR
Parte Media				BUENA				REGULAR			REGULAR
Parte Baja				BUENA				REGULAR			REGULAR
Industrial											
Parte Alta					BUENA		BUENA	BUENA	BUENA		
Parte Media					BUENA		BUENA	BUENA	BUENA		
Parte Baja					BUENA		BUENA	BUENA	BUENA		
Estético											
Parte Alta		BUENA						BUENA		BUENA	
Parte Media		BUENA						BUENA		BUENA	
Parte Baja		BUENA						BUENA		BUENA	
Recreativo contacto primario											
Parte Alta		BUENA	BUENA	BUENA	BUENA			REGULAR		BUENA	REGULAR
Parte Media		BUENA	BUENA	BUENA	BUENA			REGULAR		BUENA	REGULAR
Parte Baja		BUENA	REGULAR	BUENA	BUENA			REGULAR		BUENA	REGULAR
Recreativo contacto secundario											
Parte Alta		BUENA	BUENA	BUENA	BUENA			REGULAR		BUENA	REGULAR
Parte Media		BUENA	BUENA	BUENA	BUENA			REGULAR		BUENA	REGULAR
Parte Baja		BUENA	BUENA	BUENA	BUENA			REGULAR		BUENA	REGULAR
Enfriamiento											
Parte Alta				BUENA	BUENA	BUENA		BUENA	BUENA	BUENA	
Parte Media				BUENA	BUENA	BUENA		BUENA	BUENA	BUENA	
Parte Baja				BUENA	BUENA	BUENA		BUENA	BUENA	BUENA	

Fuente: Propia

Los criterios de calidad del agua del río Curubital para los diferentes usos (tabla 13) muestran que el agua es óptima en todo el trascurso de la corriente para el uso industrial, enfriamiento, estético, pecuario, dado que sus características cumplen los estándares de calidad. Para los usos sobre el consumo humano, recreativo contacto primario, fauna y flora se encuentra en una señal de alerta alta que puede ocasionar afectaciones a los seres vivos, es decir esta agua no es apta para emplearla en dichas actividades. Por otra parte, el uso recreativo contacto secundario y uso agrícola en las partes altas y medias del río Curubital presenta un estado de mala calidad, es decir puede ocasionar daños

al emplearla en estas acciones, sin embargo, en la parte de la desembocadura (parte baja) el río aumenta su calidad un poco, pero se encuentra en un estado regular lo que quiere decir que es posible el uso, pero no genera la confiabilidad al hacer uso de esta. Finalmente, para el uso de piscicultura el agua en general se encuentra en un estado regular.

IV. CONCLUSIONES

En cuanto la precipitación se encontró en las estaciones de estudio un aumento durante el período de los 45 años, además se registran precipitaciones de alta intensidad en los meses de abril a julio, siendo la estación Bocagrande la de mayor volumen anual con un promedio de 1476 mm en la condición más lluviosa, esto produce riesgos de inundaciones que hacen peligrar a las personas que viven alrededor de la cuenca y aguas abajo al río Tunjuelo. El río Curubital tiene ingresos valiosos de agua, debido a la alta precipitación registrada en la zona de estudio, igualmente los caudales máximos se presentan en los meses de abril a julio y un déficit en estos de diciembre a marzo, sin embargo, a pesar del aumento en las precipitaciones los caudales medios y máximos en la estación Pte. Australia han disminuido, probablemente por variaciones en la temperatura o incrementos de uso en el suelo para la agricultura, pastoreo y así mismo extensión de la población en las veredas aledañas al río, que origina una mayor demanda del recurso hídrico. En los registros de precipitación se evidenció una regularidad durante el período de 45 años en las estaciones evaluadas.

La aplicación del índice de contaminación del agua hacia los tres sitios de muestreo de nota una buena calidad del agua con un índice de contaminación del agua de 0,782. Sin embargo, en cuanto los criterios de uso del agua proveniente del río Curubital se observó que para diferentes usos el agua no cumple con la norma de calidad, hay que mencionar que el uso más benéfico para la población colindante al río Curubital es la utilización para uso agrícola que se encuentra afectado dado a la concentración de coliformes totales porque sus demás características cumplen con los estándares. También para el consumo humano el agua no es óptima debido a la concentración de color,

turbidez y coliformes totales en el agua, aunque el tratamiento para estos parámetros no genera amplios costos.

Por otro lado, los registros de las estaciones de caudales requieren una mayor atención en vista de que la información recopilada presentó registros incompletos durante varios años y a causa de esto no se permitió realizar una predicción de caudales en un tiempo definido, no obstante, la estación Pte. Australia contaba con un amplio registro histórico lo que permitió hacer una evaluación más verídica y predecir a ciencia cierta el comportamiento futuro de los caudales, obteniendo unos caudales progresivos donde se infiere que para 100 años el caudal puede ser aproximadamente 55 m³/s y para 500 años un caudal de 70 m³/s, lo que genera una idea posterior a la vida útil del embalse La Regadera por ser una de las corrientes que desemboca sus aguas al embalse, también anunciar en futuros desarrollos de las plantas La Laguna y el Dorado que tratan el agua para abastecimiento del sector sur oriental de la ciudad de Bogotá, hay que mencionar además que los resultados obtenidos por el método de Gumbel fueron confiables y pueden ser empleados para diseños.

Finalmente, los resultados obtenidos demuestran que el río Curubital es una cuenca estable donde sus precipitaciones han sido constantes y sus caudales no han presentado cambios irregulares esto instruye a relacionarla con el cambio climático donde estadísticamente no ha intervenido las consecuencias de estos fenómenos, de esa manera se debe conservar este recurso natural y no permitir acciones antrópicas que con lleven al deterioro de esta fuente hídrica, adicionalmente la investigación permitió identificar que el agua se encuentra en general en un buen estado, aunque la característica microbiológica “Coliformes Totales” afecta el uso del recurso para las actividades que tienen en cuenta este parámetro.

AGRADECIMIENTOS

Antes que nada, retribuyo a mis asesores Alberto Sánchez de la Calle y Bibiana Carolina Gómez Salgado que hicieron parte de este proyecto de grado dado que sin su paciencia, sabiduría, dedicación y

conocimiento no hubiera sido posible concretarlo. Adicionalmente, agradezco al Ingeniero Carlos Valencia Monedero por sus aportes, apoyo y enseñanzas en el área de calidad del agua y aguas residuales. También reconozco a la Universidad La Gran Colombia donde he vivido las mejores experiencias y me inculcaron a estudiar con esfuerzo, a reconocer la ética como eje principal del hombre, a leer con reflexión y aportar nuevas ideas a mí comunidad que permitan mejorar su calidad de vida, de igual manera mi mayor gratitud a la empresa Acueducto, Alcantarillado y Aseo de Bogotá (EAAB), el Instituto Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Pontificia Universidad Javeriana y a la empresa Biopolab por el acceso a la información recopilada de las estaciones meteorológicas y por los servicios expuestos a la investigación que fueron determinantes para el proyecto.

REFERENCIAS

TORRES QUINTERO, Ernesto, VELÁZQUEZ, Marly Carolina. Diagnóstico Ambiental de las Cuencas Hidrográficas de Embalses en Colombia, Análisis Hidrológico par el Embalse de La Regadera. 2009., Universidad Libre. Disponible en: http://www.unilibre.edu.co/revistaavances/avances_10/r10_art10.pdf

EL TIEMPO. Bogotá. 30 de junio del 2015. Disponible en: <http://www.eltiempo.com/bogota/lluvias-en-bogota-río-tunjuelo/16022597>

EL TIEMPO. Bogotá. Enero del 2016. Disponible en: <http://m.eltiempo.com/bogota/fenomeno-del-nino- causa-desabastecimiento-de-agua-en-cundinamarca/16320077>

EL TIEMPO. 24, marzo. 2015. Disponible en: <http://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/agua-potable-en-colombia-/15445939>

LEÓN GARCÍA, Juan Carlos. Plan Ambiental Local. Disponible en: <http://www.ambientebogota.gov.co/documents/10157/2883159/PAL+USME+2013-2016.pdf>.

CHOW, Ven Te. Hidrología Aplicada. [en línea]. [citado 19, abril., 2016]. Disponible en:

<http://es.slideshare.net/Ashleyxita/hidrologia-aplicada-ven-te-chow-mc-graw-hill-completo-ocioso>

MONSALVE SAENZ, Germán. Hidrología en la ingeniería. 2a Ed. Bogotá: Escuela Colombiana de ingeniería. Enero. 1999. ISBN: 958-95742-1-1

SILVA, Gustavo. Hidrología básica. Bogotá D.C.: Universidad Nacional de Colombia 1998 p.

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES DE COLOMBIA [en línea]. Medición de caudal. Disponible en: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtua1/012406/Cap11.pdf>

VILLON BERJAN, Máximo. Hidrología. 2ed Peru, Lima: MaxSoft. 2002. Disponible en: <http://civilgeeks.com/2014/08/31/libro-de-hidrologia-maximo-villon/>

VALENCIA MONEDERO, Carlos Hernán. Aguas Residuales: Una Visión Integral. Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2016. ISBN 978-958-8972-09-1

ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. Calidad del agua. 2da ed. Santa Fe de Bogotá. Escuela Colombiana de Ingeniería. 2005. ISBN 958-8060-53-2.

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. Sólidos suspendidos totales en agua secados a 103 – 105 °C. [En línea]. [citado 1 Octubre. 2016].

ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. Análisis Físico del Agua. Calidad del agua. 3a ed. Santa Fe de Bogotá. Escuela Colombiana de Ingeniería. 2009. 105 p. ISBN 978-958-8060-83-5.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION, et al. Métodos normalizados: Para el análisis de aguas potables y residuales. 17 ed. España, Madrid: Díaz de Santos, 1989. ISBN; 84-7978-031-2

METCALFT & EDDY. Wastewater Engineering: Treatment and Reuse. California: Mc Graw Hill, 2004. 57 p. ISBN 007-124140-X

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. Determinación de escherichi coli y coliformes totales en agua por el método de filtración por membrana en agar chromocult [En línea].30, agosto,2007. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Coliformes+totales+y+E.+coli+en+Agua+Filtraci%C3%B3n+por+Membrana.pdf/5414795c-370e-48ef-9818-ec54a0f01174>. [citado 29 abril., 2016].

ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD. Guías para la calidad de agua potable: Control de la calidad del agua potable en sistemas de

abastecimiento para pequeñas comunidades. [En línea]. Washington: Guidelines for drinking- water quality, 1988. 36 p. ISBN 92 4 154170 9. .

[citado 18 agosto,. 2016]. Disponible en: https://books.google.com.co/books?id=X9QgncMbnsYC&pg=PA30&dq=coliformes+totales&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwjf_IS2sNbPAhUKNiYKHabkCPYQ6AEIJTAC#v=onepage&q=coliformes%20totales&f=false.

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. Indicadores Hídricos. [En línea]. [citado 24 agosto,. 2016]. Disponible en:

<http://www.ideam.gov.co/web/agua/indicadores1>.

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. Índice de calidad del agua en corrientes superficiales. [En línea]. [citado 24 agosto,. 2016]. Disponible en: http://www.ideam.gov.co/documents/24155/123679/083.21_HM_Indice_calidad_agua_3_FI.pdf/c0c6eca3-1a2b-484c-82f8-76536f62e2c7.

RAMÍREZ, A. RESTREPO, R. VIÑA, G. Cuatro Índices de Contaminación para Caracterización de Aguas Continentales. Formulaciones y Aplicaciones. [En línea]. Ciencia, Tecnología y Futuro. Diciembre, 1997. no. 3, [citado 30 sep., 2016]. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/ctyf/v1n5/v1n5a08.pdf>

SIERRA RAMIREZ, Carlos Alberto. Calidad del agua: Evaluación y diagnóstico. Medellín: Ediciones de la U, 2011. 460 p. ISBN: 978-958-8692-06-7

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE MADRID. Método de Gumbel [En línea]. [citado 12 nov. 2016]. Disponible en: <http://ocw.upm.es/ingenieria-agroforestal/climatologia-aplicada-a-la-ingenieria-y-medioambiente/contenidos/tema-7/METODO-DE-GUMBEL.pdf>

Empresa de Acueducto y Alcantarillado Bogotá (EAAB). Monitoreo Limnológico del embalse La Regadera y Chisacá. Bogotá: Limnoquímica Ltda., 26, diciembre. 2000.

COLOMBIA. MINISTERIO DE LA PROTECCIÓN SOCIAL. Decreto 1575. 09, mayo. 2007. 14 p. [citado 05, mayo., 2016]. Disponible en: http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/decretos/2007/dec_1775_2007.pdf

COLOMBIA. MINISTERIO DE LA PROTECCIÓN SOCIAL et al. Resolución 2115. 22, junio. 2007. 23 p. [citado 05, mayo., 2016]. Disponible en: <http://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegr>

aldelRecursoHidrico/pdf/Legisla%C3%B3n_del_agua/Resoluci%C3%B3n_2115.pdf

COLOMBIA. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS. Documentó: Agua, Agua Potable. Bogotá: ICONTEC. 10 p. [citado 13, mayo., 2016]. (NTC 813) Disponible en:

http://ingenieria.udea.edu.co/isa/normas_decretos/TEXTO%20NTC%20813%20AGUA%20POTABLE.pdf

COLOMBIA.MINISTERIO DE AGRICULTURA. Decreto 1594 de 1984. Colombia: Junio 26. [citado 13, mayo., 2016]. Disponible en: <http://www.ins.gov.co:81/normatividad/Decretos/Forms/DispForm.aspx?ID=53>

SPIEGEL, Murray. Estadística. 2^{da} Ed. Madrid: Mc Graw Hill, 1997. ISBN 0-07-060234-4