

**CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA
CUENCA LA CIANURADA, MUNICIPIOS DE
SEGOVIA Y REMEDIOS, ANTIOQUIA (COLOMBIA).**

**HYDROGEOLOGICAL CHARACTERIZATION OF
THE CIANURADA BASIN, SEGOVIA AND
REMEDIOS MUNICIPALITIES (ANTIOQUIA-
COLOMBIA).**

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN HIDROLOGÍA
Y GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS**

Presentado por:

D. DANIEL MEJÍA BENJUMEA

Dirigido por:

Dra. IRENE DE BUSTAMENTE GUTIÉRREZ (UAH)

D. JOSÉ ANTONIO IGLESIAS (CYII)

Alcalá de Henares, a 18 de septiembre de 2019

AGRADECIMIENTOS

Ante todo, a mi familia quienes siempre me apoyan en los retos que emprendo en la vida, este fue un gran reto en el que ellos no dudaron en hacer lo propio, son mi mayor motivación para salir adelante, a mi abuela que siempre me pone en los caminos indicados y por último a todos los que hayan contribuido de una u otra manera con mi formación personal y profesional.

ÍNDICE

1. RESUMEN.....	8
2. INTRODUCCIÓN	9
3. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS	10
4. METODOLOGÍA	11
4.1 RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN EXISTENTE	12
4.2 TRABAJO DE CAMPO	13
5. RESULTADOS.....	13
5.1 GEOLOGÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	13
6. HIDROLOGÍA	16
6.1 PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL DE LA CUENCA LA CIANURADA.....	18
6.2 TEMPERATURA	20
6.3 HUMEDAD RELATIVA	21
6.4 EVAPORACIÓN	22
6.5 HORAS DE SOL	23
6.6 VIENTO.....	23
6.7 EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL (ETP)	24
6.8 EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL (ETR)	25
6.9 ESCORRENTÍA SUPERFICIAL (CE).....	26
6.10 INFILTRACIÓN (I).....	27
6.11 BALANCE HÍDRICO	28
6.12 AFECTACIONES POR ACTIVIDADES MINERAS	29
7. HIDROGEOLOGÍA DE LA CUENCA LA CIANURADA	29
7.1 UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS.....	30
7.2 MOVIMIENTO DEL AGUA SUBTERRÁNEA	37
7.3 CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA (PERMEABILIDAD)	38
7.4 CALIDAD DEL AGUA.....	39
7.5 AFECTACIONES POR ACTIVIDADES MINERAS	44
8. DISCUSIÓN.....	45
9. CONCLUSIONES.....	46
10. RECOMENDACIONES	47
11. BIBLIOGRAFÍA	49

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de la zona de estudio (Colombia, Departamento de Antioquia, Municipios de Segovia y Remedio).....	9
Figura 2. Delimitación Cuenca La Cianurada y su patrón de drenajes.	10
Figura 3. Geología Regional de la zona de estudio (recuadro rojo). Fuente Servicio Geológico Colombiano, Mapa Geológico de Colombia 2017.	15
Figura 4. Geología cuenca La Cianurada. Fuente: Servicio Geológico Colombiano, Mapa Geológico de Colombia 2015.	16
Figura 5. Ubicación de estaciones meteorológicas (Recuadro rojo, zona de estudio).	18
Figura 6. Precipitación media anual estación La Cruzada. Fuente Corp G., 2016.....	19
Figura 7. Precipitación promedio anual. Fuente Corp G., 2016.....	19
Figura 8. Precipitación promedio en el departamento de Antioquia, localización de la cuenca (recuadro rojo) en el municipio de Segovia. Fuente IDEAM, 2010.	20
Figura 9. Temperatura promedio. Fuente Corp G., 2016.	21
Figura 10. Humedad relativa. Fuente Corp G., 2016.	22
Figura 11. Evaporación. Fuente Corp G., 2016.....	23
Figura 12. Horas de sol. Fuente Corp G., 2016.....	23
Figura 13. Velocidad del viento. Fuente Corp G., 2016.....	24
Figura 14. ETP según Thornthwaite.....	25
Figura 15. Aproximaciones para acuíferos en rocas fracturadas. (a) Red de fracturas real; (b) Medio poroso equivalente usando parámetros hidráulicos uniformes; (c) Medio poroso equivalente en el cual la zona de alta densidad de fracturas se expresa con regiones de conductividad más alta; (d) Modelo de porosidad doble; y (e) Modelo de fracturas discretas en el cual las fracturas mayores son modeladas explícitamente. (Cook, 2003).	33
Figura 16. Perfil idealizado de la zona de estudio. (Fuente: Gran Colombia Gold, 2017).	36
Figura 17. Esquema conceptual del área de estudio: en color verde el saprolito, y en azul el batolito con algunos sistemas de túneles (líneas negras). Fuente: Corp G., 2016.....	37
Figura 18. Red de monitoreo. Fuente CORANTIOQUIA, 2014.....	41
Figura 19. Oxígeno disuelto. Fuente CORANTIOQUIA, 2014.....	41
Figura 20. Coliformes fecales. Fuente CORANTIOQUIA, 2014.	41
Figura 21. Cianuro total. Fuente CORANTIOQUIA, 2014.	41
Figura 22. Mercurio total. Fuente CORANTIOQUIA, 2014.	42
Figura 23. Clasificación de calidad del agua. Fuente CORANTIOQUIA, 2014.	43
Figura 24. Índice de calidad del agua (ICA). Fuente CORANTIOQUIA, 2014.....	44

TABLA DE ABREVIATURAS

IDEAM: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales

CORANTIOQUIA: Corporación Autónoma Regional de Antioquia.

ICA: Índice de Calidad del Agua

OMS: Organización Mundial de la Salud

SGC: Servicio Geológico Colombiano

1. RESUMEN

La zona de estudio se encuentra ubicada sobre el sistema Andino Colombiano, más exactamente, en la zona este de la cordillera central a la altura del departamento de Antioquia (Colombia) y aledaña al RPP 140 o título minero perteneciente a la empresa Gran Colombia Gold corp.

Geológicamente la zona, conocida como distrito Segovia-Remedios, está constituida por rocas ígneas (batolito de Segovia) y metamórficas del complejo metamórfico Cajamarca, sedimentitas de Segovia y Neis de San Lucas, actualmente considerados parte de los terrenos Tahamí (occidente) y Chibcha (oriental) (Restrepo & Toussaint, 1988).

El batolito de Segovia de edad Jurásica (Feininger, et al., 1972), posee una zona de alteración considerable (saprolito), variando en espesores de 5 hasta 45 metros.

La fisiografía de la zona puede dividirse según sus características en 3 unidades en las que es posible la identificación de relieves montañosos, de colina y finalmente otros correspondientes a planicies aluviales.

En este trabajo se realiza la caracterización hidrogeológica del batolito. Si bien es solo una unidad geológica, se separa debidamente en dos unidades hidrogeológicas teniendo en cuenta la zona de alteración (saprolito) y la roca sin alterar; en ambas la porosidad presente es de carácter secundario (fracturamiento).

La calidad del agua en esta cuenca no es buena, puesto que actualmente su cauce principal (quebrada La Cianurada) se encuentra catalogada como la quebrada más contaminada a nivel mundial por efectos de vertimiento de cianuro y mercurio, asociado esto a las labores de extracción minera informal que se realiza en las zonas aledañas a los efluentes de la quebrada. Se presentan datos publicados por la corporación autónoma de Antioquia (CORANTIOQUIA) referentes a oxígeno disuelto, cianuro total, coliformes fecales y mercurio total.

2. INTRODUCCIÓN

La zona de estudio, cuenca La Cianurada, se encuentra ubicada en la zona nororiental del departamento de Antioquia, territorio colombiano, entre los municipios de Segovia y Remedios, contando con una extensión aproximada de 19.98 km². Forma parte del área hidrográfica Magdalena-Cauca, zona hidrográfica de Nechí y regionalmente hace parte de la subzona hidrográfica bajo Nechí. Su nacimiento se encuentra ubicado a 700 metros sobre el nivel del mar en la vereda Popales, municipio de Segovia, fluyendo en sentido SW-NE hasta la quebrada Doña Teresa, desembocando en el río Bagre.

La cuenca La Cianurada cuenta con un sistema de drenajes que forman un patrón de carácter dendrítico (Figura 2).

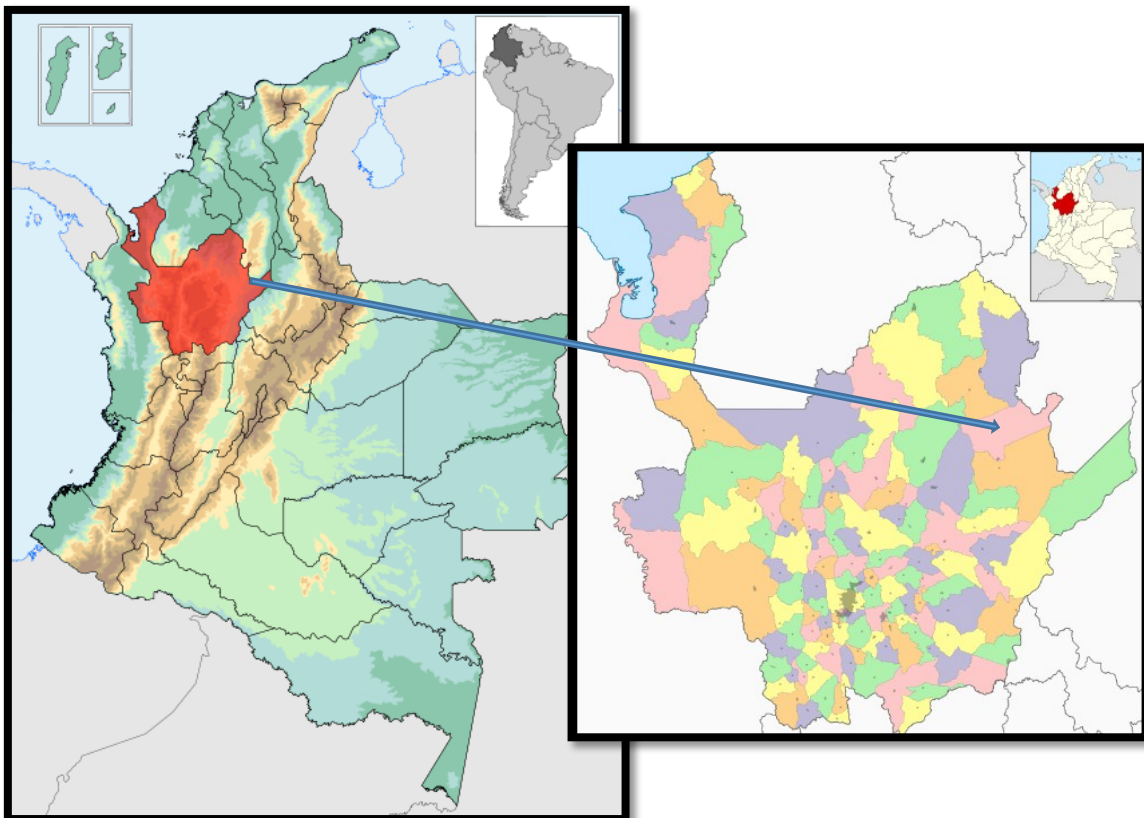


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio (Colombia, Departamento de Antioquia, Municipios de Segovia y Remedios).

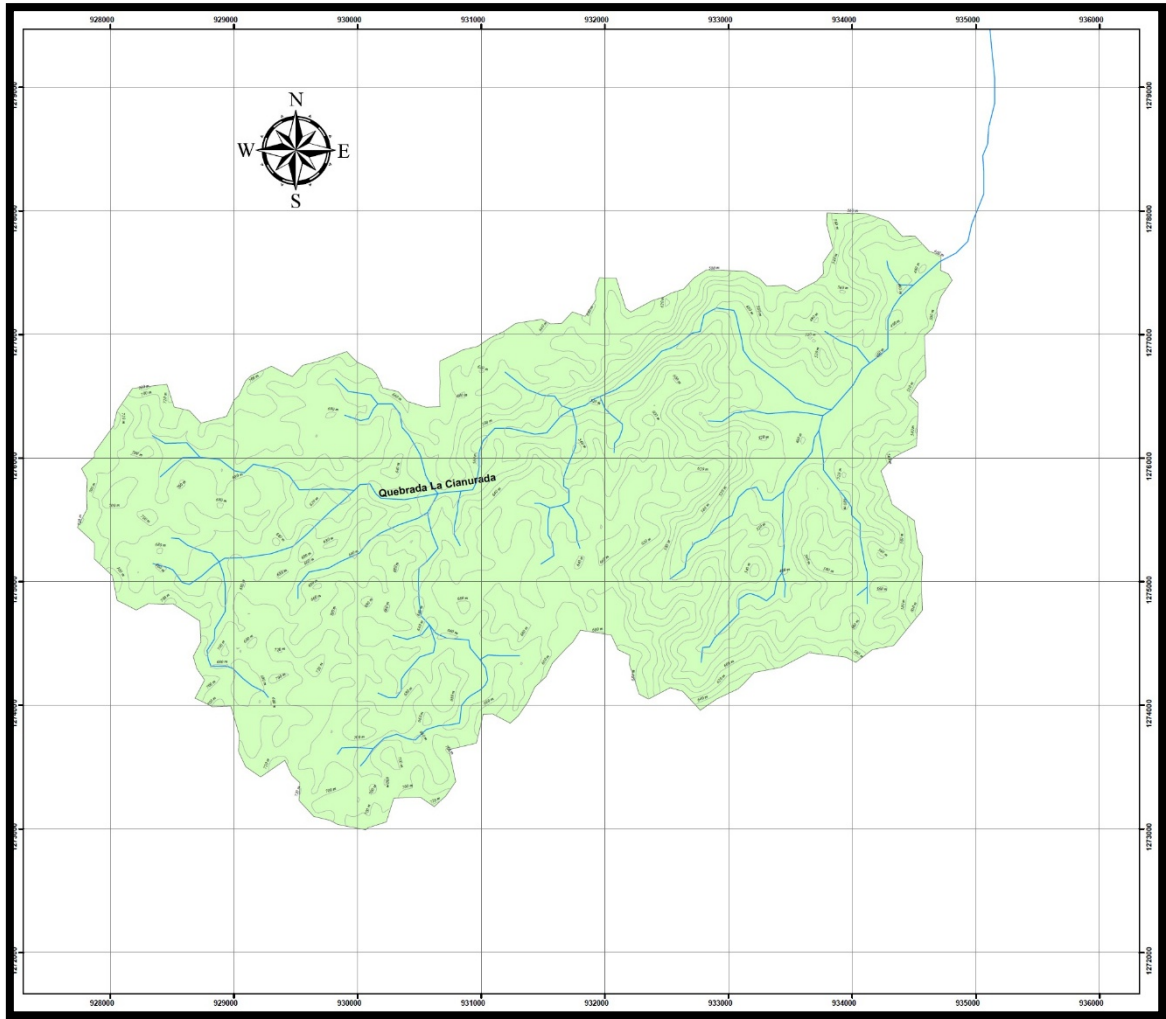


Figura 2. Delimitación Cuenca La Cianurada y su patrón de drenajes.

3. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS

El principal propósito de un estudio hidrogeológico es el dar a conocer el comportamiento de los recursos hídricos presentes en el subsuelo y cómo poder realizar una explotación de estos en una manera sostenible y rentable, partiendo desde el análisis de información presente en diferentes ámbitos como lo son la evaluación de la climatología de una región, su régimen de lluvias, composición del agua, porosidad, permeabilidad, fracturamiento y rasgos geológicos.

Todo esto permitirá establecer una relación entre la geología de la zona y la naturaleza de sus aguas, previo a los procesos que provocan el movimiento de estas entre la litología presente en la zona.

Por ello, se establece como objetivo principal,

- realizar la caracterización hidrogeológica de la cuenca La Cianurada, con el fin de que pueda servir como guía para posteriores estudios.

Para ello, se llevarán a cabo las siguientes tareas:

- Analizar la información hidrometeorológica de la zona de estudio con el fin de conocer el comportamiento de los elementos hídricos en la zona (precipitación, infiltración, escorrentía, etc.).
- Definir las unidades hidrogeológicas mediante la identificación, delimitación y caracterización litológica en cada una de ellas.
- Definir las propiedades hidráulicas de los materiales.

4. METODOLOGÍA

La metodología de trabajo se llevó a cabo mediante una etapa inicial de recopilación y posterior análisis de la información existente, seguida de un trabajo de campo en el cual se colectó información referente a la litología de la zona, para finalmente realizar una interpretación de los resultados.

Con la información bibliográfica analizada, con los datos de campo, así como con los datos de los pozos mineros, se realizó la caracterización de las unidades estratigráficas de la zona.

La información referente a la calidad de las aguas se logró determinar mediante algunas mediciones directas realizadas en campo, determinando parámetros físicos (pH, sólidos en suspensión), realizados y publicados por CORANTIOQUIA fue posible obtener diversos índices de contaminación orgánica, inorgánica y tóxica.

La medición de todos los fenómenos hidrológicos que suceden en la cuenca resulta ser complejo, y esto sumando a la escasa instrumentación en las pequeñas y medianas cuencas

a nivel nacional, hace necesario la ejecución de cálculos involucrando un conjunto de partes diversificadas como un todo. El ciclo hidrológico resulta ser un sistema del cual hacen parte la precipitación, evaporación, escorrentía e infiltración.

Se realizó finalmente un mapa hidrogeológico en el que se reúne toda la información anteriormente mencionada.

4.1 RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN EXISTENTE

- Se llevó a cabo una revisión bibliográfica de los estudios geológicos disponibles, definiendo sus propiedades hidráulicas y las características geométricas de las fracturas y fallas, entre los trabajos destacados en área se encuentran:

Feininger et al. (1972) “Geología de parte de los departamentos de Antioquia y Caldas”- Lleva a cabo la descripción de la geología presente en la zona.

Restrepo y Toussaint (1988) “Terrenos y acreciones continentales en los andes colombianos”. Se define la teoría de formación de los andes colombianos dando información acerca de las características estructurales de la zona de estudio.

Gran Colombia Gold Corp (2015) “Estudio ambiental para la operación minera en el RPP 140”. Se hacen diversas clasificaciones a groso modo de la parte hidrológica e hidrogeológica del área de influencia del proyecto minero.

Gran Colombia Gold Corp (2016) “Respuesta a requerimiento sobre medio abiótico”. Hace una breve descripción acerca de los parámetros hidrológicos y de uso de suelo en el área de influencia asociada al proyecto minero.

- Se analizaron los datos hidrometeorológicos históricos recopilados en trabajos realizados para la empresa Gran Colombia Gold Corp., correspondientes a las estaciones del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), y de una serie de estaciones que la propia empresa tiene instalados en la zona.

- Con la ayuda de imágenes satelitales se logró obtener el modelo de elevación digital del terreno, desde el cual se definieron puntos importantes para realizar campañas de campo.

1.1 TRABAJO DE CAMPO

Se realizaron cuatro salidas de campo en las cuales se colectó información referente a características litológicas y estructurales de la zona: caudales de afloramientos de aguas superficiales, capacidad y velocidad de infiltración, toma de datos fisicoquímicos (pH y temperatura). (Anexo 2).

2. RESULTADOS

5.1 GEOLOGÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO

Geológicamente el área de estudio está constituida por dos tipos de roca principalmente: granodioritas y diques.

Rocas Intrusivas.

Dioritas a cuarzodioritas afloran en toda la zona estudiada preferencialmente en la porción occidental, en cercanías a Segovia y Remedios, y en menor proporción se encuentran cuerpos gabroicos de menor tamaño, dentro de las variaciones de esta unidad intrusiva. Las zonas donde aflora esta unidad se caracterizan por la presencia de roca sin alterar, saprolito (zona de alteración) y suelos areno-arcillosos característicos de este cuerpo.

Los minerales fundamentales de las rocas que componen esta unidad, son cuarzo, feldespato, hornblenda y en menor proporción biotita, y se extiende sobre un área mucho mayor y continua que aflora hacia el suroccidente de la zona.

Esta unidad hace parte de las intrusiones agrupadas en el batolito de Segovia al este de la falla Otú, datado como Jurásico; en la zona aledaña a la Mina Córdoba se determinó una edad 154 ± 3.2 Ma por el método U-Pb en circon (González, et al., 2010).

Se encontraron diques Andesíticos y Basálticos con disposición N-S y que alcanzan a tener hasta 3 metros de ancho. Estas rocas en su mayoría son de textura afanítica y algunas son porfídicas con fenocristales de plagioclasa. Es una roca gris verdosa muy dura que presenta silicificación fuerte en algunas partes, es muy resistente a la erosión y forma diferencias de altura en el terreno de varios metros.

Debido a su dureza sobresalen en el lecho de la quebrada permitiendo así ver la continuidad en el rumbo. En esta quebrada los diques se encuentran en las rocas intrusivas presentando en su mayoría un fuerte fracturamiento y una mineralización pobre en sulfuros, (González, et al., 2010).

5.1.1 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

En la zona de estudio se pudieron determinar estructuras relacionadas a procesos tectónicos (fallamiento y cizallamiento) que tienen características a niveles frágil y frágil-dúctil.

Diaclasas

Existe una amplia variación en el rumbo de las mismas, abarcando principalmente las direcciones EW, NS y NE con altos valores de buzamiento en la mayoría de los planos.

Fallas

La zona está afectada por una amplia variedad de fallamientos tanto de carácter frágil como dúctil, que van desde la escala de afloramiento hasta semi-regional. El fallamiento dúctil aparece de forma expresiva en el batolito (González, et al., 2010)

Otras estructuras (Vetas)

Se incluyen las vetas como estructuras independientes por tratarse de planos específicos de mineralización. Dichos planos pueden ser anteriores o sincrónicos a la llegada del fluido mineralizante. Estas estructuras se caracterizaron en aquellas localidades donde se tiene o tuvo indicios de explotación, afloramientos in situ en vías, caminos y cauces.

Las estructuras vetiformes observadas exhiben una ocurrencia sistemática con controles estructurales y relación de corte con relación a las unidades litológicas encajantes, ambientes de formación/deformación asociados a fallamientos, y geometrías compatibles con deformación progresiva asociada probablemente a procesos tectónicos regionales.

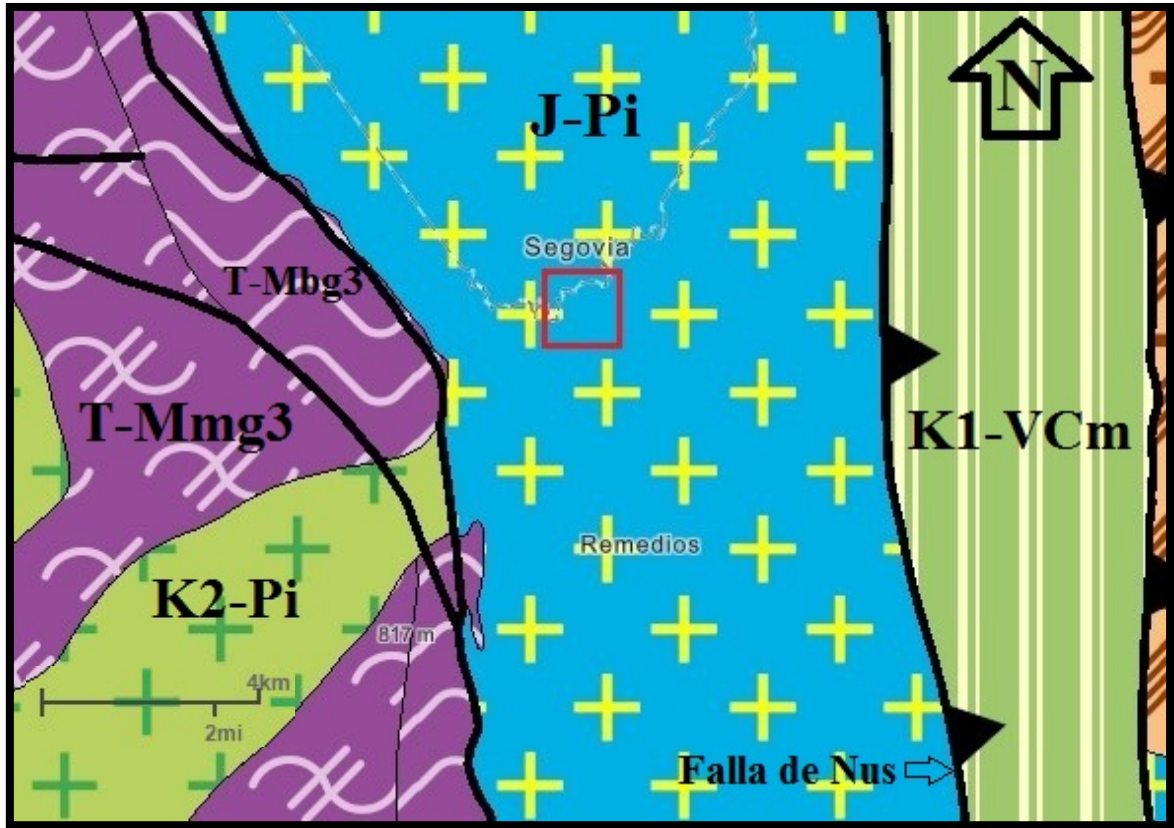


Figura 3. Geología Regional de la zona de estudio (recuadro rojo). Fuente Servicio Geológico Colombiano, Mapa Geológico de Colombia 2017.

Litología (Figura 3):

J-Pi: Batolito de Segovia (Granodioritas que varían de sienogranitos a tonalitas y de cuarzomonzonitas a cuarzomonzodioritas)

T-Mbg3: Esquistos grafiticos, cuarzomoscovíticos, cloríticos y anfibólicos; filitas; cuarcitas; mármoles y serpentinitas.

T-Mmg3: Gneises cuarzo feldespáticos algunos con sillimanita, cordierita y hornblenda; anfibolitas; migmatitas; esquistos y mármoles.

K2-Pi: Granodioritas, tonalitas y cuarzodioritas.

K1-VCm: Basaltos y lodolitas negras intercaladas con limolitas, arenitas y conglomerados.

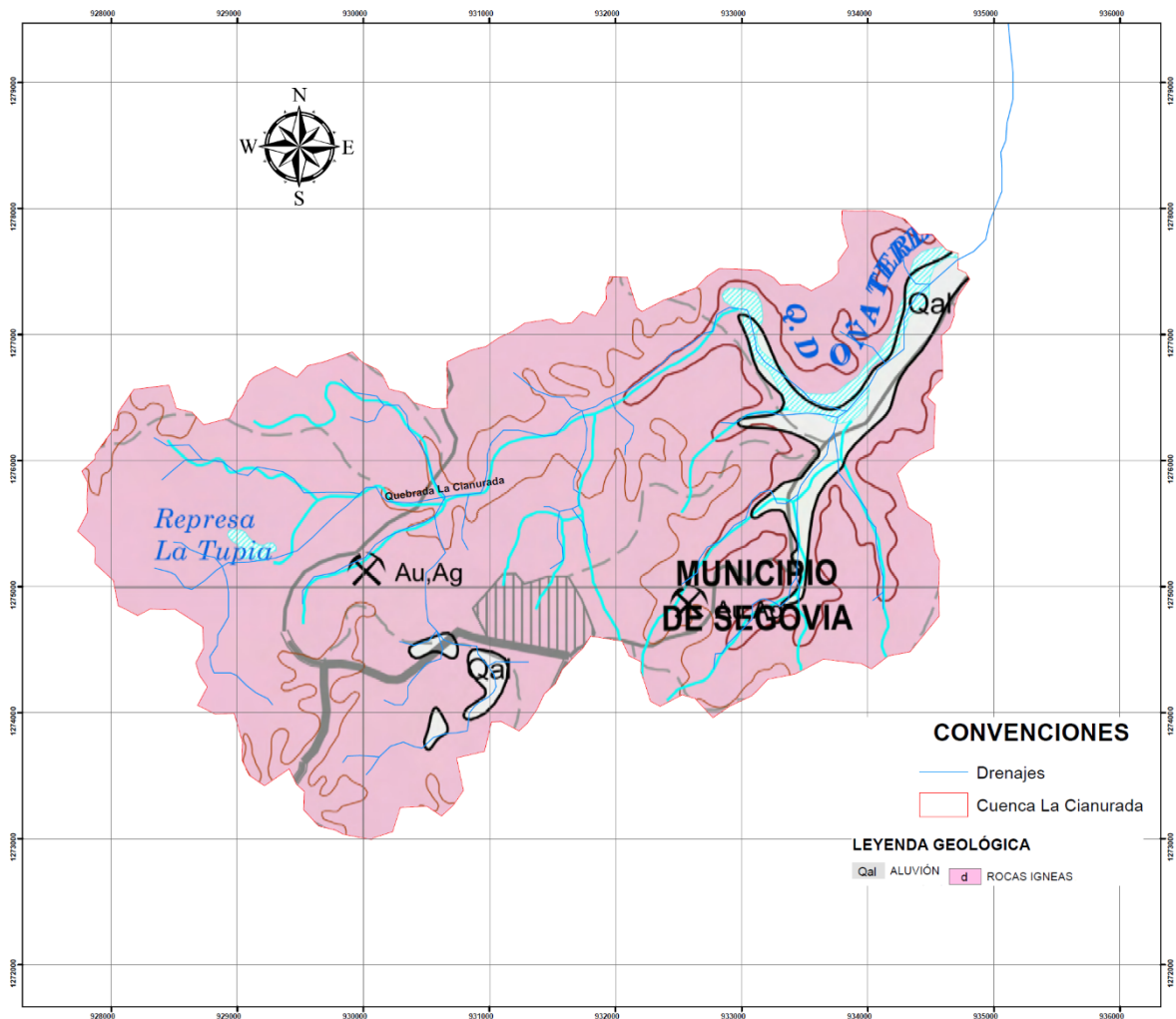


Figura 4. Geología cuenca La Cianurada. Fuente: Servicio Geológico Colombiano, Mapa Geológico de Colombia 2015.

6. HIDROLOGÍA

La quebrada La Cianurada, afluente principal de la cuenca en estudio, tiene una longitud total de 8.12 km desde su nacimiento en la vereda Popales (Segovia, Antioquia), a una altura de 700 m.s.n.m. fluyendo predominantemente en sentido SW-NE hasta llegar a la vereda La Cianurada (Remedios, Antioquia), ubicada a 470 m.s.n.m. donde desemboca en la quebrada Doña Teresa. El trazado de su cauce se encuentra controlado estructuralmente por sistemas de fracturas regionales característicos de la zona; este control es mucho más marcado hacia la parte centro oriental del trazo de la quebrada.

La cuenca de estudio se encuentra incluida en la denominada área hidrográfica del

Magdalena – Cauca, más específicamente dentro de la zona hidrográfica de Nechí, haciendo parte regionalmente de la subzona hidrográfica del bajo Nechí (ver Anexo 1).

Esta cuenca no posee estaciones hidrométricas en sus cauces, por tal razón es necesario estimar los caudales multianuales con la ayuda del balance hídrico a largo plazo, necesitando datos referentes a la precipitación y la evapotranspiración, que arroja como resultado la escorrentía superficial. En este caso se utilizan datos de las estaciones cercanas al área de influencia de la cuenca y que se encuentran operadas por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) (Tabla 1), pudiéndose ver su situación en la figura 5. Dado que el proceso de escorrentía es un efecto directo de la precipitación, se espera que los regímenes de lluvia como hidrológico sean equivalentes.

Para el cálculo de la escorrentía subterránea se tomarán en cuenta los datos referentes a caudales medios de bombeo que realiza la empresa minera de la zona, y que a su vez han sido suministrados bajo un acuerdo de confidencialidad, por lo cual, no suministran una base de datos sino solamente un dato promedio anual.

Tabla 1. Red de estaciones meteorológicas

Código	Nombre	Coordenadas magna sirgas origen Bogotá		Altura (m.s.n.m.)	Tipo	Departamento	Municipio	Periodo-datos
		E	N					
27030080	La Cruzada	929563	1273401	650	Pluviométrica	Antioquia	Remedios	1980-2016
27030240	Puente Bagre	942281	1278761	240	Pluviográfica	Antioquia	Remedios	1981-1999
27011100	Las Brisas	917781	1283455	600	Pluviométrica	Antioquia	Segovia	1983-2016
23175020	Aeropuerto Otú	929419	1267167	718	Sinóptica	Antioquia	Remedios	1980-2018

Fuente: IDEAM

En la tabla 1, la estación correspondiente al aeropuerto Otú es la que brinda información más actualizada cerca de la zona de estudio.

La estación denominada La Cruzada es la directamente relacionada con la cuenca de estudio, puesto que se encuentra ubicada en la parte alta de la quebrada La Cianurada.

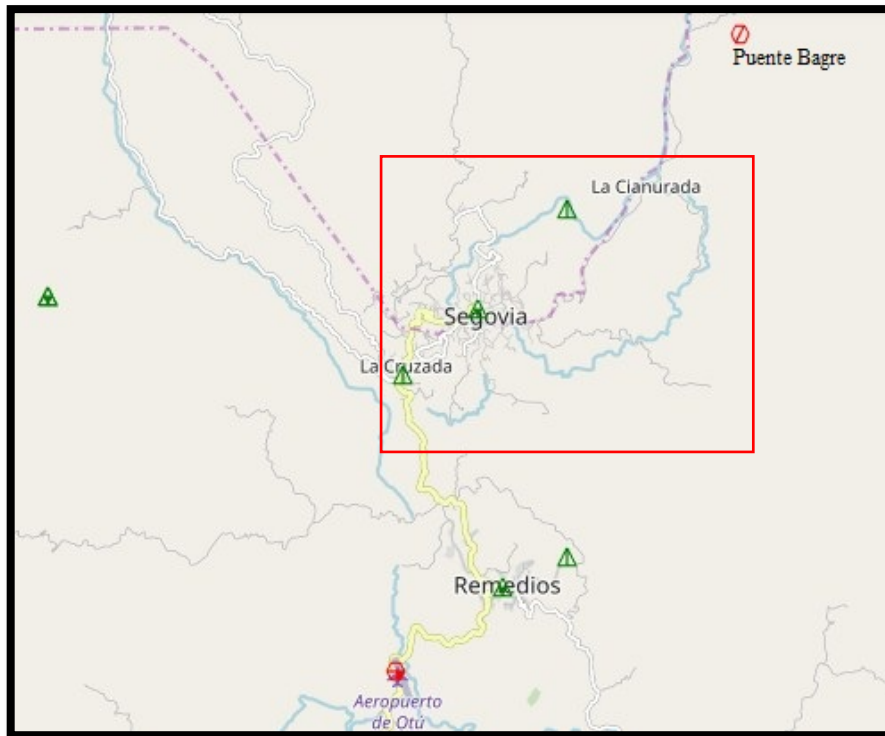


Figura 5. Ubicación de estaciones meteorológicas (Recuadro rojo, zona de estudio).

6.1 PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL DE LA CUENCA LA CIANURADA

Partiendo de la base de que la precipitación es el motor impulsador de la esorrentía, se vislumbra de esta manera la importancia en la determinación de la oferta hídrica de la cuenca. Los valores de precipitación promedio anual fueron calculados para el periodo comprendido entre los años 1980 y 2018, en el cual se excluyen los años en los cuales no se encuentra información de por lo menos 8 meses de registros.

Una vez analizados los datos presentes en la estación La Cruzada (que como se menciona anteriormente, es la más cercana a la cuenca en estudio), se marca una tendencia a la caracterización del área de estudio como un régimen bimodal, donde se aprecian dos picos de precipitación máximos en el año correspondientes a los meses de mayo y octubre, de igual manera los meses con menor precipitación son diciembre a marzo y junio a julio.

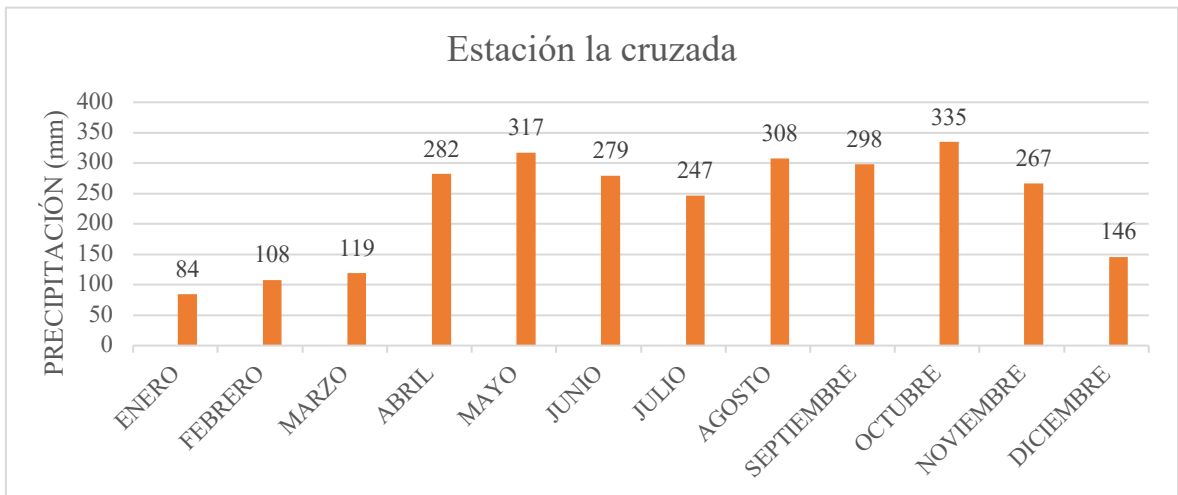


Figura 6. Precipitación media anual estación La Cruzada. Fuente Corp G., 2016.

La precipitación promedio en la cuenca se ubica en el orden de 2978 mm/año, lo que la ubica en un régimen de alto, acercándose a la clasificación del IDEAM para el año 2010 en Colombia donde ubica la cuenca en sitios con un régimen alto de precipitación.

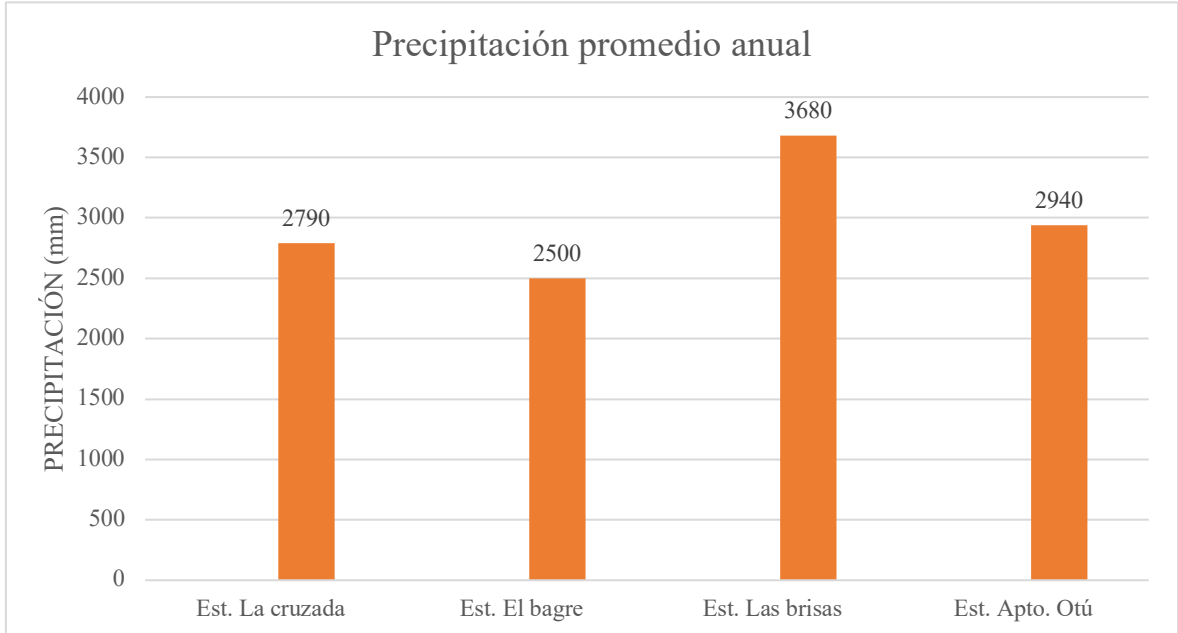


Figura 7. Precipitación promedio anual. Fuente Corp G., 2016.

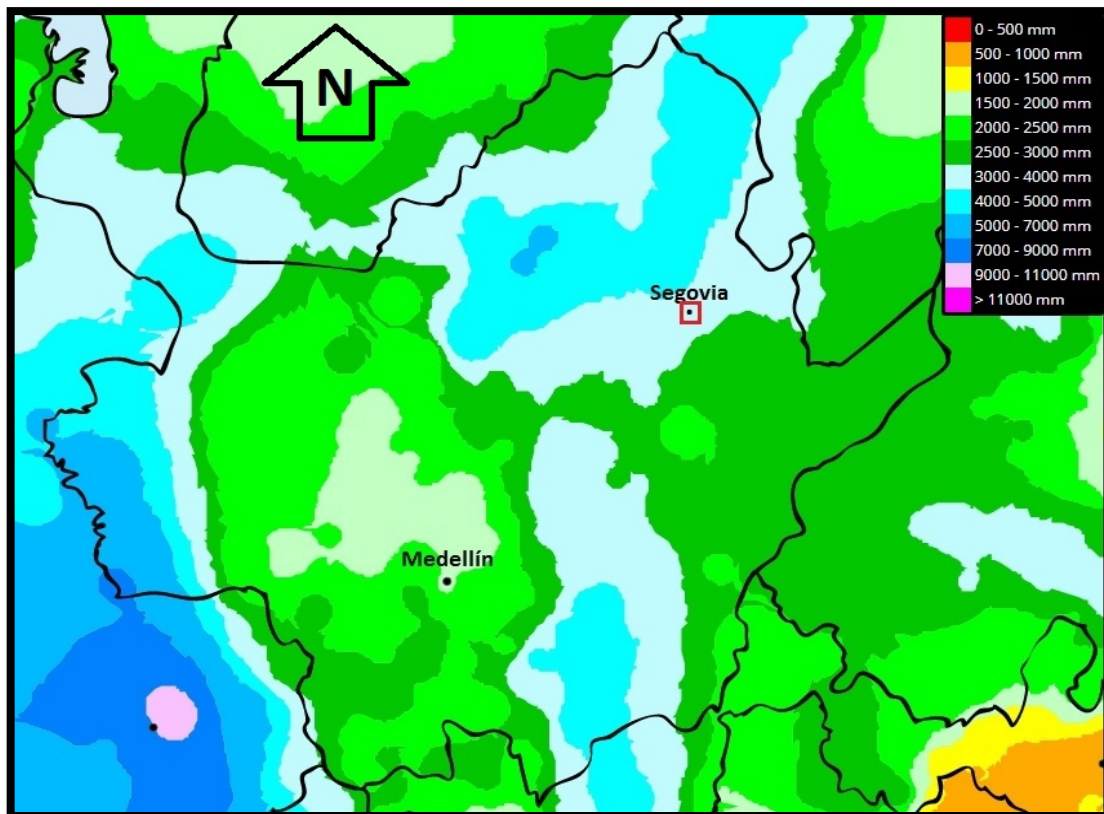


Figura 8. Precipitación promedio en el departamento de Antioquia, localización de la cuenca (recuadro rojo) en el municipio de Segovia. Fuente IDEAM, 2010.

6.2 TEMPERATURA

La estación que se toma como referencia para este procedimiento es la ubicada en el aeropuerto de Otú, dado que es la que presenta mayor cantidad de datos y de la cual se tiene información más actualizada.

El régimen de temperatura media en la cuenca La Cianurada está caracterizado por presentar valores que oscilan entre los 16.0°C y 35.8°C, con una temperatura promedio anual de 25.1°C.

La temperatura máxima en la zona de estudio presenta valores máximos entre 32.0°C y 35.8°C, este último presente en el mes de febrero y coincidiendo con la temporada de bajas precipitaciones; junto con este mes, enero y julio son los tres meses donde se registra la mayor temperatura en el área.

El régimen de temperatura mínima multianual referente a la cuenca La Cianurada presenta una tendencia con valores entre 16.0°C y 16.6°C.

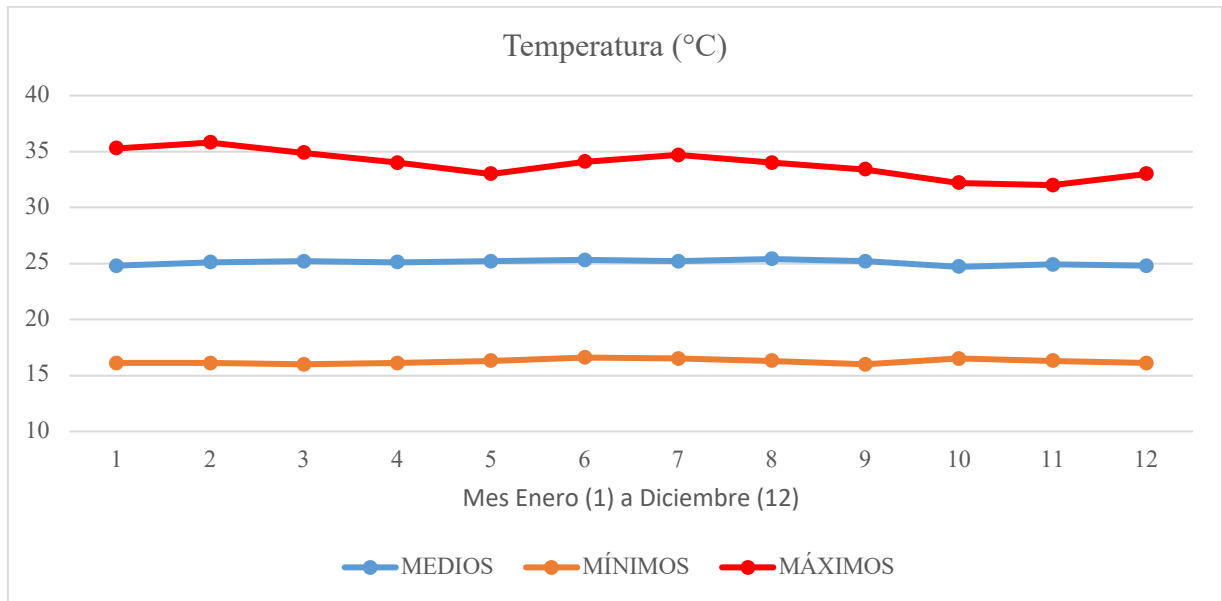


Figura 9. Temperatura promedio. Fuente Corp G., 2016.

La temporada más fresca en la zona se da entre los meses de octubre a diciembre, mientras que en cuanto a clima templado se refiere, se presenta en promedio entre febrero y abril.

6.3 HUMEDAD RELATIVA

La humedad relativa se define como la medida del contenido de humedad en el aire; es decir, “el vapor de agua que existe en una masa de aire, expresado como un porcentaje de la cantidad total que existiría si el aire estuviese saturado a esta temperatura, se expresa en tanto por ciento” (IDEAM, 2005), siendo dependiente de la temperatura y, por tanto, indicador de la evaporación, transpiración y probabilidad de lluvia.

La humedad presente en la cuenca La Cianurada es muy constante a lo largo del año, con valores entre el 83 y 87%, por lo cual es posible considerarla como bochornosa; es decir, la cuenca es calurosa, húmeda y sofocante.

Se toma como fuente de datos la estación ubicada en el aeropuerto Otú.

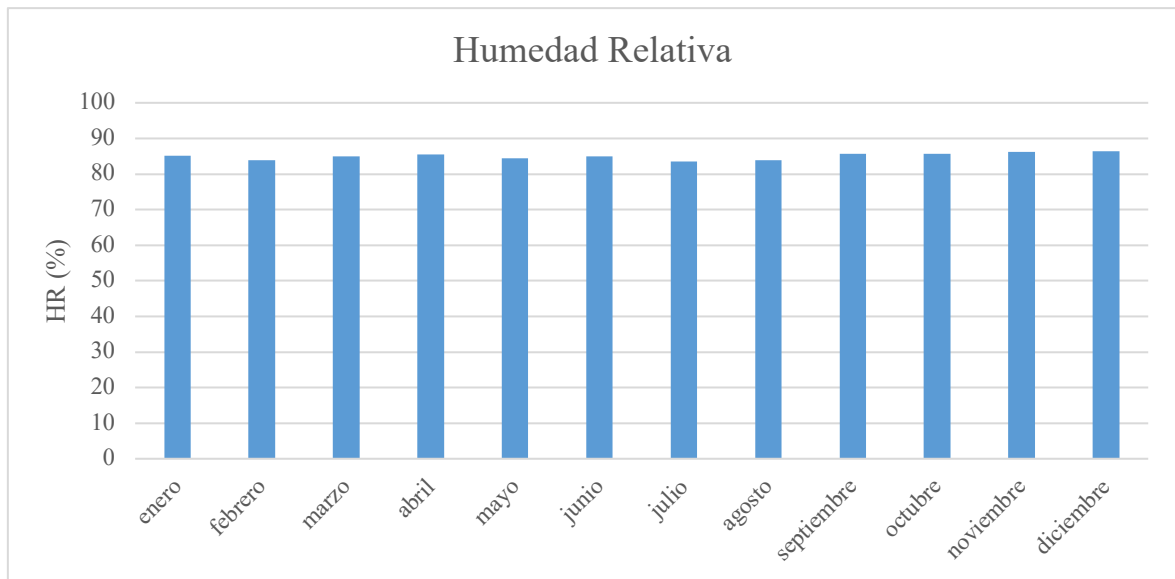


Figura 10. Humedad relativa. Fuente Corp G., 2016.

6.4 EVAPORACIÓN

La evaporación está dada por la emisión de vapor de agua desde una superficie húmeda a temperatura inferior al punto de ebullición (IDEAM, 2005). Se mide a través de un tanque evaporímetro y se expresa en milímetros. Esta tiende a disminuir a medida que aumenta la altura sobre el nivel del mar.

A pesar de no contar con mucha información referente a este ítem en la zona, se hace correlación con la estación ubicada en el aeropuerto Otú, aun cuando esta solo contiene registros hasta el año 1977 con respecto a evaporación, dado que es un valor de referencia para la caracterización básica del clima y posteriores cálculos de evapotranspiración potencial.

La evaporación en la zona de estudio alcanza un promedio anual de 93.9 mm, con una mínima presente en el mes de octubre con 77.4 mm y una máxima en el mes de julio con 112.0 mm.

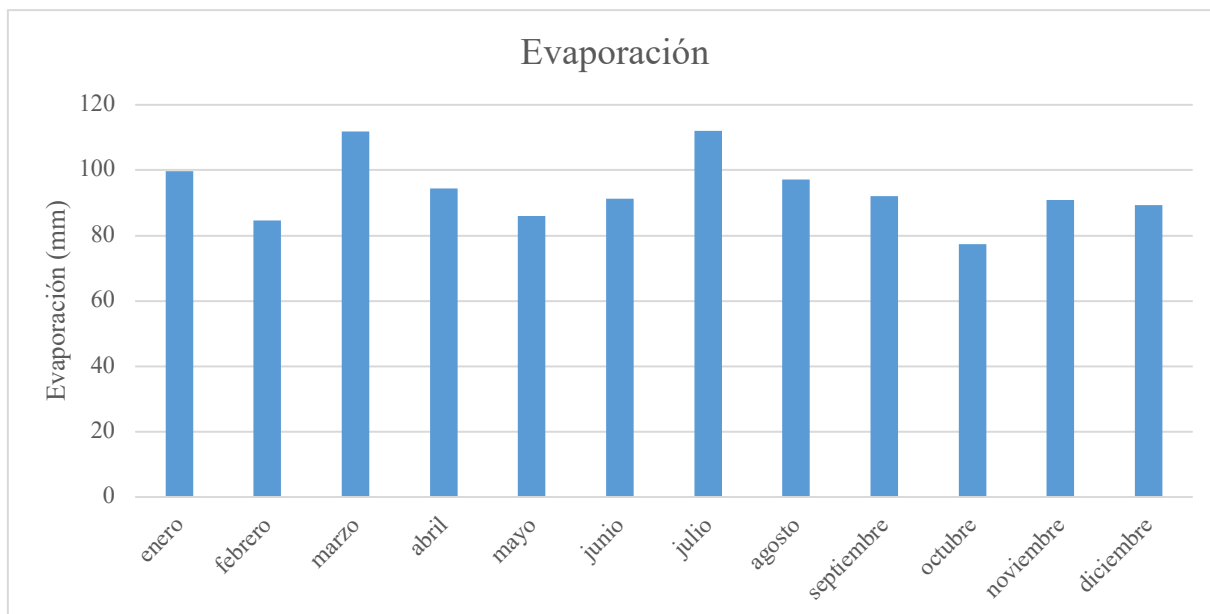


Figura 11. Evaporación. Fuente Corp G., 2016.

6.5 HORAS DE SOL

Las horas de sol son el tiempo que se mantiene iluminada un área con luz natural y se relaciona con los procesos de evaporación y evapotranspiración; es expresada en valores de horas/día.

Como en los parámetros anteriores se usa la estación nombrada aeropuerto de Otú, dando como resultado para la cuenca un promedio de 11.90 horas/día de luz natural anual, con menor exposición el mes de diciembre y mayor en el mes de junio.

Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
11.46	11.54	12.02	12.16	12.26	12.31	12.28	12.21	12.11	11.56	11.49	11.44

Figura 12. Horas de sol. Fuente Corp G., 2016.

6.6 VIENTO

El viento es el movimiento natural del aire; éste transporta energía y masa. Las mediciones del viento se hacen de acuerdo a dos criterios: velocidad, a la cual se determina su fuerza y se mide en unidades de m/s, y la dirección, es decir, desde donde sopla el viento (orientación)

del vector), ésta se mide en grados, tomando como origen el norte geográfico (IDEAM, 2006).

La cuenca presenta una velocidad promedio de 1.99 m/s a lo largo del año, dándose en mayo el mínimo, y el máximo en el mes de febrero.

Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1.96	2.39	2.3	1.92	1.77	1.93	1.99	2.08	1.99	1.95	1.84	1.82

Figura 13. Velocidad del viento. Fuente Corp G., 2016.

6.7 EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL (ETP)

Se conoce como evapotranspiración (ET) la combinación de dos procesos separados por los que el agua se pierde a través de la superficie del suelo: la evaporación y por otra parte mediante transpiración del cultivo (G. Allen, et al., 2006). En este punto es fundamental tener claros los conceptos de ET potencial (ETP) y real (ETR). La primera se define como la pérdida de agua de un terreno cubierto por una cobertura verde de poca altura, por evaporación y transpiración de las plantas sin limitaciones de agua; mientras que la real o actual se refiere a la misma pérdida de agua bajo las condiciones de almacenamiento de agua en el suelo durante el periodo de análisis (Thornthwaite, 1948).

La medición de la ETP no es fácil. Para determinarla experimentalmente se requieren aparatos específicos y mediciones precisas de varios parámetros físicos o el balance del agua en suelo (balance hídrico) en lisímetros. Estos métodos en general requieren de un alto grado de inversión y personal altamente cualificado; sin embargo, son necesarios para la validación de los métodos indirectos de estimación de ETP.

En cuanto a ETR, es aún más difícil de medir que la ETP, ya que además de los factores que influyen en la ETP, en ETR se deben tener en cuenta la humedad en el suelo y el tipo de cobertura (G. Allen, et al., 2006).

Tabla 2. Cálculo de la ETP.

Cálculo de la ETP mensual mediante la fórmula de Thornthwaite																
	set	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	set	Total		
temp	25	24.7	24.7	24.7	24.7	25	25	25	25.1	25.2	25.2	25.3	25			
i	11.44	11.23	11.23	11.23	11.23	11.44	11.44	11.44	11.50	11.57	11.57	11.64	11.44	136.95	a=	3.23
ETP sin corr	112.1	107.8	107.8	107.8	107.8	112.1	112.1	112.1	113.5	115.0	115.0	116.5	112.1			
nº días mes	30	31	30	31	31	28.25	31	30	31	30	31	31	30.0			
nº horas luz	12.11	11.56	11.49	11.44	11.46	11.54	12.02	12.16	12.26	12.31	12.28	12.21	12.1			
ETP corr.	113.1	107.3	103.2	106.2	106.4	101.5	116.0	113.6	119.9	118.0	121.6	122.5	113.1	1349.0		

Fuente: <http://hidrologia.usal.es>

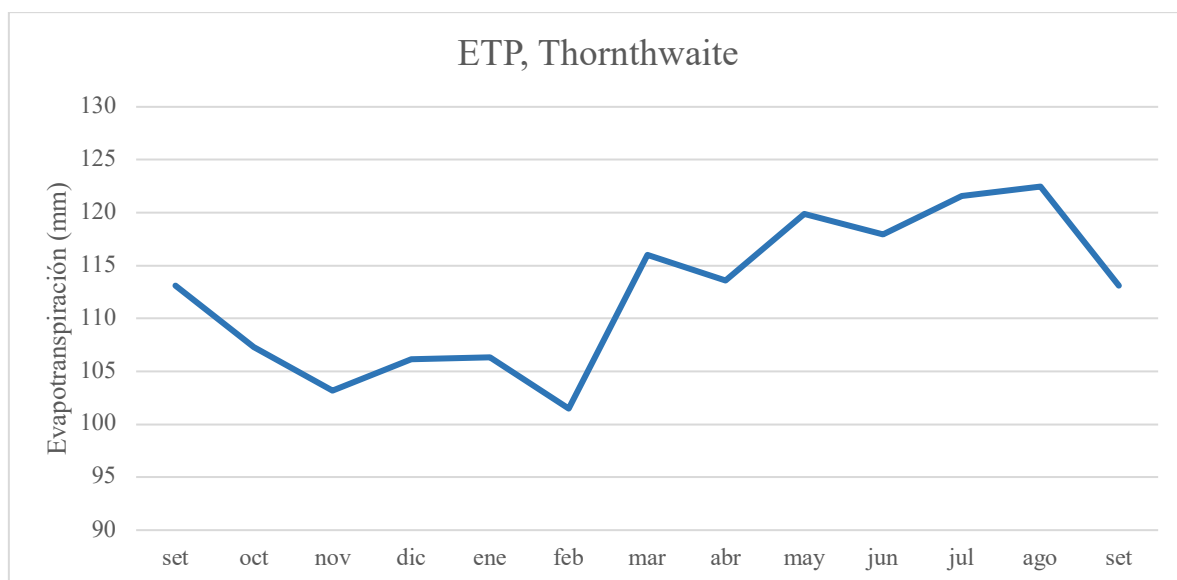


Figura 14. ETP según Thornthwaite.

La ETP promedio, calculada según Thornthwaite, en la cuenca La Cianurada se ubica en el orden de 112.5 mm, con sus épocas mayores los meses de julio y agosto con 121.6 y 122.5 mm respectivamente, y en menor proporción el mes de febrero con 101.5 mm y un total de 1349.0 mm/año (tabla 2 y figura 14).

6.8 EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL (ETR)

Son estimaciones del déficit de escorrentía, es decir, la parte de la precipitación que no produce escorrentía; si se tratase de una cuenca cerrada y consideramos su balance hídrico a escala anual, el agua precipitada que no ha generado escorrentía debe haberse perdido por evapotranspiración. Estas fórmulas fueron establecidas empíricamente comparando las

precipitaciones y la escorrentía total de numerosas cuencas (tomado el 23 de agosto del 2019 de, <http://hidrologia.usal.es/temas/Evapotransp.pdf>). Para el cálculo de la ETR en este caso utilizaremos la fórmula de TURC y que relaciona lo siguiente:

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

P = Precipitación en mm /año

L = $300 + 25t + 0.05t^3$, donde t es la temperatura media anual en °C.

P = 2978 mm/año.

t = 25.1 °C.

ETR = $2978 / 3.46 = 860.70$ mm.

La ETR en la cuenca La Cianurada se ubica en el orden de 860.70 mm/año.

6.9 ESCORRENTÍA SUPERFICIAL (CE)

Conocida como la lámina de agua que luego de una precipitación no ingresa al ciclo de infiltración ni evapotranspiración, por lo cual esta circula sobre la superficie llegando eventualmente a los cauces de los ríos.

La cantidad de agua que discurre por el terreno está asociada directamente a factores como el clima, el tipo de roca, y la pendiente del terreno.

Para el caso de la cuenca La Cianurada se han tomado datos que se colectaron en el año 2016 por el Departamento Administrativo de Planeación, de la Gobernación del departamento de Antioquia, y que arrojan los resultados directos de la escorrentía promedio en mm/año en los municipios de Segovia y Remedios en los cuales se ubica la cuenca.

Por la ubicación de la cuenca entre ambos municipios se hace una correlación de los datos arrojando un promedio de 1548.63 mm/año correspondiente a la escorrentía superficial (CE) en la zona de estudio (Planeación, 2016).

Estos datos obedecen entonces a un 52.01% del total de la precipitación promedio anual de la cuenca, que se encuentra en el orden de 2978 mm/año.

Cabe resaltar que la cuenca presenta un pendiente promedio de 22.13%.

6.10 INFILTRACIÓN (I)

Procedente de las precipitaciones, es la cantidad de agua que luego de este evento, atraviesa la superficie del terreno ocupando de manera parcial o total las superficies porosas que se presentan en el suelo y el subsuelo; esta, a su vez, depende de diversos factores, razón por la que su estimación es compleja.

En hidrogeología, la infiltración es el factor más importante del ciclo del agua y también el más difícil de evaluar puesto que escapa a las mediciones directas por procedimientos sencillos (Castany, 1975).

La infiltración potencial presente en la cuenca puede calcularse por medio de la ecuación general de balance hidrológico. Se asume que a largo plazo la variación de las reservas es nula.

$$P - ETR - CE - I \pm \Delta W = 0$$

$$I = P - ETR - CE$$

I: Infiltración

P: Precipitación

ETR: Evapotranspiración real

CE: Escorrentía superficial

ΔW : Variación del almacenamiento

$$I = 2.978 - 860.70 - 1548.63$$

$$I = 568.67 \text{ mm.}$$

La tasa de infiltración que se presenta en la cuenca La Cianurada se localiza en el orden de 568.67 mm anuales.

6.11 BALANCE HÍDRICO

La base física del balance hídrico a largo plazo es la formulación de las ecuaciones de conservación de masa para volúmenes de control en columnas de suelo, atmósfera y la unión de ambas. El contorno horizontal de las columnas queda definido por la divisoria de aguas de la cuenca en cuestión, desde donde se prolongan infinitas líneas verticales hacia abajo y/o hacia arriba según el caso. El borde inferior de la columna de suelo, se supone, es un estrato impermeable, y el borde superior de la columna atmosférica es su tapa. La superficie de la cuenca es el borde superior de la columna de suelo (atmosférica) (Vélez, et al., 1999).

El balance hídrico en la cuenca tiene como objetivo calcular las contribuciones y pérdidas de agua; sin embargo, las redes de estaciones cercanas no contribuyen con mucha información por lo cual se calcula un balance hídrico preliminar con los datos colectados.

Del agua que cae sobre la cuenca (Precipitación = P), una parte vuelve a la atmósfera por evaporación directa sumada a la transpiración vegetación (Evapotranspiración = ETR). Otra parte discurre por la superficie (Escorrentía superficial = Ce) hasta llegar al cauce del río El Bagre. El resto se introduce en el terreno y se incorpora al sistema acuífero (Infiltración = I).

Al ser un comportamiento cíclico existe una igualdad entre pérdidas y ganancias asociados en la siguiente tabla (se presenta en valores asociados a $\text{hm}^3/\text{año}$).

Aportes	Pérdidas
Precipitación: 59.50 hm^3	Evapotranspiración: 17.18 hm^3
	Escorrentía superficial: 30.94 hm^3
	Infiltración: 11.36 hm^3
Total: 59.50	Total: 59.48 hm^3

Tabla 3. Relación aportes vs pérdidas.

Precipitación = 2978 mm/año , teniendo en cuenta que 1 mm de lluvia equivale a 1 L por m^2 y el área de la cuenca es de 19980000 m^2 , entonces:

$$2978 \text{ L/m}^2 * 19.980.000 \text{ m}^2 = 59.500.440.000 \text{ L} = 59.59 \text{ hm}^3.$$

Evapotranspiración = 860.70 mm/ año, entonces:

$$860.70 \text{ L/m}^2 * 19.980.000 \text{ m}^2 = 17.182.800.000 \text{ L} = 17.18 \text{ hm}^3.$$

Escorrentía superficial (aportación específica) = 1548.63 mm/año, entonces:

$$1548.63 \text{ L/m}^2 * 19.980.000 \text{ m}^2 = 30.941.627.400 \text{ L} = 30.94 \text{ hm}^3.$$

Infiltración = 568.67 mm/año, entonces:

$$568.67 \text{ L/m}^2 * 19.980.000 \text{ m}^2 = 11.362.026.600 \text{ L} = 11.36 \text{ hm}^3.$$

6.12 AFECTACIONES POR ACTIVIDADES MINERAS

La dinámica hídrica superficial, de igual manera, se ve afectada por cambios en la distribución de presiones ejercidas por las actividades mineras, como lo son la formación de pozos, sumideros y vaguadas, así como la entrada directa de agua desde la superficie afectando de manera considerable los patrones de flujo y calidad de agua superficial. Por otra parte, el bombeo procedente desde los túneles hacia la superficie por periodos de tiempo prolongados puede afectar el ciclo hidrológico; esto puede acelerar las respuestas hidrológicas de la cuenca y disminuir en este sentido sus caudales base, dado a que se abate de manera sostenida el nivel freático generando en algunos casos desconexión en los cuerpos superficiales de la base de agua.

7. HIDROGEOLOGÍA DE LA CUENCA LA CIANURADA

El origen y formación de las aguas subterráneas al igual que su forma de yacimiento, movimiento, difusión, régimen, reservas, estado (líquido, sólido, gaseoso), interacción con los suelos y rocas, propiedades (físicas, químicas, bacteriológicas, radioactivas) y su evacuación, regulación y aprovechamiento, son analizados por la hidrología subterránea o hidrogeología (Mijailov, 1989).

Las características en los diferentes tipos de litología de formaciones geológicas que son sometidas posteriormente a procesos de modificación endógena y exógena, crean condiciones de terreno muy variadas, que facilitan o restringen la interacción con las aguas

subterráneas presentes en la zona, al igual que las características químicas e isotópicas de la misma.

7.1 UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS

El principal factor condicionante para el funcionamiento de un acuífero es la geología. Un adecuado análisis de la litología, sus propiedades hidráulicas, presencia de fallas y fracturas, etc., conlleva a una clasificación hidrogeológica de las unidades de acuerdo a su capacidad para transmitir y almacenar agua, lo cual nos permite entrar en contexto con las definiciones de acuífero, acuífugo, acuicludo y acuíardo.

La clasificación más común de acuíferos está basada en la litología de la porosidad media en la que estos se desarrollan. El funcionamiento hidrogeológico de un sistema acuífero es diferente al de otro ambiente. De acuerdo a ello se pueden diferenciar tres grupos (Flores, 2015):

- Acuífero de depósitos inconsolidados (cuaternario):
 - Acuífero poroso no consolidado (alta, mediana y baja productividad).

- Acuífero de rocas sedimentarias.
 - Acuífero fisurado sedimentario (alta, media y baja productividad).
 - Acuífero kárstico (disolución).
 - Acuífero fisurado kárstico.
 - Acuífero sedimentario (alto, mediana y baja productividad).
 - Acuífero vulcano - sedimentario.

- Acuífero de rocas cristalinas:
 - Acuífero fisurado volcánico.
 - Acuífero fisurado de intrusivos (limitaciones).

Con base a lo anterior, los acuíferos presentes en la zona de estudio están estrictamente relacionados a acuíferos de rocas cristalinas, más específicamente a los acuíferos fisurados

e intrusivos.

Si bien fue posible observar un aprovechamiento de agua subterránea en la región (a la cual no fue posible acceder por problemas de orden público), se logra establecer una profundidad del pozo de alrededor de 15 metros, sobre la zona de Saprolito, aprovechando entonces el agua que circula a través de esta zona de alteración, de igual manera no se obtienen datos del caudal aprovechado.

Debido a la presencia de una formación arcillosa (Saprolito), que suprayace a la formación rocosa, denominada batolito de Segovia, se asume, en principio, la inexistencia de acuíferos libres por encima de la formación rocosa. Por tanto, se asume que las zonas de recarga superficial están asociadas a las áreas donde la formación rocosa (batolito) se encuentra en contacto directo con la superficie, o áreas con poco espesor de saprolito. (Figura 16).

7.1.1 ACUÍFEROS DE MEDIA A BAJA IMPORTANCIA HIDROGEOLÓGICA EN ROCAS FISURADAS.

La principal característica en este tipo de acuíferos, es que la permeabilidad está generada por el grado de fracturamiento presente en la roca, permeabilidad que se ve ligada a la densidad y tamaño de las fracturas, al igual que su material de relleno (si posee). Del mismo modo se ve asociado a la intensidad de diaclasamiento, lo que en conjunto genera una porosidad de carácter secundario en la roca.

Las dinámicas asociadas a aguas subterráneas en formaciones rocosas fracturadas son complejas; por ende, para escoger la metodología adecuada y las suposiciones de la manera más acertadamente posible, se deben analizar algunas características y si estas son comunes a clasificaciones típicas de acuíferos.

En la literatura (Cook, 2003) se pueden distinguir varios tipos de aproximaciones conceptuales a acuíferos en roca fracturada: por una parte, se presentan acuíferos donde las fracturas no existen o no tienen mucha relevancia en el flujo, dentro de estos se encuentran acuíferos en medio poroso heterogéneo, en el cual la variación sistemática del tamaño de los poros genera zonas de flujo preferencial.

Por otra parte, se cuenta con otro grupo de acuíferos en los cuales las fracturas representan un factor determinante en el modelo conceptual ya que controlan el flujo. Estos incluyen: (iii) medios porosos puramente fracturados, lo que implica que el agua fluye solo a través del “sistema de tuberías” conformado por las fracturas, y (iv) medio poroso fracturado en el cual se considera que la matriz entre las fracturas, que se asume impermeable en el tipo de acuífero anterior, es capaz de almacenar agua y puede contribuir de manera significativa en el flujo. En la mayoría de los casos reales, los acuíferos son de este tipo. Sin embargo, muy comúnmente se asume para efectos prácticos que son homogéneos o puramente fracturados (ver perfil de acuífero en rocas fracturadas, figura 14).

Esta simplificación es hecha para facilitar el análisis del comportamiento del flujo subterráneo en rocas fracturadas.

En términos generales, las fracturas pueden ser caracterizadas a través de tres dimensiones principales: apertura, longitud y ancho, así como también a través de su localización, y la naturaleza de sus paredes de fractura (rugosidad superficial de la fractura). Por otra parte, el medio poroso en el cual se encuentran inmersas las fracturas es descrito a través de la distribución de los espacios porosos. En el caso de las fracturas, lo que se quiere es establecer su conductividad hidráulica K_f . En el caso del medio poroso lo que se requieren la porosidad n y la conductividad hidráulica K_m (Cook et al., 2003).

En la literatura, algunos métodos han sido propuestos para hallar la conductividad hidráulica a través de una o más características geométricas que pueden ser medidas. Dentro de los métodos más populares se encuentra la ecuación propuesta por Snow, 1969; en la cual se expresa el valor de K_f para una simple fractura planar en términos de la apertura como:

$$K_f = (2b)^2 \frac{(\rho g)}{(12\mu)}$$

Donde,

K_f = conductividad hidráulica.

$2b$ = la apertura de la fractura; ρ es la densidad del agua (1000 kg m⁻³);

μ = la viscosidad cinemática del agua (1.0×10^{-3} Pa s), y

g = la aceleración de la gravedad (9.81 m s^{-2}).

En el caso de la cuenca La Cianurada no se tiene una fractura sino un conjunto de fracturas, para lo cual, en una eventual construcción de un modelo conceptual se podría seguir la siguiente categoría:

Sistemas Discretos de Fracturas: Esta metodología permite una caracterización explícita de cada fractura a través de sus propiedades específicas. Cada fractura es simulada discretamente utilizando la conductividad hidráulica definida anteriormente. La matriz donde se encuentran inmersas las fracturas es considerada impermeable. La mayor limitación de este método radica en la necesidad de caracterizar de manera detallada, la geometría de las fracturas. Por esta razón, este método es adecuado en estudios a mediana o pequeña escala.

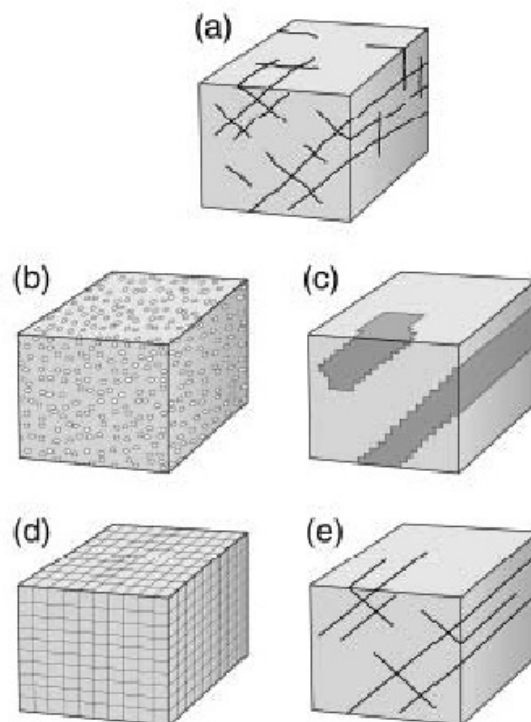


Figura 15. Aproximaciones para acuíferos en rocas fracturadas. (a) Red de fracturas real; (b) Medio poroso equivalente usando parámetros hidráulicos uniformes; (c) Medio poroso equivalente en el cual la zona de alta densidad de fracturas se expresa con regiones de conductividad más alta; (d) Modelo de porosidad doble; y (e) Modelo

de fracturas discretas en el cual las fracturas mayores son modeladas explícitamente. (Cook, 2003).

Acuífero fracturado de Segovia

Llamado así en este trabajo, se define como la unidad correspondiente a la roca sin alterar del batolito de Segovia.

Los únicos aprovechamientos de agua subterránea se ven asociadas a los caudales de bombeo (la información sobre los datos de bombeo no pudo ser suministrada por parte de las empresas mineras), observados en las minas que se encuentran dentro y en las inmediaciones de la cuenca. Cabe anotar que en la zona de estudio no hay presencia de manantiales.

Esta formación se caracteriza por presentar una alta densidad de fracturas y grietas, las cuales se asume han ido aumentando considerablemente debido a las explotaciones minera., Se asume entonces que en esta unidad se concentran las dinámicas de flujo subterráneo, sin descartar la presencia de acuíferos profundos que incluso han podido ser atravesados por algunas estructuras construidas durante el desarrollo de la explotación minera, pero que es poco probable, a partir de la información recopilada, confirmar la presencia de ellos.

Las fallas, fracturas, familias de diaclasas y zonas de cizallamiento se convierten entonces, en los principales conductos para la infiltración de agua desde la superficie del terreno en este acuífero. La falla Nus hacia el oriente la zona, y la falla de Otú hacia el occidente, son las que controlan el sistema de fallas que actúan a nivel local y que afectan el macizo sobre el cual se encuentra ubicada la zona de estudio.

Otras áreas desde la que se produce infiltración de agua desde la superficie son el sistema de vetas presente en la zona, cuyas disposiciones son de N25E/30SE en promedio para algunas estructuras, a otras que se presentan con un promedio de N10W/24SW, siendo estas en su mayoría vetas de cuarzo masivo, con espesores variables desde 10 centímetros hasta 2,5 metros. En las vetas donde se encuentran flujos al interior de las minas se puede observar un alto fracturamiento de las mismas.

Por lo descrito anteriormente, se hace imprescindible la elaboración de un modelo estructural de la zona para una mejor comprensión del comportamiento de los flujos de agua al interior del macizo rocoso.

Los caudales de bombeo suministrados por la empresa minera, se relacionan a continuación:

AÑO	PH	CAUDAL		TIEMPO					
		Gal/Min	L/Seg	H/día	Min/día	Seg/día	L/día	M3/día	L/Seg
1990		590	37	24	1440	86400	3211488	3211	37
1991		598	38	24	1440	86400	3255033.6	3255	38
1992		600	38	24	1440	86400	3265920	3266	38
1993		610	38	24	1440	86400	3320352	3320	38
1994		615	39	24	1440	86400	3347568	3348	39
1995		640	40	24	1440	86400	3483648	3484	40
1996		643	41	24	1440	86400	3499977.6	3500	41
1997		634	40	24	1440	86400	3450988.8	3451	40
1998		621	39	24	1440	86400	3380227.2	3380	39
1999		618	39	24	1440	86400	3363897.6	3364	39
2000		649	41	24	1440	86400	3532636.8	3533	41
2001		650	41	24	1440	86400	3538080	3538	41
2002		651	41	24	1440	86400	3543523.2	3544	41
2003		652	41	24	1440	86400	3548966.4	3549	41
2004		655	41	24	1440	86400	3565296	3565	41
2005		660	42	24	1440	86400	3592512	3593	42
2006		668	42	24	1440	86400	3636057.6	3636	42
2007		670	42	24	1440	86400	3646944	3647	42
2008		671	42	24	1440	86400	3652387.2	3652	42
2009		676	43	24	1440	86400	3679603.2	3680	43
2010		678	43	24	1440	86400	3690489.6	3690	43
2011		678	43	24	1440	86400	3690489.6	3690	43
2012		678	43	24	1440	86400	3690489.6	3690	43
2013		670	42	24	1440	86400	3646944	3647	42
2014		680	43	24	1440	86400	3701376	3701	43
2015		683	43	24	1440	86400	3717705.6	3718	43
2016		684	43	24	1440	86400	3723148.8	3723	43
2017		690	43	24	1440	86400	3755808	3756	43
2018		700	44	24	1440	86400	3810240	3810	44
2019		705	44	24	1440	86400	3837456	3837	44
PROMEDIO							3559308.48	3559.30848	41

Tabla 4. Caudales promedio de bombeo diario. Fuente: empresa minera de la zona.

Con la información anterior y llevada a medidas de hm^3 por año, se realiza un bombeo desde el interior de las minas del orden de $1.29 \text{ hm}^3/\text{año}$, este es el bombeo realizado por la empresa que proporciona los datos, y no se tiene en cuenta los bombeos de las otras minas (de carácter informal) ubicadas en la zona, alrededor de 15.

En la figura 15, se puede observar un perfil esquematizado de la zona de estudio, donde se observa la zona con intensa meteorización (saprolito) y el batolito con un alto

fracturamiento, idealizando el modelo de donde se ubicaría la superficie freática separando la zona saturada de la no saturada.

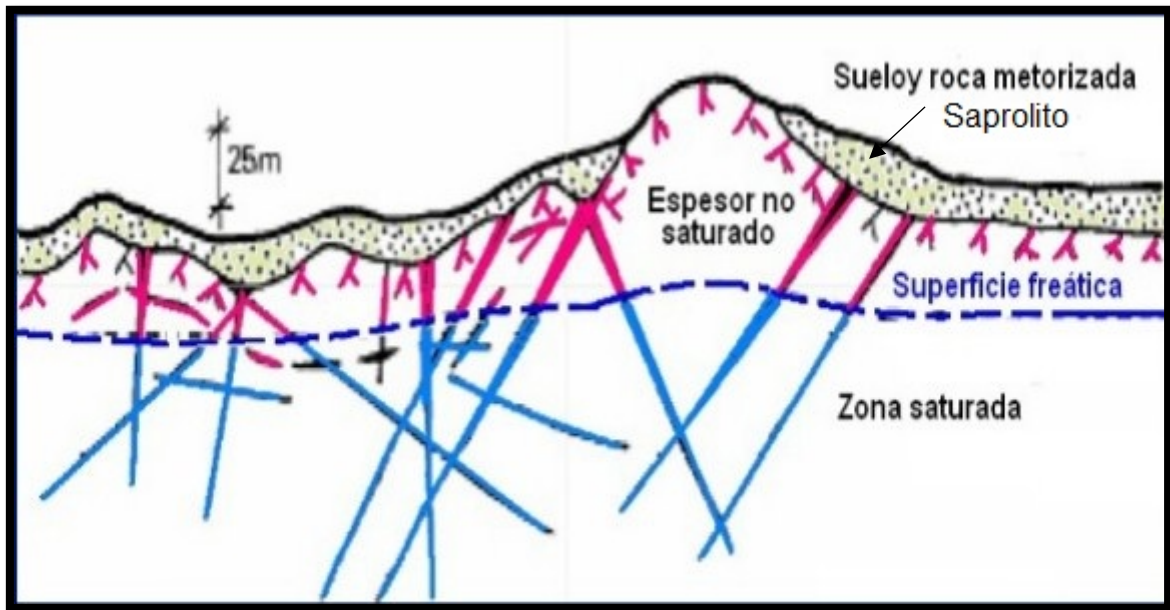


Figura 16. Perfil idealizado de la zona de estudio. (Fuente: Gran Colombia Gold, 2017).

7.1.2 ACUÍTARDOS DE MEDIA A BAJA IMPORTANCIA HIDROGEOLÓGICA

Dada su naturaleza poco permeable y semiconfinada, el saprolito o zona de alteración del batolito de Segovia queda inmerso en esta clasificación.

Acuífardo de Segovia

Clasificado así en el presente trabajo, hace referencia a la formación que se encuentra suprayaciendo al batolito de Segovia y que corresponde a su zona de alteración. Esta formación se encuentra a lo largo de toda la cuenca, variando considerablemente su espesor desde los 5 hasta los 45 metros en promedio. Su composición es principalmente arcillas poco consolidadas que presentan una tonalidad marrón.

A raíz de su composición arcillosa se considera que el saprolito en general presenta una baja conductividad hidráulica, la cual puede variar de acuerdo al grado de meteorización de la Formación, sumado a niveles de agrietamiento que se pueden presentar en el saprolito.

Se presenta en la figura 16 un modelo conceptual relacionado al área de estudio, donde se representan los espesores promedio del saprolito, de igual forma que la zona correspondiente al batolito con algunos sistemas de túneles realizados por actividades mineras que se podrían presentar en el mismo.

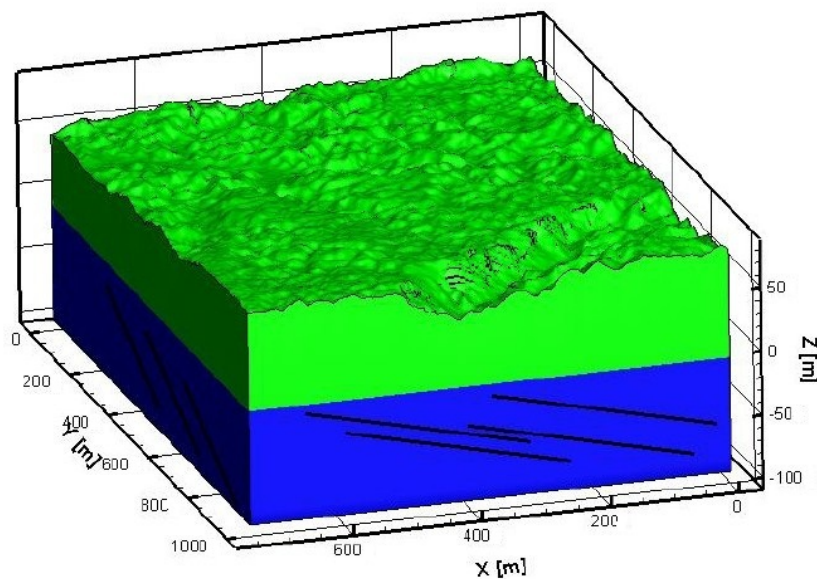


Figura 17. Esquema conceptual del área de estudio: en color verde el saprolito, y en azul el batolito con algunos sistemas de túneles (líneas negras). Fuente: Corp G., 2016.

7.2 MOVIMIENTO DEL AGUA SUBTERRÁNEA

Para definir la circulación de agua es necesario conocer las características hidráulicas del medio a través del cual ésta fluye. En este caso en particular, los materiales se comportan hidráulicamente como un medio fracturado donde domina la permeabilidad secundaria definida por las discontinuidades estructurales; no quiere decir esto que la permeabilidad primaria no actúe, simplemente tiene un aporte muy bajo o inexistente. En este caso, como la vía de circulación del agua son las fracturas se deduce que la dirección dependerá del rumbo preferencial de fracturamiento combinado con la capacidad de dicho fracturamiento para transportarla.

Teniendo en cuenta que el flujo subterráneo en el macizo está controlado por estructuras

generando una permeabilidad secundaria, es necesario realizar un análisis hidro-estructural que permita determinar la orientación preferencial de dicho flujo. Para esto es necesario realizar un análisis estructural detallado del macizo.

Las estructuras presentes en el macizo presentan rellenos de diversas composiciones, como se muestra en la Tabla 5.

SISTEMA	RELLENO
N20-30E	Cuarzo y Sulfuros
N70-80E	Arcillas
E-W	Fracturamiento sin relleno

Tabla 5. Tipología de relleno de las estructuras asociadas al macizo fracturado.

De acuerdo con esto, el almacenamiento y el flujo principal en el macizo se puede presentar para el sistema de orientación E - W, definiendo la dirección de dicho flujo.

7.3 CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA (PERMEABILIDAD)

El suelo es en un sentido general, un conjunto de partículas entre las que existen huecos, poros, o intersticios de manera que el agua puede almacenarse o fluir con menor o mayor dificultad a través de ellos. La manera como esos poros, huecos o intersticios estén intercomunicados entre sí define lo que se denomina permeabilidad o conductividad hidráulica, que mide la "habilidad" del agua para circular a través del suelo.

En el caso de la cuenca La Cianurada, esta conductividad se encuentra estrictamente relacionada a la intensidad del fracturamiento que presenta el batolito, y se ubica en el apartado de rocas cristalinas de la Tabla 6.

El coeficiente de permeabilidad fue enunciado por primera vez por Darcy en 1856. Se mide en unidades de velocidad (m/s, m/día, cm/s) y es quizás el parámetro hidráulico que registra mayores variaciones en función del tipo de suelo.

La Tabla 6 muestra valores representativos de conductividad hidráulica para una variedad

de materiales. Como puede verse, k, puede variar sobre muchos ordenes de magnitud en un acuífero que contenga diferentes tipos de material, por lo tanto, las velocidades y tasas de flujo también variarían en el mismo rango.

Material	Permeabilidad (k) (cm/s)
Depósitos Sedimentarios no consolidados	
Gravas	3 – 3x10 ⁻⁴
Arena gruesa	6x10 ⁻¹ – 9x10 ⁻⁵
Arena media	6x10 ⁻² – 9x10 ⁻⁵
Arena fina	2x10 ⁻² – 2x10 ⁻⁵
Limo, Loess	2x10 ⁻³ – 1x10 ⁻⁷
Till	2x10 ⁻⁴ – 1x10 ⁻¹⁰
Arcilla	5x10 ⁻⁷ – 1x10 ⁻⁹
Arcilla marina no meteorizada	2x10 ⁻⁷ – 8x10 ⁻¹¹
Rocas Sedimentarias	
Caliza Cárstica	2 – 1x10 ⁻⁴
Calizas y Dolomitas	6x10 ⁻⁴ – 1x10 ⁻⁷
Areniscas	6x10 ⁻⁴ – 3x10 ⁻⁸
Lodolitas	2x10 ⁻⁷ – 1x10 ⁻¹¹
Rocas Cristalinas	
Basalto permeable	2 – 4x10 ⁻⁵
Ígneas y metamórficas fracturadas	3x10 ⁻² – 8x10 ⁻⁷
Basaltos	4x10 ⁻⁵ – 2x10 ⁻⁹
Ígneas y metamórficas masivas	2x10 ⁻⁸ – 3x10 ⁻¹²
Granitos meteorizados	3x10 ⁻⁴ – 5x10 ⁻³

Tabla 6. Valores de conductividad hidráulica. Tomado de Bedient et al., 1994.

Según la tabla anterior, los valores de permeabilidad (K) asociados a rocas ígneas y metamórficas fracturadas se encuentra en el rango de 3×10^{-2} a 8×10^{-9} .

7.4 CALIDAD DEL AGUA

Toda la información presente en este apartado tiene por fuente el Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico de la Quebrada La Cianurada, realizado por la autoridad ambiental del departamento de Antioquia (CORANTIOQUIA) en el año 2014.

El término “calidad del agua” tiene importancia en relación con el uso que se le pretenda dar; es decir, para decidir si esta puede tener un propósito particular, su calidad debe de satisfacer los criterios definidos para ese uso, caracterizados en función de atributos físicos, químicos y biológicos. Bajo estas consideraciones, se dice que el agua está contaminada cuando su composición no satisface los criterios de buen estado cualitativo, afectando a su uso real o potencial.

Para determinar la calidad del agua de la zona de estudio, CORANTIOQUIA realizó un plan de monitoreo donde seleccionaron 24 sitios a lo largo del cuerpo de agua principal y sus principales afluentes (figura 18).

En términos de oxígeno disuelto se presentan valores superiores a 4.0mg/L (figura 19) cumpliendo lo establecido en la normatividad colombiana.

Los resultados obtenidos para coliformes fecales, sobrepasan lo estipulado en la normatividad colombiana para los diferentes usos el agua (0 UFC para agua potable y 10 UFC para el hábitat de peces), reflejan el alto grado de contaminación microbiológica que se encuentra en la cuenca (figura 20).

Los valores de referencia para el cianuro, si bien muestran una disminución en los valores aguas abajo, presenta valores que sobrepasan los estándares de la OMS (>0.07mg/L) generando riesgos para la salud humana (figura 21). La mayor concentración se presentó en el punto R2 con 5.94mg/L, seguido de los puntos R3 y R4.

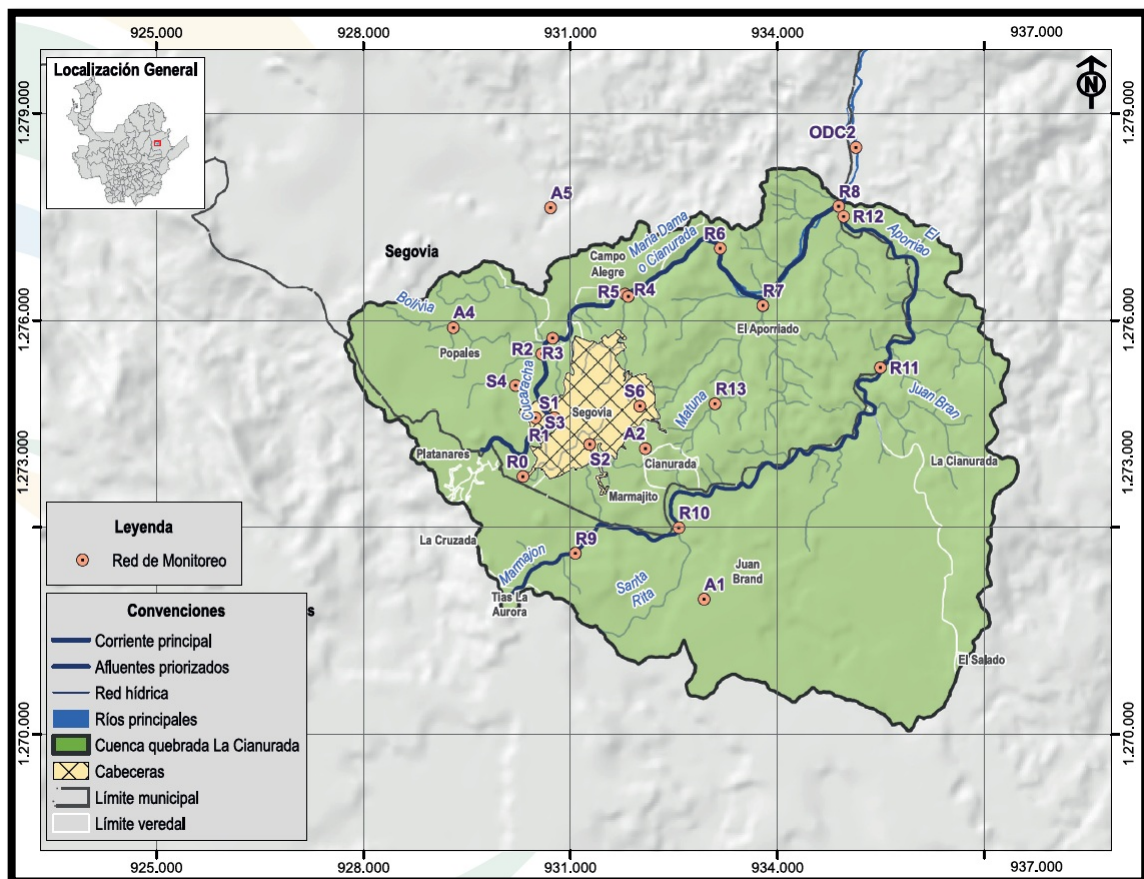


Figura 18. Red de monitoreo. Fuente CORANTIOQUIA, 2014.

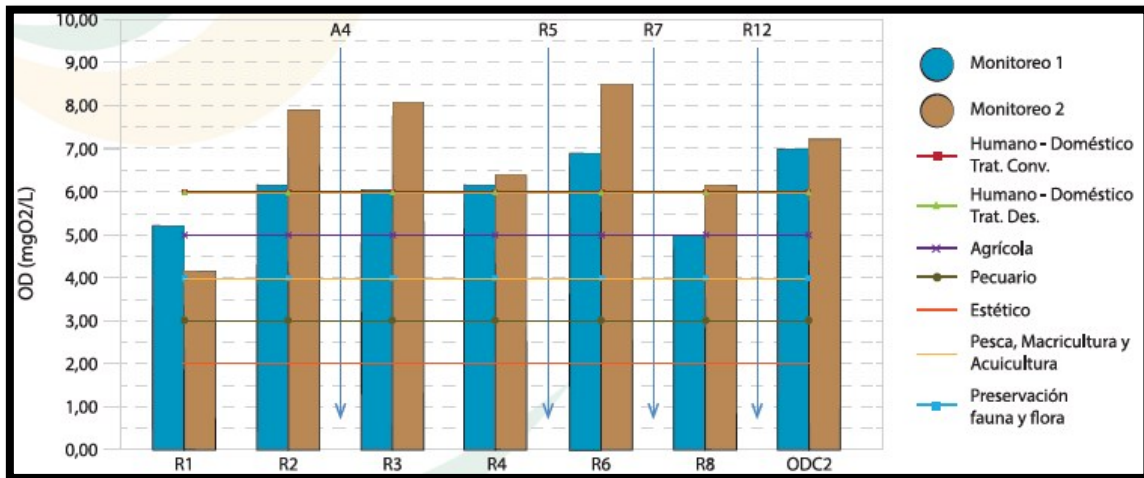


Figura 19. Oxígeno disuelto. Fuente CORANTIOQUIA, 2014.

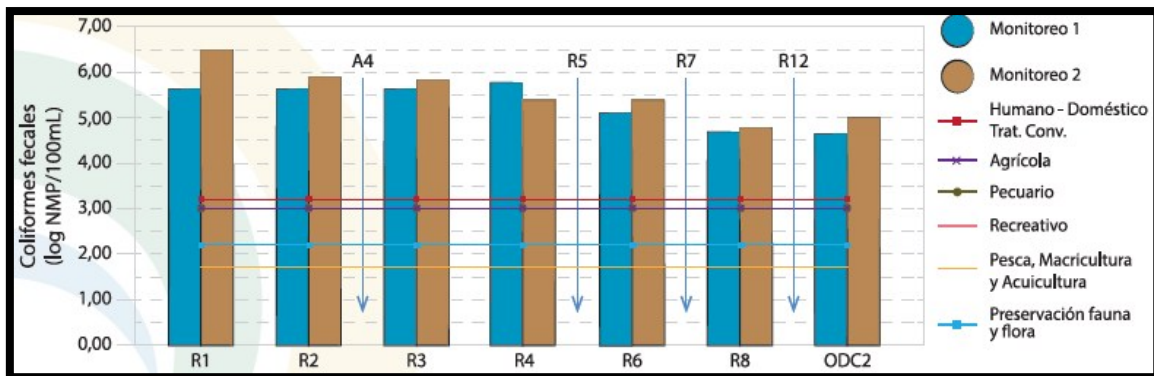


Figura 20. Coliformes fecales. Fuente CORANTIOQUIA, 2014.

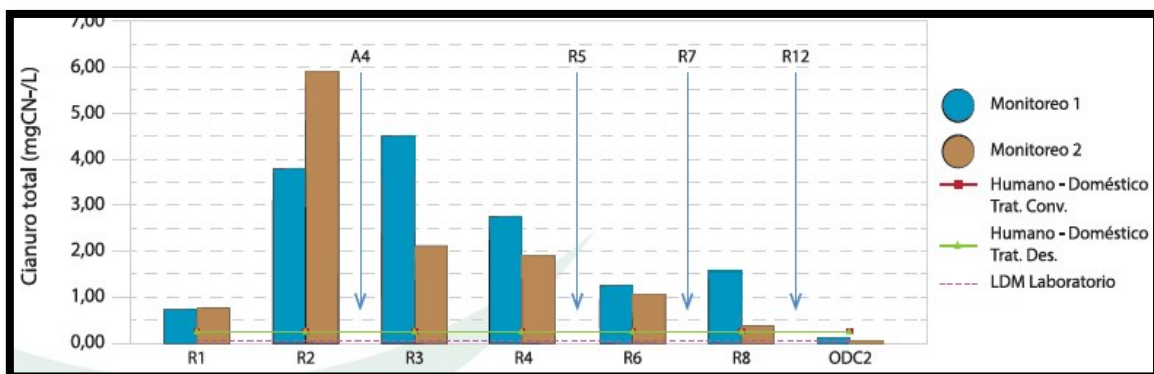


Figura 21. Cianuro total. Fuente CORANTIOQUIA, 2014.

En cuanto al mercurio total se registraron valores muy altos, principalmente en los sitios R1 (0.186 mgHg/L), R2 (0.252 mgHG/L) y R3 (0.182 mgHG/L), las cuales pueden provocar

diversos problemas para la salud (figura 22).

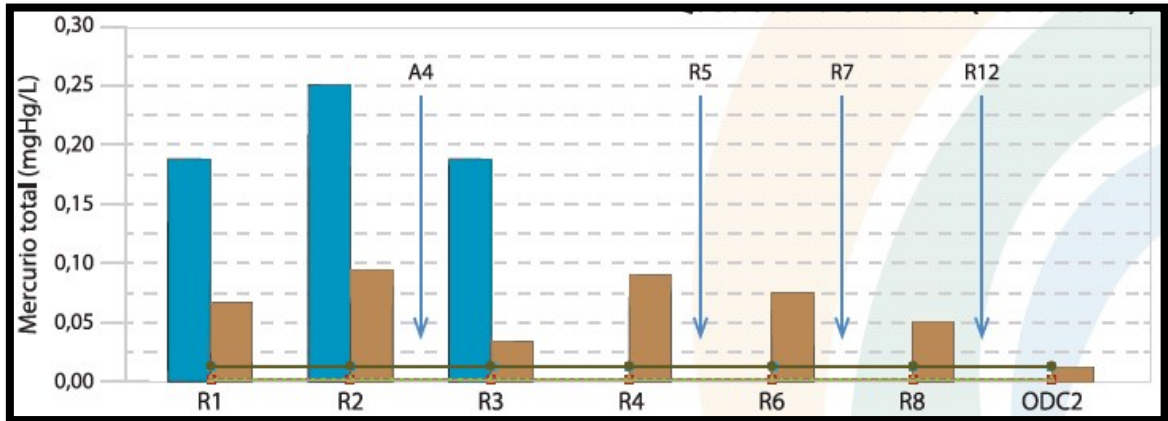


Figura 22. Mercurio total. Fuente CORANTIOQUIA, 2014.

A partir de los datos anteriores se genera un Índice de Calidad de Agua (ICA), que surge como herramienta para la evaluación del recurso hídrico, a través de la combinación de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, a los que se le asignó un valor numérico ponderado de acuerdo a su concentración en el agua. Para este caso se siguió la metodología del IDEAM 2011 con valores entre 0.1 y 1 como se muestra a continuación:

Señal de alerta	Clasificación de la calidad del agua	Categorías de valores que puede tomar el indicador
AZUL	Excelente	0,91 - 1,00
VERDE	Buena	0,71 - 0,90
AMARILLO	Media	0,51 - 0,70
NARANJA	Mala	0,26 - 0,50
ROJO	Muy Mala	0,00 - 0,25

Figura 23. Clasificación de calidad del agua. Fuente CORANTIOQUIA, 2014.

Unificando la información anteriormente mencionada, CORANTIOQUIA genera un mapa con el ICA referente a los cuerpos de agua ubicados dentro de la cuenca La Cianurada, donde toma en cuenta los afluentes principales (Figura 24).

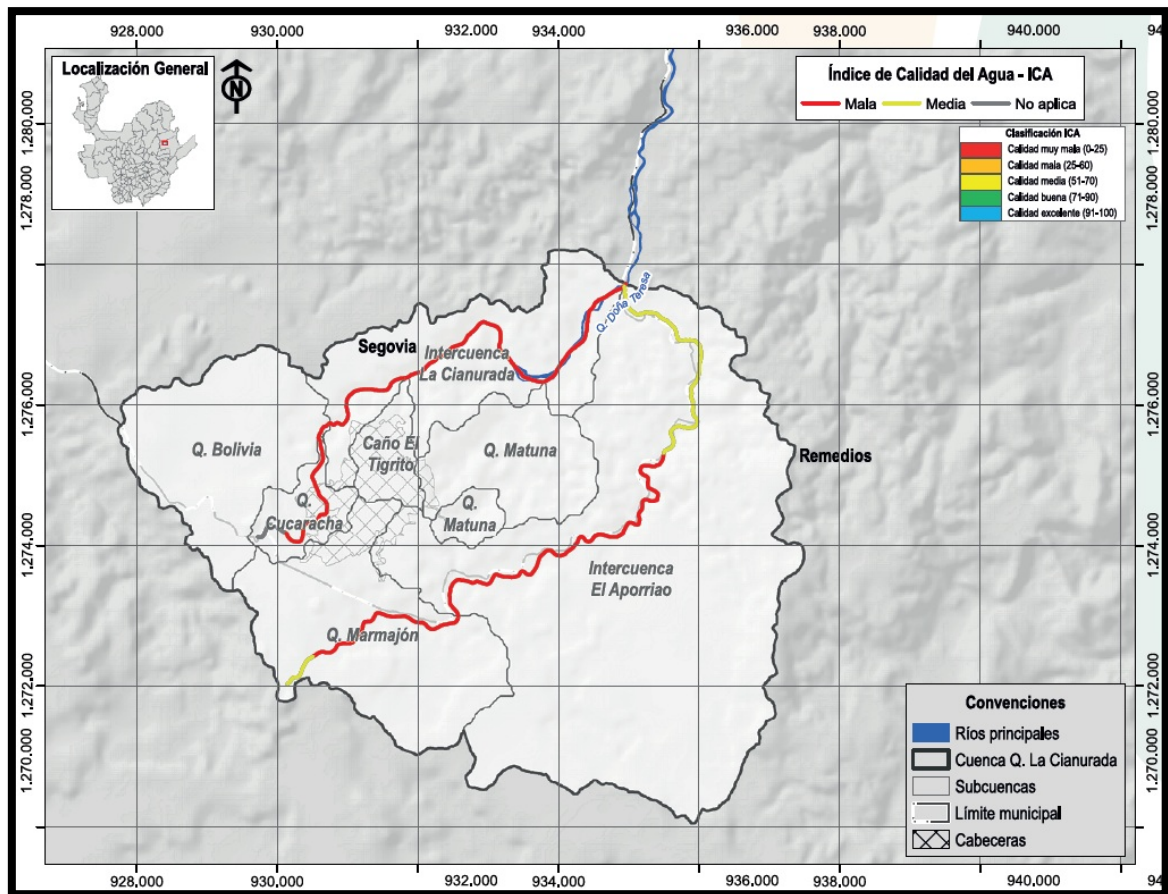


Figura 24. Índice de calidad del agua (ICA). Fuente CORANTIOQUIA, 2014.

7.5 AFECTACIONES POR ACTIVIDADES MINERAS

Se debe tener en cuenta el impacto de la intensa actividad minera que se desarrolla en la zona y que genera alteraciones en las trayectorias de flujo subterráneo y sus propiedades químicas; es decir, incrementa la permeabilidad de la roca por la construcción de túneles al interior del macizo rocoso con dimensiones variadas que oscilan principalmente entre labores con 2.5 metros de alto por 2.5 metros de ancho, hasta labores de 1.4 metros de alto por 1.8 metros de ancho y que actúan como canales preferenciales para el flujo de agua dentro del macizo o generando superficies de contacto y que eventualmente, permiten el flujo de agua entre unidades hidrogeológicas que estaban desconectadas o entre la superficie y el subsuelo.

Parte de estos impactos también a los que se asocian actividades mineras subterráneas, es el flujo o drenaje de agua desde las formaciones permeables vecinas hacia el interior de las excavaciones (Pérez, 2013). Estos efectos pueden verse extendidos por varios kilómetros

ligados a la profundidad de las explotaciones y deriva en el abatimiento del nivel freático a nivel local pudiendo inclusive afectarse a nivel regional partiendo de sus características de abatimiento como radio de influencia, tipo de acuífero, entre otros.

La química del agua subterránea puede ser potencialmente ácida dada la interacción de esta con los sulfuros presentes en las rocas. Este proceso, complementado a la presencia de oxígeno, son potenciales generadores de drenajes ácidos provenientes de las actividades mineras, con lo cual el contacto con rocas inalteradas recientemente expuestas por la construcción de los túneles, puede producir reacciones que cambien la calidad del agua subterránea (Blodgett, 2002). Por ejemplo, cuando el agua subterránea atraviesa una roca altamente mineralizada en un área minera puede arrastrar consigo altas concentraciones de metales que luego descarga en otros acuíferos o en cuerpos de agua superficiales. La magnitud el impacto derivado de esta dinámica dependerá del tratamiento del agua que pueda ser implementado en dichas actividades y de la localización de la descarga.

Los efectos de subsidencia que se generan en la zona a causa de la deformación y/o colapso de las labores (túneles) construidas para la extracción minera, causan la proliferación de fracturas induciendo el aumento en su apertura y longitud al igual que el flujo vertical, aumentando directamente la permeabilidad de las formaciones rocosas, de especial índole si estas alcanzan la superficie. Esto produce junto con lo anterior, un incremento de la recarga en los túneles forzando al incremento del caudal de desagüe y por ende el abatimiento del nivel freático.

8. DISCUSIÓN

Dadas las características geológicas del área de estudio, las cuales son asociadas principalmente al cuerpo conocido como batolito de Segovia y el cual se trata de una roca plutónica en su mayoría de composición granodiorítica con algunas intrusiones de diques porfiríticos más básicos (dioríticos), nos presentan desde el punto de vista hidrogeológico, un acuífero de porosidad secundaria asociado al alto índice de fracturamiento presente en este macizo; fracturas asociadas a los sistemas de fallas, zonas de cizallamiento, y las familias de diaclasas que se observan en la zona actuando como zonas de flujo preferencial. Sumado a esto, la actividad minera subterránea que se desarrolla en el área de estudio genera

en su expansión la construcción de túneles, los que a su vez actúan como superficies para el flujo de agua subterránea, agua que en su paso por las zonas mineralizadas y en contacto con oxígeno, son potencialmente generadoras de drenajes ácidos provenientes de las actividades mineras desarrolladas en el área.

De igual forma el batolito presenta una zona de alteración (saproilito) con espesores promedio de 5 a 45 metros y de composición arcillosa, que hidrogeológicamente podría comportarse como un acuífardo, variando su comportamiento hidráulico dependiendo del grado de meteorización y fracturamiento al que pudo ser expuesto esta zona del batolito.

Las zonas de recarga para el acuífero se ven asociadas entonces a las partes donde el macizo rocoso inalterado esté en contacto directo con la superficie o zonas donde el espesor del saprolito sea reducido o altamente fracturado.

El suministro de datos (régimen de bombeo, composición química del agua, trazado de labores subterráneas) se ve en gran medida restringido por las políticas de confidencialidad de las empresas mineras de la zona, razón por la cual se generaron algunas limitaciones en los datos presentados para este trabajo y se debió recurrir a la realización de algunos cálculos teóricos en algunos apartados.

9. CONCLUSIONES

Se realiza la caracterización hidrogeológica de la cuenca la Cianurada.

Se elabora un modelo conceptual de la cuenca, delimitando las unidades hidrogeológicas existentes donde se tiene acuífero fracturado de Segovia (en color azul) y el acuífardo de Segovia (en color verde). (Figura 17).

Fue posible analizar la información hidrometeorológica de la zona, conociendo el comportamiento de los elementos hídricos presentes en la zona tales como la precipitación, escorrentía, infiltración, etc., estos últimos basados en modelos teóricos.

Los sistemas de flujo preferencial en la zona de estudio están asociados a la porosidad

secundaria como fracturas, fallas, diaclasas, etc., que son las principales estructuras por las que se infiltra el agua.

Los impactos ambientales más relevantes de la actividad minera en el componente hidrogeológico, en el área de estudio, están relacionados con la extracción de agua desde los túneles y la posible contaminación de las aguas subterráneas cuando interactúan con las aguas superficiales.

Por medio de los datos de bombeo suministrados por la empresa minera, fue posible calcular la extracción anual realizada por una empresa minera en la zona, y la cual se ubica en el orden de 1.29 hm³/año, este cálculo no toma en cuenta los datos de bombeo de las diversas minas de carácter informal que se ubican en la zona de estudio.

Fue posible observar zonas de flujo preferente en las fracturas del macizo rocoso, permitiendo asociar éstas a zonas de recarga del acuífero.

Se analizaron datos referentes a la calidad del agua, tomando como guía el estudio realizado por CORANTIOQUIA, los cuales arrojan como resultado una mala calidad del agua para la zona de estudio, en dicho análisis se obtuvieron comportamientos anómalos de sustancias como el cianuro, mercurio total, y coliformes fecales que sobrepasan los valores estipulados por la Ley Colombiana y la OMS.

10. RECOMENDACIONES

Se recomienda la elaboración de un estudio hidrogeológico detallado, con la elaboración de pozos exploratorios, instalación de piezómetros, entre otros, para afianzar el conocimiento y conocer el comportamiento hidrogeológico de la zona.

Se hace necesaria la elaboración de un modelo estructural de la zona para una mejor comprensión de las zonas preferenciales de flujo y como es comportamiento en profundidad.

La afectación que causan las actividades mineras en el flujo subterráneo, hace necesario un

conocimiento del trazo de dichas labores para tener un conocimiento sólido de cómo es el flujo de agua por estos túneles realizados en el macizo rocoso.

Es necesario un adecuado seguimiento a los índices de calidad de agua dado sus valores anómalos y potencialmente peligrosos para la salud humana.

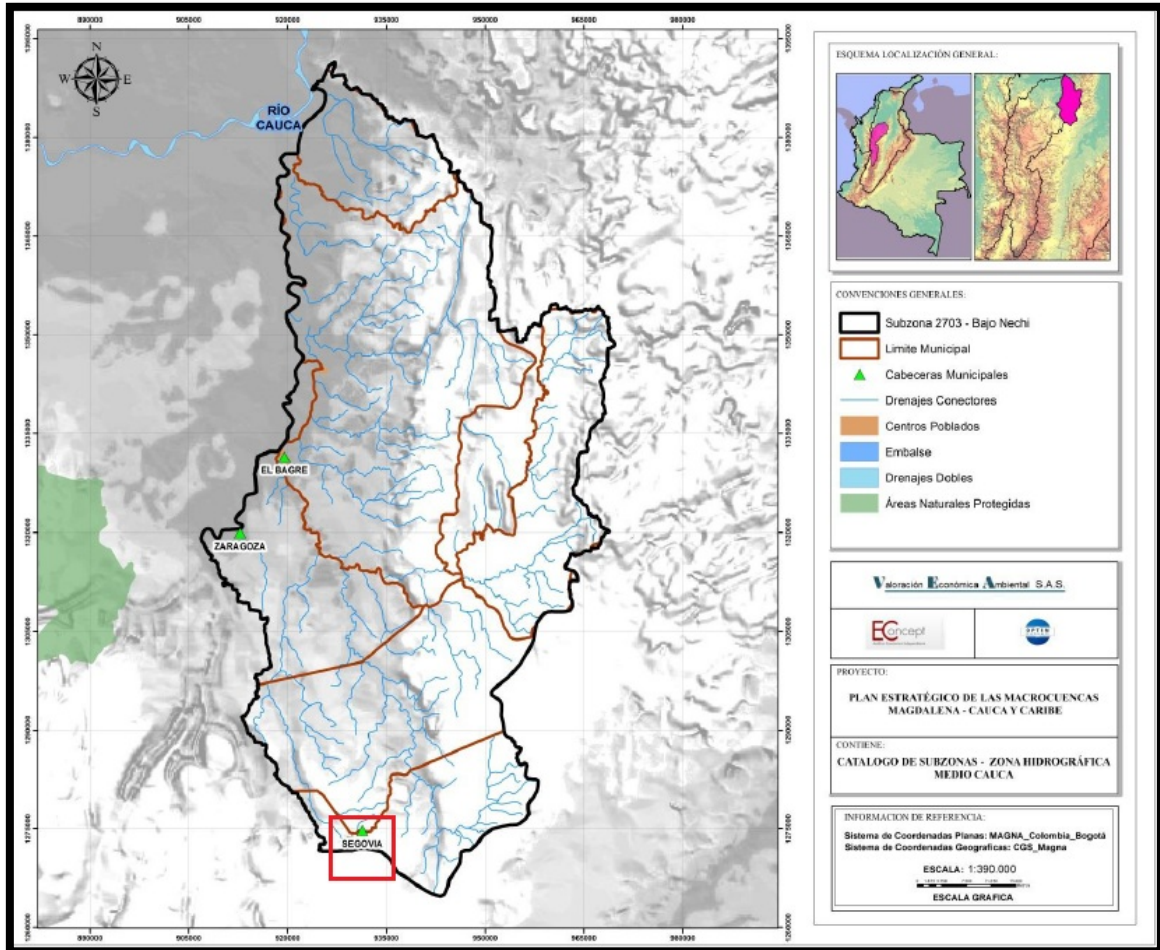
11. BIBLIOGRAFÍA

- Bedient, P. B. (1994). Ground Water Contamination. Transporte and remediation. New Jersey, USA.*
- Blodgett, S. (2002). Subsidence Impacts at the Molycorp Molybdenum Mine Questa, New Mexico.*
- Castany, G. (1975). Prospección y explotación de las aguas subterráneas.*
- CORANTIOQUIA. (2014). Plan de ordenamiento del recurso hídrico de la quebrada La Cianurada. Medellín.*
- Corp, G. C. (2015). Estudio Ambiental RPP 140. Segovia.*
- Corp, G. (2016). Respuesta a requerimientos sobre medio Abiótico. Segovia.*
- Colombiano, S. G. (2017). Mapa Geológico de Colombia. Bogotá.*
- Cook, G. P. (2003). A guide to regional groundwater flow in fractured rock aquifers, csiro, cm digital, Australia, 115 p.*
- Feininger, e. a. (1972). Geología de parte de los departamentos de Antioquia y Caldas.*
- Flores, J. d. (2015). Caracterización hidrogeológica, hidrogeoquímica e isotópica de la cuenca Quilca - Vitor - Chili, sur de Perú. Lima.*
- G. Allen, e. a. (2006). Evapotranspiración del cultivo. ROMA: ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACIÓN.*
- González, J., Terá, B., & Ordóñez Carmona, O. (2010). Geología de la parte oriental del distrito minero Segovia - Remedios. Medellín: Boletín Ciencias de la Tierra.*
- IDEAM. (2005). Atlas Climatológico de Colombia, Parte II. Bogota, D.C.*
- IDEAM. (2006). Atlas de Vientos y Energía Eólica de Colombia. Bogota, D.C.*
- IDEAM. (2010). Atlas Climatológico de Colombia.*

- IDEAM. (2011). *Hoja metodológica del indicador Índice de calidad del agua (Versión 1,00), Sistema de Indicadores Ambientales de Colombia - Índice de calidad del agua superficial - 10p.*
- Mijailov, L. (1989). *HIDROGEOLOGÍA. Moscu: MJR MOSCU.*
- Pérez, A. J. (2013). *Impacto de la minería subterránea en acuíferos: perspectivas en el contexto colombiano. Inge@Uan.*
- Planeación, D. A. (2016). *Escorrentía superficial directa, por subregiones y municipios. Medellín.*
- Restrepo, J. J., & Toussaint, J. F. (1988). *Terranes and continental accretion in the Colombian Andes. 189-193.*
- Román, F. J. (19 de 08 de 2019). <http://hidrologia.usal.es>. Obtenido de <http://hidrologia.usal.es/temas/Evapotransp.pdf>
- SNOW. (1969). *Anisotropic Permeability of Fractured Media.*
- Thornthwaite, C. (1948). *An Approach Toward a Rational Classification of Climate.*
- Thornthwaite, C. W. (1948). *An approach toward a rational classification of climate. Geographical Review, 38(1), 55–94.*
- Vélez, J., Poveda, G., & Mesa, O. (1999). *Balances hidrológicos de Colombia. Ciencias de la tierra.*
- Villarroya, F. (2009). *Tipos de acuíferos y parámetros hidrogeológicos . Madrid.*

ANEXOS

ANEXO 1.



Mapa realizado para el ministerio del medio ambiente colombiano, en el cual se catalogan las Macrocuencas del Magdalena Cauca y Caribe. Tomado de: Catálogo de Subzonas para los Talleres de “Análisis Estratégico” en la Formulación de los Planes Estratégicos de las Macrocuencas Magdalena Cauca y Caribe.

ANEXO 2.

FECHA	NOMBRE	TEMPERATUR A AMBIENTE	TEMPERATURA DEL AGUA	CAUDAL (Q)	pH
30/04/2018	Qda. La Cianurada	30.0 °C	27.2 °C	1095.3 L/s	7.83
28/05/2018	Qda. La Cianurada	25 °C	22.4 °C	1100.1 L/s	7.02
29/06/2018	Qda. La Cianurada	25.7 °C	23 °C	1105.4 L/s	8.04
30/07/2018	Qda. La Cianurada	25.5 °C	23.1 °C	1098.2 L/s	9.22

Tabla correspondiente a la toma de datos en la cuenca La Cianurada, donde se colectaron datos referentes a la temperatura, caudal y pH de la quebrada La Cianurada.