**APENDICE N°4.3.3.**
**REPORTE TÉCNICO: CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA**

# DECLARACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL
# PROYECTO
# DEPÓSITO DE RELAVES FILTRADOS CM FLORIDA
# APENDICE Nº 4.3.3

# REPORTE TÉCNICO
# CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA

ELABORADO PARA

COBRE - FIERRO
COMPAÑIA MINERA FLORIDA S.A

INERCO



General Flores 90, Providencia · Santiago · Chile · Fono (+56 ) 2 2963 8560 · www.inercochile.com · www.ial.cl

**ENERO DE 2017**

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

**1. INTRODUCCIÓN ..... 3**
**2. ÁREA DE INFLUENCIA ..... 3**
**3. RESULTADOS ..... 5**
3.1. ANTECEDENTES GENERALES ..... 5
3.2. METODOLOGÍA ..... 6
*3.2.1. Índice de Compacidad de Gravelius (Kc) ..... 6*
*3.2.2. Relieve: Curva Hipsométrica e Histograma ..... 7*
*3.2.3. Pendiente Media del Cauce Principal y Cuenca ..... 8*
*3.2.4. Densidad de Drenaje (Dd) ..... 9*
*3.2.5. Tiempo de Concentración (Tc) ..... 10*
3.3. RESULTADOS ..... 10
*3.3.1. Cálculo de Índices y Parámetros ..... 12*
*3.3.2. Relieve: Curva Hipsométrica e Histograma de Frecuencias Altimétricas ..... 13*
*3.3.3. Pendiente Media del Cauce Principal y Cuenca ..... 22*
*3.3.4. Densidad de Drenaje (Dd) ..... 23*
*3.3.5. Tiempo de Concentración (Tc) ..... 24*
3.4. MICROCUENCAS ..... 24
3.5. AGUAS SUBSUPERFICIALES ..... 30
3.6. CONCLUSIONES ..... 33
**4. BIBLIOGRAFÍA ..... 34**

## ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO Nº 3.2.1. CARACTERIZACIÓN CUALITATIVA DE LAS CUENCAS SEGÚN SU PENDIENTE ... 9
CUADRO Nº 3.3.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LAS MICROCUENCAS ÁREA PROYECTO . 10
CUADRO Nº 3.3.2. ÍNDICE DE COMPACIDAD DE GRAVELLUS (KC) ..... 12
CUADRO Nº 3.3.3. PENDIENTE MEDIA DEL CAUCE PRINCIPAL ..... 23
CUADRO Nº 3.3.4 DENSIDAD DE DRENAJE ..... 23
CUADRO Nº 3.3.5 TIEMPO DE CONCENTRACIÓN (TC) ..... 24
CUADRO Nº 3.4.1 DATOS MORFOMÉTRICOS CUENCAS DE INTERÉS ..... 26
CUADRO Nº 3.4.2 PARÁMETROS HIDROLÓGICOS CUENCAS DE INTERÉS ..... 27
CUADRO Nº 3.4.3 RAZÓN C (T)/C (10) PROPUESTA EN LA METODOLOGÍA DE VERNI-KING ..... 28
CUADRO Nº 3.4.4 PP MÁXIMA EN 24 HRS. ESTACIÓN LA SERENA ..... 28
CUADRO Nº 3.4.5 COMPILADO DE RESULTADOS ANÁLISIS DE FRECUENCIAS ..... 29
CUADRO Nº 3.4.6 CÁLCULO DE CAUDALES PARA DISTINTOS PR CUENCA APORTANTE 1 ..... 29
CUADRO Nº 3.4.7 CÁLCULO DE CAUDALES PARA DISTINTOS PR CUENCA APORTANTE 2 ..... 29
CUADRO Nº 3.5.1. UBICACIÓN POZO DE MONITOREO DESCARTADO POR BAJO NIVEL FREÁTICO 30
CUADRO Nº 3.5.2. UBICACIÓN DE NUEVOS POZOS DE MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS .... 31

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA Nº 3.2.1. CURVAS HIPSOMÉTRICAS ..... 7
FIGURA Nº 3.2.2. EJEMPLO HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS ALTIMÉTRICAS ..... 8
FIGURA Nº 3.3.1. MICROCUENCAS DELIMITADAS EN ÁREA GENERAL DE ESTUDIO ..... 11
FIGURA Nº 3.3.2. CURVA HIPSOMÉTRICA CUENCA MINA FLORIDA ..... 13
FIGURA Nº 3.3.3. BLOQUES EN CAJA DE QUEBRADA DE CUENCA MINA FLORIDA ..... 14
FIGURA Nº 3.3.4. HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS ALTIMÉTRICAS CUENCA MINA FLORIDA ..... 14
FIGURA Nº 3.3.5. CURVA HIPSOMÉTRICA CUENCA MINA FLORIDA ORIENTE ..... 15
FIGURA Nº 3.3.6. HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS ALTIMÉTRICAS CUENCA MINA FLORIDA ORIENTE ..... 16
FIGURA Nº 3.3.7. CURVA HIPSOMÉTRICA CUENCA CERRO CARACHENTO ..... 17
FIGURA Nº 3.3.8. HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS ALTIMÉTRICAS CUENCA CERRO CARACHENTO ..... 17
FIGURA Nº 3.3.9. CURVA HIPSOMÉTRICA CUENCA QUEBRADA EL RETAMO ..... 18
FIGURA Nº 3.3.10. HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS ALTIMÉTRICAS CUENCA QUEBRADA EL RETAMO ..... 19
FIGURA Nº 3.3.11. CURVA HIPSOMÉTRICA CUENCA QUEBRADA LOS RINCONES ..... 20
FIGURA Nº 3.3.12. HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS ALTIMÉTRICAS CUENCA QUEBRADA LOS RINCONES ..... 20
FIGURA Nº 3.3.13. CURVA HIPSOMÉTRICA CUENCA VALLE TAMBILLOS ..... 21
FIGURA Nº 3.3.14. HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS ALTIMÉTRICAS CUENCA VALLE TAMBILLOS ..... 22
FIGURA Nº 3.4.1. CUENCAS HIDROLÓGICAS APORTANTES EN GOOGLE EARTH ..... 25
FIGURA Nº 3.4.2. PLANO PLANTA CUENCAS APORTANTES ..... 25
FIGURA Nº 3.4.3. CURVA COEFICIENTE DURACIÓN PROMEDIO ..... 27
FIGURA Nº 3.5.1. UBICACIÓN DE LOS POZOS DE MONITOREO ..... 32

## 1. INTRODUCCIÓN

La Compañía Minera Florida S.A. (en adelante e indistintamente “Minera Florida” o “el Titular”), somete a evaluación la Declaración de Impacto Ambiental (DIA) del proyecto minero denominado “Depósito de Relaves Filtrados CM Florida” (en adelante “el Proyecto”), a la implementación de un nuevo depósito de relaves filtrados para la Planta de Beneficio de CM Florida, Faena Tambillos, actualmente en funcionamiento. Dicho depósito estará conformado por siete terrazas con una altura estimada de siete metros cada una. Conforme a la producción de relaves de la Planta de Beneficio, equivalente a 2.880 ton/día, se ha estimado una capacidad de almacenamiento de 3.540.293 $m^3$ de relaves, equivalentes a 7.256.600 ton.

En forma complementaria, el sistema requerirá la construcción de una serie de unidades de apoyo a la actividad:

- Ducto de conducción de relaves.
- Planta de filtrado de relaves.
- Sistema de drenaje y recuperación de aguas.
- Muro de pie del depósito.
- Oficina sector Planta de Filtrado.
- Bodega de sustancias peligrosas.

En este contexto, y de acuerdo a lo establecido en el Artículo 19º letra c del D.S. Nº 40/12 Reglamento del Sistema de Impacto Ambiental (RSEIA) del Ministerio de Medio Ambiente, el Titular deberá presentar todos aquellos antecedentes que justifiquen la inexistencia de aquellos efectos, características o circunstancias del artículo 11 de la Ley que pueden dar origen a la necesidad de efectuar un Estudio de Impacto Ambiental.

Por lo anterior, a continuación se presentan los antecedentes relativos al componente hidrológico que permitirán evaluar que el Proyecto “Depósitos de Relaves Filtrados CM Florida” no genera efectos adversos significativos sobre la cantidad y calidad de los recursos naturales renovables, en ese caso el agua, como consecuencia del emplazamiento de sus partes, obras o acciones; o sus emisiones, efluentes o residuos, en términos de la permanencia del recurso asociada a su disponibilidad, utilización y aprovechamiento racional futuro.

## 2. ÁREA DE INFLUENCIA

En atención a lo establecido por el Artículo 19º letra b.1. del Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (RSEIA), a continuación se define y justifica el área de influencia para el componente hidrológico, considerando los impactos ambientales potencialmente significativos y a partir del espacio geográfico en el cual se emplazan las obras, partes y acciones asociadas al proyecto:

Para efectos del recurso hídrico el área de influencia ha sido establecida a partir de las partes, obras y/o acciones asociadas al Proyecto que en sus distintas fases pudiesen afectar potencialmente y en una magnitud variable la cantidad y/o calidad del recurso hídrico, tanto superficial como subterráneo del área.

De esta forma, se definió que el área de influencia comprende aquellas zonas de intervención directa del Proyecto, considerando que durante las distintas fases del Proyecto, sus partes, obras y acciones no contemplan la extracción o utilización de los recursos hídricos, y no se prevén afecciones sobre cuerpos de agua superficiales y subsuperficiales, conforme a los antecedentes presentados a evaluación tanto en la Descripción del Proyecto, como en el Permiso Ambiental Sectorial del artículo N°139 adjunto en el Anexo Nº 5.3.

El Proyecto, en un contexto hidrológico a nivel regional, se encuentra inserto entre las cuencas exorreicas de los ríos Elqui y Limarí, en forma específica en la cuenca Pre-andina de Lagunillas y a nivel local en el Valle de Las Cardas.

Cabe indicar que las actividades del Proyecto no tienen relación con la afectación del recurso hídrico en tanto no se considera la extracción de agua o vertimiento de efluentes, para estos efectos se implementará un canal de contorno para el manejo de las aguas superficiales provenientes de las cuencas aportantes y, para las aguas subterráneas, se ha establecido un sistema de impermeabilización y de drenaje para el manejo las aguas recuperadas del depósito de relaves filtrados. No obstante lo anterior, se desarrollará un control continuo a la calidad de las aguas generadas por el Proyecto (descartando de este modo la contaminación del suelo y de las aguas subterráneas. Ver Anexo Nº 5.3: PAS 139).

El Proyecto contempla el acopio de relaves filtrados en el sector Sur de la Planta de Beneficios, debido a la implementación del mismo y a la naturaleza de los residuos, se contempla la implementación de obras de drenaje de las aguas de recuperación provenientes de los mismos relaves, las que serán acumuladas y recirculadas al proceso productivo de flotación del mineral de cobre. Conforme a lo anterior y en virtud de asegurar la no afectación de la calidad de las aguas tanto superficiales como subsuperficiales, se desarrollará un monitoreo continuo de la calidad de las aguas en el área de Proyecto.

# 3. RESULTADOS

## 3.1. Antecedentes generales

El Proyecto se localiza en la Región de Coquimbo, las principales características del comportamiento hidrológico de esta región, están dadas por el avance de la latitud conforme ésta avanza de Norte a Sur, determina el aumento de las precipitaciones de forma general, definiendo regímenes de alimentación pluvio-nivales de los cursos fluviales permanentes presentes en la región (Elqui, Limarí y Choapa) cuyas cabeceras se localizan en la alta cordillera andina (3.000 a 4.500 m); además cabe destacar una cantidad importante de quebradas y esteros existentes, que se caracterizan por un régimen dependiente de la irregularidad de las precipitaciones y por el poco desarrollo areal de sus cuencas. Con respecto a las quebradas mencionadas, se puede señalar que sólo actúan como recarga en el sistema hidrogeológico del área, los procesos de infiltración de las precipitaciones locales, no habiendo en la cuenca cauces importantes que contribuyan a esta recarga, salvo los eventuales derrames de aguas de riego.

En un contexto hidrológico a nivel regional, el Proyecto se encuentra inserto en la cuenca Pre-andina de Lagunillas, la cual se localiza entre las hoyas hidrográficas exorreicas de los ríos Elqui y Limarí. La cuenca posee una superficie de 442,36 $km^2$ (Errázuriz, 1987); los principales afluentes de la quebrada de Lagunillas son las quebradas de Martínez y El Peñón, ambas posee un régimen de alimentación pluvial dada su ubicación relativamente cercana a la costa y el uso del recurso agua de ésta dado principalmente por el de regadío en la agricultura. Además se agrega que dada la irregularidad pluviométrica y al alternancia entre años secos y húmedos permite el crecimiento de una vegetación que se caracteriza por un constante estado de tolerancia y latencia, además de un desarrollo irregular y de grandes adaptaciones a condiciones xerófitas de determinados hábitats.

Desde un punto de vista local, el nuevo depósito de relaves se inserta en el área de la Mina Florida, específicamente en la Planta Tambillos y en la localidad de Tambillos.

## 3.2. Metodología

En primera instancia, el método empleado consiste en la búsqueda de información bibliográfica, principalmente asociada al área de estudio e información relativa al estudio de las cuencas hidrográficas en general. Para efectos de la caracterización de las componentes Hidrológica e Hidrográfica del Proyecto, se procedió a subdividir el área circundante (de influencia) al Proyecto en cinco (5) microcuencas, y éstas a su vez han sido evaluadas de acuerdo a parámetros e índices que son:

- Índice de Compacidad de Gravelius (Kc);
- Relieve: Curva Hipsométrica e Histograma de Frecuencias Altimétricas;
- Pendiente Media del Cauce Principal;
- Densidad de Drenaje (Dd); y,
- Tiempo de Concentración (Tc).

A continuación, se explica en que consiste cada uno de los índices y parámetros a evaluar en cada una de las microcuencas delimitadas para el presente estudio.

### 3.2.1. Índice de Compacidad de Gravelius (Kc)

Este índice está definido como la relación entre el perímetro P y el perímetro de un círculo que contenga la misma área A de la cuenca hidrográfica:

*Kc = Perímetro de la cuenca / Perímetro de un círculo de igual área*

$$Kc = 0{,}282 * \left(\frac{P}{\sqrt{A}}\right)$$

*Donde:*

- P = Perímetro de la cuenca
- A = Área de la cuenca.

Según el valor que tome Kc, la cuenca tendrá diferente forma:

- Kc = 1,00 / Representa una cuenca redonda
- Kc = 1,25 / Representa una cuenca oval redonda
- Kc = 1,50 / Representa una cuenca oblonga
- Kc = 1,75 / Representa una cuenca rectangular-oblonga

El índice será mayor o igual a la unidad, de modo que cuanto más cercano a ella se encuentre, más se aproximará su forma a la de un círculo, en cuyo caso la cuenca tendrá mayores posibilidades de producir crecidas (caudales) dada su simetría, dado que las

distancias relativas de los puntos de la divisoria con respecto a uno central, no presenta diferencias mayores y el tiempo de concentración se hace menor, por lo tanto mayor será la posibilidad de que las ondas de crecida sean continuas. Por contrapartida, cuando Kc se aleja más del valor unidad significa un mayor alargamiento en la forma de la cuenca (menos compacta). Para un cuadrado su valor es aproximadamente 1,12.

### 3.2.2. Relieve: Curva Hipsométrica e Histograma

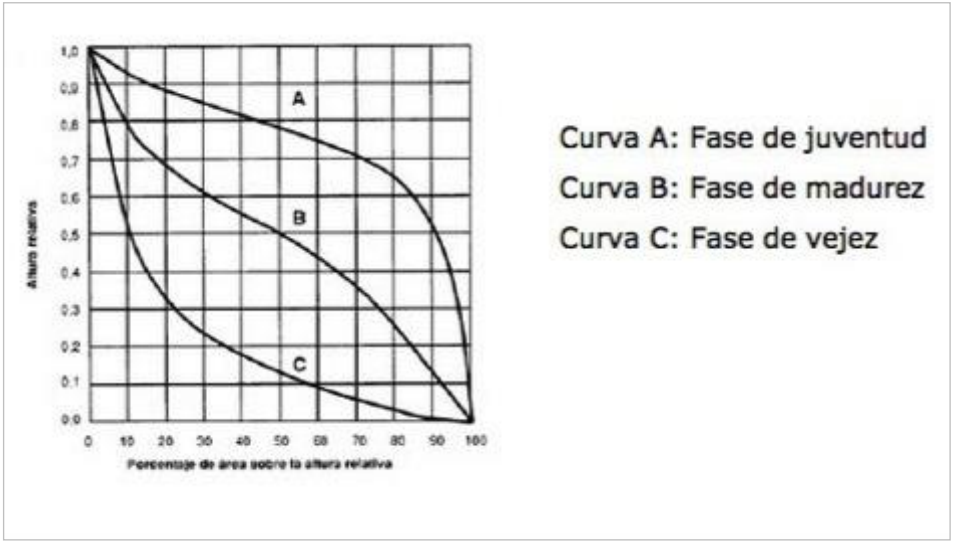
El relieve es un factor importante en el comportamiento de la cuenca hidrográfica, ya que cuanto mayores son los desniveles en la cuenca, mayor es la velocidad de circulación y menor el tiempo de concentración, lo que implica un aumento del caudal punta.

- **Curva Hipsométrica**

La forma de cuantificar el relieve de una cuenca es por medio de la curva hipsométrica, en la que se representa en ordenadas alturas de la cuenca, y en abscisas la superficie de la cuenca que está por encima de esa cota.

Según la forma de la curva hipsométrica obtenida, las cuencas se pueden clasificar de la siguiente forma:

**Figura Nº 3.2.1. Curvas hipsométricas**




Fuente: Strahler, 1952.

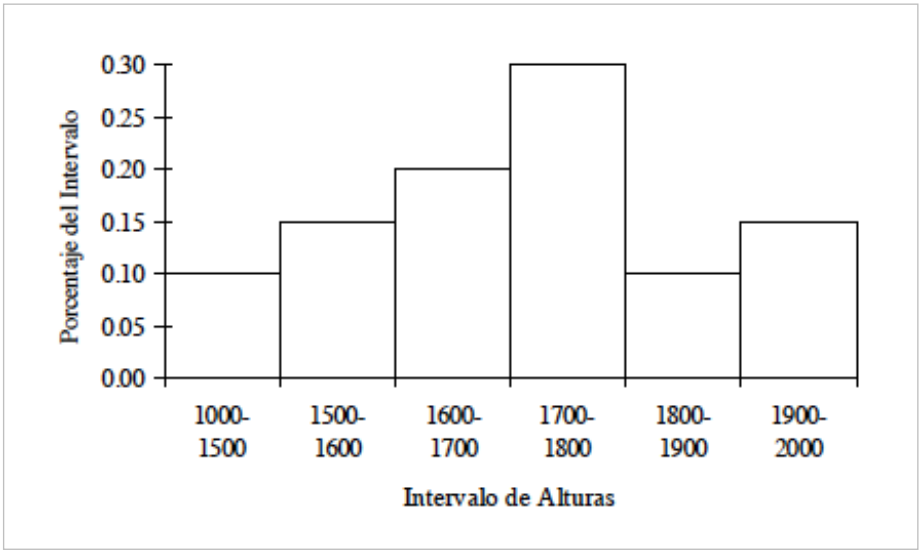
La curva superior (curva A) refleja una cuenca con un gran potencial erosivo; la curva intermedia (curva B) es característica de una cuenca en equilibrio; y la curva inferior(curva C) es típica de una cuenca sedimentaria.

**<u>Histograma de Frecuencias Altimétricas</u>**

Es la representación de la superficie en $km^2$ o en porcentaje, comprendida entre dos niveles, siendo la marca de clase el promedio de las alturas. De esta forma, con diferentes niveles se puede formar el histograma. Este diagrama de barras puede ser obtenido de

los mismos datos de la curva hipsométrica; en síntesis, contiene la misma información que ésta pero con una representación diferente, otorgando una idea probabilística de la variación de la altura en la cuenca.

**Figura Nº 3.2.2. Ejemplo histograma de frecuencias altimétricas**




Fuente: Strahler, 1952.

### 3.2.3. Pendiente Media del Cauce Principal y Cuenca

El índice de pendiente media de los cauces se obtiene dividiendo el desnivel existente, entre la cabecera y el punto de desembocadura del cauce, dividida por la longitud del cauce entre los dos puntos (Gaspari, 2002). Dado que los valores se expresan en metros, el índice obtenido es adimensional.

$$Sm = \frac{Hmáx - Hmín}{Lc}$$

*Donde:*

- Hmáx = Cota máxima.
- H mín = Cota mínima.
- Lc = Largo del cauce entre las cotas.

La pendiente media de la cuenca es calculada por medios digitales a través de un Modelo de Elevación Digital (DEM). Pérez (1979) propone la siguiente caracterización cualitativa de las cuencas de acuerdo su pendiente:

**Cuadro Nº 3.2.1. Caracterización Cualitativa de las Cuencas según su Pendiente**

| PENDIENTE MEDIA CUENCA (%) | TERRENOS |
|---|---|
| 0-2 | Llano |
| 2-5 | Suave |
| 5-10 | Accidentado medio |
| 10-15 | Accidentado |
| 15-25 | Fuertemente accidentado |
| 25-50 | Escarpado |
| >50 | Muy escarpado |

Fuente: Pérez, 1979.

### 3.2.4. Densidad de Drenaje (Dd)

La densidad de drenaje (Dd) es un indicador de la respuesta de la cuenca ante un episodio de precipitaciones torrenciales, y, por tanto, condiciona la forma del hidrograma resultante en el desagüe de la cuenca. A mayor densidad de drenaje, más dominante es el flujo en el cauce frente al flujo en ladera, lo que se traduce en un menor tiempo de respuesta de la cuenca y, por tanto, un menor tiempo al pico del hidrograma.

$$Dd = \frac{\sum Li}{S}$$

- Li: longitud curso de agua (km);
- S: superficie de la cuenca ($km^2$)
- ∑ Li: suma de la longitud, en km, de todos los cursos de agua de la cuenca, permanentes o no, cualquiera que sea su importancia.

Para el cálculo de la longitud de drenaje, en cuencas de gran superficie, se utiliza un factor de corrección sobre la longitud de los cursos principales. De esta manera, se estimará la longitud total de tributarios de cada subcuenca en función de su morfología.

El factor de corrección toma valores comprendidos entre 2 y 4, siendo mayores cuanto más redondeada es la cuenca y menores cuanto más alargada sea su forma.

A partir de los valores de densidad de drenaje las cuencas se pueden clasificar atendiendo a los siguientes criterios.

*Donde:*

- Cuenca pobremente drenada: Dd ≤ 0,6 $km/km^2$
- Cuenca bien drenada: Dd > 3 $km/km^2$

### 3.2.5. Tiempo de Concentración (Tc)

El Tiempo de Concentración (Tc) es el tiempo que tarda el flujo superficial en contribuir al caudal de salida, desde el punto más alejado hasta la desembocadura de la cuenca (Chow et al., 1994; Gaspari et al., 2009). El tiempo de concentración también depende de la forma de la cuenca (López Cadenas de Llano & Mintegui Aguirre, 1987).

Para calcular el tiempo de concentración de la cuenca se ha aplicado la formulación propuesta por J.R. Temez (1991), que modifica la versión de la Instrucción de Carreteras (España) y amplía su campo de aplicación a cuencas de hasta 3.000 km$^2$ y tiempos de concentración comprendidos entre 0,25 h y 24 h, su expresión es la siguiente:

$$Tc = 0{,}3\left[\frac{L}{J^{0{,}25}}\right]^{0{,}76}$$

*Donde:*

- Tc = Tiempo de concentración en horas.
- L = Longitud del curso principal de la cuenca en Km.
- J = Pendiente de la cuenca en tanto por uno.

## 3.3. Resultados

Durante la campaña de terreno no se observó cursos de agua fluviales permanente ni tampoco evidencia de discurrimientos superficiales recientes. A continuación se caracteriza de forma general las microcuencas delimitadas para efectos del estudio del comportamiento hidrológico del área de influencia del Proyecto y sus partes:

**Cuadro Nº 3.3.1. Características generales de las microcuencas área Proyecto**

| MICROCUENCA | SUPERFICIE (m$^2$) | PERÍMETRO (m) | COTA MÁXIMA (ALTITUD) | COTA MÍNIMA (ALTITUD) | COTA MEDIA (ALTITUD) |
|---|---|---|---|---|---|
| Mina Florida | 804.300 | 3.640,26 | 1.050 m | 424 m | 739 m |
| Quebrada El Retamo | 2.547.300 | 9.564,51 | 1.205 m | 353 m | 889 m |
| Cerro Carachento | 6.482.100 | 13.103,02 | 1.250 m | 352 m | 909 m |
| Mina Florida Oriente | 7.624.500 | 13.392,76 | 1.015 m | 241 m | 531 m |
| Quebrada Los Rincones | 5.545.500 | 13.186,61 | 952 m | 250 m | 440 m |
| Valle Tambillos | 150.260.000 | 58.006,46 | 1.205 m | 165 m | 737,5 m |

Fuente: Elaboración propia, 2015.

278.000 281.000 284.000 287.000 290.000

6.663.000 6.660.000 6.657.000 6.654.000 6.651.000 6.648.000 6.645.000 6.642.000

N W E S

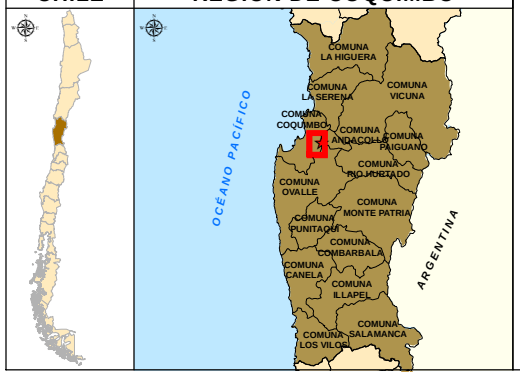
Cerro Las Cabras
Quebrada Los Rincones
Quebrada La Cordillera
Quebrada Maitencillo
D-51
D-417
RUTA 43
Quebrada
Tambillos
Las Mercedes
D-421
D-437
Las Barrancas
D-427
Quebrada El Retamo
CUENCA2
CUENCA1
CUENCA
QUEBRADA EL RETAMO
D-451
D-427
CUENCA
QUEBRADA LOS RINCONES
La Florida
CUENCA
MINA FLORIDA
Buitre
CUENCA
MINA FLORIDA ORIENTE
CUENCA
VALLE TAMBILLOS
CUENCA
CERRO CARACHENTO
Cerro Cara de Mono
D-423
Las Cardas
Las Ventanas
Quebrada La Caldera
D-433
Quebrada El Arrayan
Condoriaco
Las Perdices
RUTA 43

**CUADRO DE SUPERFICIES**

| CUENCA | SUPERFICIE (Ha) |
|---|---|
| MINA FLORIDA | 82,94 |
| MINA FLORIDA ORIENTE | 249,81 |
| CERRO CARACHENTO | 650,30 |
| QUEBRADA EL RETAMO | 792,66 |
| QUEBRADA LOS RINCONES | 568,00 |
| VALLE TAMBILLOS | 15.026,32 |
| CUENCA 1 | 86,02 |
| CUENCA 2 | 131,15 |

**CHILE**

**REGIÓN DE COQUIMBO**




**SIMBOLOGÍA**

**Limite Área Planta**
- Área Planta

**Cuencas Hidrográficas**
- Mina Florida
- Mina Florida Oriente
- Cerro Carachento
- Quebrada El Retamo
- Quebrada Los Rincones
- Valle Tambillos
- Cuenca 1
- Cuenca 2

**Red Vial**
- Caminos

**Hidrografía**
- Ríos y Esteros
- Quebradas

**DECLARACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL**
**PROYECTO DEPÓSITO DE RELAVES FILTRADOS PLANTA TAMBILLOS**

FIGURA N° 3.3.1
MICROCUENCAS DELIMITADAS
EN ÁREA GENERAL DE ESTUDIO

0 500 1.000 2.000 3.000 m.

| | | | |
|---|---|---|---|
| Escala: | 1:60.000 | Elaboró: | LMM |
| Datum: | WGS 84 | Revisó: | RC |
| Sist. de Coord.: | UTM Huso 19 S. | Aprobó : | PD |

INERCO

Fecha: Enero, 2017.

### 3.3.1. Cálculo de Índices y Parámetros

- **Índice de Compacidad de Gravelius (Kc)**

De acuerdo al índice de Gravelius (Gravelius, 1914), es posible caracterizar la forma de las cuencas. En este sentido, los valores obtenidos al aplicar la fórmula si resultan cercanos a la unidad (1), se considera que la cuenca tiene una forma más circular y que por tanto es más compacta, y va aumentando conforme disminuye la compacidad.

**Cuadro Nº 3.3.2. Índice de Compacidad de Gravellus (Kc)**

| CUENCA | SUPERFICIE ($m^2$) | PERÍMETRO (m) | (KC) |
|---|---|---|---|
| Mina Florida | 804.300 | 3.640,26 | 1,145324496 |
| Quebrada Mina Florida Oriente | 2.547.300 | 9.564,51 | 1,690938678 |
| Cerro Carachento | 6.482.100 | 13.103,02 | 1,452174214 |
| Quebrada El Retamo | 7.624.500 | 13.392,76 | 1,368578088 |
| Quebrada Los Rincones | 5.645.500 | 13.186,61 | 1,565983336 |
| Valle Tambillos | 150.260.000 | 58.006,46 | 1,335241587 |
| **TOTAL ÁREA INFLUENCIA** | **177.363.700** | **110.893,62** | **8,558240399** |

Fuente: Elaboración propia, 2015.

El índice de compacidad de la totalidad del área de influencia del Proyecto (promedio del índice de las 6 microcuencas) es de 1,335 (ver Cuadro Nº 3.3.2.), de manera que se puede considerar en términos generales que la cuenca tiene tendencia a una forma oblonga (índice cercano a 1,50) y la compacidad no es muy alta, lo que implica que los drenes de la cuenca no tienen tendencia a crecidas.

Sin embargo, el análisis de cada una de las microcuencas delimitadas, arroja que la cuenca Mina Florida tiene un índice de compacidad 1,14, valor que es más cercano a la unidad y por ende la forma de la cueca tiende a la circularidad y/o forma oval, no así con las otras cuencas, cuyos índices de compacidad fluctúan entre 1,3 y 1,6, evidenciando un alargamiento en la forma de estas cuencas que pueden ser clasificadas entre ovales redondas a rectangulares-oblongas. La microcuenca que dista en mayor medida de la circularidad es la cuenca de la quebrada Mina Florida Oriente, cuyo índice determina que su forma se acerca a rectangular-oblonga.

Si se contrasta la información del tiempo de concentración (Tc) con el índice de compacidad (Kc), se observa que hay una relación estrecha, dado que la forma de la cuenca influye de forma directa en el recorrido que debe hacer el flujo superficial hasta llegar al cauce, es así como la cuenca Mina Florida obtiene un índice de compacidad de 1,14 en contraste con el índice de compacidad de la cuenca quebrada Los Rincones, que es de 1,56; es así como una cuenca de forma redonda a redonda-oval tiene un tiempo de concentración menor que una cuenca de forma oblonga a rectangular-oblonga.

### 3.3.2. Relieve: Curva Hipsométrica e Histograma de Frecuencias Altimétricas

La curva hipsométrica (Strahler, 1952) permite conocer la distribución de masa en la cuenca de arriba hacia abajo. Se obtiene colocando en las ordenadas los valores correspondientes a las diferentes alturas de la cuenca referidos a la máxima de la misma y, en las abscisas, los valores de área que se encuentran por encima de las alturas correspondientes, referidos al área total de la cuenca. De esta forma se utilizan valores relativos (porcentuales), lo que hace posible comparar curvas de diferentes cuencas, prescindiendo de las dimensiones absolutas. Normalmente su forma es *sigmoidal*, esto significa que en su parte superior tiende a la concavidad y su forma en la parte inferior tiende a ser convexa, en cierta forma la curva parece una "*S"* invertida; el grado de sinuosidad de la curva es muy variable, lo mismo que la pendiente en el punto de inflexión.

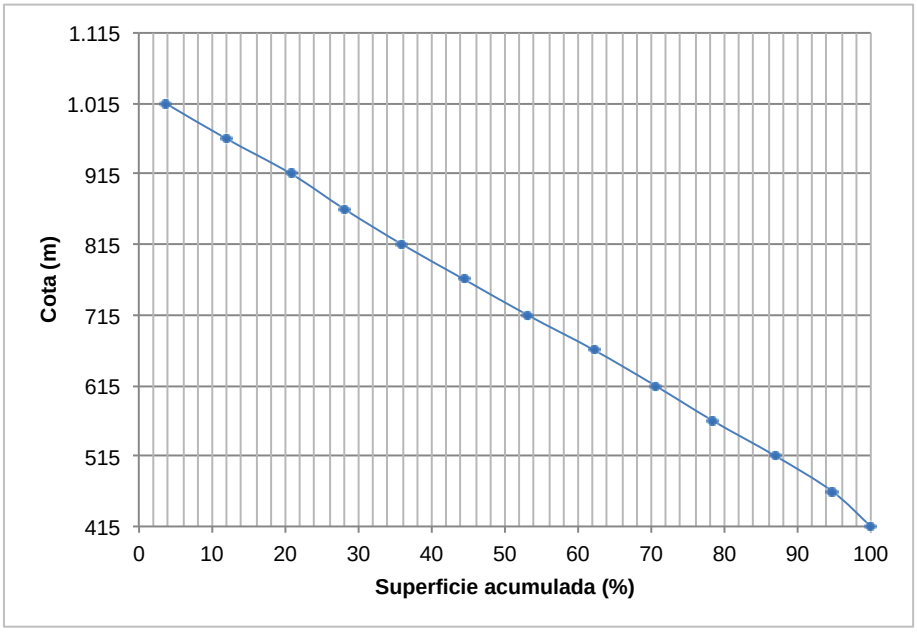
El histograma de frecuencias altimétricas, es la representación de la superficie en $km^2$ o en porcentaje, comprendida entre dos niveles, siendo la marca de clase el promedio de las alturas.

Los resultados para cada una de las cuencas se presenta a continuación:

*Cuenca Mina Florida*

La curva hipsométrica resultante para la cuenca Mina Florida, demuestra que el sistema está en equilibrio desde el punto de vista morfológico y el comportamiento de la cuenca en períodos de precipitaciones. Sin embargo su erosividad es moderada y ante eventuales precipitaciones torrenciales podría apreciarse algún grado de erosión leve en la cuenca.

**Figura Nº 3.3.2. Curva Hipsométrica Cuenca Mina Florida**




Fuente: Elaboración propia.

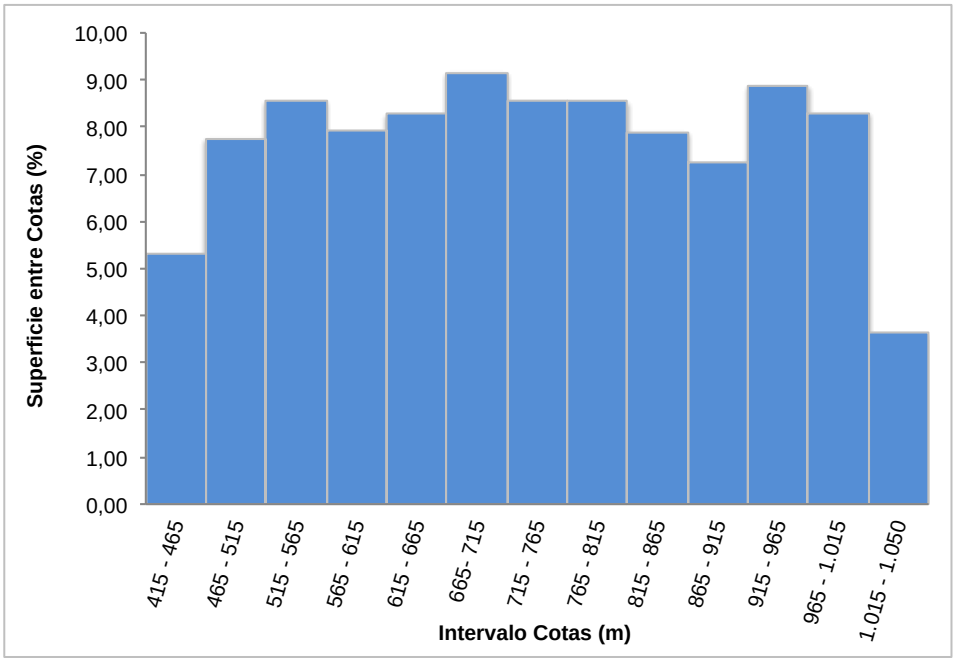
Durante la campaña de terreno, se observó en la parte alta de la cuenca la presencia de fuertes pendientes, este hecho condicionó la presencia de fenómenos erosivos en el cauce, dada la presencia de materiales del lecho que erosionan las avenidas incorporándose a la corriente y pasando a formar parte del caudal sólido del torrente, el material presente en el lecho de la quebrada dada su granulometría se clasifica como bloque y está integrado a ésta a modo de talud de gravedad.

**Figura Nº 3.3.3. Bloques en caja de Quebrada de Cuenca Mina Florida**



Fuente: Elaboración propia.

**Figura Nº 3.3.4. Histograma de Frecuencias Altimétricas Cuenca Mina Florida**



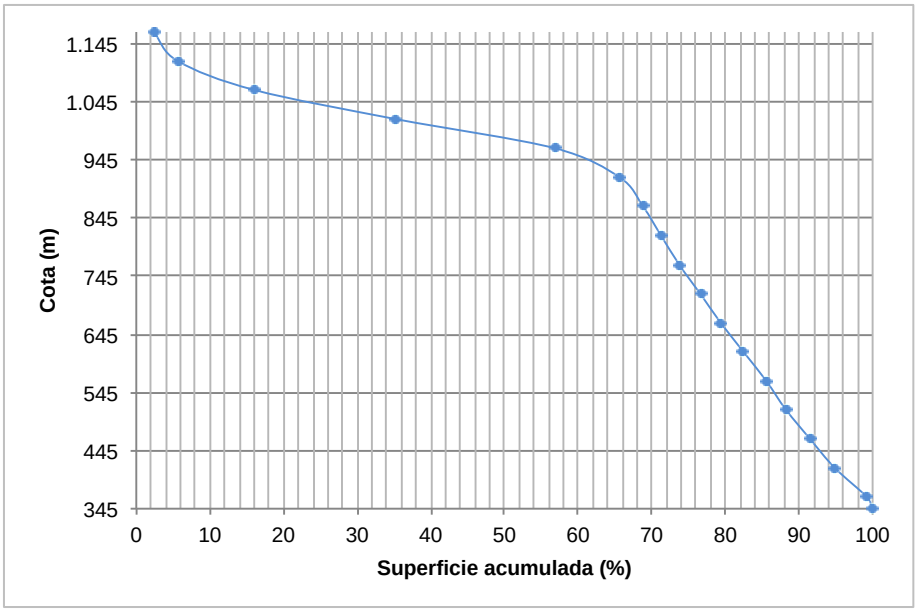

Fuente: Elaboración propia, 2015.

De acuerdo a la información del histograma, la cuenca Mina Florida posee una distribución relativamente uniforme de la superficie por intervalo de cotas, considerando que la cota menor de la cuenca es de una altitud de 415 m. y la mayor de 1.050 m., se puede determinar de acuerdo a la morfometría de la cuenca que esta tiene un cambio brusco de altitud en una superficie menor en comparación a las otras cuencas delimitadas, este sistema esta drenado por una quebrada que nace en la zona de contacto de dos vertientes en el área, considerando que el índice de compacidad es 1,14, se infiere que hay probabilidades ciertas de que el drene pueda ser escenario eventual de crecidas en períodos de lluvias torrenciales.

*Cuenca Quebrada Mina Florida Oriente*

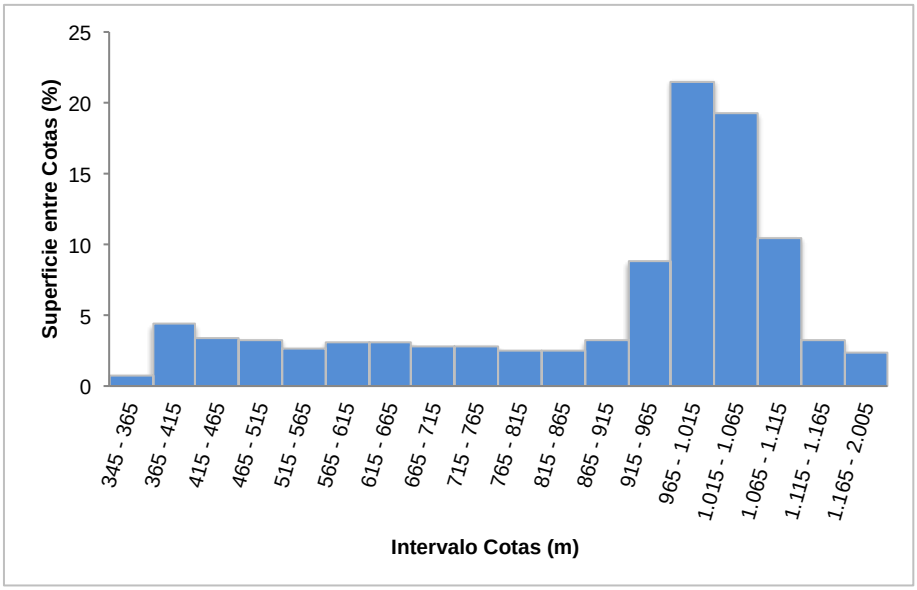
En la Figura Nº 3.3.5. se presenta la curva hipsométrica de la cuenca de la quebrada Mina Florida Oriente, la cual de acuerdo a la clasificación propuesta según la forma de ésta, corresponde a una cuenca joven en su parte alta (hasta la cota 900 aproximadamente), lo que implica un gran potencial erosivo; desde la cota 900 hasta la cota 345 m de altitud, la cuenca cambia su comportamiento, pasando a una clasificación de madurez, esto significa un comportamiento sedimentario de baja erosividad.

**Figura Nº 3.3.5. Curva Hipsométrica Cuenca Mina Florida Oriente**




Fuente: Elaboración propia, 2015.

**Figura Nº 3.3.6. Histograma de Frecuencias Altimétricas Cuenca Mina Florida Oriente**



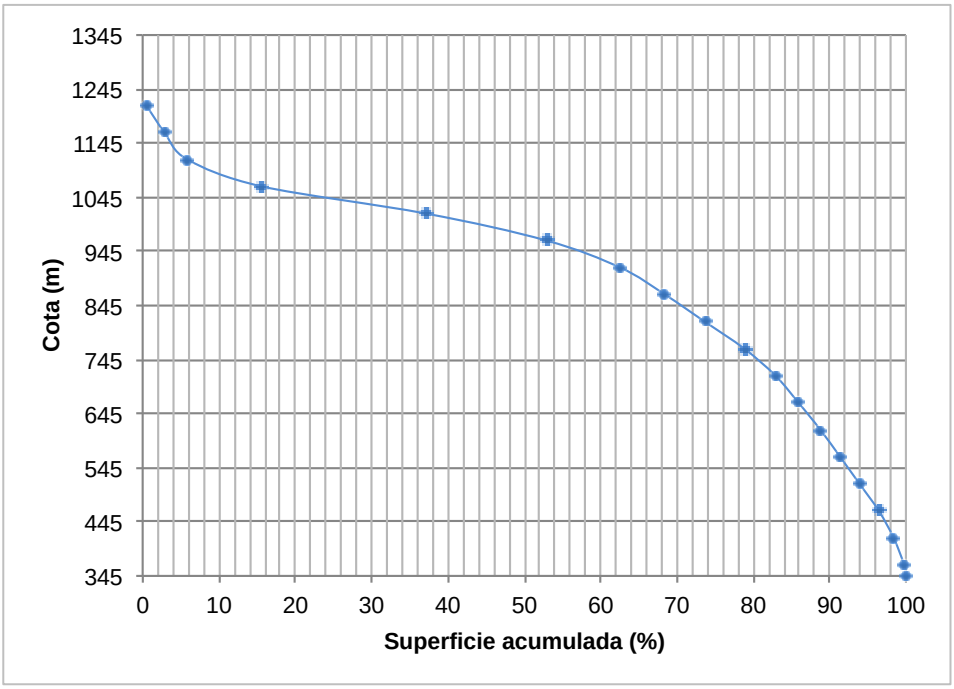

Fuente: Elaboración propia, 2015.

De acuerdo al histograma de la Figura Nº 3.3.6. la superficie de la cuenca tiene una distribución uniforme entre los intervalos de las curvas de nivel, lo que permite inferir que la pendiente del área de la cuenca varía considerablemente; se observa una excepción con respecto al intervalo entre las curvas 915 a 1.115 m de altitud las cuales contienen una superficie considerable con respecto a las curvas de nivel más bajas, esto implica que en el área comprendida por estas curvas de nivel cuenta con una mayor pendiente, además el cambio de esta es abrupto. Considerando el índice de compacidad de esta cuenca, que es de aproximadamente 1,69, se determina que su forma varía entre oblonga a rectangular-oblonga, lo que implica que la cuenca es menos compacta y el riesgo de una crecida disminuye considerablemente.

*Cuenca Cerro Carachento*

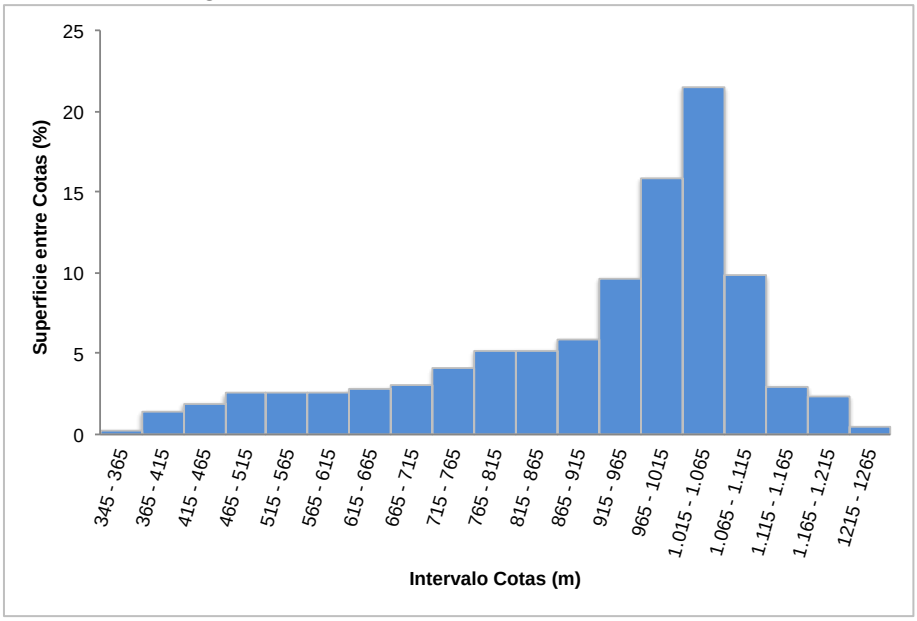
De acuerdo la curva hipsométrica de la Figura Nº 3.3.7., la cuenca Cerro Carachento presenta un estado de equilibrio; este sistema se compone de una cantidad importante de cerros y las zonas más parecidas a valles corresponden a los lechos de los cauces que discurren entre estos. La erosividad de esta sistema es moderada y está dada principalmente por factores independientes de la morfología de la cuenca, sino por los componentes de la misma, como el tipo de suelo y la consolidación de éste, etc.

**Figura Nº 3.3.7. Curva Hipsométrica Cuenca Cerro Carachento**




Fuente: Elaboración propia.

**Figura Nº 3.3.8. Histograma de Frecuencias Altimétricas Cuenca Cerro Carachento**




Fuente: Elaboración propia.

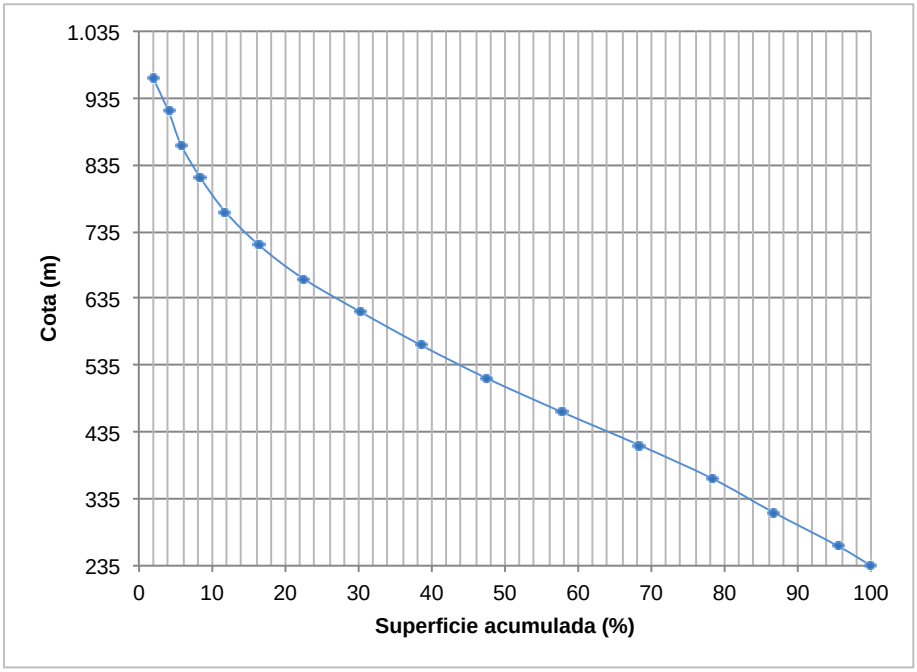
En el histograma se observa que la morfometría de la cuenca está dada por cordones montañosos de mediana altura; de acuerdo a las superficies del histograma, se observa una progresión en la superficie por intervalo de curvas de nivel, lo que permite asumir la predominancia de sistemas montañosos por sobre valles en la cuenca. El índice de

compacidad de la cuenca Cerro Carachento es de 1,45, que significa que la cuenca tiene una forma oblonga, si se considera que el valor del índice de compacidad mientras cercano a uno (1) posibilita la eventualidad de crecidas, esta cuenca posee un riesgo bajo de ser escenario de éstas.

*Cuenca Quebrada El Retamo*

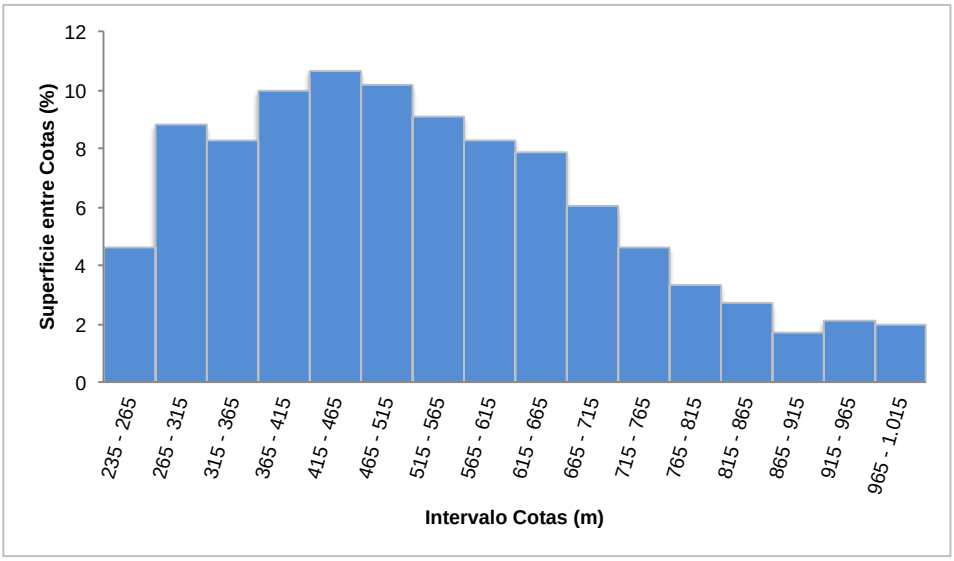
De acuerdo a la clasificación de Strahler (1952) la cuenca Quebrada El Retamo corresponde a una cuenca en fase de vejez, la cual es típica de una cuenca sedimentaria. Sin embargo, la curva hipsométrica muestra la presencia de alturas considerables en la cuenca, la pendiente de éstas altitudes no es un cambio abrupto con respecto a las bajas altitudes, por lo que se observa en la curva hipsométrica que la superficie tiene una distribución gradual inversa, conforme aumenta la altitud de la cuenca.

**Figura Nº 3.3.9. Curva Hipsométrica Cuenca Quebrada El Retamo**




Fuente: Elaboración propia.

**Figura Nº 3.3.10. Histograma de Frecuencias Altimétricas Cuenca Quebrada El Retamo**



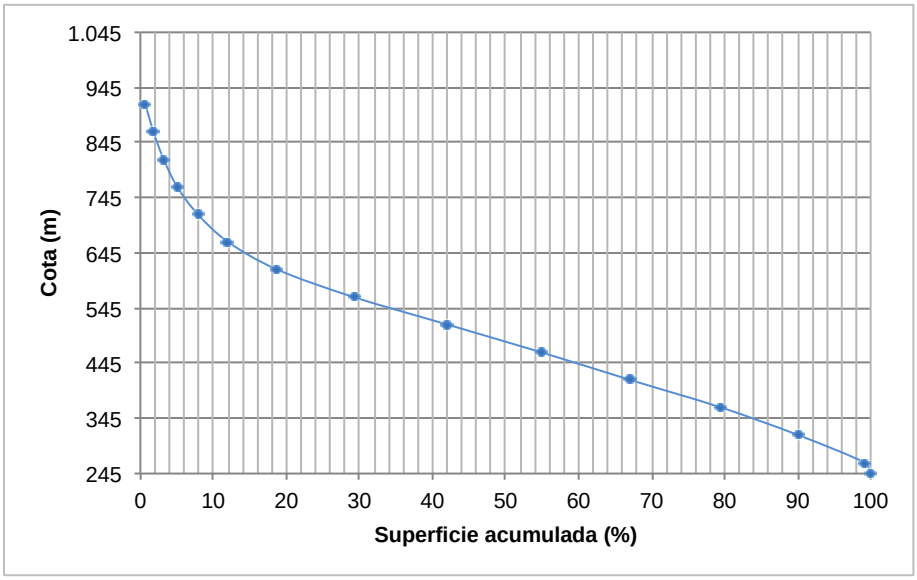

Fuente: Elaboración propia, 2015.

El histograma de la cuenca quebrada El Retamo (Figura Nº 3.3.10.), a diferencia de las cuencas anteriores, presenta una cuenca cuya superficie se distribuye de forma más equitativa entre las cotas 265 a 665 m. de altitud, lo cual permite interpretar un cambio de pendiente de forma paulatina y no abrupta como en la cuenca Mina Florida, posterior a la cota 665 m de altitud, hay un decrecimiento paulatino en la superficie ocupada por los intervalos de cotas, lo que permite inferir que si bien hay elevaciones (hasta 1.015 m de altitud), esta es progresiva y tampoco presenta cambios abruptos. Además se infiere una zona de superficie no despreciable, en el contexto del histograma, de pendiente mínima, ésta va entre las cotas 235 a 265 m de altitud. El coeficiente de compacidad de la cuenca es de 1,36, por lo tanto su forma corresponde de oval-redonda a oblonga, dada su forma y de acuerdo a la morfometría de la cuenca, se infiere que el riesgo de crecida abruptas en esta cuenca va de intermedio a mínimo.

*Cuenca Quebrada Los Rincones*

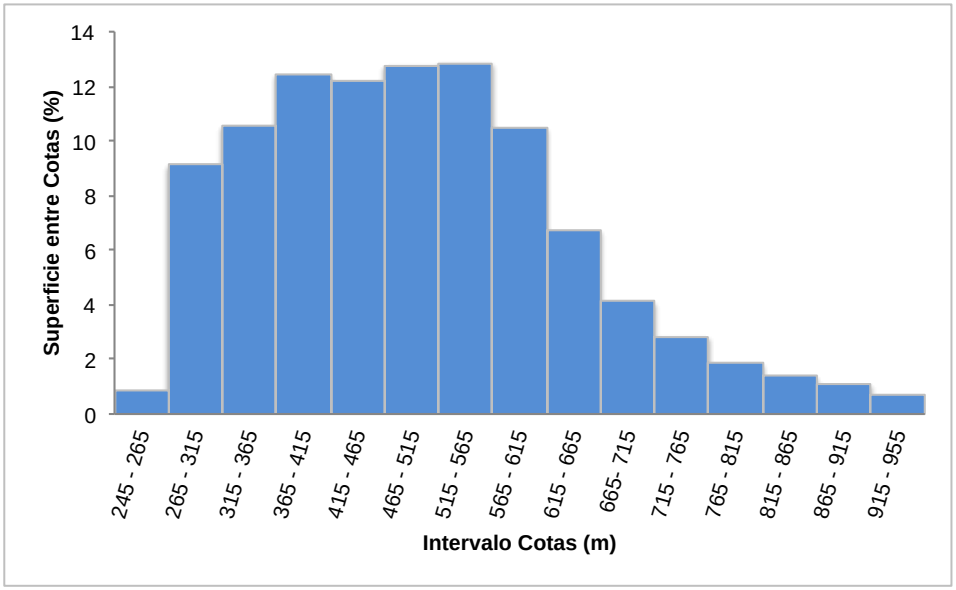
La cuenca quebrada Los Rincones, de acuerdo a la clasificación de Strahler (1952), corresponde a una cuenca en fase de vejez, esto implica que su comportamiento erosivo es típico de una cuenca sedimentaria (Figura Nº 3.3.11.). Sin embargo, al igual que la cuenca Mina Florida Oriente, la curva hipsométrica muestra la presencia de alturas considerables en la cuenca (diferencia de 700 m de altitud), la pendiente de estas altitudes no se produce de forma abrupta con respecto a las menores altitudes, se observa en la curva hipsométrica que la superficie tiene una distribución gradual inversa conforme aumenta la altitud de la cuenca.

**Figura Nº 3.3.11. Curva Hipsométrica Cuenca Quebrada Los Rincones**




Fuente: Elaboración propia.

**Figura Nº 3.3.12. Histograma de Frecuencias Altimétricas Cuenca Quebrada Los Rincones**



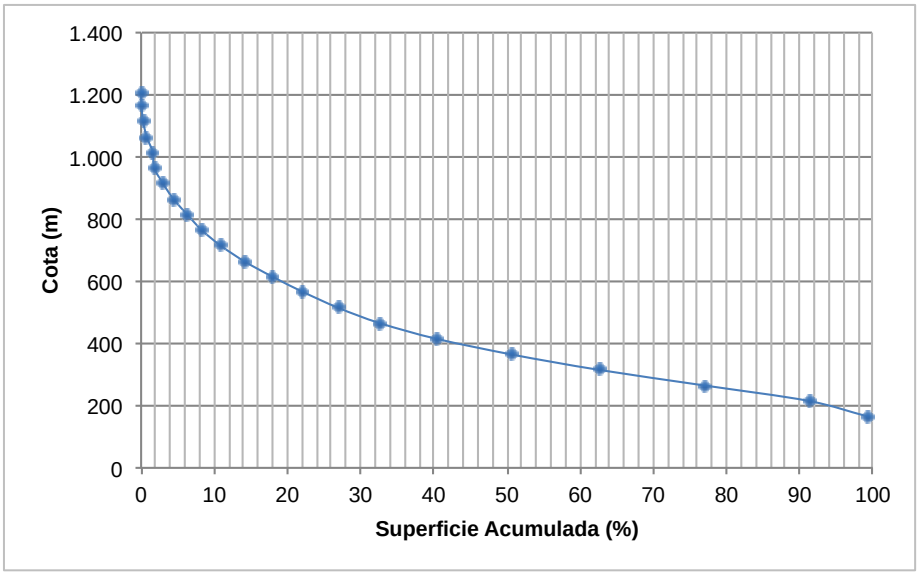

Fuente: Elaboración propia.

Para la cuenca quebrada Los Rincones, el histograma evidencia una superficie importante para el intervalo de curvas de nivel entre 265 y 615 m. de altitud, poniendo en evidencia la existencia de un área en laderas importante en este rango, dado por una pendiente marcada de avance progresivo (no abrupto) hasta alcanzar en ciertos sectores una altitud de 955 m., estos sectores corresponden a vertientes de cordones montañosos de mediana altura que componen la cuenca.

*Cuenca Valle Tambillos*

La cuenca Valle Tambillos, de acuerdo a la clasificación de Strahler (1952), se encuentra en una fase de vejez (Figura Nº 3.3.13), esto implica que su comportamiento erosivo es típico de una cuenca sedimentaria, lo cual es constatado en terreno, dado que corresponde a un valle con una gran extensión en pendientes mínimas, a excepción de los límites de la cuenca, que corresponden a lomajes adyacente al área mina, y en el área sur de ésta, coincide con los cordones transversales, típicos de la geomorfología del Norte Chico. Al igual que las curvas hipsométricas de las cuencas Mina Florida Oriente y Los Rincones, la curva presenta superficies mínimas en extensión, pero cuya altitud se diferencia incluso en 1000 m. con respecto a la cota menor de la cuenca (cota máxima de 1.210 m), sin embargo la distribución de la superficie en la cuenca se da de forma mayoritaria en el valle de la misma, cuya superficie es considerable con respecto a las otras microcuencas delimitadas para efectos del estudio.

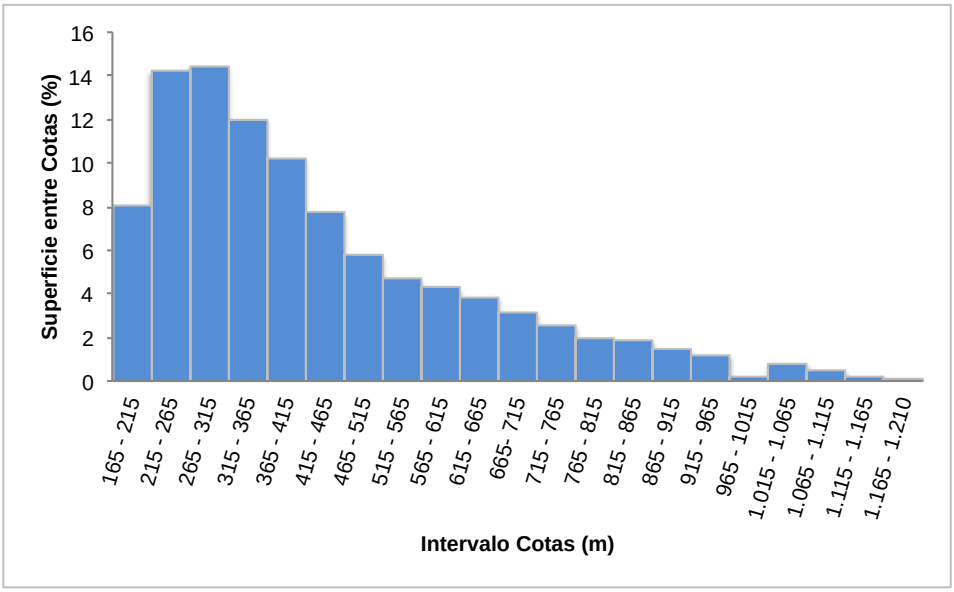
**Figura Nº 3.3.13. Curva Hipsométrica Cuenca Valle Tambillos**




Fuente: Elaboración propia.

Para la cuenca quebrada Valle Tambillos, el histograma evidencia una superficie importante para el intervalo de curvas de nivel entre 165 y 515 m de altitud, poniendo en evidencia la existencia de un área en laderas importante en este rango, dado por una pendiente marcada de avance tanto progresivo como abrupto (cordones transversales), hasta alcanzar en ciertos sectores una altitud de 1.210 m, estos sectores corresponden a vertientes de cordones montañosos de mediana altura que componen la cuenca y el rasgo geomorfológico típico del Norte Chico, los cordones transversales.

**Figura Nº 3.3.14. Histograma de Frecuencias Altimétricas Cuenca Valle Tambillos**




Fuente: Elaboración propia.

### 3.3.3. Pendiente Media del Cauce Principal y Cuenca

De acuerdo al Cuadro Nº 3.3.3., la cuenca con mayor pendiente media es la cuenca Mina Florida con un 51,28%, lo cual significa una cuenca muy escarpada, valor que prácticamente duplica la pendiente de la cuenca quebrada Los Rincones y casi triplica la pendiente de la Cuenca Valle Tambillos.

Durante la campaña de terreno se constató la situación anteriormente descrita, en la cual se observó que las vertientes libres que conforman la cuenca tienen una pendiente similar e incluso mayor a la media; el sector cuya pendiente es menor corresponde al lecho de la quebrada y es de un área acotada con respecto a la superficie total de la cuenca, esto ha provocado como efecto directo, la acumulación de material de gran granulometría (bloques) en el lecho del río, los cuales provienen de una de las vertientes (cara libre rugosa) que componen la cuenca. Con respecto a la cuenca Valle Tambillos, se observó que esta corresponde en su mayor extensión a una cuenca depositacional, que a pesar de promediar una pendiente de 19,81%, lo cual de acuerdo a la caracterización propuesta por Pérez (1979) corresponde a una cuenca *Fuertemente Accidentada*, este valor está dado por los lomajes presentes en el perímetro de la cuenca y el sistema de cordones montañosos de mediana altitud al Sur de esta que la enmarcan (cordones transversales).

Si se considera la información de los histogramas para las cuencas quebrada Mina Florida Oriente, Cerro Carachento, quebrada El Retamo y quebrada Los Rincones, se puede observar que éstos a pesar de poseer incluso altitudes mayores en ciertos sectores acotados con respecto a la cuenca Mina Florida, dada la diferencia de superficie notoria entre éstas y la cuenca Mina Florida, determinan que la pendiente media de sus cuencas sea menor. De acuerdo a la clasificación de Pérez (1979), estas cuencas poseen un terreno que va de fuertemente accidentado a escarpado.

**Cuadro Nº 3.3.3. Pendiente media del cauce principal**

| CUENCA | SUPERFICIE ($m^2$) | PERÍMETRO (m) | COTA MÁX. (m) | COTA MÍN. (m) | LONGITUD CAUCE (m) | PENDIENTE MEDIA CAUCE (m/m) | PENDIENTE MEDIA CUENCA (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Mina Florida | 804.300 | 3.640,26 | 675 | 425 | 912,46 | 0,273984 | 51,28 |
| Mina Florida Oriente | 2.547.300 | 9.564,51 | 965 | 405 | 1.864,84 | 0,300293 | 28,59 |
| Cerro Carachento | 6.482.100 | 13.103,02 | 935 | 405 | 2.854,99 | 0,185639 | 35 |
| Quebrada El Retamo | 7.624.500 | 13.392,76 | 920 | 275 | 3.828,24 | 0,168484 | 32,9 |
| Quebrada Los Rincones | 5.645.500 | 13.186,61 | 500 | 255 | 3.199,03 | 0,076585 | 27,16 |
| Valle Tambillos | 150.260.000 | 58.006,46 | 1.205 | 165 | 315.429 | 0,003297 | 19,81 |

Fuente: Elaboración propia, 2015.

### 3.3.4. Densidad de Drenaje (Dd)

De acuerdo a la fórmula para el cálculo de la densidad de drenaje, se debe considerar la utilización de un factor de corrección para cuencas de gran tamaño, que varía entre 2 y 4, sin embargo para el caso particular de las cuencas en estudio, este factor no se aplica; esto se debe a que las superficies de las microcuencas delimitadas no hacen necesario la aplicación de este factor de corrección (su aplicabilidad es en grandes superficies).

En términos generales, las microcuencas delimitadas poseen una densidad de drenaje moderada, la cual varía entre 1,36 y 1,6 $km/km^2$; sin embargo la cuenca quebrada El Retamo y la cuenca Valle Tambillos sobresalen por su densidad de drenaje mayor, cuyo valor es de 2,06 $km/km^2$ y 2,09 $km/km^2$ respectivamente (lo que se considera una densidad de drenaje *alta)*, este valor implica que frente a episodios de precipitaciones el flujo del cauce es dominante con respecto al flujo laminar en laderas, es decir, una alta infiltración. Por el contrario, la cuenca Mina Florida tiene un valor de 1,13 $km/km^2$, por ende la escorrentía laminar tiene predominancia por sobre el flujo del cauce en la quebrada, esto permite inferir que la cuenca posee una infiltración baja (Cuadro Nº 3.3.4.).

**Cuadro Nº 3.3.4 Densidad de drenaje**

| CUENCA | SUMATORIA DRENES (km) | SUPERFICIE ($km^2$) | DD ($km/km^2$) |
|---|---|---|---|
| Mina Florida | 0,91246 | 0,8043 | 1,134477185 |
| Mina Florida Oriente | 5,2596 | 2,5473 | 2,064774467 |
| Cerro Carachento | 8,8356 | 6,4821 | 1,363076781 |
| Quebrada El Retamo | 12,2703 | 7,6245 | 1,609325202 |
| Quebrada Los Rincones | 9,0336 | 5,6455 | 1,600141706 |
| Valle Tambillos | 315,429 | 150,26 | 2,09922135 |

Fuente: Elaboración propia.

### 3.3.5. Tiempo de Concentración (Tc)

Dado que el tiempo de concentración es el tiempo que tarde el flujo laminar en aportar al caudal de evacuación de la cuenca, medido desde el punto más alejado de la cuenca hasta la desembocadura de ésta, se observa con claridad para las cuencas estudiadas, que conforme la longitud del cauce aumenta, el tiempo de concentración también lo hace.
De acuerdo al Cuadro Nº 3.3.5., la cuenca Mina Florida, cuyo cauce tiene la menor longitud (0,91 km) tiene el menor tiempo de concentración (0,357 h); por otro lado, la cuenca cuyo cauce tiene la mayor longitud es la cuenca Valle Tambillos (20,10 km) y su tiempo de concentración a su vez es el mayor de las cuencas (8,865 h), lo cual determina de forma fehaciente que el tiempo de concentración guarda directa relación con la forma de la cuenca, su superficie y la longitud del drene principal.

**Cuadro Nº 3.3.5 Tiempo de concentración (Tc)**

| CUENCA | COTA MÁX. (m) | COTA MÍN. (m) | LONGITUD CAUCE (km) | PENDIENTE (m/m) | TC (h) |
|---|---|---|---|---|---|
| Mina Florida | 675 | 425 | 0,91 | 0,274 | 0,357 |
| Mina Florida Oriente | 965 | 405 | 1,86 | 0,300 | 0,606 |
| Cerro Carachento | 935 | 405 | 2,85 | 0,186 | 0,916 |
| Quebrada El Retamo | 920 | 275 | 3,83 | 0,168 | 1,169 |
| Quebrada Los Rincones | 500 | 255 | 3,20 | 0,077 | 1,182 |
| Valle Tambillos | 890 | 165 | 20,10 | 0,003 | 8,865 |

Fuente: Elaboración propia.

## 3.4. Microcuencas

De acuerdo a los antecedentes presentados en el Anexo 5.4 PAS 157, existen dos microcuencas que se relacionan directamente con el área de Proyecto, y que de acuerdo a la información presentada en este documento, se encuentran insertas en la cuenca Valle Tambillos.

El estudio hidrológico desarrollado en el marco del PAS 157 de la presente DIA, busca establecer la capacidad de porteo que debe tener el canal de contorno que se ubicará bordeando el depósito de relaves filtrados, con la finalidad de interceptar las aguas de contacto que eventualmente escurran por las quebradas de las dos cuencas ubicadas en el sector sur-este del depósito de relaves.

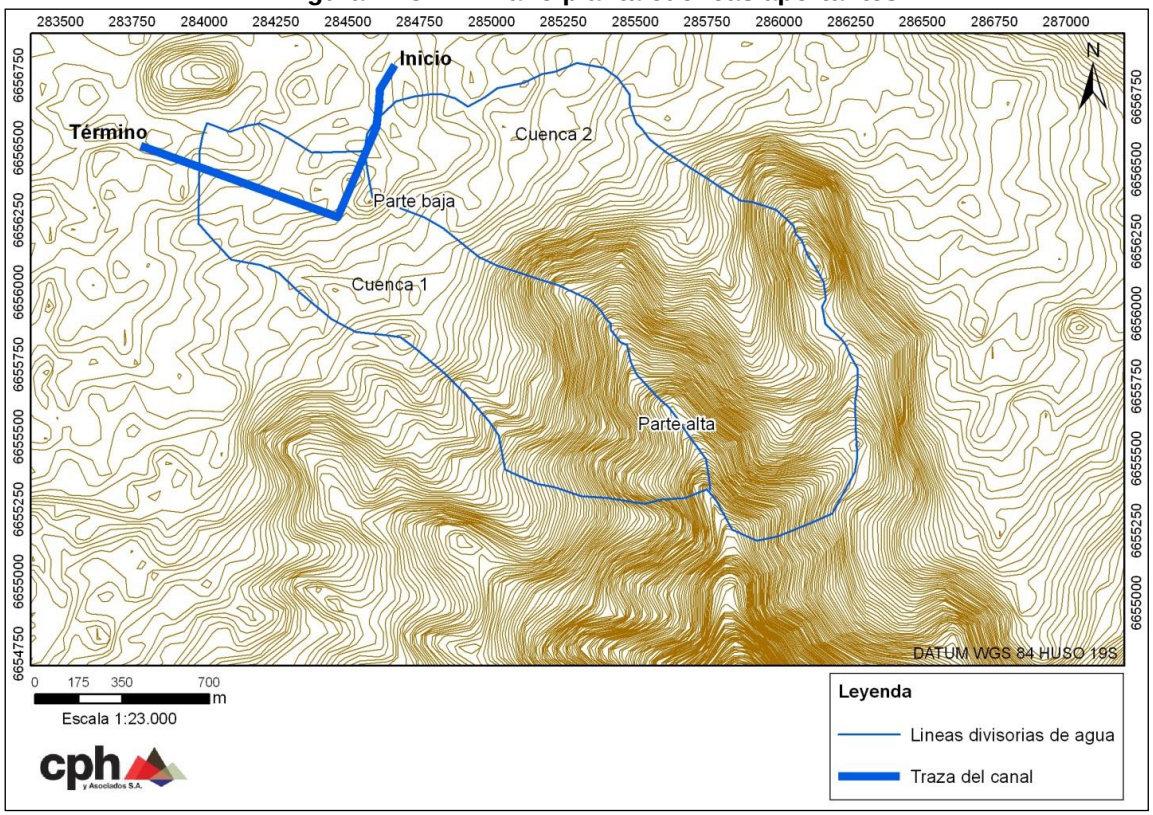
Las cuencas aportantes a la obra, que será protegida por el canal perimetral se determinaron mediante topografía obtenida de NASA - ASTER GDEM V2 Worldwide Elevation Data cuya resolución en planta es de 1 arcosegundo o su equivalente de 30 m, con este apoyo más imágenes Google Earth se elaboró un plano de divisoria de cuencas, con el cual se dimensionaron las características de las cuencas aportantes en cuanto a superficie y desniveles. La equidistancia de las curvas de nivel bajadas fue de 2 m.

**Figura Nº 3.4.1. Cuencas hidrológicas aportantes en Google Earth**




Fuente: Anexo 5.4 PAS157

**Figura Nº 3.4.2. Plano planta cuencas aportantes**




Fuente: Anexo 5.4 PAS157

Las características morfométricas de interés para el cálculo son las siguientes:

**Cuadro Nº 3.4.1 Datos morfométricos cuencas de interés**

| Cuenca | Superficie arriba canal | Largo cauce principal | Desnivel |
|---|---|---|---|
| | $km^2$ | m | m |
| 1 | 0,8 | 858 | 186 |
| 2 | 1,3 | 2200 | 220 |

Fuente: Anexo 5.4 PAS157

El método de cálculo que se desarrolla en esta memoria para obtener el caudal máximo asociado a un determinado periodo de retorno, es el Método Racional, siguiendo la aplicación propuesta por DGA en el Manual de Cálculo de Crecidas y Caudales Mínimos en Cuencas sin Información Fluviométrica (DGA, 1995).

El cálculo de caudales que se realiza a través del método Racional, utiliza la fórmula que se expresa a continuación:

$$Q = \frac{C \times I \times A}{3.6}$$

En que:

Q : Gasto máximo en crecida, en m3/s
C : Coeficiente de escorrentía
I : Intensidad máxima, correspondiente a una lluvia de duración igual al tiempo de concentración del sector analizado, en mm/hr.
A : Superficie de la zona aportante, en $km^2$.

Los cálculos efectuados implican los siguientes antecedentes y el Nº indica la columna de la tabla de resultados de la aplicación.
Columna 1 Período de retorno (PR)
Columna 2 Coeficiente empírico de período de retorno 10 años (Ref 1)1
Columna 3 Curva de frecuencias de coeficientes empírico referido al valor de período de retorno 10 años (Ref 1)
Columna 4 Coeficiente de período de retorno T años (Ref 1)
Columna 5 Precipitación diaria máxima de período de retorno 10 años
Columna 6 Coeficiente de frecuencia de la cuenca (Ref 2)2
Columna 7 Curva de frecuencias de precipitación diaria máxima
Columna 8 Tiempo de concentración de la cuenca
Columna 9 Coeficiente de duración para el tiempo de concentración
Columna 10 Intensidad media de la precipitación para una duración igual al tiempo de concentración y para un período de retorno T
Columna 11 Curva de frecuencia del caudal instantáneo máximo para cada PR

[1] DGA. 1995. Manual de Cálculo de Crecidas y Caudales Mínimos en Cuencas sin Información Fluviométrica
[2] DGA. s/f. Balance Hídrico de Chile.

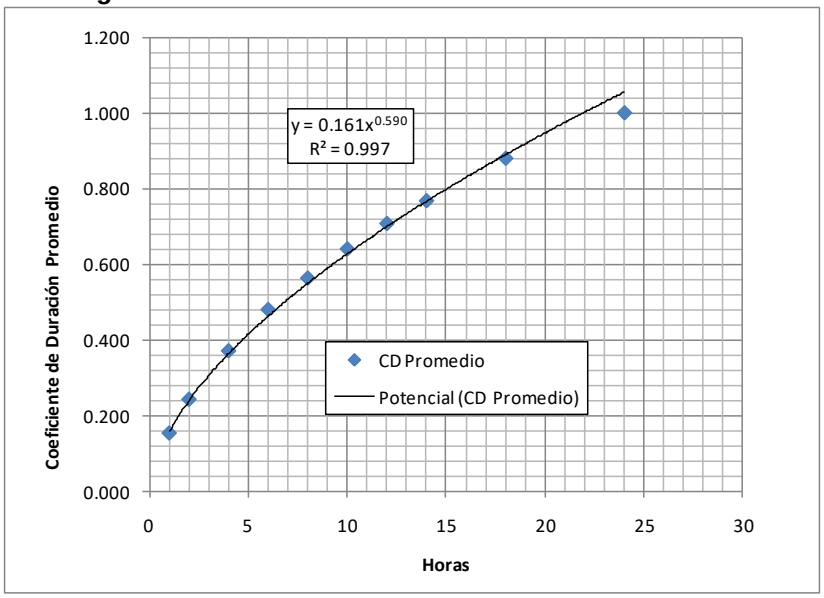
En este caso, el tiempo de concentración de la cuenca se calculó mediante la sugerencia efectuada por la DGA (Ref. 1) aplicando la fórmula del California Highways and Public Work de EEUU. Este señala lo siguiente.

$$t_c = 0{,}95(L^3 / H)^{0{,}385}$$

Donde, L corresponde al largo del cauce principal (Km) y H al desnivel máximo de la cuenca (m).

Los coeficientes de duración de cada cuenca, parámetro asociado al tiempo de concentración, se calculan extrapolando la tabla 2.2 (pg. 31) del manual de la DGA, cuyo rango mínimo es de 1 hora, tal como se muestra en la siguiente figura.

**Figura Nº 3.4.3. Curva Coeficiente Duración Promedio**




Fuente: Anexo 5.4 PAS157

Aplicando la curva de ajuste de la figura precedente, para los tiempos de concentración calculados para cada cuenca se obtiene un coeficiente de duración que se indican en el siguiente cuadro.

**Cuadro Nº 3.4.2 Parámetros hidrológicos cuencas de interés**

| Cuenca | Tiempo de concentración | Coeficiente de duración |
|---|---|---|
| | hrs | ad |
| 1 | 0,11 | 0,044 |
| 2 | 0,31 | 0,081 |

Fuente: Anexo 5.4 PAS157

Nota: ad= adimensional

Para el cálculo del caudal de diseño se ha adoptado el coeficiente de escorrentía base C(T=10) propuesto para la IV región, Cuenca del Limarí que de acuerdo a la metodología toma un valor de C(T=10)=0,078. Para determinar el coeficiente de escorrentía C(T),

asociado a una frecuencia T años, se utiliza la razón C(T)/C(T=10) presentada en el cuadro siguiente, propuesta en la metodología de Verni-King contenida en el "Manual de cálculo de crecidas y caudales mínimos en cuencas sin información fluviométrica", DGA, 1995.

**Cuadro Nº 3.4.3 Razón C (T)/C (10) propuesta en la metodología de Verni-King**

| T (años) | C(T)/C(T=10)<br>IV Región, Limari |
|---|---|
| 2 | 0.44 |
| 5 | 0.75 |
| 10 | 1.00 |
| 20 | 1.26 |
| 50 | 1.62 |
| 100 | 1.91 |

Fuente: Anexo 5.4 PAS157

La precipitación de diseño se calcula con los datos de lluvias máximas en 24 horas medidas en la estación meteorológica ubicada en La Serena, dependiente de la Dirección General de Aguas (DGA) del Ministerio de Obras Públicas. Con estos datos actualizados se calculó, mediante software Frec de análisis de frecuencias, las probabilidades de excedencia asociadas a la serie de datos.

**Cuadro Nº 3.4.4 PP máxima en 24 hrs. estación La Serena**

| Año | Máxima en 24 hrs | Año | Máxima en 24 hrs | Año | Máxima en 24 hrs |
|---|---|---|---|---|---|
| 1978 | 20.00 | 1991 | 38.10 | 2004 | 33.20 |
| 1979 | 2.50 | 1992 | 71.50 | 2005 | 19.00 |
| 1980 | 29.50 | 1993 | 32.50 | 2006 | 20.90 |
| 1981 | 25.50 | 1994 | 20.90 | 2007 | 12.10 |
| 1982 | 17.50 | 1995 | 2.50 | 2008 | 48.80 |
| 1983 | 83.50 | 1996 | 16.00 | 2009 | 30.00 |
| 1984 | 43.00 | 1997 | 40.30 | 2010 | 20.80 |
| 1985 | 16.10 | 1998 | 16.00 | 2011 | 96.00 |
| 1986 | 12.40 | 1999 | 11.00 | 2012 | 15.50 |
| 1987 | 93.80 | 2000 | 21.00 | 2013 | 19.50 |
| 1988 | 5.00 | 2001 | 63.10 | 2014 | 71.00 |
| 1989 | 7.30 | 2002 | 52.80 | | |
| 1990 | 11.00 | 2003 | 44.50 | | |

Fuente: Anexo 5.4 PAS157

El análisis de frecuencia, cuyo análisis completo se muestran en el Anexo 1 del PAS157, da cuenta de los siguientes resultados.

**Cuadro Nº 3.4.5 Compilado de resultados análisis de frecuencias**

| PR (años) | PE (%) | Normal | Log Normal | Log Normal 3 | Gumbell | Gamma | Gamma 3 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1000 | 0.10 | 109.88 | 363.22 | 243.04 | 137.75 | 92.05 | 97.11 |
| 500 | 0.20 | 104.35 | 298.72 | 208.17 | 126.05 | 92.05 | 97.11 |
| 200 | 0.50 | 96.69 | 227.81 | 167.80 | 110.57 | 92.05 | 97.11 |
| 150 | 0.67 | sd | sd | 150.01 | sd | sd | sd |
| 100 | 1.00 | 90.45 | 182.70 | 140.67 | 98.84 | 92.05 | 97.10 |
| 50 | 2.00 | 83.60 | 143.39 | 115.78 | 87.06 | 92.04 | 97.10 |
| 20 | 5.00 | 73.33 | 99.70 | 86.22 | 71.34 | 78.11 | 81.20 |
| 10 | 10.00 | 64.20 | 72.19 | 66.12 | 59.20 | 63.55 | 65.13 |
| 5 | 20.00 | 53.14 | 48.82 | 47.65 | 46.54 | 48.39 | 48.60 |
| 3.33 | 30.00 | 45.18 | 36.83 | 37.42 | 38.63 | 39.07 | 38.67 |
| 2.50 | 40.00 | 38.30 | 28.95 | 30.29 | 32.57 | 32.07 | 31.33 |
| 2.00 | 50.00 | 32.00 | 23.11 | 24.74 | 27.42 | 26.41 | 25.45 |
| 1.67 | 60.00 | 25.64 | 18.45 | 20.07 | 22.72 | 21.39 | 20.39 |
| 1.43 | 70.00 | 18.83 | 14.50 | 15.90 | 18.11 | 16.82 | 15.87 |
| 1.25 | 80.00 | 10.86 | 10.94 | 11.92 | 13.21 | 12.45 | 11.68 |
| 1.18 | 85.00 | 5.96 | 9.20 | 9.87 | 10.44 | 10.13 | 9.62 |
| 1.11 | 90.00 | 0.00 | 7.40 | 7.66 | 7.17 | 7.82 | 7.57 |
| 1.04 | 96.00 | 0.00 | 5.36 | 5.00 | 2.13 | 5.12 | 5.30 |
| Test $Chi^2$ calculado | | 18.35 | 3.43 | 2.57 | 13.81 | 4.30 | 2.14 |
| Test $Chi^2$ límite | | 11.10 | 11.10 | 9.49 | 11.10 | 11.10 | 9.49 |

Fuente: Anexo 5.4 PAS157

Para determinar el caudal máximo para distintos Períodos de Retorno (PR), según indica el método, se adopta el monto de 66,12 mm como precipitación máxima en 24 horas, para un período de retorno de 10 años ($P_{24}^{10}$). La distribución de caudales aplicando la metodología propuesta se presenta a continuación.

**Cuadro Nº 3.4.6 Cálculo de caudales para distintos PR cuenca aportante 1**

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| T (años) | C(10) | C(T)/C(10) | C(T) | $P_{24}^{10}$ (mm) | $CF_T$ | $P_{24}^{T}$ (mm) | tc (hrs) | $CD_{tc}$ | $I_{tc}^{T}$ | Q ($m^3$/s) |
| 2 | 0.078 | 0.44 | 0.034 | 66.1 | 0.485 | 32.07 | 0.11 | 0.04 | 13.40 | 0.23 |
| 5 | 0.078 | 0.75 | 0.059 | 66.1 | 0.795 | 52.57 | 0.11 | 0.04 | 21.96 | 0.38 |
| 10 | 0.078 | 1.00 | 0.078 | 66.1 | 1.000 | 66.12 | 0.11 | 0.04 | 27.63 | 0.48 |
| 20 | 0.078 | 1.26 | 0.098 | 66.1 | 1.192 | 78.82 | 0.11 | 0.04 | 32.93 | 0.57 |
| 50 | 0.078 | 1.62 | 0.126 | 66.1 | 1.436 | 94.95 | 0.11 | 0.04 | 39.67 | 0.69 |
| 100 | 0.078 | 1.91 | 0.149 | 66.1 | 1.615 | 106.78 | 0.11 | 0.04 | 44.62 | 0.77 |

Fuente: Anexo 5.4 PAS157

**Cuadro Nº 3.4.7 Cálculo de caudales para distintos PR cuenca aportante 2**

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| T (años) | C(10) | C(T)/C(10) | C(T) | $P_{24}^{10}$ (mm) | $CF_T$ | $P_{24}^{T}$ (mm) | tc (hrs) | $CD_{tc}$ | $I_{tc}^{T}$ | Q ($m^3$/s) |
| 2 | 0.078 | 0.44 | 0.034 | 66.1 | 0.485 | 32.07 | 0.31 | 0.08 | 8.38 | 0.24 |
| 5 | 0.078 | 0.75 | 0.059 | 66.1 | 0.795 | 52.57 | 0.31 | 0.08 | 13.73 | 0.39 |
| 10 | 0.078 | 1.00 | 0.078 | 66.1 | 1.000 | 66.12 | 0.31 | 0.08 | 17.28 | 0.49 |
| 20 | 0.078 | 1.26 | 0.098 | 66.1 | 1.192 | 78.82 | 0.31 | 0.08 | 20.59 | 0.58 |
| 50 | 0.078 | 1.62 | 0.126 | 66.1 | 1.436 | 94.95 | 0.31 | 0.08 | 24.81 | 0.70 |
| 100 | 0.078 | 1.91 | 0.149 | 66.1 | 1.615 | 106.78 | 0.31 | 0.08 | 27.90 | 0.79 |

Fuente: Anexo 5.4 PAS157

**El caudal de diseño del canal perimetral es de 1,56 $m^3/s$**.

## 3.5. Aguas Subsuperficiales

Compañía Minera Florida ha dispuesto dos pozos de control de calidad de aguas para con el fin de dar cumplimiento a la Normativa Vigente de Calidad de Aguas (NCh 1.333), estos son los Pozos 5 y 6; sin embargo durante el año 2012 en los meses de febrero, abril, junio y agosto, no se realizó monitoreo en el pozo 5 debido a que este presentó un nivel estático de la napa freática deprimido, razón por la cual no se pudo efectuar el monitoreo, las coordenadas del pozo 5 son las siguientes:

**Cuadro Nº 3.5.1. Ubicación pozo de monitoreo descartado por bajo nivel freático**

| POZO | CARACTERÍSTICAS | UBICACIÓN | | |
|---|---|---|---|---|
| | | REFERENCIAL | COORDENADAS UTM WGS 84 | |
| | | | NORTE | NORTE |
| Pozo 5 | Pozo ubicado aguas arriba. Ampliación Tranque Nº4 | Casa Quinta, al este de la Planta de Beneficios Tambillos | 6.656.671,91 | 6.656.671,91 |

Fuente: Elaboración propia.

**Cuadro Nº 3.5.2. Ubicación de Nuevos Pozos de Monitoreo de Calidad de Aguas**

| POZO | CARACTERÍSTICAS | UBICACIÓN | | |
|---|---|---|---|---|
| | | REFERENCIAL | COORDENADAS UTM WGS 84 | |
| | | | NORTE | NORTE |
| Pozo 5A | Casa Quinta al este de la Planta de Beneficios Tambillos | Pozo localizado aguas arriba de la ampliación Tranque Nº4 y Embalse de Relaves | 6.656.839,52 | 6.656.839,52 |
| Pozo 6 | Las Barrancas, al oeste de la Planta de Beneficios Tambillos | Pozo localizado aguas debajo de la ampliación Tranque Nº4 y Embalse de Relaves | 6.656.829,3 | 6.656.829,3 |

Fuente: Elaboración propia.

Los pozos que actualmente son monitoreados por el Titular cuentan con las siguientes características:

- **Pozo 5A:** De acuerdo al monitoreo hecho con fecha 18/10/2012 este pozo cuenta con una profundidad de 31,25 m y su nivel freático actual es de 1,70 m; posteriormente en una medición hecha con fecha 14/12/2012 el pozo presenta una profundidad de 31,4 m y un nivel freático de 1,8 m. El pozo 5A monitorea el estado del recurso aguas arriba, con los datos generados el laboratorio Aguas del Valle confecciona un informe bimensual de los parámetros de agua, dando cumplimiento a la NCh. 1.333, este informe es enviado tanto a la Dirección de Aguas Regional (DGA) como al Servicio de Evaluación Ambiental (SEA).
- **Pozo 6:** Este pozo se encuentra en el área de Las Barrancas; de acuerdo al monitoreo hecho con fecha 18/10/2012 este pozo cuenta con una profundidad de 25,7 m y su nivel freático actual es de 3,2 m; posteriormente en una medición hecha con fecha 14/12/2012 el pozo presenta una profundidad de 26,25 m y un nivel freático de 3,4 m El agua de este pozo se extrae por parte de SCM Tambillos para ser usada para consumo humano previo tratamiento de cloración en dependencias de la Planta; también es usada regularmente para el abatimiento del polvo en el camino que une la planta con la mina mediante humectación del mismo con un camión aljibe.

283.000 284.000 285.000 286.000 287.000 288.000 289.000

6.660.000 6.659.000 6.658.000 6.657.000 6.656.000 6.655.000 6.654.000 6.653.000

N W E S

Quebrada Los Rincones

Quebrada Los Rincones

Co. Peñon Alto

PLANTA TAMBILLOS

POZO 6

POZO 5A

POZO 5

D-421

D-437

D-427

D-451

RUTA 43

Cerro El Diablo

Quebrada El Retamo

Quebrada El Boyeri

Quebrada Los Rincones

Cerro El Guanaco

D-437

Cerro El Buitre

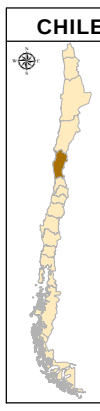
Cerro Carachento

| POZO | COORDENADAS UTM WGS 84 | |
|---|---|---|
| | ESTE | NORTE |
| POZO 5 | 286.727 | 6.656.672 |
| POZO 5A | 286.845 | 6.656.840 |
| POZO 6 | 282.998 | 6.656.829 |

283.000 284.000 285.000 286.000 287.000 288.000 289.000

CHILE

REGIÓN DE COQUIMBO






## SIMBOLOGÍA

**Pozos**
- Pozo Habilitado
- Pozo Deshabilitado

**Limite Área Planta**
- Área Planta
- Instalaciones

**Caminos**
- Caminos

**Hidrografía**
- Ríos y Esteros
- Quebradas

## LEYENDA

**Cuencas Hidrográficas**
- Cuenca 1
- Cuenca 2
- Mina Florida
- Mina Florida Oriente
- Cerro Carachento
- Quebrada El Retamo
- Quebrada Los Rincones
- Valle Tambillos

# DECLARACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO DEPÓSITO DE RELAVES FILTRADOS PLANTA TAMBILLOS

FIGURA N° 3.5.1
UBICACIÓN DE POZOS DE MONITOREO

0 250 500 1.000 m.

| | | | |
|---|---|---|---|
| Escala: | 1:25.000 | Elaboró: | LMM |
| Datum: | WGS 84 | Revisó: | RC |
| Sist. de Coord.: | UTM Huso 19 S. | Aprobó : | PD |

INERCO

Fecha: Enero, 2017.

## 3.6. Conclusiones

La localización del Proyecto en la Región de Coquimbo, predispone una serie de características que influyen en el comportamiento hidrológico de las cuencas en ésta, como el aumento de las precipitaciones líquidas conforme el avance de la latitud, lo que influye en que en esta zona de Chile conocida como Norte Chico, comience el cambio de un régimen de escurrimiento endorreico de forma general en el Norte Grande a un régimen de escurrimiento exorreico hacia el Sur.

El Proyecto forma parte del sistema hídrico de la Cuenca Pre-andina Lagunillas, localizada entre las cuencas de los ríos Elqui y Limarí. La cuenca está compuesta por una extensa red de esteros y quebradas que sirven de afluentes a la Quebrada de Lagunillas.

De acuerdo a los índices y parámetros morfométricos y de comportamiento de las cuencas estudiadas, se concluye lo siguiente:

- Durante la campaña de terreno, no se observaron cursos de agua superficial en el área de estudio (Área aledaña a las obras proyectadas).
- De acuerdo al índice de compacidad, la cuenca con una mayor posibilidad de crecidas es la cuenca Mina Florida; en términos generales, el sistema hidrológico del área de influencia tiene una forma oblonga, lo que provoca que el tiempo de recorrido de los flujos superficiales sea mayor, y frente a un episodio de precipitaciones torrenciales, la posibilidad de crecidas se vea mermada. El tiempo de concentración está íntimamente ligado con la forma de las cuencas, es así como también influye en gran medida la longitud de los drenes con respecto a la cuenca; en el sistema estudiado conforme aumentaba la longitud del cauce, aumentaba el tiempo de concentración, esto ligado a la variación de forma de cada una de ellas. Para la cuenca Mina Florida cuyo índice de compacidad es de 1,14 y la longitud de su cauce es de 0,91 km, su tiempo de concentración asciende a 0,35 hrs, lo cual implica mayores posibilidades de crecidas en un tiempo corto de precipitaciones; por otra parte la cuenca cuya longitud de cauce es mayor (3,2 km) y su índice de compacidad también es mayor (1,56), tiene una respuesta más lenta a precipitaciones torrenciales, por ende la posibilidad de crecidas disminuye de forma considerable.
- El sistema en términos generales, tiene un comportamiento moderado a bajo con respecto a las crecidas, a excepción de la cuenca ya descrita (Cuenca Mina Florida), esto demuestra que las cuencas hidrográficas también tienen comportamientos disímiles de forma local (microcuencas) que deben ser estudiados con énfasis en el marco de nuevos proyectos.
- Considerando la curva hipsométrica, el histograma de frecuencias altimétricas y el relieve medio de las cuencas, se obtiene una vista general de la morfología de las cuencas, las cuales de acuerdo a la clasificación de Strahler (1952) transitan entre fuertemente accidentada y muy escarpada. La situación morfológica general en la cual se insertan estas cuencas es la de los *Valles Transversales,* esto determina la sucesión de cordones montañosos de mediana altura en los cuales se inserta el Proyecto.

- De forma general, las cuencas del estudio pasan por procesos erosivos disímiles, es así como la cuenca quebrada El Retamo, presenta una alta erosividad dada la "juventud" de la cuenca, no así las cuencas Mina Florida Oriente, quebrada Los Rincones y cuenca Valle Tambillos que presentan un estado de "vejez", lo que determina que estos sistemas hídricos tienen una baja erosividad, cuyo comportamiento tiende a la sedimentación. Al considerar la quebrada Los Rincones cuenta como un solo sistema hidrográfico, se puede considerar que ésta se encuentra en un período de madurez y o equilibrio, en el que la erosividad es moderada y ciertamente los procesos de alta o baja erosividad se dan en espacios acotados o varían de acuerdo a las microcuencas de este sistema.

## 4. BIBLIOGRAFÍA

BENDJOUDI, H. Y HUBERT, P. (2002) Le coefficient de compacité de Gravelius: analyse critique d'un indice de forme desbasins versants. Hydrological Sciences Journal. 47(6) 921-930.

BÖRGEL, R. (1982). Colección Geografía de Chile Tomo II Geomorfología, Instituto Geográfico Militar de Chile. Santiago, Chile. 182 p.

CERECEDA & ERRÁZURIZ, 1991. Ecogeografía: Nueva Geografía de Chile. Editorial Zig-Zag S.A. Santiago.

CHOW, V., MAIDMENT, D. & MAYS, L. (1994) Hidrología Aplicada. Ediciones McGraw-Hill, Colombia: 583 p.

GASPARI, F. (2002) Plan de ordenamiento territorial en cuencas serranas degradadas. Aplicación de sistemas de información geográfica. Huelva. España. Ediciones cooperativas. Buenos aires: 179 p.

GASPARI, F., SENISTERRA, G., DELGADO, M., RODRÍGUEZ VAGARÍA, A. & BESTEIRO, S. (2009) Manual de Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas. Editorial Autores, 1 ed, La Plata, Argentina: 321p.

GRAVELIUS, H. (1914): Flusskunde. Goschen Verlagshan dlug Berlin. En Zavoianu, I. (1985): Morphometry of Drainage Bassins. Amsterdam, Elsevier.

PÉREZ, J. (1979) Fundamentos del Ciclo Hidrológico. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Departamento de Meteorología e Hidrología. Caracas, Venezuela.

STRAHLER, A. (1952) Hypsometric area-altitude analysis of erosional topography. Bulletin of the Geological Society of America 63: 1117-1142.

TEMES, J. 1978. Cálculo Hidrometereológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales. Dirección General de Carreteras. Madrid. España