

**DETERMINACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS CAUDALES DE EVENTO EXTREMO MEDIANTE
TORMENTAS ESTOCÁSTICAS EN LA CUENCA DE MISICUNI-COCHABAMBA, BOLIVIA****DETERMINATION AND ANALYSIS OF EXTREME EVENT FLOWS BY STOCHASTIC STORMS IN THE
MISICUNI BASIN - COCHABAMBA, BOLIVIA****Claude Le Noir, Andrés Cardoso***Universidad del Valle**Cochabamba-Bolivia*

lenoirclaude@gmail.com

(Recibido el 10 de marzo 2024, aceptado para publicación el 29 de abril 2024)

RESUMEN

El cálculo de los caudales máximos por medio de la generación estocástica de tormentas elípticas dentro de la cuenca Misicuni se realizó con los softwares especializados IT-LluviaNH y IT-Inundación del Banco Interamericano de Desarrollo desarrollados por la plataforma CAPRA, obteniendo las curvas PADF características y 300 escenarios de tormentas estocásticas evaluados en los modelos hidrológicos e hidrodinámicos resultando en hidrogramas a nivel de presa y de subcuencas para diferentes periodos de retorno. Se determinaron también caudales máximos por medio de metodologías convencionales relacionando las curvas IDF y tormentas de diseño. La comparación gráfica y numérica de los hidrogramas a la salida de la cuenca permitió verificar la variación entre las metodologías aplicadas y el impacto en el aliviadero de la presa a través del tránsito de avenidas sobre el embalse. Los caudales máximos estocásticos resultaron inferiores a los determinados por las metodologías convencionales. Esto se debe a la no uniformidad de las intensidades de precipitación sobre el área de la cuenca. Sin embargo, contemplando la simultaneidad de escenarios de evento extremo independientes en cada subcuenca (aplicando porcentajes muy bajos a la probabilidad de excedencia) se tienen caudales máximos similares entre las metodologías. Asimismo, se calculó la proyección de los caudales con periodo de retorno de 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años a periodos de retorno de 1000 y 10000 años para ambas metodologías. El impacto de los caudales estocásticos máximos laminados no representa un riesgo para el aliviadero de la presa al ser menores al caudal de diseño.

Palabras Clave: PADF, Estocástico, Determinístico, Lluvia Elíptica.**ABSTRACT**

The calculation of peak flows by means of stochastic generation of elliptical storms within the Misicuni basin was performed with the specialized software IT-LluviaNH and IT-Flood of the Inter-American Development Bank developed by the CAPRA platform, obtaining the characteristic PADF curves and 300 stochastic storm scenarios evaluated in the hydrological and hydrodynamic models resulting in hydrographs at the dam and sub-basin levels for different return periods. Peak flows were also determined by conventional methodologies relating to IDF curves and design storms. The graphical and numerical comparison of the hydrographs at the basin outlet made it possible to verify the variation between the methodologies applied and the impact on the dam spillway through the transit of floods over the reservoir. The stochastic peak flows were lower than those determined by conventional methodologies. This is due to the non-uniformity of precipitation intensities over the basin area. However, considering the simultaneity of independent extreme event scenarios in each sub-basin (applying very low percentages to the probability of exceedance), the maximum flows are similar between methodologies. Likewise, the projection of flows with return periods of 2, 5, 10, 20, 50 and 100 years to return periods of 1000 and 10000 years was calculated for both methodologies. The impact of the maximum stochastic flows does not represent a risk for the dam spillway since they are lower than the design flow.

Keywords: PADF, Stochastic, Deterministic, Elliptical Rainfall.**1. INTRODUCCIÓN**

Los estudios hidrológicos de eventos extremos representan gran importancia para el diseño, operación y control de embalses [3]. Estos estudios pueden resultar simples para cuencas pequeñas, ya que la modelación “convencional-agregado-determinístico”, posibilita analizar un comportamiento hidrológico homogéneo. Por el contrario, el análisis para cuencas de mayor área resulta más complejo ([12]; [6]), debido a que las precipitaciones ocurren por sectores y el comportamiento hidrológico resulta variable. Por lo que, para cuencas grandes se recomienda desarrollar estudios de carácter “semi distribuido o distribuido” y “determinístico o estocástico”.

No obstante, es prudente mencionar que toda cuenca presenta un comportamiento heterogéneo a consecuencia del relieve, la capacidad de drenaje, perfil altitudinal, orientación, climas, tipos de suelos, uso de suelo, entre otras. Por lo

que diferenciarlas representa cierta dificultad. Ante ello, Chow [18], distingue a una cuenca pequeña por la sensibilidad a las lluvias de alta intensidad y de corta duración, en la cual predominan las características físicas del suelo respecto a las del cauce y su tamaño puede variar de 4 hasta 130 km². Por su parte, Campos Aranda [6], por medio de la clasificación de I-Pai Wu y R. Springall, indica que una cuenca pequeña tiene una superficie de 25 a 250 km². Mientras que, Sandoval Erazo y E. P. Aguilera Ortiz [19], determinan un área máxima de 45 km² para una cuenca homogénea pequeña en terreno montañoso. No obstante, para un relieve plano en área tropical, el World Meteorological Organization [21] indica que una cuenca homogénea pequeña puede tener un área de hasta 600 km².

En Bolivia, tres cuencas grandes ya fueron estudiadas de forma positiva con la metodología BID-CAPRA. Río Grande (102.062 km²) [9], Río Rocha (3655 km²) [9] y Río Itona (2189 km²) [5]. Ahora la metodología BID-CAPRA será aplicado a la Cuenca del río Misicuni correspondiente al Proyecto Múltiple Misicuni (PMM), de la ciudad de Cochabamba-Bolivia, (344 km²) y comparado los resultados con los resultados de un cálculo convencional conforme el concepto de una cuenca pequeña.

Este estudio justifica su importancia debido a la magnitud de la demanda hídrica (agua potable y de riego) y energética existente en los municipios del valle central de Cochabamba [13]. Por lo que, compete analizar los estudios convencionales desarrollados para el diseño del PMM. En este sentido, la presente investigación tiene por objetivo calcular los hidrogramas de evento extremo de la cuenca Misicuni mediante la generación de tormentas estocásticas elípticas, comparar con resultados de estudios convencionales, y en caso de grandes diferencias, elaborar alternativas a las políticas de operación del embalse en ocurrencia de crecidas con niveles altos en el embalse.

2. METODOLOGÍA

2.1. Características del Área de Estudio

La presa del embalse Misicuni se sitúa al noreste de la ciudad de Cochabamba (Figura 1) en las coordenadas 17°5'29.98" Sur y 66°19'48. 65" Oeste, la altura de la represa es de 120 m. El nivel de rebalse del vertedero, que protege la represa, está en 3774 m.s.n.m. El volumen del embalse creado en esta cota es de 180 millones de m³.

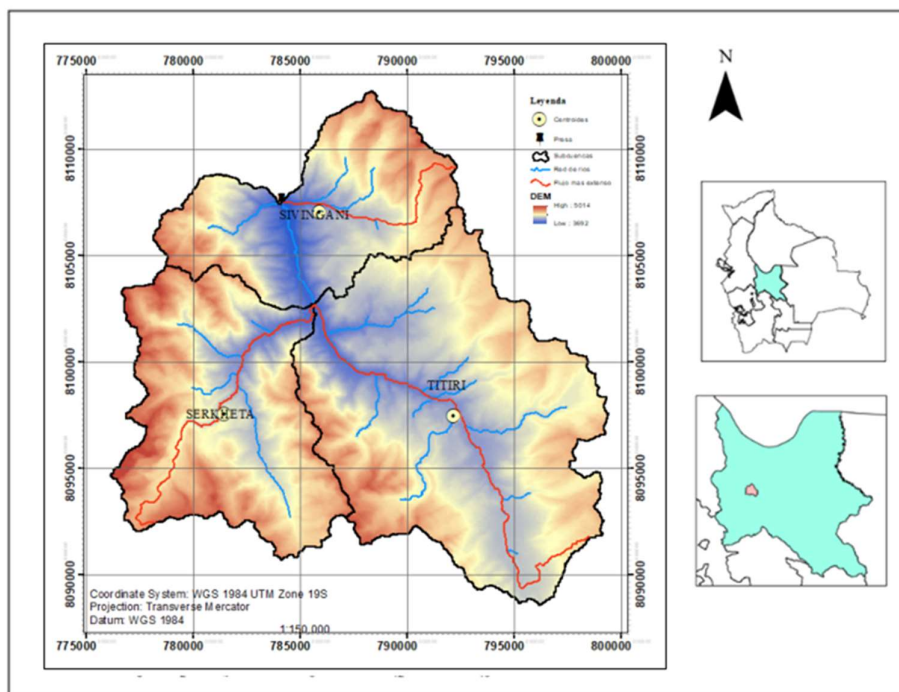


Figura 1: Ubicación geográfica-Cuenca Misicuni.

Fuente: Elaboración propia.

La cuenca resulta en la composición de 3 subcuencas (Figura 1) cuyas características se presentan en la Tabla 1, Tabla 2 y Tabla 3. Su totalidad representa un área de 344.36 km², un perímetro de 130.26 km, una pendiente media de 23.5%, una altura media de 4300 m.s.n.m. (nivel más alto = 5014 m.s.n.m. – nivel más bajo = 3692 m.s.n.m.) y, un tiempo de concentración de 4 horas. El área es característico de la zona andina, por lo que se destaca las altas cumbres cordilleranas,

registro de bajas temperaturas (entre el día y la noche), nevadas en ciertas épocas del año, vientos y poca cobertura vegetal.

TABLA 1 – SUPERFICIES Y PERÍMETROS POR SUBCUENCAS

<u>Subcuenca</u>	<u>Área</u> <i>Km²</i>	<u>Perímetro</u> <i>Km</i>
Sivingani	77.29	61.02
Titiri	167.44	86.70
Serkheta	99.63	69.54

Fuente: Elaboración propia.

TABLA 2 – CLASIFICACIÓN RELIEVE MEDIANTE PENDIENTE PROMEDIO POR SUBCUENCAS

<u>Subcuenca</u>	<u>P</u> (%)	<u>Relieve</u> (-)
Sivingani	32.57	Fuertemente accidentado
Titiri	24.55	Fuertemente accidentado
Serkheta	37.85	Muy fuertemente accidentado

Fuente: Elaboración propia.

TABLA 3 – TIEMPO DE CONCENTRACIÓN POR SUBCUENCA

<u>Subcuenca</u>	<u>T_c</u>	
	Horas	Minutos
Sivingani	1.91	114.80
Titiri	3.96	237.68
Serkheta	2.76	165.34

Fuente: Elaboración propia.

Con respecto al modelo de infiltración se aplicó el modelo del Número de la Curva (CN), que fue desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos (SCS) de Estados Unidos [20], para la estimación del escurrimiento en estudios de determinación de caudales máximos, sobre los mapas [15 y 16] y, mediante álgebra de mapas en la plataforma SIG ArcGis 10.5, se obtuvo el CN-III representativo para la totalidad de la cuenca Misicuni resultando en un CN-III igual a 78.20. De igual manera se determinó los números CN-III para las 3 principales subcuencas como son Titiri, Serkheta y Sivingani. Obteniendo valores similares para las subcuencas Sivingani y Titiri con valores de 76.51 y 76.10, para la subcuenca Serkheta se obtuvo un CN-III mayor resultando en 82.65.

2.2. Precipitaciones en el Área del Estudio

La ubicación de las estaciones del Proyecto Misicuni se presenta en la Figura 2, y su información general en la Tabla 4. La base de datos original con los registros de precipitaciones diarias de las estaciones fue proporcionada por parte de la empresa Misicuni. Los datos fueron procesados en planillas Excel para una oportuna identificación de la disponibilidad de datos. La fecha inicial de operación de las primeras estaciones de Misicuni es desde julio de 1967. Según el procesamiento de las series originales de datos, el registro de cada serie es discontinuo (Tabla 5).

TABLA 4 – INFORMACIÓN GENERAL DE LAS ESTACIONES

<u>Estación</u>	<u>Coordenadas UTM</u>		<u>Elevación</u> (m.s.n.m)	<u>Tipo de datos</u>	<u>Periodo de registro</u>
	<u>Este</u>	<u>Sud</u>			
Aguadas	789243.69	8101867.21	3956	Precipitación	2006-2020
Bocatoma	784963.96	8104443.15	3756	Precipitación	2000-2016
C-Esquinas	793422.77	8096505.21	3986	Precipitación	1967-2020
Sivingani	784252.28	8108130.99	3780	Precipitación	1967-2021
Sunjani	781616.68	8100242.29	3964	Precipitación	1967-2022
Templo	780229.67	8098596.78	4278	Precipitación	1967-2023

Fuente: Elaboración propia.

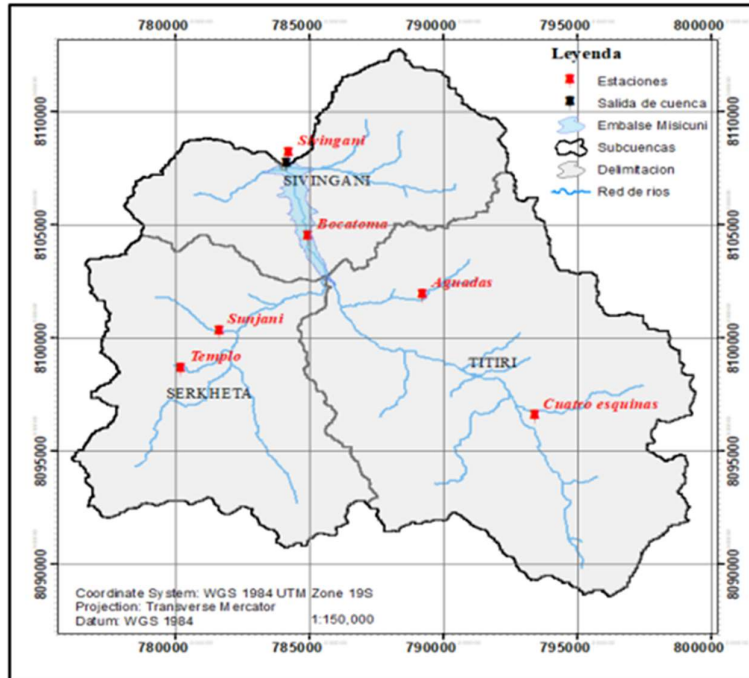


Figura 2: Ubicación de las estaciones pluviométricas.
Fuente: Elaboración propia.

TABLA 5 – DISPONIBILIDAD DE DATOS DE PRECIPITACIÓN DIARIA

[illegible]

Fuente: Elaboración propia.

Previamente al relleno de datos, se realizó el análisis de datos dudosos en relación a las precipitaciones máxima diaria anual para la identificación de Outliers para su depuración, se encontró dos Outliers en las estaciones Templo y Bocatoma, los cuales fueron también la causa de dos Outliers en las series de precipitaciones mensual de las mismas estaciones. Estos Outliers fueron depurados según criterio e iteraciones de relleno realizadas con la finalidad de lograr las mejores series posibles.

Para el proceso de relleno de datos de precipitación diaria en el periodo de 1967-2020, se utilizó el software HEC-4, el cual aplica una metodología de regresión lineal múltiple con un componente autorregresivo entre el mes actual y el mes anterior, obteniendo series rellenas a nivel mensual. Posteriormente, se desagregó por medio de la estación más cercana con datos no rellenos de manera manual las series a un nivel diario.

Los porcentajes de relleno de datos de la mayoría de las estaciones son catalogados entre altos (Templo 28 %, Cuatro Esquinas 34 % y Sunjani 38%) a muy altos (Aguadas 75% y Bocatoma 78%), siendo Sivingani 11 % la única estación de registro normal. Bajo este análisis y debido a su retiro desde enero del 2017, por su ubicación dentro del embalse y por el inicio de operaciones del PMM la estación Bocatoma fue descartada, El porcentaje de relleno de datos promedio sobre las 5 estaciones restantes (Sivingani, Templo, Cuatro Esquinas, Sunjani y Aguadas) es de 40 %. Este indicador no es lo ideal, sin embargo, es lo mejor posible en el momento.

Para el análisis de la homogeneidad de las series rellenadas con periodos considerables con falta de datos, se aplicaron dos metodologías: análisis de las curvas doble masa a nivel de precipitaciones mensuales y un análisis de Outliers a nivel de precipitaciones máximas diarias anuales en las series rellenadas. Para el análisis de curvas doble masa, se tomó como base la estación Sivingani, por contar con el mayor periodo de registros respecto a las demás estaciones. Esta

estación se relaciona con las cuatro otras estaciones obteniendo un comportamiento gráfico casi perfectamente lineal con coeficientes de determinación R^2 que varían de 0.9973 a 0.999, indicando que para precipitaciones mensuales entre las estaciones existe consistencia.

De igual manera, se realizó el análisis de datos dudosos a nivel de las precipitaciones máximas diarias en el cual no se identificó ningún valor atípico sobre lo permitido [1] y [2].

2.3. Estudio Estocástico

La determinación de los hidrogramas estocásticos por periodo de retorno en el presente estudio se ha llevado a cabo haciendo uso de las plataformas IT-LluviaNH, IT-Inundación, HEC-HMS y HEC-RAS.

IT-LluviaNH e IT-Inundación forman parte del CAPRA (Central America Probabilistic Risk Assessment = Evaluación Probabilística de Riesgos en Centro América). La plataforma CAPRA es una iniciativa financiada por el BID (Banco Interamericano de Desarrollo), que tiene como objetivo fortalecer la capacidad institucional para evaluar, comprender y comunicar el riesgo de desastres con terremotos, deslizamientos, huracanes, sequías, inundaciones, ... con el objetivo final de integrar la información sobre el riesgo de desastres en las políticas y programas de desarrollo. La plataforma CAPRA está desarrollada por la Universidad de los Andes de Colombia.

La plataforma IT-LluviaNH permite leer los datos de las estaciones pluviométricas, los datos SIG del proyecto, los parámetros que definen mínimos eventos extremos, los periodos de retorno que se quiere considerar y los parámetros para análisis estocástico. La plataforma calcula las curvas PADF (Precipitación – Área – Duración – Frecuencia) para una duración de un día y para los periodos de retorno considerados, Figura 3.

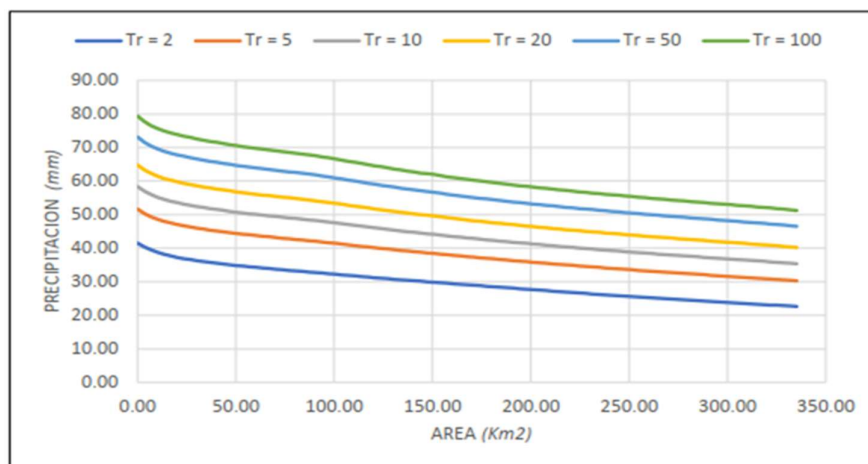


Figura 3: Curvas PADF-Cuenca Misicuni.

Fuente: Elaboración propia.

Luego, IT-LluviaNH con las curvas generadas y la grilla de distribución espacial definida, ejecuta el proceso de generación de tormentas estocásticas elípticas. Los centros de las tormentas elípticas se eligen dentro de los polígonos de eventos de precipitación máxima determinados dentro del análisis para las curvas PADF. En el estudio presente se generaron por periodo de retorno 50 escenarios, cada escenario producto de 100 simulaciones. Finalizando el procesamiento, el software IT-LluviaNH genera el archivo de las tormentas de amenazas con formato de salida (.AME). La visualización e interpretación es posible con el SIG desarrollado por CAPRA Figura 4.

La plataforma IT-Inundación mediante modelo hidrológico HEC-HMS versión 4 determina para cada tormenta de amenaza calculada en IT-Lluvia el hidrograma correspondiente a la salida de la cuenca y procesa este hidrograma mediante un modelo hidrodinámico HEC-RAS, calculando la curva de remanso y analizando eventuales riesgos de inundación. El modelo HEC-HMS considera las 3 subcuencas principales Figura 5. Los parámetros hidrológicos son exactamente los mismos en tanto a las metodologías de pérdidas por infiltración en el suelo y transformación de lluvia a caudal tomadas en cuenta en la metodología convencional descritas en la sección 2.4 y la precipitación es representada en grilla de resolución de 500x500 metros Figura 5.

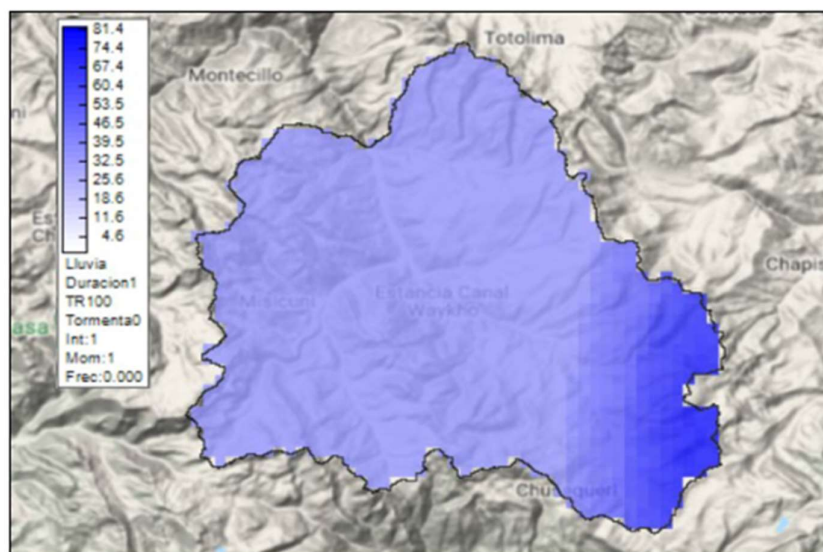


Figura 4: CAPRAGIS – escenario #1 para un periodo de retorno de 100 años.
Fuente: Elaboración propia.

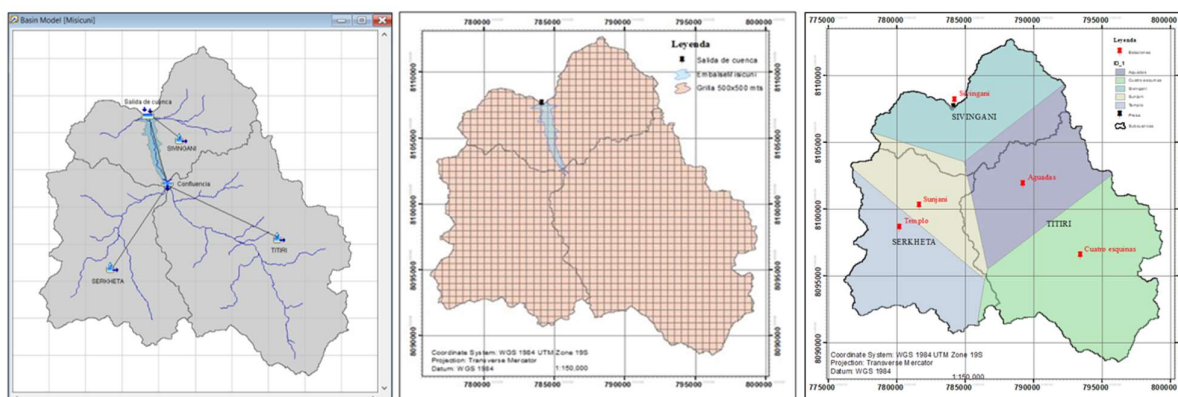


Figura 5: Esquema modelo hidrológico en HEC-HMS ver 4 con grilla de precipitación y con polígonos de Thiessen.
Fuente: Elaboración propia.

En el presente estudio al recaer la importancia en la generación de eventos extremos para la Cuenca de Misisuni por la metodología estocástica y su comparación con estudios convencionales, se utilizó un modelo básico en la salida de la Cuenca simulando un canal georreferenciado. Posterior al trabajo de la plataforma IT-Inundación, el análisis de los archivos *.DSS generados en HEC-HMS y HEC-RAS permite bajar los 50 hidrogramas estocásticos para cada uno de los diferentes periodos de retorno, ver inciso 3.2.

Para información más detallada sobre el método estocástico, ver [1] y [2].

2.4. Método Convencional

El estudio convencional se basa en el estudio de las máximas precipitaciones diarias anual que se obtienen del análisis de las series de precipitación diaria anual que corresponden a las estaciones pluviométricas de la cuenca. Luego por estación se ordena de mayor a menor valor la serie de máxima precipitación diaria anual. Sobre las series ordenadas se determina cual es la función de distribución (Gumbel, Normal, Pearson, Log Normal, ...) que mejor se ajusta. Después por estación mediante la función de distribución que mejor se ajusta se calcula la máxima precipitación diaria anual por periodos de retorno. A continuación, se determinan por estación las curvas PDF e IDF por el método de los coeficientes de desagregación en base a la estación NAABOL (ex – AASANA) Aeropuerto Cochabamba y por el método sencillo de Dick y Peschke. Posteriormente, mediante el método de los bloques alternos se calculan los hidrogramas de las tormentas de diseño, los cuales se aplican sobre un modelo HEC-HMS basado en método de los polígonos de Thiessen, Figura 5, obteniendo dos series de hidrogramas de evento extremo por periodo de retorno, ver inciso 3.1, [1] y [2].

3. RESULTADOS

3.1. Método Convencional

Por medio de las dos metodologías convencionales, se obtuvieron los hidrogramas para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años (Figura 6). El hidrograma resultante de la metodología por coeficientes de desagregación (Coe) presenta caudales inferiores al hidrograma resultante por el criterio de Dick y Peschke (D y P), en la Tabla 6 se presentan los caudales máximos por periodo de retorno. La diferencia entre las dos metodologías convencionales es de 8 a 13%.

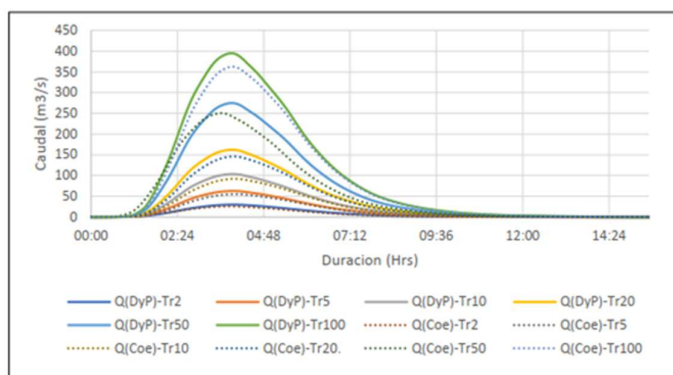


Figura 6: Comparación gráfica de hidrogramas a la salida de la cuenca de Misicuni por metodologías convencionales.

Fuente: Elaboración Propia.

TABLA 6 – COMPARACIÓN NUMÉRICA DE HIDROGRAMAS A LA SALIDA DE LA CUENCA DE MISICUNI POR METODOLOGÍAS CONVENCIONALES

Metodología	Caudales máximos por periodo de retorno (m³/s)					
	Tr-2	Tr-5	Tr-10	Tr-20	Tr-50	Tr-100
Dick y Peschke	29.7	62.7	103.3	161.9	274.3	394.3
Coeficientes	25.7	55.2	92.1	146.0	250.3	362.0
Variación	4.0	7.5	11.2	15.9	24.0	32.3
(DyP - Coef.)	13%	12%	11%	10%	9%	8%

Fuente: Elaboración propia.

3.2. Comparación Hidrogramas Métodos Convencionales y Estocásticos

Los hidrogramas, según las limitaciones de los softwares IT-Lluvia e IT-Inundación, se determinaron 50 escenarios para cada periodo de retorno de 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años. En la Figura 7a, 7b y Figura 7c se presenta la comparación de hidrogramas entre las metodologías convencionales y los 50 escenarios correspondientes a la metodología estocástica para el periodo de retorno de 100 años para las 3 subcuencas. En la Figura 7d se tiene el mismo análisis para la cuenca Misicuni (sitio actual de la presa del embalse de Misicuni). A cada serie de 50 caudales máximos de 50 escenarios estocásticos se ha ajustado una distribución Gumbel y determinado los máximos caudales estocásticos con probabilidades de 50, 10, 1 y 0.1 % de excedencia. Estos caudales están anotados en las 4 figuras. En la Tabla 7 se tiene los valores numéricos de estos 16 caudales estocásticos y de los 8 caudales determinísticos de los dos métodos convencionales.

Se observa en los 4 paneles y en la tabla que para las 3 subcuencas y para la cuenca en su totalidad que $Q_{\max T=100 \text{ años}}^{\text{excedido con } 50\%}$ y $Q_{\max T=100 \text{ años}}^{\text{excedido con } 10\%}$ están siempre inferior al máximo caudal simulado con los 50 escenarios $T=100$ años. $Q_{\max T=100 \text{ años}}^{\text{excedido con } 1\%}$ siempre está superior al máximo caudal simulado con los 50 escenarios para $T=100$ años. Lo cual es correcto, en base a la aplicación de la función de distribución de Gumbel a series de 50 valores.

Los caudales máximos determinísticos de los dos métodos convencionales para las subcuencas Sivingani (**Panel c**) y Serkheta (**Panel b**) son superiores a $Q_{\max T=100 \text{ años}}^{\text{excedido con } 10\%}$ e inferior o igual a $Q_{\max T=100 \text{ años}}^{\text{excedido con } 1\%}$. Para la subcuenca Titiri (**Panel a**) y la cuenca total (**Panel d**), son superiores a $Q_{\max T=100 \text{ años}}^{\text{excedido con } 10\%}$ e igual o superior a $Q_{\max T=100 \text{ años}}^{\text{excedido con } 0.1\%}$.

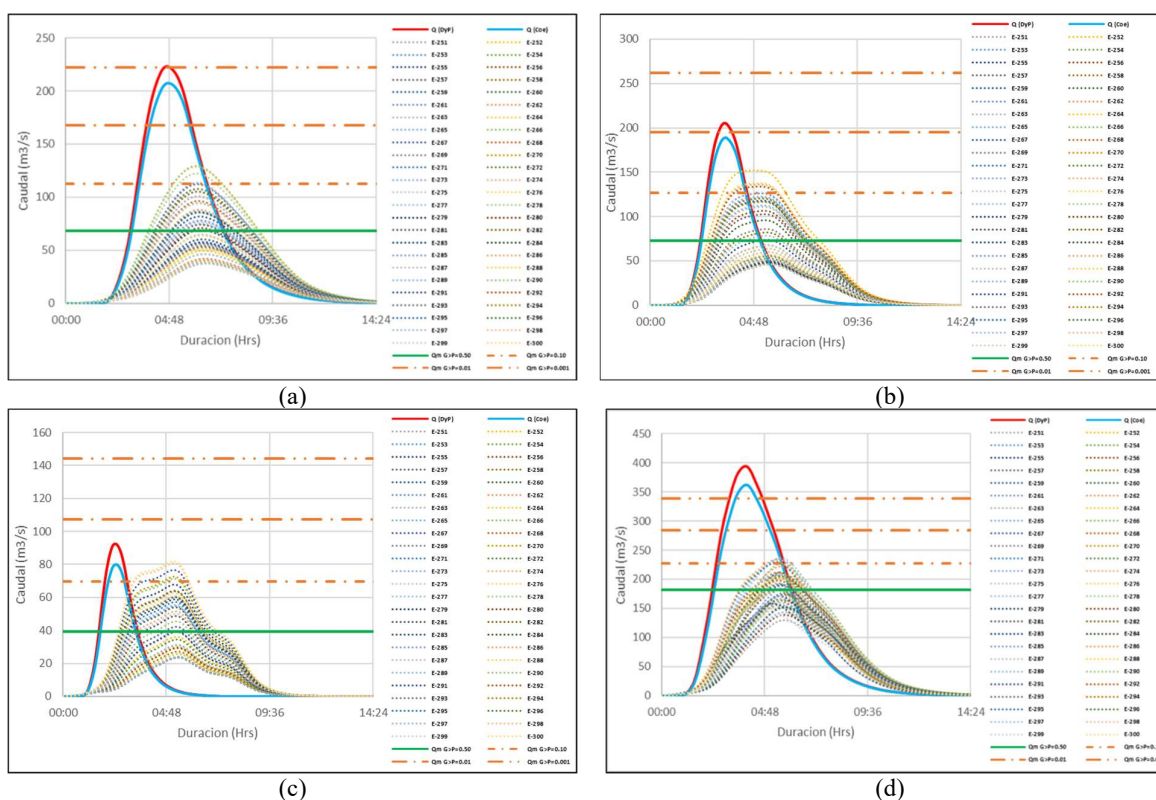


Figura 7: Comparación gráfica de hidrogramas para el periodo de retorno de 100 años (métodos convencional y estocástico) para a) Subcuenca Titiri, b) Subcuenca Serkheta, c) Subcuenca Sivingani y d) Cuenca Misicuni.

Fuente: Elaboración propia.

TABLA 7 – COMPARACIÓN NUMÉRICA DE CAUDALES MÁXIMOS POR SUBCUENCAS Y CUENCA TOTAL PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 100 AÑOS (MÉTODOS CONVENCIONAL Y ESTOCÁSTICO)

Caudal Máximo (m³/s)	Sivingani	Serkheta	Titiri	Misicuni
$Q_{\max}$ excedido con $P=50\%$	40.0	70.0	70.0	180.0
$Q_{\max}$ excedido con $P=10\%$	69.6	127.0	112.8	227.6
$Q_{\max}$ excedido con $P=1\%$	107.3	195.0	168.0	283.6
$Q_{\max}$ excedido con $P=0.1\%$	144.3	261.7	222.2	338.9
$Q_{\max}$ conv. (Dick y Peshke)	92.0	205.4	223.3	394.3
$Q_{\max}$ conv. (Coeficientes)	80.0	188.9	207.3	362.0

Fuente: Elaboración propia.

Los caudales máximos determinísticos para $T=100$ años resultan superiores a los máximos caudales de los 50 escenarios estocásticos correspondientes. Esto se debe a que están calculados con la metodología Thiessen, la cual considera las máximas precipitaciones diarias en 5 estaciones y, una distribución uniforme de la precipitación conforme polígonos determinados con el criterio “del vecino más cercano” agregada a la salida de las subcuencas. Adoptar el criterio de simultaneidad de máximas precipitaciones entre todas las estaciones no es correcto para la cuenca de Misicuni. En la Tabla 8 se confirma que, en un periodo de 53 años de registros diarios de precipitación, solamente hubo 2 años donde las 5 estaciones registraron la máxima precipitación de forma simultánea, 6 años con 4 estaciones, 11 años con 3 estaciones, 22 años con 2 estaciones y 12 años con ninguna simultaneidad entre las máximas precipitaciones diarias en las 5 estaciones.

Con la presente investigación se han procesado aparte del periodo de retorno 100 años también los periodos de retorno 2, 5, 10, 20 y 50 años para las 3 subcuencas y la cuenca total. En la Figura 8 se tiene los hidrogramas de la cuenca total para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 20 y 50 años.

TABLA 8 – NÚMERO DE EVENTOS CON SIMULTANEIDAD ENTRE LAS ESTACIONES

<u>Estaciones Simultáneas</u>	<u>Número de eventos</u>	<u>Años de registro en periodo de 1968 a 2020</u>
NS	12	1968-1969-1970-1976-1977-1979-1980-1983-1984-2009-2011-2018
2	29	1975-1973-1974-1975-1978-1981-1982-1985-1986-1987-1988-1989-1990-1993-1994-1996-1998-2000-2005-2006-2008-2019-2020
3	11	1988-1991-1992-1995-2001-2002-2004-2005-2007-2013-2014
4	6	1999-2003-2010-2015-2016-2017/
5	2	1997-2012

Fuente: Elaboración propia.

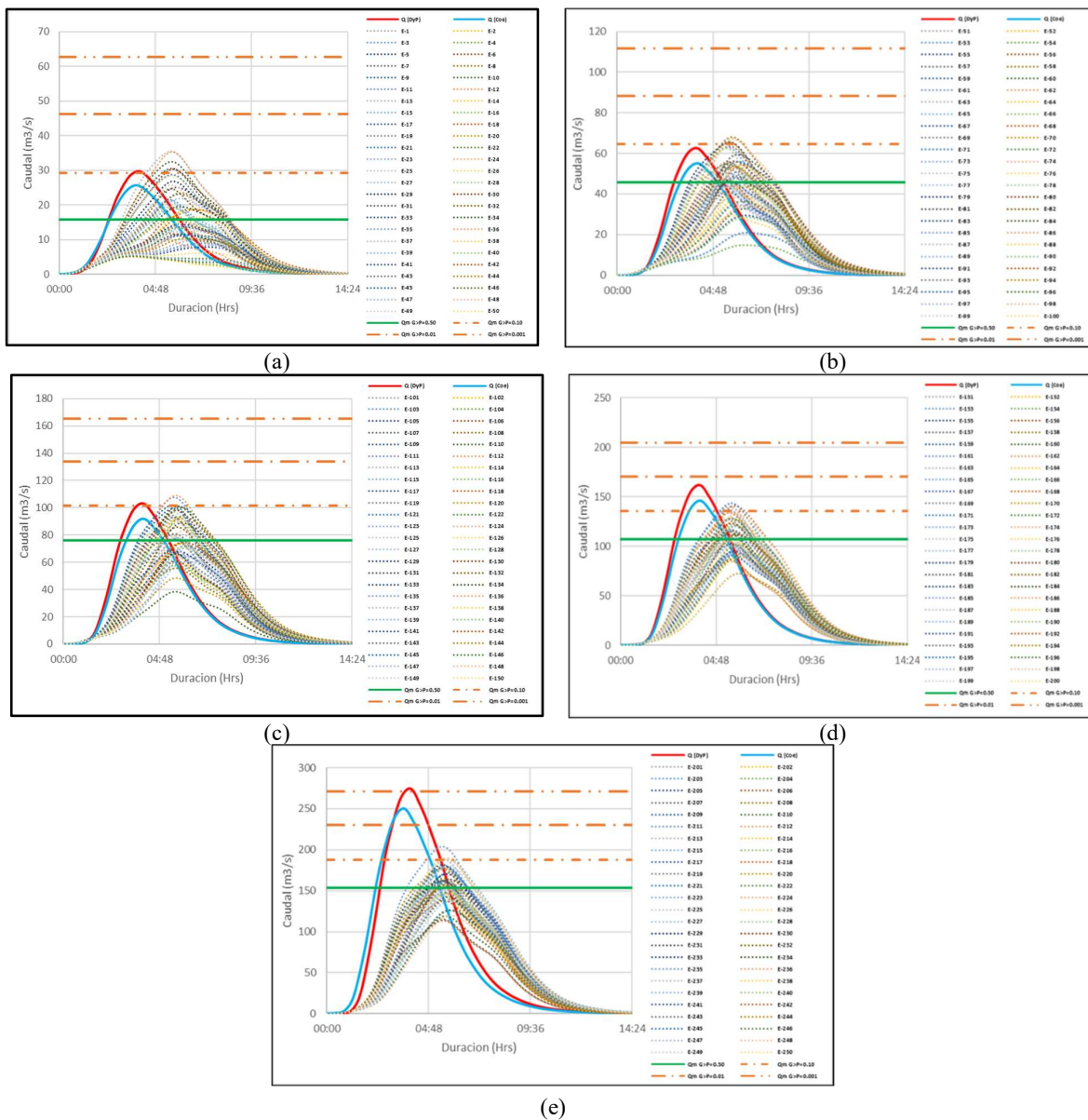


Figura 8: Comparación gráfica de hidrogramas cuenca Misisicuni (método convencional y estocástico) para el periodo de retorno: a) 2 años, b) 5 años, c) 10 años, d) 20 años y e) 50 años.

Fuente: Elaboración Propia

Para 20 y 50 años de periodo de retorno, los hidrogramas tienen las mismas características ya mencionadas para un periodo de retorno de 100 años. Para pequeños periodos de retorno 2, 5 y 10 años los máximos caudales de los hidrogramas determinísticos se encuentran en la franja de caudales estocásticas $Q_{\max T}$ excedido con 50 % y $Q_{\max T}$ excedido con 10 %. Existiendo una mejor correspondencia entre los máximos caudales de los hidrogramas convencionales y estocásticos.

En la Tabla 9 se tienen para la cuenca de Misicuni y sus subcuencas por periodo de retorno los valores de los máximos caudales que corresponden a los hidrogramas determinísticos (metodologías convencionales) y estocásticos descritos y analizados anteriormente.

TABLA 9 – VALORES DE CAUDALES MÁXIMOS ESTOCÁSTICOS Y DETERMINÍSTICOS SEGÚN PERIODOS DE RETORNO EN LA CUENCA MISICUNI Y SUS SUBCUENCAS

	<u>P exc.</u> <u>(50%)</u>	<u>P exc.</u> <u>(10%)</u>	<u>P exc.</u> <u>(1%)</u>	<u>P exc.</u> <u>(0.1%)</u>	<u>Qmax.</u> <u>(DyP)</u>	<u>Qmax.</u> <u>(Coef)</u>
<u>Periodo de retorno 2 años</u>						
Subcuenca Sivingani	3	9	16	24	7	6
Subcuenca Serkheta	8	23	42	60	17	15
Subcuenca Titiri	5	11	18	25	13	15
Cuenca Misicuni	16	29	46	63	30	26
<u>Periodo de retorno 5 años</u>						
Subcuenca Sivingani	11	29	51	73	15	12
Subcuenca Serkheta	19	43	73	103	35	31
Subcuenca Titiri	14	31	52	73	34	30
Cuenca Misicuni	46	65	88	111	63	55
<u>Periodo de retorno 10 años</u>						
Subcuenca Sivingani	15	35	59	83	24	20
Subcuenca Serkheta	37	70	111	151	57	51
Subcuenca Titiri	22	48	81	114	56	51
Cuenca Misicuni	76	102	134	165	103	92
<u>Periodo de retorno 20 años</u>						
Subcuenca Sivingani	22	47	78	108	38	32
Subcuenca Serkheta	48	85	130	175	88	79
Subcuenca Titiri	35	68	109	150	90	82
Cuenca Misicuni	107	135	170	205	162	146

Fuente: Elaboración propia.

Las relaciones $Q_{\max(Tr)}$ pueden dibujarse en ejes con escala logarítmica permitiendo que los caudales estocásticos y convencionales puedan extrapolarse para estimar los caudales con periodos de retorno para 1000 y 10000 años, Figura 9 y Tabla 10.

Los caudales estocásticos se extrapolaron bien con coeficientes de determinación R^2 mayor a 0.99 y con un control visual aceptable. Aunque los caudales convencionales se han extrapolado con coeficientes de determinación R^2 mayor a 0.92 el control visual no demuestra un ajuste bueno con los datos base, pero la gráfica de los valores extrapolados parece aceptable.

En la Tabla 10, se tiene un resumen de los caudales máximos de las crecidas centenaria, milenaria y decamilenaria del PMM, en base a las 7 metodologías analizadas (5 metodologías estocásticas: $Q_{\max}$ excedido con $P=50\%$, $Q_{\max}$ excedido con $P=10\%$, $Q_{\max}$ excedido con $P=1\%$, $Q_{\max}$ excedido con $P=0.1\%$ y $Q_{\max}$ excedido con $P=0.01\%$ y 2 metodologías determinísticos: $Q_{\max}$ conv (coe) y $Q_{\max}$ conv (D y P). En la misma tabla se tienen los caudales de entrada al embalse y de salida por el vertedero de excedencias del embalse: centenario, milenario, deca milenario y máximo probable que fueron usado para el diseño y ejecución del PMM, ENGEVIX CAEM 2015.

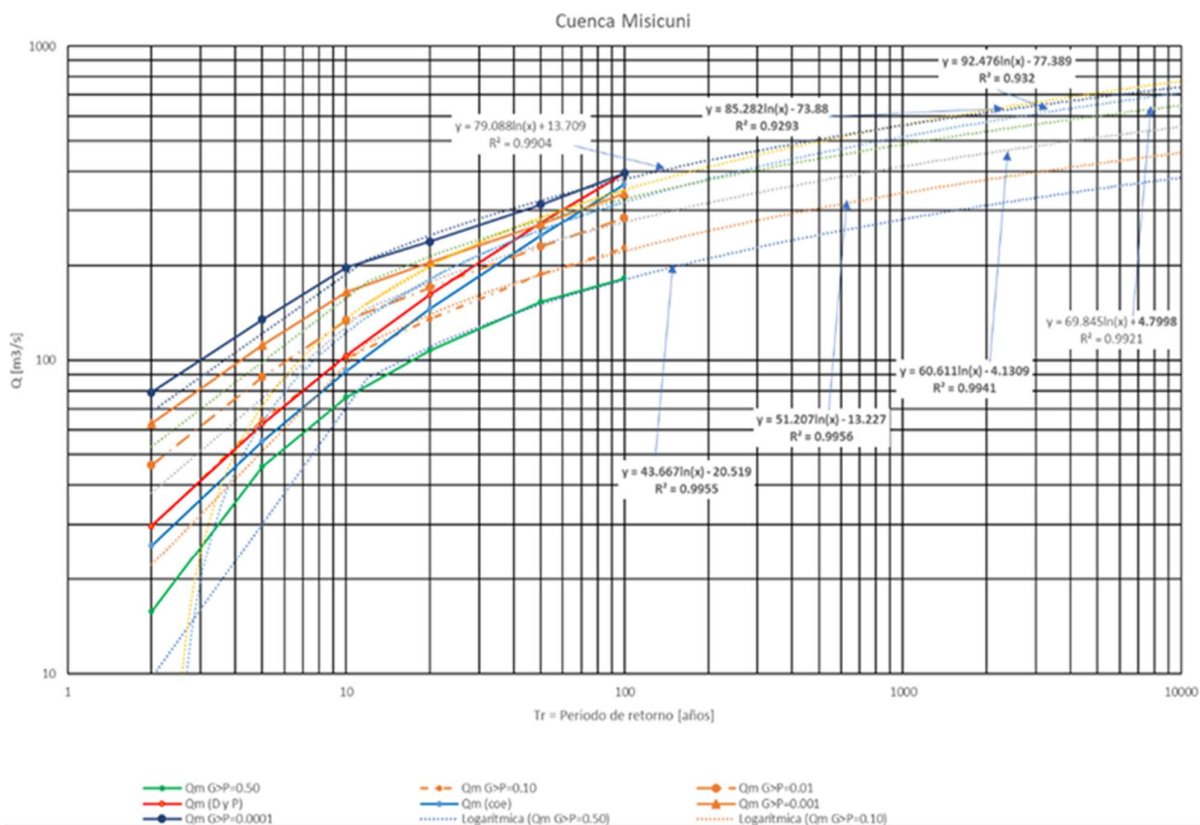


Figura 9: Relaciones $Q_{\max}$ (T_r) para cuenca total del Proyecto Misicuni proyectados hasta periodo de retorno 10000 años.

Fuente: Elaboración Propia.

TABLA 10 – ESTIMACIÓN DE CAUDALES CENTENARIO, MILENARIO Y DECAMILENARIA PROYECTO MISICUNI

<u>Caudal máximo</u> (m ³ /s)	<u>Periodo de retorno (años)</u>			<u>Caudal máximo probable</u> (m ³ /s)
	100	1000	10000	
$Q_{\max}$ excedido con $P=50\%$	182	280	380	-
$Q_{\max}$ excedido con $P=10\%$	227	340	470	-
$Q_{\max}$ excedido con $P=1\%$	284	410	560	-
$Q_{\max}$ excedido con $P=0.1\%$	339	490	640	-
$Q_{\max}$ excedido con $P=0.01\%$	394	560	750	-
$Q_{\max}$ conv (Coeficientes)	362	510	710	-
$Q_{\max}$ conv (Dick y Peshke)	394	560	780	-
$Q_{\max}$ informe Misicuni	330	510	680	2306
$Q_{\max}$ laminado Misicuni	65	119	178	800

Fuente: Elaboración Propia.

En la Tabla 10, se ve que el método determinístico convencional en base a coeficientes de desagregación $Q_{\max}$ conv (coe) da valores característicos muy similares a las que el PMM ha usado para diseño y ejecución. Es muy probable que el PMM se realizó en base a un estudio determinístico convencional con coeficientes de desagregación. El método estocástico que entrega valores cercanos a los valores característicos del PMM es el que considera la probabilidad de excedencia de 0.1 % $Q_{\max}$ excedido con $P=0.1\%$. Esta probabilidad es estricta y demuestra que la precipitación máxima diaria no es uniforme sobre la cuenca, ver líneas arriba. La aplicación de Thiessen activando todas las estaciones de forma simultánea no es correcta para el PMM. El método estocástico demuestra que las crecidas del PMM deben ser inferiores a las que el PMM ha considerado para el diseño, construcción y operación. El PMM podrá disminuir las medidas de seguridad que se toman para proteger el embalse y subir la rentabilidad del embalse. No es aconsejable realizar aquello

sin haber realizado previamente campañas de aforos y determinado cuantitativamente en qué escenario se encuentra el método estocástico.

4. CONCLUSIONES

- La metodología estocástica en base a la generación de curvas PADF y escenarios de tormentas elípticas sobre la cuenca, permite tener una visión más característica y detallada sobre el comportamiento real en base a registros históricos de precipitaciones y la geomorfología de la cuenca. Sin embargo, donde más llega a destacar es en estudios de cuencas de gran superficie.
- La aplicación estocástica y los softwares especializados (IT-LluviaNH y IT-inundación) sobre la cuenca Misicuni, permitió obtener 300 escenarios de tormentas elípticas con diferentes distribuciones espaciales e intensidades que permiten hacer un control no solo de caudales máximos correspondientes a eventos extremos del PMM, sino también caudales máximos con la realización de estudios o proyectos dentro de la cuenca.
- Para las dos metodologías estocástica y convencional se ha logrado extrapolar los caudales con periodos de retorno, $Tr = 2, 5, 10, 50$ y 100 años a caudales con periodo de retorno 1000 y 10000 años.
- Según la comparación de resultados de las diferentes metodologías y criterios optados, se obtuvieron caudales menores a las convencionales adoptadas para diseño del PMM cercano al 30%, debido a la distribución espacial del evento como tal, una metodología convencional que relaciona su distribución en la totalidad de la superficie de la cuenca no es lo más realista, pero sí con más rango de seguridad y contra mayores costos económicos.
- El método estocástico demuestra que las crecidas del PMM deben ser inferiores a las que el PMM ha considerado para el diseño, construcción y operación. El PMM podrá disminuir las medidas de seguridad que se toman para proteger el embalse y subir la rentabilidad económica del embalse. No es aconsejable realizar aquello sin antes haber efectuado campañas de aforos y determinar cuantitativamente en qué escenario se encuentra del método estocástico, vale decir que previo se debe calibrar el método estocástico.
- El modelo hidrológico propuesto relaciona las tres subcuencas principales de aportación, se consideró un ruteo del río Misicuni con un tiempo de retardo, el cual fue descartado por la cobertura actual del embalse sobre el río Misicuni. Los caudales entran directamente al embalse, por lo cual son laminados y no son transportados.
- La metodología estocástica del CAPRA-BID está basado en un escaneo sobre las 5 estaciones de forma simultánea y una distribución de la precipitación conforme a las isoyetas procesadas mediante grilla y red de flujo, lo cual corresponde a un modelo distribuido.
- La metodología Thiessen es artificial, sencilla y menos precisa, pero con resultados al lado de la seguridad. La metodología estocástica es complicada de aplicar, pero está basada sobre principios más correctos y entrega resultados que más se aproximan a la realidad.

REFERENCIAS

- [1] A. Cardoso Velasco, "Cálculo de los caudales de evento extremo en la cuenca de Misicuni mediante tormentas estocásticas," Proyecto de Grado, Universidad Privada del Valle, Departamento Académico de Ingeniería Civil, Carrera de Ingeniería Civil, 2022.
- [2] A. Cardoso Velasco y C. Le Noir, "Análisis y cálculo de los caudales de evento extremo mediante tormentas estocásticas en la cuenca de Misicuni – Cochabamba – Bolivia," *Journal Boliviano de Ciencias*, Universidad del Valle de Cochabamba, vol. 12, 2023 (en prensa).
- [3] D. A. Aldana Flores y M. A. Leigue Fernández, "Estudio hidrológico para determinación de caudales máximos en la cuenca del río San Pedro de la ciudad de Tarija, Bolivia," 2022.
- [4] C. Le Noir, "Estudio Hidrológico Misicuni – Río Titiri," Informe de consultoría, 2017.
- [5] R. Coca Guzman, "Análisis de eventos extremos por un método probabilístico con generación estocástica de tormentas – río Icona," Proyecto de Grado, Universidad Mayor de San Simón, Carrera de Ingeniería Civil, 2021.
- [6] D. Campos Aranda, "Procesos del ciclo hidrológico," Universidad Autónoma de San Luis Potosí, 1992.
- [7] ENGEVIX CAEM, "Estudios y evaluaciones hidráulicas en el vertedero del Proyecto Múltiple Misicuni cambios generales," Informe de consultoría, Proyecto Múltiple Misicuni, 2015.
- [8] ERN, "Modelos de evaluación de amenazas naturales y selección," Informe Técnico, vol. 1, 2016. [En línea]. Disponible en: <https://ecapra.org/sites/default/files/documents/ERN-CAPRA-R6-T1-3>.

- [9] ITEC, “BID Proyecto #RG-T2416 Perfil de riesgo de desastres para Bolivia ante inundaciones y deslizamientos en cuencas seleccionadas (río Rocha y río Grande) – Informe Final,” Universidad de los Andes, Colombia, 2015. [En línea]. Disponible en: <https://ewdata.rightsindevelopment.org/files/documents/07/IADB-BO-L1107.pdf>.
- [10] ITEC, “Manual de usuario del software IT-Flood V.2.2,” Universidad de los Andes, Colombia, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://ecapra.org/es/topics/it-flood>.
- [11] ITEC, “Manual de usuario del software IT-NHrain V.3.0,” Universidad de los Andes, Colombia, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://ecapra.org/topics/it-nhrain>.
- [12] J. Shaman, M. Stieglitz y D. Burns, “Are big basins just the sum of small catchments,” *Hydrol. Process.*, vol. 18, pp. 3195-3206, 2004, DOI: 10.1002/hyp.5739.
- [13] P. López, “Informe modelo de operación inicial del embalse Misicuni,” Informe de consultoría, 2016.
- [14] M. Villón Béjar, “HIDROESTA 2 Cálculos Hidrológicos – Manual de Usuario,” Tecnológico de Costa Rica, 2012.
- [15] Ministerio de Desarrollo Rural y Tierras (MDRyT), “Mapa de cobertura vegetal y uso actual de la tierra de Bolivia del 2010,” GeoBolivia, 2011.
- [16] BioTerra, “Mapa de tipo de suelos de la cuenca Misicuni,” Plan de manejo integral de la cuenca de aporte del embalse Misicuni, 2004.
- [17] D. Rincón, J. F. Velandia, I. Tsanis, y U. T. Khan, “Stochastic Flood Risk Assessment under Climate Change Scenarios for Toronto, Canada Using CAPRA,” *Water*, vol. 14, no. 2, p. 227, 2022. DOI: 10.3390/w14020227.
- [18] V. T. Chow, D. Maidment, y L. Mays, “Hidrología Aplicada,” 1994. [En línea]. Disponible en: <https://www.libreriaingeniero.com/2017/12/hidrologia-aplicada-ven-te-chow.html>.
- [19] W. R. Sandoval Erazo y E. P. Aguilera Ortiz, “Determinación de caudales en cuencas con poca información hidrológica,” *Revista Ciencia UNEMI*, pp. 100–110, 2014.
- [20] National Engineering Hand Book, National Resources Conservation Service, “Hydrological Soil-Cover Complexes” y “Hydrology,” NRCS part 630, 2004. [En línea]. Disponible: <http://www.wcc.nrcs.usda.gov/ftpref/wntsc/H&H/NEHhydrology/ch9.pdf> y <http://www.wcc.nrcs.usda.gov/ftpref/wntsc/H&H/NEHhydrology/ch10.pdf>.
- [21] World Meteorological Organization, “Tropical Hydrology,” WMO No. 655, Geneva, Switzerland, 1987.
- [22] M. Villón Béjar, “HIDROESTA 2 Cálculos Hidrológicos – Manual de Usuario,” Tecnológico de Costa Rica, 2012.