JO INGENIERÍA SPA

S.C.M. ATACAMA KOZAN

PROYECTO INGENIERÍA CONCEPTUAL AVANZADA DEPOSITO DE RELAVES FILTRADO EL GATO (HITO 2)

N° 3070-GE-INF-003_B

INFORME HIDROLÓGICO DE SITIO

Preparado por

JO Ingeniería.

Aprobado por

Jefe de Disciplina _____
Gerente de Ingeniería _____
Sub-Gerente de Proyecto _____
Gerente de Proyecto _____

Rev.	Por	Emitido para	Fecha	Fecha de Revisión	Aprobado
A	SCC	Revisión Interna	04-11-16	07-11-16	
B	SCC	Revisión del cliente			
0					
Comentarios:					

PROYECTO INGENIERÍA CONCEPTUAL AVANZADA DEPOSITO DE RELAVES FILTRADO EL GATO (HITO 2)

INFORME HIDROLÓGICO DE SITIO

ÍNDICE

1 INTRODUCCIÓN 4
2 OBJETIVO 4
3 ALCANCE 4
4 UBICACIÓN 4
5 DOCUMENTOS DE REFERENCIA 5
6 CONDICIONES DE SITIO 6
7 REQUERIMIENTOS GENERALES 6
7.1 UNIDADES 6
7.2 REFERENCIA TOPOGRÁFICA 6
7.3 UBICACIÓN Y MORFOLOGÍA 7
8 METODOLOGÍA DEL ESTUDIO Y CRITERIOS DE DISEÑO 9
9 ANÁLISIS ESTADÍSTICO 10
10 CRECIDA MÁXIMA PROBABLE 10
11 PRECIPITACIÓN EFECTIVA 11
12 HIDROGRAMA UNITARIO 11
12.1 GENERAL 11
12.2 HIDROGRAMA PARA CUENCA A 12
12.3 HIDROGRAMA PARA CUENCA B 13
13 ANÁLISIS COMPARATIVO MÉTODO RACIONAL – VERNI & KING - HIDROGRAMA . 14
13.1 GENERAL 14
13.2 MÉTODO RACIONAL 14
13.3 MÉTODO VERNI & KING MODIFICADO 14
13.4 ANÁLISIS COMPARATIVO 15

LISTADO DE TABLAS

Tabla 7-1: Unidades de medida (SI) 6

Tabla 7-2: Parámetros morfológicos de la cuenca 8

Tabla 9-1: Resumen precipitaciones a 24 hr para función Gamma – Estación Copiapó. 10

Tabla 12-1: Caudales peak según duración de tormenta – Cuenca A. 12

Tabla 12-2: Caudales peak según duración de tormenta – Cuenca B. 13

Tabla 13-1: Análisis comparativo entre metodologías Verni & King – Método Racional – Hidrograma SCS para periodos de retorno de 50 y 100 años, para cuencas A y B 15

1 INTRODUCCIÓN

La **COMPAÑÍA CONTRACTUAL MINERA ATACAMA KOZAN** (AK) está planificando desarrollar un nuevo depósito de relaves para operar a continuación (o alternadamente) del actual tranque de relaves que se ubica en la quebrada denominada El Gato, este último a una distancia de 16 km hacia el Norte de la actual planta concentradora.

Para este efecto, AK ha solicitado a JO Ingeniería (**JO**) desarrollar una ingeniería para sustentar el expediente técnico del nuevo depósito de relaves a presentar al Sistema de Evaluación Ambiental (SEA), por la vía de una Declaración de Impacto Ambiental (DIA), que se justifica como una ampliación del depósito de relaves en Qda. El Gato, para la capacidad actual de la planta concentradora, y por el método de relaves filtrados que es ambientalmente más favorable.

En la presente etapa de ingeniería denominada Hito 2, se desarrollará un estudio a nivel de ingeniería conceptual avanzada, base para la preparación de la DIA respectiva..

2 OBJETIVO

El presente documento, como parte de los estudios básicos para el área del estudio, tiene como objetivo la caracterización hidrológica de las cuencas aportantes al acopio de relaves filtrados proyectado, y la posterior determinación de los caudales asociados a cada una.

3 ALCANCE

El alcance del presente informe consiste en la determinación de los caudales de diseño para posteriores obras de captación de aguas naturales, provenientes de la precipitaciones más desfavorables, determinadas comparando la crecida máxima probable (CMP) y la lluvia decamilenaria, cual corresponda según la [Ref. 6].

4 UBICACIÓN

El futuro DR Filtrados se localizará en el sector bajo de la Quebrada El Gato sitios donde se ubica actualmente el Tranque de Relaves El Gato propiedad de S.C.M Atacama Kozan (AK), en la comuna de Copiapó, Región de Atacama, al Norte de la intersección de Quebrada Paipote y el cauce natural del río Copiapó, con una distancia aproximada de 15 km de la Planta de AK, como se observa en la Figura Nº 4-1.



Figura 4-1: Proyección Nuevo Depósito de Relaves Filtrados AK

5 DOCUMENTOS DE REFERENCIA

[Ref. 1] Documento N°3070-RE-INF-001 Bases y Criterios de Diseño Depósito de Relaves
[Ref. 2] Plano Nº3070-RE-PLA-004 Disposición General y Perfil – Disposición General Obras Depósito de Relaves – Alternativa 1 de 2.

Otros documentos:

[Ref. 3] Manual de Cálculo de Crecidas y Caudales Mínimos en Cuencas Sin Información Fluviométrica, 1995. Ministerio de Obras Públicas.
[Ref. 4] Precipitaciones Máximas Diarias en Chile, Ludwig Stowhas. VII Congreso Nacional de Ingeniería Hidráulica, 1985.
[Ref. 5] Técnicas Alternativas para Soluciones de Aguas Lluvias en Sectores Urbanos, 1996. MINVU.
[Ref. 6] Reglamento referido al artículo 295 inciso 2º del Código de Aguas. Dirección General de Aguas (DGA).

[Ref. 7] Manual para la Estimación de Avenidas Máximas en Cuencas y Presas Pequeñas, 1982. Dirección General de Obras Hidráulicas y de Ingeniería Agrícola para el Desarrollo rural.
[Ref. 8] Técnicas Alternativas para Soluciones de Aguas Lluvias en Sectores Urbanos, 1996. MINVU.
[Ref. 9] Informe Estudio de Tranque de Relave Quebrada el Gato. Desarrollado por la Empresa E.C. Rowe Asoc. Año 1996.

Si se presentan diferencias o conflictos entre las normas, códigos y/o estándares, regirá la más conservadora y serán sometidas a revisión del Cliente o su representante.

Podrán emplearse otros Códigos o Normas, citando claramente la fuente y una vez demostrado que sean de un nivel de exigencia similar o mayor a aquéllos

6 CONDICIONES DE SITIO

Para las condiciones generales del sitio referirse al documento 3070-RE-INF-001 Bases y Criterios de Diseño Depósito de Relaves.

7 REQUERIMIENTOS GENERALES

7.1 UNIDADES

Los documentos técnicos y planos , serán desarrollados, de modo general, utilizando el Sistema Internacional de Unidades (SI), según el siguiente cuadro:

Tabla 7-1: Unidades de medida (SI)

Magnitud	Nombre	Símbolo
Ángulo plano	radián	rad
Ángulo plano	grado	°
Longitud	metro	m
Masa	kilogramo	kg
Masa	tonelada	t
Masa en volumen	kilogramo por metro cúbico	kg/m³
Caudal	metro cúbico por segundo	m^3/s
Superficie	kilometro cuadrado	km²
Tiempo	segundo	s
Volumen	metro cúbico	m³
Intensidad de lluvia	milímetro por hora	mm/hr

7.2 REFERENCIA TOPOGRÁFICA

Para el proyecto considera como referencia topográfica el sistema UTM WGS84, Huso 19 Sur.

7.3 UBICACIÓN Y MORFOLOGÍA

El acopio de relaves filtrados se ubicará en el lecho de la quebrada El Gato, en el costado sur del actual tranque de relaves.

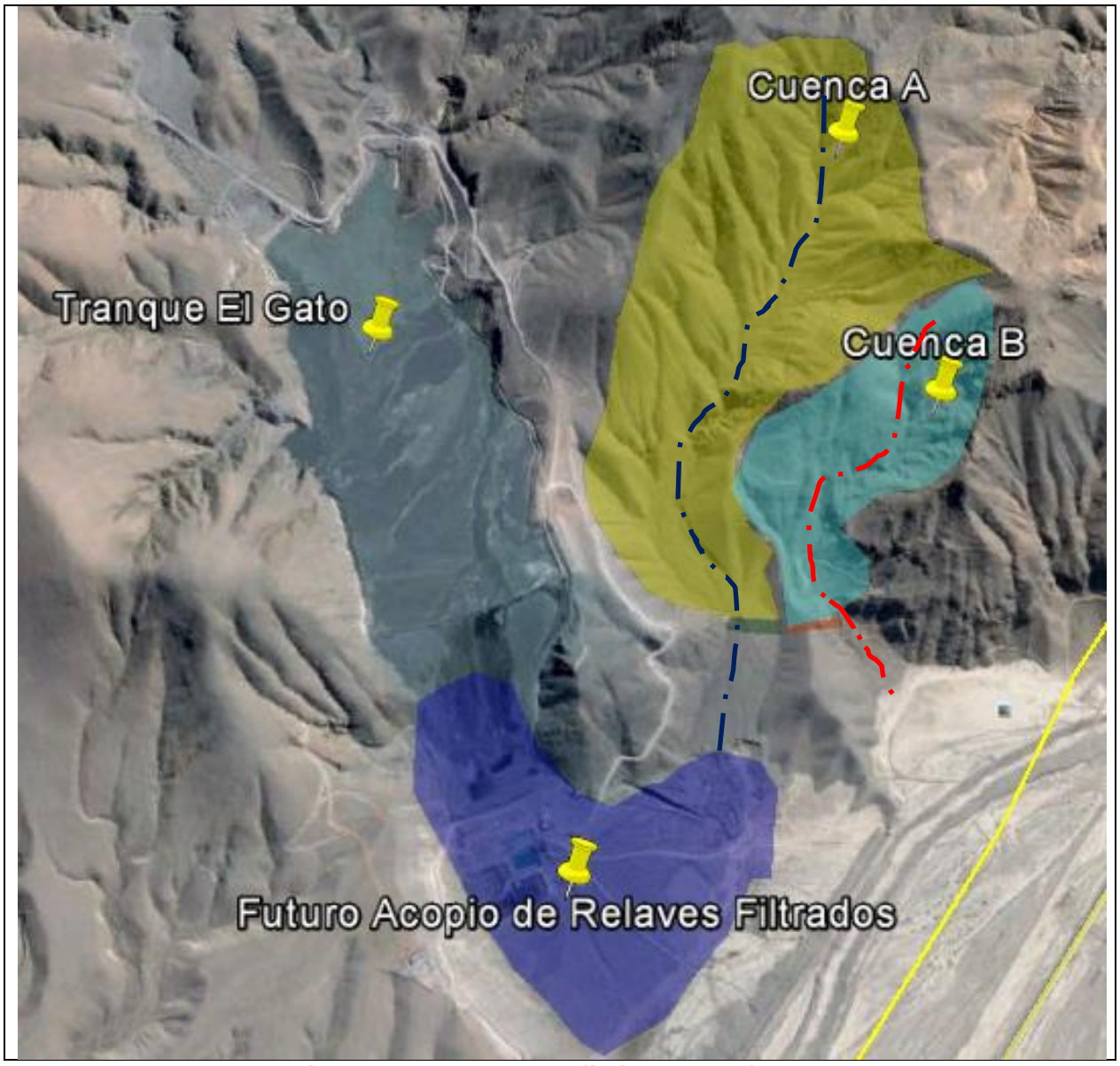


Figura 7-1: Imagen satelital cuenca El Gato.

El acopio se ve circundado por 2 posibles cuencas portantes, las que se aprecian en la Figura 7-1. El aporte de la cuenca A, sobre el nuevo depósito de relaves filtrados, se ha proyectado desviarlo mediante un muro y un canal [Ref. 2], el cual se sumará al cauce natural de la cuenca B, los que posteriormente serán descargados en la quebrada Paipote. Por lo tanto, para fines del presente estudio hidrológico y teniendo en consideración el proyecto a realizar, se analizan las cuencas A y B.

La cuenca sobre el tranque existente El Gato y sus obras de desvío, han sido motivo de análisis en los estudios básicos para la obras del sector superior de la quebrada El Gato, correspondientes al tranque actual [Ref. 9].

La cuenca A tiene una cota máxima de 745 msnm, con una pendiente promedio de 0,16 m/m aproximadamente y una longitud de cauce de 1,4 km. En tanto que, la cuenca B …….

En Tabla 7-2 se presentan los parámetros morfológicos de las cuencas en estudio, mientras que en Figura 7-1 se observa una imagen satelital de las mismas.

Tabla 7-2: Parámetros morfológicos de la cuenca

Parámetro	Cuenca A	Cuenca B
Área (A) [km^2]	**0,6**	**0,2**
Longitud de cauce (L)	**1,36**	**0,79**
Cota máxima (Cmáx) [msnm]	**745**	**762**
Cota Mínima (Cmín) [msnm]	**518**	**528**
Cota pto medio (Cpm) [msnm]	**602**	**587**
Desnivel máximo (H) [m]	**227**	**234**
Longitud desde CG de la cuenca a punto de salida de la misma (Lcg) [km]	**0,95**	**0,55**
Pendiente media (S) [m/m]	**0,158**	**0,229**

8 METODOLOGÍA DEL ESTUDIO Y CRITERIOS DE DISEÑO

La zona donde se ubica el acopio de relaves filtrados cuenta con registros pluviométricos obtenidos directamente de la página web de la DGA, por lo que la metodología que mejor se ajusta para el cálculo del caudal y posterior volumen a embalsar, es la del hidrograma unitario. Aún así, se analiza la metodología de Verni & King Modificado y método Racional, con el fin de generar un análisis comparativo.

Se analizan, en primera instancia, las precipitaciones históricas de las estaciones pluviométricas más cercanas al acopio de relaves filtrados. Debido a la distribución de las mismas, se considera solamente la Estación Copiapó como la más influyente en las precipitaciones anuales, por su cercanía al acopio. Es así, que se realiza un análisis estadístico para la determinación de precipitaciones para distintos periodos de retornos.

En vista que la [Ref. 6] se centra en depósitos de relaves convencionales, se opta por utilizar el caudal asociado a la precipitación máxima probable (PMP), siempre y cuando sea mayor a la lluvia decamilenaria. La PMP se determina mediante la metodología de Hershfield [Ref. 7].

Se utiliza el hidrograma unitario de la Soil Conservation Service SCS [Ref. 3], realizándose un análisis comparativo para distintas duraciones de tormenta (para 6 hr, 12 hr y 24 hr).

En específico, el análisis se realiza tanto para la cuenca A como para la cuenca B, ya que ambos caudales descargan en conjunto en la quebrada Paipote.

9 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Se realiza un análisis estadístico para corroborar la adecuada correlación entre datos meteorológicos y distribuciones de probabilidad, como lo son la función Normal, Log Normal II, Pearson III y Gamma. Luego, en base a test de bondad de ajuste (chi-cuadrado y kolmogorov-smirnov) se determina aquella que mejor se ajusta a las muestras. El resumen del ajuste puede observarse en el ANEXO B.

Se obtiene entonces que la mejor función de probabilidades corresponde a la función Gamma. Así, se extrapolan los datos a 100, 200, 1000 y 10000 años de periodo de retorno a modo referencial, los cuales se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 9-1: Resumen precipitaciones a 24 hr para función Gamma – Estación Copiapó.

Periodo de retorno T [años]	Precipitación Pp [mm]
50	50,6
100	61,7
1000	99,5
10000	138,3

10 CRECIDA MÁXIMA PROBABLE

Para la determinación de la Crecida Máxima Probable se considera el desarrollo mediante la metodología de Hershfield [Ref. 7], donde:

$$PMP = P_M + K * \sigma_p$$

Dónde:

PMP: Precipitación Máxima Probable [mm].
P_M: Promedio de las precipitaciones máximas anuales a 24 hr [mm].
K: Coeficiente de frecuencia.
σ_P: Desviación estándar de las precipitaciones máximas anuales a 24 hrs [mm]

Las recomendaciones de L. Stowhas [Ref. 4] concluyen que para cuencas chilenas el factor de frecuencia recomendado es de **K = 11**.

En el ANEXO C se aprecian los coeficientes de corrección determinados mediante la metodología descrita.

Se compara la tormenta decamilenaria con la PMP, obteniéndose que esta última es la más desfavorable y por ende, la que debe considerarse en el diseño. La magnitud para dicha precipitación alcanza los 146,5 [mm] para 24 hr de duración.

11 PRECIPITACIÓN EFECTIVA

Mediante el método de Curva Número [Ref. 7] se determina qué cantidad de la lluvia se infiltra en el terreno y qué cantidad escurre hacia la quebrada.

Se opta por un valor de curva número 90 [Ref. 7], correspondiente al efecto más desfavorable, y que entrega un caudal mayor de escurrimiento.

Para determinar la precipitación efectiva se utilizan las siguientes expresiones de la metodología:

$$CN = \frac{25400}{254 + S}$$

$$P_{ef} = {(P - 0{,}2S)^2}\Big/{(P + 0{,}8S)}$$

Donde *CN* es el valor de la curva número.

Desarrollando las expresiones, se obtiene que S tiene una magnitud de 28,2 [mm] entregando una precipitación efectiva de 117,3 [mm] correspondiente al 80% de la PMP.

12 HIDROGRAMA UNITARIO

12.1 GENERAL

Se utiliza el hidrograma unitario de la Soil Conservation Service SCS [Ref. 3] para obtener el hidrograma para la duración mencionada. Los datos específicos para el cálculo del hidrograma, tales como el periodo de concentración, entre otros, pueden observarse en el Tabla 7-2.

Los parámetros básicos para el configuración del Hidrograma son los mostrados a continuación y son determinados mediante la [Ref. 3] para la zona específica de Copiapó.

$$t_p = 0{,}323 \cdot \left(L \cdot L_g / S^{1/2}\right)^{0{,}422} \text{ (hr)}$$
$$t_B = 5{,}377 \cdot {t_p}^{0{,}805} \text{ (hr)}$$
$$q_p = 144{,}141 {t_p}^{-0{,}796} \text{ (lt/s/mm/km}^2\text{)}$$

Donde:

t_p: tiempo peak.
t_B: tiempo base.
q_p: caudal peak.

En cuanto al tiempo de concentración de la cuenca, se utiliza la fórmula de Giandotti, que se utiliza para cuencas pequeñas.

$$t_c = \frac{4\sqrt{A} + 1{,}5L}{0{,}5\sqrt{H_m}}$$

Donde:

A: área de la cuenca [km^2].
L: longitud de cuenca [km].
Hm: altura media de la cuenca [km].

12.2 HIDROGRAMA PARA CUENCA A

La Figura 12.1 muestra el análisis comparativo entre los hidrogramas para las tres duraciones de tormenta utilizadas, mientras que la Tabla 12-1 entrega los valores del caudal peak de cada una de ellas.

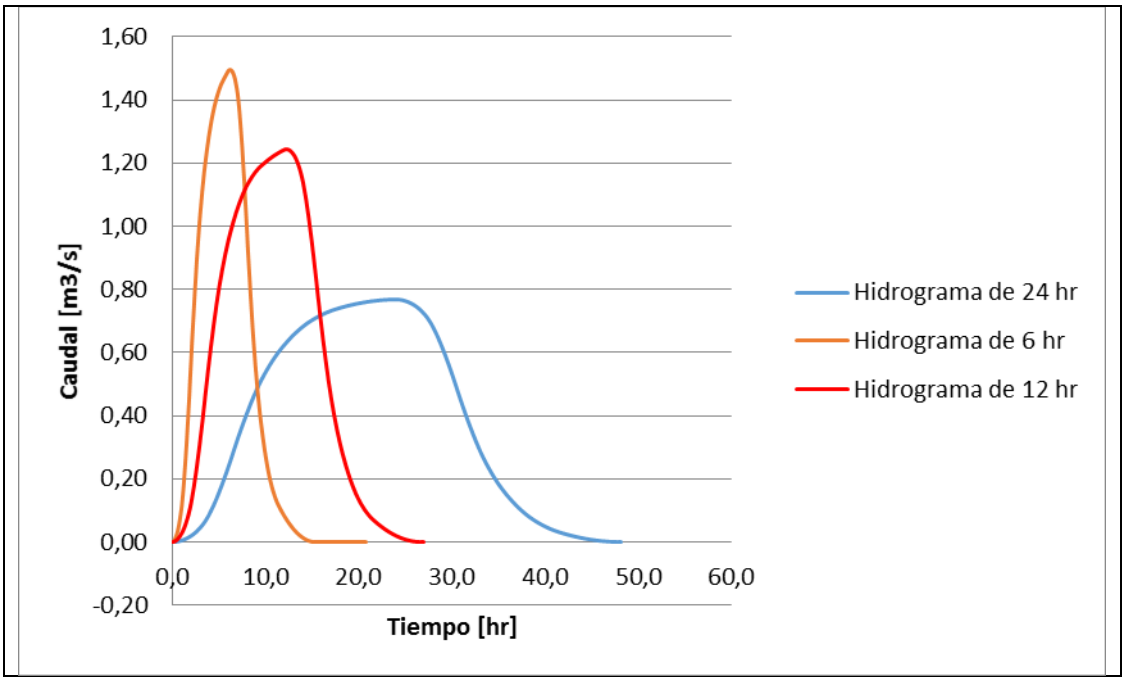


Figura 12.1: Hidrograma para tormenta de 6 hr, 12 hr y 24 hr según PMP - Cuenca A.

Tabla 12-1: Caudales peak según duración de tormenta – Cuenca A.

Duración de tormenta [hr]	Caudal peak [m^3/s]
6 hr	1,45
12 hr	1,21
24 hr	0,75

12.3 HIDROGRAMA PARA CUENCA B

La Figura 12.2 muestra el análisis comparativo éntre los hidrogramas para las tres duraciones de tormenta utilizadas, mientras que la Tabla 12-2 entrega los valores del caudal peak de cada una de ellas.

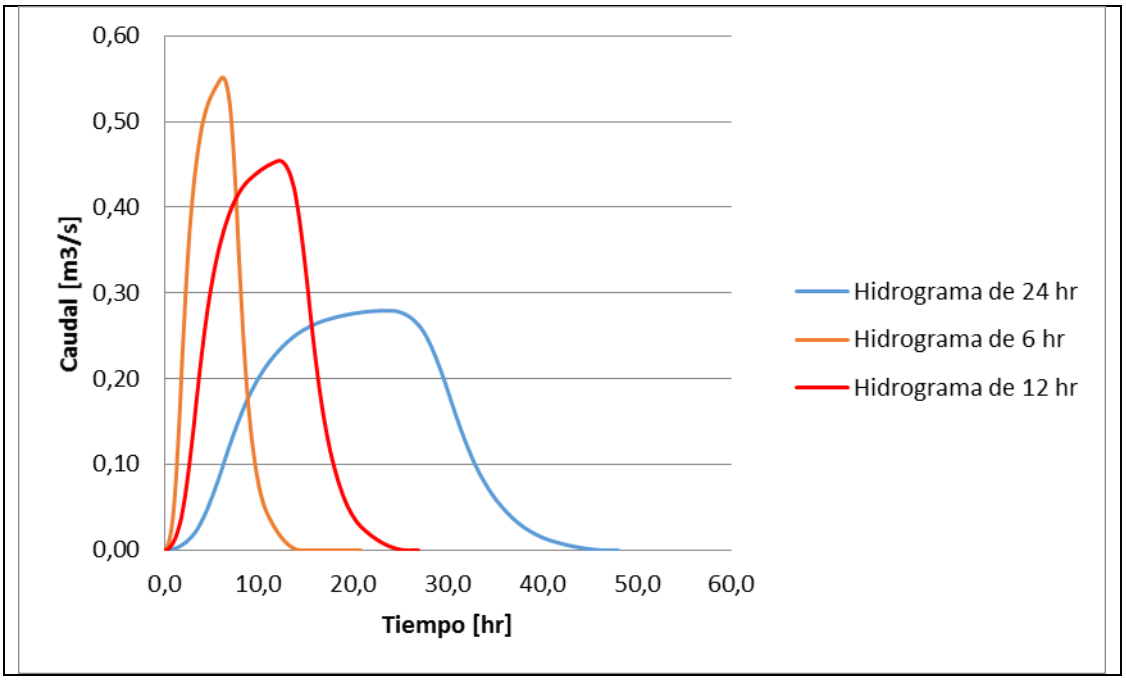


Figura 12.2: Hidrograma para tormenta de 6 hr, 12 hr y 24 hr según PMP- Cuenca B.

Tabla 12-2: Caudales peak según duración de tormenta – Cuenca B.

Duración de tormenta [hr]	Caudal peak [m^3/s]
6 hr	0,95
12 hr	0,44
24 hr	0,27

13 ANÁLISIS COMPARATIVO MÉTODO RACIONAL – VERNI & KING - HIDROGRAMA

13.1 GENERAL

Según la [Ref. 3] el método racional y el método de Verni & King modificado entregan resultados adecuados para periodos de retorno menores a 100 años. Por lo mismo, el análisis comparativo se realiza para periodos de retorno de 50 años y 100 años.

Se presenta en primera instancia la formulación teórica de cada metología para luego realizar la comparación de cada una con el hidrograma según cada periodo de retorno. Cada parámetro asociado a las metodologías, como su propia formulación se basan en la [Ref. 3].

13.2 MÉTODO RACIONAL

La expresión para la determinación del caudal instantáneo es la siguiente:

$$Q = \frac{C \cdot i \cdot A}{3{,}6}$$

Dónde:

Q: Caudal instantáneo máximo de periodo de retorno T, expresada en m^3/s.
C: Coeficiente de escorrentía asociado al periodo de retorno T.
i: Intensidad media de la lluvia asociada al periodo de retorno T y a una duración igual al tiempo de concentración de la cuenca, expresada en mm/hr.
A: Área pluvial de la cuenca en km^2.

En el ANEXO D se aprecia el resumen del cálculo de caudales para la metodología descrita.

13.3 MÉTODO VERNI & KING MODIFICADO

La expresión para la determinación del caudal instantáneo máximo es la siguiente:

$$Q = C(T) \cdot 0{,}00618 \cdot {P_{24}}^{1,24} A^{0,88}$$

Dónde:

Q: Caudal instantáneo máximo de periodo de retorno T, expresada en m^3/s.
P_{24}: Precipitación en 24 hrs para el periodo T en mm.
A: Área pluvial de la cuenca en km^2.
$C(T)$: Coeficiente empírico para T años de periodo de retorno.

En el ANEXO D se aprecia el resumen del cálculo de caudales para la metodología descrita.

13.4 ANÁLISIS COMPARATIVO

Una vez determinados los parámetros asociados a cada método se proceden a determinar los caudales máximos para los periodos de retorno mencionados, que se resumen en la Tabla 13-1.

Tabla 13-1: Análisis comparativo entre metodologías Verni & King – Método Racional – Hidrograma SCS para periodos de retorno de 50 y 100 años, para cuencas A y B

Periodo de Retorno	Caudal máximo m^3/s					
	Verni & King		Método Racional		Hidrograma SCS	
	Cuenca A	*Cuenca B*	*Cuenca A*	*Cuenca B*	*Cuenca A*	*Cuenca B*
T = 50 años	0,040	0,0166	0,035	0,013	0,176	0,064
T = 100 años	0,042	0,0173	0,044	0,016	0,237	0,086

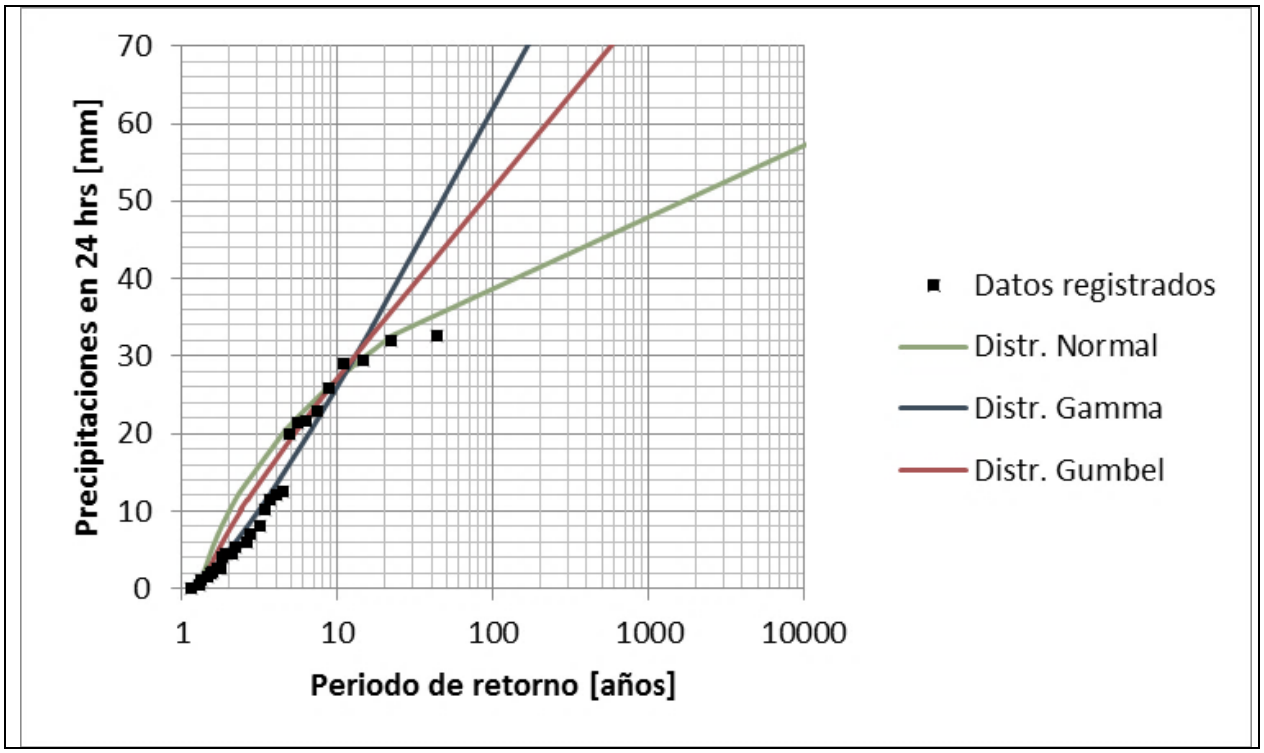
En conclusión se pude observar que el caudal más desfavorable es el asociado al Hidrograma SCS, el cuál además es el de mayor representatividad por considerar en su cálculo la geomorfología de la cuenca, siendo finalmente la metodología adecuada para el cálculo del caudal.

ANEXO A: Registros Pluviométricos de Estación Copiapó

AÑO	FECHA	MAXIMA EN 24 HS. PRECIPITACION (mm)
1971	26/06	2,50
1972	05/07	6,00
1973	07/06	8,00
1974	10/09	2,60
1975	31/05	4,00
1976	27/05	8,00
1977	11/06	12,50
1978	01/01	0,00
1979	28/03	0,50
1980	25/07	32,00
1981	06/08	7,00
1982	25/09	1,50
1983	30/06	29,00
1984	10/07	12,00
1985	22/07	4,40
1986	18/05	4,50
1987	24/07	22,80
1988	21/05	1,00
1989	20/08	11,40
1990	01/01	0,00
1991	17/06	32,70
1992	27/05	25,80
1993	11/08	0,50
1994	01/01	0,00
1995	19/05	1,50
1996	01/01	0,00
1997	12/06	68,30
1998	09/06	2,20
1999	31/03	21,60
2000	23/06	21,50
2001	01/01	0,00
2002	27/08	20,00
2003	01/06	1,50
2004	20/07	5,30
2005	15/07	10,20
2006	01/01	0,00
2007	24/06	0,50
2008	20/07	6,00
2009	21/07	2,50
2010	28/05	4,50
2011	08/07	29,50
2012	05/09	0,50
2013	18/07	2,00
2014	22/05	6,00
2015	12/07	16,80
2016	01/01	0,00

ANEXO B: Resumen Test de Bondad de Ajuste

Comparación entre distintas distribuciones de probabilidades.



ANEXO C: Crecida Máxima Probable

Precipitación Máxima Probable

Pmáx =	**68,3**	[mm]	*Máxima precipitación en 24 hrs registrada
Pprom =	**9,76**	[mm]	*Precipitación media anual en 24 hrs
Desviación =	**13,2**	[mm]	*Desviación estándar de datos
Km2 =	**4,43**		*Valor asumido de factor de frecuencia, por Stowhas, 1996

Xn-m/Xn =	**0,904**	
Sn-m/Sn =	**0,744**	

X' =	0,88	*Factor de ajuste de media según diagrama
S' =	0,83	*Factor de ajuste de desviación según diagrama
X'' =	1	*Factor de ajuste Media por tamaño de muestra
S'' =	1,0125	*Factor de ajuste S por tamaño de muestra
Xn =	8,59	*Media modificada según factores de correción
Sn =	11,09	*Desviación modificada según factores de correción
F1 =	1,13	*Factor de ajuste por cantidad de datos medidos
F2 =	1	*Factor de ajuste por tamaño de cuenca

Así,

PMP (Kstowhas) = 146,5 [mm]

ANEXO D: Verni & King Modificado y Método Racional

Método de Verni & King Modificado

C(T=50) =	0,06555		*Coeficiente para 50 años. IV Región de Coquimbo
C(T=100) =	0,0684		*Coeficiente para 100 años. IV Región de Coquimbo
P24 (T=50) =	51,3	[mm]	*Precipitación en 24 hr para 50 años de periodo de retorno
P24 (T=100) =	62,6	[mm]	*Precipitación en 24 hr para 100 años de periodo de retorno
A =	0,55	[km2]	*Área de la cuencua fluvial

Caudales

Q (T=50)	0,040	[m3/s]	*Caudal para 50 años de periodo de retorno
Q (T=100)	0,042	[m3/s]	*Caudal para 100 años de periodo de retorno

Método Racional

C(T=50) =	0,02875		*Coeficiente para 50 años. IV Región de Coquimbo
C(T=100) =	0,03		*Coeficiente para 100 años. IV Región de Coquimbo
P24 (T=50) =	51,3	[mm]	*Precipitación en 24 hr para 50 años de periodo de retorno
P24 (T=100) =	62,6	[mm]	*Precipitación en 24 hr para 100 años de periodo de retorno
A =	0,55	[km2]	*Área cuenca fluvial
tc =	0,26	[hr]	*Periodo de concentración de la cuenca
CD =	0,04		*Coeficiente de duración para el tiempo de concentración
i (T=50) =	7,95	[mm/hr]	*Intensidad media de la precipitación para 50 años de periodo de retorno
i (T=100) =	9,70	[mm/hr]	*Intensidad media de la precipitación para 100 años de periodo de retorno

Caudales

Q (T=50)	0,035	[m3/s]	*Caudal para 50 años de periodo de retorno
Q (T=100)	0,044	[m3/s]	*Caudal para 100 años de periodo de retorno