

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

PROPUESTA DE REDISEÑO DEL MANEJO DE AGUA DE MINA COLOMBIA COMO APOORTE A LA GESTIÓN INTEGRAL DE AGUAS, MUNICIPIO EL CALLAO, ESTADO BOLÍVAR

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Br. Bastidas S., Yllevic M.
Para optar al Título
de Ingeniero de Minas

Caracas, 2018.

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

PROPUESTA DE REDISEÑO DEL MANEJO DE AGUA DE MINA COLOMBIA COMO APOORTE A LA GESTIÓN INTEGRAL DE AGUAS, MUNICIPIO EL CALLAO, ESTADO BOLÍVAR

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Alba Castillo

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Br. Bastidas S., Yllevic M.
Para optar al Título
de Ingeniero de Minas

Caracas, 2018

Caracas, Noviembre de 2018.

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería de Minas, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por la Bachiller Yllevic M. Bastidas S., titulado:

“Propuesta de rediseño del manejo de agua de mina Colombia como aporte a la gestión integral de aguas, municipio El Callao, estado Bolívar”

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero de Minas, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por la autora, lo declaran APROBADO.

Prof. Spic Limo
Jurado

Prof. Isidro Barboza
Jurado

Profa. Alba Castillo
Tutora Académico

**UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE GEOLOGIA, MINAS Y GEOFISICA
DEPARTAMENTO DE MINAS**

ACTA

Quienes suscriben, integrantes de la totalidad del jurado examinador del Trabajo Especial de Grado, titulado: **“Propuesta de rediseño del manejo de agua de mina Colombia como aporte a la gestión integral de aguas, municipio El Callao, estado Bolívar”**, presentado por la Bachillera Yllevic Margarita Bastidas Salazar, portadora de la cédula de identidad V- 21.105.406, para optar al título de Ingeniero de Minas, acordaron por unanimidad solicitarles a las autoridades correspondientes de la Facultad de Ingeniería, tengan a bien otorgar **MENCIÓN HONORÍFICA** al Trabajo de Grado antes mencionado.

Esta solicitud se hace con base en la originalidad e innovación en el enfoque utilizado para tratar el tema presentado y en la excelencia, tanto de su contenido como de su presentación formal, atributos que lo convierten en una fuente de referencia útil.

Se levanta la presente Acta en Caracas, a los dieciséis (16) días del mes de noviembre del año 2018.

Profesor Spic Limo
Jurado Principal

Profesor Isidro Barboza
Jurado Principal

Profesora Alba Castillo
Tutora Académica

DEDICATORIA

A mi abuelo, Juan Salazar, quien tanto soñó con verme con su casco que me obsequió, mi primer casco de Ingeniera, ya lo podré usar oficialmente, Dios lo tenga en la gloria.

A mi abuela, Yamilet de Salazar, eterna compañera de aventuras, que siempre estuvo a mi lado, especialmente en la etapa de campo de esta investigación, Dios te dé larga vida y salud.

A mis padres Yllemnis Salazar, por ser mi gran roca y Victor Bastidas por tu incansable apoyo, ambos han sido mi más grande ejemplo a seguir, Dios les dé larga vida y salud.

A mi hermanita Yllemnis Bastidas, que tanto me ha enseñado de paciencia y constancia.

Los amaré y agradeceré por siempre.

AGRADECIMIENTOS

A Dios y La Virgen, por la vida, la salud, la fortaleza y la motivación de ser mejor cada día.

A Venezuela, por permitirme descubrir el gran potencial minero que tenemos en nuestro país.

A la UCV, por recibirme en su casa durante estos años de esfuerzo y aprendizaje, por permitirme conocer a las amistades más valiosas que podré conservar durante toda mi vida.

A la Profesora Alba, quien más que mi tutora se convirtió en una gran amiga, por contagiarme de su intensa pasión por el conocimiento y por tantísimo más.

A mis profesores, en especial a las Profesoras Aurora, Sasha y Katherine, por sus enseñanzas durante mi formación académica, al Profesor Spic que me hizo enamorarme tanto de la minería subterránea del oro, al Profesor Isidro por su atención y apoyo prestado para la realización de esta investigación.

A mis familiares de Upata y El Callao, por tanto cariño y apoyo prestado siempre, en especial durante la etapa de campo de ésta investigación.

A mi familia tanto la Bastidera como la Salazar, que bonito fue sentir su apoyo a lo largo de toda esta aventura, en especial a mi primo, quien se convirtió en el Asesor Técnico de este trabajo, el Ingeniero Mecánico Jesús Bastidas, por tantos trasnochos e ingenios compartidos durante la realización del mismo.

A mis amigos, que me han apoyado y brindado su increíble amistad desde el día uno, en especial a mi equipo minero Zadkiel y Pedro, de los que he aprendido tanto.

En fin, a todos los que hicieron posible, que hoy sea Ingeniera de Minas.

Bastidas S., Yllevic M.

**PROPUESTA DE REDISEÑO DEL MANEJO DE AGUA DE MINA
COLOMBIA COMO APORTE A LA GESTIÓN INTEGRAL DE AGUAS,
MUNICIPIO EL CALLAO, ESTADO BOLÍVAR**

Tutor Académico: Prof. Alba Castillo.

**Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología,
Minas y Geofísica. Año 2018, 156 p.**

Palabras Claves: mina subterránea, gestión integral de agua de mina, drenaje de mina, rediseño sistema de bombeo minero, inundación de mina.

Resumen. Mina Colombia es una de las minas más antiguas ubicadas en territorio venezolano, actualmente cuenta con siete (7) niveles desarrollados y tan sólo dos (2) en explotación, esto debido a que en los últimos años el sistema de bombeo implementado ha presentado fallas críticas, por lo que se ha dejado de desalojar el agua que ingresa a la mina. Al no tener un sistema óptimo que se encargue de extraer el agua a superficie, ésta se ha ido acumulando provocando así la inundación de los niveles más profundos de la mina; en septiembre 2017, el laboreo entre el nivel 7 y el nivel 5 se encontraban totalmente inundados, es por ello que se plantea la siguiente investigación. El objetivo principal de este trabajo es elaborar una propuesta de rediseño del manejo de aguas de mina Colombia como aporte a la gestión integral de aguas. La metodología empleada es de tipo descriptiva-correlacional bajo el enfoque de la gestión integral. En septiembre 2017, las estaciones de bombeo en operación no estaban en condiciones óptimas de captar el volumen de agua para el que fueron diseñados, por lo que se rebosan y el agua escurre por las galerías afectando el laboreo para luego caer por el pozo, funcionando como recarga a la inundación. Se albergan 610 mil metros cúbicos en los niveles inundados, volumen que se propone sea desalojado con la bomba marca FLYGT ® modelo BS 244 HT ubicada en el pozo a la altura del nivel 5. El rediseño del sistema de drenaje se realizó tomando en cuenta los requerimientos actuales mediante el desarrollo de una ingeniería conceptual;

se proyecta una estación de bombeo en el nivel 4 con bombas en paralelo para extraer el flujo volumétrico proveniente del aforo de la inundación. Para la continuidad operacional, una vez superada la inundación se propone una bomba estacionaria en el nivel 7 y una sumergible en el sumidero 442. El agua extraída de mina continuará siendo descargada proporcionalmente entre la quebrada El Tigre, posterior a un debido tratamiento para prevenir la afectación del recurso y redirigida en superficie para ser reciclada como agua industrial en la planta de procesamiento mineral. Se recomienda la permanente supervisión y mantenimiento del sistema.

ÍNDICE

CAPÍTULO I FUNDAMENTO DE LA INVESTIGACIÓN	3
1.1 Planteamiento del problema	3
1.2 Objetivos de la investigación.....	4
1.3 Justificación	4
1.4 Alcance y limitaciones.....	5
CAPÍTULO II GENERALIDADES DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	6
2.1 Ubicación geográfica	6
2.2 Características físico-naturales.....	6
2.3 Aspectos geológicos y estructurales.....	9
2.4 Laboreo en mina Colombia.....	13
CAPÍTULO III MARCO TEÓRICO	16
3.1 Antecedentes	16
3.2 Bases teóricas	18
3.2.1 Gestión integral de recursos hídricos.....	18
3.2.1.1 Cuenca hidrográfica en la GIRH	20
3.2.2 Ciclo hidrológico.....	21
3.2.3 Precipitación	24
3.2.3.1 Satélite Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM)	24
3.2.3.2 Parámetros de la Precipitación	26
3.2.4 Servidor Giovanni	26
3.2.5 Evapotranspiración	27
3.2.5.1 Temperatura	29
3.2.5.2 The Global Land Data Assimilation System (GLDAS).....	30
3.2.6 Balance hídrico	33
3.2.6.1 Proceso de cálculo según la metodología de Thornthwaite y Matter (1955)	33
3.2.7 Drenaje de mina subterránea.....	38
3.2.7.1 Sistemas de bombeo	39
3.2.8 Bombas.....	39
3.2.8.1 Ecuación de Bernoulli	41
3.2.8.2 Curvas de rendimiento de la bomba y correspondencia entre una bomba y un sistema de tubería.....	42
3.3 Bases jurídicas.....	47
3.3.1 Constitución de la República Bolivariana de Venezuela	47
3.3.2 Leyes Ambientales.....	47
3.3.3 Leyes y reglamentos de minas	49
3.3.4. Decretos y normas.....	50
CAPÍTULO IV MARCO METODOLÓGICO.....	52
4.1 Tipo de investigación	52
4.2 Diseño de investigación	52

4.3 Sujeto de estudio	52
4.4 Recolección de datos.....	53
4.4.1 Técnicas utilizadas.....	54
4.4.2 Instrumentos	56
4.5 Procedimiento experimental.....	57
4.5.1 Etapa de recopilación de material técnico	58
4.5.1.1 Interacción componente atmósfera-agua superficial.....	58
4.5.1.2 Interacción componente agua superficial-agua subterránea.....	60
4.5.2 Etapa de actividades de campo	60
4.5.2.1 Interacción componente agua superficial-agua subterránea.....	60
4.5.3 Etapa de Procesamiento.....	63
4.5.3.1 Interacción componente atmósfera-agua superficial	63
4.5.3.2 Interacción componente agua superficial-agua subterránea.....	63
4.5.4 Etapa de diseño de la gestión integral	64
4.5.4.1 Integración componente atmósfera-agua superficial	64
4.5.3.2 Integración componente agua superficial-agua subterránea	66
CAPÍTULO V RESULTADOS Y ANÁLISIS	67
5.1 Agua superficial	67
5.1.1 Aguas de precipitación.....	67
5.1.1.1 Intensidad de precipitación	67
5.1.1.2 Lluvia de Diseño	70
5.1.2 Temperatura superficial	77
5.1.3 Balance hídrico para mina Colombia	80
5.1.4 Cuenca hidrográfica.....	84
5.2 Aguas subterráneas.....	90
5.2.1 Relación entre fallas geológicas y recargas del agua subterránea	91
5.2.2 Volumen total de inundación.....	94
5.2.3 Extracción del agua subterránea	95
5.2.3.1 Drenaje actual en mina Colombia	95
5.2.3.2 Sistema de bombeo propuesto para la inundación actual	103
5.2.3.3 Sistema de bombeo final propuesto.....	110
CONCLUSIONES	119
RECOMENDACIONES.....	123
BIBLIOGRAFÍA.....	126
ANEXOS I.....	129
ANEXOS II.....	136
ANEXOS III.....	147
ANEXOS IV.....	151
ANEXOS V.....	154

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Ubicación relativa de la zona de estudio, física regional, hidrográfica y local.	7
Figura 2.2. Fallas geológicas de mina Colombia.	12
Figura. 2.3. Vista general de mina Colombia.	14
Figura. 2.4. Labores de Mina Colombia.	15
Figura 3.1. Ciclo Hidrológico. Fuente: The water Cycle. Precipitation Education. NASA.	23
Figura 3.2. El satélite TRMM, NASA.	25
Figura. 3.3. Dirección de sistema de bombeo.	40
Figura 3.4. Curvas de rendimiento típicas de una bomba centrífuga.	43
Figura 3.5. Punto de operación de un sistema de tuberías.	44
Figura 3.6. Representación gráfica de la ecuación de carga hidrostática neta necesaria.	45
Figura 4.1. Enfoque de la Gestión integral de agua subterránea.	53
Figura 4.2. Etapas del procedimiento experimental.	57
Figura 4.3. Metodología para hacer uso del Servidor Giovanni, NASA.	58
Figura 4.4. Interfaz del Servidor Giovanni, NASA.	59
Figura 4.5. Nivel de inundación en rampa del nivel 4 al nivel 5.	61
Figura 4.6. Nivel de inundación en chimenea de traspase del nivel 4 al nivel 5.	61
Figura 4.7. Seguimiento de descarga en superficie del bombeo de la inundación.	62
Figura 4.8. Quebrada El Tigre en la superficie de mina Colombia, e invasión minera.	62
Figura 4.9. Metodología de procesamiento de los archivos obtenidos mediante Giovanni.	63
Figura 4.10. Metodología para hacer uso de la plantilla HidroBioV3.0.	64
Figura 4.11. Interfaz de la Plantilla de Balances HidroBioV3.0.	65
Figura 5.1. Cantidad de agua mensual caída en la superficie de mina Colombia.	68
Figura 5.2. Precipitación media anual (mm) en la superficie de mina Colombia, durante los años 1998-2017.	70
Figura 5.3. Curvas de Intensidad, Duración y Frecuencia de la cuenca hidrográfica de mina Colombia.	78
Figura 5.4. Temperatura media anual de la superficie de mina Colombia. Fuente elaboración propia.	80
Figura 5.5. Representación gráfica de la temperatura media anual y productos del balance hídrico: exceso de humedad, infiltración y escorrentía 2000-2017.	84
Figura 5.6. Sub cuencas que aportan agua a mina Colombia.	85
Figura 5.7. Sub cuenca 1 de mina Colombia.	86
Figura 5.8. Sub cuenca 2 de mina Colombia.	88

Figura 5.9. Sub cuenca 2 de mina Colombia.	89
Figura 5.10. Corte transversal de la superficie y el nivel 1 de mina Colombia	93
Figura 5.11. Canaleta en la galería principal de la entrada del nivel 1.....	96
Figura 5.12. Sistema de bombeo actual de mina Colombia, septiembre 2017.	97
Figura 5.13. Descarga en superficie de la estación de bombeo del nivel 4.	102
Figura 5.14. Descarga en superficie de la estación de bombeo del nivel 1.	102
Figura 5.15. Curva característica de la bomba marca FLYGT modelo B 244 HT	105
Figura 5.16. Punto de operación del sistema a 150m con la bomba marca FLYGT modelo B 244 HT.	105
Figura 5.17. Punto de operación del sistema a 284m con la bomba equivalente en paralelo.	107
Figura 5.18. Representación gráfica de escenarios inversión para reducción de tiempo de drenaje.	111
Figura 5.19. Sistema de bombeo final propuesto.....	112
Figura 5.20. Curva característica de la bomba marca GRINDEX modelo MATADOR H.	113
Figura 5.21. Punto de operación del sistema a 50m con la bomba marca GRINDEX modelo MATADOR H.	113
Figura 5.22. Curvas características de la bomba marca KSB modelo MEGANORM 50-160.	116
Figura 5.23. Punto de operación del sistema a 150m con la bomba marca KSB modelo MEGANORM 50-160 (153mm).	117

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Coeficiente de escorrentía	21
Tabla 3.2. Factor de corrección de la ETP estándar en función de la latitud (Dunne y Leopold, 1978)	29
Tabla 3.3. Especificaciones del sistema GLDAS	31
Tabla 3.4. Capacidad de retención según textura de la formación superficial	34
Tabla 3.5. Capacidad de almacenamiento de agua según suelo y formaciones herbáceas	35
Tabla 5.1. Datos de precipitaciones mensuales (mm) en la superficie de mina Colombia, durante los años 1998-2017.	69
Tabla 5.2. Datos de precipitaciones máximas diarias (mm), en mina Colombia, MINERVEN durante los años 1998-2017.	71
Tabla 5.3. Distribución de probabilidades pluviométricas según los parámetros de Gumbel.	72
Tabla 5.4. Cálculo de las variables probabilísticas mediante Gumbel.	73
Tabla 5.5. Cálculo de las precipitaciones diarias máximas probables para distintas frecuencias.	74
Tabla 5.6. Precipitaciones máximas para diferentes tiempos de duración de lluvias.	75
Tabla 5.7. Intensidades de lluvia a partir de Pd, según su Duración de precipitación y Frecuencia.	75
Tabla 5.8. Resumen de los valores de regresión lineal para distintos años.	76
Tabla 5.9. Intensidades-Tiempo de Duración-Frecuencia.	77
Tabla 5.10. Datos de temperatura mensual (°C) en la superficie de mina Colombia, durante los años 2000-2017.	79
Tabla 5.11. Características de la formación superficial de mina Colombia. ...	81
Tabla 5.12. Balance hídrico del año 2017 de mina Colombia.	82
Tabla 5.13. Temperatura media anual y productos del balance hídrico: exceso de humedad, infiltración y escorrentía 2000-2017	83
Tabla 5.14. Caudal de la sub cuenca 1.....	87
Tabla 5.15. Caudal de la sub cuenca 2.....	88
Tabla 5.16. Caudal de la sub cuenca 3.....	89
Tabla 5.17. Caudal de agua presente en el nivel 1 y 4 de mina Colombia ...	92
Tabla 5.18. Volumen de agua almacenada en el laboreo subterráneo, agosto 2017.....	94
Tabla 5.19. Descripción del sistema de bombeo actual, septiembre 2017. ...	98

Tabla 5.20. Características del sistema de tuberías de la estación de bombeo del nivel 1 a superficie.	99
Tabla 5.21. Características del sistema de tuberías de la estación de bombeo del nivel 4 a superficie.	100
Tabla 5.22. Características del sistema de tuberías de la estación de bombeo del nivel 4 al nivel 1.....	100
Tabla 5.23. Características del sistema de mangueras disponible.	101
Tabla 5.24. Régimen de trabajo de la bomba marca GRINDEX modelo MATADOR H.	114
Tabla 5.25. Régimen de trabajo de la bomba marca KSB modelo MEGANORM 50-160.....	117

INTRODUCCIÓN

El drenaje de minas es el conjunto de operaciones auxiliares mediante el cual se impide la inundación del laboreo, mediante procedimientos de control del flujo y extracción del agua que se infiltra. De acuerdo con Piña (2018) la minería responsable en el siglo XXI asume los desafíos de la protección ambiental, mediante la integración de esta dimensión en la producción de materias primas minerales.

En la planificación de operaciones auxiliares de mina, además de las variables operacionales, se deben considerar las variables propias de la localización de los yacimientos, enfoque que persigue la presente investigación a partir del estudio de los productos de los componentes atmosfera, agua superficial y agua subterránea se conforma el manejo integral de aguas en el laboreo minero.

Mina Colombia es un sistema subterráneo para extracción de oro, ubicada en la Concesión 6 y 7 de MINERVEN, Municipio El Callao, estado Bolívar específicamente en la Región Hidrográfica N° 15 Cuyuní en la cuenca del río Yuruari. Está diseñada con siete (7) niveles de extracción y cuenta con la infraestructura necesaria para realizar las operaciones unitarias de minería, mediante el uso de Skip (jaula) en un pozo vertical de 479m de profundidad y mediante una rampa de 1500m.

El drenaje de la mina Colombia había sido realizado con un sistema de bombeo mecánico múltiple, constituido por cuatro (4) estaciones de bombeo, ubicadas en los niveles denominados: 1, 4, 7 y 442, en orden descendente. Para agosto 2017 se encontraban inundados los niveles 5, 6 y 7, por lo que la extracción de material se llevaba a cabo por la rampa. Esta condición se tradujo en una baja eficiencia, y en otro factor para el descenso de la producción.

Con el planteamiento de una gestión integral de los caudales disponibles y excedentes que producen la inundación eventual del laboreo minero, se analizan los productos de los componentes atmosfera, agua superficial y agua subterránea, para finalmente mediante el desarrollo de una ingeniería conceptual rediseñar el actual sistema de bombeo de la mina, considerando la situación de los recursos hidrológicos que alimentan al sistema minero, con el propósito de correlacionar los ingresos y egresos hídricos y así completar el balance hídrico.

A continuación se expone el Trabajo Especial de Grado que tiene como objetivo general elaborar una propuesta de rediseño del manejo de aguas de mina Colombia como aporte a la gestión integral de aguas, municipio El Callao, estado Bolívar. Consta de cinco (5) capítulos para cumplir con los objetivos específicos. En el primero se desarrolla las generalidades de la investigación como el planteamiento del problema, objetivos y la justificación de esta investigación. En el segundo capítulo se describen las generalidades de la zona de estudio, ubicación, características físico-naturales, información geológica y estructural y una breve descripción del laboreo con el cual está desarrollado mina Colombia. En el tercer capítulo se hace referencia a los trabajos que anteceden a este proyecto, además se aborda la teoría que le da sustento, relacionada con la gestión integral de los recursos hídricos, drenaje de minas y sistemas de bombeo en minas subterráneas. En el cuarto capítulo comprende una descripción del enfoque y la metodología implementada en el estudio. El quinto capítulo presenta el análisis e interpretación de los resultados.

CAPÍTULO I

FUNDAMENTO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 Planteamiento del problema

Mina Colombia, ubicada en el municipio El Callao, estado Bolívar, es una mina subterránea de oro, diseñada con siete (7) niveles de extracción, cuenta con la infraestructura necesaria para realizar las operaciones unitarias de minería: arranque, carga e izado de material a la superficie mediante el uso de Skip (jaula) en un pozo vertical y mediante una rampa. El drenaje de la mina ha sido realizado, desde su desarrollo, con un sistema de bombeo mecánico instalado en serie, constituido por cuatro (4) estaciones de bombeo que poseen bombas de distintas potencias y, las mismas se encuentran ubicadas en los niveles denominados: 1, 4, 7 y 442, en orden descendente

En septiembre 2017 se encontraban inundados tres (3) niveles; 5, 6 y 7, por lo que la extracción de material se llevaba a cabo solo por rampa, a través de un solo camión, lo cual se traduce en una baja eficiencia y altos costos en el mantenimiento de los equipos de acarreo, incidiendo con el tiempo en el descenso de la producción de oro. Es por esto que se planteó estudiar el sistema de bombeo diseñado para el drenaje de mina Colombia, que permitió elaborar propuestas para acelerar el desalojo de agua de los niveles inundados, como aporte en la recuperación de la mina y con ello en la producción de oro.

Con el planteamiento de una gestión integral de las aguas subterráneas se buscó rediseñar el actual sistema de bombeo de las aguas dentro de la mina y proponer una planificación a seguir dentro de los lineamientos del manejo integral de aguas, para aforar la mina y restablecer las operaciones

mineras en los niveles afectados, así como también participar en la conservación y aprovechamiento del agua dentro de la Empresa.

1.2 Objetivos de la investigación.

❖ Objetivo General

Elaborar una propuesta de rediseño del manejo de aguas de mina Colombia como aporte a la gestión integral de aguas, municipio El Callao, estado Bolívar.

❖ Objetivos Específicos

- Diagnosticar el sistema de drenaje, a través del levantamiento de información hidrológica y mediciones hidromecánicas en la mina.
- Describir la situación de los recursos hidrológicos que alimentan al sistema minero, con el propósito de correlacionar los ingresos y egresos hídricos.
- Calcular el volumen de agua a drenar, con la finalidad de diseñar un sistema de drenaje adecuado.
- Analizar las relaciones identificadas entre el drenaje y las características hidrológicas, para completar el balance hídrico en la mina.
- Rediseñar el sistema de drenaje para mina Colombia, para dar respuesta al requerimiento actual y con proyección al plan de explotación quinquenal.

1.3 Justificación

La presente investigación tiene lugar debido a la situación inédita en la que se encuentra mina Colombia, debido a la inundación de tres (3) niveles de producción, por lo cual surge la necesidad de desalojar el agua almacenada en el menor tiempo posible. En este sentido, es necesario conocer las características del sistema de bombeo que está actualmente instalado y los recursos hidrológicos que alimentan al sistema minero.

Al plantear un rediseño del manejo de aguas de la mina Colombia, se beneficiará directamente la producción de la Empresa, ya que se solventaría la situación inédita que limita las operaciones de producción.

Considerando que el proceso de extracción de mineral aurífero constituye una fuente de desarrollo para el país y el drenaje del agua está limitando dicho proceso, se hace necesaria la investigación de sus causas, para así poder diseñar y luego implementar el rediseño del manejo de aguas. Esto permitirá continuar con las operaciones en toda la mina y cumplir con las metas establecidas en la producción de oro.

1.4 Alcance y limitaciones

El alcance de la presente investigación consiste en estudio de las variables físicas, como temperatura, precipitación, evapotranspiración, infiltración y escorrentía con la finalidad de estimar los volúmenes que ingresan al laboreo subterráneo de mina Colombia. La problemática de inundación de mina, así como el sistema de régimen permanente para el drenaje del agua de mina se calculan con procedimientos estándares basados en el balance de masa y la conservación de la energía.

Entre las limitaciones de esta investigación que fueron visualizadas al inicio de la misma, pudieron ser reducidas al contar con los datos satelitales y los trabajos de campo realizados en agosto-octubre 2017. Por otra parte, las tecnologías de computación como los procesadores de imágenes y hojas de cálculo permitieron realizar numerables iteraciones para verificar el funcionamiento requerido en el sistema de bombeo.

CAPÍTULO II

GENERALIDADES DE LA ZONA DE ESTUDIO

2.1 Ubicación geográfica

Mina Colombia es una mina de oro subterránea, ubicada en la población de El Callao, en el estado Bolívar, explotada por el método de cámaras y pilares. La mina se ubica en el caserío Caratal a unos 3,2 km al sureste del municipio autónomo El Callao. Con coordenadas 61°61' de Longitud Oeste y 7°18' de Latitud Norte, a una altura de 188 m sobre el nivel del mar. El Callao está ubicado al sureste del estado Bolívar, en la margen derecha del río Yuruari, a 277km de Ciudad Bolívar, tiene una superficie de 2.223km².

El área minera pertenece a la región hidrográfica N° 15 Cuyuní (Figura 2.1), específicamente en la cuenca del río Yuruari, que drena sus aguas al Océano Atlántico y representa un 1,2% del caudal medio anual de país con un 483m³/s.

Se puede acceder por vía terrestre por la carretera asfaltada de primer orden hacia Brasil; recorriendo desde la Ciudad de San Félix las poblaciones de Upata, Guasipati y El Callao.

2.2 Características físico-naturales.

En este apartado se presenta información básica y necesaria para el estudio del balance hídrico, de procesos climatológicos e hidrometeorológicos en la cuenca del río Yuruari, de la región hidrográfica N°15 Cuyuní que incluye al área de estudio, acerca de: clima, precipitación, temperatura, suelos, vegetación e hidrografía.

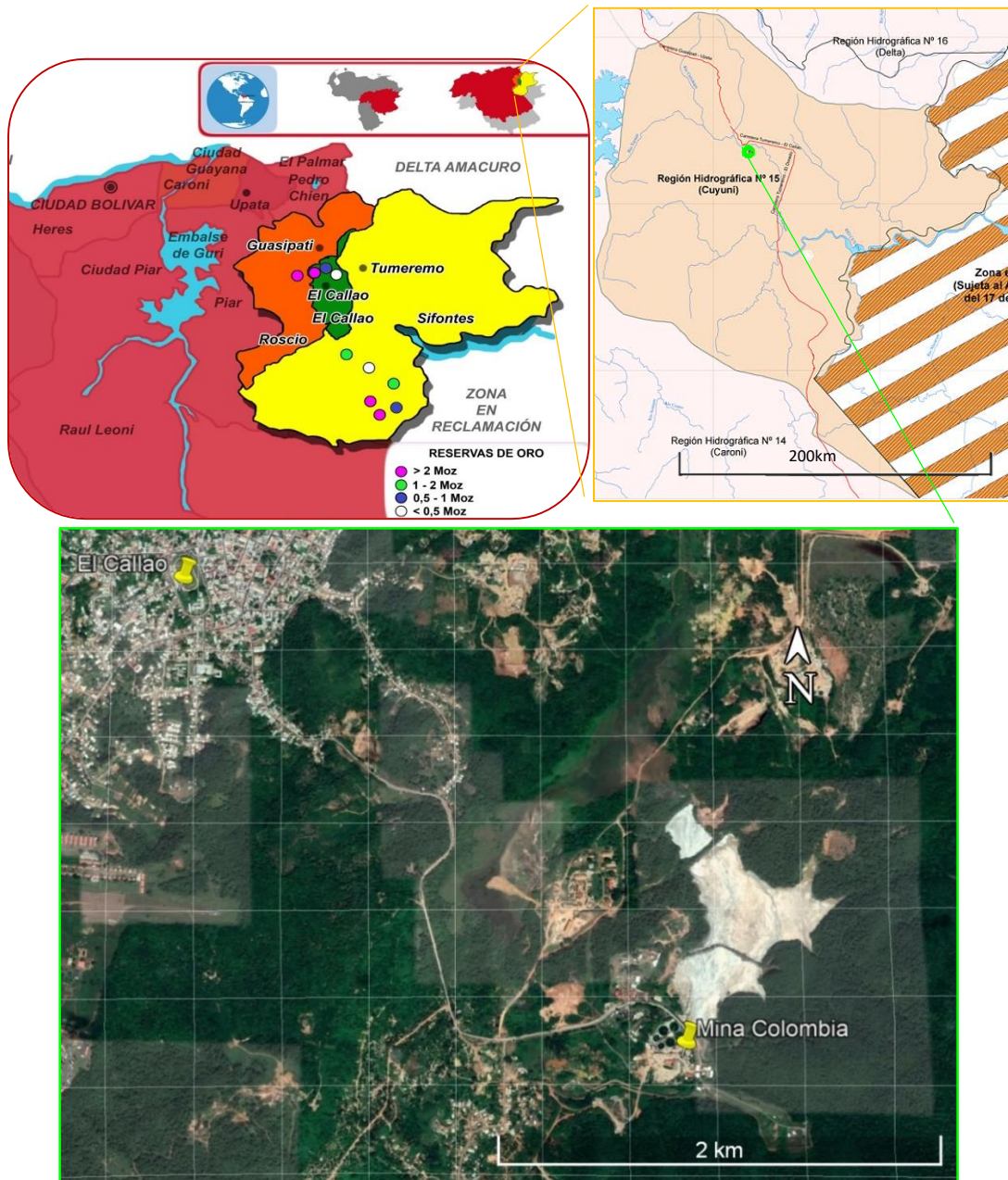


Figura 2.1. Ubicación relativa de la zona de estudio, física regional, hidrográfica y local.

Fuente: Tomado y modificado de http://siga.geoportalsb.gob.ve/rios_embalses/. Julio, 2017 y Google Earth.

Cabe destacar que el análisis técnico sería realizado con mayor precisión si fuera posible contar con instalaciones hidrometeorológicas mínimas pero suficientes para medir las variaciones climáticas que resultan cuando

grandes extensiones de cobertura vegetal son removidas, originando las alteraciones en los valores de evaporación y especialmente de evapotranspiración locales.

❖ **Clima**

La región hidrográfica N° 15 Cuyuní cuenta con una variada distribución bioclimática, debido principalmente al gradiente de precipitación que va desde los 900 mm en la parte norte, hasta los 3.600 mm en la zona sur y al gradiente de temperatura el cual oscila entre los 26,5 °C, en el valle del Cuyuní, hasta los 20° C en la serranía de Lema al sur.

Presenta una precipitación media anual de 3.335 mm y una temperatura media anual de 26°C. El noreste de la región hidrográfica posee un bioclima seco tropical, con pequeñas áreas de transición con el muy seco, que abarca totalmente la cuenca del río Yuruari y sus alrededores.

❖ **Suelos**

En una forma general, los suelos predominantes en la cuenca pertenecen a las órdenes de los Ultisoles y Entisoles, los cuales ocurren en distintos tipos de paisajes y evolucionan a partir de rocas y/o materiales transportados, incluidos dentro de las provincias geológicas de Pastora, Imataca y Roraima.

Por lo general los suelos se caracterizan por exhibir un avanzado a poco desarrollo pedogenético, de profundidades variables, que van de superficie (<25 cm) a profundos (> 1,50 m); su textura es franco a franco-arcillosa en superficie y franco-arcillosa a arcillosa con la profundidad; el pH es moderadamente ácido, y los colores son marrón - rojizos a rojizos y rojos, en la mayoría de los casos están asociados con afloramientos rocosos en superficie.

Químicamente presentan bajo contenido de carbono orgánico, pH fuerte a extremadamente ácido y de baja a muy baja capacidad de intercambio

catiónico, lo cual le confiere a estos suelos un status nutricional pobre con bajo o muy baja fertilidad.

❖ **Vegetación**

La vegetación está principalmente influenciada por caracteres climáticos, antropogénicos y edáficos. La marcada alternancia de un período seco y uno lluvioso, determina la presencia de formaciones vegetales con caracteres siempre verdes, deciduos a semideciduos.

Las formaciones deciduas a semideciduas son características de las formaciones boscosas del noreste de la cuenca, comprendida entre los ríos Supamo y Yuruari. En este sector, por condiciones de suelos e intervenciones antropogénicas se observan formaciones herbáceas de raíces someras como matorrales y sabanas arbustivas.

❖ **Hidrografía**

Como se mencionó anteriormente el área minera está ubicada en la cuenca del río Yuruari que aporta su caudal directamente al río Cuyuní el cual pertenece a la cuenca baja del río Esequibo y drena un área de 48.169km², de la cual aproximadamente el 80% corresponde al territorio venezolano., además presenta un volumen medio de escurrimiento anual de 26.000 millones de m³.

2.3 Aspectos geológicos y estructurales

La constitución geológica es del Precámbrico Inferior y Superior. Afloran rocas pertenecientes a las provincias geológicas de Imataca, Pastora y Roraima, además de sedimentos aluvionales recientes.

La provincia Imataca está representada principalmente por rocas graníticas y cuarcitas ferruginosas; Pastora por rocas volcánicas y Roraima por rocas sedimentarias donde destacan las areniscas.

En la región hidrográfica n° 15 Cuyuní, se encuentra el Cinturón de Rocas verdes (CRV), la cual ocupa aproximadamente el 80% del área. Este cinturón es una secuencia de rocas metalvocánicas y sedimentarias, cuya estratigrafía, estructura, geoquímica, sedimentos constituyentes y depósitos minerales son semejantes en todo el mundo. En Venezuela se localiza en el Cratón de Guayana y forma la Provincia Geológica de Pastora, donde se asocia a importantes depósitos de oro, pero podría albergar minerales que se consiguen en los CRV del mundo.

En mina Colombia la secuencia litoestratigráfica presenta una disposición de dirección Noreste con buzamiento hasta el Suroeste, con pliegues a la escala regional. Son evidentes las diferentes direcciones de deformación: Zona de Cizallamiento dentro del plano de estratificación, definido por las interfases de los flujos de lavas. Esta zona tiene el mismo rumbo Noreste (N60°-80°) con buzamiento de 35°-55° al Suroeste. Zonas de fracturación oblicua (fallas, zona de cizallamiento) cortan la secuencia litoestratigráfica con buzamiento más fuerte de 70° a 85°.

La alteración hidrotermal se desarrolla con el emplazamiento de las vetas, vetillas de cuarzo, carbonatos, sulfuros y oro, y una alteración progresiva en las rocas caja, la cual se superpone a una fracturación de intensidades según la competencia de las rocas caja. Esta alteración se marca principalmente con la aparición de carbonatos, sericita, pirita y cuarzo en forma de vetas o difusa.

❖ **Vetas y Fallas Mineralizadas**

Las principales estructuras presentes en la mina Colombia, se encuentran en una zona que alcanza hasta 100 m de espesor, las vetas principales son la Veta Colombia y Veta América, actualmente también se explotan como estructuras secundarias la Veta B y Veta Hansa, otra estructura secundaria es Veta D se explotó en los niveles 4, 3, y 2; en los niveles 1 y 5 no arrojó resultados económicamente rentables. Las vetas principales tienen extensiones como Colombia Extensión (al este de la falla Gloria) y América

desplazada (al Este de la Falla Gloria); otras vetas importantes son Veta Mocupia y Veta Santa Elena.

La veta Colombia es un enjambre continuo y complejo de vetas y vetillas de cuarzo, carbonatos y sulfuros con una dirección de N50-70 y buzamientos Sur 75. El sistema está compuesto por una sucesión de lentejones, vetas y vetillas alargados de 1,5 a 2,0 m de espesor de cuarzo con carbonatos y sulfuros. En la roca caja por encima y por debajo del sistema Colombia se encuentra una red de vetas y vetillas de cuarzo carbonatos y piritita la cual aparece como relleno de las fracturas paralelas al plano de foliación, oblicua a la orientación general del sistema Colombia. Las andesitas encajantes son foliadas sobre 1 a 2 m mostrando una alteración hidrotermal.

La veta América tiene un espesor de 1 a 5 m y está compuesta por un enjambre complejo de vetas, vetillas y lentejones de cuarzo, carbonatos y sulfuros de dirección paralela u oblicua a la dirección general de la estructura. En algunos sitios de la parte Este de la mina, la veta tiene un aspecto bandeado, constituido por alternancias de niveles centimétricos de argilita con clorita negra a verde oscuro, niveles de cuarzo fino, de carbonatos (dolomitas, ankerita y siderita) y de chert, también se puede observar un enjambre de vetas y vetillas perpendiculares a la veta principal bandeada.

El Bolsón es una estructura de mineralización masiva, que pudo ocurrir por un mayor volumen de fluidos mineralizantes en vías de cristalización; por la actividad tectónica de la zona, se crearon condiciones favorables de porosidad y permeabilidad secundaria para su deposición. Características macroscópicas que se observan en la roca que contiene la mineralización, como el color gris oscuro y su densidad, indican un aumento en los minerales ferromagnesianos, por lo que se deduce un cambio en la roca caja de basandesitas toleíticas a rocas basálticas.

❖ Fallas Transversales Mineralizadas

Estructuralmente el área de la mina se encuentra atravesada por una serie de fallas geológicas descritas en la figura 2.2. Falla Gloria es definida como una falla inversa, ubicada al Este de la mina, de tal forma que la veta América choca con esta falla, presenta un buzamiento 45° NE, con azimut N 145° , fue la falla mineralizada más productiva se explotó del nivel 1 a superficie, del nivel 2 al 1, y del nivel 3 al 2, pero ya sus reservas están agotadas.

Otras fallas mineralizadas, pero no económicamente explotables son:

Falla Isbelia es una falla inversa ubicada a 270m al Este de la falla Gloria con un rumbo aproximado de $N10^\circ W$, de buzamiento aproximado de 40° hacia el Este.

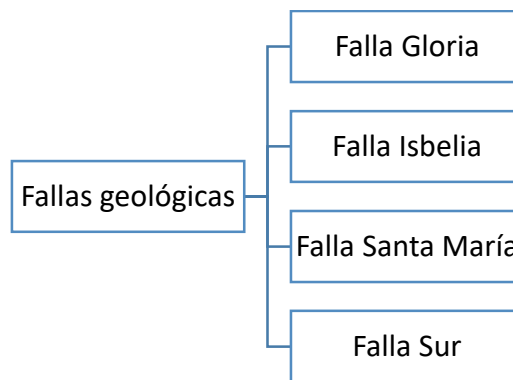


Figura 2.2. Fallas geológicas de mina Colombia.

Fuente: Departamento de Geología, MINERVEN.

Falla Santa María se presenta al Oeste de la mina como una falla inversa dextral, desplazando a las vetas Colombia y América hacia el Norte. Tiene una dirección azimutal desde el nivel 1 hasta el nivel 4 de $N 175^\circ - 180^\circ$ con un buzamiento de $45^\circ - 50^\circ$ NE, a partir del nivel 5 es donde existe un cambio en su dirección a consecuencia de la rotación sufrida por la falla.

Falla Sur es la que marca el límite al Oeste de la mina Colombia, presenta un buzamiento de 40° a 45° Noroeste.

2.4 Laboreo en mina Colombia

El sistema subterráneo está conformado por siete (7) niveles, como se observa en la figura 2.3, contando desde la superficie 134m hacia el interior de la roca madre se encuentra el nivel 1 y a 50 m de éste se encuentra el nivel 2 y así sucesivamente espaciándose 50m entre ellos hasta el nivel 7.

El método de explotación empleado desde el nivel 1 hasta el nivel 5 es el de Cámaras y Pilares, donde las cámaras poseen una altura promedio de 2 m. Entre el nivel 5 y 6 debido a la estructura geológica denominada “el bolsón” que se puede observar en la figura 2.4, se cuenta con una serie de laboreos denominados “Cortes” espaciados entre sí aproximadamente 10m, esto se trata del método de explotación denominado Cámara por Subniveles con Tiros Largos, con este método de explotación se crearon lo que se denominan Corte 0, Corte 3, Corte 5 y Corte 7, la característica principal de este laboreo son los tajos, laboreos con una altura de aproximadamente 10m, dejando pilares entre sí con área promedio de 45 m².

En el nivel 6 se hizo una combinación de ambos métodos, el de Cámaras y Pilares y el de Cámaras por Subniveles con Tiros Largos, al igual que en el nivel 7 con la única excepción que las cámaras de este nivel fueron pocas las desarrolladas y luego fueron selladas.

A mina Colombia se accede por dos maneras, por rampa y por medio de Skip. El Pozo principal por el cual se traslada el Skip tiene una excavación de 479 m de profundidad y su collar se ubica a 187,4 m sobre el nivel del mar, posee un diámetro de 4,6 m de los cuales 5% está ocupado por vigas y estructuras para que el Skip pueda cumplir su función, por lo que el diámetro útil del pozo es 4,37m.

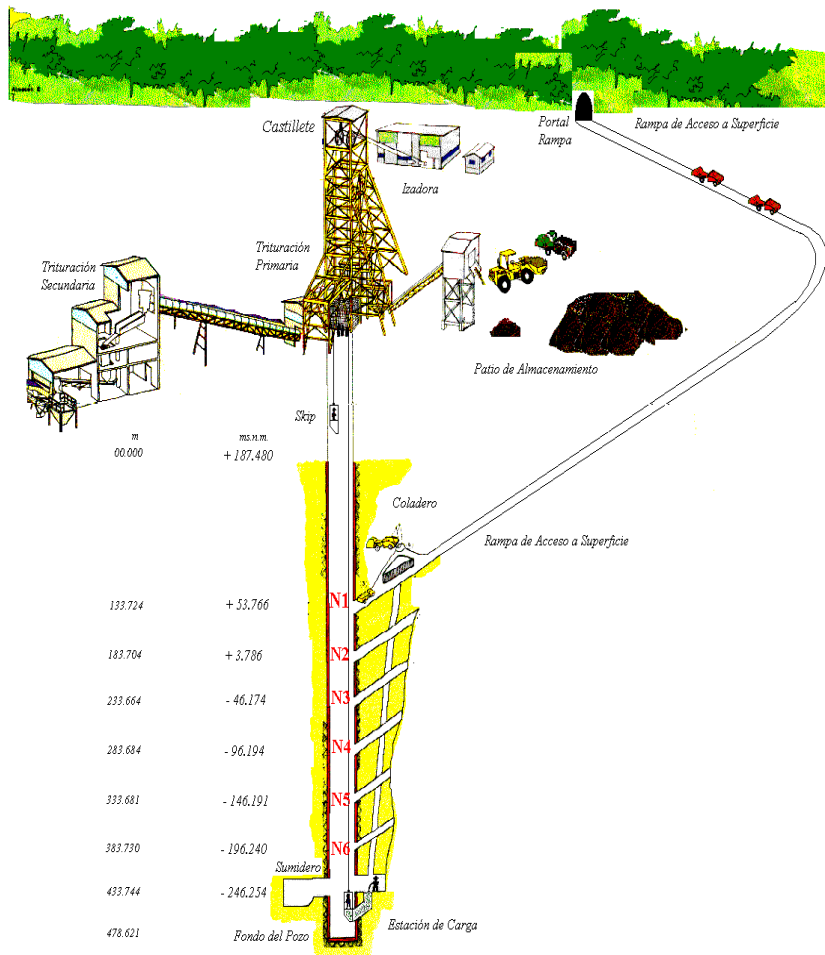


Figura. 2.3. Vista general de mina Colombia. Fuente: Departamento de Geología, MINERVEN.

La otra entrada a la mina se realiza por una rampa de sección arqueada con un ancho de 5,00 m y un alto de 3,37 m. Con una longitud de descenso aproximadamente de 1.700 m. Los primeros 190 m se encuentran revestidos de concreto con arcos metálicos en forma de costillas. El resto continúa sin revestimiento debido a la competencia de la roca. La inclinación de la rampa es de -10% variando en ocasiones a pocos grados tanto del piso como del techo.

MINA COLOMBIA

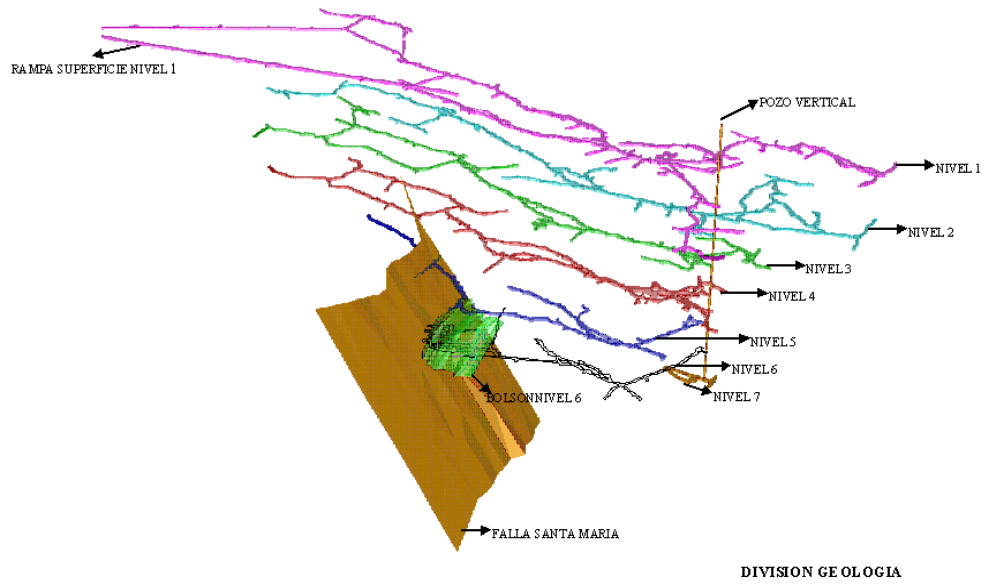


Figura. 2.4. Labores de Mina Colombia. Fuente: Departamento de geología, MINERVEN.

CAPÍTULO III

MARCO TEÓRICO

3.1 Antecedentes

•Van Zanten J. (2004), presentó un diseño de manejo de aguas de mina, en el PIT baqueta de la Mina Paso Diablo, Estado Zulia, como aporte al desarrollo sustentable de la región para la Universidad Central de Venezuela, en el que propone la construcción de obras de drenaje para conducción de aguas de mina y retención de sólidos en suspensión hídrica, con el propósito de evitar las inundaciones que ocurren frecuentemente durante los períodos de precipitación y la inserción de la actividad minera en el concepto de sustentabilidad.

•López, C. (2005), presentó un Diseño de un método de explotación para la mina Colombia, CVG MINERVEN, El Callao, Estado Bolívar, para la Universidad Central de Venezuela, en el cual se describe en el capítulo 5, las estaciones de bombeo de Mina Colombia como referencia para el diseño del método de explotación propuesto. López describe las estaciones de bombeo que para ese entonces estaban operativas, la estación en el nivel 1, nivel 4, nivel 7 y el nivel 442.

•Dpto. de Ingeniería de Minas, MINERVEN (2012), presentó un plan de adecuación del sistema de bombeo en mina Colombia, en el cual se describe la capacidad efectiva de los sumideros y se compara con la capacidad de succión de las bombas operantes, se concluyó que la cantidad de agua que ingresa a los sumideros es soportada por la cantidad de agua desalojada por las bombas operantes.

•Salcedo, L. (2016), realizó un análisis estacional de las principales unidades hidrográficas de Sudamérica basado en datos satelitales (GPS, TRMM, GLDAS) para la Universidad de Concepción, Campus Los Angeles.

Observó que existe una gran correlación entre los datos utilizados y detectó importantes períodos de sequías por medio de análisis de climatología.

- Rangel, R. (2016), presentó un monitoreo de sequías en México a través de índices multivariados para la Universidad Nacional Autónoma de México, D.F. Empleó series de tiempo de variables hidrológicas derivada de productos de modelos de superficie terrestre que incorporan asimilación de datos, como el MERRA-2, GLDAS-1 y el GLDAS-2.

- Bastidas, Y. (2017), elaboró un diagnóstico del sistema de bombeo de Mina Colombia, MINERVEN, Municipio El Callao, Estado Bolívar para la Universidad Central de Venezuela. Concluyó que el sistema de bombeo, del drenaje del laboreo subterráneo, no trabaja a una eficiencia mínima capaz de aforar eficientemente la inundación eventual.

- Herrera, J. (2017), presentó una cuantificación de caudales que ingresan en los niveles 1 y 4 de la mina Colombia, MINVERVEN, El Callao, Estado Bolívar, para la Universidad Central de Venezuela. En el cual presenta los caudales medidos en los niveles donde se ubican las estaciones de bombeo de mina Colombia, lo cual se empleó como referencia para la estimación de la eficiencia de las bombas en el nivel 4. Concluye que la mayor cantidad de agua que ingresa a la mina proviene del nivel 1, debido a que se encuentra más cercano al nivel freático.

- Cova, J. (2018), presentó una propuesta de un sistema de control integral de sólidos en suspensión hídrica, mina a cielo abierto C.V.M S.A. División-Níquel, Tiara-Estado Aragua para la Universidad Central de Venezuela. En el que presenta el estudio de la lluvia de diseño y el cálculo del caudal captado por las cuencas hidrográficas que aportan agua a la zona de estudio para el diseño de una canalización en superficie.

3.2 Bases teóricas

La gestión integrada de los recursos hídricos comprende un desarrollo y un manejo coordinados de la cuenca hidrográfica y del agua superficial y subterránea (Owen,2010) porque la recarga de las aguas subterráneas es afectada por el uso de las aguas superficiales, la cual puede ocurrir de manera natural, mediante infiltraciones y/o escorrentía y de manera artificial por actividades humanas, por tal razón el enfoque para estudiar el agua subterránea presente en mina Colombia, con la finalidad de mediante éste dar solución al requerimiento actual e incorporar una visión integral de trabajo.

Para llevar a cabo la gestión integral del agua subterránea en mina es necesario basarse en una comprensión de las características de la misma con un enfoque de sistema (cuenca hidrográfica), la cual requiere importantes cantidades de datos de monitoreo del agua subterránea, por tal razón el capítulo III describe las bases teóricas, para la caracterización del sistema (cuenca hidrográfica) del área de estudio, sobre la hidrología superficial: ciclo del agua, precipitación, evapotranspiración, temperatura; el balance hídrico de la cuenca hidrográfica que es una herramienta vital para la gestión conjunta de aguas superficiales y subterráneas; y por último el sistema hidromecánico encargado de la extracción del agua subterránea presente en el laboreo.

3.2.1 Gestión integral de recursos hídricos

Según Owen (2010), la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH) es un enfoque que promueve el desarrollo y la gestión coordinados de agua, suelos y demás recursos asociados con el objeto de maximizar el bienestar económico y social de manera equitativa sin comprometer la sostenibilidad de ecosistemas vitales.

Esto comprende un desarrollo y una gestión más coordinados de: suelo y agua, aguas superficiales y subterráneas, la cuenca hidrográfica y sus ambientes adyacentes, intereses aguas arriba y aguas abajo.

La gestión integrada implica que todos los usos de los recursos hídricos se consideran en conjunto. La asignación del agua y demás decisiones de gestión referidas a los recursos hídricos toman en cuenta el impacto de cada uso sobre los demás, consideran las metas sociales y económicas generales, incluido el logro de un desarrollo sostenible

La GIRH abarca un desarrollo y gestión coordinados de las aguas superficiales con las aguas subterráneas, de acuerdo con Owen (2010) ambas están estrechamente interconectadas y, deben gestionarse como un solo recurso, por lo cual éste es el lineamiento a seguir en la presente investigación.

La gestión de las aguas subterráneas tiene por principal objetivo el desarrollo sostenible del recurso para diferentes usos además de equilibrar la recarga de aguas subterráneas y la extracción.

Esta gestión debe basarse en una buena comprensión de las características de estas con enfoque de sistema (cuenca hidrográfica). Según sea la situación particular, los sistemas de agua subterránea pueden ser de escala relativamente pequeña, localizada, como es el caso de mina Colombia (kilómetros cuadrados) o de escala regional. Esta comprensión requiere importantes cantidades de datos de investigaciones y monitoreo del agua subterránea.

La caracterización de un sistema de aguas subterránea como base para su adecuada gestión (Owen, 2010), requiere de los siguientes conocimientos:

- Extension del sistema del acuífero
- Propiedades del acuífero
- Fuentes de recarga del sistema
- Descargas del sistema

Donde dicha información sobre las características del sistema proviene de: investigaciones hidrogeológicas, ensayos de bombeo, datos sobre la

hidrología superficial (ciclo hidrológico, precipitaciones, evapotranspiración, caudales de los cursos de agua), registros de nivel de agua subterránea y registros de extracción de agua subterránea.

3.2.1.1 Cuenca hidrográfica en la GIRH

En lo establecido por FUNDAMBIENTE (2006), la cuenca es la unidad territorial más adecuada para la gestión integrada de los recursos hídricos la cual requiere que se tengan en cuenta tanto las aguas superficiales como las subterráneas porque la recarga de las aguas subterráneas puede ocurrir localmente a partir de los cuerpos de agua superficial o en forma difusa a partir de las precipitaciones a través de la zona no saturada del suelo, de ahí la importancia de su estudio.

Owen (2010) plantea que la gestión de los recursos hídricos se realiza mejor dentro de los límites de la cuenca hidrográfica, la cual es toda aquella parte de terreno donde las aguas superficiales se concentran y pasan por un punto determinado del cauce principal que la drena (Ruiz, 2001). Es necesario identificar las características estructurales generales (fallas, fracturas) de la cuenca porque pueden variar dentro de ella, lo que significa que puede haber varios sistemas de flujo subterráneo con posibilidad de interactuar con el cauce principal que la drena, sea directa o indirectamente, generando así zonas de recarga, por lo que además es necesario conocer el caudal afluente del cauce principal de la cuenca en cuestión, caudal que puede ser calculado a través de ecuación 1 como plantea Cova (2017), multiplicando el total de agua precipitada en la cuenca por el coeficiente de escurrimiento (ver tabla 3.1), donde la cantidad de agua precipitada puede ser asumida como el producto de la intensidad pluviométrica (milímetros de lluvia por unidad de tiempo) por el área de la cuenca.

$$Q = \frac{C \times i \times A}{3,6} \quad \text{Ecuación 1.}$$

Donde:

Q : Caudal (m^3/s)

C : Coeficiente de escorrentía, ver tabla 3.1.

i : Intensidad de precipitación (mm/h)

A : Área de la cuenca de drenaje (km^2)

Tabla 3.1. Coeficiente de escorrentía

COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA (C)						
Cobertura Vegetal	Tipo de Suelo	Pendiente del terreno				
		Pronunciada	Alta	Media	Suave	Despreciable
		$\geq 50\%$	20%	5%	$\leq 1\%$	
Sin Vegetación	Impermeable	0,80	0,75	0,70	0,65	0,60
	Semipermeable	0,70	0,65	0,60	0,55	0,50
	Permeable	0,50	0,45	0,40	0,35	0,30
Cultivos	Impermeable	0,70	0,65	0,60	0,55	0,50
	Semipermeable	0,60	0,55	0,50	0,45	0,40
	Permeable	0,40	0,35	0,30	0,25	0,20
Pastos, vegetación ligera	Impermeable	0,65	0,60	0,55	0,50	0,45
	Semipermeable	0,55	0,50	0,45	0,40	0,35
	Permeable	0,35	0,30	0,25	0,20	0,15
Hierba, grama	Impermeable	0,60	0,55	0,50	0,45	0,40
	Semipermeable	0,50	0,45	0,40	0,35	0,30
	Permeable	0,30	0,25	0,20	0,15	0,10
Bosques, vegetación densa	Impermeable	0,55	0,50	0,45	0,40	0,35
	Semipermeable	0,45	0,40	0,35	0,30	0,25
	Permeable	0,25	0,20	0,15	0,10	0,05

NOTA: Para zonas con probabilidades de ser quemadas se deben aumentar los coeficientes de la siguiente manera: Cultivos: multiplicar por 1,10. Hierba, pastos, vegetación ligera, bosques, vegetación densa: multiplicar por 1,30.

Fuente: (Suarez, 1993)

3.2.2 Ciclo hidrológico

Como establece Bustillo y López (2000), las explotaciones mineras originan una serie de alteraciones ambientales específicas. Entre las principales alteraciones se tiene: la pérdida o alteración de recursos naturales, contaminación física de las aguas superficiales y contaminación química de las aguas. Estas alteraciones producidas por la actividad minera interfieren con el normal desarrollo del ciclo hidrológico.

El ciclo hidrológico reúne la precipitación, temperatura, evapotranspiración y demás fenómenos meteorológicos que serán

descritos a continuación, los cuales interactúan entre sí como un conjunto cíclico que afectan a la porción de precipitación que puede drenar hacia los acuíferos a través del perfil del suelo afectando la recarga del agua subterránea.

Ruiz (2001) describe el ciclo hidrológico como el conjunto de los diferentes caminos a través de los cuales circula el agua en la naturaleza, experimentando transformaciones a través de sus tres fases: líquida, gaseosa y sólida; caminos que penetran las tres capas del sistema terráqueo total: la atmósfera, la hidrosfera, la litosfera y la biosfera; es un proceso continuo, simultáneo e interminable que es activado por medio de la energía solar, que es la que aporta la energía para evaporar el agua.

Suárez (1993) explica que el ciclo hidrológico no tiene principio ni fin, por lo que su descripción puede comenzar en cualquier punto, es un sistema cíclico por medio del cual el agua se evapora de la superficie terrestre (vegetación, suelos, ríos), pasa a la atmósfera (nubes) y regresa a las fuentes originales por medio de la precipitación, el escurrimiento y el flujo lateral en el subsuelo, ver figura 5.

El vapor de agua que pasa a la atmósfera se enfría y condensa para formar gotas minúsculas que se agrupan formando las nubes. El enfriamiento de la masa de aire ocasiona la unión de las pequeñas gotas, dando origen a gotas más grandes que pueden precipitarse en forma de lluvia, nieve o granizo.

No toda el agua que se precipita alcanzará la superficie terrestre, ya que una parte se evapora durante la caída, o es interceptada y retenida por la cobertura vegetal. De la precipitación que llega a la superficie del suelo una parte se evapora, otra se infiltra en el subsuelo, y la restante después de llenar pequeñas depresiones, rebosa las mismas y escurre sobre el terreno para concentrarse en los cursos de agua.

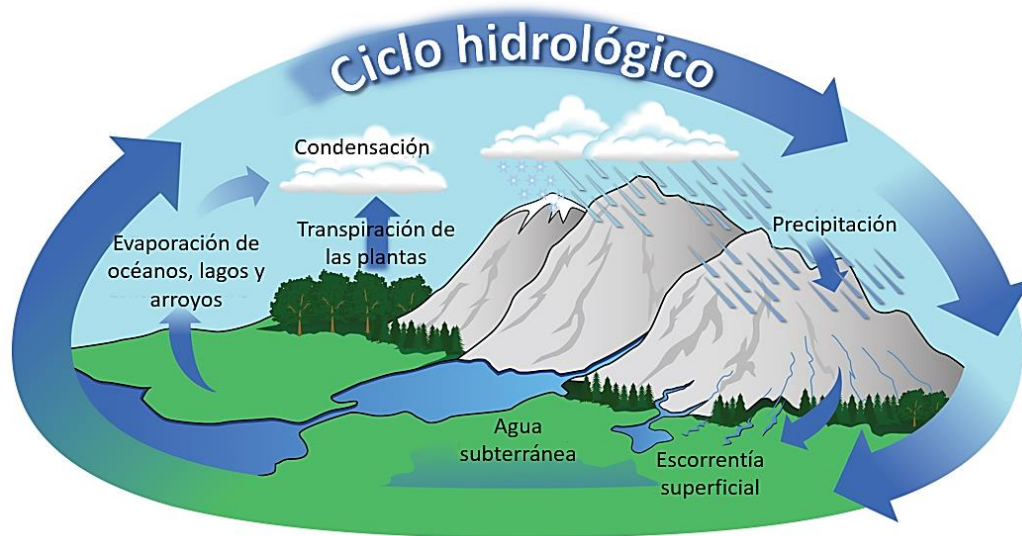


Figura 3.1. Ciclo Hidrológico. Fuente: The water Cycle. Precipitation Education. NASA. Tomado y modificado de: <https://pmm.nasa.gov/education/water-cycle>. Consultado el 17/09/2018.

Una parte del agua infiltrada en el terreno es absorbida por las raíces de las plantas y posteriormente transpirada hacia la atmósfera. Otra parte fluye bajo la superficie del terreno hacia los cauces, el mar, otros cuerpos de agua, o hacia zonas profundas donde se almacena como agua subterránea como ocurre en el presente caso de estudio, la inundación de los niveles más profundos de Mina Colombia por el almacenamiento de agua subterránea.

Es importante destacar, en relación con lo establecido por Bustillo y López (2000), que la actividad minera altera localmente diversos factores que forman parte del ciclo hidrológico natural, tal como lo son; la deforestación, donde la cobertura vegetal es eliminada y por lo tanto el agua proveniente de la precipitación chocará directamente con el suelo desnudo, provocando una mayor erosión del suelo y un mayor aporte de agua de escorrentía y de infiltración.

3.2.3 Precipitación

Como se mencionó anteriormente las precipitaciones son los principales impulsores climáticos de la recarga del agua subterránea, debido a que éstas comprenden toda el agua que cae de la atmósfera a la superficie de la cuenca hidrográfica de la zona de estudio, tanto en forma líquida (lluvia), como congelada (nieve, granizo) siendo el primero el correspondiente con el presente caso de estudio, en las sub cuencas de Mina Colombia, El Callao, Estado Bolívar.

La precipitación es un componente vital de cómo el agua se mueve a través del ciclo del agua de la Tierra, conectando el océano, la tierra y la atmósfera. Como expresa la NASA (2018) saber dónde llueve, cuánto llueve y el carácter de la lluvia, nieve o granizo que cae permite comprender mejor el impacto de las precipitaciones en arroyos, ríos, escorrentías superficiales y aguas subterráneas. Las mediciones frecuentes y detalladas permiten crear modelos y determinar los cambios en el ciclo del agua de la Tierra.

La cantidad de agua caída en una precipitación se expresa en milímetros y la medición se lleva a cabo mediante los pluviómetros, pluviógrafos, y el Radar de Precipitación (PR), a bordo del satélite *Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM)* del *National Aeronautics and Space Administration (NASA)* y la Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón (JAXA), desde su lanzamiento en 1997.

3.2.3.1 Satélite Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM)

La Misión de Medición de Lluvias tropicales (Tropical Rainfall Measuring Mission TRMM) es un satélite de investigación (ver figura 3.2) diseñado para mejorar la comprensión de la distribución y la variabilidad de la precipitación en los trópicos como parte del ciclo del agua en el sistema climático actual (Precipitation Measurement Missions, NASA, 2018), cubre las regiones tropicales y subtropicales de la Tierra. Mediante una serie de instrumentos

espaciales a bordo, el satélite TRMM proporciona información importante de precipitación. El satélite TRMM recopila información importante de precipitación mediante una serie de instrumentos espaciales a bordo, a saber: radar meteorológico de lluvia (PR), generador de imágenes por microondas, escáner de radiación visible e infrarrojo (VIRS), sistema de energía radiante de la tierra y de las nubes (CERES) y el sensor de imágenes de relámpagos (LIS), de los cuales el radar meteorológico de lluvia (PR) es el encargado de medir la intensidad de las precipitaciones.



Figura 3.2. El satélite TRMM, NASA.

Fuente: Precipitation measurement missions, NASA.
<https://pmm.nasa.gov/trmm>. Consultado el 17/09/2018

El radar meteorológico de precipitación, PR, provee cartas de estructuras de tormentas tridimensionales. Se emite radiación y se reciben lecturas de la intensidad y distribución de la lluvia, tipo de lluvia, profundidad de la tormenta, altitud donde la nieve funde en lluvia.

Las mediciones de precipitación de TRMM han hecho aportaciones críticas a la predicción de ciclones tropicales (Precipitation Measurement Missions, NASA, 2018), la predicción meteorológica numérica y las climatologías de precipitación, entre muchos otros temas, así como a una amplia gama de aplicaciones sociales.

3.2.3.2 Parámetros de la Precipitación

Para fines de análisis y en concordancia con lo establecido por Suárez (1993), se tienen los siguientes parámetros:

Duración de precipitación, es el tiempo durante el cual la misma precipita sobre la zona en estudio y se mide usualmente en horas.

Intensidad de precipitación, también llamada período de retorno, o intervalo de recurrencia, se define estadísticamente como el número promedio de años entre la ocurrencia de una precipitación de cierta intensidad y otra precipitación igual o mayor que la primera.

Las curvas estadísticas que representan las variaciones de la intensidad con la duración, para diferentes frecuencias, se denominan curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (curvas IDF). La determinación de las curvas IDF es uno de los aspectos fundamentales para los cálculos de dimensionamiento de estructuras de control de aguas. Si en la cuenca bajo estudio se conociesen las curvas mencionadas, se facilitaría notablemente la determinación de la lluvia de diseño, lo que a su vez constituye el primer paso para el cálculo de caudal del proyecto.

3.2.4 Servidor Giovanni

Giovanni (Giovanni, NASA, 2018) es un entorno en línea (web) para la visualización y el análisis de parámetros geofísicos en los que se puede acceder fácilmente a la procedencia (linaje de datos). Usando la interfaz de usuario de Giovanni, es posible encontrar y visualizar fácilmente los datos seleccionados en varios tipos de trazados. También es posible descargar los archivos fuente de la trama en formato NetCDF (y otros formatos). Giovanni es la interfaz web de la NASA que provee información de varios satélites para todas las zonas del mundo. Los datos ya están procesados y pueden ser descargados en una escala requerida. La dirección web del servidor NASA Giovanni es la siguiente: <http://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>. Este servidor

permite examinar los datos satelitales con una resolución espacial reducida a la zona de estudio. Posee una serie de datos de:

- Precipitación
- Temperatura de superficie
- Evaporación y evapotranspiración
- Química atmosférica
- Temperatura atmosférica, entre otros.

Los datos en este servidor están agrupados por temas, teniendo varios sets de datos por categoría, permite búsquedas temáticas y muestra las características de los registros como resolución, tiempo de registro, etc.

3.2.5 Evapotranspiración

Como plantea Ruiz (2001), el ciclo hidrológico es un proceso continuo, simultáneo e interminable que es activado por medio de la energía solar y por fuerzas planetarias, donde es la radiación solar la que aporta la energía para evaporar el agua, que podría decirse que es donde el ciclo hidrológico inicia, se evapora el agua contenida en los océanos y en cualquiera de los recipientes continentales, convirtiéndose así en vapor de agua y pasa a formar parte de la atmósfera, es por esto que se estudia los conceptos de evapotranspiración del estudio del balance hídrico según Thornthwaite (1948).

La evapotranspiración potencial (ETP) es la cantidad máxima posible de agua que perdería el suelo por evaporación y transpiración, suponiendo que este estuviera saturado, y la evapotranspiración real (ETR) es la que se produce realmente bajo las condiciones meteorológicas, de humedad de suelo y de vegetación existentes en un lugar y durante un periodo dado.

Los cálculos de Thornthwaite están basados en la determinación de la evapotranspiración en función de la temperatura media, con una corrección en función de la duración astronómica del día y el número de días del mes.

El método es muy empleado en Hidrología y en la estimación del balance hídrico para Climatología e Hidrología de cuencas.

Thornthwaite comprobó que la evapotranspiración era proporcional a la temperatura media afectada de un coeficiente exponencial “a”, ver ecuación 2 (Thornthwaite, An approach toward a rational classification of climate., 1948), es por esto que se precisa el estudio de la temperatura media mensual del área de estudio.

$$ETP_m (mm) = 16 \times \left(10 \times t_m / I\right)^a \text{ Ecuación 2.}$$

Donde:

ETP_m : Evapotranspiración mensual sin ajustar en mm (mm/mes)

t_m : Temperatura media mensual en °C

I : Índice de calor anual

a : Coeficiente exponencial

Donde el índice de calor anual (I) se calcula mediante la ecuación 3, como la suma de los doce índices de calor mensual, y la constante “a” es un parámetro que se calcula, en función del índice de calor anual según la expresión 4.

$$I = \sum^{12} (t_m / 5)^{1,514} \text{ Ecuación 3.}$$

Donde:

I : Índice de calor anual

t_m : Temperatura media mensual en °C

$$a = 675 \times (I \times 10^{-3})^3 - 77.1 \times (I \times 10^{-3})^2 + 1792 \times (I \times 10^{-5}) + 0.493 \text{ Ecuación 4.}$$

Donde:

I : Índice de calor anual

a : Constante del índice I

Para el cálculo de la ETP de un mes determinado, mediante la ecuación 5 se corrige la ETP_m sin ajustar, mediante el factor de corrección (L) de la tabla 3.2 que tiene en cuenta el número de días del mes y horas de luz de cada día, en función de la latitud. Éste factor de corrección (L) se introduce como el

índice de iluminación mensual en unidades de doce (12) horas, que deberá multiplicar a la ETP_m para obtener la ETP según Thornthwaite (mm/mes).

$$ETP \text{ (mm/mes)} = ETP_m \times L \text{ Ecuación 5.}$$

Donde:

ETP_m : Evapotranspiración mensual sin ajustar en mm (mm/mes)

L : Factor de corrección del número de días del mes (Nd_i) y la duración astronómica del día N_i (horas de sol).

Tabla 3.2. Factor de corrección de la ETP estándar en función de la latitud (Dunne y Leopold, 1978)

Latitud	Meses del año											
	EN	FB	MZ	AB	MY	JN	JL	AG	SP	OC	NV	DC
60°N	0,54	0,67	0,97	1,19	1,33	1,56	1,55	1,33	1,07	0,84	0,58	0,48
50°N	0,71	0,84	0,98	1,14	1,28	1,35	1,33	1,21	1,06	0,90	0,76	0,68
40°N	0,80	0,89	0,99	1,10	1,20	1,25	1,23	1,15	1,04	0,93	0,83	0,78
30°N	0,87	0,93	1,00	1,07	1,14	1,17	1,16	1,11	1,03	0,96	0,89	0,85
20°N	0,92	0,96	1,00	1,05	1,09	1,11	1,10	1,07	1,02	0,98	0,93	0,91
10°N	0,97	0,98	1,00	1,03	1,05	1,06	1,05	1,04	1,02	0,99	0,97	0,96
0°	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
10°S	1,05	1,04	1,02	0,99	0,97	0,96	0,97	0,98	1,00	1,03	1,05	1,06
20°S	1,10	1,07	1,02	0,98	0,93	0,91	0,92	0,96	1,00	1,05	1,09	1,11
30°S	1,16	1,11	1,03	0,96	0,89	0,85	0,87	0,93	1,00	1,07	1,14	1,17
40°S	1,23	1,15	1,04	0,93	0,83	0,78	0,80	0,89	0,99	1,10	1,20	1,25
50°S	1,33	1,19	1,05	0,89	0,75	0,68	0,70	0,82	0,97	1,13	1,27	1,36

Fuente: (Cámara Artigas & Martínez Batlle, 2007)

3.2.5.1 Temperatura

Thornthwaite (1948) comprobó que la temperatura media mensual era base para el cálculo de la evapotranspiración, parte fundamental para el estudio del balance hídrico de la zona de estudio, la relación entre ambas está basada en que mayor temperatura es mayor la tasa de evapotranspiración, por lo que es necesario el estudio de los registros de temperatura media mensual en la superficie de Mina Colombia.

Como se mencionó en el apartado 3.2.3 la *National Aeronautics and Space Administration (NASA)* ha desarrollado instrumentos de monitoreo de diversos fenómenos físicos, a bordo de satélites espaciales, que han

permitido estudiar el ciclo del agua en el sistema climático actual. Como describe Pearce (2018) la NASA en su proyecto *Energy and Water Cycle Study*, ha estado implementando los productos hidrológicos basados en satélites, tales como humedad del suelo y la temperatura superficial, datos recopilados por The Global Land Data Assimilation System (GLDA).

3.2.5.2 The Global Land Data Assimilation System (GLDAS)

El Sistema Global de Asimilación de Datos Terrestres (GLDAS) (Rodell, Houser et al., 2004) es generado mediante un marco de infraestructura digital llamado Land Information System (Sistema de Información Terrestre, LIS; Kumar et al., 2006), desarrollado por el Laboratorio de Ciencias Hidrológicas del Centro de Vuelo Espacial Goddard (GSFC) de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio de E. U. A. (NASA). Consiste en diversos modelos de superficie terrestre (desacoplados de cualquier modelo atmosférico) forzados con observaciones, lo que evita sesgos de forzamientos resultados de predicciones climáticas numéricas. Su objetivo principal es integrar productos de percepción remota y observación terrestre con técnicas de modelación para generar campos óptimos de distintos estados y flujos de superficie terrestre.

Como se describe en la tabla 3.2, el Sistema GLDAS usa un conjunto de datos globales de clasificación de la cobertura del suelo con resolución de 1 km, producido por la Universidad de Maryland (E. U. A.) que incluye once tipos de vegetación, además de agua, terreno sin cultivar, y cobertura urbana. Los mapas de parámetros del suelo usados en GLDAS fueron derivados del conjunto de datos globales de Reynolds, Jackson y Ralas (1999), la información de elevación y pendiente es obtenida de un mapa topográfico global de 30" de resolución.

Este sistema ofrece resultados de cuatro distintos modelos de superficie terrestre (LSM), mediante los que simula la transferencia de masa y energía

entre las superficies del suelo, vegetación y la atmosfera, a saber: modelo Mosaico, modelo NOAH, Modelo Terrestre Comunitario (CLM) y modelo de Capacidad de Infiltración Variable (VIC), que guardan una estrecha semejanza entre sí de los cuales el modelo NOAH, como describe Real Rangel (2016) posee un desempeño ligeramente mejor que los demás, por lo tanto, fue el modelo que se empleó en la presente investigación.

Tabla 3.3. Especificaciones del sistema GLDAS

ESPECIFICACIONES DEL SISTEMA GLDAS	
Extensión espacial	Hemisferio Norte y hasta los 60°S
Grado de latitud	-60° a 90°N
Grado de longitud	-180° a 180°E
Resolución espacial	1° y 0,25°
Resolución temporal	3 horas o mensual
Cobertura temporal	1 enero 1979 hasta el presente para los datos de 1,0°. 24 de febrero 2000 hasta el presente para los datos de 0,25°
Forzamiento	Conjunto de datos múltiples derivados de mediciones de satélites y análisis atmosféricos
Forzamiento Altura	2m para la temperatura del aire y 10m para el viento
Definición de Elevación	Global 30 Arc-Second Elevation (GTOPO30)
Definición de Vegetación	Universidad de Maryland, 1km
Definición del suelo	Reynolds, Jackson y Rawls [1999]
Modelos de superficie terrestre	Mosaic, CLM2, Noah, VIC
Formatos de salida	GRIB, NetCDF, ASCII, GDS

Fuente: Global Land Data Assimilation System (GLDAS) Products, Services And Application From Nasa Hydrology Data And Information Services Center (HDISC), ASPRS 2009 Annual Conference.

El modelo *National Centers for Environmental Prediction/Oregon State University/Air Force/Hydrologic Research Lab*, conocido como *NOAH* (Chen et al., 1996) ha sido desarrollado desde 1993 a través de la colaboración de instituciones públicas y privadas. Es un modelo de columna unidimensional que aplica métodos de diferencias finitas para la discretización espacial y

un esquema de integración temporal de Crank-Nicholson para integrar numéricamente las ecuaciones rectoras de los procesos físicos del medio suelo-vegetación nieve.

La asimilación de datos combina mediciones y predicciones de los modelos con el objetivo de maximizar la cobertura, consistencia, resolución y precisión espacial y temporal (Rodell, Houser et al., 2004) de la información de variables atmosféricas e hidrológicas. Con este objetivo, GLDAS incluye algoritmos de asimilación de datos de percepción remota de temperatura, humedad del suelo y cobertura de nieve.

El producto GLDAS-1 cuenta con resultados de los cuatro modelos de LSM desde enero de 1979 hasta el presente con una resolución global de 1° y desde abril de 2000 hasta el presente con una resolución de 0.25° para el modelo NOAH. En ambos casos, los productos se actualizan mensualmente.

Los productos GLDAS incluyen parámetros del estado de la superficie terrestre (humedad del suelo y temperatura superficial) y de flujo (evaporación). La resolución temporal para los productos GLDAS es de tres (3) horas, los productos mensuales se generan a través del promedio temporal de los productos de tres (3) horas; el proyecto ha resultado en un archivo masivo de datos meteorológicos de superficie que incluye simulaciones desde el año 1979 hasta la actualidad.

Como expone Pearce (2018) los archivos de alta calidad de superficie terrestre global proporcionados por el sistema GLDAS, respaldan varias predicciones meteorológicas y climáticas actuales, aplicaciones de recursos hídricos e investigaciones del ciclo del agua, por lo cual se tomó como referencia para acceder a los registros de temperatura superficial de la zona de estudio.

3.2.6 Balance hídrico

Cada sistema de agua subterránea es único porque el origen y la cantidad de agua que fluye a través de él dependen de factores externos como son la tasa de precipitación, la ubicación de las corrientes y otros cuerpos de agua superficial y la tasa de evapotranspiración, sin embargo, el único factor común de todos los sistemas de agua subterránea es que la cantidad de agua que entra, sale y se almacena en el sistema se encuentra en equilibrio. El registro de todos los flujos de entrada, salida y los cambios que ocurran en el almacenamiento se denomina balance hídrico (Owen, 2010).

El Instituto de Hidrología de España y Unesco (1981) plantea que el estudio del balance hídrico se basa en la aplicación del principio de conservación de masas, también conocido como ecuación de la continuidad, la cual establece que la diferencia entre las entradas y salidas estará condicionada por la variación del volumen de agua almacenada, además indican que a partir de un estudio del balance hídrico es posible hacer una evaluación cuantitativa de los recursos de agua y sus modificaciones por influencia de las actividades del ser humano y de esta manera llevar a cabo una gestión sostenible de las aguas subterráneas.

3.2.6.1 Proceso de cálculo según la metodología de Thornthwaite y Matter (1955)

La metodología de Thornthwaite y Matter (1955) para el cálculo del balance hídrico plantea el estudio del balance del agua en el suelo a lo largo del año partiendo del conocimiento de las precipitaciones medias mensuales y de la evapotranspiración mensual estimada. El conocimiento del balance de humedad (balance hídrico) es necesario para definir la falta y excesos de agua y es de aplicación para definir la hidrología de una zona y para la planificación hidráulica.

Para la elaboración de los elementos que constituyen el balance hídrico como se mencionó anteriormente solo se precisa de las temperaturas medias mensuales (t_m), los valores mensuales de precipitación (P), que en el caso de estudio se obtuvieron mediante el sistema GLDAS y el satélite TRMM respectivamente y los datos aportados por las tablas 3.4 y 3.5 de Thornthwaite y Matter (1957).

❖ **Capacidad de campo (CC)**

La profundidad del suelo, donde tiene lugar las pérdidas de agua por evapotranspiración, viene definida por la profundidad del sistema radical de la vegetación, de tal manera que la capacidad de almacenamiento en agua de esta zona, que es susceptible a la evapotranspiración, está definida por la capacidad de campo y el punto de marchitez.

Para la obtención del valor de la capacidad de campo (CC) se aplica la ecuación 6 considerando para la capacidad de retención (CR) los valores presentados en la tabla 3.4, y los valores de la capacidad de campo de la tabla 3.5.

$$CC = CR \times P_r \text{ Ecuación 6}$$

Donde:

CR : Capacidad de retención en mm/m.

P_r : Profundidad radicular en m.

Tabla 3.4. Capacidad de retención según textura de la formación superficial

Textura de la formación superficial	Capacidad de retención (mm)
Arenosos fino	100
Franco arenoso fino	150
Franco limoso	200
Franco arcilloso	250
Arcilloso	300

Fuente: (Cámara Artigas & Martínez Batlle, 2007).

Tabla 3.5. Capacidad de almacenamiento de agua según suelo y formaciones herbáceas.

Textura del suelo	Capacidad de retención (Agua total utilizable) mm	Profundidad radicular m.	Capacidad de campo (agua utilizable) mm./m.
Formaciones herbáceas de raíces someras			
Arenoso fino	100	0,50	50
Franco arenoso fino	150	0,50	75
Franco limoso	200	0,62	125
Franco arcilloso	250	0,40	100
Arcilloso	300	0,25	75
Formaciones herbáceas de raíces de profundidad moderada (cereales)			
Arenoso fino	100	0,75	75
Franco arenoso fino	150	1,00	150
Franco limoso	200	1,00	200
Franco arcilloso	250	0,80	200
Arcilloso	300	0,50	150
Formaciones herbáceas de raíces profundas (praderas, arbustos)			
Arenoso fino	100	1,00	100
Franco arenoso fino	150	1,00	150
Franco limoso	200	1,25	250
Franco arcilloso	250	1,00	250
Arcilloso	300	0,67	200
Árboles frutales (arbolado, dehesa)			
Arenoso fino	100	1,50	150
Franco arenoso fino	150	1,67	250
Franco limoso	200	1,50	300
Franco arcilloso	250	1,00	250
Arcilloso	300	0,67	200
Bosque cerrado			
Arenoso fino	100	2,50	250
Franco arenoso fino	150	2,00	300
Franco limoso	200	2,00	400
Franco arcilloso	250	1,60	400
Arcilloso	300	1,17	350

Fuente: (Cámara Artigas & Martínez Batlle, 2007)

La superficie de Mina Colombia se caracteriza por la escasa vegetación, por lo que la capacidad de almacenamiento de agua del suelo está definida

por las formaciones herbáceas de raíces someras y por la textura del suelo franco arcillosa como se describió en el apartado 2.2.

❖ **Evapotranspiración potencial (ETP)**

El cálculo de la ETP se presentó en el apartado 3.2.5, donde se describe el cálculo de la ETP y su corrección en base del número del día del mes, la duración astronómica del día y la latitud de la zona en estudio.

❖ **Diferencia entre precipitación y evapotranspiración potencial (P - ETP)**

Thornthwaite y Matter (1955) plantean que los valores positivos entre la diferencia de precipitación y evapotranspiración potencial corresponden a adiciones potenciales de humedad y los valores negativos a pérdidas potenciales de humedad.

❖ **Agua capilar contenida en el suelo (ST).**

Thornthwaite y Matter (1955) explican que el límite superior del agua capilar contenida en el suelo (ST) es la capacidad de campo (CC) que ha de determinarse para cada formación superficial y cada formación vegetal, ver tabla 3.5, además plantean que para los meses en los que la diferencia de precipitación y evapotranspiración potencial sea mayor que cero ($P - ETP > 0$), entonces el agua capilar contenida en el suelo (ST) viene dada por la ecuación 7.

$$ST = ST_{m-1} + (P - ETP) \text{ Ecuación 7.}$$

Donde:

ST : Agua almacenada en el suelo.

ST_{m-1} : Agua almacenada en el suelo del mes anterior.

$(P - ETP)$: Pérdidas o adiciones potenciales de humedad en el suelo.

❖ **Cambios de la humedad almacenada en el suelo (ΔST).**

Los cambios de humedad almacenada en el suelo (ΔST) es la diferencia entre el agua capilar (ST) contenida en el suelo del mes en cuestión y el agua capilar contenida en el suelo del mes anterior (ST_{m-1}). Está expresado por la ecuación 8.

$$\Delta ST = ST - ST_{m-1} \text{ Ecuación 8.}$$

Donde:

ΔST : Cambios del agua almacenada en el suelo.

ST : Agua almacenada en el suelo.

ST_{m-1} : Agua almacenada en el suelo del mes anterior.

❖ **Evapotranspiración real (ETR)**

Thornthwaite y Matter (1955) plantean que si la precipitación es mayor que la evapotranspiración potencial del mes en cuestión ($P > ETP$), entonces la evapotranspiración real será igual a la evapotranspiración potencial ($ETR = ETP$). En caso contrario si la precipitación es menor que la evapotranspiración potencial del mes en cuestión ($P < ETP$), entonces la evapotranspiración real del mes (ETR) estará expresada por la ecuación 9.

$$ETR = P + |\Delta ST| \text{ Ecuación 9.}$$

Donde:

ETR : Evapotranspiración real.

P : Precipitación media mensual.

ΔST : Cambios del agua almacenada en el suelo.

❖ **Déficit de humedad (Dh).**

El déficit de humedad (Dh) es la diferencia entre la evapotranspiración real (ERT) y la evapotranspiración potencial (ETP). Está expresado por la ecuación 10,

$$Dh = ETR - ETP \text{ Ecuación 10.}$$

Donde:

Dh : Déficit de humedad.

ETR : Evapotranspiración real.

ETP : Evapotranspiración potencial.

❖ **Exceso de humedad o excedente (S).**

Existirá sólo cuando la diferencia de precipitación y evapotranspiración potencial sea mayor que cero ($P - ETP > 0$), y el agua capilar contenida en el suelo (ST) sea igual a la capacidad de campo, entonces el exceso de humedad (S) estará expresado por la ecuación 11.

$$S = P - (ETR + \Delta ST) \text{ Ecuación 11.}$$

Donde:

S: Excedente de humedad.

P: Precipitación media mensual.

ETR: Evapotranspiración real.

ΔST : Cambios del agua almacenada en el suelo

❖ **Escorrentía de agua (R) e Infiltración (I).**

En la metodología de Thornthwaite y Matter (1955) se plantea que sólo existirá escorrentía en aquellos meses en que las pérdidas o adiciones potenciales de humedad en el suelo sean mayor que cero ($P - ETP > 0$) y se cumpla que el agua capilar contenida en el suelo (ST) ha alcanzado la capacidad de campo (CC).

Para el primer mes que se alcance la capacidad de campo (CC), y por lo tanto exista escorrentía, ésta estará expresada por la ecuación 12. Además Thornthwaite propuso que el 50% del excedente de agua de un mes se escurre hacia los ríos durante el mes en cuestión y el resto se infiltra (I) hacia las capas profundas.

$$R = 0.5 \times (S + R_{m-1}) \text{ Ecuación 12}$$

Donde:

R: Escorrentía total.

S: Excedente de humedad.

R_{m-1} : Escorrentía del mes anterior.

Si existe sobrante en todos los meses será necesario realizar un ciclo para que los datos se retro alimenten. El ciclo se terminará cuando se vuelvan a repetir los valores.

3.2.7 Drenaje de mina subterránea

Conjunto de operaciones auxiliares que impide a las aguas inundar el pozo del laboreo minero y comprende procedimientos con el fin de limitar el flujo de agua al mismo y extraer el agua que es infiltrada. El agua usualmente se encuentra presente en el terreno, algunos metros por debajo de la superficie.

Las aguas de la superficie pueden infiltrarse en el subsuelo a través de los poros y las fracturas de las rocas de las zonas mineras debido a las perturbaciones provocadas por la actividad.

De acuerdo con López (2005) los puntos de drenaje se distribuyen en lugares convenientes y, las cámaras de bombas se sitúan próximas a los pozos. Se utilizan canales y tuberías. En minas profundas las aguas se bombean por etapas que van de 150 a 600 m y aún superiores a 900 m. Grandes alturas de impulsión representan grandes presiones, que obligan a emplear bombas, así como accesorios especiales. Reducir la altura de impulsión exige el uso de bombeo en serie.

3.2.7.1 Sistemas de bombeo

Los sistemas de bombeo en las minas subterráneas son normalmente múltiples, lo que significa que las estaciones de bombas se encuentran en diversos niveles como se observa en la figura 3.3, desde un nivel, se bombea el agua hasta un nivel superior y de éste nuevamente se bombea al nivel superior y así sucesivamente hasta que el agua bombeada sale a superficie. En muchas minas, esta agua es empleada en la operación de las plantas de proceso y se recircula tanto como es posible. En la mayoría de las minas se trata de no disponer aguas al ambiente, pero si esto es necesario, estas aguas deben ser tratadas para lograr su purificación hasta que alcance la calidad de aguas de riego.

3.2.8 Bombas

La palabra bomba es un término general que designa a cualquier máquina hidráulica que añade energía a un fluido. El incremento en la energía hidráulica se experimenta como un aumento en la presión del fluido.

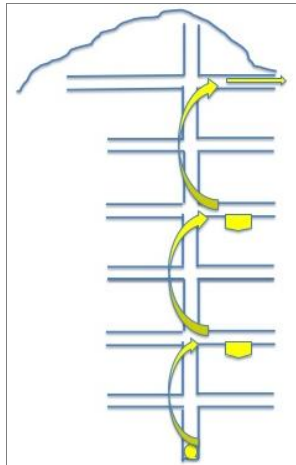


Figura. 3.3. Dirección de sistema de bombeo. Fuente: Drenaje de mina. [https://es.slideshare.net/ProfesorUPV/drenaje-de-mina-subterranea] Consultado el 07/10/2017 Octubre.

Para analizar el rendimiento de una bomba Çengel y Cimbala (2012) plantean que se emplean algunos parámetros fundamentales, como la razón de flujo de masa del fluido a través de la bomba, “ m ”, parámetro fundamental en el funcionamiento de las bombas. En el caso del fluido incompresible, como el agua, es más común utilizar el gasto volumétrico en vez del gasto másico. En la industria de la turbo maquinaria, el flujo volumétrico se denomina capacidad, aunque también caudal, y está expresado por la ecuación 13 como el gasto másico dividido entre la densidad del fluido en cuestión:

$$Q = \frac{m}{\rho} \text{ Ecuación 13. Gasto volumétrico (Caudal)}$$

Donde:

m : Flujo de masa del fluido a través de la bomba

ρ : Densidad del fluido.

Además, el rendimiento de una bomba se caracteriza por su carga hidrostática neta “ H ”, que se define con la ecuación 14 como el cambio en la carga hidrostática de Bernoulli entre la entrada y la descarga de la bomba.

La carga hidrostática neta es simplemente el aumento de la presión en la bomba que se expresa como carga (altura de la columna de fluido), es proporcional a la potencia útil entregada al fluido, su dimensión es de longitud

y con frecuencia se menciona como altura de una columna equivalente de agua.

$$H = \left(\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 \right)_{sal} - \left(\frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 \right)_{ent} \quad \text{Ecuación 14. Carga hidrostática neta de la bomba.}$$

Donde:

$\left(\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 \right)_{sal}$: Carga hidrostática en la salida de la bomba

$\frac{P}{\rho g}$: Carga de presión, representa la altura de una columna de fluido que produce la presión estática P .

$\frac{V^2}{2g}$: Carga de la velocidad, representa la elevación necesaria para que un fluido alcance la velocidad V .

Z : Carga de elevación, representa la energía potencial del fluido.

$\left(\frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 \right)_{ent}$: Carga hidrostática en la entrada de la bomba

H : Carga total para el flujo

3.2.8.1 Ecuación de Bernoulli

Çengel y Cimbala (2012) describen la ecuación de Bernoulli como una relación aproximada entre la presión, la velocidad y la elevación en el flujo estacionario e incompresible, un instrumento con amplia aplicación en mecánica de fluidos que puede plantearse como el “principio de conservación de la energía mecánica” que puede expresarse entre dos puntos cualesquiera sobre una línea de corriente mediante la ecuación 15.

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} + gZ_1 = \frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} + gZ_2 \quad \text{Ecuación 15.}$$

Donde:

$\frac{P_1}{\rho}$: Energía de flujo.

$\frac{V_1^2}{2}$: Energía cinética.

gZ_1 : Energía potencial.

La ecuación de Bernoulli se obtiene a partir de la segunda ley de Newton para una partícula fluida que se mueve en línea recta y de la primera ley de la termodinámica aplicada a un sistema de flujo uniforme, de tal manera se concibe como una expresión del balance de energía mecánica y se enuncia de la siguiente manera:

“La suma de la energía cinética, la potencial y la de flujo de una partícula de fluido es constante a lo largo de una línea de corriente en el transcurso del flujo estacionario, cuando los efectos de la compresibilidad y de la fricción son despreciables.” (Çengel y Cimbala, 2012)

3.2.8.2 Curvas de rendimiento de la bomba y correspondencia entre una bomba y un sistema de tubería

El máximo flujo volumétrico en una bomba ocurre cuando la carga hidrostática neta es cero, $H = 0$ es decir la carga y la descarga ocurren a la misma altura; este flujo se llama descarga libre de la bomba. La condición de descarga libre se logra cuando es inexistente la restricción de flujo en la entrada o la salida de la bomba, en otras palabras, cuando no hay carga en la bomba. En este punto de operación, el caudal (Q) es grande pero la carga hidrostática (H) es cero; la eficiencia de la bomba es cero porque la bomba no está haciendo trabajo útil.

En caso opuesto, la carga al cierre es la presión hidrostática neta que se presenta cuando el gasto volumétrico es cero ($Q = 0$), y se obtiene cuando la abertura de descarga de la bomba está bloqueada. En estas condiciones la carga hidrostática (H) es grande pero el caudal (Q) es igual a cero; la eficiencia de la bomba es otra vez cero porque la bomba no realiza trabajo útil.

Entre estos dos extremos, desde el cierre hasta la descarga libre, la carga hidrostática neta de la bomba (H), al incrementar el caudal, podría incrementarse un poco desde su valor al cierre, pero definitivamente H debe

disminuir a cero a medida que el gasto volumétrico aumenta hasta su valor de descarga libre.

La eficiencia de la bomba alcanza su valor máximo en algún punto entre la condición de cierre y la condición de descarga libre; este punto de operación de eficiencia máxima se denomina punto de la mejor eficiencia o punto nominal o punto de diseño y se denota con un asterisco (H^*). Las curvas de H , η_{bomba} y bhp como funciones de caudal (Q) se denominan curvas de rendimiento de la bomba (curvas características), figura 3.4. Las curvas del rendimiento de la bomba cambian con la velocidad rotacional.

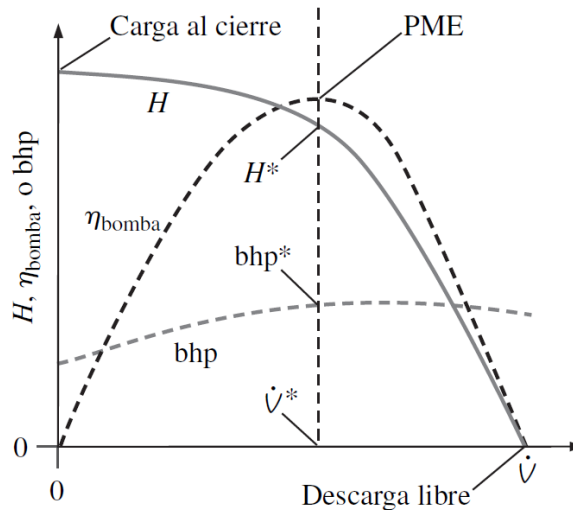


Figura 3.4. Curvas de rendimiento típicas de una bomba centrífuga.
Fuente: (Çengel & Cimbala , 2012).

Es importante tener en cuenta que una bomba puede operar solo según su curva de rendimiento, por lo que Çengel y Cimbala (2012) explican que el punto de operación de un sistema de tuberías se determina cuando se hace corresponder la demanda del sistema ($H_{necesaria}$: carga hidrostática neta necesaria) con el rendimiento de la bomba ($H_{disponible}$: carga hidrostática neta disponible). En una aplicación representativa, $H_{necesaria}$ y $H_{disponible}$ coinciden en un único valor de caudal, que es el punto de operación o punto de servicio del sistema.

“El punto de operación permanente de un sistema de tuberías está establecido en el gasto volumétrico donde $H_{necesaria} = H_{disponible}$.”

En un sistema de tuberías con sus pérdidas mayores y menores y cambios de altura, entre otras variaciones, la carga hidrostática neta necesaria se incrementa con el gasto volumétrico y como se muestra en la figura 3.4 la carga hidrostática neta disponible de la mayoría de las bombas disminuye con el caudal, por lo menos sobre la mayor parte de su rango de operación recomendado. Por lo tanto, la curva de la demanda del sistema y la curva de rendimiento de la bomba se cruzan como se ilustra en la figura 3.5 y esto determina el punto de operación, definido como el gasto volumétrico (caudal) en donde la curva de la demanda del sistema y la curva de rendimiento se interceptan.

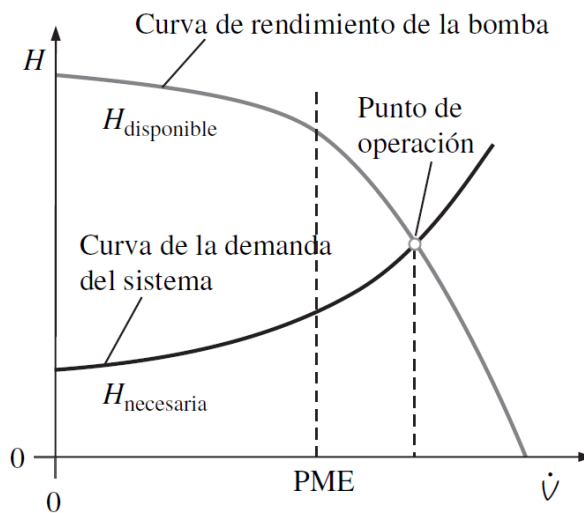


Figura 3.5. Punto de operación de un sistema de tuberías.
Fuente: (Çengel & Cimbala , 2012).

Para acoplar un sistema de tuberías a una bomba Çengel y Cimbala (2012) plantean que el término para carga útil de la bomba ($h_{bomba,u}$) es el mismo que la carga hidrostática neta (H), de manera que para un sistema general de tuberías con cambios de altura, pérdidas mayores y menores y aceleración del fluido tal como se presenta en la figura 3.6, primero se resuelve la ecuación 16 de energía para la carga hidrostática neta necesaria $H_{necesaria}$.

$$H_{necesaria} = h_{bomba,u} = \frac{P_2 - P_1}{\rho g} + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} + (Z_2 - Z_1) + h_{L,total}$$

Ecuación 16. Carga hidrostática neta necesaria.

Donde:

$h_{bomba,u}$: Carga útil entregada al fluido por la bomba (en función del trabajo mecánico de la bomba)

$\frac{P}{\rho g}$: Carga de presión, representa la altura de una columna de fluido que produce la presión estática P

$\frac{V^2}{2g}$: Carga de la velocidad, representa la elevación necesaria para que un fluido alcance la velocidad V

Z : Carga de elevación, representa la energía potencial del fluido

$h_{L,total}$: es la pérdida irreversible de carga (pérdidas por fricción) entre los puntos 1 y 2 (figura 3.6), debido a todos los componentes del sistema de tuberías distintos a la bomba en cuestión.

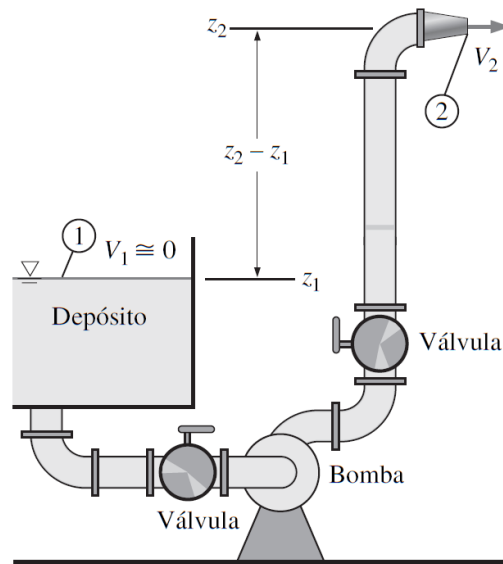


Figura 3.6. Representación gráfica de la ecuación de carga hidrostática neta necesaria.

Fuente: (Çengel & Cimbala , 2012).

La ecuación se evalúa desde la entrada del sistema de tuberías (punto 1 en la figura 3.6, corriente arriba de la bomba) hasta la descarga del sistema de tuberías (punto 2 en la figura 3.6, corriente debajo de la bomba). La

ecuación señala que la carga hidrostática útil de la bomba que se entrega al fluido realiza lo siguiente:

- Incrementa la presión estática del fluido desde el punto 1 hasta el punto 2 (primer término de la derecha).
- Aumenta la presión dinámica (energía cinética) del fluido desde el punto 1 hasta el punto 2 (segundo término de la derecha).
- Aumenta la elevación (energía potencial) del fluido desde el punto 1 hasta el punto 2 (tercer término de la derecha).
- Vence las pérdidas irreversibles de carga hidrostática en el sistema de tuberías (último término de la derecha).

En un sistema general, el cambio en la presión estática, presión dinámica y elevación pueden ser positivas o negativas, en tanto que las pérdidas de carga irreversibles siempre son positivas. En muchos de los problemas de ingeniería, en los cuales el fluido es un líquido, el término de elevación es importante.

Finalmente, para acoplar una bomba a un sistema y para determinar el punto de operación, como se expresa en la ecuación 17, se iguala $H_{necesaria}$ con $H_{disponible}$ la cual es la carga hidrostática neta de la bomba como una función del gasto volumétrico.

$$H_{necesaria} = H_{disponible} \text{ Ecuación 17. Punto de operación.}$$

Donde:

$H_{necesaria}$: Demanda del sistema (carga hidrostática neta necesaria).

$H_{disponible}$: Rendimiento de la bomba (carga hidrostática neta disponible).

La situación más común es que se seleccione una bomba un poco más potente que la que en realidad se necesita. El gasto volumétrico a través del sistema de tubería es un poco más grande que el necesario, por lo que se instala una válvula o un amortiguador en la línea, de modo que el caudal puede disminuirse cuando se necesite.

3.3 Bases jurídicas

En esta sección se describe el marco jurídico a partir de la Constitución de la República Bolivariana de Venezuela, las Leyes Orgánicas del Ambiente, el Decreto con Ley de Rango, Valor y Fuerza de Ley de Minas y las normativas técnicas que regulan la protección ambiental con especial atención en la conservación y gestión integral de los recursos hídricos.

3.3.1 Constitución de la República Bolivariana de Venezuela

La Constitución de la República Bolivariana de Venezuela, es el documento de mayor rango en la escala legal, aprobada a través de consulta pública y publicada en Gaceta Oficial N° 36.860 el 30 de diciembre de 1999.

En la Constitución son declarados los poderes y los principios según los cuales son aprobadas las leyes y reglamentos. De acuerdo con Cazal (2013) es importante resaltar el artículo 106 el cual expresa que “El Estado atenderá a la defensa y conservación de los recursos naturales de su territorio y la explotación de estos estará dirigida primordialmente al beneficio colectivo de los venezolanos y las venezolanas”.

Referente a los derechos ambientales, se tiene: en el Capítulo IX, artículo 127, que: “Es un derecho y un deber de cada generación proteger y mantener el ambiente en beneficio de sí misma y del mundo futuro”.

3.3.2 Leyes Ambientales

a) Ley de aguas

Fue publicada en Gaceta Oficial N° 38.595 de fecha 2 de enero de 2007, tiene por objeto establecer las disposiciones que rigen la gestión integral de las aguas, como elemento indispensable para el desarrollo sustentable del país, y es de carácter estratégico e interés de Estado.

Sobre la gestión integral de las aguas dispone en el artículo 3: La gestión integral de las aguas comprende, entre otras, el conjunto de actividades de índole técnica, científica, económica, financiera, institucional, gerencial, jurídica y operativa, dirigidas a la conservación y aprovechamiento del agua en beneficio colectivo, considerando las aguas en todas sus formas y los ecosistemas naturales asociados, las cuencas hidrográficas que las contienen, los actores e intereses de los usuarios o usuarias, los diferentes niveles territoriales de gobierno y la política ambiental, de ordenación del territorio y de desarrollo socioeconómico del país.

De igual manera a través del artículo 4 se resalta como principales objetivos de la gestión integral de aguas garantizar la conservación de las aguas tanto superficiales como subterráneas además de la prevención y control de los posibles efectos negativos de las mismas sobre la población.

Merece destacarse el artículo 5 por los principios que rigen la gestión de las aguas:

1. El acceso al agua es un derecho humano fundamental.
2. El agua es insustituible para la vida, el bienestar humano, el desarrollo social y económico, constituyendo un recurso fundamental para la erradicación de la pobreza y debe ser manejada respetando la unidad del ciclo hidrológico.
3. El agua es un bien social. El Estado garantizará el acceso al agua a todas las comunidades urbanas, rurales e indígenas, según sus requerimientos.
4. La gestión integral del agua tiene como unidad territorial básica la cuenca hidrográfica.
5. La gestión integral del agua debe efectuarse en forma participativa.
6. El uso y aprovechamiento de las aguas debe ser eficiente, equitativo, óptimo y sostenible.
7. Los usuarios o usuarias de las aguas contribuirán solidariamente con la conservación de la cuenca, para garantizar en el tiempo la cantidad y calidad de las aguas.
8. Es una obligación fundamental del Estado, con la activa participación de la sociedad, garantizar la conservación de las fuentes de aguas, tanto superficiales como subterráneas.

9. En garantía de la soberanía y la seguridad nacional no podrá otorgarse el aprovechamiento del agua en ningún momento ni lugar, en cualquiera de sus fuentes, a empresas extranjeras que no tengan domicilio legal en el país.

10. Las aguas por ser bienes del dominio público no podrán formar parte del dominio privado de ninguna persona natural o jurídica.

11. La conservación del agua, en cualquiera de sus fuentes y estados físicos, prevalecerá sobre cualquier otro interés de carácter económico o social.

12. Las aguas, por ser parte del patrimonio natural y soberanía de los pueblos, representan un instrumento para la paz entre las naciones.

b) Reglamento de la ley de aguas

Fue publicada en Gaceta Oficial N° 41.377 de fecha 13 de abril de 2018, tiene por objeto desarrollar las normas que regulan las materias contenidas en la Ley de Aguas.

Se presentan en el artículo 4 los criterios para el cálculo del balance hídrico en las regiones y cuencas hidrográficas que se considere pertinente, los cuales se indican a continuación:

1. “La interacción entre las aguas superficiales y subterráneas.
2. Los ingresos y egresos de agua, tanto naturales como los que sean producto de obras de infraestructura hidráulica.
3. Las variaciones del volumen de agua acumulado en la unidad espacial de referencia considerada.
4. Las extracciones de agua superficial o subterránea para los diferentes usos.
5. Las restricciones de uso relacionadas con la calidad del agua.”

El Ministerio del Poder Popular que ejerza la Autoridad Nacional de las Aguas determinará el mecanismo para el cálculo del balance hídrico.

3.3.3 Leyes y reglamentos de minas

a) Decreto con Rango y Fuerza de Ley de Minas

Fue publicada en Gaceta oficial N°5382 Extraordinario, de fecha 28 de septiembre de 1999, y tiene por objeto regular lo referente a las minas y a

los minerales existentes en el territorio nacional, cualquiera que sea su origen o presentación, incluida su exploración y explotación, así como el beneficio, o almacenamiento, tenencia, circulación, transporte y comercialización, interna o externa, de las sustancias extraídas, salvo lo dispuesto en otras leyes.

Se establece por primera vez en la legislación venezolana el principio del desarrollo sostenible, el cual implica el ejercicio de la actividad minera en concordancia con aspectos ambientales, de ordenación del territorio, de estabilidad económica y de responsabilidad social.

El tema ambiental es recurrente tanto en la Ley de Minas como en su Reglamento. En particular, cabe destacar el artículo 15, el cual señala que las actividades mineras deben efectuarse con acatamiento a la legislación ambiental y a las demás normativas que rigen la materia.

3.3.4. Decretos y normas

a) Decreto 883 Normas para la clasificación y el control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes líquidos

Fue publicado en Gaceta Oficial N° 5.021 Extraordinario, de 18 de diciembre de 1995, y establece las normas para el control de la calidad de los cuerpos de agua y de los vertidos líquidos.

Se deben tomar medidas para cumplir con la prohibición de realizar cualquier tipo de vertido o infiltración de poluentes a los cursos de agua superficiales o subterráneos. En el caso de descargas a cuerpos de agua superficiales, los efluentes deben ser previamente tratados hasta cumplir con los parámetros previstos en la normativa.

El decreto establece los criterios para la clasificación de las aguas, así como los niveles de calidad exigibles de acuerdo con los usos a que se destinen las aguas. En el artículo 7 se señalan las actividades que se someterán a la aplicación de este Decreto, de acuerdo con la Clasificación Industrial

Internacional Uniforme de las Naciones Unidas, con indicación específica de las actividades del sector minero.

El artículo 10 establece los rangos y límites máximos de calidad de vertidos líquidos que vayan a ser descargados, en forma directa o indirecta, a ríos, estuarios, lagos y embalses.

b) Decreto 2.220 Normas para Regular las Actividades Capaces de Provocar Cambio de Flujo, Distribución de Cauces y Problemas de Sedimentación.

Fue publicado en Gaceta Oficial N° 4.418 Extraordinario, del 27 de abril de 1992, tiene por objeto controlar el desarrollo de actividades que, por generar variaciones en los sistemas de control de obras hidráulicas, obstrucción de cauces y escorrentías y producción artificial de sedimentos, son susceptibles de ocasionar daños tales como inundaciones, déficit en la distribución de aguas, inestabilidad de cauces y alteración de la calidad de las aguas.

En el artículo 5 se expone que cualquier actividad que contemple en encauzamiento, alineamiento, revestimiento o protección de los canales, deberá garantizar su eficiente funcionamiento, con la finalidad de evitar el desbordamiento, erosión y disposición de sedimentos.

Para evitar la modificación de los flujos y alteración de los cauces y a los fines de proteger las obras hidráulicas susceptibles de ser afectadas, en el artículo 8 se plantea que se deberán tomar las previsiones técnicas en obras de protección que en cada caso y según las características de las actividades a ejecutar establecerá la Autoridad que ejerza la función.

c) Normas para aguas industriales y residuales, de la Comisión Venezolana de Normas Industriales (COVENIN), con los procedimientos para el muestreo de aguas y la determinación de metales (2709-90 y 2768-91).

CAPÍTULO IV

MARCO METODOLÓGICO

En este capítulo se detallan aspectos metodológicos seleccionados para desarrollar este proyecto de investigación, cuyo objetivo es proponer una gestión integral de agua subterránea en la Mina Colombia, El Callao, estado Bolívar. Se describe el conjunto de acciones destinadas al análisis del problema planteado, a través de procedimientos específicos que incluyen las técnicas de observación, recolección y análisis de datos de campo y oficina.

4.1 Tipo de investigación

Esta investigación es un estudio de campo-descriptivo-correlacional, debido a que se realizaron las mediciones de diversas variables que engloban el objeto de estudio para su posterior análisis y representación, ya que se llevó a cabo la comparación de la situación actual del drenaje con parámetros que permitan plantear una posible solución.

4.2 Diseño de investigación

El diseño de la investigación es de tipo no experimental transaccional debido a que no hay manipulación intencional de las variables, además de que la recolección de datos se llevó a cabo en el periodo de tiempo de inundación actual de la mina.

4.3 Sujeto de estudio

El sujeto de estudio es la Mina Colombia de la empresa MINERVEN, la cual se encuentra integrada por los niveles uno (1) hasta el siete (7) y el volumen transiente de agua en la mina, desde la condición inicial hasta las condiciones dinámicas resultantes por los procesos de extracción mineral.

4.4 Recolección de datos

El enfoque de la presente investigación corresponde a la gestión coordinada de los caudales excedentes que producen la inundación eventual del laboreo subterráneo, por lo cual la metodología a seguir es la descrita en la figura 4.1. Una integración del componente atmósfera, agua superficial y agua subterránea, para la gestión integral de los caudales disponibles y excedentes en la zona de estudio.

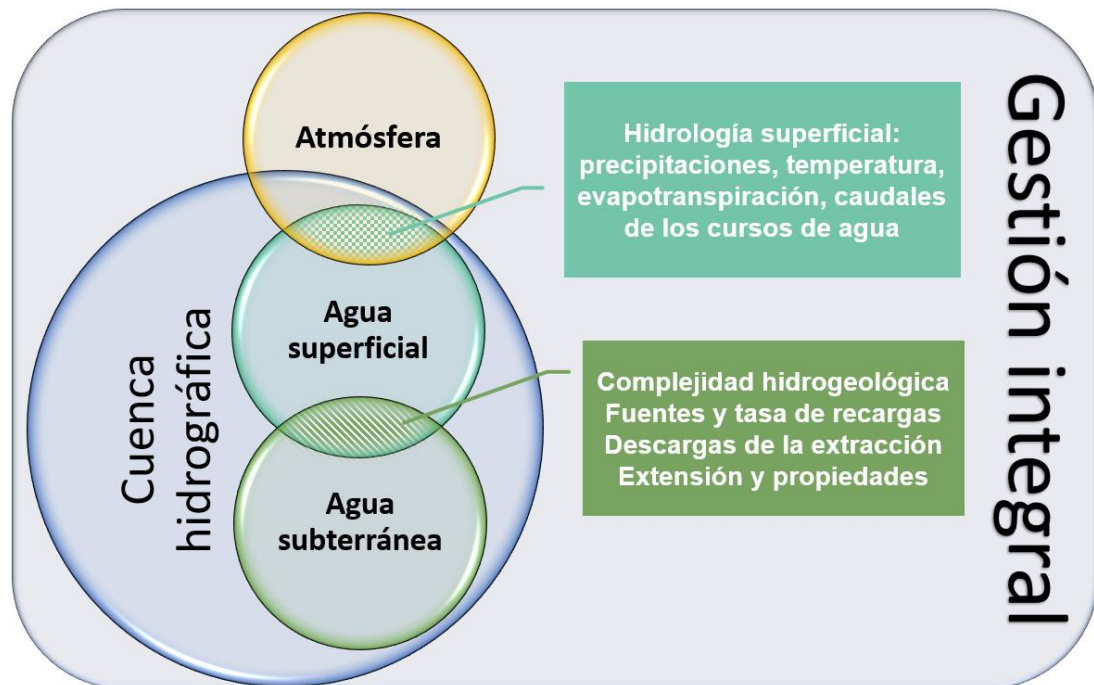


Figura 4.1. Enfoque de la Gestión integral de agua subterránea.
Fuente: Elaboración propia.

La integración del componente atmósfera y agua superficial comprende un estudio de la hidrología superficial: precipitaciones, temperatura, evapotranspiración y caudales de los cursos de agua presentes en el agua superficial de la cuenca hidrográfica, y la integración de los dos últimos abarca el análisis de la complejidad hidrogeológica, fuentes y tasa de recarga del sistema, descargas en superficie de la extracción del agua subterránea (sistema de bombeo) y la extensión y propiedades del agua subterránea almacenada en el laboreo minero afectado.

Para desarrollar el enfoque anteriormente descrito y obtener un desempeño óptimo, la investigación se dividió en cuatro (4) etapas descritas en la figura 4.2: recopilación de material técnico, actividades de campo, procesamiento y diseño. Para cada una de ellas, variaron las técnicas e instrumentos a utilizar según las necesidades que se identificaron en el avance de la investigación.

4.4.1 Técnicas utilizadas

En el marco de la gestión integral de aguas, en primer lugar, se estudió la integración del componente atmósfera y agua superficial. Se realizó una recopilación de información climatológica, para analizar la integración de las variables temperatura y precipitación (hidrología superficial) mediante el diseño del balance hidrológico, para lo que se realizaron consultas con el departamento de Climatología de la escuela de Geografía, UCV. Por la necesidad de los datos de temperatura y precipitación del área de estudio, se accedió mediante el servidor Giovanni a los datos meteorológicos recopilados por los satélites y sistemas de la NASA, destinados para ello. Se recopiló información bibliográfica hidromecánica para la posterior etapa de campo en mina Colombia.

En la etapa de campo, se estudió la integración entre el componente agua superficial y agua subterránea de mina Colombia. Se llevó a cabo la documentación de planos topográficos y geológicos con el departamento de Topografía, MINERVEN. Se realizó un seguimiento del nivel del agua subterránea presente en el laboreo de la mina y del sistema hidromecánico encargado de la extracción y las descargas de la misma. Además se levantó información hidrológica de los cursos de agua presentes en la superficie de la mina.

Los datos obtenidos en las etapas anteriores de los tres (3) componentes mencionados en la figura 4.1, fueron organizados e integrados en la fase de procesamiento. En cuanto a los componentes atmósfera y agua superficial los

datos meteorológicos obtenidos mediante el servidor Giovanni, se depuraron con ayuda de herramientas de cálculo contenidas en el programa Excel de Microsoft ® obteniendo así, los datos de la hidrología superficial (temperatura y precipitación) de la superficie de mina Colombia.

En relación a los componentes agua superficial y agua subterránea: mediante el programa AutoCAD Civil 3D 2011, se elaboró el análisis de la superficie de la zona de estudio, se definieron sus sub cuencas y los cursos de agua de la escorrentía superficial, lo cual se integró seguidamente con los planos recopilados en la etapa de campo, y se obtuvo un plano integral que permitió estudiar los cursos de agua superficial, las estructuras y su comunicación con el laboreo subterráneo de la mina.

Posteriormente, en la etapa de diseño se elaboraron los análisis necesarios para la gestión integral de los productos de los componentes atmósfera, agua superficial y agua subterránea. En relación a la integración de los dos (2) primeros se realizaron los balances hídricos mediante la plantilla pública HidroBioV3.0, en donde se cuantificó el volumen total de agua de precipitación que infiltra al laboreo subterráneo. Se elaboraron curvas IDF que permitieron estudiar las precipitaciones máximas en 24 horas, las cuales en conjunto con el plano de las sub cuencas, obtenido en la etapa anterior, permitió el cálculo del caudal de los cursos de agua de cada sub cuenca que aporta agua al terreno donde se ubica mina Colombia. En lo que concierne a la interacción entre el componente agua superficial y agua subterránea, con el plano integral obtenido en la etapa de procesamiento, se analizó la relación entre el agua superficial, las estructuras y el agua subterránea. Mediante el software privado AutoCAD Civil 3D 2013 y los datos de nivel de agua obtenidos en la etapa de campo, se analizó el volumen total del agua subterránea almacenada en los laboreos inundados y finalmente se construyeron propuestas para un manejo integral de agua en la mina.

4.4.2 Instrumentos

Para llevar a cabo las etapas anteriores (recopilación, campo, procesamiento y diseño) se requirió el uso de una serie de instrumentos, los cuales se mencionan a continuación.

❖ Instrumentos de Recopilación

- Satélite TRMM, que mediante el instrumento a bordo PR (radar meteorológico) registró la intensidad de las precipitaciones en la superficie de mina Colombia.
- Sistema GLDA, a través del modelo NOAH registró la temperatura superficial de mina Colombia.
- Servidor Giovanni: entorno en línea (NASA, 2018), descrito en el apartado 3.4, permitió encontrar y visualizar los datos de precipitación y temperatura de la superficie de Mina Colombia.

❖ Instrumentos de Campo

- Cronómetro: utilizado para medir el tiempo de trabajo de las bombas in situ.
- Cinta métrica: empleada para medir las dimensiones de los sumideros, nivel de agua de la inundación, la almacenada en los sumideros y la bombeada por las estaciones de bombeo.
- Flotadores de corcho: permitió medir el caudal de agua dentro de la mina.
- GPS: se utilizó para ubicar puntos en superficie y correlacionarlos con los puntos mineros en subterráneo y así ubicar las zonas de estudio en campo.

❖ Software

- Microsoft Office ® 2013: Necesario para la compilación de información, procesamiento de texto y generación de gráficas que permitan la comprensión de la información resultante, además de procesar y depurar los datos obtenidos mediante el servidor Giovanni.
- HidroBioV3.0: plantilla diseñada bajo el programa Excel por el Departamento de Geografía Física y Análisis Geográfico Regional, de la Universidad de Sevilla, España, para el cálculo del balance hídrico y el diagrama bioclimático, se utilizó para elaborar los balances hídricos anuales desde 1998 hasta el 2017 de Mina Colombia, con los valores de temperatura y precipitación mensual y las características de la formación superficial de la zona de estudio.

- Programa AutoCAD Civil 3D 2013: para la medición de las dimensiones de las labores subterráneas inundadas, y así calcular el volumen de agua almacenadas en ellas.
- Programa AutoCAD Civil 3D 2011: para la generación de la superficie de Mina Colombia, sus sub cuencas y la escorrentía superficial y su integración con los planos estructurales y topográficos del laboreo subterráneo.
- Google *Earth*: para la ubicación referencial de las zonas de descarga del sistema y el análisis de las características de la formación superficial de mina Colombia.

4.5 Procedimiento experimental

Se presenta a continuación la figura 4.2, donde se expresan las actividades vinculadas a las cuatro (4) etapas en la que consistió la investigación (Recopilación, Campo, Procesamiento y Diseño) enmarcadas en la gestión integral de los productos de los componentes atmósfera, agua superficial y agua subterránea. La realización de las diversas tareas proporcionó el cumplimiento del objetivo planteado.



Figura 4.2. Etapas del procedimiento experimental.
Fuente: Elaboración propia.

4.5.1 Etapa de recopilación de material técnico

4.5.1.1 Interacción componente atmósfera-agua superficial

Para una gestión integral es necesario compilar datos respecto a la hidrología superficial, por lo que antes de iniciar cualquier estudio en el campo, fue fundamental la recopilación de material técnico relacionado con la interacción entre el componente atmósfera y el agua superficial, como las variables meteorológicas temperatura y precipitación en la cuenca de mina Colombia, por tal motivo se recurrió a los archivos de la Empresa, y en vista de la ausente información de las variables necesarias para el diseño del balance hidrológico se empleó el servidor Giovanni de la NASA.

Como se mencionó en el apartado 3.4, la NASA ha estado trabajando con satélites y sistemas espaciales que recopilan los valores de diversos fenómenos físicos, los cuales se han empleado en aplicaciones de recursos hídricos e investigaciones del ciclo del agua (Pearce, 2018) y mediante el servidor Giovanni se accedió a los registros de precipitación y temperatura de la zona de estudio, empleando la metodología descrita en la figura 4.3, basado en el Manual del Usuario de Giovanni (NASA 2018).

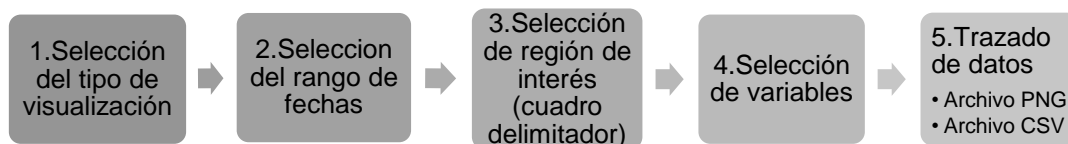


Figura 4.3. Metodología para hacer uso del Servidor Giovanni, NASA.
Fuente: Elaboración propia.

1. Selección del tipo de visualización, en el punto 1 señalado en la figura 4.4, se seleccionó la opción “*Time Series*”, específicamente “*Area Averaged*”, de esta manera los datos solicitados se representarán en una serie de tiempo sobre el área de la zona de estudio.

2. **Selección del rango de fechas**, en el punto 2 señalado en la figura 4.4, se ingresó manualmente el rango de fechas de la ventana de tiempo estudiada, desde 1998 hasta 2017.

3. **Selección de región de interés (cuadro delimitador)**, como se representa en la figura 4.4, en el punto 3 se ingresaron las coordenadas de latitud y longitud de Mina Colombia, es importante destacar que las coordenadas de latitud y longitud se ingresan como oeste, sur, este y norte, con longitudes occidentales y latitudes sur ingresadas como números negativos.

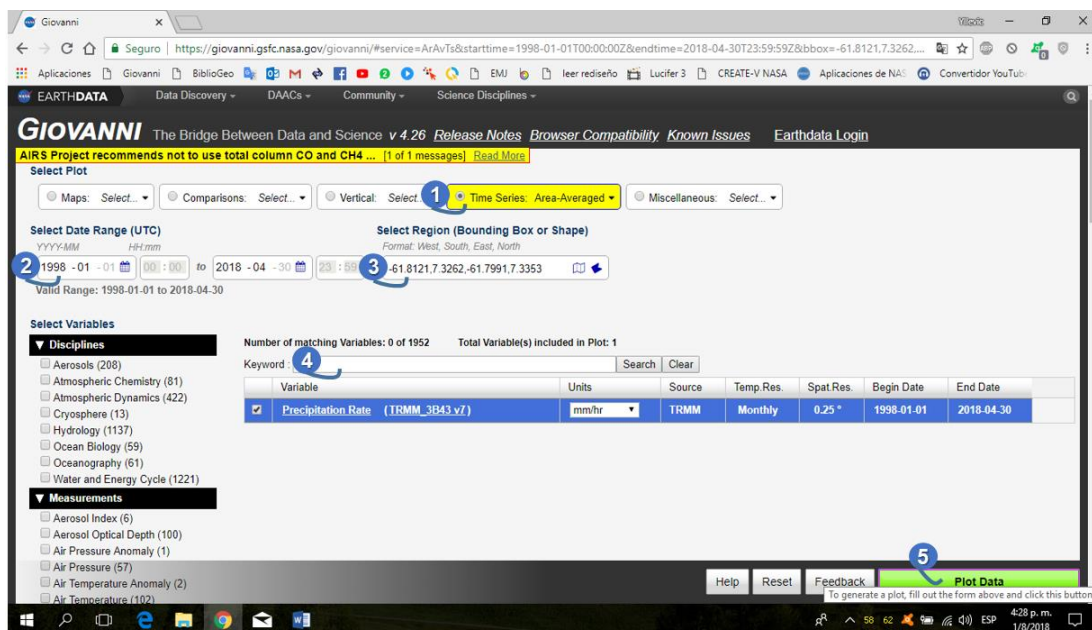


Figura 4.4. Interfaz del Servidor Giovanni, NASA.

Fuente: Elaboración propia.

4. **Selección de Variables**, en el punto 4 señalado en la figura 4.4, de la interfaz del servidor Giovanni, se escribió el nombre del satélite/sistema que registra los datos de interés, TRMM en el caso de precipitación y GLDAS en el caso de temperatura, y se hizo clic en el botón “Search”, el resultado fue un listado con las opciones de registros almacenados en dicho satélite, se seleccionaron las variables deseadas “Precipitation Rate” para los valores de precipitación y “Surface Temperature” en el caso de los datos de

temperatura; cabe destacar que en esta sección el servidor Giovanni permitió seleccionar la unidad de los datos a descargar, donde se seleccionó “*mm/mes*” para precipitación y “*K*” para el caso de temperatura.

5. Trazado de datos, finalmente se dio clic en el botón verde “*Plot Data*” (ver campo 5 figura 4.4) mediante el cual el servidor Giovanni inició el análisis y búsqueda de las variables seleccionadas, arrojando como resultados dos tipos de archivos, uno gráfico en formato PNG, que es la representación gráfica de los valores de temperatura y/o precipitación, y un archivo en formato CSV separado por comas compatible con Microsoft Excel ®, que fue posteriormente depurado en la Etapa de Procesamiento.

4.5.1.2 Interacción componente agua superficial-agua subterránea

Mediante la revisión bibliográfica de las características y los aspectos físicos naturales de la zona de estudio se recopiló la información concerniente a las estructuras de la cuenca de mina Colombia, necesaria para analizar la interacción entre el agua superficial y el agua subterránea presente en el laboreo de mina Colombia.

4.5.2 Etapa de actividades de campo

En la etapa de campo consistió en la observación y medición de las interacciones agua superficial-agua subterránea y

4.5.2.1 Interacción componente agua superficial-agua subterránea

En esta etapa se realizó adquisición de datos y se llevaron a cabo mediciones hidromecánicas, que vislumbraran la interacción entre el componente agua superficial y el agua subterránea, necesarias para el desarrollo de la investigación bajo el enfoque de la gestión integral. Se ejecutaron varias salidas de campo a los distintos sectores de estudio donde se efectuaron las siguientes actividades:

- Documentación de planos topográficos y geológicos de Mina Colombia, mediante el departamento de Topografía de la Empresa.
- Seguimiento del nivel de agua subterránea presente en el laboreo de la mina, figura 4.5 y 4.6, y del sistema hidromecánico usado para la extracción y las descargas de la misma.



Figura 4.5. Nivel de inundación en rampa del nivel 4 al nivel 5.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 4.6. Nivel de inundación en chimenea de traspase del nivel 4 al nivel 5.
Fuente: Elaboración propia.

- Levantamiento de información hidrológica de los cursos de agua presentes en la superficie de mina Colombia, figura 4.7 y 4.8.



Figura 4.7. Seguimiento de descarga en superficie del bombeo de la inundación.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 4.8. Quebrada El Tigre en la superficie de mina Colombia, e invasión minera.

Fuente: Elaboración propia.

4.5.3 Etapa de Procesamiento

4.5.3.1 Interacción componente atmósfera-agua superficial

En esta etapa se organizó e integró el material obtenido en las etapas anteriores, en cuanto a los datos de la interacción del componente atmósfera y el agua superficial, con el programa Excel de Microsoft®, siguiendo la metodología descrita en la figura 4.9. Se depuró el archivo CSV obtenido mediante el servidor Giovanni; se copiaron los valores directamente del archivo CSV a una hoja de Excel de Microsoft® que se programó para tal finalidad, con lo que se clasificaron las listas de valores de temperatura/precipitación por meses y posteriormente por años, cuidando los años bisiestos de la ventana de estudio, y se elaboraron las tablas de precipitaciones/temperaturas mensuales que se presentan en el capítulo V.

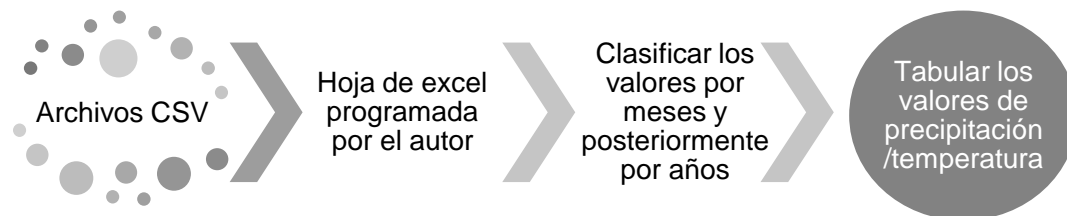


Figura 4.9. Metodología de procesamiento de los archivos obtenidos mediante Giovanni. Fuente: Elaboración propia.

4.5.3.2 Interacción componente agua superficial-agua subterránea

En relación a la interacción entre el componente de agua superficial y agua subterránea mediante el software privado AutoCAD Civil 3D 2011, se elaboró el análisis de la superficie de mina Colombia. Con la opción “Definición de cuencas de captación” se representaron las sub cuencas presentes en la superficie de mina Colombia y mediante la opción “Gota de agua” se representó la escorrentía superficial, obteniendo así el plano de la hidrología superficial de la zona de estudio y mediante el programa

AutoCAD Civil 3D 2011, se integró con el plano estructural y subterráneo de la mina y se obtuvo un plano integral con varias capas de información.

4.5.4 Etapa de diseño de la gestión integral

Con la información y resultados, obtenidas en las etapas anteriores, en esta etapa se diseñó el manejo de agua integral de Mina Colombia, mediante las siguientes actividades a través la integración de los productos de los componentes atmósfera, agua superficial y agua subterránea.

4.5.4.1 Integración componente atmósfera-agua superficial

Se realizó la cuantificación del volumen total de agua de precipitación que infiltra en el laboreo subterráneo con los valores obtenidos del balance hídrico anual, (según la metodología de Thornthwaite, descrita en el apartado 3.6) elaborado mediante la plantilla HidroBioV3.0, siguiendo la metodología descrita en la figura 4.10.

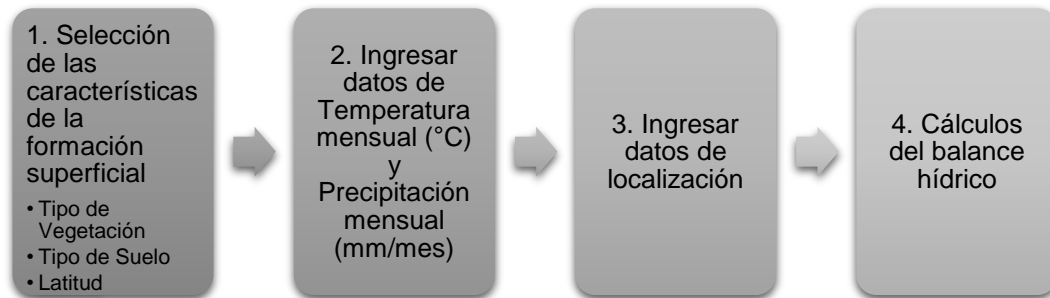


Figura 4.10. Metodología para hacer uso de la plantilla HidroBioV3.0.

Fuente: Elaboración propia.

1. Selección de las características de la formación superficial, en el punto 1, señalado en la figura 4.11, se seleccionaron las características de la formación superficial de mina Colombia, formaciones herbáceas de raíces someras, tipo de suelo franco arcilloso y la latitud de $7^{\circ}20'4.524''N^{\circ}$.

2. Ingresar datos de temperatura y precipitación, en el punto 2 (figura 4.11), se ingresaron los datos de temperatura mensual ($^{\circ}C$) y precipitación

mensual (mm/mes), obtenidos mediante el servidor Giovanni y organizados en la etapa de procesamiento.

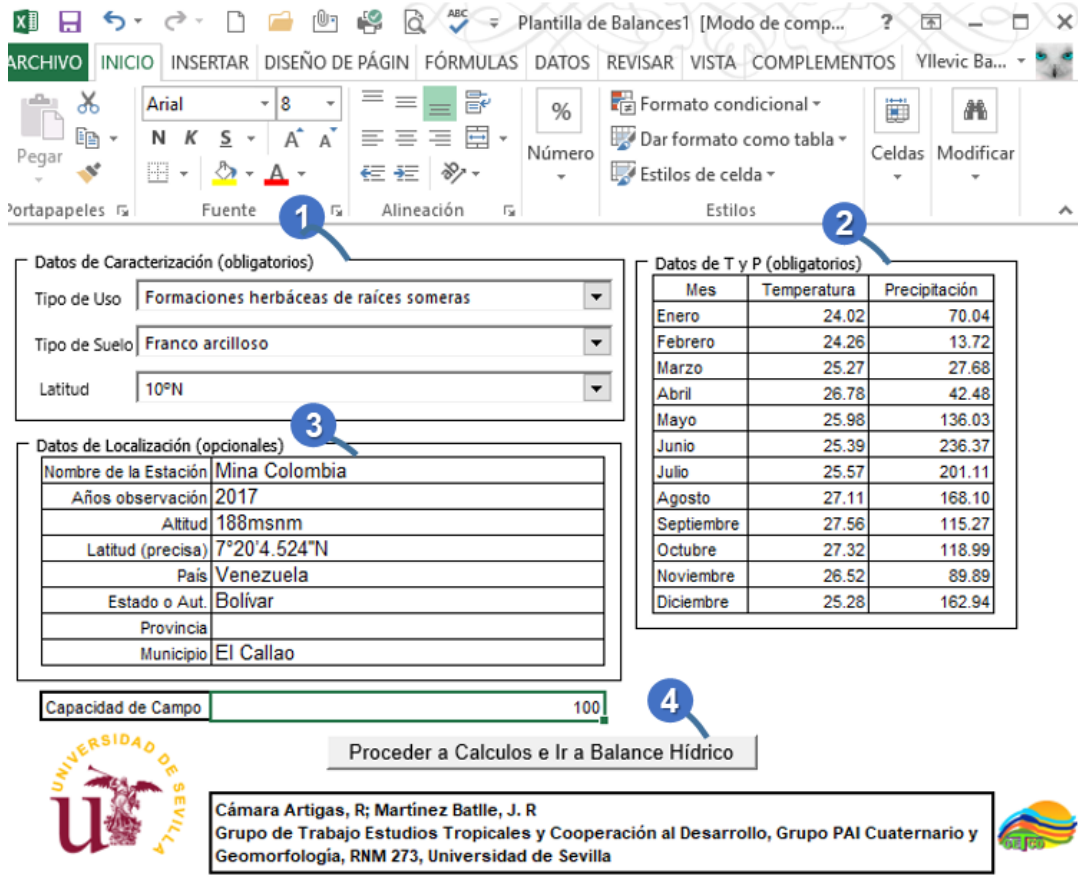


Figura 4.11. Interfaz de la Plantilla de Balances HidroBioV3.0.
Fuente: Elaboración propia.

3. Ingresar datos de localización, en el punto 3 de la figura 4.11, se ingresaron los datos referentes a la localización de la zona de estudio como altitud y año de observación.

3. Cálculos del balance hídrico, finalmente se accede a “Proceder a Calculos e Ir a Balance Hídrico” (ver punto 4, figura 4.11) mediante el cual la plantilla HidroBioV3.0 ejecutó las ecuaciones con las cuales está programada y presentó el balance hídrico acorde a los datos ingresados, según la metodología de Thornthwaite (1955).

Posteriormente se elaboraron las curvas IDF de la cuenca, que permitieron estudiar las precipitaciones máximas en 24 horas con las que en conjunto con el plano de las sub cuencas, elaborado en la etapa de procesamiento, y la ecuación 1 descrita en el apartado 3.1.1 se calculó el caudal de los cursos de agua de cada sub cuenca que aporta agua al terreno donde se ubica la mina.

4.5.3.2 Integración componente agua superficial-agua subterránea

Para la integración de los dos (2) componentes finales, con el plano integral obtenido en la etapa de procesamiento, se analizó la relación entre el agua superficial, las estructuras y el agua subterránea; mediante el software privado AutoCAD Civil 3D 2013 y los datos de nivel de agua obtenidos en la etapa de campo, se analizó el volumen total del agua subterránea almacenada en los laboreos inundados, lo que permitió finalmente elaborar la configuración del sistema hidromecánico para una gestión integral del agua presente en la mina.

CAPÍTULO V

RESULTADOS Y ANÁLISIS

En el presente capítulo se muestran los análisis de los diferentes datos que se han obtenido durante la investigación, campo y oficina. Estos están relacionados con los parámetros de precipitación y temperatura; el primero, obtenido del satélite TRMM y el segundo del sistema GLDAS, NASA respectivamente, así como las mediciones en campo del nivel de agua presente en la mina y del sistema hidromecánico que extrae agua del laboreo.

5.1 Agua superficial

Para un manejo integral de los caudales disponibles y excedentes en la zona de estudio es necesario el análisis de la integración de los productos de la atmósfera: el agua superficial y el agua subterránea. En otras palabras, el estudio del agua en el ciclo hidrológico, por lo que siguiendo el enfoque descrito en el apartado 4.4, se detallan a continuación los valores concernientes a los productos entre el componente atmósfera y el agua superficial de la cuenca hidrográfica de mina Colombia.

5.1.1 Aguas de precipitación

Los datos que se analizan en las siguientes subsecciones están relacionados con los conceptos y parámetros mostrados en la Sección 3.2.2 y 3.2.3, respectivamente.

5.1.1.1 Intensidad de precipitación

El satélite TRMM es uno de los satélites más antiguos que registra precipitación, teniendo registros que datan del año mil novecientos noventa y ocho (1998) completando hasta diecinueve (19) años de registros de

precipitación. Estos registros son base para evaluar sequías, efectos del cambio climático e inundaciones, como es el caso de estudio de mina Colombia. Los datos del TRMM son muy prácticos para conocer la dinámica de la precipitación temporal y espacialmente, además de ser de gran utilidad en este caso de estudio ya que no se cuenta con estaciones meteorológicas que registren los valores de precipitación.

Mediante las coordenadas de la superficie de la mina subterránea y a través del servidor de la NASA Giovanni, se ubicaron los registros de precipitación en un rango de tiempo considerable, de mil novecientos noventa y ocho (1998), que es la fecha base en la cual el satélite TRMM empezó a registrar valores, hasta el año dos mil diecisiete (2017). La representación gráfica de la cantidad de agua caída durante las precipitaciones entre 1998 y 2017 sobre la superficie de Mina Colombia se muestra en la Figura 5.1.

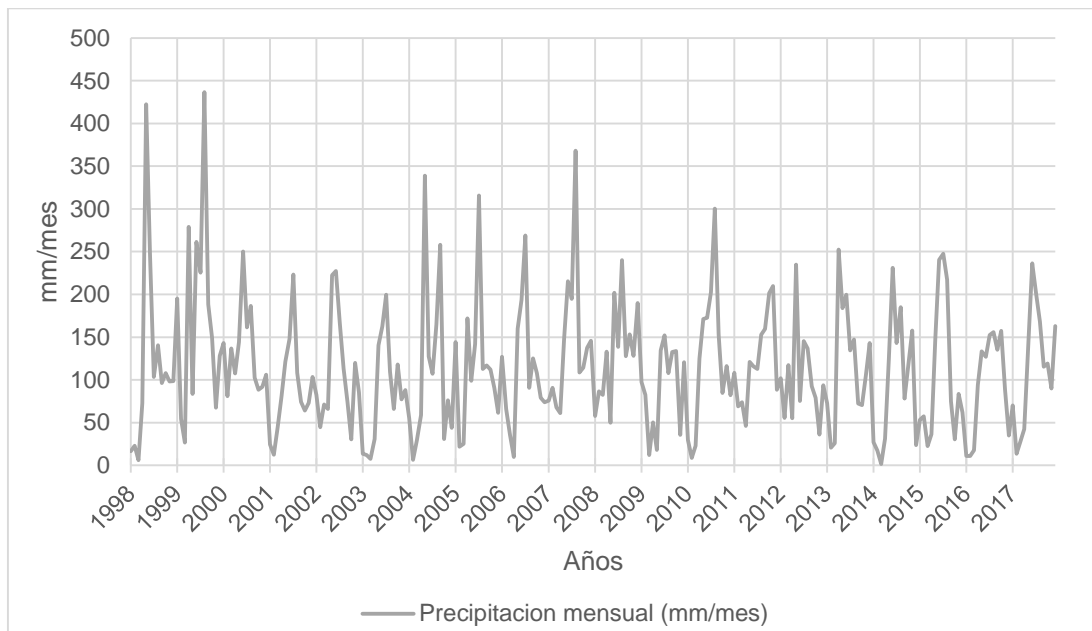


Figura 5.1. Cantidad de agua mensual caída en la superficie de mina Colombia.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del satélite TRMM.

Los datos de precipitación registrados por el TRMM indican que en la superficie de Mina Colombia ocurren precipitaciones durante todo el año,

dando como resultado que no existe un mes que pueda ser catalogado como realmente seco. Solo existe una disminución de la precipitación en los cuatro (4) primeros meses del año (enero, febrero, marzo y abril). Posteriormente, comienzan a aumentar, a partir del quinto mes (mayo) registrándose las máximas precipitaciones en los meses de junio, julio y agosto, y manteniéndose lluvias considerables en los meses restantes (tabla 5.1).

Tabla 5.1. Datos de precipitaciones mensuales (mm) en la superficie de mina Colombia, durante los años 1998-2017.

PRECIPITACIÓN MENSUAL (mm)												
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1998	16,44	23,06	5,99	72,54	422,37	246,93	103,36	140,54	96,13	107,78	98,22	98,43
1999	195,21	54,38	26,78	278,81	83,76	261,37	225,29	436,75	188,25	149,10	67,40	128,11
2000	143,16	80,78	136,62	107,68	144,14	250,11	161,30	186,51	102,51	88,56	91,69	105,97
2001	24,43	12,59	136,62	80,61	121,26	147,84	223,15	108,46	74,35	64,24	73,10	103,23
2002	82,27	44,65	136,62	66,13	222,46	227,33	167,13	113,26	74,57	30,30	119,79	85,28
2003	13,54	12,12	136,62	30,87	140,38	162,60	199,75	109,93	65,85	118,15	77,28	87,96
2004	55,00	6,52	136,62	58,82	338,96	127,26	106,99	164,66	258,11	30,81	75,97	43,76
2005	144,38	21,99	136,62	172,09	98,90	142,08	315,74	112,85	116,93	112,01	90,58	61,64
2006	127,00	65,99	136,62	10,01	160,10	193,57	268,77	90,55	125,15	107,80	79,25	74,02
2007	75,64	90,73	136,62	61,25	147,61	215,41	194,71	368,12	108,61	114,35	137,50	145,88
2008	57,77	86,75	136,62	132,88	49,85	201,91	138,59	240,12	127,64	153,09	128,28	190,07
2009	97,46	82,48	136,62	50,10	18,11	134,36	152,24	107,88	132,52	133,55	35,67	120,58
2010	29,86	8,79	136,62	124,70	171,06	172,51	202,47	300,15	153,34	84,72	116,10	81,91
2011	108,19	68,84	136,62	46,20	121,14	115,59	112,70	153,00	159,58	201,41	209,72	88,59
2012	102,03	55,32	136,62	54,98	234,94	75,21	145,49	136,60	92,66	79,04	36,04	93,68
2013	72,88	20,87	136,62	252,58	183,90	199,50	134,53	147,25	72,50	70,64	104,80	143,20
2014	26,87	17,31	136,62	31,01	124,98	231,04	143,24	185,03	78,28	117,99	157,52	23,60
2015	53,41	57,41	136,62	36,53	147,24	240,41	247,51	217,03	74,96	30,43	83,45	61,97
2016	11,12	10,78	136,62	93,97	133,33	126,85	152,47	155,93	135,40	157,49	88,30	35,02
2017	70,04	13,72	136,62	42,48	136,04	236,37	201,11	168,10	115,27	118,99	89,89	162,94

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del satélite TRMM.

La precipitación media anual disminuye cada cuatro (4) años aproximadamente, registrándose la menor durante el año 2003, donde se presentaron precipitaciones medias anuales menores de 1.050 mm y la mayor precipitación durante el año 2007, con valores que superan los 1.700 mm, como se observa en la figura 5.2.

5.1.1.2 Lluvia de Diseño

La recolección de los datos pluviométricos permite estimar cuál es la cantidad de agua que precipita en la zona o, en el mejor de los casos, obtener un registro de las precipitaciones diarias.

En la tabla 5.2 se presentan los registros de las precipitaciones máximas diarias, las cuales son de suma importancia para la construcción de la lluvia de diseño y fueron registradas por el satélite TRMM, de la NASA, durante la serie de años 1998 a 2017, con rango de percepción de cada lectura de 1 milímetro (mm). Las variaciones reportadas en dicha tabla se deben a que durante el siglo XX se presentaron cambios climáticos de consideración en el país, tales como: aumento de temperaturas nocturnas, disminución de la precipitación anual entre 3 y 20%, generando como consecuencia la agudización de las sequías en algunas zonas del país, influidas por el fenómeno de El Niño, entre otros.

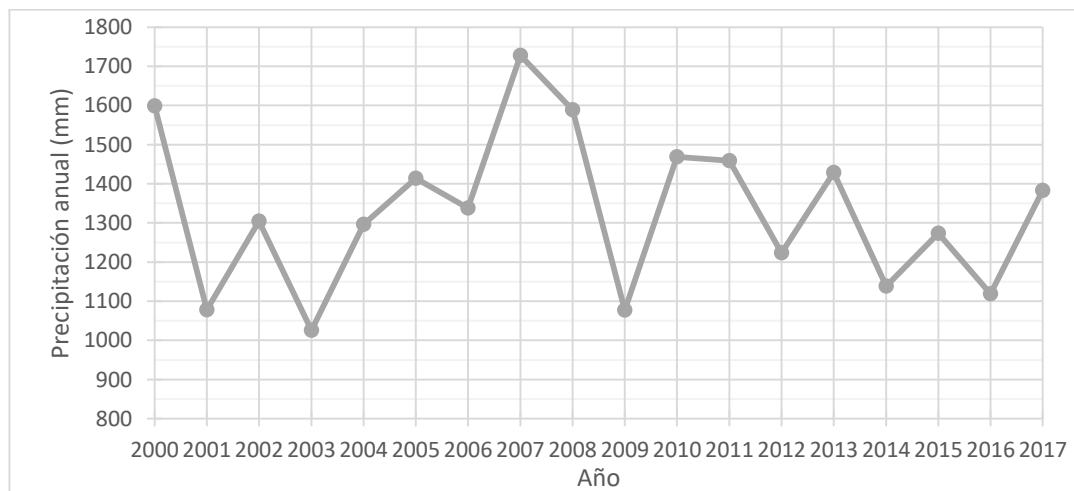


Figura 5.2. Precipitación media anual (mm) en la superficie de mina Colombia, durante los años 1998-2017.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del satélite TRMM.

En la tabla también se observa que las precipitaciones máximas tienen lugar en los meses de mayo y julio, siendo mayo el mes cuando ocurre la mayor descarga sobre la superficie de mina Colombia.

Como se explicó anteriormente, se tomaron registros de precipitación durante un período limitado de tiempo, por lo que, con fines de diseño, se requiere ajustar los datos a la función de Distribución de Probabilidad, propuesta por E.J. Gumbel (1941), que modeliza máximos y mínimos estadísticos y probabilísticos, para la distribución de valores extremos en el análisis de frecuencia de datos hidrológicos.

Tabla 5.2. Datos de precipitaciones máximas diarias (mm), en mina Colombia, MINERVEN durante los años 1998-2017.

PRECIPITACIÓN MÁXIMAS DIARIAS (mm)														
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Máximo	
1998	3,33	15,17	0,18	31,59	70,86	60,93	23,55	38,25	24,82	46,11	12,38	33,79	70,86	May
1999	36,31	14,29	13,72	96,24	24,58	68,49	62,57	66,73	68,29	41,81	17,85	25,64	96,24	Abr
2000	47,97	36,97	48,31	43,26	30,75	43,41	35,8	44,88	36,86	46,37	20,72	36,86	48,31	Mar
2001	0,72	2,07	40,56	40,74	25,77	25,17	75,63	28,73	30,56	14,29	12,24	42,71	75,63	Jul
2002	27,99	35,01	18,08	11,8	34,1	29,13	31,43	18,99	21,62	12,76	27,06	42,13	42,13	Dic
2003	0	3,81	3,49	6,39	28,55	28,14	44,83	38,32	16,77	41,7	28,8	38,48	44,83	Jul
2004	26,46	0,18	20,58	12,87	126,43	23,7	21,47	84,09	43,06	10,25	18,41	17,53	126,43	May
2005	36,34	10,71	23,05	48,33	20,27	20,16	59,03	26,27	40,98	35,67	27,26	24,04	59,03	Jul
2006	35,05	28,62	7,75	10,01	73,48	35,26	76,89	27,95	36,44	36,77	18,86	15,75	76,89	Jul
2007	42,48	90,73	31,65	25,38	31,57	43,55	31,04	39,12	33,54	27,67	43,5	23,25	90,73	Feb
2008	7,65	24,39	29,21	26,99	16,62	30,73	22,74	46,98	53,13	68,61	23,82	27,4	68,61	Oct
2009	33,8	29,96	1,17	11,87	6,53	27,3	24,93	29,38	39,38	45,09	21,63	68,08	68,08	Dic
2010	13,05	0,18	20,21	37,44	47,86	29,03	45,17	54,55	34,81	17,19	25,01	15,99	54,55	Ago
2011	33,81	22,08	15,49	13,9	36,19	24,92	35,43	35,37	37,53	35,12	35,35	30,8	37,53	Sep
2012	20,67	19,58	36,89	21,17	62,72	16	41,99	15,15	37,87	31,58	7,02	20,03	62,72	May
2013	36,52	14,13	0,54	91,85	36,95	30,19	34,58	32,58	14,37	22,5	40,18	29,08	91,85	Abr
2014	14,17	11,71	0	9,02	41,65	37,85	53,89	51,77	39,2	21,22	57,79	10,62	57,79	Nov
2015	12,18	11,7	8,86	14,54	44,4	34,9	39,17	72,66	33,81	12,06	47,3	17,37	72,66	Ago
2016	0	6,84	17,87	22,96	32,08	19,89	47,39	33,17	43,01	54,54	29,41	13,56	54,54	Oct
2017	34,87	11,35	10,11	18,07	41,36	46,4	64,67	52,11	39,7	46	35,62	78,99	78,99	Dic
MAX	47,97	90,73	48,31	96,24	126,43	68,49	76,89	84,09	68,29	68,61	57,79	78,99	126,43	

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del satélite TRMM.

❖ Ajustes de los datos a la función de distribución de probabilidad de Gumbel

Con la finalidad de producir las curvas de Intensidad-Frecuencia-Duración (IDF) y obtener los Tiempos de Retorno (TR) de las precipitaciones, se consideró la distribución de Gumbel, que es utilizada

para modelar la distribución del máximo (o el mínimo) y calcular valores extremos. Esta función se expresa con la siguiente ecuación:

$$F_{(x)} = e^{-e^{-\left(\frac{x-u}{\alpha}\right)}} \quad (\text{Ecuación 18})$$

Para obtener la distribución de probabilidades pluviométricas, mediante Gumbel, se utilizaron los valores de precipitaciones máximas diarias que se registraron mensualmente, asumiendo que es cuando ocurre la más significativa descarga de agua sobre la superficie del laboreo subterráneo de mina Colombia (tabla 5.3).

Tabla 5.3. Distribución de probabilidades pluviométricas según los parámetros de Gumbel.

Nº	Año	Mes Max. Precip.	Precipitación (mm)	
			x_i	$(x_i - x)^2$
1	1998	Mayo	70,86	2,58
2	1999	Abril	96,24	728,15
3	2000	Marzo	48,31	438,79
4	2001	Julio	75,63	40,69
5	2002	Diciembre	42,13	735,63
6	2003	Julio	44,83	596,61
7	2004	Mayo	126,43	3268,51
8	2005	Julio	59,03	104,52
9	2006	Julio	76,89	58,22
10	2007	Febrero	90,73	461,30
11	2008	Octubre	68,61	0,42
12	2009	Diciembre	68,08	1,37
13	2010	Agosto	54,55	216,36
14	2011	Septiembre	37,53	1006,75
15	2017	Diciembre	78,99	94,70
Suma			1038,8	7754,6

Fuente: Elaboración propia.

Con los registros de las precipitaciones y el programa Microsoft[®] Excel 2013, se calcularon valores de: sumatoria de los datos, la media de la muestra y la desviación estándar. Seguidamente, se obtuvieron los parámetros de Gumbel, α y u , mediante las fórmulas mostradas en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4. Cálculo de las variables probabilísticas mediante Gumbel.

Cálculo variables probabilísticas
$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} = 69,26mm$
$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} = 23,54 mm$
$\alpha = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \times s = 18,35mm$
$u = \bar{x} - 0,5772 \times \alpha = 58,66mm$

Fuente: Elaboración propia.

Dónde:

\bar{x} : Media de la muestra.

S : Desviación típica de la muestra.

Los resultados obtenidos fueron:

- Valores de probabilidad:
Sumatoria= 1.038,8 mm
Media de la muestra= 69,26 mm
Desviación estándar= 23,54 mm
- Los parámetros de Gumbel que resultaron fueron (ver tabla 5.4):
 $\alpha = 18,35 mm$
 $u = 59,66 mm$

Con la finalidad de obtener el ajuste de las curvas IDF, para los datos calculados anteriormente, la tabla 5.5 muestra: los valores de período de retorno, variable reducida, probabilidad de ocurrencia y corrección del intervalo fijo de precipitaciones.

Las precipitaciones obtenidas (XT') se multiplicaron por 1,13, para así obtener la corrección por el intervalo fijo de observación y obtener las

magnitudes más aproximadas a las obtenidas con las lluvias máximas verdaderas.

Tabla 5.5. Cálculo de las precipitaciones diarias máximas probables para distintas frecuencias.

<i>Periodo Retorno</i>	<i>Variable Reducida</i>	<i>Precip. (mm)</i>	<i>Prob. de ocurrencia</i>	<i>Corrección intervalo fijo</i>
<i>Años</i>	<i>YT</i>	<i>XT'(mm)</i>	<i>F(XT)</i>	<i>XT (mm)</i>
2	0,3665	65,3890	0,5000	73,8896
5	1,4999	86,1877	0,8000	97,3921
10	2,2504	99,9582	0,9000	112,9527
25	3,1985	117,3573	0,9600	132,6137
50	3,9019	130,2649	0,9800	147,1993
100	4,6001	143,0772	0,9900	161,6773

Fuente: Elaboración propia.

Se puede deducir de la tabla 5.5, que existe un 1% de probabilidad, de que sean superados los 161,6773 mm en 24 horas de precipitación, lo que corresponde a un evento centenario; en otras palabras, existe un 50% de probabilidades de que el año 2019, la precipitación en 24 horas sea menor o igual a 73,8896mm.

Similar análisis, puede ser realizado para todos los períodos de retorno restantes, asumiendo que la vida útil de la mina con las reservas mineras actualmente certificadas, está por el orden de dos (2) décadas, aproximadamente.

Seguidamente, al obtener los valores de corrección del intervalo fijo, se estimaron las precipitaciones máximas diarias para distintos tiempos de duración (tabla 5.6), teniendo en cuenta el coeficiente para la relación de lluvia de duración 24 horas.

Tabla 5.6. Precipitaciones máximas para diferentes tiempos de duración de lluvias.

Tiempo de Duración	Cociente	Precipitación máxima Pd (mm) por tiempos de duración					
		2 años	5 años	10 años	25 años	50 años	100 años
24	X24	73,8896	97,3921	112,9527	132,6137	147,1993	161,6773
18	X18 = 91%	67,2395	88,6268	102,7870	106,0910	133,9514	147,1263
12	X12 = 80%	59,1117	77,9136	90,3622	106,0910	117,7595	129,3418
8	X8 = 68%	50,2449	66,2266	76,8079	90,1773	100,0955	109,9405
6	X6 = 61%	45,0726	59,4092	68,9012	80,8944	89,7916	98,6231
5	X5 = 57%	42,1171	55,5135	64,3831	75,5898	83,9036	92,1560
4	X4 = 52%	38,4226	50,6439	58,7354	68,9591	76,5437	84,0722
3	X3 = 46%	33,9892	44,8003	51,9583	61,0023	67,7117	74,3715
2	X2 = 39%	28,8169	37,9829	44,0516	51,7193	57,4077	63,0541
1	X1 = 30%	22,1669	29,2176	33,8858	39,7841	44,1598	48,5032

Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente con los resultados obtenidos, anteriormente en la Tabla 5.6, de precipitación máxima y los tiempos de duración, se utilizaron para calcular la intensidad de lluvia según el período de retorno, teniendo en cuenta la siguiente ecuación:

$$I = \frac{P[mm]}{t_{duración}[hr]} \quad (\text{Ecuación 19})$$

Dando como resultado los valores expresados en la tabla 5.7.

Tabla 5.7. Intensidades de lluvia a partir de Pd, según su Duración de precipitación y Frecuencia.

Tiempo de duración		Intensidad de la lluvia (mm /h) según el Periodo de Retorno					
Horas	min	2 años	5 años	10 años	25 años	50 años	100 años
24	1440	3,0787	4,0580	4,7064	5,5256	6,1333	6,7366
18	1080	3,7355	4,9237	5,7104	5,8939	7,4417	8,1737
12	720	4,9260	6,4928	7,5302	8,8409	9,8133	10,7785
8	480	6,2806	8,2783	9,6010	11,2722	12,5119	13,7426
6	360	7,5121	9,9015	11,4835	13,4824	14,9653	16,4372
5	300	8,4234	11,1027	12,8766	15,1180	16,7807	18,4312
4	240	9,6056	12,6610	14,6839	17,2398	19,1359	21,0180
3	180	11,3297	14,9334	17,3194	20,3341	22,5706	24,7905
2	120	14,4085	18,9915	22,0258	25,8597	28,7039	31,5271
1	60	22,1669	29,2176	33,8858	39,7841	44,1598	48,5032

Fuente: Elaboración propia.

❖ Diseño de las Curvas IDF para mina Colombia

Para la construcción de las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF), se obtuvo mediante el método propuesto por Aparicio (1997), que es analizar el comportamiento de las variables involucradas, relacionándolas simultáneamente en una familia de curvas, a través de la siguiente ecuación:

$$I = \frac{K \times T^m}{t^n} \quad (\text{Ecuación 20})$$

Dónde:

I= Intensidad de precipitación (mm/h).

T= Período de retorno (años).

t= Tiempo de duración de la lluvia (min).

K, m, n= Parámetros de ajuste.

Con la finalidad de presentar gráficamente las curvas IDF, se determinaron los parámetros K, m y n, para la fórmula de la Intensidad, mediante regresiones potenciales, dando como resultados los valores en la tabla 5.8. Los cálculos de estos parámetros matemáticos de las curvas Intensidad-Duración-Período de retorno se detallan en el Anexo I.

Tabla 5.8. Resumen de los valores de regresión lineal para distintos años.

Coeficiente de regresión (K)	Coeficiente de regresión (m)	Coeficiente de regresión (n)
277,57	0,17	-0,619

Fuente: Elaboración propia.

Después de obtener los valores anteriores, la ecuación de intensidad (ecuación 20) válida para la cuenca hidrográfica, donde se encuentra el laboreo subterráneo, es presentada de la siguiente manera:

$$I = \frac{277,5721 \times T^{0,171159}}{t^{0,61885}} \quad (\text{Ecuación 20})$$

Dónde:

I= Intensidad de precipitación (mm/h).

T= Período de retorno (años).

t= Tiempo de duración de la lluvia (min).

Se sustituyeron las variables (períodos de retornos y los tiempos de duración) para así obtener los distintos valores de intensidades respecto a la duración y la frecuencia como se muestran en la tabla 5.9, éstos se utilizaron para graficar las curvas IDF de la zona de estudio.

Tabla 5.9. Intensidades-Tiempo de Duración-Frecuencia.

Tabla de intensidades - Tiempo de duración												
Frec. (años)	Duración en minutos											
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
2	115,44	75,17	58,49	48,95	42,64	38,09	34,62	31,88	29,64	27,76	26,17	24,8
5	135,04	87,94	68,42	57,26	49,88	44,55	40,5	37,29	34,67	32,48	30,62	29,01
10	152,05	99,01	77,04	64,48	56,16	50,17	45,6	41,99	39,03	36,57	34,48	32,67
25	177,86	115,82	90,12	75,42	65,7	58,69	53,35	49,11	45,66	42,78	40,33	38,22
50	200,27	130,41	101,47	84,92	73,97	66,08	60,07	55,3	51,41	48,17	45,41	43,03
100	225,5	146,84	114,25	95,62	83,29	74,4	67,63	62,27	57,89	54,24	51,13	48,45

Fuente: Elaboración propia.

Los valores obtenidos para las diferentes intensidades, varían entre dos (2) años y cien (100) años. Sin embargo, basados en la vida útil del proyecto en estudio, aproximadamente 20 años, sólo se analizaron las curvas IDF para períodos de retorno de hasta 100 años.

La figura 5.3 presenta la familia de curvas IDF, en general existe una curva para cada período de retorno (T). A medida que se incrementa la duración del evento (t), disminuye la intensidad (I). Y a medida que se incrementa el periodo de retorno de la misma forma aumenta el valor de intensidad máxima establecida para Mina Colombia de 100 mm/h.

5.1.2 Temperatura superficial

Como plantea Pearce (2018) los datos de superficie terrestre proporcionados por el sistema GLDAS respaldan varias predicciones meteorológicas y climáticas actuales, aplicaciones de recursos hídricos e investigaciones del ciclo del agua, es por ello que se tomaron los registros de la temperatura de la superficie de éste sistema para completar el balance hídrico de la zona de estudio.

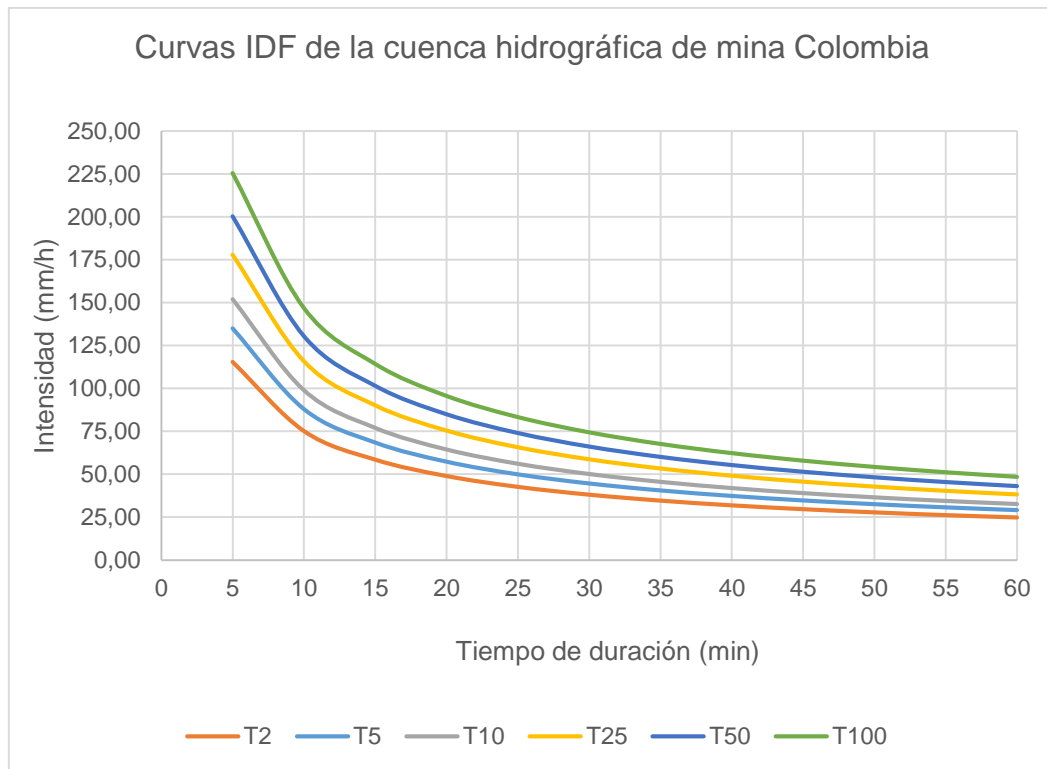


Figura 5.3. Curvas de Intensidad, Duración y Frecuencia de la cuenca hidrográfica de mina Colombia.

Fuente: Elaboración propia.

Los valores de temperatura procesados por el sistema GLDAS, están registrados por diversos modelos, de los cuales NOAH es el encargado de procesar los datos de temperatura desde el año dos mil (2000) hasta la actualidad. Por ser éste el modelo que cuenta con los valores más completos del rango de tiempo estudiado (1998-2017), fueron sus registros los que se consideraron para el análisis.

Al igual que con los registros del satélite TRMM, mediante las coordenadas de la superficie de la mina subterránea Colombia se ubicó a través del servidor de la NASA Giovanni, los registros de temperatura del sistema GLDAS que se presentan en la tabla 5.10.

Los datos de temperatura registrados por el sistema GLDAS, indican que en la superficie de Mina Colombia durante todo el año la temperatura oscila

entre los 24 y 27°C. Existen dos disminuciones de temperatura, la primera en el mes de diciembre hasta el mes de marzo donde aumenta y vuelve a disminuir en los meses de junio y julio, posteriormente comienzan a aumentar registrándose las máximas temperaturas en los meses de septiembre y octubre, entre 26 y 27°C, este patrón se mantiene constante en la ventana de tiempo estudiada desde el año 2000 hasta el año 2017, como se puede observar en la tabla 5.10.

Tabla 5.10. Datos de temperatura mensual (°C) en la superficie de mina Colombia, durante los años 2000-2017.

TEMPERATURA SUPERFICIAL												
Año	Ene	Feb	Mar	Abri	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2000	22,72	23,34	24,14	23,84	24,40	24,08	24,38	25,05	25,50	25,43	24,29	23,05
2001	23,73	23,09	25,11	24,98	24,56	24,11	24,39	24,90	24,50	24,92	24,26	24,19
2002	23,19	23,45	23,77	24,14	23,64	23,62	24,13	24,55	25,33	24,73	23,67	22,88
2003	23,74	23,70	24,88	24,88	23,34	23,76	23,93	24,52	24,99	25,01	24,32	23,57
2004	22,96	24,55	24,71	24,54	23,55	23,55	23,75	24,49	25,07	25,20	24,79	23,58
2005	22,92	23,73	25,25	24,30	25,20	24,93	24,08	24,71	25,54	25,48	24,36	23,39
2006	22,80	22,98	23,80	26,12	24,61	23,91	23,98	24,68	24,92	25,00	24,38	23,33
2007	23,11	23,72	24,14	25,48	25,09	23,93	23,89	24,37	24,87	24,82	23,89	23,04
2008	22,70	22,39	23,81	24,01	24,12	24,00	23,90	24,42	25,48	25,04	24,53	23,14
2009	23,04	23,46	23,70	24,67	25,59	24,32	24,30	25,27	25,98	25,04	24,46	23,57
2010	23,72	25,39	26,44	26,00	25,42	24,84	24,65	25,44	26,06	25,75	25,26	24,59
2011	24,02	24,02	24,18	25,92	26,13	25,46	25,19	25,84	26,15	25,25	25,22	24,61
2012	23,45	23,99	24,77	26,00	25,51	25,16	25,12	25,38	26,06	26,34	25,64	24,43
2013	24,23	24,13	25,70	25,80	25,78	25,26	24,89	25,35	26,29	25,89	24,90	24,08
2014	23,71	24,13	25,18	25,61	25,76	25,24	25,08	25,43	25,87	25,93	25,06	24,74
2015	24,19	24,76	24,64	26,05	25,59	25,26	24,98	25,75	26,67	26,93	25,58	24,79
2016	24,62	25,51	26,68	26,53	25,82	25,35	25,34	25,69	26,29	26,86	26,47	24,47
2017	24,02	24,26	25,27	26,78	25,98	25,39	25,57	27,12	27,56	27,32	26,52	25,28

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del sistema GLDAS.

La temperatura media anual ha estado en aumento a partir del año 2008, registrándose la menor durante el año 2002, donde se la temperatura media anual registrada fue de 23,925°C y la mayor temperatura durante el año 2017, con valores que superan los 25,9°C como se presenta en la figura 5.4.

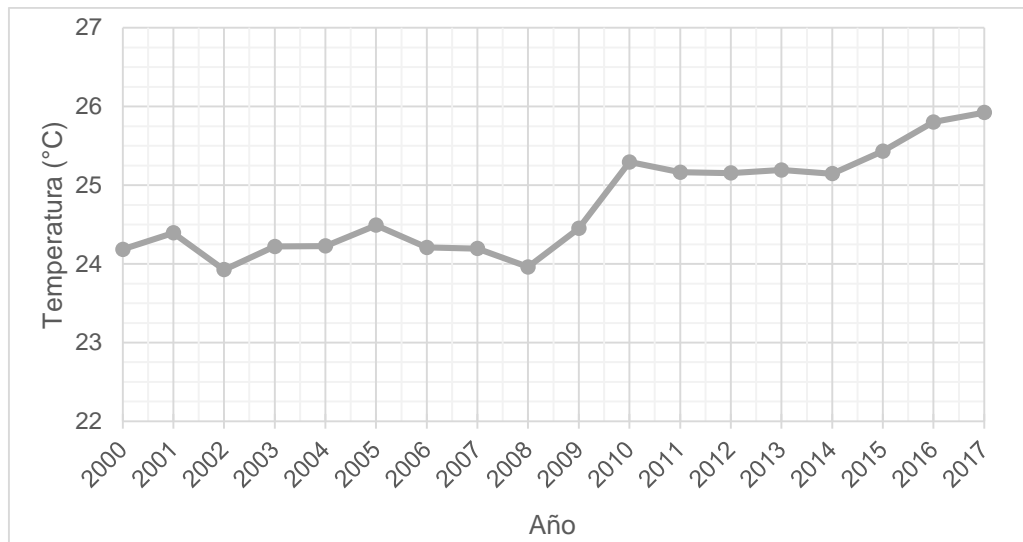


Figura 5.4. Temperatura media anual de la superficie de mina Colombia. Fuente elaboración propia.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del sistema GLDAS.

5.1.3 Balance hídrico para mina Colombia

Las precipitaciones son los principales impulsores climáticos de la recarga del agua subterránea, la temperatura y las concentraciones de CO₂ también son importantes ya que afectan a la evapotranspiración y por ende a la porción de precipitaciones que puede drenar hacia los acuíferos a través del perfil del suelo, de esta manera se planteó el estudio del ciclo hidrológico que reúne dichos fenómenos meteorológicos como un conjunto cíclico.

Partiendo del conocimiento de las precipitaciones y temperaturas medias mensuales, se calculó la evapotranspiración mensual estimada, a través de la metodología de Thornthwaite con la plantilla HidroBioV3.0 (Cámara Artigas & Martínez Batlle, 2007) en conjunto con las características de la formación superficial de la zona de estudio, lo que permitió analizar el balance del agua en el suelo de mina Colombia. El conocimiento del balance de humedad (balance hídrico) es necesario para definir la falta y excesos de agua y es de aplicación para las clasificaciones climáticas (Thornthwaite & Mather, The

Water Balance, 1955), definir la hidrología de una zona y para la planificación hidráulica como se plantea en la presente investigación.

Como se describió en el apartado 3.2.6 los diagramas de balance hídrico se basan en los datos aportados por las tablas 3.4 y 3.5 de Thornthwaite & Matter (1957), que parte de la capacidad de retención según la textura de la formación superficial y la capacidad de almacenamiento de agua según suelo y cultivo, en ese orden de ideas el área de estudio se caracteriza por una textura de la formación superficial franco arcillosa cuya capacidad de retención es de 250 mm esto en conjunto con la formación vegetal presente de raíces someras, debido a las características de vegetación de la zona en cuestión, permite estimar su capacidad de almacenamiento de agua de 100 mm (capacidad de campo), valores que se presentan en la tabla 5.11.

Tabla 5.11. Características de la formación superficial de mina Colombia.

CARACTERÍSTICAS DE LA FORMACIÓN SUPERFICIAL DE MINA COLOMBIA			
Vegetación	Suelo	Capacidad de retención (mm)	Capacidad de campo (mm)
Formaciones herbáceas de raíces someras	Franco arcilloso	250	100

Fuente: Elaboración propia.

Thornthwaite & Matter (1955) plantean que la diferencia positiva entre la precipitación y la evapotranspiración potencial (P-ETP) da como resultado el total de agua de la precipitación que no se evapotranspiró (he aquí la importancia de estudiar las características de la formación superficial de la zona de estudio), convirtiéndose así en agua almacenada en el suelo (ST) y exceso de humedad (S), siendo ésta última la de interés, ya como se describió en el apartado 3.2.6.1, Thornthwaite propuso que el 50% del excedente de agua (S) de un mes se escurre hacia los ríos durante el mes en cuestión y el resto se infiltra hacia las capas profundas, alimentando así las aguas subterráneas.

Para el año 2017 el valor de la adición potencial de humedad en el suelo (P-ETP), fue de un total de 265,71mm y el exceso de humedad (S) fue de un total de 115,91mm (ver tabla 5.12), por lo que el total de agua que infiltró (I) ese año hacia el laboreo subterráneo de Mina Colombia fue de 57,96 mm y la cantidad de agua que escurrió (R) hacia los cauces superficiales fue de 85,59mm.

Tabla 5.12. Balance hídrico del año 2017 de mina Colombia.

TABLA DE BALANCE HIDRICO (Thornthwaite y Matter)											
Mina Colombia 2017; Alt.: 188msnm; Lat.: 7°20'4,524"N°											
Mes	T	P	ETP	P - ETP	ST	ΔST	ETR	Dh	S	I	R
Ene	24,02	70,04	92,11	-22,07	68	-17,8	87,84	-4,27	0	0	0
Feb	24,26	13,72	96,38	-82,67	29	-39	52,72	-43,67	0	0	0
Mar	25,27	27,68	113,49	-85,82	12	-17	44,68	-68,82	0	0	0
Abr	26,78	42,48	143,57	-101,09	4	-8	50,48	-93,09	0	0	0
May	25,98	136,03	131,5	4,54	8,54	4,54	131,5	0	0	0	0
Jun	25,39	236,37	122,38	114	100	91,46	122,38	0	22,53	11,3	11,3
Jul	25,57	201,11	124,36	76,75	100	0	124,36	0	76,75	38,4	44
Agos	27,11	168,1	151,47	16,63	100	0	151,47	0	16,63	8,32	30,3
Sep	27,56	115,27	157,3	-42,03	65	-35	150,27	-7,03	0	0	0
Oct	27,32	118,99	148,09	-29,1	48	-17	135,99	-12,1	0	0	0
Nov	26,52	89,89	130,71	-40,81	32	-16	105,89	-24,81	0	0	0
Dic	25,28	162,94	109,14	53,8	85,8	53,8	109,14	0	0	0	0
TOTAL	25,92	1382,61	1520,48	-137,87	--	--	1266,69	-253,79	115,91	58	85,6

Fuente: Tomado y modificado de HidroBioV3.0.

La ventana de tiempo estudiada (2000-2017) permitió obtener un histórico de balances hídricos, que se presentan en el anexo II, los mismos indican que el total de agua infiltrada (I), proveniente de las precipitaciones, en el laboreo Subterráneo de mina Colombia, desde el año 2000 hasta el 2017 fue de 1,803,39 mm, ver tabla 5.13.

El exceso de agua (S) está estrechamente relacionado con la temperatura media anual (T) y el volumen total de precipitación (P), representadas gráficamente en la figura 5.5.

Analizando el histórico de valores de S desde 2000 hasta el 2017, en conjunto con los valores de temperatura, porque es la que condiciona la evapotranspiración de la precipitación que es la manera en como el ciclo hidrológico ocurre, en los años donde hubo un aumento significativo de temperatura, como ocurrió desde el año 2008 al 2010, se puede observar en la figura 5.5, el exceso de humedad y por ende la infiltración y escurrentía fue prácticamente nulo.

Tabla 5.13. Temperatura media anual y productos del balance hídrico: exceso de humedad, infiltración y escurrentía 2000-2017

Año	T (°C)	P (mm)	S (mm)	I (mm)	R (mm)
2000	24,18	1599,03	358,41	179,2	262,31
2001	24,39	1077,76	64,61	32,31	32,31
2002	23,93	1304,33	220,02	110,01	170,45
2003	24,22	1026,01	98,56	49,28	50,15
2004	24,23	1296,03	366,23	183,12	207,74
2005	24,49	1414,22	218,50	109,25	109,25
2006	24,21	1337,76	211,14	105,57	117,14
2007	24,20	1727,52	516,18	258,1	315,81
2008	23,96	1589,22	381,37	190,69	313,99
2009	24,45	1077,20	0,00	0	0
2010	25,30	1468,50	299,32	149,66	231,59
2011	25,17	1458,84	155,94	77,97	92,05
2012	25,15	1223,15	25,61	12,81	12,81
2013	25,19	1428,70	211,48	105,74	179,65
2014	25,14	1138,27	101,27	50,64	60,55
2015	25,43	1273,04	262,16	131,08	179,35
2016	25,80	1118,53	0,00	0	0
2017	25,92	1382,61	115,91	57,96	85,59
TOTAL		23.941	3.606,71	1.803,39	2.420,74

.Fuente: Elaboración propia.

Durante los años 2007-2008 la temperatura tuvo un compartamiento lineal e incluso descendió, el exceso de humedad fue el de mayor valor en todo el registro histórico, de 517mm y por ende el volumen de agua infiltrada a las labores subterráneas fue de 258mm.

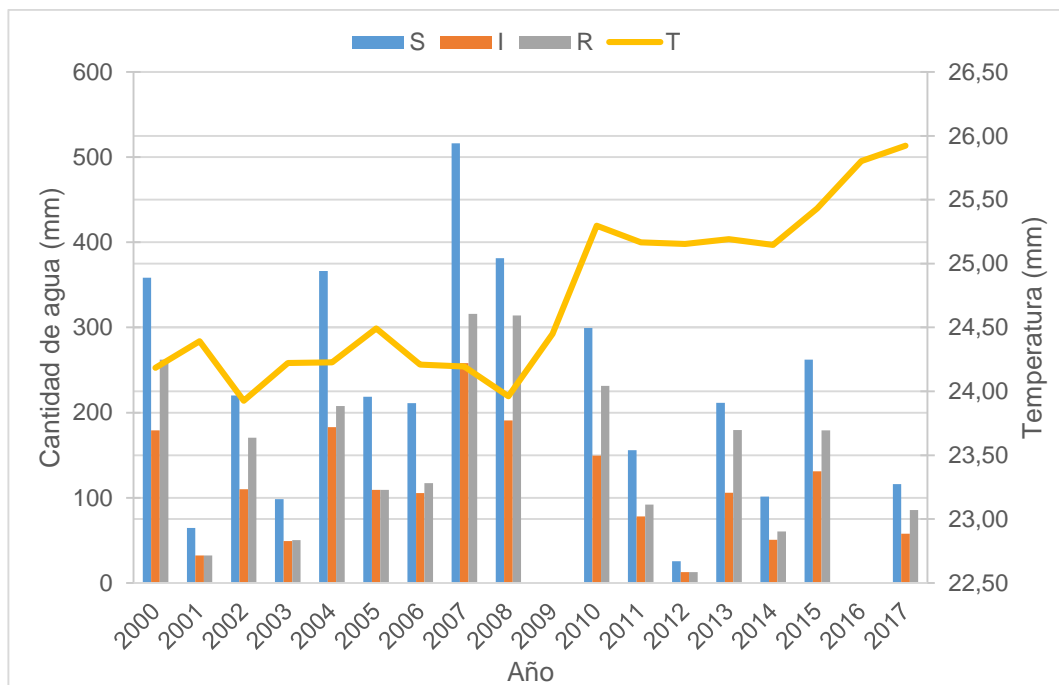


Figura 5.5. Representación gráfica de la temperatura media anual y productos del balance hídrico: exceso de humedad, infiltración y escorrentía 2000-2017.

Fuente: Elaboración propia

5.1.4 Cuenca hidrográfica

Como se mencionó en el apartado 3.2.1.1 para una eficiente gestión de los recursos hídricos a nivel de cuenca es necesario identificar las características hidrogeológicas (fallas, estructuras) así como el caudal afluente del cauce principal que drena la cuenca en cuestión.

Mediante planos topográficos e imágenes satelitales se evidenció que el terreno donde se encuentra mina Colombia está ubicado en la Región Hidrográfica N° 15 (Cyuní), figura 2.1, específicamente en la cuenca del río Yuruari que a su vez drena directamente al río Cyuní. Se efectuó la delimitación mediante el software privado AutoCAD Civil 3D de las tres sub cuencas, de la cuenca Yuruari, que aportan agua al terreno donde se ubica mina Colombia, que fueron denominadas 1, 2 y 3, en el sentido noreste-suroeste, como se muestra en la figura 5.6.

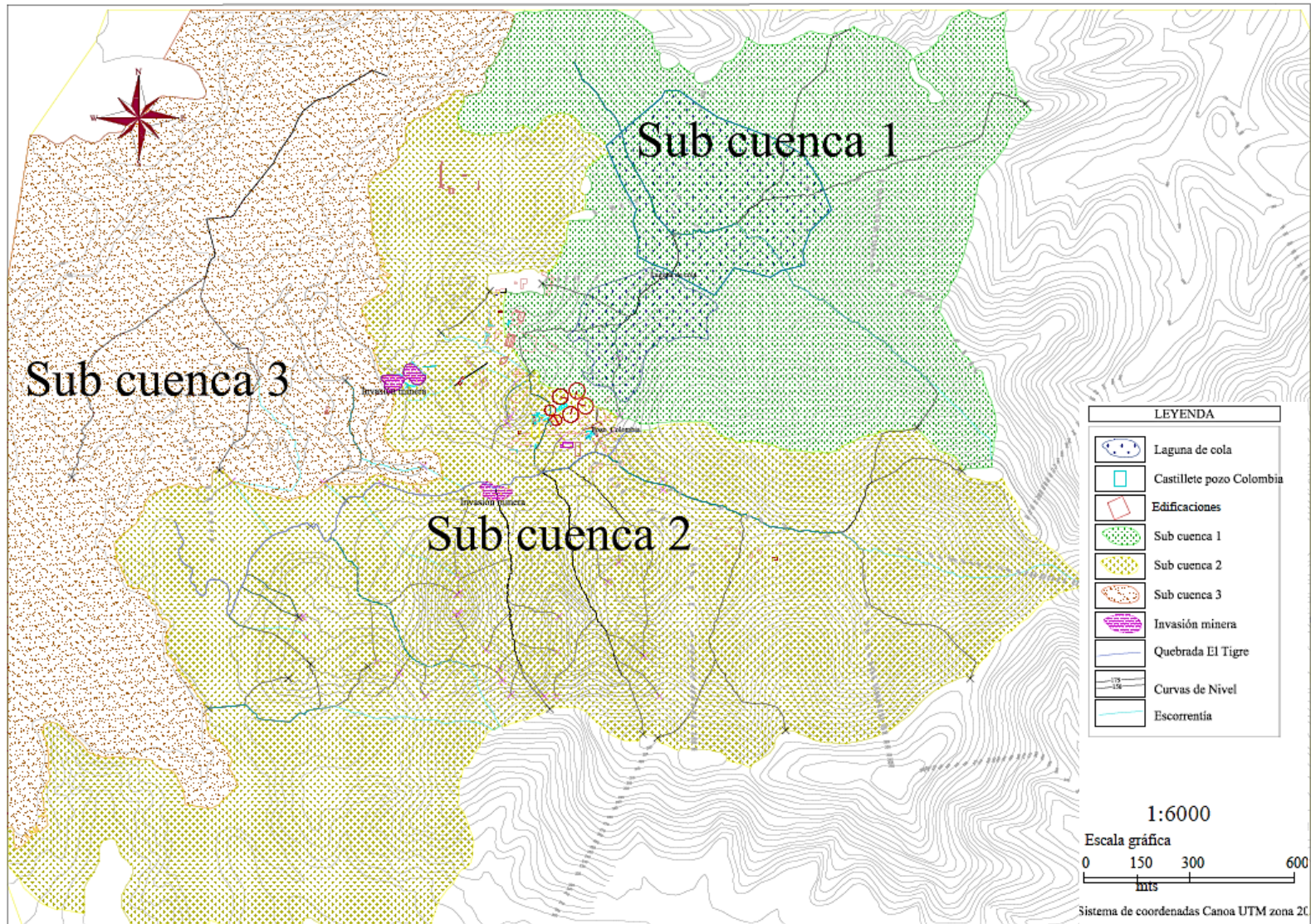


Figura 5.6. Sub cuencas que aportan agua a mina Colombia. Fuente: Elaboración propia

Una vez obtenida el área de cada sub cuenca y los valores de la tabla 5.2 de los registros de las precipitaciones máximas diarias de la zona se calculó el caudal de la cuenca hidrográfica (Q), mediante la ecuación (1) (presentada en la sección 3.1.1), utilizando el coeficiente de escorrentía para pendiente media (Tabla 3.1).

La sub cuenca 1 cuenta con un área aproximada de 1,54 km², es una cuenca tipo depresión cuya superficie además de albergar la laguna de colas como se observa en la figura 5.7, recoge las escorrentías naturales y en el momento de la etapa de campo en su superficie corría el agua proveniente del rebose del “tanque azul”, destinado a albergar el agua proveniente del bombeo del agua presente en el laboreo subterráneo, el cual se encuentra en condiciones deplorables, bien por la falta del mantenimiento general y/o de supervisión permanente.

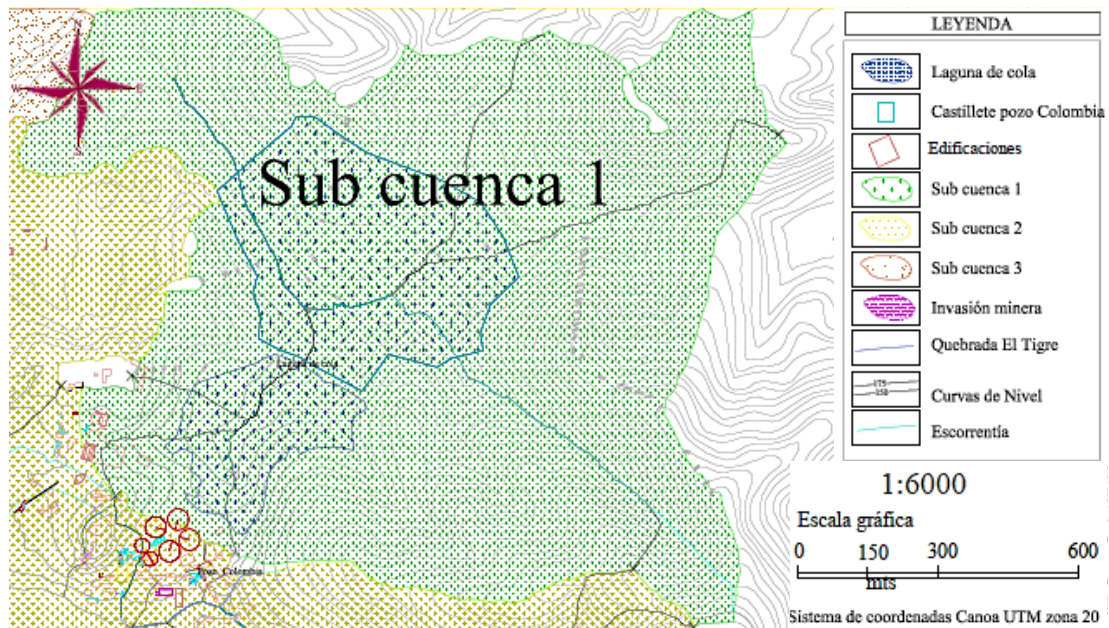


Figura 5.7. Sub cuenca 1 de mina Colombia.
Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta que el terreno alberga la laguna de colas, tiene una pendiente media y sin vegetación, el coeficiente de escorrentía es de 0,6 para

la sub cuenca 1 (Ver Tabla 3.1). Se pudo calcular un caudal aproximado del afluente, con la máxima intensidad de precipitación en los meses para así tener un criterio acerca de cuál es el volumen de agua captada por las cuencas, susceptible a infiltrarse al laboreo subterráneo.

Con los cálculos realizados mediante la ecuación 1 los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 5.14.

Tabla 5.14. Caudal de la sub cuenca 1.

SUB CUENCA 1	Cálculo de caudal (Q) para la sub cuenca 1				
	Suelo franco arcilloso semipermeable				
	Meses estudiados	Coef. C	I (mm/h)	A (km ²)	Q(m ³ /s)
	mayo	0,6	41,361	1,538	10,602
	junio	0,6	46,396	1,538	11,892
	julio	0,6	64,666	1,538	16,575
	agosto	0,6	52,114	1,538	13,358
	septiembre	0,6	39,711	1,538	10,176

Fuente: Elaboración propia

En la figura 5.8, se puede apreciar que la sub cuenca 2, con un área aproximada de 3,16 km², es una cuenca de captación de área plana. Su extensión recoge las escorrentías dirigidas hacia el drenaje natural de la quebrada El Tigre, afluente hídrico que corre en sentido Este-Oeste en la superficie de la explotación subterránea de mina Colombia que además en el momento de la etapa de campo (octubre, 2017) se encontraba afectada por invasión minera en las zonas indicadas.

Como se trata del mismo yacimiento, se tienen condiciones morfológicas similares a las de la sub cuenca 1, suelo franco arcilloso, una pendiente media y con escasa vegetación, el coeficiente de escorrentía es de 0,3. Se realizó el cálculo del caudal afluente, tomando en cuenta la máxima precipitación de los meses evaluados. Obteniendo como resultados los valores que se muestran en la tabla 5.15.

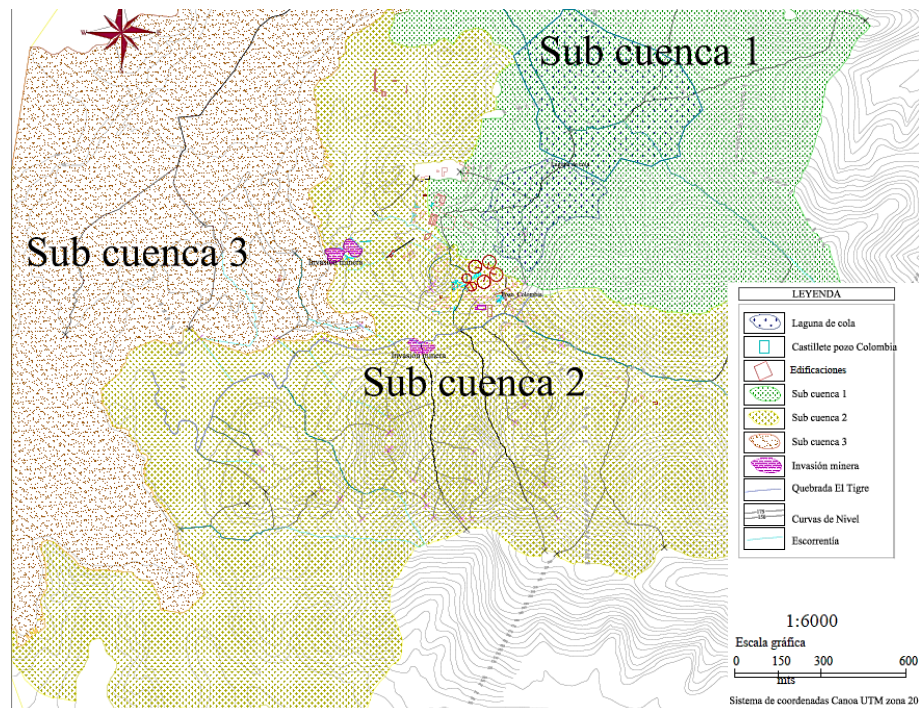


Figura 5.8. Sub cuenca 2 de mina Colombia.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.15. Caudal de la sub cuenca 2

SUB CUENCA 2	Cálculo de caudal (Q) para la sub cuenca 2				
	Suelo franco arcilloso permeable				
	Meses estudiados	Coef. C	I (mm/h)	A(km ²)	Q(m ³ /s)
	mayo	0,3	41,361	3,157	10,882
	junio	0,3	46,396	3,157	12,207
	julio	0,3	64,666	3,157	17,014
	agosto	0,3	52,114	3,157	13,712
	septiembre	0,3	39,711	3,157	10,445

Fuente: Elaboración propia.

La sub cuenca 3, figura 5.9, posee unas características similares a la sub cuenca 1, es una cuenca tipo depresión cuya superficie abarca 1,88 km², sus divisoras de agua están orientadas al noroeste (NO), redirigiendo de esta manera el afluente hídrico de la Quebrada El Tigre, en cuanto a las condiciones morfológicas se mantienen las de la sub cuenca 2. Los resultados de los valores del caudal afluente de esta sub cuenca se muestran en la tabla 5.16.

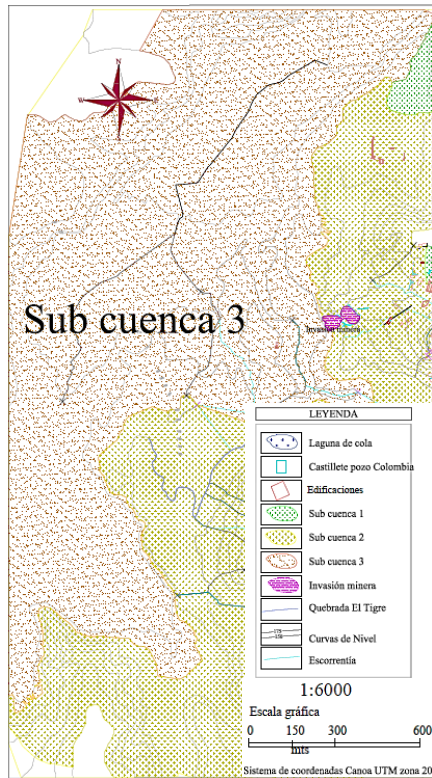


Figura 5.9. Sub cuenca 2 de mina Colombia.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.16. Caudal de la sub cuenca 3.

SUB CUENCA 3	Cálculo de caudal (Q) para la sub cuenca 3				
	Suelo franco arcilloso permeable				
	Meses estudiados	Coef. C	I (mm/h)	A(km ²)	Q(m ³ /s)
	mayo	0,3	41,361	1,876	6,467
	junio	0,3	46,396	1,876	7,254
	julio	0,3	64,666	1,876	10,111
	agosto	0,3	52,114	1,876	8,148
	septiembre	0,3	39,711	1,876	6,207

Fuente: Elaboración propia.

Analizando los valores de los caudales que escurren por las distintas sub cuencas, que drenan al área donde se ubica mina Colombia, se puede apreciar que el volumen de agua se concentra en la sub cuenca 2, aportando un aproximado de 17,014m³/s. Esto es motivado por el área de dicha cuenca, al ser la de mayor extensión de la zona de estudio.

Es necesario tener presente que solo una parte de la precipitación sobre una cuenca hidrológica alcanza los cauces naturales de agua, debido a que cantidades de agua son retenidas, evaporadas, o infiltradas, como se explicó en el apartado 5.1.3.

En el presente caso de estudio, para un manejo integral de las aguas de mina Colombia, es importante analizar el volumen de agua captado por la cuenca hidrológica que escurre hacia el cauce natural, Quebrada El Tigre, ya que es el principal recurso hídrico presente en la zona, que además está siendo afectado por las invasiones mineras que socaban su cauce, produciendo la contaminación de éste, cuya evaluación no es objetivo de esta investigación.

Por tal motivo en este proyecto se considera el caudal afluente de la sub cuenca 2, específicamente en el mes de septiembre, $10,445\text{m}^3/\text{s}$, que escurre hacia el cauce natural de la Quebrada El Tigre ya que se complementará con el estudio de las estructuras geológicas de mina Colombia, que son una vía de comunicación natural, de dicha agua superficial con el laboreo subterráneo de la explotación minera y su relación con el caudal de agua presente en el nivel 1 de la mina, medido por Herrera (2017) durante el mes en cuestión.

5.2 Aguas subterráneas

Las aguas subterráneas y las aguas superficiales están estrechamente interconectadas y, desde un enfoque de manejo integral ambas deben gestionarse como un solo recurso para el desarrollo sostenible del mismo y sus diferentes usos mediante un equilibrio entre la recarga y la extracción.

De aquí la importancia de estudiar la recarga al sistema y de diseñar una buena red de desagüe (descargas), que en definitiva lo que persigue es la eliminación del agua subterránea presente en la mina.

5.2.1 Relación entre fallas geológicas y recargas del agua subterránea

Las fallas naturales o las grietas producidas por las explotaciones mineras rompen la continuidad de los mantos impermeables y son el camino de entrada de las aguas, ya que una grieta puede dar entrada a aguas superficiales directamente, por ello la importancia de su estudio.

Estructuralmente el área de mina Colombia se encuentra atravesada por una serie de fallas geológicas, descritas en el apartado 2.4, las fallas Gloria, Isbelia, Santa María y la falla Sur.

En conjunto con el plano estructural, el plano de labores y servicios de la mina subterránea y el plano de la hidrología superficial se elaboró el plano integral de mina Colombia, que se presenta en la figura 5.10 donde si se observa el plano de la falla Santa María, ubicada al oeste de la mina con un buzamiento de 45° hacia el este, se encuentra que las líneas de flujo del cauce de la Quebrada el Tigre resultan casi normales a la dirección de la falla, condición que podría obedecer a alguna de la siguientes hipótesis según van Zanten (2004):

- La falla sirve como medio permeable al flujo subterráneo y a través de ella podría penetrar el agua superficial hasta capas profundas y alcanzar la zona de saturación.
- La falla es impermeable en profundidad, pero superficialmente el conjunto de rocas de la zona fallada presenta el mismo grado de agrietamientos del resto del área, lo cual no origina, en ningún momento, una condición de taponamiento que ponga en evidencia la condición de impermeabilidad de alguna de estas fallas.

Sin embargo, para este estudio y basado en el corte transversal, figura 5.10, donde están representados la intersección del cauce con la traza del plano de falla y en las mediciones del caudal constante de agua proveniente de superficie que ingresa al nivel 1, medidas por Herrera (2017),

representadas en la tabla 5.17, el modelo hidrogeológico que se asume en este estudio es el presentado en la primera hipótesis, la falla Santa María sirve como medio permeable, a través de la cual penetra el agua superficial hasta capas profundas, trabajando de esta manera como medio de recarga de la inundación.

Tabla 5.17. Caudal de agua presente en el nivel 1 y 4 de mina Colombia

	FUENTE	CAUDAL (GPM)
NIVEL 1	Sector Oeste	619,8400
	Sector Norte	162,4724
NIVEL 4	Niveles superiores	222,035
	Galería principal	109,361

Fuente: Tomado y modificado de Herrera (2017)

En base al modelo hidrogeológico asumido, se analizan en conjunto los valores de caudal afluente de la sub cuenca 2, (cuenca hidrográfica de la quebrada El Tigre, calculado en el apartado 5.1.4) y del caudal constante de agua proveniente de superficie que ingresa al nivel 1, medidas por Herrera (2017), quien también midió el caudal presente en el nivel 4 que recarga directamente a la inundación (tabla 5.17). En el nivel 1 desde el sector oeste de la mina, que es donde además se ubica la falla Santa María como se mencionó anteriormente, para septiembre 2017 existía un caudal considerable que fluye por el piso del laboreo subterráneo sentido OE de 618,85 GPM; el caudal afluente de la sub cuenca 2 para dicho mes, fue de 10,445m³/s (165.556,72 GPM), es decir aproximadamente 0,37% del caudal afluente de la sub cuenca 2 funciona como recarga al sistema subterráneo, de esta manera se identifica que efectivamente existe una relación entre la hidrología superficial y el drenaje subterráneo de mina Colombia, por lo que es necesario un estudio hidrogeológico más a detalle que permita tomar acciones en cuanto a la constante recarga al nivel 1 proveniente de la relación identificada entre el laboreo subterráneo con el plano de la falla Santa María y el cauce de la Quebrada El Tigre ubicado en la sub cuenca 2.

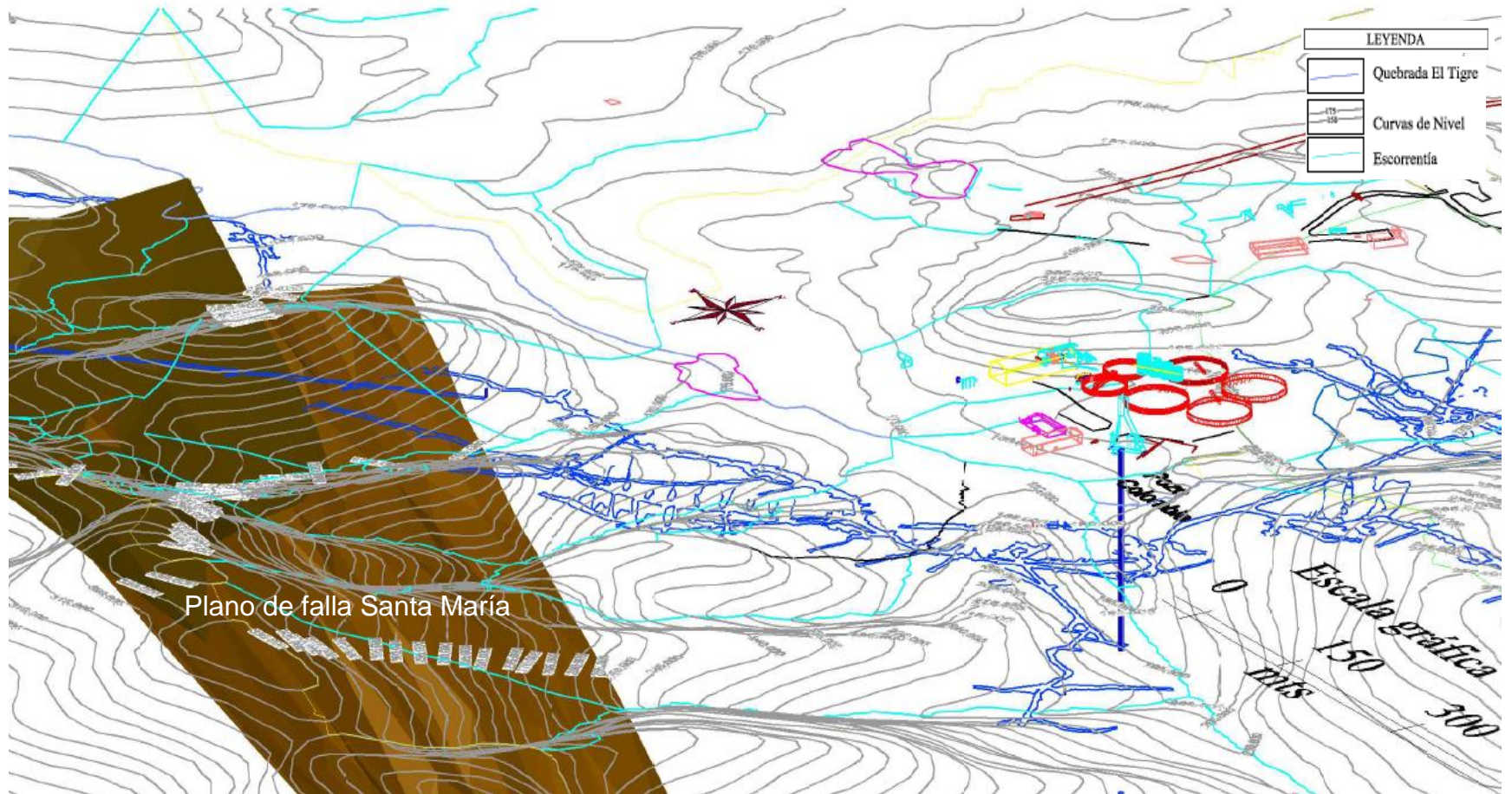


Figura 5.10. Corte transversal de la superficie y el nivel 1 de mina Colombia. Fuente: Elaboración propia

5.2.2 Volumen total de inundación

Como se describió en el apartado 2.4, mina Colombia está conformada por siete niveles, contando desde la superficie 134m hacia el interior de la roca madre se encuentra el nivel 1 y a 50 m de éste se encuentra el nivel 2 y así sucesivamente espaciándose 50m entre ellos hasta el nivel 7.

Por fallas en el sistema de bombeo encargado de realizar el drenaje de la mina, y su falta de mantenimiento preventivo y correctivo, en septiembre 2017 se encontraban inundados el laboreo entre el nivel 7 y el nivel 5, además de 200m del pozo vertical que para el momento de la medición el nivel del agua se observaba a 50m del nivel 4.

Con la finalidad de diseñar un sistema de drenaje adecuado para dar solución a la actual inundación es, necesario estudiar el volumen de agua a drenar, por lo que se analizó la estimación del volumen de agua subterránea almacenada en la inundación realizada por Bastidas (2017), tabla 5.18, que mediante el software AutoCAD Civil 3D 2013 midió los parámetros necesarios de cada nivel con lo que obtuvo el volumen de cada laboreo inundado.

Tabla 5.18. Volumen de agua almacenada en el laboreo subterráneo, agosto 2017.

LABOREO	Volumen (m ³)	Volumen (gal)
NIVEL 5	107.782,81	28.476.304,93
CORTE 7	39.251,16	10.370.188,54
CORTE 5	49.873,58	13.176.640,46
CORTE 3	54.398,90	14.372.231,26
CORTE 0	43.317,24	44.920.706,04
NIVEL 6	142.115,26	37.546.965,00
NIVEL 7	170.362,45	45.009.893,15
POZO	2.966,65	783.792,12
VOLUMEN TOTAL	610.068,06	194.656.721,51

Fuente: Tomado y modificado de Bastidas (2017).

Analizando los valores de volumen presentes en los laboreos inundados de mina Colombia que se presentan en la tabla 5.18, los niveles seis (6) y siete (7) son los que albergan la mayor cantidad de agua, 142.115,26 m³ en el nivel 6 y 170.362,45 m³ en el nivel 7 ya que en ellos se encuentran la mayor cantidad

de labores desarrolladas hasta la actualidad, debido a la estructura geológica denominada “el bolsón” (intersección de la veta A y la veta B) que posee los tenores más altos encontrados en la mina; es el caso opuesto con los cortes y el nivel 5, donde éste último alberga actualmente un volumen de agua de 107.782,81 m³ el mismo fue el nivel más rápido en inundarse en agosto 2017, por ser el de menor extensión debido a que está conformado por cámaras de aproximadamente 2 m de altura, esto aunado a que la inundación ocurrió durante la temporada de lluvias de la zona geográfica donde se encuentra ubicada la mina.

El volumen total estimado de todo el laboreo inundado de mina Colombia en agosto de 2017 es de 610.068,06 m³, con una recarga constante de 79,25gal según Herrera (2017) volumen necesario junto con el de las recargas y/o caudal presente en cada nivel, para el diseño de un sistema de bombeo que desaloje dicho volumen de agua.

5.2.3 Extracción del agua subterránea

Continuando con el enfoque de gestión integral, posterior al análisis de las recargas al sistema donde se encuentra el agua subterránea almacenada, como se describió anteriormente es necesario el equilibrio entre la recarga y la extracción de la misma, por lo que se estudió el conjunto de operaciones mediante el cual actualmente se extrae el agua en mina Colombia y se diseñaron dos (2) propuestas para dar soluciones al requerimiento actual y con proyección a futuro, y contribuir al manejo integral de las aguas subterráneas.

5.2.3.1 Drenaje actual en mina Colombia

Las labores de drenaje en mina Colombia están estructuradas de la siguiente manera, cada nivel está diseñado estratégicamente con una suave pendiente negativa hacia el pozo vertical de extracción de mineral, de manera que el drenaje se realice naturalmente por efecto de la energía

potencial gravitatoria, hacia la galería principal de cada nivel, la cual posee una canaleta como la que se presenta en la figura 5.11 que recoge el agua y la dirige al sumidero de captación ubicado en la entrada de cada estación de bombeo que integra el sistema de bombeo de la mina.



Figura 5.11. Canaleta en la galería principal de la entrada del nivel 1.
Fuente: Elaboración propia.

El sistema de bombeo de mina Colombia es múltiple, integrado por cuatro (4) estaciones de bombeo, asociados cada una a un sumidero, distribuidos en lugares convenientes en el nivel 1, nivel 4, nivel 7 y en el nivel 442 como se presenta en la figura 5.12.

En base de las mediciones de la tabla 5.19 realizadas por Bastidas (2017) y Herrera (2017) en septiembre 2017, en el nivel 1 trabajan tres (3) subestaciones de bombeo que reúnen el agua que ingresa al nivel y la bombean a superficie. A 5m de la entrada del pozo la primera subestación compuesta por una (1) bomba marca KSB 50/5 que extrae 182,84 GPM del sumidero 1; la segunda subestación de bombeo constituida por dos (2) bombas marca KSB modelo 125/4 que extraen en conjunto 531 GPM del sumidero La Virgen a superficie, y la tercera subestación consta de una bomba

sumergible marca Grindex modelo Minette que traspasa al sumidero La Virgen el caudal proveniente del sector oeste captado por el sumidero auxiliar.

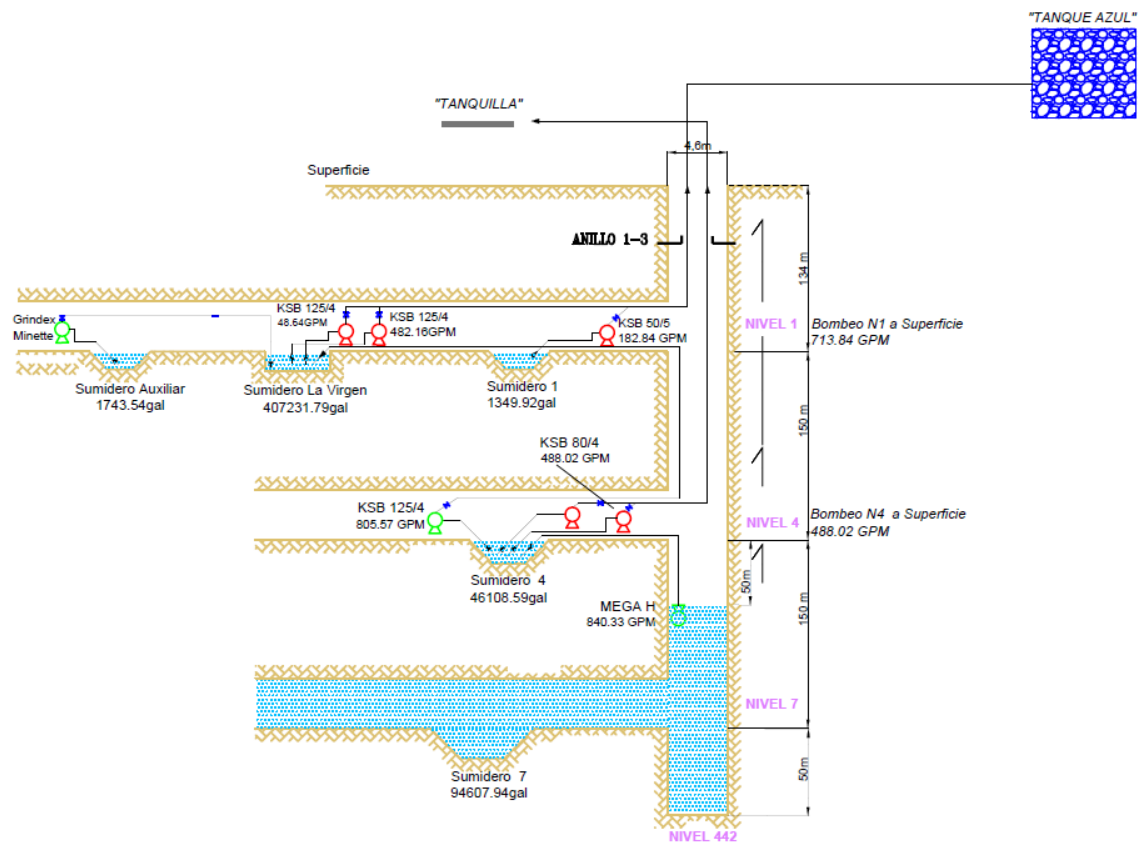


Figura 5.12. Sistema de bombeo actual de mina Colombia, septiembre 2017. Fuente: Tomado y modificado de Bastidas (2017) y López (2005).

En relación a la estación de bombeo del nivel 4, como se presenta en la tabla 5.19, dos (2) de cuatro (4) bombas extraen agua del sumidero 4, una (1) bomba marca KSB modelo 80/4 extrae 488,02 GPM a superficie y una (1) bomba marca KSB modelo 125/4 extrae 805,57 GPM al sumidero La Virgen en el nivel 1.

En el pozo vertical a 50m del nivel 4 una bomba sumergible marca GRINDEX modelo MEGA H extrae de la altura de la inundación en el nivel 5 840,33GPM al sumidero cuatro (4) y según Herrera (2017) por el pozo ingresa 79,25GPM al laboreo inundado.

Tomando como base las descripciones de López (2005) en el nivel 7, en condiciones normales (sin inundación) dos bombas extraían agua, proveniente del nivel 5, seis (6) y del nivel 442, captada por el sumidero 7 en la entrada del nivel, al nivel 4 y en el nivel 442 a 50m del nivel 7 extraía agua una bomba sumergible, y descargaba en el sumidero del nivel 7.

Tabla 5.19. Descripción del sistema de bombeo actual, septiembre 2017.

Nivel	SUMIDEROS				BOMBAS				
	Sumidero	Volumen de captación (gal)	Caudal medido que ingresa		Caudal medido que extrae		Eficiencia (%)	Régimen de trabajo	Altura (m)
			Fuente	(GPM)	Bomba	(GPM)			
1	1	1.349,92	Galería principal y Anillo 1-3	96,45	KSB 50/5	182,84	98,83%	Sumidero 1 a Superficie	134
	La Virgen	407.231,79	Sector Este y Oeste	1.505,46	KSB 125/4	48,84	3,05%	Sumidero	134
			Bomba KSB 125/4 Nivel 4	1.275,00	KSB 125/4	482,16	30,14%	La Virgen a Superficie	
Auxiliar	1.743,54	Sector Oeste	531,48	Grindex Minette	-	-	Sumidero Auxiliar a Sumidero La Virgen	-	
4	4	46.108,59	Niveles superiores, Nivel propio,	272,54	KSB 80/4	488,02	64,44%	Sumidero 4 a Superficie	284
					KSB 80/4	No operativo	-		
			Bomba MEGA H en el pozo	840,33	KSB 125/4	805,57	53,70%	Sumidero 4 a Sumidero La Virgen	
4	4	46.108,59	Bomba MEGA H en el pozo	840,33	KSB 125/4	805,57	53,70%	Sumidero 4 a Sumidero La Virgen	150
					KSB 125/4	No operativo	-		
5	Pozo vertical y laboreos inundados	-	Niveles superiores	79,25	MEGA H	840,33	84,03%	Pozo (Nivel 5) a Sumidero4	50
7	7	94.607,94	Inundados al momento de la medición					Sumidero 7 a Sumidero 4	150
442	442	198.129,04						Sumidero 442 a Sumidero 7	50

Fuente: Tomado y modificado de Bastidas (2017), Herrera (2017) y López (2005).

Durante la etapa de campo se describió las características del sistema de tuberías de cada estación de bombeo, con excepción de la estación que se encuentra en el nivel 7 y en el nivel 442 debido a la eventual inundación por lo que se tomó como referencia la descripción del mismo realizada por López (2005).

Referente al sistema de tuberías y accesorios de la subestación de bombeo del sumidero La Virgen en el nivel 1 es exactamente el mismo para cada

bomba asociada, debido a que cada una trabaja independiente de la otra con su respectivo sistema de tubería, extrayendo agua del sumidero La Virgen a superficie, este sistema de tubería posee 6" (0,1016m) de diámetro, como se presenta en la tabla 5.20, y una longitud en la sección de succión de 2 m y de 490m en la sección de impulsión considerando la distancia vertical y horizontal a la que se encuentran y su descarga en superficie.

Tabla 5.20. Características del sistema de tuberías de la estación de bombeo del nivel 1 a superficie.

Sistema de tuberías de la estación de bombeo del nivel 1 a superficie		
Características	Succión positiva	Impulsión
Longitud (m)	2	490
Diámetro (m)	0,1016	0,1016
Válvula de pie (unidad)	1	-
Válvula de retención	-	1
Válvula de compuerta	1	1
Codos de 90	-	8
Codos de 45	-	9
Cono difusor entrada	1	-
Cono difusor salida	-	1

Fuente: Elaboración propia.

En la estación de bombeo del nivel 4 el sistema de tubería se divide en dos (2) según su función, extraer agua a superficie y extraer agua al sumidero La Virgen en el nivel 1. Como se describe en la tabla 5.21, el sistema de tubería que extrae agua del nivel 4 a superficie, poseen 4" (0,1016m) y una longitud en la sección de succión de 3m y de 572m en la sección de impulsión considerando la distancia vertical a la que se encuentran y su descarga en superficie.

Tabla 5.21. Características del sistema de tuberías de la estación de bombeo del nivel 4 a superficie.

Sistema de tuberías de la estación de bombeo del nivel 4 a superficie		
Características	Succión	Impulsión
Longitud (m)	3	571,94
Diámetro (m)	0,1016	0,1016
Válvula de pie (unidad)	1	-
Válvula de retención	-	1
Válvula de compuerta	-	1
Codos de 90	1	9
Codos de 45	-	8

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto al sistema de tubería que extrae agua del nivel 4 al sumidero La Virgen en el nivel 1, poseen un diámetro de 6" (0,1524), y una longitud de 3,5 m en la sección de succión y 308,1m en la sección de impulsión, y cuentan con los accesorios descritos en la tabla 5.22.

Tabla 5.22. Características del sistema de tuberías de la estación de bombeo del nivel 4 al nivel 1. Fuente: Elaboración propia.

Sistema de tuberías de la estación de bombeo del nivel 4 al nivel 1		
Características	Succión	Impulsión
Longitud (m)	3,5	308,1
Diámetro (m)	0,1524	0,1524
Válvula de pie (unidad)	1	-
Válvula de retención		1
Válvula de compuerta		1
Codos de 90	1	4
Cono difusor entrada	1	-
Cono difusor salida	-	1

El sistema asociado a la bomba que extrae agua del pozo, se describe en la tabla 5.23 que el sistema dispone de una manguera de 4" de diámetro (0,1016m) con una longitud horizontal de 16,5 m además de la longitud vertical relacionada a altura de trabajo a la que se ubica la bomba, que como se mencionó anteriormente, al momento de la medición se encontraba a 50m del

nivel 4, adicionalmente no posee ningún accesorio ya que descarga libremente en el sumidero 4 y se acopla directamente a la bomba.

Tabla 5.23. Características del sistema de mangueras disponible.

Características del sistema de mangueras	
Diámetro (m)	0,1016
Área (m ²)	0,00810321
Longitud	16.5 m + altura de trabajo

Fuente: Elaboración propia

Respecto al agua extraída por el sistema de bombeo a superficie, durante el levantamiento hidrológico se ubicaron dos (2) zonas de descargas: la primera que se presenta en la figura 5.13, denominada “*tanquilla*” es la libre salida del agua bombeada del sumidero 4 a superficie que escurre sobre el terreno y descarga en el cauce de la quebrada El Tigre, produciendo la contaminación de éste cuya evaluación no es objetivo de esta investigación, y la segunda es el “*tanque azul*”, figura 5.14, ubicado a un costado de los tanques espesadores de la planta de procesamiento, donde descarga la estación de bombeo del nivel 1, cabe mencionar que dicho tanque se desborda constantemente y el agua fluye en superficie, como se describió en el apartado 5.1.4, en la sub cuenca 1, sobre la laguna de cola.

En el diagnóstico de la situación actual (septiembre 2017) del sistema de bombeo que extrae el volumen de agua que ingresa y el ya presente en los laboreos inundados, se puede apreciar que el sistema no satisface el requerimiento existente. En la estación del nivel 4 solo la mitad de las bombas están operativas, y no trabajan a una eficiencia mínima de 70%, considerando que con el constante ingreso de agua al sumidero 4, proveniente del sistema asociado a la bomba que extrae el agua del pozo, ésta estación de bombeo debe ser la más robusta de todo el sistema en general. Por lo que es evidente la necesidad de diseñar una configuración del sistema y una planificación a seguir dentro de los lineamientos del manejo integral de aguas para satisfacer el requerimiento actual.



Figura 5.13. Descarga en superficie de la estación de bombeo del nivel 4.
Fuente: Elaboración Propia.



Figura 5.14. Descarga en superficie de la estación de bombeo del nivel 1.
Fuente: Elaboración Propia.

5.2.3.2 Sistema de bombeo propuesto para la inundación actual

La importancia de las operaciones auxiliares en minería radica en ser el soporte de las operaciones unitarias de producción mineral. Si falla alguna de éstas, se compromete el completo desarrollo de las actividades de las operaciones mineras. De allí, la necesidad de planificarlas y diseñarlas casi con tanto detalle como el plan de producción mineral, mediante el desarrollo de una ingeniería conceptual.

Como se mencionó anteriormente, la producción de oro de mina Colombia se ha visto comprometida por las fallas que ha venido presentando el sistema de drenaje, aunado a la falta de mantenimiento preventivo y correctivo, que resultó en la inundación de los niveles más profundos de la mina, y en consecuencia la pérdida de la explotación de los niveles desarrollados en el sistema geológico denominado “El Bolsón”, que alberga los tenores más altos del sistema minero.

De esta manera, se plantea dar solución a la problemática de inundación del laboreo subterráneo, entre los niveles cinco (5) y siete (7) de mina Colombia, basada en el estudio de energía proveniente del balance de masa de la ecuación de Bernoulli descrita en el apartado 3.2.8., del sistema de mangueras disponible actualmente en la estación de bombeo ubicada entre el nivel 4 y cinco (5) que se presentan en la tabla 5.23.

Considerando las características del sistema disponible compuesto por una manguera de 4” de diámetro y las pérdidas de energía relacionadas a éstas (tabla del anexo III) se calculó mediante la ecuación 16, la carga hidrostática necesaria ($H_{necesaria}$) que debe vencer la bomba a seleccionar en el caso más crítico, que sería cuando el nivel de agua llegue al nivel 7 y la altura de trabajo de la bomba sea 150m, con lo que se obtuvo que la carga hidrostática a vencer debe ser de 207,32m.

Una vez calculada la carga hidrostática a vencer, se consultaron dos catálogos de los fabricantes FLYGT y GRINDEX (por tener disponibilidad en la zona geográfica) de bombas sumergibles y se seleccionó la bomba que mejor se ajustó a tal carga de 207,32m según su curva característica, la bomba marca FLYGT modelo B 244 HT, que como se presenta en la figura 5.15 (sus especificaciones se indican en el anexo IV) su curva de trabajo abarca un rango de altura considerable que incluye el valor de la carga hidrostática calculada.

Como se describió en el apartado 3.2.8.2. para acoplar una bomba a un sistema y determinar su punto de operación, se iguala $H_{necesaria}$ con $H_{disponible}$ que es la carga hidrostática neta de la bomba como una función del caudal, por lo que mediante iteraciones que se incluyeron en la tabla V.1, anexo V,, empleando la ecuación de conservación de la energía 16 de Bernoulli, se realizó la curva del sistema de manguera considerando las características descritos en la tabla 5.23 y sus respectivas pérdidas de carga, extraída de la tabla incluida en el anexo III y la altura de trabajo máxima de 150m, cuando la bomba esté en el nivel 7 y la descarga se mantenga en el nivel 4.

Como se presenta en la figura 5.16 la curva del sistema se intersectó con la curva característica de la bomba seleccionada, de esta manera $H_{necesaria} = H_{disponible}$, con lo que se determinó el punto de operación del sistema con la bomba marca FLYGT modelo BS 244 HT, de 550GPM a una altura de trabajo de 150m, cuando la bomba se encuentre en el nivel 7.

En el diseño se propone que la bomba seleccionada descargue en el sumidero 4, mientras realiza el desalojo del agua de toda la inundación, por lo que fue necesario calcular el caudal de diseño que debería manejar la estación de bombeo asociada al sumidero en cuestión.

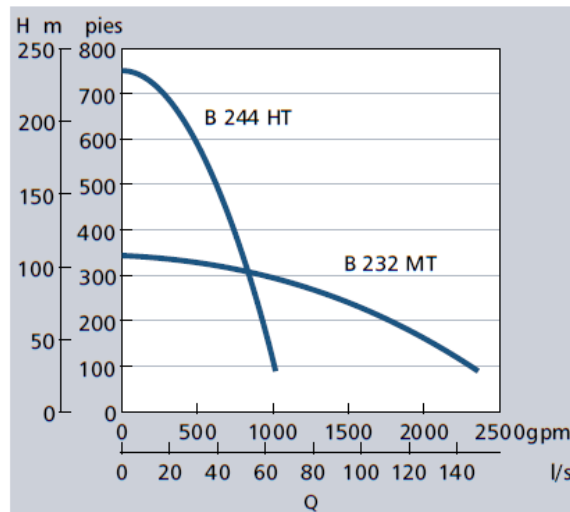


Figura 5.15. Curva característica de la bomba marca FLYGT modelo B 244 HT. Fuente: Manual de bombas de drenaje, Xylem (2012)

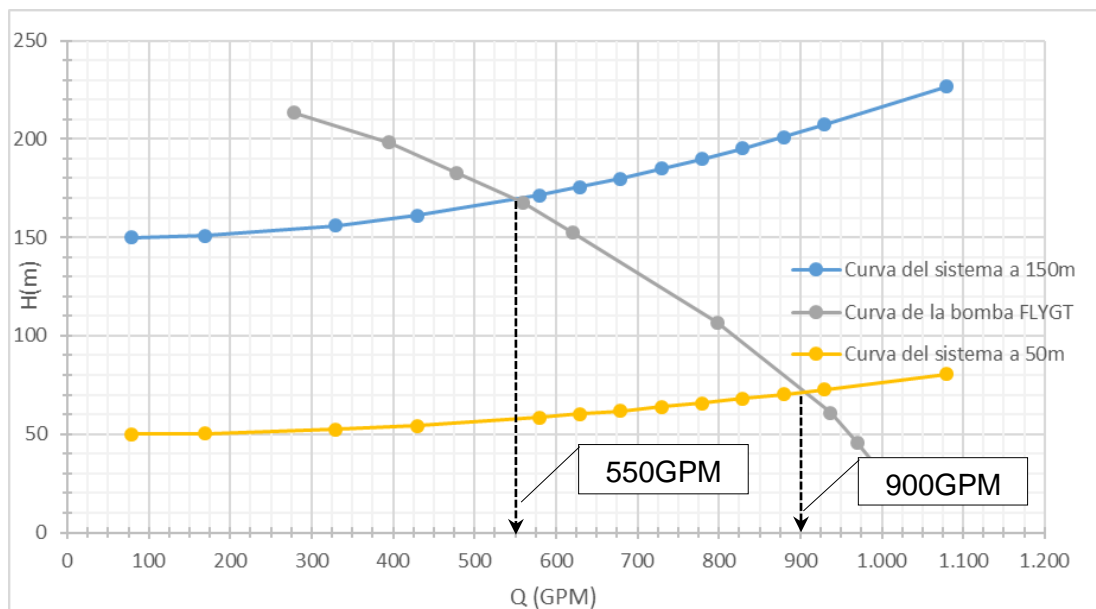


Figura 5.16. Punto de operación del sistema a 150m con la bomba marca FLYGT modelo B 244 HT.

Fuente: Elaboración Propia

El caudal de diseño se calculó considerando el caso de mayor ingreso de caudal proveniente del bombeo de la inundación al sumidero 4. Como se describió en el apartado 3.2.8.2, el caudal extraído por una bomba aumenta a medida que la carga hidrostática del sistema (H) disminuye, por lo que para establecer el flujo volumétrico máximo que extraería la bomba

seleccionada se calculó la carga hidrostática del sistema a la altura de trabajo mínima que sería cuando la bomba se ubique a 50m del nivel 4, nivel de la inundación actual, estudiando las pérdidas en el sistema de manguera, mediante iteraciones que presentan en la tabla V.2, anexo V. Se elaboró la curva del sistema a la altura de trabajo de 50m y como se presenta en la figura 5.16 se interceptó con la curva característica de la bomba y se determinó el punto de operación para dicha altura de trabajo de 900GPM.

Para esta cantidad de agua que ingresará al sumidero 4 proveniente del bombeo de la inundación, además del caudal de 272,54 GPM proveniente de niveles superiores, descrito por Bastidas (2017) que ingresa al sumidero (ver tabla 5.19), el caudal de diseño de la estación de bombeo asociado es en total de 1.172,54 GPM.

La estación de bombeo del nivel 4, como se mencionó anteriormente, es la estación más importante, debido a que es el sistema que extrae el agua proveniente del aforo de la actual inundación. Considerando el caudal de diseño calculado 1.172,54 GPM y que en esta estación se disponen de dos sistemas de tuberías detalladas en el apartado 5.2.3.1 se estudiaron dos sistemas de bombeo descritas a continuación.

❖ **Bombeo del nivel 4 a superficie**

Por la teoría descrita en el apartado 3.2.8.2 para acoplar una bomba a un sistema y determinar su punto de operación, se iguala $H_{necesaria}$ con $H_{disponible}$ que es la carga hidrostática neta de la bomba como una función del caudal, por lo que mediante iteraciones que se incluyeron en la tabla V.3, anexo V, empleando la ecuación de conservación de la energía 16 de Bernoulli, se realizó la curva del sistema considerando las características descritos en la tabla 5.21 y sus respectivas pérdidas de carga extraída de la tabla incluida en el anexo III y la altura de trabajo del sistema de bombeo del nivel 4 a superficie, específicamente 284m.

Se realizó la curva equivalente de las dos (2) bombas marca KSB modelo 80/4 en paralelo, que se disponen a incluir en el sistema, contemplando que teóricamente dos (2) bombas en paralelo resultan en una bomba equivalente cuya característica principal es mantener la altura de trabajo y duplicar el caudal (flujo volumétrico) a extraer, considerando de esta manera el caudal de diseño para la estación de bombeo en general descrito anteriormente.

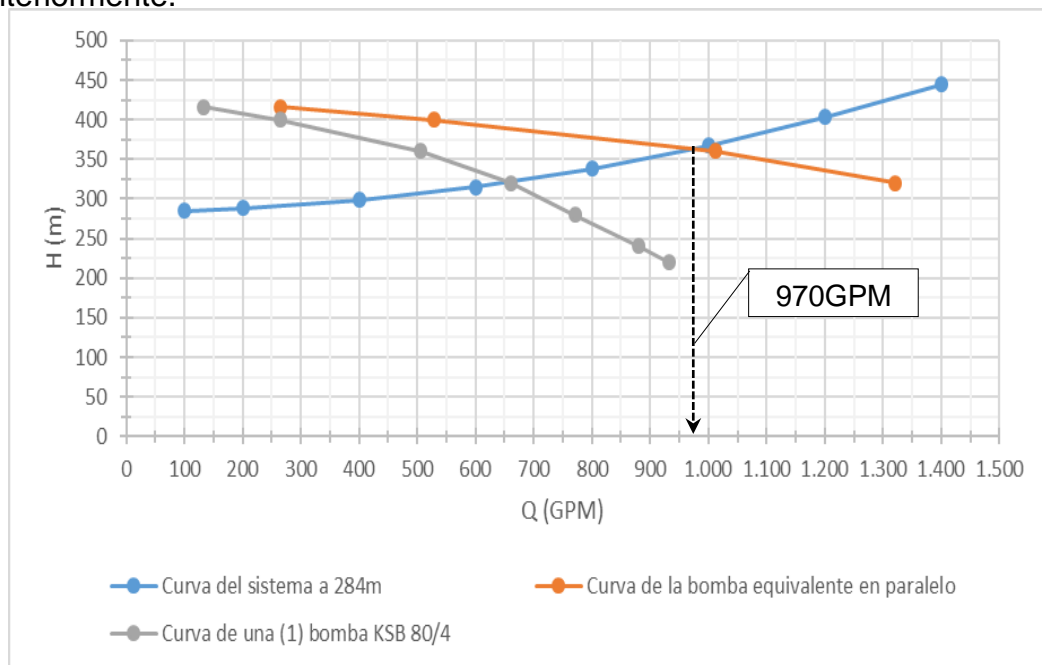


Figura 5.17. Punto de operación del sistema a 284m con la bomba equivalente en paralelo.

Fuente: Elaboración propia.

Como se presenta en la figura 5.17 la curva del sistema se intersectó con la curva característica de la bomba equivalente del sistema de bombeo en paralelo propuesto, de esta manera $H_{necesaria} = H_{disponible}$, con lo que se determinó el punto de operación del sistema con las dos (2) bombas marca KSB modelo 80/4 en paralelo, de 970GPM a una altura de trabajo de 284m.

En relación a la descarga en superficie, se plantea redirigir la descarga, proveniente del nivel 4, de la “tanquilla” al “tanque azul” y, de allí, distribuirlo

en superficie según las necesidades en la planta de procesamiento, acoplado una tubería de 4" a la tubería del mismo diámetro, disponible en la boca del pozo actualmente inactiva, que descargue en el tanque indicado.

❖ **Bombeo del nivel 4 al nivel 1**

En relación al sistema de bombeo del nivel 4 al nivel 1, se considera mantener el actualmente operativo conformado por una bomba marca KSB modelo 125/4 y un sistema de tuberías de 6", descrito en la tabla 5.22, que como se presenta en la tabla 5.19, al momento de la medición el sistema, extraía un volumen de 805,57 GPM.

Analizando el sistema de bombeo relacionado con el sumidero 4, al que se propone anexar la descarga de la bomba marca FLYGT modelo B 244 HT que extraerá agua de la inundación, se determinó que es necesario proponer un mantenimiento preventivo a la bomba marca KSB modelo 125/4 para que su nivel de operatividad llegue a satisfacer mínimo un 75% de su rendimiento y además de un mantenimiento correctivo a la bomba marca KSB modelo 80/4 actualmente inoperativa, para poner en operación el sistema en paralelo propuesto y descrito anteriormente con el objetivo de aumentar el flujo volumétrico total de descarga del sistema de bombas en conjunto, y así el sumidero 4 no se rebose e inunde la entrada del nivel 4, de esta manera se da solución al requerimiento actual de inundación.

❖ **Estación de bombeo del nivel 1.**

Como se describió en el apartado 5.2.3.1 del drenaje de mina, la subestación de bombeo relacionada al sumidero 1 trabaja con una eficiencia de 98%, por lo que no se propone modificarla. De igual manera la subestación de bombeo asociada al sumidero La Virgen trabaja con una eficiencia de 30% y es la responsable de bombear todo el caudal proveniente de la constante recarga de superficie, por lo que se propone un mantenimiento preventivo a cada bomba marca KSB modelo 125/4 para que su nivel de operatividad llegue a satisfacer mínimo un 70% de su rendimiento, con el objetivo de aumentar el

flujo volumétrico total de descarga del sistema de bombas en conjunto. Además, se propone el mantenimiento quincenal del sumidero La Virgen, mediante el uso de una bomba succionadora de lodos, descrita en campo, conectada a mangueras para la remoción y disposición del material fino en las cámaras de explotación ya agotadas más adyacentes al sumidero con la finalidad de aumentar el volumen de captación del sumidero en cuestión y reúna eficientemente el flujo volumétrico que le ingresa descrito en la tabla 5.19.

❖ **Escenarios de inversión financiera para reducción de tiempos de drenaje de inundación**

Para completar la propuesta diseñada y a su vez presentar una optimización en tiempo de la misma, se realizó el análisis de tres (3) escenarios de inversión financiera para reducción de tiempos de drenaje de inundación, considerando 20% de inactividad por pérdidas de tiempo en paradas del sistema.

La propuesta diseñada para el desalojo del volumen de agua presente en los laboreos inundados, consta de una bomba sumergible marca FLYGT modelo B 244 HT, la cual extraerá el volumen de agua de la inundación en un tiempo estimado de 5.472 h, considerando la inactividad anteriormente mencionada.

En el primer escenario se considera una reducción de $\frac{1}{2}$ del tiempo total estimado desalojado por el sistema propuesto, considerando el 20% de inactividad respectivo, se estimó un requerimiento de extracción de caudal de 1.720,8 GPM, que se alcanzaría adicionando otra bomba, de semejantes características, a la bomba principal propuesta que es capaz de extraer 900 GPM a una altura de trabajo de 50m.

El segundo escenario se aplica haciendo una reducción de $\frac{1}{3}$ del tiempo total estimado de desalojo por el sistema propuesto, es decir 1.843,2h, considerando el 20% de inactividad respectivo, con lo que se estimó un

requerimiento de extracción de 2.541,5 GPM, que se resolvería adicionando dos bombas semejantes a la bomba principal propuesta marca FLYGT modelo modelo B 244 HT.

Considerando la reducción del tiempo total de desalojo del agua de la inundación a $\frac{1}{4}$, se estudió el tercer escenario de inversión para reducción de tiempos de drenaje a 1.382,4h, de igual manera considerando el 20% de inactividad respectivo, y se obtuvo un requerimiento de extracción de 3.362,3 GPM, lo cual se conseguiría adicionando tres bombas semejantes a la bomba marca FLYGT modelo B 244 HT del diseño propuesto en primer lugar.

El escenario que se planteó en la propuesta principal está relacionado a la menor inversión a realizar, ya que consta de una bomba sumergible marca FLYGT modelo B 244 HT; por su parte el análisis de los escenarios estudiados de inversión financiera para reducción de tiempos de drenaje de inundación, indica que para reducir tiempos de extracción del agua es necesario aumentar el caudal de extracción, como se presenta en la figura 5.18 mediante la representación gráfica de los distintos escenarios estudiados, lo cual se logra adicionando bombas para aumentar dicho caudal de extracción, lo que implicaría una mayor inversión financiera al sistema, además de aumentar la capacidad del sumidero 4.

5.2.3.3 Sistema de bombeo final propuesto

De igual manera se realizó el estudio de conservación de la energía mediante la ecuación de Bernoulli para el diseño propuesto para el nivel 7 y el nivel 442 después de satisfacer el requerimiento actual de inundación, asumiendo como caudal de recarga el medido por Herrera (2017) de 79,25GPM.

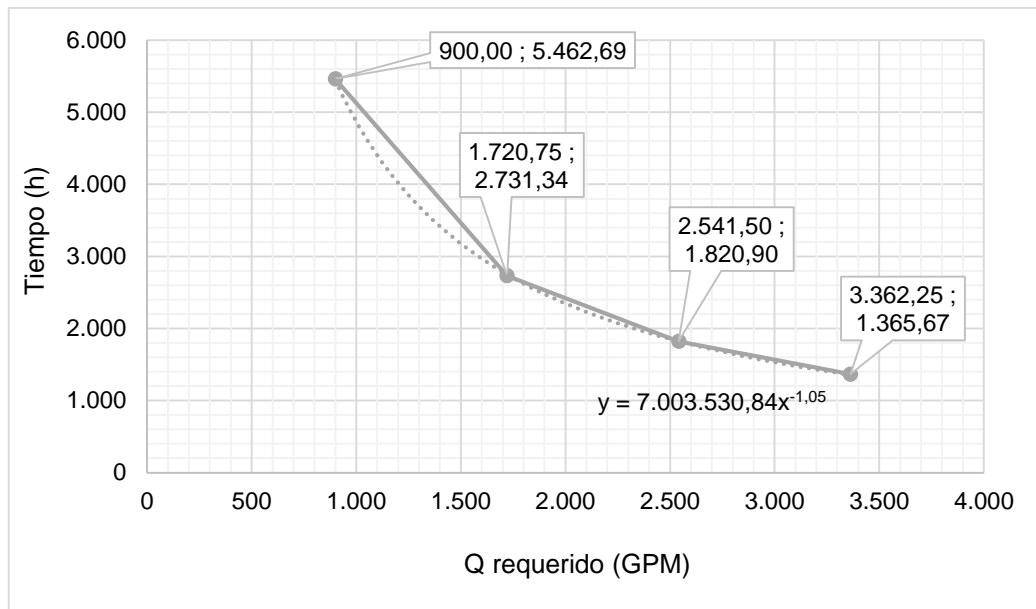


Figura 5.18. Representación gráfica de escenarios inversión para reducción de tiempo de drenaje.

Fuente: Elaboración propia.

❖ Estación de bombeo del nivel 442

Para la estación de bombeo en el nivel más profundo de la mina, el estudio realizado fue semejante al que se realizó en el apartado 5.2.3.2 teniendo en cuenta las características del sistema descrito por López (2005), el sistema de bombeo se ubicará en el sumidero 442 y descargará en el sumidero 7 del nivel 7, ver figura 5.19.

El caudal de diseño se calculó considerando como demanda diaria un 80% del volumen que puede ser captado por el sumidero asociado 442, para evitar cavitación y sea continua su funcionalidad, además se asumió como caudal de recarga 79,25GPM (tabla 5.19) que ingresa por el pozo medido por Herrera (2017), con lo que se obtuvo un total de 189,32GPM.

Considerando las características del sistema disponible compuesto por una manguera de 4" de diámetro y las pérdidas de carga relacionadas a éstas (tabla III.2 y III.3, anexo III) se calculó mediante la ecuación 16, la carga hidrostática necesaria ($H_{necesaria}$) que debe vencer la bomba a

seleccionar con la altura de trabajo de 50m, con lo que se obtuvo que la carga hidrostática a vencer será de 51,84m.

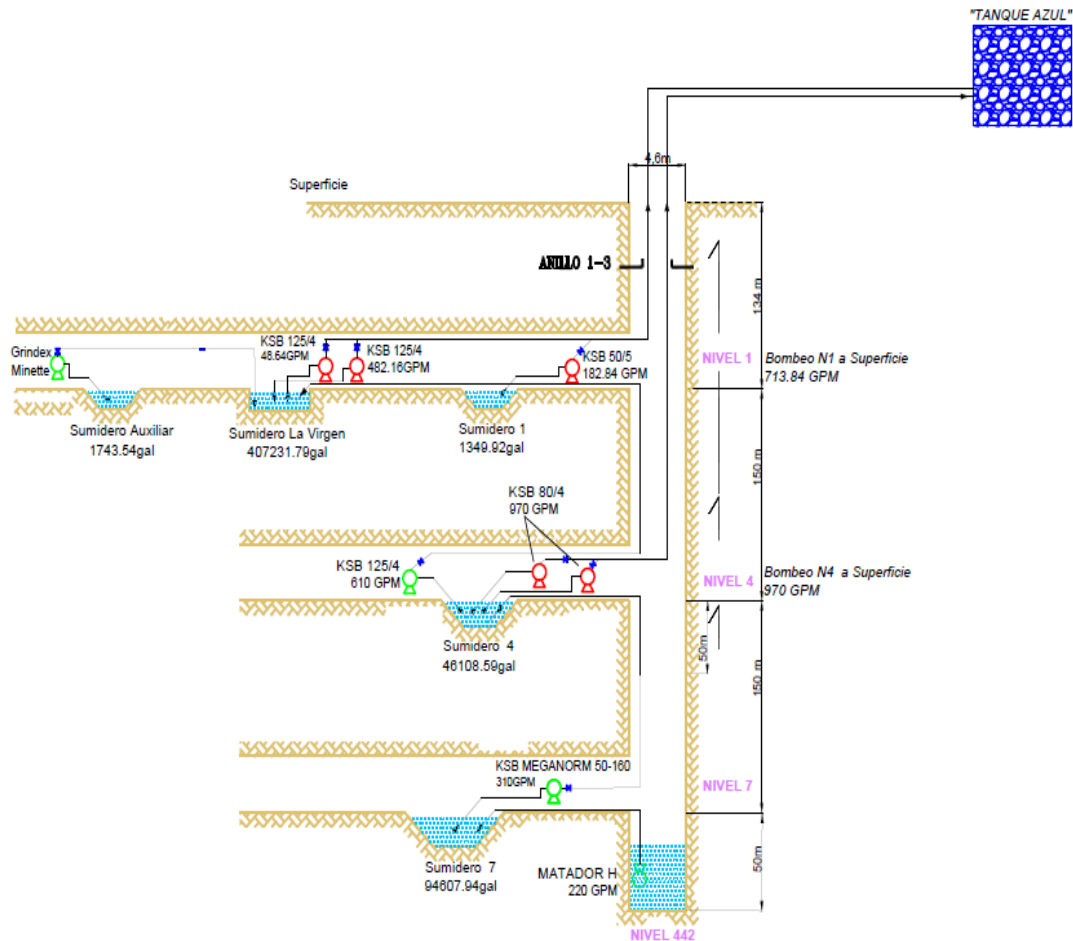


Figura 5.19. Sistema de bombeo final propuesto. Fuente: Elaboración propia.

Con los valores de caudal de diseño y la carga hidrostática a vencer, se consultaron catálogos de los fabricantes FLYGT y GRINDEX (por tener disponibilidad en la zona geográfica) de bombas sumergibles y se seleccionó la que mejor se ajustó a las variables, la bomba sumergible marca GRINDEX modelo MATADOR H cuya curva característica, figura 5.20, (especificaciones anexo IV), abarca un rango de alturas que incluye el valor de la carga hidrostática calculada y una capacidad de extracción de flujo volumétrico que corresponde con el caudal de diseño.

Para establecer el punto de operación de la bomba con el sistema de mangueras como se describió en el apartado 3.2.8.2, se iguala $H_{necesaria}$ con $H_{disponible}$ que es la carga hidrostática neta de la bomba como una función del caudal, para ello mediante iteraciones representadas en la tabla V.4 (anexo V), empleando la ecuación 16, se realizó la curva del sistema de manguera considerando las características descritos en la tabla 5.23, las pérdidas de carga relacionadas a éstas, (extraída de la tabla III.1 en el anexo III) y la altura de trabajo de 50m.

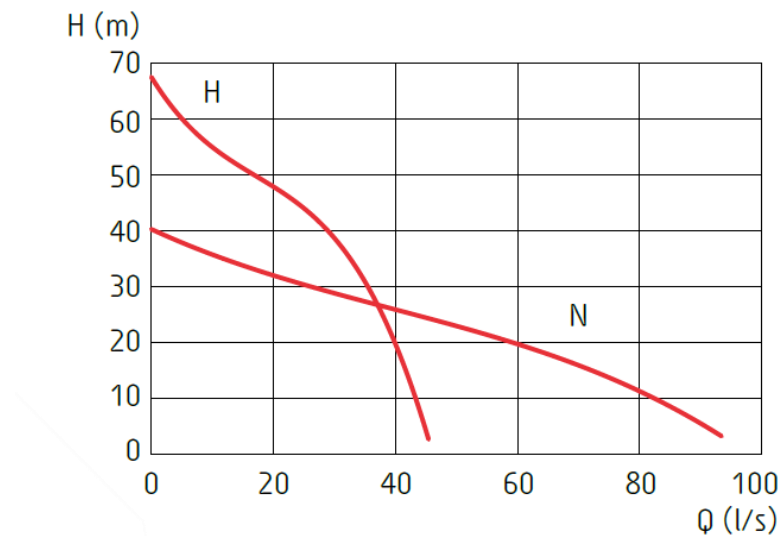


Figura 5.20. Curva característica de la bomba marca GRINDEX modelo MATADOR H. Fuente: Manual de bombas, GRINDEX (2012)

Como se presenta en la figura 5.21 la curva del sistema se intersectó con la curva característica de la bomba seleccionada, de esta manera $H_{necesaria} = H_{disponible}$, con lo que se determinó el punto de operación del sistema de 220GPM, mayor que el caudal de diseño, por lo que fue necesario establecer un régimen de trabajo, descrito en la tabla 5.24.

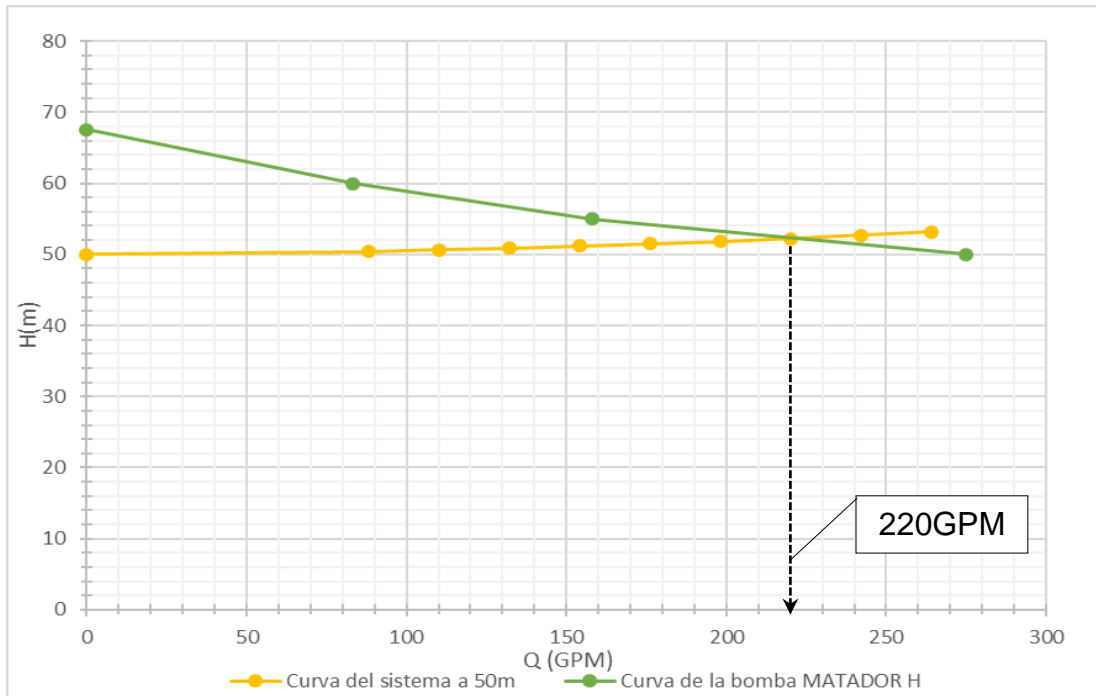


Figura 5.21. Punto de operación del sistema a 50m con la bomba marca GRINDEX modelo MATADOR H. Fuente: Elaboración propia.

Para el cálculo del régimen de trabajo se consideró la demanda diaria del 80% del volumen que puede captar el sumidero 442 y la capacidad de caudal de la bomba seleccionada, 220GPM, con lo que se obtuvo que el régimen de trabajo de la bomba será de 12 horas, de las cuales se propone sean distribuidas en 4 horas de trabajo en cada turno de ocho horas, de manera que el drenaje se realice en cada turno de trabajo.

Tabla 5.24. Régimen de trabajo de la bomba marca GRINDEX modelo MATADOR H.

Régimen de trabajo de la bomba MATADOR H	
Volumen a extraer del sumidero (80%)	158.503,232
Capacidad de la bomba (GPM)	220
Tiempo total de trabajo (h)	12

Fuente: Elaboración propia.

❖ Estación de bombeo del nivel 7

Debido a que no se cuenta con un caudal medido que ingrese al sumidero 7 proveniente de niveles superiores, se consideró la relación de 30% que existe entre los caudales que ingresan al sumidero 4, 272,54GPM proveniente

de niveles superiores y 900GPM del flujo volumétrico de la bomba en el pozo vertical durante el bombeo del volumen de la inundación. De esta manera el caudal de diseño de la estación en el nivel 7 se calculó en base a la descarga de 220GPM de las bombas marca GRINDEX modelo MATADOR H en el sumidero 442, asumiendo como caudal proveniente de niveles superiores 30% del flujo volumétrico de la bomba en cuestión, es decir una recarga extra de 66GPM, con lo que en total se obtuvo un caudal de 286,64GPM para el diseño de la estación.

Como se describió en el apartado 3.2.8.2, el caudal extraído por una bomba aumenta a medida que la carga hidrostática del sistema (H) disminuye, por lo que se propone que la estación de bombeo del nivel 7 descargue en el sumidero del nivel 4 y no en superficie, ya que aumentaría la carga hidrostática y el caudal extraído disminuiría, por lo que la altura de trabajo de la estación será de 150m.

Considerando la altura de trabajo y las características del sistema disponible compuesto por una tubería de 4" de diámetro y las pérdida de carga relacionadas a éstas (tabla III.2 y III.3 del anexo III) se calculó mediante la ecuación 16, la carga hidrostática necesaria ($H_{necesaria}$) que debe vencer la bomba a seleccionar con lo que se obtuvo que la carga hidrostática a vencer debe ser de 167,101m.

Con los valores de caudal de diseño y carga hidrostática a vencer se consultaron aproximadamente tres catálogos del fabricante de bombas KSB (por tener disponibilidad en la zona geográfica) y se seleccionó la que mejor se ajustó a las variables, la bomba marca KSBS modelo MEGANORM 50-160 con un diámetro del rotor de 153mm, cuya curva característica, figura 5.22, (especificaciones anexo IV), abarca un rango de alturas para el diámetro del rotor 153mm que incluye el valor de la carga hidrostática calculada y una capacidad de extracción de flujo volumétrico que corresponde con el caudal de diseño.

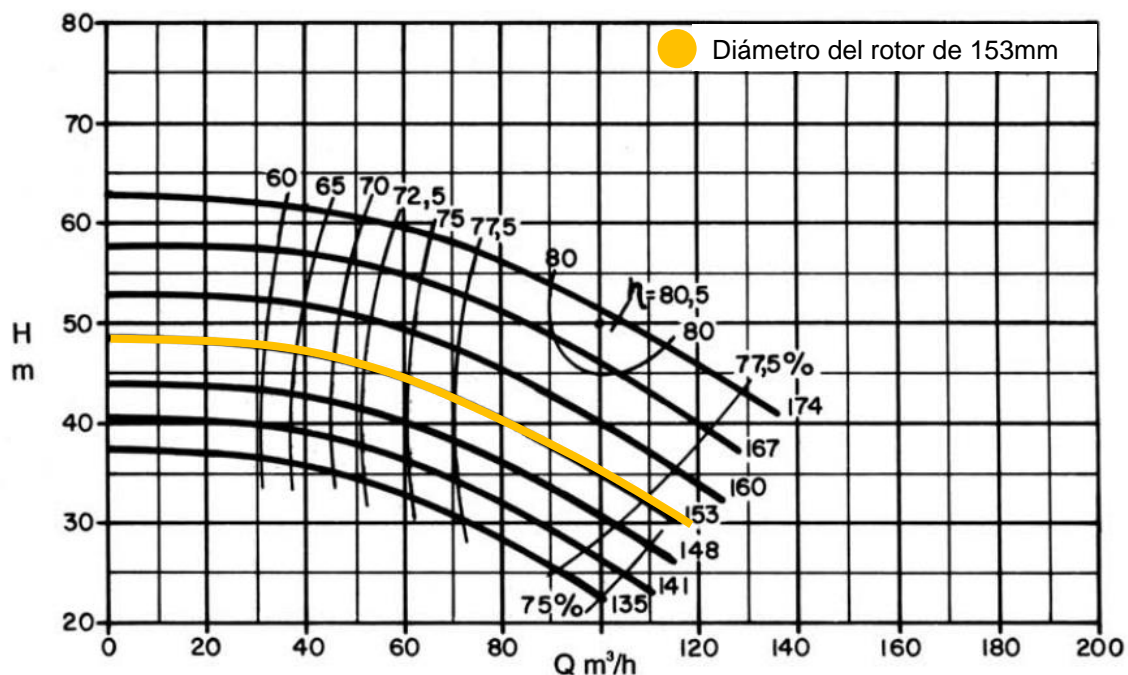


Figura 5.22. Curvas características de la bomba marca KSB modelo MEGANORM 50-160. Fuente: Manual de curvas características N° A274/40V/42/44.1P/E/S/2.KSB Meganorm

Para el cálculo del punto de operación de la bomba con el sistema de tuberías de 4" , mediante iteraciones incluidas en la tabla V.3, anexo V, empleando la ecuación 16 , se realizó la curva del sistema de tubería de 4" considerando la altura de trabajo de 150m además de las características y accesorios del sistema descritos en la tabla 5.22 con sus respectivas pérdidas de carga relacionadas (extraída de la tabla III.2 y III.3 en el anexo III) y como se presenta en la figura 5.23 se intersectó con la curva característica de la bomba seleccionada, de esta manera $H_{necesaria} = H_{disponible}$, con lo que se determinó el punto de operación del sistema de 310GPM, mayor que el caudal de diseño, por lo que se estableció un régimen de trabajo de 12h en conjunto con la bomba marca GRINDEX modelo MATADOR H del sumidero 442, de manera que ambas bombas trabajen en conjunto 4 horas cada turno de trabajo y no se rebose el sumidero 7 ni el caso contrario, ya que como se presenta en la tabla 5.25, se calculó la recarga del sumidero, cuando ambas bombas estén

apagadas y el valor de recarga constante estimada no sobrepase la capacidad de captación del sumidero en cuestión.

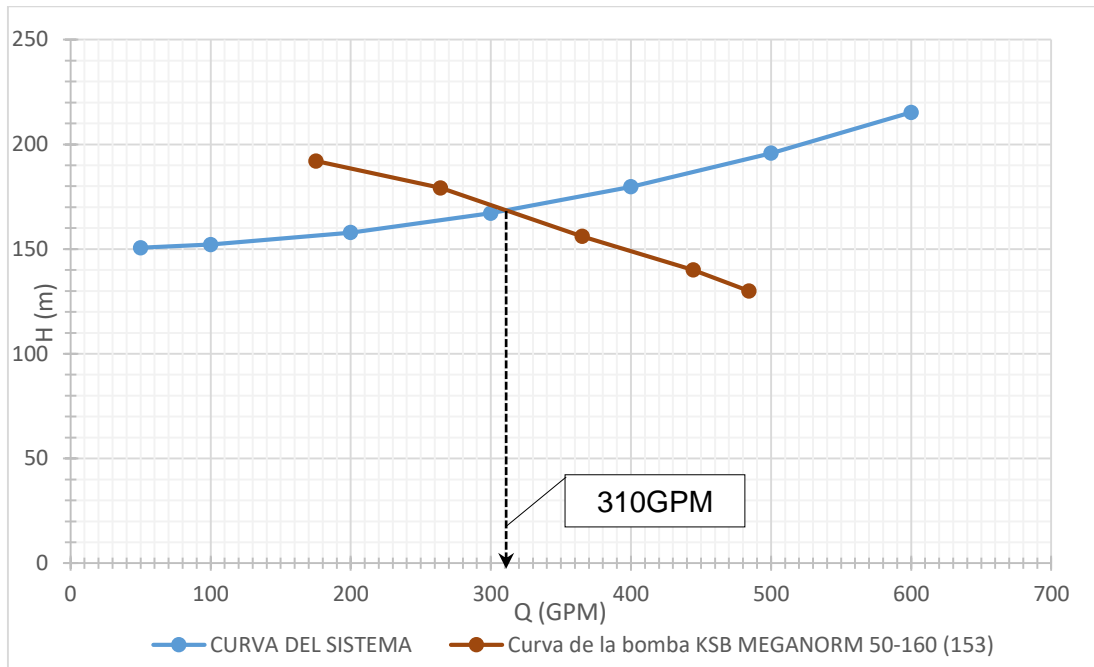


Figura 5.23. Punto de operación del sistema a 150m con la bomba marca KSB modelo MEGANORM 50-160 (153mm). Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.25. Régimen de trabajo de la bomba marca KSB modelo MEGANORM 50-160

Régimen de trabajo de la bomba KSB MEGANORM 50-160	
Tiempo total de trabajo (h)	12
Tiempo total de inoperatividad (h)	12
Recarga constante estimada (GPM)	66
Capacidad de captación del sumidero (gal)	94.607,94
Recarga total estimada en tiempo de inoperatividad(gal)	47.520

Fuente: Elaboración propia

❖ Estación de bombeo del nivel 4 y nivel 1

En relación a la estación de bombeo del nivel 4 se propone mantener el sistema descrito en el apartado 5.3.2.2, integrado por un conjunto de bombas en paralelo para mantener el flujo volumétrico, ver figura 5.20. Considerando que, en lugar de la recarga del proveniente del aforo de la inundación, ingresará el bombeo proveniente del nivel 7 estimado de

310GPM en 12 horas de trabajo, de esta manera se establece el régimen de trabajo para la estación del nivel 4 de 12 horas distribuidas en 4 horas cada turno en conjunto con el sistema de bombeo del nivel 7, y así el sumidero 4 no se rebosa e inunda la entrada del nivel 4. De igual manera se propone mantener la estación de bombeo del nivel 1, por lo descrito anteriormente.

CONCLUSIONES

Para el diseño de manejo de aguas de mina Colombia, fueron realizadas actividades de investigación, que consistieron en recopilación bibliográfica y levantamiento de datos de campo bajo el enfoque de la gestión integral de los productos del componente atmósfera y agua de escurrimiento en superficie e infiltración al subsuelo, cuyos excedentes producen la inundación eventual del laboreo subterráneo (agua subterránea).

❖ Agua superficial

Las actividades de recopilación y procesamiento de datos permitieron calcular caudales de agua de infiltración y caudales afluentes de las subcuencas, por registros de precipitación del satélite TRMM de la NASA, e identificar relaciones entre la hidrología superficial y las recargas de la inundación.

El análisis de las tasas de precipitación diaria, mensual y anual indican que en la superficie de mina Colombia ocurren precipitaciones durante todo el año, las máximas precipitaciones se registran en junio, julio y agosto, manteniéndose lluvias considerables en los meses restantes.

La lluvia de diseño permitió calcular la máxima precipitación en 24 horas en la superficie de la mina, registrada durante el mes de julio de 2017, con un valor de 64,647mm.

El análisis indicó que existe un 1% de probabilidad, de que sean superados los 161,6773 mm en 24 horas de precipitación, lo que corresponde a un evento centenario; en otras palabras, existe un 50% de probabilidad de que la precipitación en 24 horas sea menor o igual a 73,8896 mm en el año 2019.

Fueron realizados los balances hídricos, en la ventana de tiempo 2000 - 2017, empleando la metodología de Thornthwaite, lo que permitió completar el balance de agua proveniente de la precipitación sobre la superficie de mina Colombia, utilizando los registros de precipitación del satélite TRMM y los registros de temperatura del sistema GLDAS de la NASA, debido a que la mina no cuenta con una estación meteorológica.

Mediante el balance hídrico se observó que el exceso de agua de infiltración está estrechamente relacionado y condicionado por la temperatura media anual y el volumen total de precipitación. El registro histórico estudiado (2000 – 2017) indica que el total de agua infiltrada (I) en el laboreo subterráneo de mina Colombia fue de 1.803,39mm. Se destaca que en 2007 se registró una temperatura anual de 24°C y la tasa de infiltración fue de 258mm.

El caudal afluyente de las sub cuencas hidrográficas que aportan agua al terreno donde se encuentra mina Colombia se calculó con la intensidad de la mayor precipitación en 24 horas, registradas en los meses identificados con mayor precipitación durante el año 2017, 64,67mm/h en julio y 40mm/h en septiembre.

Para la correlación con los valores del caudal de agua que ingresa al nivel 1 de la mina, medidos por Herrera (2017), durante la misma fecha, se consideró el caudal afluyente de la sub cuenca 2 en 10,445 m³/s, durante el mes de septiembre.

El área de la mina se encuentra atravesada por un conjunto importante de fallas y estructuras. La sección del plano integral permitió visualizar el plano y la traza de la falla inversa Santa María. Este plano de falla actúa como un medio para el ingreso de las aguas subterráneas, por permeabilidad secundaria, pudiendo alcanzar niveles profundos en el laboreo subterráneo.

Se identificó la intersección de esta falla con el cauce de la quebrada El Tigre, en superficie, y con el sector oeste del nivel 1, en subterráneo.

El análisis del caudal afluente de la sub cuenca 2, en septiembre de 2017 y los valores medidos por Herrera (2017), en la misma fecha, permitió calcular que aproximadamente el 0,3% de ese caudal funciona como recarga al sistema subterráneo.

❖ **Agua subterránea**

Las actividades de recopilación bibliográfica y campo permitieron completar el diagnóstico del sistema de drenaje de mina Colombia, describir el volumen de agua subterránea a drenar y diseñar el sistema de drenaje para dar respuesta al requerimiento actual.

En septiembre de 2017, el laboreo entre los niveles cinco (5) y siete (7) de mina Colombia albergaban un total de 610.068,06 m³ de agua subterránea, con una recarga constante de 79,25 GPM, proveniente del nivel 4.

El sistema de bombeo de mina Colombia es múltiple, compuesto por cuatro (4) estaciones de bombeo distribuidas entre los niveles uno (1), cuatro (4), siete (7) y en el nivel 442.

En septiembre de 2017, estaban operativos los dos primeros (niveles 1 y 4), en conjunto con una bomba sumergible a la altura de la inundación, a 50m del nivel 4.

El diagnóstico del sistema de drenaje actual de mina Colombia indicó que no satisface el requerimiento existente ya que en el nivel 4 solo la mitad de las bombas están operativas.

A través del estudio de la conservación de la energía, para el requerimiento actual que incluye el drenaje de los laboreos inundados y la recarga constante, se diseñó un sistema de bombeo para la estación ubicada en el nivel 4, con una bomba sumergible marca FLYGT modelo BS 244 HT, que descargue toda el agua de la inundación al sumidero 4.

Se asumió que el agua será extraída a superficie, por un sistema en paralelo de dos (2) bombas marca KSB modelo 80/4, con un caudal de 970 GPM, a ser distribuida entre los requerimientos de la planta de procesamiento mineral y la quebrada El Tigre posterior a su debido tratamiento, para prevenir la afectación de la misma.

Se supuso un sistema de bombeo permanente, para el nivel 7 y el nivel 442, después de satisfacer el requerimiento actual de inundación, que incluye una bomba sumergible marca GRINDEX modelo MATADOR H para bombear del sumidero 442 al sumidero 7.

Se asumió incluir en el sumidero 7 una bomba marca KSB modelo MEGANORM 50-160, con un diámetro del rotor de 153mm para extraer en un régimen de trabajo de 12 horas, 330GPM al sumidero 4, donde se proyecta mantener en paralelo el sistema anteriormente descrito.

Es importante mencionar que, debido al basamento teórico de la mecánica de los fluidos que explica que el caudal extraído por una bomba aumenta a medida que la carga hidrostática del sistema (H) disminuye, en el diseño propuesto se mantuvo el sistema múltiple integrado por cuatro (4) estaciones de bombeo. De esta manera, se trabajará con la menor altura de trabajo posible, preservando el mayor flujo volumétrico a extraer, con el fin de evitar inundaciones en el futuro.

RECOMENDACIONES

❖ Agua superficial

Seguimiento de las precipitaciones en la superficie de mina Colombia, específicamente en los meses identificados con las mayores precipitaciones, desde junio a septiembre, ya que son la principal fuente de recarga a la hidrología superficial de la zona, captadas por la sub cuenca 2 que aporta agua directamente al cauce de la quebrada El Tigre, principal recurso hidrológico, el cual se identificó que recarga agua al sistema subterráneo.

Realizar un estudio hidrogeológico a detalle, que permita identificar cada estructura hidrogeológica que derive de la actividad estructural de la falla Santa María, y posteriormente se puedan tomar acciones en cuanto a la constante recarga al nivel 1 proveniente de la relación identificada entre el laboreo subterráneo con el plano de esta falla y el cauce de la quebrada El Tigre.

Considerar la posibilidad de embaular el cauce de la quebrada El Tigre, dentro del perímetro industrial, teniendo en cuenta que es un recurso hídrico, que debe ser preservado y fluye en la superficie de mina Colombia, propenso a recargar agua al laboreo subterráneo.

Realizar un levantamiento detallado de los pavimentos flexibles y rígidos en las instalaciones industriales en la superficie del laboreo subterráneo, con la finalidad de impermeabilizar aquellas secciones agrietadas, rotas y/o sin revestimiento.

Facilitar el monitoreo y control de la calidad de las aguas industriales (servidas) en cumplimiento a la ley de agua y su reglamento, a los decretos 883 y 2.220, así como las normas COVENIN venezolanas y demás que regulan la materia.

❖ Agua subterránea

Implementar el diseño propuesto para drenar la inundación actual, ya que es necesaria una estación de bombeo en el nivel 4 que sea capaz de elevar a superficie el caudal proveniente del aforo. De lo contrario, el nivel cuatro se inundará, considerando que el aumento de caudal o capacidad de las bombas en cuanto a flujo, involucra además del costo de las mismas, una inversión en el sistema de tuberías y mangueras.

Aumentar la capacidad de captación del sumidero 4 que permita establecer un régimen de trabajo, de manera que en el tiempo de inoperatividad éste no se rebose, ocasionando la inundación de la entrada del nivel 4.

Ejecutar la instalación de sistemas de control de nivel para evitar posibles daños a las bombas y garantizar el funcionamiento adecuado del sistema, que se debe desarrollar a fondo en un estudio necesario de ingeniería básica y de detalle.

Realizar mantenimiento quincenal de cada sumidero, en especial del sumidero La Virgen, por la gran cantidad de agua que le ingresa y que debe contener. Para controlar la cantidad de captación, se requiere el uso de una bomba succionadora de lodos, conectada a mangueras para la remoción de material fino y su disposición en las cámaras ya agotadas, más adyacentes a cada sumidero.

Crear un grupo de control del sistema de bombeo destinado a las labores de supervisión y mantenimiento, con mayor atención durante la etapa de aforo de la inundación de la estación de bombeo del nivel 4. Este grupo realizará como mínimo una (1) supervisión semanal de todo el sistema de bombeo con un informe donde detallen lo ocurrido.

Redirigir en superficie la descarga proveniente del nivel 4 de la “*tanquilla*” al “*tanque azul*” y, de allí, distribuirlo en superficie según las necesidades en la

planta de procesamiento, acoplando una tubería de 4" a la tubería del mismo diámetro disponible en la boca del pozo actualmente inactiva.

Realizar un estudio de corrosión de las tuberías, por el contacto con las aguas de mina dentro del laboreo subterráneo, para diseñar medidas de protección del sistema de drenaje.

Realizar un estudio de ingeniería básica y de detalle, que debe cubrir la parte civil, eléctrica e instrumentación asociada, con personal capacitado, durante el cual se debe analizar hidráulicamente todo el sistema de bombeo y tuberías asociadas además de verificar si el sistema cumple con los requerimientos de Altura Neta de Succión Positiva (NPSH), estudio con el que conjuntamente se obtendrá el estimado de costos de implantación del proyecto y todos los equipos asociados.

BIBLIOGRAFÍA

- Bastidas, Y. (2017). *Diagnóstico del sistema de bombeo de Mina Colombia, MINERVEN, Municipio El Callao, Estado Bolívar*. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- Cámara Artigas, R., & Martínez Batlle, J. R. (2007). *Plantilla para el cálculo del balance hídrico y el diagrama bioclimático: su aplicación a estudios de hidrología y geobotánica*. Sevilla, España: Equipo de Trabajo Estudios Tropicales y Cooperación al Desarrollo del Grupo de Investigación Cuaternario y Geomorfología (PAI RNM-273).
- Cazal, S. (2013). *Propuesta de cierre de Cantera Las Marías, Estado Miranda, como aporte al Ministerio del Poder Popular de Petróleo y Minería en las políticas mineras*. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- Constitución de la República Bolivariana de Venezuela, Gaceta Oficial de la República de Venezuela N°36.860 (Extraordinario), diciembre 30, 1999.
- Cova, J. (2018). *Propuesta de un sistema de control integral de sólidos en suspensión hídrica, mina a cielo abierto C.V.M S.A División-Níquel, Tiara-Estado Aragua*. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- Decreto 883. Normas para la clasificación y el control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes líquidos. Gaceta Oficial de la República de Venezuela N° 5.021 (Extraordinario), diciembre 18, 1995.
- Decreto 2.220. Normas para regular las actividades capaces de provocar cambios de flujo, obstrucción de cauces y problemas de sedimentación Gaceta Oficial de la República de Venezuela N°4.418 (Extraordinario), abril 27, 1992.
- Decreto con Rango y Fuerza de Ley de Minas. Gaceta Oficial de la República de Venezuela N°5382 (Extraordinario), septiembre 28, 1999.
- Dpto. de Ingeniería de Minas. (2012). *Plan de adecuación del sistema de bombeo en mina Colombia*. MINERVEN.
- España, I. d., & UNESCO. (1981). *Métodos de cálculo del balance hídrico*. Madrid.
- Fundación de Educación Ambiental. (2006). *Recursos Hídricos de Venezuela* (Primera ed.). Caracas, Caracas, Venezuela: FUNDAMBIENTE.
- Giovanni, NASA. (2018). Recuperado el 07 de Julio de 2018, de <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/doc/UsersManualworkingdocument.docx.html#h.wlbft0x3lt51>
- Grindex. (2014). *Manual de bombas*.

- Herrera, J. (2017). *Cuantificación de caudales que ingresan en los niveles 1 y 4 de la mina Colombia, MINERVEN, El Callao, Estado Bolívar*. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- KSB MEGANORM. (s.f.). *Manual de curvas características N° A274/40V/42/44.1P/E/S/2.KSB*.
- Ley de Aguas. Gaceta Oficial de la República de Venezuela N°38.595 (Extraordinaria), enero 2, 2007.
- López, C. (2005). *Diseño de un método de explotación para la mina Colombia, CVG MINERVEN, El Callao, Estado Bolívar*. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- Norma COVENIN 2709:1991 "Procedimientos para el muestreo de aguas y determinación de metales"
- Owen, R., Mirghani, M., Diene, M., Tuinhof, A., & Taylor, P. (2010). *Gestión de aguas subterráneas en la GIRH. Manual de capacitación*. Cap-Net.
- Pearce, S. (2018). *Land Data Assimilation Systems, NASA*. Recuperado el 29 de Junio de 2018, de <https://ldas.gsfc.nasa.gov/gldas/GLDASgoals.php>
- Perdmang. (1997). *Tabla de pérdidas de carga en mangueras*.
- Pietersz C., F. (2001). *Pérdidas por fricción en tuberías debido a la resistencia del flujo de líquidos*. Escuela de Ingeniería Mecánica, Caracas.
- Piña, A. (2018). *Research Gate*. Recuperado el 30 de Octubre de 2018, de Presentación: La dimension ambiental en el aprovechamiento minero 2018: <https://www.researchgate.net/project/Challenges-of-the-XXI-Century-Mining-Engineering-Retos-y-desafios-de-la-Ingenieria-de-Minas-Siglo-XXI/update/5bd3700a3843b0067540d33c>
- Precipitation Measurement Missions, NASA*. (2018). Recuperado el 22 de Julio de 2018, de <https://pmm.nasa.gov/trmm>
- Real Rangel, R. A. (2016). *Monitoreo de sequías en México a través de índices multivariados*. Distrito Federal.
- Reglamento de la Ley de Aguas. Gaceta Oficial de la República de Venezuela N°41.377, abril 13, 2018.
- Reglamento General de la Ley de Minas. Gaceta Oficial de la República de Venezuela N°37.155 (Extraordinario), marzo 9, 2001.
- Ruiz, J. (2001). *Hidrología evolución y visión sistémica*. Barinas: UNELLEZ.
- Salcedo, L. (2016). *Análisis estacional de las principales unidades hidrográficas de Sudamérica basado en datos satelitales (GPS, TRMM, GLDAS)*. Universidad de Concepción, Los Angeles.

- SIGA Geoportail. (2017). Recuperado el 15 de Julio de 2017, de http://siga.geoportalsb.gob.ve/rios_embalses/.
- Slideshare. (2017). Recuperado el 7 de Octubre de 2017, de Drenaje de mina. [<https://es.slideshare.net/ProfesorUPV/drenaje-de-mina-subterranea>]
- Suarez, L. (1993). *Presas de correccion de torrentes y retención de sedimentos*. Caracas: MARN.
- Thorntwaite, C. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review.*, 55-94.
- Thorntwaite, C., & Mather, J. (1955). The Water Balance. *Climatology*, 1-104.
- Thorntwaite, C., & Mather, J. (1957). Instructions and Tables for Computing Potencial Evapotranspiration and the Water Balance. *Climatology*, 181-311.
- Van Zanten, J. (2004). *Diseño de manejo de aguas de mina, en el PIT baqueta de la Mina Paso Diablo, Estado Zulia, como aporte al desarrollo sustentable de la región*. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- Xylem. (2012). *Manual de bombas de drenaje*.
- Çengel, Y., & Cimbala , J. (2012). *Mecánica de fluidos. Fundamento y aplicaciones* (Segunda ed.). Ciudad de México: McGRAW-HILL.

ANEXOS I

REGRESIONES PARA EL CÁLCULO DE LOS PARAMETROS MATEMATICOS DE LAS CURVAS INTENSIDAD-DURACIÓN-PERÍODO DE RETORNO

Tabla I.1. Período de retorno para T = 2 años.

<i>Periodo de retorno para T = 2 años</i>								
Nº	x	y	ln x	ln y	ln x*ln y	(lnx)^2		
1	1440	3,0787	7,2724	1,1245	8,1779	52,8878		
2	1080	3,7355	6,9847	1,3179	9,2051	48,7863		
3	720	4,9260	6,5793	1,5945	10,4908	43,2865		
4	480	6,2806	6,1738	1,8375	11,3441	38,1156		
5	360	7,5121	5,8861	2,0165	11,8694	34,6462		
6	300	8,4234	5,7038	2,1310	12,1548	32,5331		
7	240	9,6056	5,4806	2,2624	12,3991	30,0374		
8	180	11,3297	5,1930	2,4274	12,6055	26,9668		
9	120	14,4085	4,7875	2,6678	12,7721	22,9201		
10	60	22,1669	4,0943	3,0986	12,6867	16,7637		
Total	4980	91,4671	58,1555	20,4781	113,7057	346,9435		
<i>Ln (d) =</i>		5,6324	<i>d =</i>		279,3414	<i>n =</i>		-0,6164

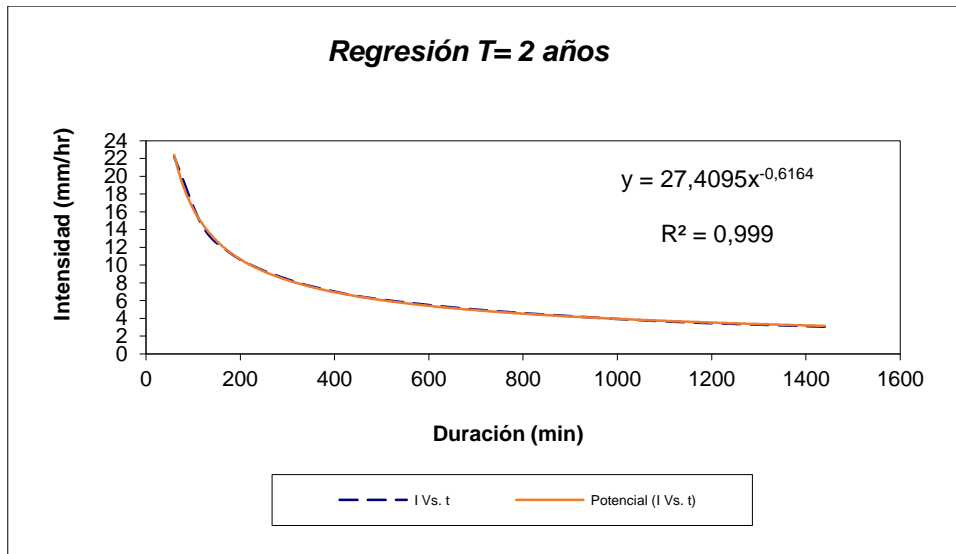


Figura I.1. Grafica de periodo de retorno para 2 años.

Tabla I.2. Período de retorno para T = 5 años.

Periodo de retorno para T = 5 años						
Nº	x	y	ln x	ln y	ln x*ln y	(lnx)^2
1	1440	4,0580	7,2724	1,4007	10,1864	52,8878
2	1080	4,9237	6,9847	1,5941	11,1341	48,7863
3	720	6,4928	6,5793	1,8707	12,3078	43,2865
4	480	8,2783	6,1738	2,1136	13,0492	38,1156
5	360	9,9015	5,8861	2,2927	13,4950	34,6462
6	300	11,1027	5,7038	2,4072	13,7301	32,5331
7	240	12,6610	5,4806	2,5385	13,9127	30,0374
8	180	14,9334	5,1930	2,7036	14,0397	26,9668
9	120	18,9915	4,7875	2,9440	14,0943	22,9201
10	60	29,2176	4,0943	3,3748	13,8175	16,7637
10	4980	120,5605	58,1555	23,2399	129,7667	346,9435
Ln (d) = 5,9086		d = 368,1931		n = -0,6164		

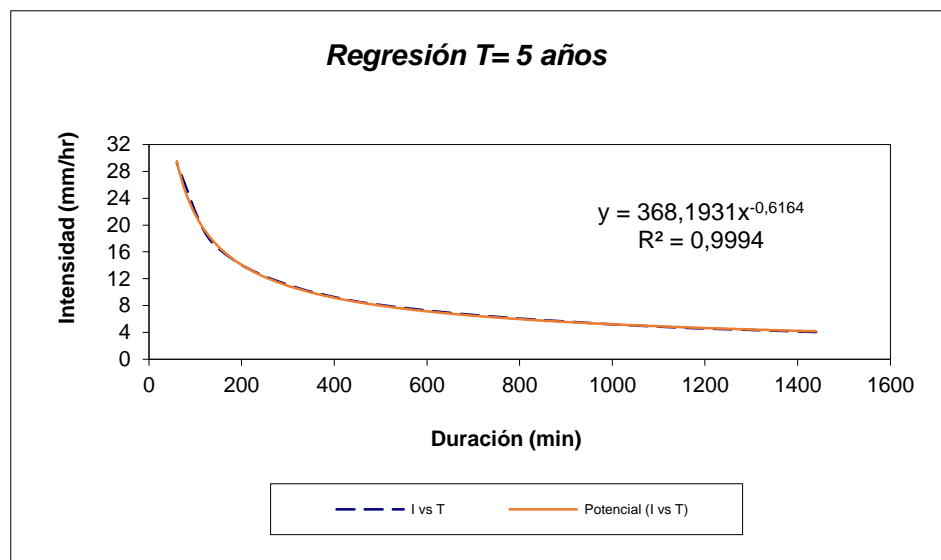


Figura I.2. Grafica de periodo de retorno para 5 años.

Tabla I.3. Período de retorno para T = 10 años.

Periodo de retorno para T = 10 años						
Nº	x	y	ln x	ln y	ln x*ln y	(lnx)^2
1	1440	4,7064	7,2724	1,5489	11,2643	52,8878
2	1080	5,7104	6,9847	1,7423	12,1694	48,7863
3	720	7,5302	6,5793	2,0189	13,2830	43,2865
4	480	9,6010	6,1738	2,2619	13,9643	38,1156
5	360	11,4835	5,8861	2,4409	14,3675	34,6462
6	300	12,8766	5,7038	2,5554	14,5755	32,5331
7	240	14,6839	5,4806	2,6867	14,7251	30,0374
8	180	17,3194	5,1930	2,8518	14,8094	26,9668
9	120	22,0258	4,7875	3,0922	14,8039	22,9201
10	60	33,8858	4,0943	3,5230	14,4244	16,7637
10	4980	139,8229	58,1555	24,7221	138,3868	346,9435
Ln (d) = 6,0568		d = 427,0207		n = -0,6164		

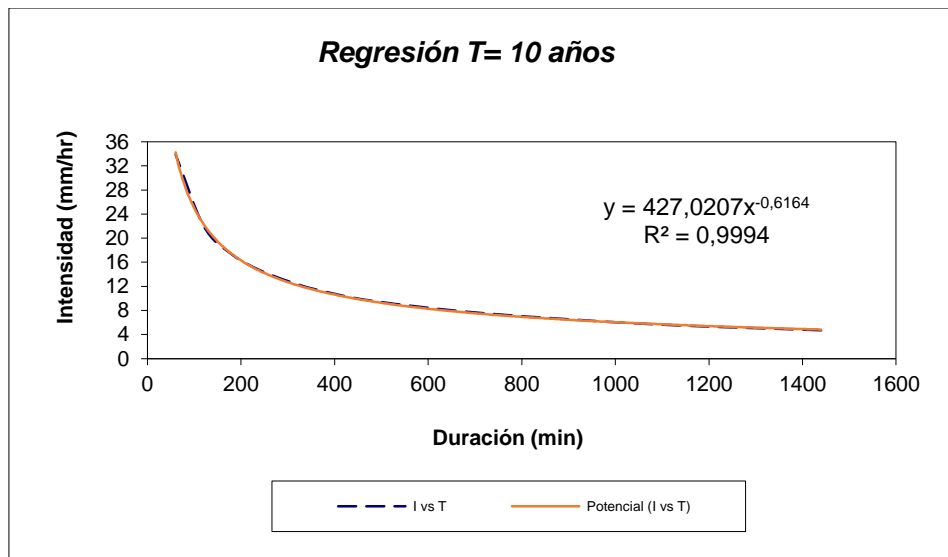


Figura I.3. Grafica de periodo de retorno para 10 años.

Tabla I.4. Período de retorno para T = 25 años.

Periodo de retorno para T = 25 años						
Nº	x	y	ln x	ln y	ln x*ln y	(lnx)^2
1	1440	5,5256	7,2724	1,7094	12,4313	52,8878
2	1080	5,8939	6,9847	1,7739	12,3904	48,7863
3	720	8,8409	6,5793	2,1794	14,3388	43,2865
4	480	11,2722	6,1738	2,4223	14,9550	38,1156
5	360	13,4824	5,8861	2,6014	15,3120	34,6462
6	300	15,1180	5,7038	2,7159	15,4908	32,5331
7	240	17,2398	5,4806	2,8472	15,6046	30,0374
8	180	20,3341	5,1930	3,0123	15,6427	26,9668
9	120	25,8597	4,7875	3,2527	15,5722	22,9201
10	60	39,7841	4,0943	3,6835	15,0814	16,7637
10	4980	163,3506	58,1555	26,1980	146,8192	346,9435
Ln (d) = 6,3047		d = 547,1231		n = -0,6336		

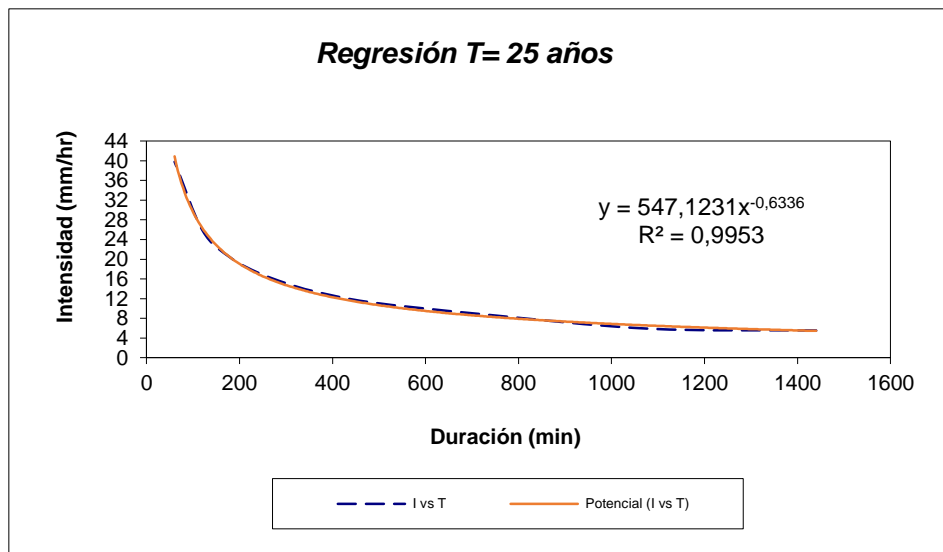


Figura I.4. Grafica de periodo de retorno para 25 años.

Tabla I.5. Período de retorno para T = 50 años.

Periodo de retorno para T = 50 años						
Nº	x	y	ln x	ln y	ln x*ln y	(lnx)^2
1	1440	6,1333	7,2724	1,8137	13,1902	52,8878
2	1080	7,4417	6,9847	2,0071	14,0191	48,7863
3	720	9,8133	6,5793	2,2837	15,0253	43,2865
4	480	12,5119	6,1738	2,5267	15,5992	38,1156
5	360	14,9653	5,8861	2,7057	15,9262	34,6462
6	300	16,7807	5,7038	2,8202	16,0860	32,5331
7	240	19,1359	5,4806	2,9516	16,1765	30,0374
8	180	22,5706	5,1930	3,1166	16,1846	26,9668
9	120	28,7039	4,7875	3,3570	16,0718	22,9201
10	60	44,1598	4,0943	3,7878	15,5086	16,7637
10	4980	182,2164	58,1555	27,3703	153,7874	346,9435
Ln (d) = 6,3217		d = 556,4908		n = -0,6164		

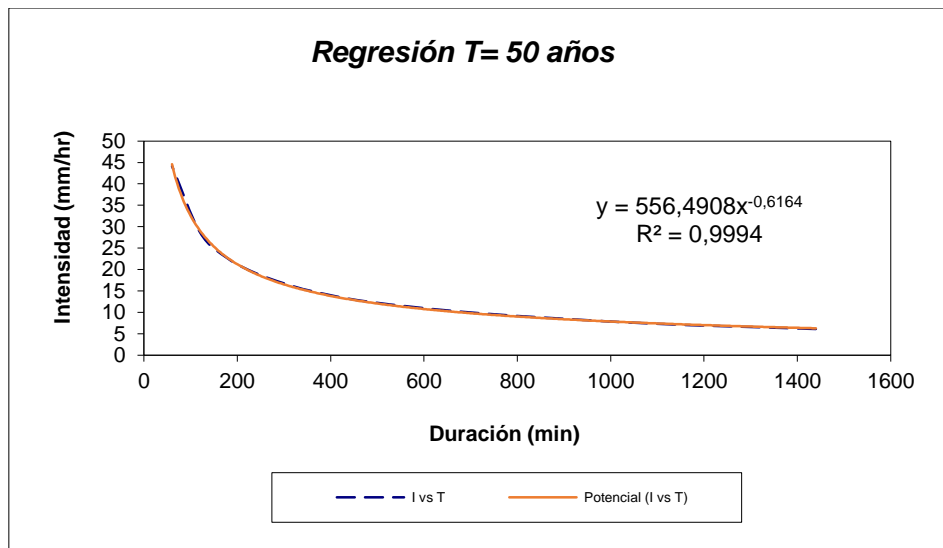


Figura I.5. Grafica de periodo de retorno para 50 años.

Tabla I.6. Período de retorno para T = 100 años.

Periodo de retorno para T = 100 años						
Nº	x	y	ln x	ln y	ln x*ln y	(lnx)^2
1	1440	6,7366	7,2724	1,9075	13,8725	52,8878
2	1080	8,1737	6,9847	2,1009	14,6743	48,7863
3	720	10,7785	6,5793	2,3776	15,6425	43,2865
4	480	13,7426	6,1738	2,6205	16,1784	38,1156
5	360	16,4372	5,8861	2,7995	16,4784	34,6462
6	300	18,4312	5,7038	2,9140	16,6211	32,5331
7	240	21,0180	5,4806	3,0454	16,6906	30,0374
8	180	24,7905	5,1930	3,2105	16,6718	26,9668
9	120	31,5271	4,7875	3,4508	16,5209	22,9201
10	60	48,5032	4,0943	3,8816	15,8927	16,7637
10	4980	200,1385	58,1555	28,3084	159,2432	346,9435
Ln (d) = 6,4155		d = 611,2250		n = -0,6164		

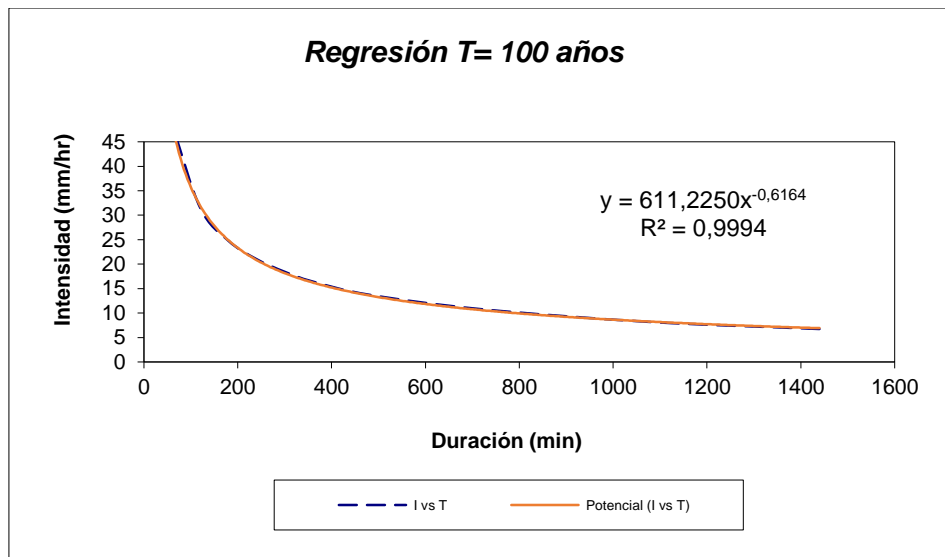


Figura I.6. Grafica de periodo de retorno para 100 años.

Tabla II.7 Resumen de aplicación de regresión potencial para distintos años.

Resumen de aplicación de regresión potencial		
Periodo de Retorno (años)	Término ctte. de regresión (d)	Coef. de regresión [n]
2	279,34141891917	-0,61638608809
5	368,19312604698	-0,61638608809
10	427,02068740775	-0,61638608809
25	547,12310960497	-0,63362500463
50	556,49080202579	-0,61638608809
100	611,22498195445	-0,61638608809
500	737,70731617082	-0,61638608809
Promedio =	503,87163458999	-0,61884879045

Tabla II.8 Regresión potencial.

Regresión potencial						
Nº	x	y	ln x	ln y	ln x*ln y	(lnx)^2
1	2	279,3414	0,6931	5,6324	3,9041	0,4805
2	5	368,1931	1,6094	5,9086	9,5095	2,5903
3	10	427,0207	2,3026	6,0568	13,9464	5,3019
4	25	547,1231	3,2189	6,3047	20,2940	10,3612
5	50	556,4908	3,9120	6,3217	24,7304	15,3039
6	100	611,2250	4,6052	6,4155	29,5443	21,2076
7	500	737,7073	6,2146	6,6035	41,0385	38,6214
Total	692	3527,1014	22,5558	43,2432	142,9672	93,8667
Ln (K) = 5,6261		K = 277,5721		m = 0,1712		

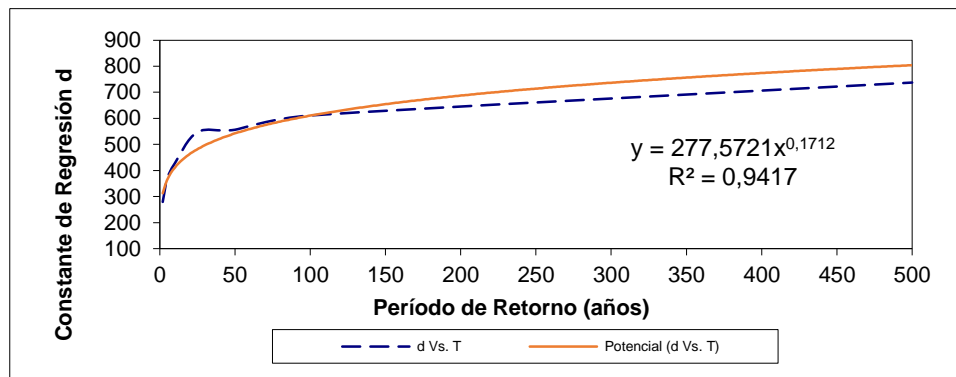


Figura I.7. Retorno potencial

ANEXOS II

HISTÓRICOS DE BALANES HÍDRICOS (METODOLOGÍA DE THORNTHWAITE Y MATTER) DE MINA COLOMBIA

1998 HASTA 2017

Tabla II.1. Balance hídrico mina Colombia 1998. Fuente: HidroBioV30.

TABLA DE BALANCE HIDRICO (Thornthwaite y Matter)											
Mina Colombia 1998 ; Alt.: 188msnm; Lat.: 7°20'4.524"Nº											
Mes	T	P	ETP	P - ETP	ST	ΔST	ETR	Dh	S	I	R
Enero	26,59	16,44	129,11	-112,68	6,00	-12,00	28,44	-100,68	0,00	0,00	0,00
Febrero	28,21	23,06	165,26	-142,20	1,00	-5,00	28,06	-137,20	0,00	0,00	0,00
Marzo	28,49	5,99	175,26	-169,28	1,00	0,00	5,99	-169,28	0,00	0,00	0,00
Abril	28,94	72,54	192,17	-119,63	1,00	0,00	72,54	-119,63	0,00	0,00	0,00
Mayo	28,07	422,37	173,65	248,72	100,00	99,00	173,65	0,00	149,72	74,86	37,43
Junio	26,69	246,93	143,37	103,56	100,00	0,00	143,37	0,00	103,56	51,78	70,50
Julio	26,70	103,36	142,08	-38,72	67,00	-33,00	136,36	-5,72	0,00	0,00	0,00
Agosto	27,27	140,54	153,12	-12,58	59,00	-8,00	148,54	-4,58	0,00	0,00	0,00
Septiembre	27,42	96,13	153,51	-57,38	33,00	-26,00	122,13	-31,38	0,00	0,00	0,00
Octubre	27,16	107,78	143,42	-35,64	23,00	-10,00	117,78	-25,64	0,00	0,00	0,00
Noviembre	25,97	98,22	117,64	-19,43	19,00	-4,00	102,22	-15,43	0,00	0,00	0,00
Diciembre	25,23	98,43	103,65	-5,21	18,00	-1,00	99,43	-4,21	0,00	0,00	0,00
TOTAL	27,23	1431,79	1792,24	-360,45	--	--	1178,50	-613,74	253,29	126,64	107,93

Tabla II.2. Balance hídrico mina Colombia 1999. Fuente: HidroBioV30.

TABLA DE BALANCE HIDRICO (Thornthwaite y Matter)											
Mina Colombia 1999 ; Alt.: 188msnm; Lat.: 7°20'4.524"N°											
Mes	T	P	ETP	P - ETP	ST	ΔST	ETR	Dh	S	I	R
Enero	25,23	195,21	106,91	88,29	100,00	56,00	106,91	0,00	32,29	16,15	16,15
Febrero	25,82	54,38	118,01	-63,62	52,00	-48,00	102,38	-15,62	0,00	0,00	0,00
Marzo	26,45	26,78	131,93	-105,15	18,00	-34,00	60,78	-71,15	0,00	0,00	0,00
Abril	26,93	278,81	145,35	133,45	100,00	82,00	145,35	0,00	51,45	25,73	12,86
Mayo	27,53	83,76	161,19	-77,43	45,00	-55,00	138,76	-22,43	0,00	0,00	0,00
Junio	26,57	261,37	142,22	119,15	100,00	55,00	142,22	0,00	64,15	32,08	32,08
Julio	26,67	225,29	142,94	82,35	100,00	0,00	142,94	0,00	82,35	41,18	57,21
Agosto	26,53	436,75	138,68	298,07	100,00	0,00	138,68	0,00	298,07	149,04	177,64
Septiembre	27,89	188,25	164,56	23,69	100,00	0,00	164,56	0,00	23,69	11,85	100,67
Octubre	26,95	149,10	140,07	9,02	100,00	0,00	140,07	0,00	9,02	4,51	54,84
Noviembre	27,39	67,39	145,93	-78,53	44,00	-56,00	123,39	-22,53	0,00	0,00	0,00
Diciembre	26,54	128,11	128,27	-0,16	44,00	0,00	128,11	-0,16	0,00	0,00	0,00
TOTAL	26,71	2095,20	1666,06	429,14	--	--	1534,17	-131,89	561,03	280,54	451,45

Tabla II.3. Balance hídrico mina Colombia 2000. Fuente: HidroBioV30.

TABLA DE BALANCE HIDRICO (Thornthwaite y Matter)											
Mina Colombia 2000 ; Alt.: 188msnm; Lat.: 7°20'4.524"N°											
Mes	T	P	ETP	P - ETP	ST	ΔST	ETR	Dh	S	I	R
Enero	22,72	143,16	82,73	60,43	100,00	25,53	82,73	0,00	34,90	17,50	17,50
Febrero	23,34	80,78	90,67	-9,89	90,00	-10,00	90,67	0,00	0,00	0,00	0,00
Marzo	24,14	136,62	102,50	34,12	100,00	10,00	102,50	0,00	24,12	12,06	6,03
Abril	23,84	107,68	101,60	6,08	100,00	0,00	101,60	0,00	6,08	3,04	6,06
Mayo	24,40	144,13	111,04	33,09	100,00	0,00	111,04	0,00	33,09	16,55	19,57
Junio	24,08	250,11	107,82	142,29	100,00	0,00	107,82	0,00	142,29	71,15	80,93
Julio	24,38	161,30	110,81	50,48	100,00	0,00	110,81	0,00	50,48	25,24	65,71
Agosto	25,05	186,51	119,08	67,43	100,00	0,00	119,08	0,00	67,43	33,715	66,57
Septiembre	25,50	102,51	123,31	-20,80	81,00	-19,00	121,51	-1,80	0,00	0,00	0,00
Octubre	25,43	88,56	118,69	-30,13	59,00	-22,00	110,56	-8,13	0,00	0,00	0,00
Noviembre	24,29	91,69	101,23	-9,54	54,00	-5,00	96,69	-4,54	0,00	0,00	0,00
Diciembre	23,05	105,97	85,50	20,47	74,47	20,47	85,50	0,00	0,00	0,00	0,00
TOTAL	24,18	1599,03	1254,98	344,04	--	--	1240,51	-14,47	358,41	179,20	262,31

Tabla II.4. Balance hídrico mina Colombia 2001. Fuente: HidroBioV30.

TABLA DE BALANCE HIDRICO (Thornthwaite y Matter)											
Mina Colombia 2001 ; Alt.: 188msnm; Lat.: 7°20'4.524"N°											
Mes	T	P	ETP	P - ETP	ST	ΔST	ETR	Dh	S	I	R
Enero	23,73	24,43	93,69	-69,25	17,00	-17,77	42,20	-51,48	0,00	0,00	0,00
Febrero	23,09	12,59	87,03	-74,45	8,00	-9,00	21,59	-65,45	0,00	0,00	0,00
Marzo	25,11	44,49	115,00	-70,51	4,00	-4,00	48,49	-66,51	0,00	0,00	0,00
Abril	24,98	80,61	116,55	-35,94	3,00	-1,00	81,61	-34,94	0,00	0,00	0,00
Mayo	24,55	121,26	112,71	8,55	11,55	8,55	112,71	0,00	0,00	0,00	0,00
Junio	24,11	147,84	107,53	40,31	51,86	40,31	107,53	0,00	0,00	0,00	0,00
Julio	24,39	223,15	110,40	112,75	100,00	48,14	110,40	0,00	64,61	32,31	32,31
Agosto	24,90	108,46	116,48	-8,02	92,00	-8,00	116,46	-0,02	0,00	0,00	0,00
Septiembre	24,50	74,35	108,79	-34,44	65,00	-27,00	101,35	-7,44	0,00	0,00	0,00
Octubre	24,92	64,24	111,14	-46,90	40,00	-25,00	89,24	-21,90	0,00	0,00	0,00
Noviembre	24,26	73,10	100,29	-27,19	30,00	-10,00	83,10	-17,19	0,00	0,00	0,00
Diciembre	24,19	103,23	98,46	4,77	34,77	4,77	98,46	0,00	0,00	0,00	0,00
TOTAL	24,39	1077,76	1278,08	-200,32	--	--	1013,15	-264,93	64,61	32,31	32,31

Tabla II.5. Balance hídrico mina Colombia 2002. Fuente: HidroBioV30.

TABLA DE BALANCE HIDRICO (Thornthwaite y Matter)											
Mina Colombia 2002 ; Alt.: 188msnm; Lat.: 7°20'4.524"N°											
Mes	T	P	ETP	P - ETP	ST	ΔST	ETR	Dh	S	I	R
Enero	23,19	82,27	88,91	-6,64	49,00	-4,08	86,35	-2,55	0,00	0,00	0,00
Febrero	23,45	44,65	92,82	-48,18	30,00	-19,00	63,65	-29,18	0,00	0,00	0,00
Marzo	23,77	71,16	98,51	-27,35	23,00	-7,00	78,16	-20,35	0,00	0,00	0,00
Abril	24,14	66,13	106,28	-40,15	15,00	-8,00	74,13	-32,15	0,00	0,00	0,00
Mayo	23,64	222,46	101,75	120,72	100,00	85,00	101,75	0,00	35,72	17,86	8,93
Junio	23,62	227,33	102,54	124,79	100,00	0,00	102,54	0,00	124,79	62,40	66,86
Julio	24,13	167,13	108,11	59,02	100,00	0,00	108,11	0,00	59,02	29,51	62,94
Agosto	24,55	113,26	112,77	0,49	100,00	0,00	112,77	0,00	0,49	0,25	31,72
Septiembre	25,33	74,57	121,29	-46,72	62,00	-38,00	112,57	-8,72	0,00	0,00	0,00
Octubre	24,73	30,30	109,61	-79,30	27,00	-35,00	65,30	-44,30	0,00	0,00	0,00
Noviembre	23,67	119,79	94,43	25,36	52,36	25,36	94,43	0,00	0,00	0,00	0,00
Diciembre	22,88	85,27	84,55	0,72	53,08	0,72	84,55	0,00	0,00	0,00	0,00
TOTAL	23,93	1304,33	1221,56	82,76	--	--	1084,31	-137,26	220,02	110,01	170,45

Tabla II.6. Balance hídrico mina Colombia 2003. Fuente: HidroBioV30.

TABLA DE BALANCE HIDRICO (Thornthwaite y Matter)											
Mina Colombia 2003 ; Alt.: 188msnm; Lat.: 7°20'4.524"N°											
Mes	T	P	ETP	P - ETP	ST	ΔST	ETR	Dh	S	I	R
Enero	23,74	13,54	94,37	-80,83	21,00	-27,00	40,54	-53,83	0,00	0,00	0,00
Febrero	23,70	12,12	94,92	-82,80	9,00	-12,00	24,12	-70,80	0,00	0,00	0,00
Marzo	24,88	7,59	112,15	-104,57	3,00	-6,00	13,59	-98,57	0,00	0,00	0,00
Abril	24,88	30,87	115,52	-84,65	1,00	-2,00	32,87	-82,65	0,00	0,00	0,00
Mayo	23,34	140,38	97,07	43,31	44,31	43,31	97,07	0,00	0,00	0,00	0,00
Junio	23,76	162,60	103,43	59,16	100,00	55,69	103,43	0,00	3,47	1,74	1,74
Julio	23,93	199,75	104,65	95,09	100,00	0,00	104,65	0,00	95,09	47,55	48,41
Agosto	24,52	109,93	111,62	-1,68	98,00	-2,00	111,62	0,00	0,00	0,00	0,00
Septiembre	24,99	65,85	115,96	-50,11	59,00	-39,00	104,85	-11,11	0,00	0,00	0,00
Octubre	25,01	118,15	112,80	5,35	64,35	5,35	112,80	0,00	0,00	0,00	0,00
Noviembre	24,32	77,28	101,55	-24,27	50,00	-14,35	91,63	-9,92	0,00	0,00	0,00
Diciembre	23,57	87,96	91,43	-3,47	48,00	-2,00	89,96	-1,47	0,00	0,00	0,00
TOTAL	24,22	1026,01	1255,49	-229,48	--	--	927,13	-328,36	98,56	49,28	50,15

Tabla II.7. Balance hídrico mina Colombia 2004. Fuente: HidroBioV30.

TABLA DE BALANCE HIDRICO (Thornthwaite y Matter)											
Mina Colombia 2004 ; Alt.: 188msnm; Lat.: 7°20'4.524"N°											
Mes	T	P	ETP	P - ETP	ST	ΔST	ETR	Dh	S	I	R
Enero	22,96	55,00	85,31	-30,31	14,00	-5,00	60,00	-25,31	0,00	0,00	0,00
Febrero	24,55	6,52	105,48	-98,96	5,00	-9,00	15,52	-89,96	0,00	0,00	0,00
Marzo	24,71	29,19	109,83	-80,65	2,00	-3,00	32,19	-77,65	0,00	0,00	0,00
Abril	24,54	58,82	110,79	-51,97	1,00	-1,00	59,82	-50,97	0,00	0,00	0,00
Mayo	23,55	338,96	99,70	239,26	100,00	99,00	99,70	0,00	140,26	70,13	35,07
Junio	23,55	127,26	100,57	26,68	100,00	0,00	100,57	0,00	26,68	13,34	30,87
Julio	23,75	106,99	102,28	4,71	100,00	0,00	102,28	0,00	4,71	2,36	17,79
Agosto	24,49	164,66	111,18	53,49	100,00	0,00	111,18	0,00	53,49	26,75	35,64
Septiembre	25,07	258,11	117,01	141,10	100,00	0,00	117,01	0,00	141,10	70,55	88,37
Octubre	25,20	30,81	115,34	-84,53	42,00	-58,00	88,81	-26,53	0,00	0,00	0,00
Noviembre	24,79	75,96	107,61	-31,64	30,00	-12,00	87,96	-19,64	0,00	0,00	0,00
Diciembre	23,58	43,76	91,48	-47,72	19,00	-11,00	54,76	-36,72	0,00	0,00	0,00
TOTAL	24,23	1296,03	1256,58	39,44	--	--	929,79	-326,79	366,23	183,12	207,74

Tabla II.8. Balance hídrico mina Colombia 2005. Fuente: HidroBioV30.

TABLA DE BALANCE HIDRICO (Thornthwaite y Matter)											
Mina Colombia 2005 ; Alt.: 188msnm; Lat.: 7°20'4.524"N°											
Mes	T	P	ETP	P - ETP	ST	ΔST	ETR	Dh	S	I	R
Enero	22,92	144,38	83,92	60,46	100,00	41,00	83,92	0,00	19,46	9,73	9,73
Febrero	23,73	21,99	94,38	-72,39	48,00	-52,00	73,99	-20,39	0,00	0,00	0,00
Marzo	25,25	25,04	116,74	-91,70	19,00	-29,00	54,04	-62,70	0,00	0,00	0,00
Abril	24,30	172,09	106,77	65,33	84,33	65,33	106,77	0,00	0,00	0,00	0,00
Mayo	25,20	98,90	121,90	-23,00	66,00	-18,33	117,22	-4,68	0,00	0,00	0,00
Junio	24,93	142,07	118,92	23,15	89,15	23,15	118,92	0,00	0,00	0,00	0,00
Julio	24,08	315,74	105,86	209,88	100,00	10,85	105,86	0,00	199,03	99,52	99,52
Agosto	24,71	112,85	113,59	-0,74	99,00	-1,00	113,59	0,00	0,00	0,00	0,00
Septiembre	25,54	116,93	123,44	-6,51	93,00	-6,00	122,93	-0,51	0,00	0,00	0,00
Octubre	25,48	112,00	118,92	-6,92	87,00	-6,00	118,00	-0,92	0,00	0,00	0,00
Noviembre	24,36	90,58	101,33	-10,75	77,00	-10,00	100,58	-0,75	0,00	0,00	0,00
Diciembre	23,39	61,64	88,44	-26,79	59,00	-18,00	79,64	-8,79	0,00	0,00	0,00
TOTAL	24,49	1414,22	1294,20	120,02	--	--	1195,46	-98,74	218,50	109,25	109,25

Tabla II.9. Balance hídrico mina Colombia 2006. Fuente: HidroBioV30.

TABLA DE BALANCE HIDRICO (Thornthwaite y Matter)											
Mina Colombia 2006 ; Alt.: 188msnm; Lat.: 7°20'4.524"N°											
Mes	T	P	ETP	P - ETP	ST	ΔST	ETR	Dh	S	I	R
Enero	22,80	127,00	83,57	43,43	100,00	42,00	83,57	0,00	1,43	0,72	0,72
Febrero	22,97	65,99	86,37	-20,38	81,00	-19,00	84,99	-1,38	0,00	0,00	0,00
Marzo	23,80	35,54	98,02	-62,48	43,00	-38,00	73,54	-24,48	0,00	0,00	0,00
Abril	26,12	10,01	133,82	-123,81	12,00	-31,00	41,01	-92,81	0,00	0,00	0,00
Mayo	24,61	160,10	113,96	46,14	58,14	46,14	113,96	0,00	0,00	0,00	0,00
Junio	23,91	193,57	105,43	88,15	100,00	41,86	105,43	0,00	46,29	23,15	23,15
Julio	23,98	268,77	105,35	163,42	100,00	0,00	105,35	0,00	163,42	81,71	93,28
Agosto	24,68	90,55	113,88	-23,32	79,00	-21,00	111,55	-2,32	0,00	0,00	0,00
Septiembre	24,92	125,15	114,97	10,17	89,17	10,17	114,97	0,00	0,00	0,00	0,00
Octubre	25,00	107,80	112,61	-4,82	85,00	-4,17	111,97	-0,64	0,00	0,00	0,00
Noviembre	24,38	79,25	102,31	-23,07	67,00	-18,00	97,25	-5,07	0,00	0,00	0,00
Diciembre	23,33	74,02	88,61	-14,59	58,00	-9,00	83,02	-5,59	0,00	0,00	0,00
TOTAL	24,21	1337,76	1258,91	78,85	--	--	1126,62	-132,29	211,14	105,57	117,14

Tabla II.10. Balance hídrico mina Colombia 2007. Fuente: HidroBioV30.

TABLA DE BALANCE HIDRICO (Thornthwaite y Matter)											
Mina Colombia 2007 ; Alt.: 188msnm; Lat.: 7°20'4.524"N°											
Mes	T	P	ETP	P - ETP	ST	ΔST	ETR	Dh	S	I	R
Enero	23,11	75,64	87,03	-11,38	89,00	-11,00	86,64	-0,38	0,00	0,00	0,00
Febrero	23,72	90,73	95,18	-4,45	85,00	-4,00	94,73	-0,45	0,00	0,00	0,00
Marzo	24,14	67,71	102,38	-34,66	60,00	-25,00	92,71	-9,66	0,00	0,00	0,00
Abril	25,48	61,25	124,14	-62,90	31,00	-29,00	90,25	-33,90	0,00	0,00	0,00
Mayo	25,09	147,61	120,82	26,80	57,80	26,80	120,82	0,00	0,00	0,00	0,00
Junio	23,93	215,41	105,75	109,66	100,00	42,20	105,75	0,00	67,46	33,73	33,73
Julio	23,89	194,71	104,26	90,45	100,00	0,00	104,26	0,00	90,45	45,23	62,09
Agosto	24,37	368,12	109,56	258,56	100,00	0,00	109,56	0,00	258,56	129,28	160,33
Septiembre	24,87	108,61	114,32	-5,71	94,00	-6,00	114,32	0,00	0,00	0,00	0,00
Octubre	24,82	114,35	110,33	4,02	98,02	4,02	110,33	0,00	0,00	19,61	19,61
Noviembre	23,89	137,50	96,30	41,20	100,00	1,98	96,30	0,00	39,22	30,25	40,06
Diciembre	23,04	145,88	85,38	60,50	100,00	0,00	85,38	0,00	60,50	0,00	0,00
TOTAL	24,20	1727,52	1255,44	472,08	--	--	1211,05	-44,39	516,18	258,10	315,81

Tabla II.11. Balance hídrico mina Colombia 2008. Fuente: HidroBioV30.

TABLA DE BALANCE HIDRICO (Thornthwaite y Matter)											
Mina Colombia 2008 ; Alt.: 188msnm; Lat.: 7°20'4.524"N°											
Mes	T	P	ETP	P - ETP	ST	ΔST	ETR	Dh	S	I	R
Enero	22,70	57,77	83,32	-25,55	77,00	-23,00	80,77	-2,55	0,00	0,00	0,00
Febrero	22,38	86,75	80,74	6,01	83,01	6,01	80,74	0,00	0,00	0,00	0,00
Marzo	23,81	82,28	98,96	-16,69	70,00	-13,01	95,29	-3,67	0,00	0,00	0,00
Abril	24,01	132,88	104,39	28,48	98,48	28,48	104,39	0,00	0,00	0,00	0,00
Mayo	24,12	49,85	107,89	-58,04	54,00	-44,48	94,33	-13,55	0,00	0,00	0,00
Junio	24,00	201,91	107,31	94,60	100,00	46,00	107,31	0,00	48,60	24,30	24,30
Julio	23,90	138,59	104,97	33,62	100,00	0,00	104,97	0,00	33,62	16,81	28,96
Agosto	24,42	240,12	110,92	129,20	100,00	0,00	110,92	0,00	129,20	64,60	79,08
Septiembre	25,48	127,64	123,33	4,31	100,00	0,00	123,33	0,00	4,31	2,16	41,70
Octubre	25,04	153,09	113,66	39,43	100,00	0,00	113,66	0,00	39,43	19,72	40,56
Noviembre	24,53	128,28	104,83	23,45	100,00	0,00	104,83	0,00	23,45	11,725	32,01
Diciembre	23,14	190,07	87,31	102,76	100,00	0,00	87,31	0,00	102,76	51,38	67,38
TOTAL	23,96	1589,22	1227,63	361,59	--	--	1207,85	-19,78	381,37	190,69	313,99

Tabla II.12. Balance hídrico mina Colombia 2009. Fuente: HidroBioV30.

TABLA DE BALANCE HIDRICO (Thornthwaite y Matter)											
Mina Colombia 2009 ; Alt.: 188msnm; Lat.: 7°20'4.524"N°											
Mes	T	P	ETP	P - ETP	ST	ΔST	ETR	Dh	S	I	R
Enero	23,03	97,46	85,33	12,13	85,00	12,13	85,33	0,00	0,00	0,00	0,00
Febrero	23,46	82,48	91,25	-8,77	77,00	-8,00	90,48	-0,78	0,00	0,00	0,00
Marzo	23,70	12,25	96,06	-83,82	33,00	-44,00	56,25	-39,82	0,00	0,00	0,00
Abril	24,66	50,10	111,94	-61,84	18,00	-15,00	65,10	-46,84	0,00	0,00	0,00
Mayo	25,59	18,11	127,95	-109,84	6,00	-12,00	30,11	-97,84	0,00	0,00	0,00
Junio	24,32	134,35	110,27	24,08	30,08	24,08	110,27	0,00	0,00	0,00	0,00
Julio	24,30	152,23	109,00	43,24	73,32	43,24	109,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Agosto	25,27	107,88	121,87	-14,00	63,00	-10,32	118,20	-3,67	0,00	0,00	0,00
Septiembre	25,98	132,52	130,11	2,41	65,41	2,41	130,11	0,00	0,00	0,00	0,00
Octubre	25,04	133,55	112,74	20,82	86,23	20,82	112,74	0,00	0,00	0,00	0,00
Noviembre	24,46	35,67	102,78	-67,11	43,00	-43,23	78,90	-23,87	0,00	0,00	0,00
Diciembre	23,57	120,58	90,72	29,87	72,87	29,87	90,72	0,00	0,00	0,00	0,00
TOTAL	24,45	1077,20	1290,01	-212,81	--	--	1077,20	-212,81	0,00	0,00	0,00

Tabla II.13. Balance hídrico mina Colombia 2010. Fuente: HidroBioV30.

TABLA DE BALANCE HIDRICO (Thornthwaite y Matter)											
Mina Colombia 2010 ; Alt.: 188msnm; Lat.: 7°20'4.524"N°											
Mes	T	P	ETP	P - ETP	ST	ΔST	ETR	Dh	S	I	R
Enero	23,72	29,86	90,56	-60,70	32,00	-27,00	56,86	-33,70	0,00	0,00	0,00
Febrero	25,39	8,79	114,73	-105,94	11,00	-21,00	29,79	-84,94	0,00	0,00	0,00
Marzo	26,44	22,91	134,00	-111,10	4,00	-7,00	29,91	-104,10	0,00	0,00	0,00
Abril	26,00	124,70	130,60	-5,90	3,00	-1,00	125,70	-4,90	0,00	0,00	0,00
Mayo	25,42	171,06	123,41	47,65	50,65	47,65	123,41	0,00	0,00	0,00	0,00
Junio	24,84	172,51	115,36	57,14	100,00	49,35	115,36	0,00	7,79	3,90	3,90
Julio	24,65	202,47	111,44	91,03	100,00	0,00	111,44	0,00	91,03	45,52	47,46
Agosto	25,44	300,15	122,61	177,54	100,00	0,00	122,61	0,00	177,54	88,77	112,50
Septiembre	26,06	153,34	130,37	22,96	100,00	0,00	130,37	0,00	22,96	11,48	67,73
Octubre	25,75	84,72	121,50	-36,78	68,00	-32,00	116,72	-4,78	0,00	0,00	0,00
Noviembre	25,26	116,10	111,70	4,41	72,41	4,41	111,70	0,00	0,00	0,00	0,00
Diciembre	24,59	81,91	101,13	-19,23	59,00	-13,41	95,31	-5,82	0,00	0,00	0,00
TOTAL	25,30	1468,50	1407,42	61,08	--	--	1169,18	-238,24	299,32	149,66	231,59

Tabla II.14. Balance hídrico mina Colombia 2011. Fuente: HidroBioV30.

TABLA DE BALANCE HIDRICO (Thorntwaite y Matter)											
Mina Colombia 2011 ; Alt.: 188msnm; Lat.: 7°20'4.524"N°											
Mes	T	P	ETP	P - ETP	ST	ΔST	ETR	Dh	S	I	R
Enero	24,02	108,19	94,89	13,30	100,00	12,00	94,89	0,00	1,30	0,65	0,65
Febrero	24,01	68,84	95,80	-26,96	76,00	-24,00	92,84	-2,96	0,00	0,00	0,00
Marzo	24,18	73,88	100,02	-26,14	58,00	-18,00	91,88	-8,14	0,00	0,00	0,00
Abril	25,91	46,20	129,40	-83,21	25,00	-33,00	79,20	-50,21	0,00	0,00	0,00
Mayo	26,13	121,14	135,62	-14,48	21,00	-4,00	125,14	-10,48	0,00	0,00	0,00
Junio	25,46	115,59	125,62	-10,04	19,00	-2,00	117,59	-8,04	0,00	0,00	0,00
Julio	25,19	112,70	120,10	-7,39	18,00	-1,00	113,70	-6,39	0,00	0,00	0,00
Agosto	25,84	153,00	129,41	23,59	41,59	23,59	129,41	0,00	0,00	0,00	0,00
Septiembre	26,15	159,58	132,06	27,52	69,11	27,52	132,06	0,00	0,00	0,00	0,00
Octubre	25,25	201,41	114,18	87,23	100,00	30,89	114,18	0,00	56,34	28,17	28,17
Noviembre	25,22	209,72	111,43	98,29	100,00	0,00	111,43	0,00	98,29	49,15	63,23
Diciembre	24,61	88,59	101,69	-13,10	88,00	-12,00	100,59	-1,10	0,00	0,00	0,00
TOTAL	25,17	1458,84	1390,23	68,61	--	--	1302,90	-87,33	155,94	77,97	92,05

Tabla II.15. Balance hídrico mina Colombia 2012. Fuente: HidroBioV30.

TABLA DE BALANCE HIDRICO (Thorntwaite y Matter)											
Mina Colombia 2012 ; Alt.: 188msnm; Lat.: 7°20'4.524"N°											
Mes	T	P	ETP	P - ETP	ST	ΔST	ETR	Dh	S	I	R
Enero	23,44	102,03	87,65	14,38	30,38	14,38	87,65	0,00	0,00	0,00	0,00
Febrero	23,99	55,32	95,54	-40,23	20,00	-10,38	65,70	-29,85	0,00	0,00	0,00
Marzo	24,77	117,17	108,26	8,91	28,91	8,91	108,26	0,00	0,00	0,00	0,00
Abril	26,00	54,98	130,90	-75,92	13,00	-15,91	70,88	-60,01	0,00	0,00	0,00
Mayo	25,51	234,94	125,28	109,66	100,00	87,00	125,28	0,00	22,66	11,33	11,33
Junio	25,15	75,21	120,75	-45,54	62,00	-38,00	113,21	-7,54	0,00	0,00	0,00
Julio	25,12	145,49	119,09	26,41	88,41	26,41	119,09	0,00	0,00	0,00	0,00
Agosto	25,38	136,60	122,06	14,54	100,00	11,59	122,06	0,00	2,95	1,48	1,48
Septiembre	26,06	92,66	130,48	-37,82	68,00	-32,00	124,66	-5,82	0,00	0,00	0,00
Octubre	26,34	79,04	131,25	-52,21	40,00	-28,00	107,04	-24,21	0,00	0,00	0,00
Noviembre	25,64	36,04	117,66	-81,62	17,00	-23,00	59,04	-58,62	0,00	0,00	0,00
Diciembre	24,43	93,68	99,30	-5,62	16,00	-1,00	94,68	-4,62	0,00	0,00	0,00
TOTAL	25,15	1223,15	1388,22	-165,06	--	--	1197,54	-190,67	25,61	12,81	12,81

Tabla II.16. Balance hídrico mina Colombia 2013. Fuente: HidroBioV30.

TABLA DE BALANCE HIDRICO (Thornthwaite y Matter)											
Mina Colombia 2013 ; Alt.: 188msnm; Lat.: 7°20'4.524"N°											
Mes	T	P	ETP	P - ETP	ST	ΔST	ETR	Dh	S	I	R
Enero	24,23	72,88	97,57	-24,69	61,00	-17,64	90,52	-7,05	0,00	0,00	0,00
Febrero	24,13	20,87	97,19	-76,32	28,00	-33,00	53,87	-43,32	0,00	0,00	0,00
Marzo	25,70	26,05	122,19	-96,14	10,00	-18,00	44,05	-78,14	0,00	0,00	0,00
Abril	25,80	252,58	127,54	125,05	100,00	90,00	127,54	0,00	35,05	17,53	17,53
Mayo	25,78	183,90	129,56	54,34	100,00	0,00	129,56	0,00	54,34	27,17	35,93
Junio	25,26	199,50	122,41	77,10	100,00	0,00	122,41	0,00	77,10	38,55	56,52
Julio	24,88	134,53	115,34	19,18	100,00	0,00	115,34	0,00	19,18	9,59	37,85
Agosto	25,35	147,25	121,44	25,81	100,00	0,00	121,44	0,00	25,81	12,91	31,83
Septiembre	26,29	72,50	134,34	-61,84	53,00	-47,00	119,50	-14,84	0,00	0,00	0,00
Octubre	25,89	70,64	124,01	-53,37	31,00	-22,00	92,64	-31,37	0,00	0,00	0,00
Noviembre	24,90	104,80	106,83	-2,03	30,00	-1,00	105,80	-1,03	0,00	0,00	0,00
Diciembre	24,08	143,20	94,55	48,64	78,64	48,64	94,55	0,00	0,00	0,00	0,00
TOTAL	25,19	1428,70	1392,96	35,75	--	--	1217,22	-175,73	211,48	105,74	179,65

Tabla II.17. Balance hídrico mina Colombia 2014. Fuente: HidroBioV30.

TABLA DE BALANCE HIDRICO (Thornthwaite y Matter)											
Mina Colombia 2014 ; Alt.: 188msnm; Lat.: 7°20'4.524"N°											
Mes	T	P	ETP	P - ETP	ST	ΔST	ETR	Dh	S	I	R
Enero	23,71	26,87	91,00	-64,13	23,00	-21,00	47,87	-43,13	0,00	0,00	0,00
Febrero	24,13	17,31	97,43	-80,12	10,00	-13,00	30,31	-67,12	0,00	0,00	0,00
Marzo	25,18	1,42	114,36	-112,95	3,00	-7,00	8,42	-105,95	0,00	0,00	0,00
Abril	25,61	31,01	124,54	-93,53	1,00	-2,00	33,01	-91,53	0,00	0,00	0,00
Mayo	25,76	124,97	129,32	-4,35	1,00	0,00	124,97	-4,35	0,00	0,00	0,00
Junio	25,24	231,04	122,08	108,96	100,00	99,00	122,08	0,00	9,96	4,98	4,98
Julio	25,08	143,24	118,53	24,71	100,00	0,00	118,53	0,00	24,71	12,36	14,85
Agosto	25,43	185,03	122,81	62,22	100,00	0,00	122,81	0,00	62,22	31,11	38,53
Septiembre	25,87	78,28	127,51	-49,23	60,00	-40,00	118,28	-9,23	0,00	0,00	0,00
Octubre	25,93	117,99	124,63	-6,64	56,00	-4,00	121,99	-2,64	0,00	0,00	0,00
Noviembre	25,06	157,52	109,14	48,38	100,00	44,00	109,14	0,00	4,38	2,19	2,19
Diciembre	24,74	23,60	103,52	-79,92	44,00	-56,00	79,60	-23,92	0,00	0,00	0,00
TOTAL	25,14	1138,27	1384,87	-246,60	--	--	1037,00	-347,87	101,27	50,64	60,55

Tabla II.18. Balance hídrico mina Colombia 2015. Fuente: HidroBioV30.

TABLA DE BALANCE HIDRICO (Thornthwaite y Matter)											
Mina Colombia 2015 ; Alt.: 188msnm; Lat.: 7°20'4.524"N°											
Mes	T	P	ETP	P - ETP	ST	ΔST	ETR	Dh	S	I	R
Enero	24,19	53,41	96,22	-42,80	5,00	-3,00	56,41	-39,80	0,00	0,00	0,00
Febrero	24,76	57,41	105,20	-47,78	3,00	-2,00	59,41	-45,78	0,00	0,00	0,00
Marzo	24,64	22,70	105,52	-82,82	1,00	-2,00	24,70	-80,82	0,00	0,00	0,00
Abril	26,05	36,53	131,12	-94,59	1,00	0,00	36,53	-94,59	0,00	0,00	0,00
Mayo	25,59	147,24	125,92	21,32	22,32	21,32	125,92	0,00	0,00	0,00	0,00
Junio	25,26	240,41	121,65	118,76	100,00	77,68	121,65	0,00	41,08	20,54	20,54
Julio	24,98	247,51	116,03	131,47	100,00	0,00	116,03	0,00	131,47	65,74	76,01
Agosto	25,75	217,03	127,43	89,60	100,00	0,00	127,43	0,00	89,60	44,80	82,80
Septiembre	26,67	74,96	140,60	-65,65	51,00	49,00	123,96	-16,65	0,00	0,00	0,00
Octubre	26,93	30,43	141,11	-110,68	16,00	35,00	65,43	-75,68	0,00	0,00	0,00
Noviembre	25,58	83,45	116,24	-32,79	12,00	-4,00	87,45	-28,79	0,00	0,00	0,00
Diciembre	24,79	61,96	103,47	-41,50	8,00	-4,00	65,96	-37,50	0,00	0,00	0,00
TOTAL	25,43	1273,04	1430,50	-157,46	--	--	1010,88	-419,62	262,16	131,08	179,35

Tabla II.19. Balance hídrico mina Colombia 2016. Fuente: HidroBioV30.

TABLA DE BALANCE HIDRICO (Thornthwaite y Matter)											
Mina Colombia 2016 ; Alt.: 188msnm; Lat.: 7°20'4.524"N°											
Mes	T	P	ETP	P - ETP	ST	ΔST	ETR	Dh	S	I	R
Enero	24,62	11,12	100,95	-89,83	12,00	-20,00	31,12	-69,83	0,00	0,00	0,00
Febrero	25,51	10,78	115,33	-104,56	4,00	-8,00	18,78	-96,56	0,00	0,00	0,00
Marzo	26,68	17,87	137,73	-119,85	1,00	-3,00	20,87	-116,85	0,00	0,00	0,00
Abril	26,53	93,97	139,16	-45,19	1,00	0,00	93,97	-45,19	0,00	0,00	0,00
Mayo	25,82	133,33	128,98	4,35	5,35	4,35	128,98	0,00	0,00	0,00	0,00
Junio	25,35	126,85	122,11	4,74	10,09	4,74	122,11	0,00	0,00	0,00	0,00
Julio	25,34	152,47	120,74	31,72	41,82	31,72	120,74	0,00	0,00	0,00	0,00
Agosto	25,69	155,93	125,58	30,34	72,16	30,34	125,58	0,00	0,00	0,00	0,00
Septiembre	26,29	135,40	133,44	1,96	74,12	1,96	133,44	0,00	0,00	0,00	0,00
Octubre	26,86	157,49	139,54	17,95	92,07	17,95	139,54	0,00	0,00	0,00	0,00
Noviembre	26,47	88,29	129,92	-41,63	60,00	-32,07	120,36	-9,56	0,00	0,00	0,00
Diciembre	24,47	35,02	97,80	-62,78	32,00	-28,00	63,02	-34,78	0,00	0,00	0,00
TOTAL	25,80	1118,53	1491,30	-372,77	--	--	1118,53	-372,77	0,00	0,00	0,00

Tabla II.20. Balance hídrico mina Colombia 2017. Fuente: HidroBioV30.

TABLA DE BALANCE HIDRICO (Thorntwaite y Matter)											
Mina Colombia 2017; Alt.: 188msnm; Lat.: 7°20'4.524"N°											
Mes	T	P	ETP	P - ETP	ST	□ST	ETR	Dh	S	I	R
Enero	24,02	70,04	92,11	-22,07	68,00	-17,80	87,84	-4,27	0,00	0,00	0,00
Febrero	24,26	13,72	96,38	-82,67	29,00	-39,00	52,72	-43,67	0,00	0,00	0,00
Marzo	25,27	27,68	113,49	-85,82	12,00	-17,00	44,68	-68,82	0,00	0,00	0,00
Abril	26,78	42,48	143,57	-101,09	4,00	-8,00	50,48	-93,09	0,00	0,00	0,00
Mayo	25,98	136,03	131,50	4,54	8,54	4,54	131,50	0,00	0,00	0,00	0,00
Junio	25,39	236,37	122,38	114,00	100,00	91,46	122,38	0,00	22,53	11,27	11,27
Julio	25,57	201,11	124,36	76,75	100,00	0,00	124,36	0,00	76,75	38,38	44,01
Agosto	27,11	168,10	151,47	16,63	100,00	0,00	151,47	0,00	16,63	8,32	30,32
Septiembre	27,56	115,27	157,30	-42,03	65,00	-35,00	150,27	-7,03	0,00	0,00	0,00
Octubre	27,32	118,99	148,09	-29,10	48,00	-17,00	135,99	-12,10	0,00	0,00	0,00
Noviembre	26,52	89,89	130,71	-40,81	32,00	-16,00	105,89	-24,81	0,00	0,00	0,00
Diciembre	25,28	162,94	109,14	53,80	85,80	53,80	109,14	0,00	0,00	0,00	0,00
TOTAL	25,92	1382,61	1520,48	-137,87	--	--	1266,69	-253,79	115,91	57,96	85,59

ANEXOS III

PÉRDIDAS DE ENERGÍA POR FRICCIÓN

Tabla III.1. Tabla de pérdidas de carga en mangueras. Fuente: Perdmang (1997)

Tabla de pérdidas de carga en mangueras

Diámetrc Caudal m3/h	en metros cada 100m				hinchazón 4 % Hazen Williams150							
	25	38	45	50	63	75	90	100	105	112	127	153
2	4,93	0,64	0,28	0,17	0,05	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
4	17,79	2,31	1,02	0,61	0,20	0,08	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,00
6	37,69	4,90	2,15	1,29	0,42	0,18	0,07	0,04	0,03	0,03	0,01	0,01
8	64,21	8,36	3,67	2,20	0,71	0,30	0,13	0,08	0,06	0,04	0,02	0,01
10	97,06	12,63	5,54	3,32	1,08	0,46	0,19	0,11	0,09	0,07	0,04	0,01
12	136,05	17,71	7,77	4,65	1,51	0,65	0,27	0,16	0,13	0,09	0,05	0,02
14		23,56	10,34	6,19	2,01	0,86	0,35	0,21	0,17	0,12	0,07	0,03
16		30,16	13,24	7,93	2,57	1,10	0,45	0,27	0,21	0,16	0,08	0,03
18		37,52	16,47	9,86	3,20	1,37	0,56	0,34	0,27	0,19	0,11	0,04
20		45,60	20,02	11,98	3,89	1,66	0,68	0,41	0,32	0,24	0,13	0,05
25		68,94	30,26	18,11	5,88	2,51	1,03	0,62	0,49	0,36	0,19	0,08
30		96,63	42,41	25,39	8,24	3,52	1,45	0,87	0,68	0,50	0,27	0,11
35			56,43	33,78	10,96	4,69	1,93	1,16	0,91	0,67	0,36	0,15
40			72,26	43,26	14,04	6,00	2,47	1,48	1,17	0,85	0,46	0,19
45			89,87	53,80	17,46	7,47	3,07	1,84	1,45	1,06	0,57	0,23
50				65,39	21,22	9,08	3,74	2,24	1,76	1,29	0,70	0,28
55				78,02	25,31	10,83	4,46	2,67	2,10	1,54	0,83	0,34
60				91,66	29,74	12,72	5,24	3,13	2,47	1,80	0,98	0,40
65					34,49	14,76	6,07	3,64	2,87	2,09	1,14	0,46
70					39,57	16,93	6,97	4,17	3,29	2,40	1,30	0,53
75					44,96	19,23	7,92	4,74	3,74	2,73	1,48	0,60
80					50,67	21,68	8,92	5,34	4,21	3,07	1,67	0,67
85					56,69	24,25	9,98	5,97	4,71	3,44	1,87	0,75
90					63,02	26,96	11,09	6,64	5,24	3,82	2,07	0,84
95					69,66	29,80	12,26	7,34	5,79	4,23	2,29	0,93
100					76,60	32,77	13,49	8,07	6,37	4,65	2,52	1,02
105					83,84	35,87	14,76	8,84	6,97	5,09	2,76	1,11
110					91,39	39,10	16,09	9,63	7,59	5,55	3,01	1,21
115					99,23	42,45	17,47	10,46	8,25	6,02	3,27	1,32
120						45,93	18,90	11,32	8,92	6,52	3,53	1,43
125						49,54	20,39	12,20	9,62	7,03	3,81	1,54
130						53,27	21,92	13,12	10,35	7,56	4,10	1,65
135						57,13	23,51	14,07	11,10	8,10	4,39	1,77
140						61,11	25,15	15,05	11,87	8,67	4,70	1,90
145						65,21	26,84	16,06	12,67	9,25	5,02	2,02
150						69,44	28,57	17,11	13,49	9,85	5,34	2,16
160						78,25	32,20	19,28	15,20	11,10	6,02	2,43
170						87,55	36,03	21,57	17,01	12,42	6,73	2,72
180						97,33	40,05	23,98	18,91	13,81	7,49	3,02
190							44,27	26,50	20,90	15,26	8,27	3,34
200							48,68	29,14	22,98	16,78	9,10	3,67

(ref perdmang.xls dsk ing jun97)

Tabla III.2 Pérdidas por fricción en tuberías de 4". Fuente: Pietersz (2001).

Material: Acero comercial; Schedule 40

Diámetro nominal: 4 pulg. Diámetro interno: 4,026 pulg (102,2604 mm).

LIT/S	LIT/min	m ³ /h	GPM	VEL (m/s)	C ² /2g (m)	Hf (m X100m)
26,8133	1608,800	96,53	425,00	3,2647	0,5434	9,526
27,7778	1666,667	100,00	440,29	3,3821	0,5832	10,196
28,3905	1703,430	102,21	450,00	3,4568	0,6092	10,633
29,9678	1798,067	107,88	475,00	3,6488	0,6788	11,801
30,0000	1800,000	108,00	475,51	3,6527	0,6803	11,825
30,5556	1833,333	110,00	484,32	3,7204	0,7057	12,252
31,5450	1892,700	113,56	500,00	3,8408	0,7521	13,029
33,1222	1987,333	119,24	525,00	4,0329	0,8292	14,317
33,3333	2000,000	120,00	528,35	4,0586	0,8398	14,494
34,6995	2081,970	124,92	550,00	4,2249	0,9101	15,665
36,1111	2166,667	130,00	572,37	4,3968	0,9856	16,922
36,2767	2176,600	130,60	575,00	4,4170	0,9947	17,072
36,6667	2200,000	132,00	581,18	4,4644	1,0162	17,430
37,8540	2271,240	136,27	600,00	4,6090	1,0831	18,541
38,8889	2333,333	140,00	616,40	4,7350	1,1431	19,536
39,4314	2365,883	141,95	625,00	4,8011	1,1752	20,069
40,0000	2400,000	144,00	634,01	4,8703	1,2094	20,634
41,0085	2460,510	147,63	650,00	4,9931	1,2711	21,656
41,6667	2500,000	150,00	660,43	5,0732	1,3123	22,337
42,5858	2555,150	153,31	675,00	5,1851	1,3708	23,305
43,3333	2600,000	156,00	686,85	5,2762	1,4193	24,106
44,1630	2649,780	158,99	700,00	5,3772	1,4742	25,012
44,4444	2666,667	160,00	704,46	5,4114	1,4931	25,323
45,7403	2744,417	164,67	725,00	5,5692	1,5814	26,780
46,6667	2800,000	168,00	739,68	5,6820	1,6461	27,847
47,2222	2833,333	170,00	748,49	5,7497	1,6855	28,495
47,3175	2839,050	170,34	750,00	5,7613	1,6923	28,608
48,8947	2933,683	176,02	775,00	5,9533	1,8070	30,496
50,0000	3000,000	180,00	792,52	6,0879	1,8896	31,855
50,4720	3028,320	181,70	800,00	6,1453	1,9255	32,444
52,0492	3122,950	187,38	825,00	6,3374	2,0477	34,452
52,7778	3166,667	190,00	836,55	6,4261	2,1054	35,399
53,3333	3200,000	192,00	845,35	6,4937	2,1500	36,131
53,6265	3217,590	193,06	850,00	6,5294	2,1737	36,519
55,2039	3312,233	198,73	875,00	6,7215	2,3035	38,647
55,5556	3333,333	200,00	880,58	6,7643	2,3329	39,130
56,6667	3400,000	204,00	898,19	6,8996	2,4271	40,674
56,7810	3406,860	204,41	900,00	6,9135	2,4369	40,835
58,3333	3500,000	210,00	924,61	7,1025	2,5720	43,046
58,3583	3501,500	210,09	925,00	7,1056	2,5742	43,082
59,4444	3566,667	214,00	942,22	7,2378	2,6709	44,665
59,9355	3596,130	215,77	950,00	7,2976	2,7152	45,390
60,0000	3600,000	216,00	951,02	7,3054	2,7211	45,485
61,1111	3666,667	220,00	968,63	7,4407	2,8228	47,149
61,5128	3690,767	221,45	975,00	7,4896	2,8600	47,757
63,0900	3785,400	227,12	1000,00	7,6817	3,0086	50,185
63,3333	3800,000	228,00	1003,86	7,7113	3,0318	50,564
63,8889	3833,333	230,00	1012,66	7,7789	3,0852	51,437
64,6672	3880,033	232,80	1025,00	7,8737	3,1609	52,672
66,2444	3974,667	238,48	1050,00	8,0657	3,3169	55,219
66,6667	4000,000	240,00	1056,69	8,1172	3,3594	55,911
67,8217	4069,300	244,16	1075,00	8,2578	3,4768	57,826
68,0556	4083,333	245,00	1078,71	8,2863	3,5008	58,218
69,4444	4166,667	250,00	1100,72	8,4554	3,6451	60,571

Tabla III.3 Pérdidas por fricción en tuberías de 6". Fuente: Pietersz (2001).

Tubería nueva

Material: Acero comercial; Schedule 40

Diámetro nominal: 6 pulg. Diámetro interno: 6,065 pulg (154,051 mm).

LIT/S	LIT/min	m ³ /h	GPM	VEL (m/s)	C ² /2g (m)	Hf (m X100m)
3,1545	189,270	11,39	50,00	0,1682	0,0015	0,024
3,7854	227,124	13,63	60,00	0,2031	0,0021	0,034
4,1867	250,000	15,00	66,04	0,2235	0,0025	0,040
4,4163	264,978	15,90	70,00	0,2369	0,0029	0,044
5,0472	302,832	18,17	80,00	0,2708	0,0037	0,056
5,5556	333,333	20,00	88,06	0,2981	0,0045	0,067
5,6781	340,686	20,44	90,00	0,3046	0,0047	0,070
6,3090	378,540	22,71	100,00	0,3385	0,0058	0,084
6,6667	400,000	24,00	106,67	0,3577	0,0065	0,093
6,9399	416,394	24,98	110,00	0,3723	0,0071	0,100
6,9444	416,667	25,00	110,07	0,3726	0,0071	0,100
7,5708	454,248	27,25	120,00	0,4062	0,0084	0,117
8,0000	480,000	28,80	128,90	0,4292	0,0094	0,130
8,2017	492,102	29,53	130,00	0,4400	0,0099	0,136
8,3333	500,000	30,00	132,09	0,4471	0,0102	0,140
8,8326	529,956	31,80	140,00	0,4739	0,0114	0,155
9,0000	540,000	32,40	142,95	0,4820	0,0119	0,161
9,4635	567,810	34,07	150,00	0,5077	0,0131	0,176
10,0000	600,000	36,00	158,50	0,5365	0,0147	0,195
10,7253	643,518	38,61	170,00	0,5754	0,0169	0,222
11,1111	666,667	40,00	176,12	0,5961	0,0181	0,237
11,6667	700,000	42,00	184,92	0,6259	0,0200	0,259
11,9871	719,226	43,15	190,00	0,6431	0,0211	0,273
12,6180	757,080	45,42	200,00	0,6770	0,0234	0,299
13,3333	800,000	48,00	211,34	0,7154	0,0261	0,331
13,8889	833,333	50,00	220,14	0,7452	0,0283	0,357
15,0000	900,000	54,00	237,76	0,8046	0,0330	0,411
15,1416	908,496	54,51	240,00	0,8124	0,0336	0,418
16,4034	984,204	59,05	260,00	0,8901	0,0395	0,486
16,6667	1000,000	60,00	264,17	0,8942	0,0408	0,500
17,6667	1059,972	63,59	280,00	0,9478	0,0458	0,557
19,4444	1166,667	70,00	308,20	1,0432	0,0555	0,666
22,0815	1324,890	79,49	356,00	1,1847	0,0716	0,844
25,0000	1500,000	90,00	396,26	1,3413	0,0917	1,065
25,2380	1514,160	90,85	400,00	1,3539	0,0935	1,064
27,7778	1666,667	100,00	440,29	1,4903	0,1132	1,299
28,5406	1709,430	102,21	450,00	1,5232	0,1183	1,353
31,5450	1892,700	113,56	500,00	1,6924	0,1460	1,651
33,3333	2000,000	120,00	520,36	1,7681	0,1631	1,832
34,6995	2081,970	124,92	550,00	1,8617	0,1767	1,977
37,8540	2271,240	136,21	600,00	2,0309	0,2103	2,332
41,0085	2460,510	147,63	650,00	2,2002	0,2468	2,716
41,5867	2500,000	150,00	660,43	2,2258	0,2548	2,800
44,1630	2649,780	158,99	700,00	2,3694	0,2862	3,128
47,5175	2850,990	176,34	750,00	2,5367	0,3296	3,560
50,0000	3000,000	180,00	792,52	2,6826	0,3669	3,966
50,9720	3026,320	181,70	800,00	2,7070	0,3739	4,038
53,6284	3217,583	193,06	850,00	2,8771	0,4221	4,535
55,5556	3333,333	200,00	890,58	2,9936	0,4530	4,853
56,7810	3406,860	204,41	900,00	3,0464	0,4732	5,061
58,3333	3500,000	210,00	924,81	3,1297	0,4894	5,330
59,9355	3596,130	215,77	950,00	3,2156	0,5272	5,615
63,0000	3785,400	227,12	1000,00	3,3849	0,5842	6,198
66,6667	4000,000	240,00	1056,69	3,5768	0,6523	6,893

Tabla III.4 Pérdidas por fricción en tuberías de 6". Fuente: Pietersz (2001)

Tubería nueva
 Material: Acero comercial; Schedule 40
 Diámetro nominal: 6 pulg. Diámetro interno: 6,065 pulg (154,051 mm).

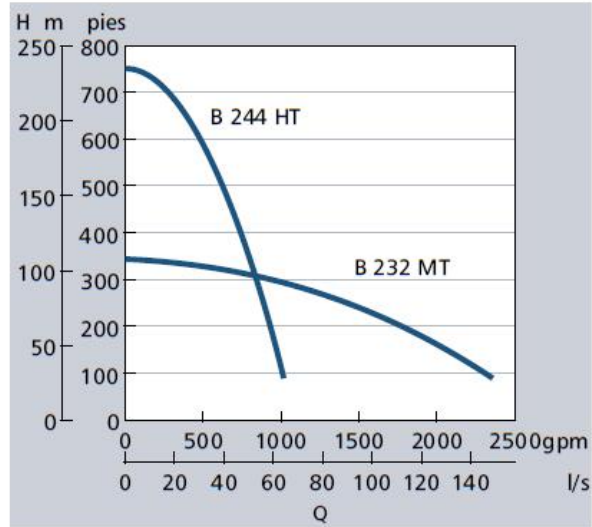
LIT/S	LIT/min	m ³ /h	GPM	VEL (m/s)	C ² /2g (m)	Hf (m X100m)
69,3990	4163,940	249,84	1100,00	3,7234	0,7068	7,448
72,5536	4353,217	261,19	1180,00	3,8926	0,7726	8,116
75,0000	4500,000	270,00	1188,78	4,0239	0,8255	8,653
76,7080	4542,480	272,55	1203,00	4,0818	0,8412	8,812
77,7778	4666,667	280,00	1232,81	4,1729	0,8878	9,284
78,6625	4731,750	283,91	1250,00	4,2311	0,9128	9,536
80,5556	4833,333	290,00	1276,84	4,3219	0,9524	9,937
82,0170	4921,020	295,26	1300,00	4,4003	0,9872	10,288
83,3333	5000,000	300,00	1320,86	4,4710	1,0192	10,611
85,1671	5110,028	306,60	1348,63	4,5463	1,0648	11,089
86,1111	5166,667	310,00	1364,89	4,6200	1,0883	11,308
88,3260	5299,560	317,97	1400,00	4,7388	1,1456	11,879
88,8889	5333,333	320,00	1408,92	4,7690	1,1596	12,027
91,4806	5488,833	329,33	1450,00	4,9081	1,2232	12,717
91,6667	5500,000	330,00	1452,95	4,9180	1,2332	12,787
94,4444	5666,667	340,00	1496,98	5,0671	1,3091	13,530
94,6350	5678,100	340,69	1500,00	5,0773	1,3144	13,583
97,2222	5833,333	350,00	1541,01	5,2161	1,3872	14,314
97,7894	5867,367	352,04	1550,00	5,2465	1,4034	14,477
100,0000	6000,000	360,00	1598,04	5,3851	1,4876	15,120
100,9440	6056,840	363,40	1600,00	5,4158	1,4955	15,399
102,7778	6166,667	370,00	1628,07	5,5142	1,5503	15,949
104,0986	6245,917	374,76	1650,00	5,5850	1,5904	16,350
105,6556	6333,333	380,00	1673,09	5,6632	1,6352	16,796
107,2530	6435,180	386,11	1700,00	5,7543	1,6882	17,329
108,3333	6500,000	390,00	1717,12	5,8122	1,7224	17,671
110,4075	6624,450	397,47	1750,00	5,9235	1,7890	18,337
111,1111	6666,667	400,00	1761,15	5,9613	1,8119	18,586
113,5620	6813,720	408,82	1800,00	6,0928	1,8927	19,373
113,8889	6833,333	410,00	1806,18	6,1103	1,9056	19,461
116,6667	7000,000	420,00	1849,21	6,2593	1,9976	20,419
116,7184	7002,883	420,18	1850,00	6,2620	1,9993	20,436
119,4444	7166,667	430,00	1893,24	6,4084	2,0938	21,379
119,8710	7182,280	431,54	1900,00	6,4312	2,1086	21,623
122,2222	7333,333	440,00	1937,27	6,5574	2,1924	22,361
123,0226	7381,533	442,88	1950,00	6,6095	2,2213	22,630
125,0000	7500,000	450,00	1981,30	6,7064	2,2931	23,365
126,1600	7570,800	454,25	2000,00	6,7687	2,3366	23,738
127,7778	7666,667	460,00	2025,33	6,8555	2,3962	24,391
128,3944	7700,067	462,60	2030,00	6,8890	2,4149	24,475
130,5556	7833,333	470,00	2069,35	7,0045	2,5015	25,438
130,6839	7845,333	471,28	2070,00	7,0082	2,5061	25,481
133,3333	8000,000	480,00	2113,38	7,1535	2,6091	26,508
135,6438	8138,617	488,32	2166,00	7,2775	2,7065	27,484
136,1111	8166,667	490,00	2157,41	7,3026	2,7189	27,599
138,1900	8327,050	499,67	2207,00	7,4257	2,8073	28,676
138,8889	8333,333	500,00	2201,44	7,4516	2,8310	28,713
141,6667	8500,000	510,00	2245,47	7,6006	2,9454	29,838
141,9525	8517,150	511,03	2250,00	7,6160	2,9573	29,966
144,4444	8666,667	520,00	2293,92	7,7498	3,0621	31,036
145,1069	8708,417	522,39	2300,00	7,7852	3,0902	31,285
147,2222	8833,333	530,00	2353,55	7,9307	3,1810	32,185
148,2614	8895,683	533,74	2350,00	7,9544	3,2260	32,632
150,0000	9000,000	540,00	2377,56	8,0477	3,3021	33,386
151,4160	9084,960	545,10	2400,00	8,1237	3,3648	34,007

ANEXOS IV

ESPECIFICACIONES DE BOMBAS SEGUN SUS CATALOGOS DE FABRICANTE

Serie 2000

2400.402



Modelo	B 232 MT	B 244 HT
Potencia, CV [kW]	140 (104)	140 (104)
Tensión, V/fase	460/575, 3~	460/575, 3~
Corriente nominal, A	148/118	148/118
Peso, libras (kg)	1984 (900)	2172 (985)
Máx. altura, pulg. [mm]	46" (1180)	49" (1245)
Máx. ancho, pulg. [mm]	30" (770)	27" (770)
Descarga Ø, pulg.	6"	4"
Abertura de colador, pulg. (mm)	3/8"×3/8" (10×10)	3/8"×3/8" (10×10)
Líquido caliente, 158°F (70°C)	No	No

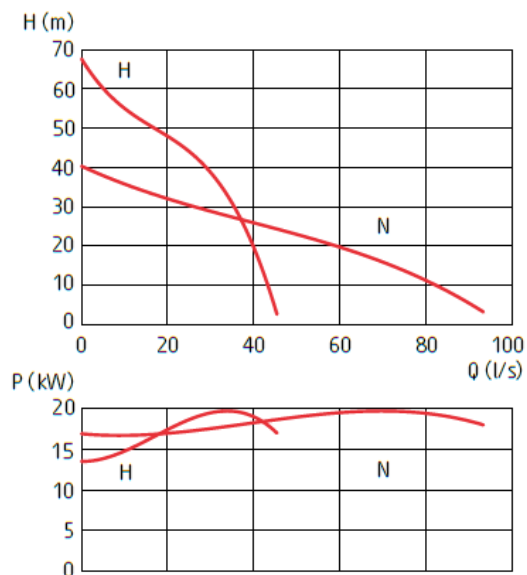
Disponibile en versiones Ex/MSHA 2400.591/490

Para especificaciones adicionales, ver la documentación técnica del producto.
Con reservación por cambios.

29

Figura IV.1. Especificaciones de la bomba FLYGT B 244HT. Fuente: Manual de bombas de drenaje, Xylem (2012)

MATADOR

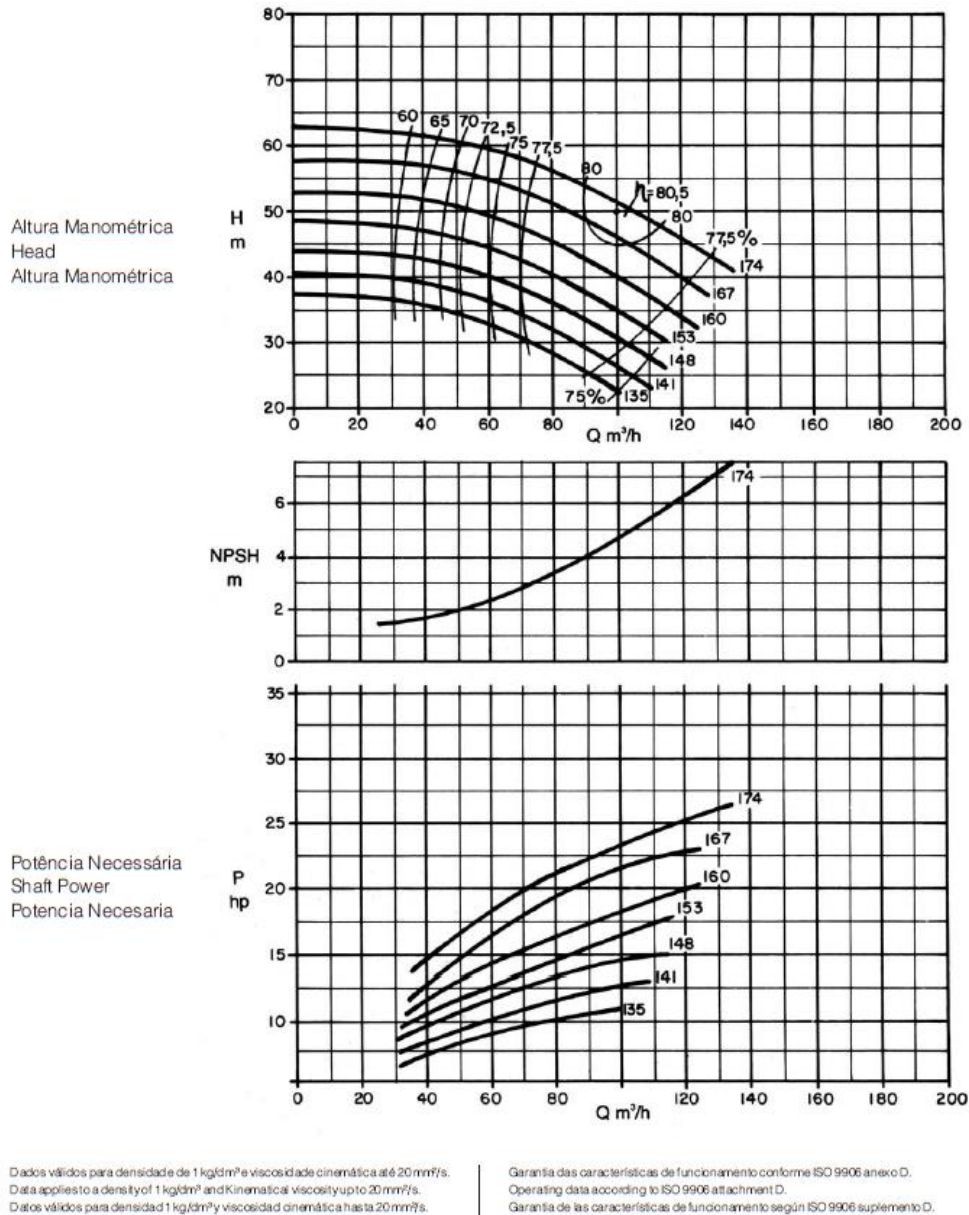


Datos técnicas	N	H
Conexión de descarga	6"	4"
Potencia nominal de salida	18 kW	18 kW
Consumo máximo	20 kW	20 kW
Velocidad del eje	2905 RPM	2905 RPM
Corriente nominal a 400 V	33 A	33 A
Corriente nominal a 500 V	26 A	26 A
Paso: \varnothing 12 mm Peso: 133 kg Altura: 954 mm Diámetro: \varnothing 395 mm		

Las especificaciones están sujetas a modificaciones sin previo aviso.

Figura IV.2. Especificaciones de la bomba MATADOR H. Fuente: Manual de bombas, GRINDEX (2014).

Bomba Tipo Pump Type Tipo de Bomba	KSB MEGANORM KSB MEGABLOC KSB MEGACHEM KSB MEGACHEM V	Tamanho Size Tamaño	50-160	
Oferta nº Project - No. Oferta - nº	Item nº Item - No. Pos - nº	Velocidade Nominal Nom. Rotative Speed Velocidad Nominal	3500 rpm	



18

Figura IV.3.. Especificaciones de la bomba KSB MEGANORM 50-160. Fuente: Manual de curvas características N° A274/40V/42/44.1P/E/S/2.KSB Meganorm.

ANEXOS V

CALCULO MEDANTE ITERACIONES PARA LA REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA CARGA HIDROSTÁTICA DEL SISTEMA

Tabla V.1. Iteraciones para la representación gráfica de la carga hidrostática ($H_{necesaria}$) del sistema de manguera a 150m.

Sistema de mangueras de 4" a 150 m de altura.						
Flujo volumétrico (GPM)	Perdidas por longitud (m)		Perdidas por accesorios (m)		Pérdida total (m)	Carga hidrostática necesaria (m)
	Succión	Descarga	Succión	Descarga		
79,252	0	0	0	0	0	150
169,252	0	0,349	0	0	0,349	150,349
329,252	0	2,337	0	0	2,337	152,337
429,252	0	4,356	0	0	4,356	154,356
579,252	0	8,439	0	0	8,439	158,439
629,252	0	10,131	0	0	10,131	160,131
679,252	0	11,823	0	0	11,823	161,823
729,252	0	13,803	0	0	13,803	163,803
779,252	0	15,784	0	0	15,784	165,784
829,252	0	17,984	0	0	17,984	167,984
879,252	0	20,185	0	0	20,185	170,185
929,252	0	22,727	0	0	22,727	172,727
1079,252	0	30,353	0	0	30,353	180,353

Tabla V.2. Iteraciones para la representación gráfica de la carga hidrostática ($H_{necesaria}$) del sistema de manguera a 50m.

Sistema de mangueras de 4" a 50m de altura.						
Flujo volumétrico (GPM)	Perdidas por longitud (m)		Perdidas por accesorios (m)		Pérdida total (m)	Carga hidrostática necesaria (m)
	Succión	Descarga	Succión	Descarga		
79,252	0	0	0	0	0	50
169,252	0	0,349	0	0	0,349	50,349
329,252	0	2,337	0	0	2,337	52,337
429,252	0	4,356	0	0	4,356	54,356
579,252	0	8,439	0	0	8,439	58,439
629,252	0	10,131	0	0	10,131	60,131
679,252	0	11,823	0	0	11,823	61,823
729,252	0	13,803	0	0	13,803	63,803
779,252	0	15,784	0	0	15,784	65,784
829,252	0	17,984	0	0	17,984	67,984
879,252	0	20,185	0	0	20,185	70,185
929,252	0	22,727	0	0	22,727	72,727
1079,252	0	30,353	0	0	30,353	80,353

Tabla V.3. Iteraciones para la representación gráfica de la carga hidrostática ($H_{necesaria}$) del sistema de tuberías a 284m.

Sistema de tuberías de 4" a 284 m de altura						
Flujo volumétrico (GPM)	Perdidas por longitud(m)		Perdidas por accesorios (m)		Pérdida total(m)	Carga hidrostática necesaria (m)
	Succión	Descarga	Succión	Descarga		
100	0,005	1,007	0,022	0,064	1,099	285,099
200	0,019	3,569	0,09	0,259	3,936	287,936
400	0,068	12,977	0,36	1,033	14,438	298,438
600	0,147	27,974	0,81	2,326	31,256	315,256
800	0,254	48,489	1,439	4,135	54,318	338,318
1000	0,391	74,518	2,249	6,461	83,618	367,618
1200	0,556	106,043	3,238	9,304	119,142	403,142
1400	0,75	143,054	4,408	12,663	160,875	444,875
1600	0,973	185,537	5,757	16,54	208,808	492,808
1800	1,225	233,552	7,286	20,933	262,996	546,996
2000	1,506	287,028	8,996	25,844	323,373	607,373
2113,38	1,677	319,777	10,045	28,857	360,357	644,357

Tabla V.3. Iteraciones para la representación gráfica de la carga hidrostática ($H_{necesaria}$) del sistema de tuberías a 150m.

Sistema de tuberías de 4" a 150 m de altura						
Flujo volumétrico (GPM)	Perdidas por longitud(m)		Perdidas por accesorios (m)		Pérdida total(m)	Carga hidrostática necesaria (m)
	Succión	Descarga	Succión	Descarga		
50	0,006	0,542	0,022	0,029	0,6	150,6
100	0,022	1,923	0,09	0,117	2,151	152,151
200	0,079	6,991	0,36	0,467	7,897	157,897
300	0,171	15,069	0,81	1,051	17,101	167,101
400	0,297	26,121	1,439	1,868	29,725	179,725
500	0,456	40,142	2,249	2,918	45,765	195,765
600	0,649	57,125	3,238	4,202	65,215	215,215
700	0,875	77,062	4,408	5,72	88,065	238,065
800	1,136	99,96	5,757	7,471	114,324	264,324
900	1,429	125,813	7,266	9,428	143,936	293,936
1000	1,756	154,62	8,996	11,673	177,046	327,046
1056,69	1,957	172,262	10,045	13,034	197,298	347,298

Tabla V.4. Iteraciones para la representación gráfica de la carga hidrostática ($H_{necesaria}$) del sistema de mangueras a 50m.

Sistema de mangueras de 4" a 50m de altura,						
Flujo volumétrico (GPM)	Perdidas por longitud (m)		Perdidas por accesorios (m)		Pérdida total (m)	Carga hidrostática necesaria (m)
	Succión	Descarga	Succión	Descarga		
0	0	0	0	0	0	50
88,057	0	0,41	0	0	0,41	50,41
110,07	0	0,62	0	0	0,62	50,62
132,09	0	0,87	0	0	0,87	50,87
154,1	0	1,16	0	0	1,16	51,16
176,11	0	1,48	0	0	1,48	51,48
198,13	0	1,84	0	0	1,84	51,84
220,14	0	2,24	0	0	2,24	52,24
242,16	0	2,67	0	0	2,67	52,67
264,17	0	3,13	0	0	3,13	53,13