

TRÁNSITO DE CRECIENTE PARA EL EMBALSE DE BUCARAMANGA

JHON EDINSON ALVIADES RIVEROS

HILMAVELIS GONZÁLEZ PALACIO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS

ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

BUCARAMANGA

2015

TRÁNSITO DE CRECIENTE PARA EL EMBALSE DE BUCARAMANGA

JHON EDINSON ALVIADES RIVEROS

HILMAVELIS GONZÁLEZ PALACIO

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:

INGENIERO CIVIL

DIRECTOR

ANDRÉS ALMEYDA ORTIZ

Ingeniero Civil, M.Sc

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS

ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

BUCARAMANGA

2015

Ayer veía este día tan lejos, sin embargo tras pasar muchos caminos, muchas pruebas, conocer personas, superar obstáculos y adquirir muchos conocimientos; hoy estoy aquí, viendo la meta tan cerca. Este logro va dedicado a ti mi Dios por darme las fuerzas necesarias para luchar, por darme paciencia y mostrarme siempre el camino que debía seguir.

A mi padre Hildemaro González por sus sabios consejos, por enseñarme el valor de la humildad. Por recalcar me que con sencillez puedo ser grande, lograr todo lo que me proponga y a mi hermano Juan José González por ser uno de los motores para cumplir mis propósitos.

A mis tías Carmen Amaya, Maribellys Palacio, a mi abuela Felicia Amaya y al resto de mi familia por creer en mí, por acompañarme con sus oraciones y facilitarme los medios para formarme y salir adelante.

A mis amigos y aquellas personas que me han acompañado en este proceso, a los de mi promoción RL-TNG, a los que han aportado momentos inolvidables en mi vida, sobre todo a aquellos que siempre estuvieron cuando más necesite una mano amiga y un cálido abrazo, cuando la distancia hacia peso y extrañaba mi casa.

A ti Omar Ballesteros por impulsarme a llegar lejos, por tu apoyo incondicional, sobre todo por compartir esta etapa conmigo y ayudar a que mi sustentación fuera un éxito.

Por ultimo pero no menos importante este triunfo va dedicado a ti mamá, por ser mi amiga, mi apoyo constante, por enseñarme a perseverar, por darme las mejores palabras de aliento, por no dejarme desfallecer cuando no encontraba salidas, por esforzarte cada día para darme lo mejor. Simplemente por mostrarme un amor puro y ser el mejor ejemplo a seguir. Mami esta meta es tuya.

De corazón mil gracias, por ustedes hoy soy quien soy.

Hilmavelis González Palacio

Dedico este proyecto de tesis a Dios, a mis padres, a Andrea. A Dios porque en todo momento he podido sentir su respaldo, su bendición y por su gracia hoy me permite alcanzar este sueño con una gran satisfacción. A mis padres por su dedicación y esfuerzo en todas las circunstancias que a mi respectan, con sus enseñanzas, sus consejos y su ejemplo han instruido para bien mi vida, siendo mi apoyo en todo momento. A Andrea por su apoyo incondicional durante todo este tiempo.

Gracias por ser parte de mi vida, los amo...

Jhon Edinson Alviades Riveros

AGRADECIMIENTOS

En primera instancia a Dios,

Por permitirnos desarrollar y culminar con éxito nuestro trabajo de grado.

A nuestro director, el ingeniero, M.Sc Andrés Almeyda Ortiz,

Por la disposición, colaboración y orientación que nos brindó en todo el desarrollo del proyecto y al Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (AMB) por la información brindada ante la necesidad del mismo.

Al ingeniero, M.Sc, Ph.D Edgar Ricardo Oviedo Ocaña,

Por los consejos y recomendaciones durante el plan de proyecto para el progreso del trabajo de grado.

A nuestros familiares y amigos,

Que de una u otra forma nos brindaron su apoyo no solo en nuestro proyecto, sino en toda la carrera.

A la Universidad Industrial de Santander por brindarnos los medios para desarrollarnos como buenos profesionales y personas competitivas con muchos valores.

CONTENIDO

	Pág
INTRODUCCION	16
1. HIDROLOGÍA DEL EMBALSE DE BUCARAMANGA	19
1.1. DESCRIPCIÓN DE LA CUENCA	19
1.2. CAUDAL MÁXIMO ASOCIADO A LA CRECIENTE MÁXIMA PROBABLE DE TONA	20
1.2.1. Análisis De Frecuencia de Precipitación Máxima de 24 Horas	21
1.2.2. Duración y Distribución Temporal de la Precipitación	24
1.2.3. Precipitación Efectiva	25
1.2.4. Precipitación Máxima Probable (PMP)	25
1.2.5. Desarrollo del Modelo Lluvia Escorrentía	26
1.2.5.1. U.S. Soil Conservation Service (SCS)	27

1.2.5.2.	Creciente Máxima Probable	28
2.	TRÁNSITO DE CRECIENTE PARA EL EMBALSE	30
2.1.	TRÁNSITO AGREGADO DE CRECIENTES	31
2.1.1.	Método De Runge-Kutta De Tercer Orden	38
2.1.1.1.	Resultado Del Hidrograma Transitado	38
2.1.2.	Laminación De La Avenida	41
2.1.2.1.	Resultado Del Tránsito	42
3.	ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS DOS MÉTODOS	46
4.	CONCLUSIONES	48
	BIBLIOGRAFÍA	49

LISTA DE FIGURAS

	Pág
Figura 1. Imagen de la localización del Embalse de Bucaramanga.	16
Figura 2. Cuenca de drenaje del río Tona y ubicación de estaciones hidroclimatológicas.	22
Figura 3. Curvas de frecuencia de precipitaciones máximas.	23
Figura 4. Hidrograma Unitario propuesto por el U.S. S.C.S.	28
Figura 5. Resultado del software HEC-HMS para el hidrograma de entrada de creciente máxima probable por el método CSC.	29
Figura 6. Curvas cota vs volumen y cota vs área embalse.	33
Figura 7. Configuración de la geometría del vertedero tipo Morning Glory.	34
Figura 8. Nomogramas realizados por el Bureau of Reclamation del U.S. Department of the Interior.	37
Figura 9. Curva de descarga del vertedero.	38
Figura 10. Diagrama de flujo para el tránsito en el embalse de detención utilizando la técnica de Runge-Kutta de tercer orden.	39
Figura 11. Tránsito de crecientes por Runge Kutta(tercer orden).	40

Figura 12.	Relación almacenamiento caudal de salida.	41
Figura 13.	Diagrama de flujo para el método de Laminación.	42
Figura 14.	Tránsito de crecientes por laminación de la avenida.	44
Figura 15.	Relación almacenamiento caudal de salida.	45

LISTA DE TABLAS

	Pág
Tabla 1. Características principales de la cuenca tomadas del memorando técnico No 3: Hidrología, Clima y Sedimentos del embalse.	20
Tabla 2. Precipitaciones promedias esperadas.	24
Tabla 3. Comparación de métodos aplicados.	47

GLOSARIO

Creciente máxima probable (CMP): Crecida máxima que cabe esperarse suponiendo una coincidencia de todos los factores que producirían las precipitaciones más intensas y la escorrentía máxima.

Cuenca: Área que tiene una salida única para su escorrentía superficial.

Curva Numero (CN): Parámetro empírico que varía entre 0 y 100 que se utiliza para estimar el coeficiente de escorrentía de un episodio de lluvias a partir de la altura de precipitación y las propiedades de drenaje de la cuenca.

Ecuación de continuidad: Ecuación que describe la conservación de la masa de materia en movimiento, por ejemplo, del flujo de agua.

Hidrograma: Gráfico que muestra la variación temporal de variables hidrológicas tales como el nivel de agua, el caudal, la velocidad y la carga de sedimentos.

Hidrograma Unitario: Hidrograma de escorrentía directa producido por una cantidad de lluvia efectiva uniformemente repartida sobre una cuenca en un intervalo de tiempo determinado.

Precipitación Máxima probable: Cantidad de precipitación que es el límite superior estadístico (físico) en una cuenca para una duración dada.

RESUMEN

TÍTULO: TRÁNSITO DE CRECIENTE PARA EL EMBALSE DE BUCARAMANGA *

AUTORES: JHON EDINSON ALVIADES RIVEROS
HILMAVELIS GONZÁLEZ PALACIO**

PALABRAS CLAVE: Tránsito de creciente, Hidrógrama, Laminación, Creciente máxima probable, Caudal de diseño.

DESCRIPCIÓN: Esta investigación consistió en estimar el tránsito de creciente para el embalse de Bucaramanga bajo el criterio de máxima operación y se presenta el evento para la creciente máxima probable (CMP) aplicando sistemas de tránsitos hidrológicos (sistemas agregados de creciente), mediante los métodos de Runge-Kutta de tercer orden y Laminación de la avenida, estos métodos se basan en la ecuación de continuidad donde el flujo se encuentra en función del tiempo y del volumen almacenado en el embalse. Se determinó el hidrógrama de salida a partir de tres parámetros: el hidrógrama de entrada calculado a través del método de modelo lluvia escorrentía U.S. Soil Conservation Service (SCS), la relación cotas versus área del espejo de agua del embalse y los valores de la curva de descarga del vertedero tipo Morning Glory; factores conocidos gracias a los estudios hidrológicos hechos por los consultores de Integral, Ponce de León, Germán Gavilán y José Salas en la zona donde se encuentra localizado el embalse de Bucaramanga. Al ser transitado el hidrograma de entrada se pudo percibir que las condiciones de flujo aguas abajo tendrán un comportamiento similar a las condiciones de flujo aguas arriba del embalse, por consiguiente el embalse de Bucaramanga no está diseñado para que genere una laminación suficiente que permita disminuir considerablemente el pico de hidrograma de salida.

Se recomienda realizar estudios futuros que determinen la vulnerabilidad y estimación del riesgo con el fin de desarrollar un plan de gestión de la emergencia de manera que permita disminuir los daños ocasionado aguas abajo del embalse dado el evento de la CMP.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Andrés Almeyda Ortiz

ABSTRACT

TITLE: GROWING TRAFFIC OF BUCARAMANGA'S DAM*

AUTHORS: JHON EDINSON ALVIADES RIVEROS

HILMAVELIS GONZÁLEZ PALACIO**

KEY WORDS: Growing Traffic, Hydrograph, Lamination, probable maximum flood, Design flow.

DESCRIPTION: This research consisted in estimating the growing traffic of Bucaramanga's dam following the maximum operation criteria for maximum growing probable (CMP) applying hydrological transit systems (systems increased aggregate) through Runge-Kutta third order and lamination Avenue, these methods are based on the continuity equation where the flow is a function of time and volume stored in the reservoir. The outflow hydrograph is determined from three parameters: the inflow hydrograph calculated by the method of rainfall runoff model US Soil Conservation Service (SCS), the ratio levels versus water mirror area of the reservoir and the values of the curve type discharge Morning Glory landfill; known factors thanks to hydrological studies by Integral consultants like, Ponce de León, José Salas y Germán Gavilán and Boards in the area where the dam is located in Bucaramanga. Being busy hydrograph input could see that the flow conditions downstream will have a similar flow conditions behavior upstream of the dam, therefore the Bucaramanga reservoir is not designed to generate a sufficient lamination that allows considerably to decrease peak outflow hydrograph.

It is recommended that future studies to determine vulnerability and risk estimation in order to develop a plan of emergency management so as to enable damage caused decrease downstream of the event since CMP dam.

* Degree Work

** Faculty of Physical-Mechanicals Engineering. School of Civil Engineering. Director: Andrés Almeyda Ortiz.

INTRODUCCIÓN

El embalse de Bucaramanga es un proyecto construido con el fin de suministrar agua a las plantas de tratamiento Los Angelinos y Bosconia para abastecimiento de la población hasta el año 2032. Posee una presa de enrocado con cara de concreto con una altura de 103,6 metros, almacena un volumen de 17,6 millones de m³ y se localiza en la vereda Retiro Grande a 600 metros aguas arriba de la confluencia del río Tona y Suratá.

En la siguiente figura se puede apreciar la ubicación del embalse de Bucaramanga:

Figura 1. Imagen de la localización del Embalse de Bucaramanga.



Fuente. Imagen tomada de Google Earth.

El tránsito de crecientes en un embalse es un procedimiento que sirve para determinar el hidrograma de salida de una presa dado un hidrograma de entrada. Esto permite evaluar qué sucede con los niveles de la creciente al pasar por la

estructura de almacenamiento del agua. Suele aplicarse en un embalse para dimensionar las estructuras de desagüe, fijar el nivel de agua máximo esperado (NAME), conocer la evolución de los niveles en el vaso y de los caudales de salida por los desagües (principal y de emergencia), por último para saber si el criterio de operación de los desagües está de acuerdo con los objetivos del diseño de la estructura¹.

Este caso de estudio consistió en realizar el tránsito de crecientes bajo criterio de máxima operación al embalse de Bucaramanga para la estimación del hidrograma de salida, conocido como la transición que sufre la onda del flujo al recorrer la presa para plantear el diseño de vertederos de exceso². El tránsito de crecientes se desarrolló mediante los métodos de Runge-Kutta (de tercer orden) y Laminación de la avenida, con el fin de observar el comportamiento del flujo a través del embalse y del vertedero Morning Glory. El vertedero está conformado por un azud circular de radio 10,00 m, continuando con un pozo vertical de aproximadamente 25 m de profundidad y de radio variable (entre 10 y 4,50 m), éste se conecta a través de un codo a un túnel de 317 m de longitud, el cual conduce el flujo hasta un deflector de chorro, permitiendo disponer el caudal evacuado en el cuenco de socavación de la obra³.

Luego del almacenamiento temporario o del tránsito de creciente por el embalse se plantea el diseño de vertedero y su dimensionamiento toma en cuenta únicamente la máxima descarga o pico del hidrograma⁴. En este caso el caudal pico del hidrograma se estima a partir de la creciente máxima probable.

¹ **KOOLHAAS, Michel.** Embalses Agrícolas. Diseño y Construcción. Uruguay: s.l. : Hemisferio Sur, 2003. P.1.

² **KOOLHAAS, Michel.** Tránsito de Crecientes. Curso de Posgrado Profesional Estructuras Hidráulicas para Riego. Uruguay, 2012.P.3-4. En: <http://www.fagro.edu.uy/~topografia/docs/Transito%20de%20Crecientes.pdf>

³ **CONSULTORES INTEGRAL.** Estudios y diseño del proyecto de regulación del río Tona Embalse de Bucaramanga. Memorando Técnico N°9. Bucaramanga : Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (AMB), 2012. P.5.7.

⁴ **KOOLHAAS, Michel.** Tránsito de Crecientes. Curso de Posgrado Profesional Estructuras Hidráulicas para Riego. Uruguay, 2012.P.3-4. En: <http://www.fagro.edu.uy/~topografia/docs/Transito%20de%20Crecientes.pdf>

Principalmente se hizo necesario conocer el hidrograma de entrada correspondiente a la creciente máxima probable del embalse de Bucaramanga. Que depende de factores como caudal máximo de río Tona, estipulado a partir de modelos de lluvia escorrentía⁵ y del hidrógrama unitario que consta de diversas variables dependientes de las características propias de la cuenca. Para ello se examinaron los informes de análisis hidrológico donde se determinaron los caudales, el hidrograma de entrada al embalse y la información pertinente para el diseño de vertedero. Estos fueron proporcionados por los consultores Ponce de León e Integral. Adicionalmente se hizo énfasis en el informe respectivo al peritaje a cargo de José Salas y Germán Gavilán. Donde se encuentran datos sugeridos y cálculos finales para el hidrógrama de entrada y el diseño del vertedero.

⁵ **ALMEYDA, Andrés.** Simulación a escala reducida del embalse de Bucaramanga. Máster internacional en explotación y seguridad de presas y balsas. España: Comité Nacional Español de Grandes Presas (SPANCOLD), 2014. P. 1.

1. HIDROLOGÍA DEL EMBALSE DE BUCARAMANGA

A partir de la hidrología se determinó el caudal de diseño de 1500 m³/s para la creciente máxima probable (CMP). Teniendo en cuenta esto se estableció el caudal pico para el hidrograma unitario y posteriormente el hidrograma de entrada al embalse.

Los datos de las características de la cuenca como la información hidrológica se extrajeron memorando técnico No 3: Hidrología, Clima y Sedimentos del embalse, elaborado por la consultora Integral.

1.1. DESCRIPCIÓN DE LA CUENCA

La subcuenca hidrográfica del río Toná está ubicada al noreste de la ciudad de Bucaramanga. El río Toná desemboca en el río Suratá, afluente del río Lebrija situado en el noreste del departamento de Santander-Colombia y correspondiente a la vertiente occidental de la cordillera oriental.

Los afluentes principales del río Toná son las quebradas Arnanía, Carrizal y Golondrinas⁶.

En la siguiente tabla se puede observar las características propias de la cuenca:

⁶ **ALMEYDA, Andrés.** Simulación a escala reducida del embalse de Bucaramanga. Máster internacional en explotación y seguridad de presas y balsas. España: Comité Nacional Español de Grandes Presas (SPANCOLD), 2014. P.6.

Tabla 1. Características principales de la cuenca tomadas del memorando técnico No 3: Hidrología, Clima y Sedimentos del embalse.

Cuenca montañosa, altas pendientes.	(3- 72)%
Pendiente promedio cauce principal.	12%
Pendiente promedio de la cuenca.	44%
Área	195 km ²
Longitud del cauce	26Km
Cota superior	3890msnm
Cota Inferior	800msnm
Longitud hidráulica de la cuenca	28km
Curva Numero(CN)	75
Velocidad media para un tiempo de concentración tc: 3,7 horas.	1,97m/s
Precipitación media multianual por polígonos de Thiessen.	1182 mm/año
Temperatura	23°C
Humedad relativa	82,5%

1.2. CAUDAL MÁXIMO ASOCIADO A LA CRECIENTE MÁXIMA PROBABLE DE TONA

El caudal máximo probable (QMP) es considerado un caudal de diseño asociado a la precipitación máxima probable (PMP) que es el valor límite máximo que puede ocurrir pero que no se superará⁷, en otras palabras la mayor intensidad de

⁷ **SALAS, José y GAVILAN, Germán.** Revisión de los Caudales de Diseño para la Represa de Bucaramanga. Informe 2. Bucaramanga : Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (AMB), 2011.P.2.

precipitación para una cierta duración que es físicamente posible sobre una cuenca determinada⁸.

Existen diversos métodos para calcular la precipitación máxima probable (PMP), dentro de los tres más destacados en el proyecto del embalse de Bucaramanga se encuentran: Métodos estadísticos, método de maximización y transposición de tormentas observadas, y los métodos de modelos lluvia escorrentía.

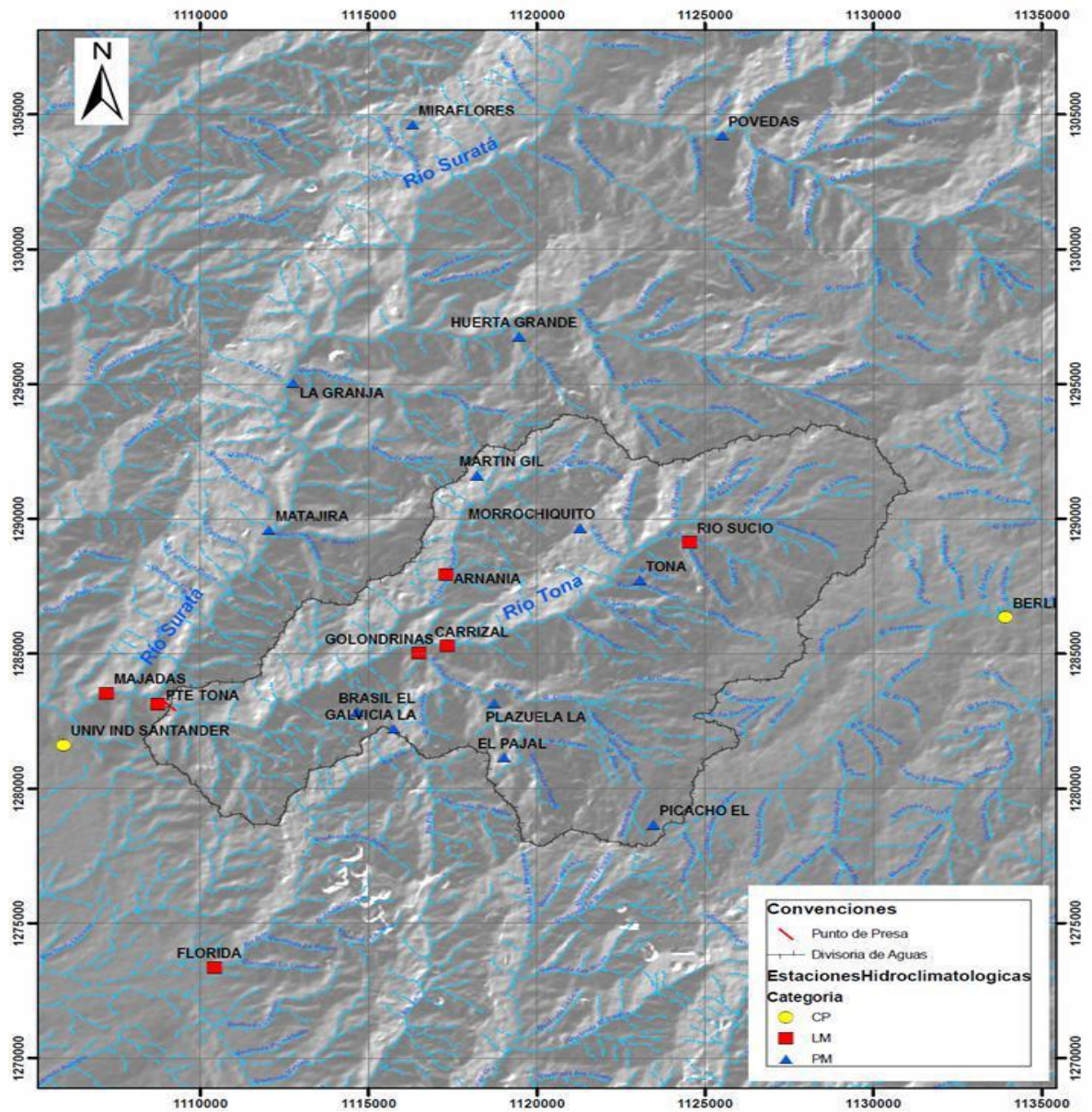
El caudal máximo del río Tona se determinó a partir del modelo lluvia escorrentía U.S. Soil Conservation Service (SCS), para ello se analizan las precipitaciones de diseño, luego el desarrollo y por último los resultados de la aplicación de este modelo.

1.2.1. Análisis De Frecuencia De Precipitación Máxima De 24 Horas. Para este análisis se emplearon registros de estaciones con mayor representación en la cuenca, cercanas al lugar donde está ubicado el embalse y ajustados a la distribución Gumbel (figura 3).

En la siguiente figura se muestra la ubicación de las estaciones en la cuenca del Río Tona:

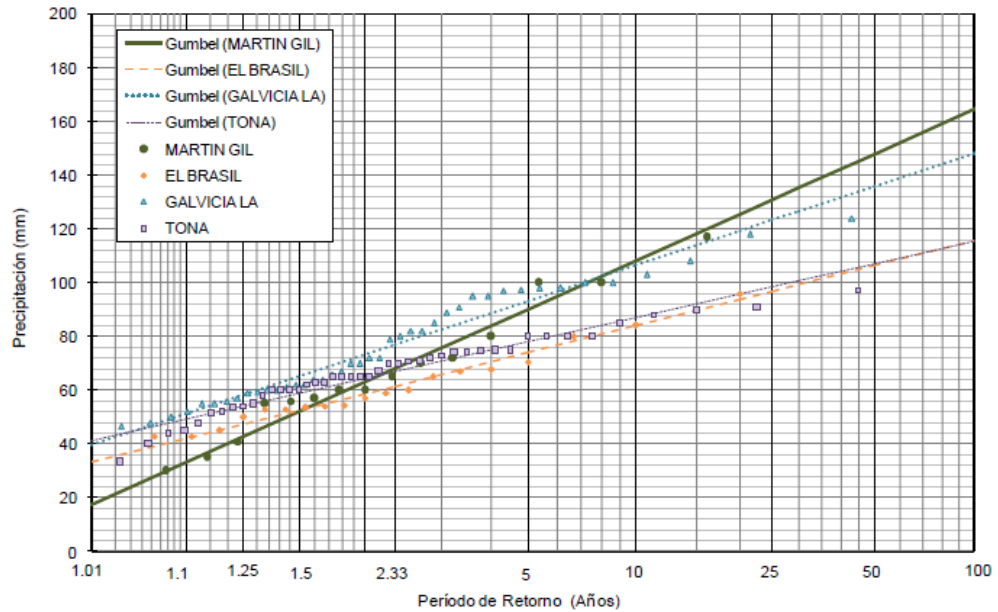
⁸ **SALAS, José y GAVILAN, Germán.** Revisión de los Caudales de Diseño para la Represa de Bucaramanga. Informe 2. Bucaramanga : Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (AMB), 2011.P.2.

Figura 2. Cuenca de drenaje del río Tona y ubicación de estaciones hidroclimatológicas.



Fuente. CONSULTORES INTEGRAL. Estudios y diseños del proyecto de regulación del río Tona Embalse de Bucaramanga. Memorando Técnico 03 – Hidrología, Clima y Sedimentos del embalse. Bucaramanga: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (AMB), 2012, P.11.

Figura 3. Curvas de frecuencia de precipitaciones máximas.



Fuente. CONSULTORES INTEGRAL. Estudios y diseños del proyecto de regulación del río Tona Embalse de Bucaramanga. Memorando Técnico 03 – Hidrología, Clima y Sedimentos del embalse. Bucaramanga: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (AMB), 2012, P. 22.

En estos registros se seleccionaron las precipitaciones (Tabla 2.) más altas aplicándoles un factor del 40% por reducción de área igual a 0,6 y por reducción en el tiempo de 0,82 para obtener una precipitación promedio de la cuenca.

Tabla 2. Precipitaciones promedias esperadas.

Periodo de retorno(años)	Precipitación Focal (mm)	Precipitación diseño(mm)
2,33	68	33
5	90	44
10	108	53
25	131	64
50	148	73
100	165	81

Fuente. ALMEYDA, Andrés. Simulación a escala reducida del embalse de Bucaramanga. Máster internacional en explotación y seguridad de presas y balsas. España: Comité Nacional Español de Grandes Presas (SPANCOLD), 2014. P.23.

1.2.2. Duración y Distribución Temporal de la Precipitación. Para la revisión de las crecientes objeto de este estudio, la duración de la lluvia se consideró igual al tiempo de concentración, pues se ha demostrado de manera teórica que lluvias con duración menores no alcanzan a generar la mayores crecientes y que lluvias más largas no generan caudales mayores a la que se estiman con una duración igual al tiempo de concentración⁹.

En cuanto a la distribución temporal, se asume la curva propuesta por Huff para el segundo cuartil con una probabilidad del 50% por falta de datos. Estas curvas fueron determinadas para fuertes tormentas en el medio oeste de los Estados Unidos para áreas hasta de 400 mi² y para diferentes clases de precipitaciones. En nuestro medio esta metodología se ha utilizado teniendo en cuenta que se ha podido verificar comportamientos similares en zonas con registros, y que permite estimar de manera probabilística la severidad de la distribución utilizada¹⁰.

1.2.3. Precipitación Efectiva. La precipitación efectiva es la porción de la lluvia que contribuye a la escorrentía directa de una cuenca, luego de restar las pérdidas o abstracciones hidrológicas, las cuales son consecuencia de intercepción en la vegetación, el almacenamiento en depósitos del suelo, la infiltración y la evapotranspiración, entre otros factores¹¹.

⁹ **CONSULTORES INTEGRAL** . Estudios y diseños del proyecto de regulación del Río Tona Embalse de Bucaramanga. Memorando técnico 03-Hidrología, Clima y Sedimentos. Bucaramanga : Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (AMB), 2012. P.24.

¹⁰ **ALMEYDA, Andrés.** Simulación a escala reducida del embalse de Bucaramanga. Máster internacional en explotación y seguridad de presas y balsas. España: Comité Nacional Español de Grandes Presas (SPANCOLD), 2014. P.23.

¹¹ *Ibíd.* P.23.

Para determinar la precipitación efectiva se utilizó el método del U.S. Soil Conservation Service (SCS), que emplea el factor Número de Curva (NC) 88 correspondiente a un suelo de humedad tipo III, por lo que al momento de ocurrir la PMP el suelo de la cuenca se encontrará saturado.

1.2.4. **Precipitación Máxima Probable (PMP).** El resultado de la PMP puntual fue 450 mm para una duración de 24 horas, con base en el método estadístico de Hershfield¹².

El método de Hershfield asigna un factor de frecuencia K en función de análisis estadísticos a los datos de precipitaciones máximas de 24 horas. Se asumió la envolvente del estimativo K propuesto por Mejía y Villegas para Colombia¹³.

Se emplea la siguiente ecuación:

$$PMP = P_{med} + KS_p \quad (1)$$

Donde:

- P_{med} : Precipitación media histórica en 24 horas (mm).
- K : Variable estadística, denominada factor de frecuencia (adimensional).
- S_p : Desviación típica de la muestra de precipitación histórica en 24 horas (mm).

¹² **SALAS, José y GAVILAN, Germán.** Revisión de los Caudales de Diseño para la Represa de Bucaramanga. Informe 2. Bucaramanga : Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (AMB), 2011.P.16.

¹³ **MEJIA, G.; VILLEGAS, F.** Maximum precipitation deviations in Colombia. EnProc. Third Conf. on Hydrometeorology. Colombis, 1979.

Implementando esos métodos se ajustaron los datos obtenidos a una curva representativa de las precipitaciones máximas de diferentes duraciones y el promedio se estimó aplicando 0,6 por el factor de reducción de área. Finalmente el valor de la PMP sobre toda la cuenca es de 272 mm.

1.2.5. Desarrollo del Modelo Lluvia Escorrentía. El modelo consiste en establecer un hidrógrama unitario (hidrograma de escorrentía directa originado por un volumen de 1 mm de precipitación efectiva uniforme sobre una cuenca durante un periodo de tiempo especificado)¹⁴ que se multiplica por la lluvia efectiva por medio de la ecuación de convolución.

A continuación se presentan el hidrograma unitario usado para el estudio del embalse de Bucaramanga mediante el método del SCS (figura 4).

1.2.5.1. U.S. Soil Conservation Service (SCS). El hidrograma unitario se calculó multiplicando las ordenadas y abscisas del hidrograma adimensional por el caudal pico y el tiempo al pico, empleando las siguientes expresiones:

$$T_p = \frac{D}{2} + Lag \quad (2)$$

$$Q_p = 0,208 \frac{A}{T_p} \quad (3)$$

¹⁴ **AYUSO, José Luis; PEÑA, Adolfo; MONTESINOS, M^a Pilar.** Estimación del hidrograma unitario. Estudio comparativo de cuatro métodos lineales. *Ingeniería del agua*. Universidad de Córdoba. Argentina, 1994, vol. 1, no 2. En: <https://upcommons.upc.edu/revistes/bitstream/2099/4148/1/article2.pdf>

Donde:

T_p = Tiempo al pico, en horas

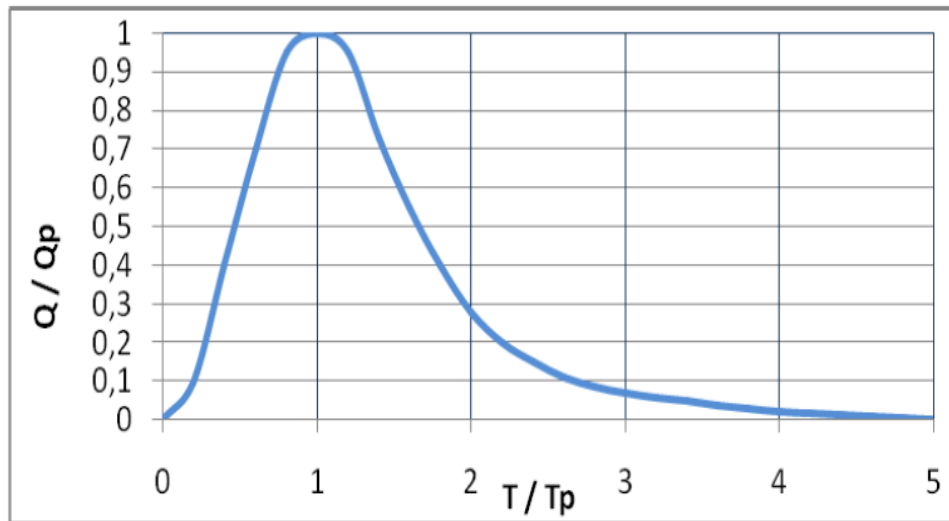
D = Duración unitaria de la lluvia, en horas

Lag = Tiempo de retraso en horas

A = Área de la cuenca, en km^2

Q_p = Caudal pico en $m^3/s/mm$

Figura 4. Hidrograma Unitario propuesto por el U.S. S.C.S.

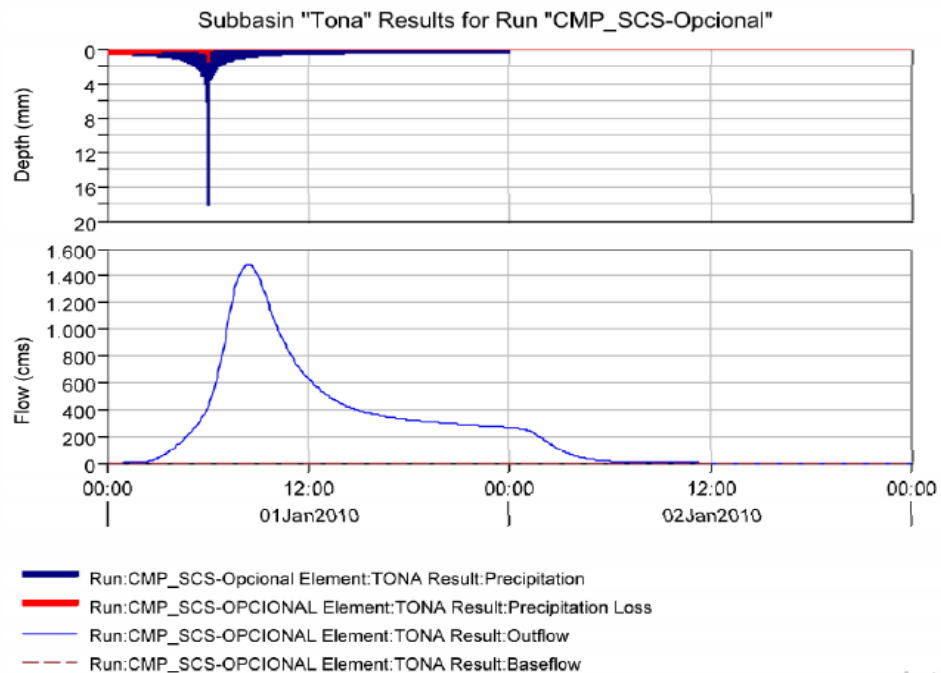


Fuente. CONSULTORES INTEGRAL. Estudios y diseños del proyecto de regulación del río Tona Embalse de Bucaramanga. Memorando Técnico 03 – Hidrología, Clima y Sedimentos del embalse. Bucaramanga: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (AMB), 2012, P. 29.

1.2.5.2. Creciente Máxima Probable (CMP). Para el cálculo de la CMP se procedió a modelar el hidrograma unitario del SCS mediante el programa HEC-HMS 3.4, estableciendo como valor $1488 m^3/s$.

Los consultores José Salas y German Gavilán analizaron que el valor de Precipitación Máxima Probable (PMP) se encontraba entre 168 y 297 mm, de acuerdo a la variedad de los estimados obtenidos por el método estadístico de Hersfield, por tanto, recomendaron como PMP de diseño el valor de 272mm y basados en este, estimaron un valor razonable para el caudal máximo probable (QMP) de 1.500 m³/s considerando el método SCS (**Figura 5**).

Figura 5. Resultado del software HEC-HMS para el hidrograma de entrada de creciente máxima probable por el método CSC.



Fuente. CONSULTORES INTEGRAL. Estudios y diseños del proyecto de regulación del río Tona Embalse de Bucaramanga. Memorando Técnico 03 – Hidrología, Clima y Sedimentos del embalse. Bucaramanga: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (AMB), 2012. P. 54.

2. TRÁNSITO DE CRECIENTE PARA EL EMBALSE

El tránsito de crecientes determina un hidrograma de salida a partir de un hidrograma conocido, a su vez permite hacer un análisis de lo que pueda estar sucediendo en la estructura de embalse al presentarse diferentes niveles de la creciente.

En la literatura existen varios métodos para estimar el tránsito de crecientes, los cuales se clasifican en dos grandes categorías, que corresponde al tránsito de sistemas agregados o tránsito hidrológico y el tránsito hidráulico o tránsito de sistemas distribuidos.

Los métodos hidrológicos se fundamentan en la ecuación de continuidad, por lo tanto son función del tiempo y las relaciones de volumen almacenado de agua – caudal de salida. Por su parte los métodos hidráulicos implementan las ecuaciones de continuidad y a su vez resuelve la ecuaciones de movimiento permitiendo modelar el comportamiento físico de la onda con mayor precisión (ecuaciones de Saint-Venant)¹⁵.

Para el desarrollo de la estimación del hidrograma de salida se implementó el tránsito agregado de creciente (sistemas hidrológicos) por los métodos de Runge Kutta de tercer orden y Laminación de la avenida. Cabe resaltar que existen otros métodos dentro del sistema hidrológico como tránsito de embalses nivelados (piscina nivelada), tránsito hidrológico en ríos (Muskingum) y modelo de embalse

¹⁵ CHOW, Ven Te, MAIDMENT, David R. y MAYS, Larry W. *Hidrología Aplicada*. Bogotá : McGraw-Hill, 1994.P.249-281.

lineal¹⁶. La selección se hizo apoyados en la posibilidad de lograr un desarrollo de los métodos, de manera que se permita obtener los resultados mediante la compilación de un algoritmo basado en el desarrollo de la ecuación de la continuidad (ecuación 4).

2.1. TRÁNSITO AGREGADO DE CRECIENTES

Este sistema hidrológico se fundamenta en la ecuación de la continuidad:

$$\frac{ds}{dt} = I(t) - Q(t) \quad (4)$$

Donde:

$ds(t)$: almacenamiento

$I(t)$: Caudal de entrada

$Q(t)$: Caudal de salida

Al aplicar este sistema tanto el método de Runge Kutta como el de laminación de la avenida se generaron a partir de la suposición que el embalse se encuentra en el nivel máximo de operación y se presenta la avenida máxima extraordinaria.

Los métodos se desarrollaron a través del lenguaje de programación C# creado por el danés Anders Hejlsberg para mejorar los lenguajes de C y C++. C# se conoce como un lenguaje de programación que utiliza códigos tratados íntegramente como objetos, con síntesis similar a JAVA y hace parte de una interfaz de programación de aplicaciones conocida como plataforma NET¹⁷. Gracias a esta característica se facilitó el desarrollo de los métodos en dicho lenguaje de programación.

¹⁶ CHOW, Ven Te, MAIDMENT, David R. y MAYS, Larry W. *Hidrología Aplicada*. Bogotá : McGraw-Hill, 1994.P.249-281.

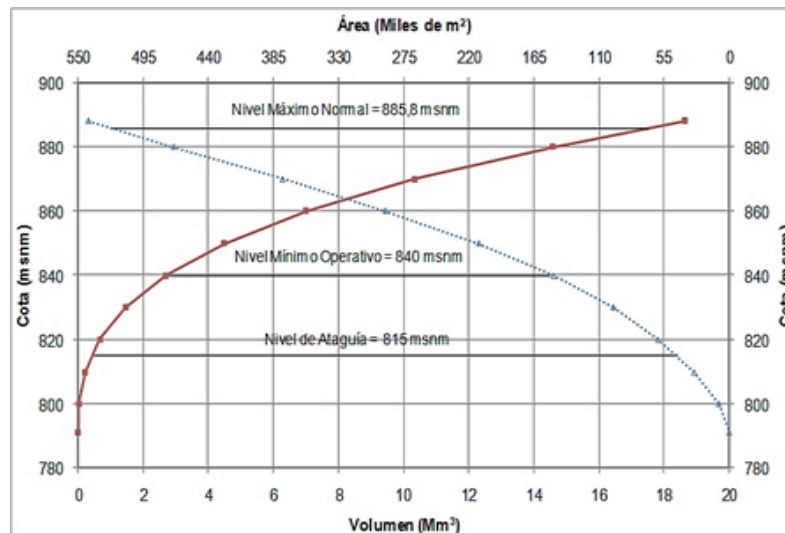
¹⁷ MICROSOFT, Developer Network. Introducción al Lenguaje C# y NET Framework. (En línea). Microsoft.NET, 2015. [Citado: 25 junio 2015] Disponible en Internet: <https://msdn.microsoft.com/es-es/library/z1zx9t92.aspx>

Adicionalmente se programaron los métodos en hojas de cálculo en Excel Para corroborar los resultados arrojados por el software C#.

Para estimar el tránsito de crecientes se tuvo en cuenta los parámetros del diseño hidráulico del vertedero, caudal de entrada para la creciete máxima probable (CMP) y las curvas características del embalse (**Figura 6.**) proporcionadas por el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (AMB), a partir de los informes entregados por los consultores Ponce de León e Integral.

Mediante las curvas características del embalse se determinó el área del espejo de agua en función de las cotas. Debido a recomendaciones de los consultores al tratarse de un vertedero sin compuertas se hace necesario que la cresta del azud se ubique en el nivel máximo normal del embalse, es decir, a la cota 885,80 y el nivel máximo extraordinario en la cota 891,6 msnm.

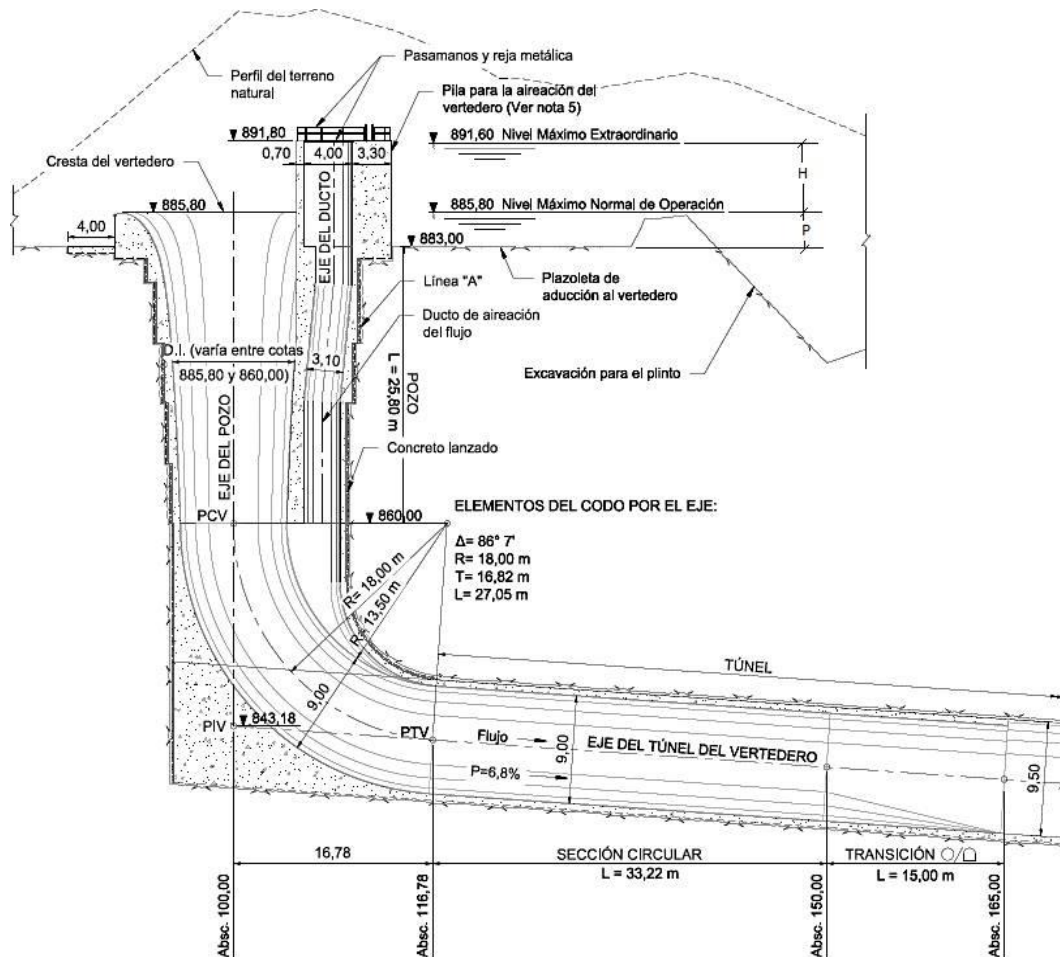
Figura 6. Curvas cota vs volumen y cota vs área embalse.



Fuente. Consultores Integral. *Estudios y diseño del proyecto de regulación del río Tona Embalse de Bucaramanga*. Memorando Técnico N°9. Bucaramanga: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga(AMB), 2012. P.24.

Otros parámetros fueron el Radio de la cresta y Coeficiente de descarga, que hacen referencia a características específicas del vertedero tipo Morning Glory conformado por el túnel vertical, el codo y el túnel horizontal. La geometría del vertedero se presenta en la siguiente figura:

Figura 7. Configuración de la geometría del vertedero tipo Morning Glory.



Fuente. ALMEYDA, Andrés. *Simulación a escala reducida del embalse de Bucaramanga*. Máster internacional en explotación y seguridad de presas y balsas. España: Comité Nacional Español de Grandes Presas (SPANCOLD), 2014. P.41.

El radio de la cresta y el Coeficiente de descarga se determinan teniendo en cuenta las siguientes medidas:

- Cabeza de diseño del vertedero (H): 5,80 m, resultado de la diferencia de altura entre la cresta del vertedero (cota 885,80) y el nivel máximo extraordinario del embalse (cota 891,60).
- Altura de la estructura vertedora (P): 2,80, resultado de la diferencia de altura entre la plazoleta de aducción (cota 883,00) y la cresta del vertedero (cota 885,80). La cual garantiza una optimización del coeficiente de descarga del vertedero.

La determinación del radio de cresta y del coeficiente de descarga se obtiene a partir de valores asumidos de radio de cresta y valores determinados de “P” y “H”, que arrojan el valor del coeficiente de descarga en función del radio.

Con la ecuación del vertedero se calcula la curva de descarga. Teniendo en cuenta que el control de descarga se hace por medio de la cresta del vertedero bajo condiciones de flujo libre a través de la sección del vertedero tipo Morning Glory se implementa la **Ecuación 5**.

$$Q = [Cd * 2\pi R * H]^{\frac{3}{2}} \quad (5)$$

Donde:

- Cd es el coeficiente de descarga del vertedero que depende de la relación entre el coeficiente de descarga para cresta circular, la cabeza de diseño, la altura de la estructura y el radio de la cresta; y se obtiene a partir de los nomogramas realizados por el Bureau of Reclamation del U.S. Department of the Interior

(Figura 8), que a su vez está en función de la relación H_e/R_s ; donde H_e es la altura de vertido y R_s el radio del vertedero.

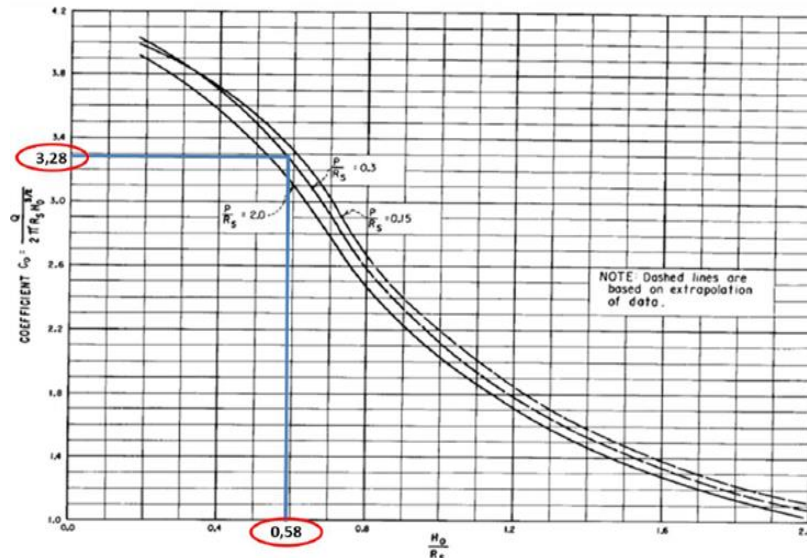
Para el caso de cargas sobre la cresta del vertedero hasta llenar una sección del pozo (garganta) el control de descarga se hace mediante la ecuación:

$$Q = (R/0,275)^2 * Ha^{1/2} \quad (6)$$

Donde:

R y H_a depende del punto en el pozo donde se presente el control.

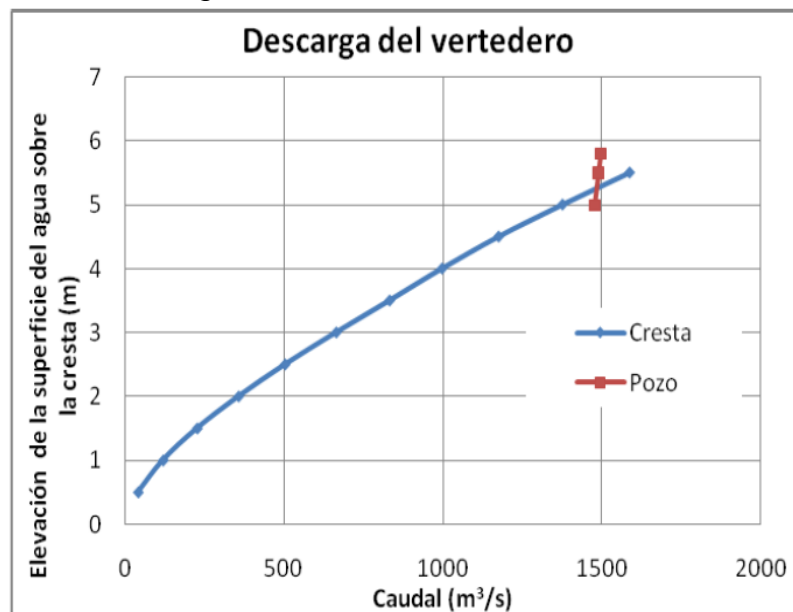
Figura 8. Nomogramas realizados por el Bureau of Reclamation del U.S. Department of the Interior.



Fuente. Consultores Integral. Estudios y diseño del proyecto de regulación del río Tona Embalse de Bucaramanga. Memorando Técnico N°9. Bucaramanga: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (AMB), 2012. P.19.

La curva de descarga se estimó mediante las ecuaciones (5) y (6), sin embargo el coeficiente de descarga está en función de la altura; es decir, que para cada lámina de agua se debe tomar un valor de los nomogramas realizados por el Bureau of Reclamation del U.S. Department of the Interior para dicho coeficiente. De acuerdo a esto se consideró que hacer ese tipo de aproximación grafica podría alterar la curva de descarga propuesta por los consultores, por este motivo se decidió determinar el cálculo de caudal de descarga a partir de la interpolación de los datos de la curva de descarga (**Figura 9.**), establecidos en el estudio previo del proyecto embalse de Bucaramanga. De esta manera se logró el caudal vertido como parámetro para el tránsito de crecientes.

Figura 9. Curva de descarga del vertedero.

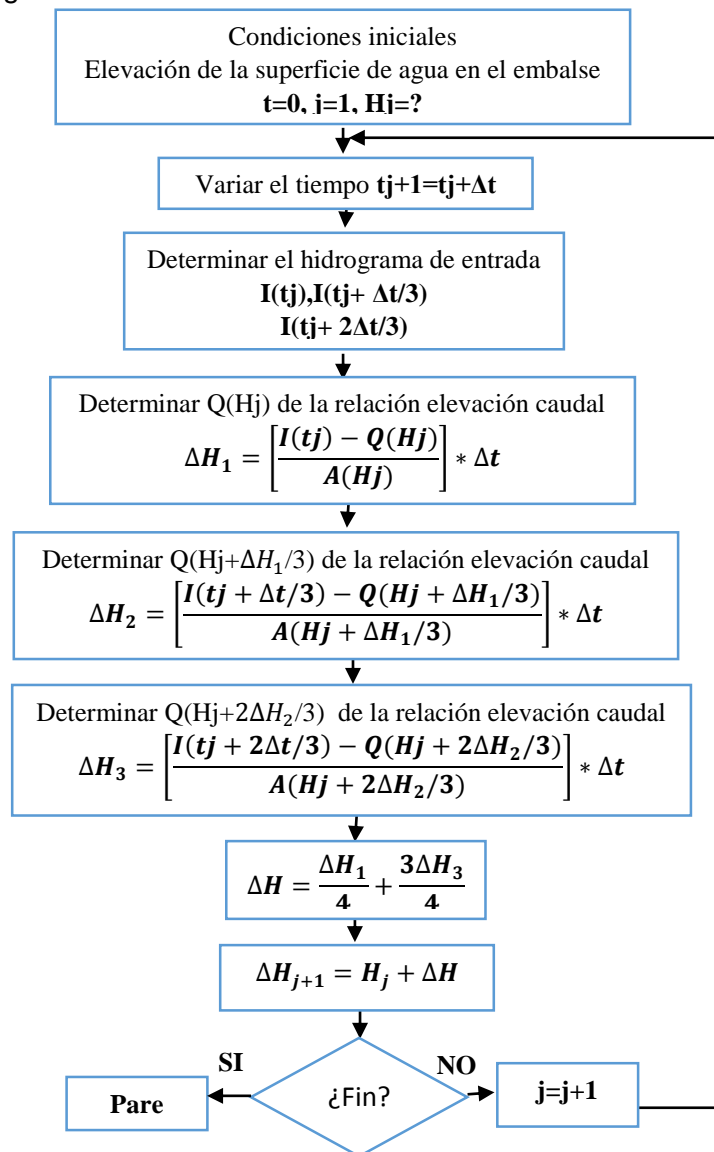


Fuente. Consultores Integral. Estudios y diseño del proyecto de regulación del río Tona Embalse de Bucaramanga. Memorando Técnico N°9. Bucaramanga : Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (AMB), 2012. P.25.

2.1.1. Método de Runge-Kutta de Tercer Orden. Está relacionado con la hidráulica del flujo a través del embalse y no requiere del cálculo de la función

espacial de almacenamiento-caudal de salida. Consiste en partir cada intervalo de tiempo en tres incrementos y calcula valores sucesivos de la elevación de la superficie del agua y el caudal de salida del embalse para cada incremento¹⁸. El método se puede apreciar en el diagrama de flujo observado en la Figura 10.

Figura 10. Diagrama de flujo para el tránsito en el embalse de detención utilizando la técnica de Runge-Kutta de tercer orden.



¹⁸ CHOW, Ven Te, MAIDMENT, David R. y MAYS, Larry W. *Hidrología Aplicada*. Bogotá : McGraw-Hill, 1994.P.259.

Fuente. CHOW, Ven Te, MAIDMENT, David R. y MAYS, Larry W. *Hidrología Aplicada*. Bogotá : McGraw-Hill, 1994.P.262.

2.1.1.1. Resultado del Hidrograma Transitado. De acuerdo a los parámetros anteriores se estimó el tránsito de crecientes mostrado en la figura 11. Una vez desarrollado el método de Runge Kutta se obtuvo que el máximo caudal transitado en el embalse es de $1431.26 \text{ m}^3/\text{s}$ y el volumen máximo almacenado sobre la cresta del vertedero es de 2.45 Hm^3 .

Figura 11. Tránsito de crecientes por Runge Kutta(tercer orden).

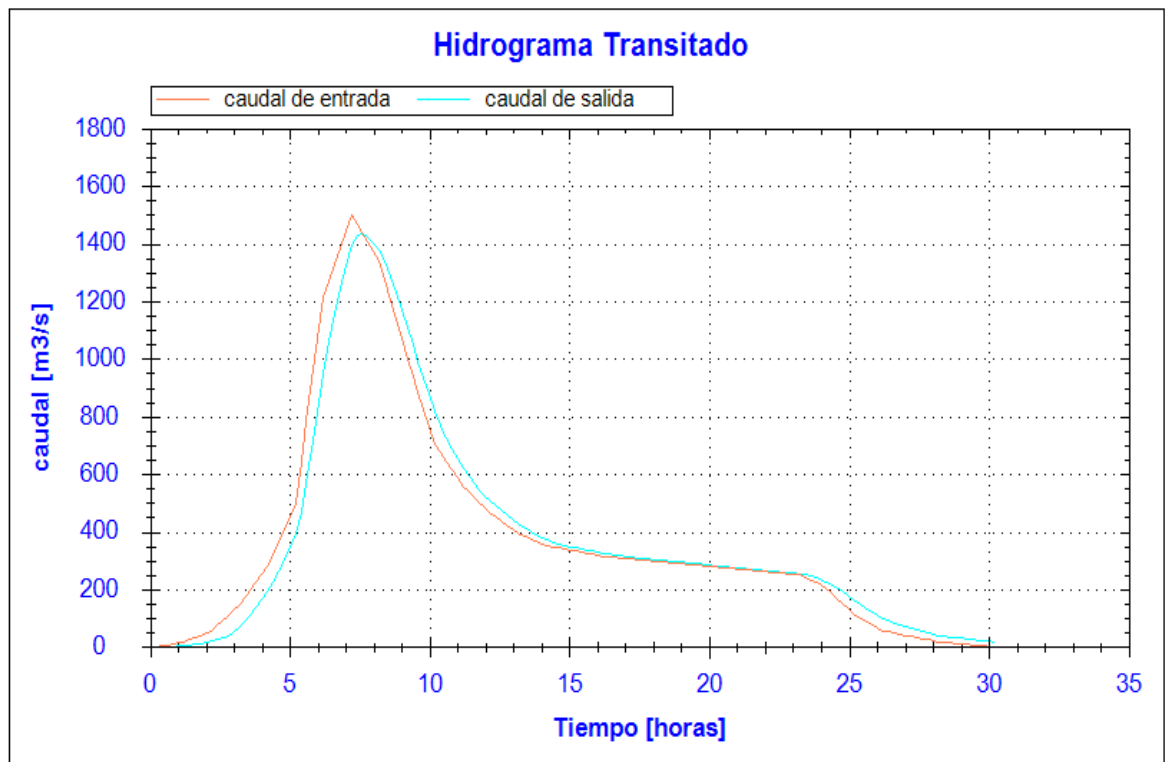
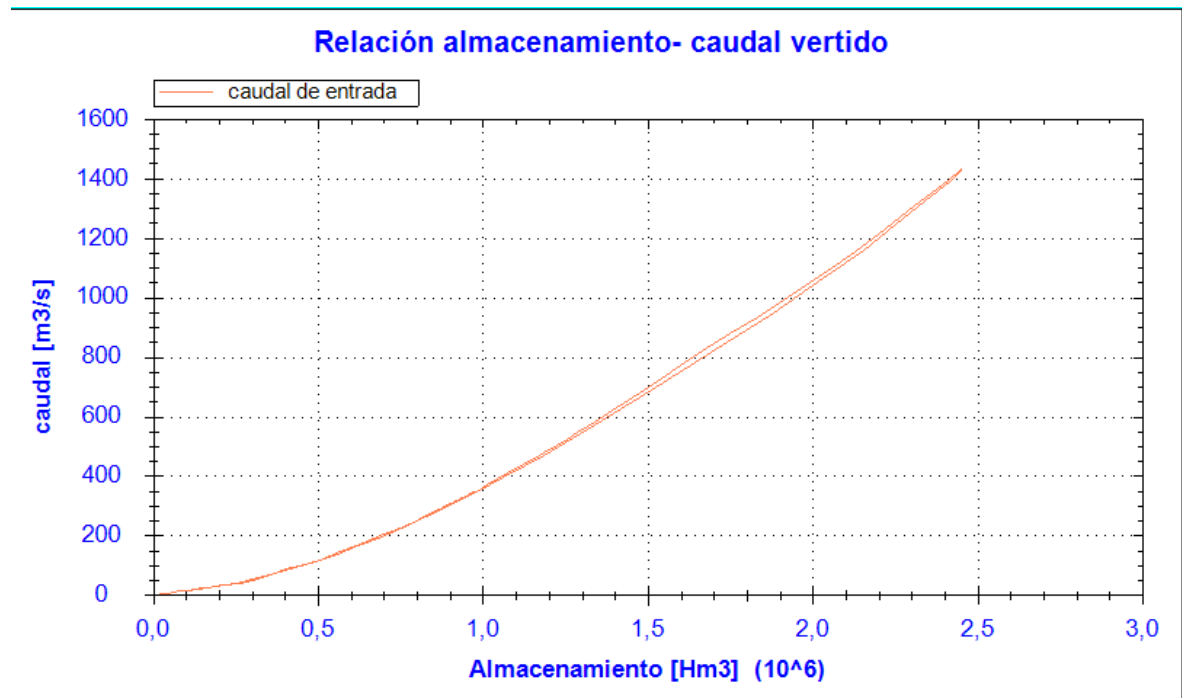


Figura 12. Relación almacenamiento caudal de salida.

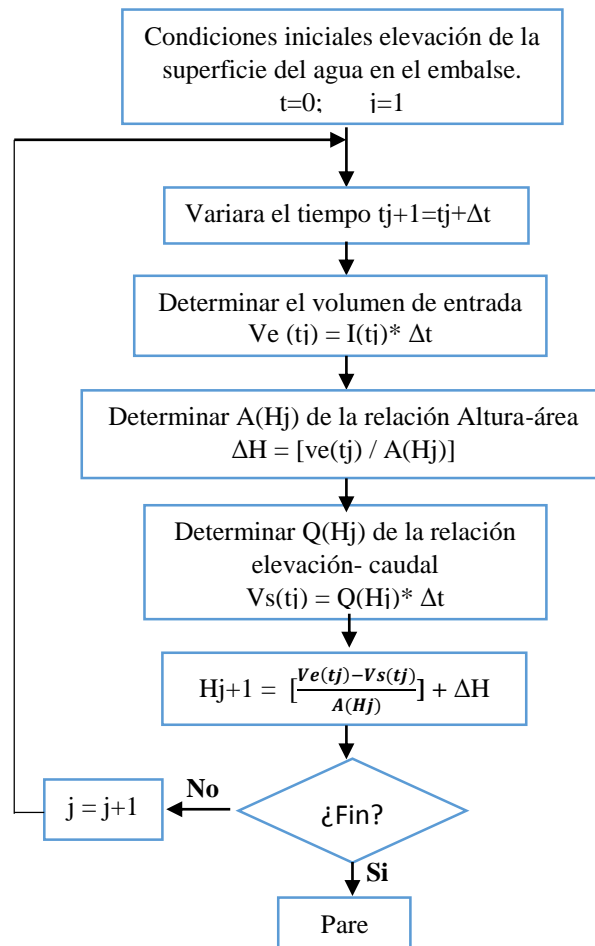


2.1.2. Laminación de la Avenida. La laminación es un fenómeno que se produce a través de una fuente hídrica, llámese ríos, lagunas, presas etc. Cuando se presenta una avenida se observa un aumento en el nivel de agua, lo cual crea un comportamiento de laminación de caudal y una disminución de los caudales máximos, es decir; el pico de descarga de una avenida disminuye a través del tránsito sobre una fuente hídrica. En el caso de un embalse el efecto de la laminación suele ser mayor dependiendo del área del espejo de agua y presentan un papel fundamental en la regulación de las avenidas¹⁹.

¹⁹ **LÓPEZ-MORENO, Juan I., et al.** Efecto de los embalses en el control de las avenidas en el Pirineo Central Español. Instituto Pirenaico de Ecología, CSIC, Campus de aula Dei, Apdo 202, Zaragoza. 2003. P.1-5. En: nlopez@ipe.csic.es

El método de laminación de la avenida se desarrolla con base en la ecuación (4) de continuidad del embalse. A continuación se presenta el diagrama de flujo para el método:

Figura 13. Diagrama de flujo para el método de Laminación



2.1.2.1. Resultado del Tránsito. Se procedió a estimar el tránsito de crecientes mostrado en la figura 14. Una vez efectuada la laminación se definió que el máximo caudal transitado en el embalse es de 1452.77 m³/s. y el volumen máximo almacenado es de 1.75 Hm³.

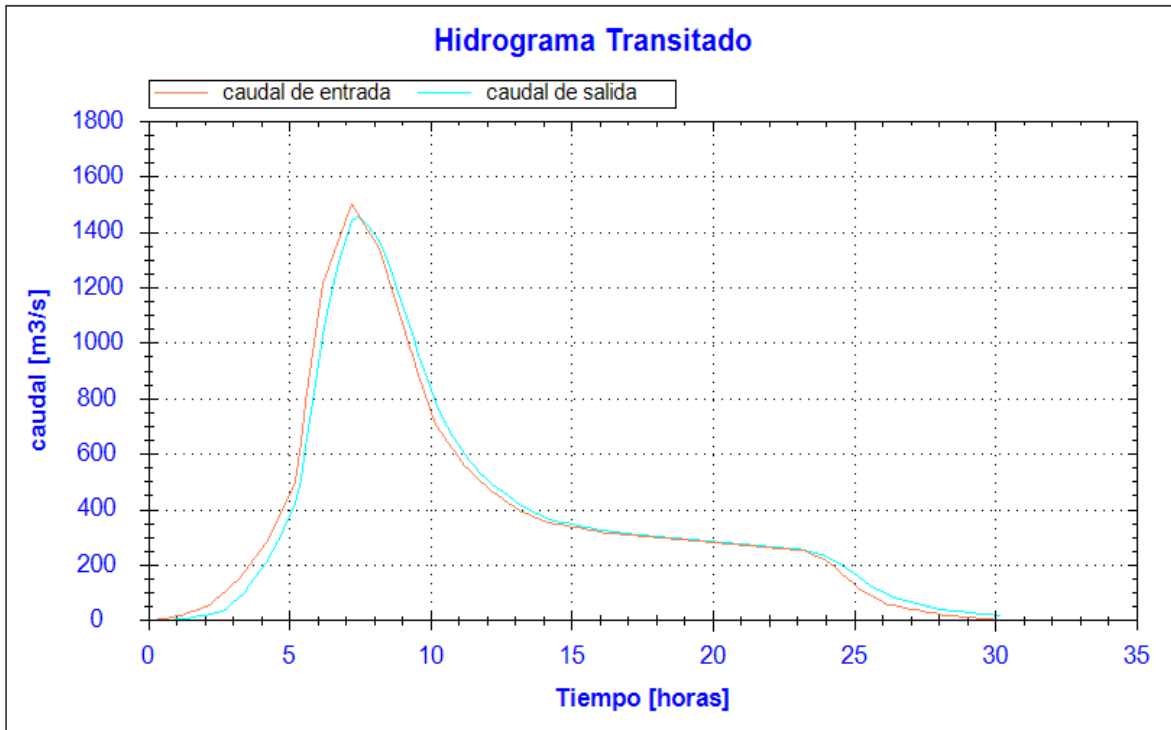
El modelo de tránsito de caudales inicialmente se estimó por el método de laminación para un hidrograma de entrada con un intervalo de tiempo de 1 hora, los resultados obtenidos fueron incoherentes. Se observó que el método no lograba modelar el comportamiento del embalse debido a que el volumen de agua que entraba al embalse incrementaba en una proporción superior al 50% comparado con el volumen de agua que entraba al embalse en la hora anterior; de manera que en cada iteración del método, se encontraban alturas sobre la cresta de vertido superiores a 5.8 m, para lo cual la ecuación de descarga del vertedero estima valores que sobrepasan el pico de hidrograma de entrada. Por lo tanto se disminuyó el intervalo de tiempo para ganar precisión, de manera que se redujo el intervalo de tiempo a 0.2 [horas], lo cual permitió que el método se desarrolle con mayor precisión y se lograra cuantificar el comportamiento del flujo al transitar el embalse.

La relación almacenamiento-caudal de ambos métodos figura 12 y figura 15, se considera una relación invariable; es decir, la creciente máxima probable al realizar el tránsito sobre el embalse no afecta las condiciones hidráulicas del flujo aguas arriba del embalse, se observa que el hidrograma de entrada descendiente se intersecta justo con el caudal pico del hidrograma de salida. Lo cual según Chow (1994) expresa una relación almacenamiento- caudal invariable.

“una relación invariable requiere un caudal de salida fijo del embalse para una superficie de agua dada, lo cual significa que las estructuras de salida del embalse deben ser controladas o incontroladas por compuertas que se queden fijas en una posición, si el caudal o la posición de las compuertas de control cambia, el caudal y la elevación de la superficie de la presa cambian, y el efecto se propaga hacia aguas arriba para crear una superficie

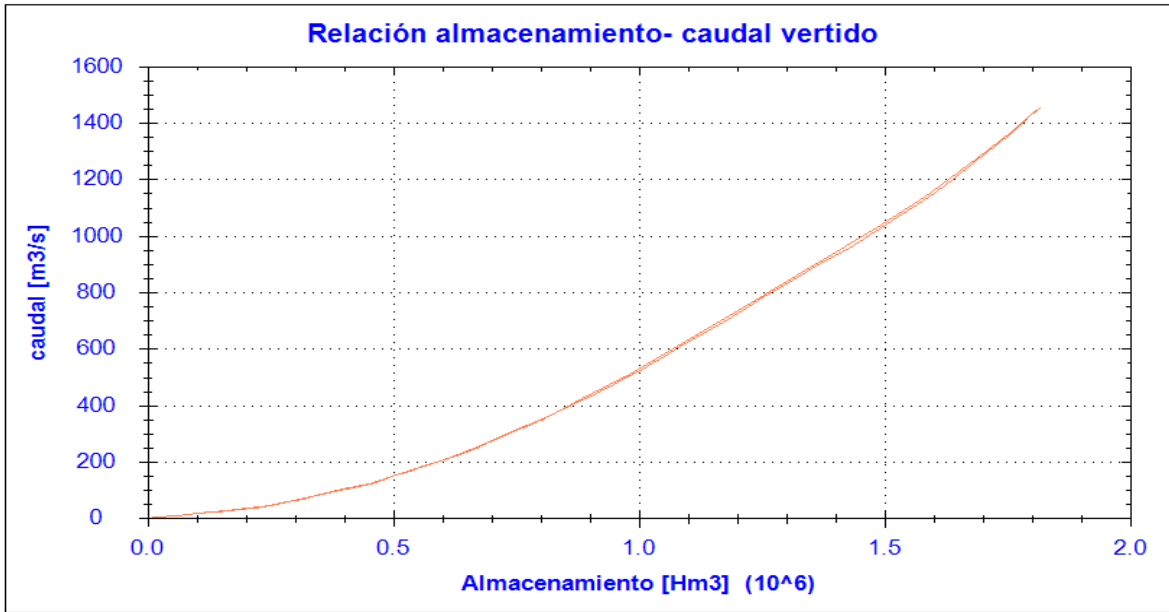
de agua temporalmente endiente hasta que se establece una nueva elevación de equilibrio de la superficie de agua a través del embalse.”²⁰

Figura 14. Tránsito de crecientes por laminación de la avenida



²⁰ CHOW, Ven Te, MAIDMENT, David R. y MAYS, Larry W. *Hidrología Aplicada*. Bogotá : McGraw-Hill, 1994.P.250-252.

Figura 15. Relación almacenamiento caudal de salida.



3. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS DOS MÉTODOS

En este punto se realizara un análisis comparativo teniendo en cuenta factores como variación del tiempo Δt , resultados del caudal pico de salida, las variables dependientes de cada sistema, el tipo de relación de almacenamiento-caudal y el porcentaje de volumen almacenado con respecto al volumen total que ingresa al embalse.

Se puede decir que los dos métodos dependen de la variación del tiempo Δt , es decir, a menor Δt mayor precisión. Sin embargo, para un Δt determinado el método de Runge Kutta de tercer orden divide el intervalo de tiempo en tres subintervalos para encontrar valores intermedios de caudales, por lo que se espera, que los resultados en el comportamiento del flujo través del embalse logren determinarse de forma más eficiente, no obstante se hace necesario comparar los resultados arrojados por los métodos en un modelo a escala reducida, de manera que permita establecer una relación en términos de precisión para los métodos desarrollados.

El caudal pico transitado para un $\Delta t = 0,2$ [horas] por el método de laminación del embalse fue de 1452.77 [m³/s] y por el método de Runge Kutta fue de 1431.26 [m³/s]. Presentando una diferencia menor al 5% con respecto al caudal pico de entrada al embalse. De tal forma que el diseño del vertedero requiere verter un caudal similar al pico del hidrograma de entrada o caudal de diseño para la creciente máxima probable de 1500m³/s.

El método de laminación y el método de Runge Kutta dependen del hidrograma de entrada, de la relación altura-área del espejo de agua y la relación altura-caudal vertido, este último depende del tipo de vertedero.

Ambos métodos presentan una relación de almacenamiento-caudal invariable lo cual permite que se cree la intersección del hidrograma descendiente de entrada con el caudal pico del hidrograma transitado o hidrograma de salida.

La tabla que se presenta a continuación muestra una comparación de los métodos con sus respectivos resultados.

Tabla 3. Comparación de métodos aplicados.

	Laminación	Runge-Kutta
Variables	Q(h), I(t), A(h)	I(t), Q(h), A(h)
Precisión	a menor Δt mayor precisión	a menor Δt mayor precisión
Caudal pico	1452.77 m ³ /s	1431.26 m ³ /s
S=f(Q)	invariable	invariable
%Volumen máximo almacenado	4.37	5.90

4. CONCLUSIONES

- El método de laminación cuantifica el comportamiento del flujo al recorrer el embalse de forma que los resultados obtenidos permiten tener una estimación del caudal de descarga en función de una estructura de vertido previamente calibrada. El método de Runge Kutta al igual que el método de laminación determina el comportamiento del embalse a partir de la curva de descarga del vertedero, pero a diferencia subdivide el intervalo de tiempo del hidrograma de entrada, logrando incrementar el número de datos por interpolación lineal, de tal forma se espera que los resultados presenten mayor precisión dentro del modelo de equilibrio del embalse cuando se comparen con un evento real.
- El caudal pico para el hidrograma transitado por el método de laminación del embalse es de 1452.77 m³/s, el método de Runge Kutta estimo un caudal pico de 1431.26 m³/s, los caudales máximos fueron aproximados al caudal pico del hidrograma de entrada para la creciente máxima probable de 1500 m³/s. Los resultados de los caudales pico calculados con el desarrollo de los métodos a través del lenguaje de programación C# difieren en 1.48% lo que representa 21.51 m³/s, por lo tanto se recomienda que el caudal pico del hidrograma transitado para el embalse de Bucaramanga sea un valor aproximado al promedio de los estimados igual a 1440 m³/s.
- El porcentaje de volumen máximo almacenado para ambos métodos es inferior al 6% comparada con el volumen total de agua que entra al embalse para la CMP. Esto nos conlleva a concluir que la capacidad de laminación del embalse es pequeña debido principalmente a las características morfológicas del mismo; lo cual, hace que el área del espejo de agua logre expandirse aproximadamente 5 hectáreas, desde la cota 885.8 (NAMO) hasta la cota 891,6 (NAME) que corresponde a cota del muro parapeto, por lo tanto el embalse no está diseñado

para almacenar el suficiente volumen de agua cuya laminación permita disminuir el pico del hidrograma vertido o hidrograma de salida.

- Se logró establecer que para la creciente máxima probable (CMP) el vertedero de exceso Morning Glory logra evacuar el 96 % del volumen de agua que ingresa al embalse permitiendo establecer un equilibrio hidráulico tal que no se presenten afectaciones aguas arriba del embalse.
- El tránsito de hidrograma permite una disminución de los caudales pico de salida con respecto a los caudales pico de entrada. El volumen de agua almacenado en el embalse en el momento en que se produce la avenida genera una atenuación; lo cual, se traduce como un retraso en el tiempo de recorrido de la avenida, esto permite aguas abajo generar un hidrograma de salida con una mayor duración, de manera que el caudal entregado al río presenta una mejor distribución que mejora las condiciones del flujo aguas abajo, sin embargo el embalse de Bucaramanga no está diseñado para que genere una laminación suficiente tal que logre disminuir considerablemente el pico de hidrograma de salida, por lo tanto las condiciones de flujo aguas abajo tendrán un comportamiento similar a las condiciones de flujo aguas arriba del embalse.

BIBLIOGRAFÍA

ALMEYDA, Andrés. Simulación a escala reducida del embalse de Bucaramanga. Máster internacional en explotación y seguridad de presas y balsas. España: Comité Nacional Español de Grandes Presas (SPANCOLD), 2014.

AYUSO, José Luis; PEÑA, Adolfo; MONTESINOS, M^a Pilar. Estimación del hidrograma unitario. Estudio comparativo de cuatro métodos lineales. Ingeniería del agua. Universidad de Córdoba. Argentina, 1994. Vol. 1, no 2.

CHOW, Ven Te, MAIDMENT, David R. y MAYS, Larry W. Hidrología Aplicada. Bogotá : McGraw-Hill, 1994.P.250-252.

CONSULTORES INTEGRAL . Estudios y diseños del proyecto de regulación del Río Tona Embalse de Bucaramanga. Memorando técnico 03-Hidrología,Clima y Sedimentos. Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (AMB). Bucaramanga. 2012.

CONSULTORES INTEGRAL. Estudios y diseño del proyecto de regulación del río Tona Embalse de Bucaramanga. Memorando Técnico N°9. Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (AMB). Bucaramanga. 2012.

INSLEY R., KOHLER M., and PAULUS J. Hidrología para Ingenieros. México: Ed. Mc Graw Hill, 1977.

KOOLHAAS, Michel. Embalses Agrícolas. Diseño y Construcción. Uruguay: ed. Hemisferio Sur, 2003.

KOOLHAAS, Michel. Tránsito de Crecientes. Curso de Posgrado Profesional Estructuras Hidráulicas para Riego. Uruguay, 2012. [Citado: 12 de mayo de 2015]. Disponible en internet <http://www.fagro.edu.uy/~topografia/docs/Transito%20de%20Crecientes.pdf>

LABAQUE. Propuesta para la Confección de Planes de Emergencia por Rotura de Presa en la Provincia de Córdoba. Aplicación al Dique de San Roque. [En línea]. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. Capítulo 4. 2008. [citado: 3 de Diciembre de 2014]. Disponible en internet: <http://www.efn.uncor.edu/posgrado/rrhh/asignaturaspdf/Tesis/Labaque/>

LÓPEZ-MORENO, Juan I., et al. Efecto de los embalses en el control de las avenidas en el Pirineo Central Español. Instituto Pirenaico de Ecología, CSIC, Campus de aula Dei, Apdo 202, Zaragoza. 2003. En: nlopez@ipe.csic.es

MEJIA, G.; VILLEGAS, F. (Agosto 20–24 de 1979 Bogota Colombia) Maximum precipitation deviations in Colombia. En: Proc. Third Conf. on Hydrometeorology, American Meteorological Society, Boston, MA, .pp 74-76.

MICROSOFT, Developer Network. Introducción al Lenguaje C# y NET Framework. (En línea). Microsoft.NET, 2015. [Citado: 25 de junio de 2015] Disponible en Internet: <https://msdn.microsoft.com/es-es/library/z1zx9t92.aspx>

MONSALVE, G. Hidrología en la ingeniería. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería, 1995.

SALAS, José y GAVILAN, Germán. Revisión de los Caudales de Diseño para la Represa de Bucaramanga. Informe 2. Bucaramanga : Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (AMB), 2011.

VIESSMAN, W. and LEWIS, G. Introduction to Hydrology. New York: Ed.: Harper Collins Publishers, 1996.

WMO. Manual on Estimation of Probable Maximum Precipitation (PMP). Ed. World Meteorological Organization. 1986. [citado: 28 mayo 2015] En: <http://www.wmo.int/pages/prog/hwrrp/publications/PMP/WMO%201045%20en.pdf>