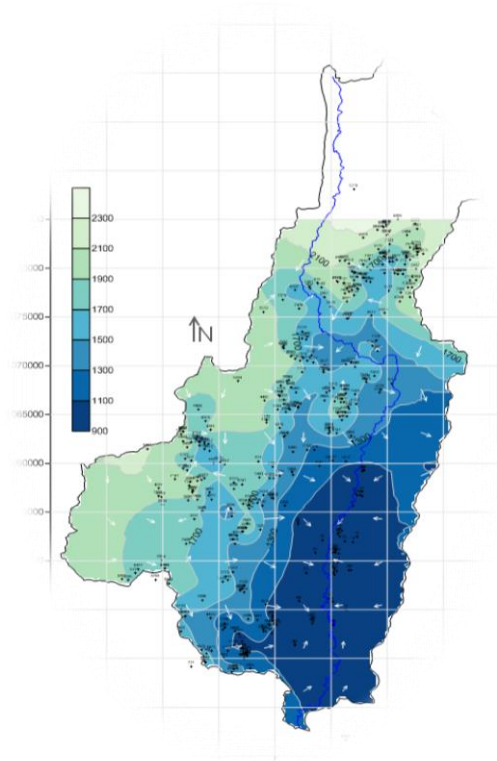


III. CARACTERIZACIÓN DEL MEDIO FÍSICO – BIÓTICO



III-3. HIDROGEOLOGÍA

ABRIL 2017

PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE LA CUENCA DEL RÍO RISARALDA
FASE DE DIAGNÓSTICO

CONSORCIO CUENCA RISARALDA
Carrera 18 E Nro 42 B 352, local 5
(6) 3141728, 314 7922544, Pereira
pomcasrisaralda@gmail.com



TABLA DE CONTENIDO

| | | |
|--------|--|----|
| 1. | INTRODUCCIÓN | 7 |
| 1.1. | Objetivo | 7 |
| 1.2. | Marco de referencia..... | 7 |
| 1.3. | Metodología..... | 8 |
| 1.4. | Estudios anteriores..... | 9 |
| 2. | INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA SUBTERRÁNEA | 13 |
| 2.1. | Inventario de puntos de agua año 1994 | 13 |
| 2.2. | Inventario y actualización de puntos de agua año 2014..... | 14 |
| 2.3. | Actualización de puntos de agua año 2015 | 15 |
| 2.4. | Concesiones de agua subterránea | 15 |
| 2.4.1. | Concesiones de agua en pozos | 15 |
| 2.4.2. | Concesiones de agua en manantiales | 16 |
| 3. | PROSPECCIÓN GEOELÉCTRICA | 17 |
| 3.1. | Fundamentos Teóricos | 18 |
| 3.2. | Procesamiento e interpretación de datos | 19 |
| 3.2.1. | Secciones geoeléctricas..... | 21 |
| 4. | CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS | 28 |
| 5. | UNIDADES HIDROGEOLOGÍCAS | 29 |
| 5.1. | Sedimentos y Rocas con Flujo Intergranular / Porosidad Primaria..... | 33 |
| 5.1.1. | Acuíferos de alta productividad, capacidad específica mayor a 2 l/s/m | 33 |
| 5.1.2. | Acuíferos de moderada productividad, capacidad específica entre 1 y 2 l/s/m | 35 |
| 5.1.3. | Acuíferos de baja productividad, con capacidad específica entre 0.05 y 1 l/s/m.... | 36 |
| 5.2. | Sedimentos y Rocas con limitados Recursos de Aguas Subterráneas | 37 |
| 5.2.1. | Acuíferos con muy baja productividad, capacidad específica promedio menor de 0.05 l/s/m, que se comportan como acuicludos..... | 37 |
| 5.2.2. | Unidades con muy baja productividad, capacidad específica promedio menor de 0.05 l/s/m, que se comportan como acuifugos | 38 |
| 6. | FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA Y ZONAS DE RECARGA Y DESCARGA..... | 39 |
| 6.1. | Flujo del agua subterránea | 39 |
| 6.2. | Zonas de recarga y descarga de acuíferos | 39 |
| 7. | HIDROGEOQUÍMICA | 59 |
| 8. | VULNERABILIDAD DE LOS ACUÍFEROS A LA CONTAMINACIÓN | 61 |
| 8.1. | Grado de confinamiento hidráulico – Parámetro “G” | 64 |

| | | |
|------|--|----|
| 8.2. | Ocurrencia del sustrato litológico – Parámetro “O” | 64 |
| 8.3. | Distancia al agua subterránea – Parámetro “D” | 64 |
| 8.4. | Zonificación del grado de vulnerabilidad..... | 69 |
| 9. | MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL..... | 71 |
| 10. | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 77 |
| 11. | BIBLIOGRAFÍA | 80 |

LISTADO DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Distribución de puntos de agua actualizados e inventariados en el año 2014 | 15 |
| Figura 2. Distribución porcentual de concesiones de agua en manantiales por municipio..... | 16 |
| Figura 3. Distribución porcentual de caudales asociados a usos del agua en concesiones de manantiales..... | 17 |
| Figura 4. Arreglo Schlumberger utilizado en estudios geoelectricos de sondeos eléctricos | 18 |
| Figura 5. Localización de Sondeos Eléctricos Verticales y cortes geoelectricos..... | 22 |
| Figura 6. Sección Geoelectrica A – A' | 23 |
| Figura 7. Corte Geoelectrico B – B' | 25 |
| Figura 8. Corte Geoelectrico C-C' | 27 |
| Figura 9. Direcciones del flujo subterráneo local para acuífero de la Cuenca del Río Risaralda | 40 |
| Figura 10. Distribución del parámetro Pendiente en la Cuenca del Río Risaralda | 45 |
| Figura 11. Distribución del parámetro Tipo de suelo en la Cuenca del Río Risaralda..... | 47 |
| Figura 12. Distribución del parámetro Tipo de roca en la Cuenca del Río Risaralda | 50 |
| Figura 13. Distribución del parámetro cobertura en la Cuenca del Río Risaralda | 53 |
| Figura 14. Distribución del parámetro Uso del suelo en la Cuenca del Río Risaralda | 56 |
| Figura 15. Zonas de Recarga Potencial | 58 |
| Figura 16. Sistema de indexación GOD para evaluación de Vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación | 62 |
| Figura 17. Distribución espacial del parámetro G – Condición del acuífero | 66 |
| Figura 18. Distribución espacial del parámetro O – Predominio litológico en zona no saturada | 67 |
| Figura 19. Distribución espacial del parámetro D – Distancia al agua subterránea | 68 |
| Figura 20. Distribución espacial del índice de vulnerabilidad del acuífero superior de la Cuenca del Río Risaralda..... | 70 |
| Figura 21. Esquema del Modelo Hidrogeológico Conceptual de la Cuenca del Río Risaralda | 72 |

LISTADO DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Consumo de agua en captaciones inventariadas en el año 1994 | 14 |
| Tabla 2. Características de pozos profundos ubicados en Cuenca del Río Risaralda | 14 |
| Tabla 3. Puntos de agua subterránea ubicados dentro de la Cuenca del Río Risaralda | 17 |
| Tabla 4. Resistividades reales típicas de los diferentes sedimentos y rocas | 19 |
| Tabla 5. Estudios geoeléctricos consultados | 20 |
| Tabla 6. Coeficiente de almacenamiento de acuerdo al tipo de acuífero | 28 |
| Tabla 7. Potencialidad hidrogeológica de las unidades litoestratigráficas en la Cuenca del Río Risaralda | 30 |
| Tabla 8. Unidades Hidrogeológicas para la cuenca del Río Risaralda | 34 |
| Tabla 9. Valoración del potencial de recarga | 42 |
| Tabla 10. Ponderación del parámetro pendiente en la cuenca del Río Risaralda | 43 |
| Tabla 11. Ponderación del parámetro Tipo de suelos en la cuenca del Río Risaralda | 46 |
| Tabla 12. Ponderación del parámetro Tipo de roca en la Cuenca del Río Risaralda | 48 |
| Tabla 13. Ponderación del parámetro cobertura en la Cuenca del Río Risaralda | 52 |
| Tabla 14. Ponderación del parámetro Uso del suelo en la Cuenca del Río Risaralda | 55 |
| Tabla 15. Potencial de recarga de los acuíferos libres en la cuenca del Río Otún | 57 |

LISTADO DE ANEXOS

- Anexo 1. Puntos de agua ubicados en la cuenca del Río Risaralda
- Anexo 2. Concesiones de agua subterránea en cuenca del Río Risaralda
- Anexo 3. Sondeos Eléctricos Verticales ubicados en la cuenca del Río Risaralda
- Anexo 4. Mapa hidrogeológico de la cuenca del Río Risaralda
- Anexo 5. Calificación de parámetros para indexación de vulnerabilidad del acuífero
- Anexo 6. Mapa de zonas de importancia hidrogeológica

1. INTRODUCCIÓN

Regionalmente la Cuenca del Río Risaralda se encuentra ubicada entre la Provincia Hidrogeológica de Cauca - Patía y Rocas del Basamento de la Cordillera Occidental. En la Cuenca Media y Baja del Río Risaralda, se presentan rocas y sedimentos con una buena potencialidad hidrogeológica, que pueden conformar acuíferos por porosidad primaria.

El agua superficial ha sido la fuente principal de abastecimiento en la cuenca, pero en la Cuenca Baja, las fuentes subterráneas han sido consideradas como una alternativa para suplir la demanda especialmente para uso doméstico en las zonas rurales, incluyendo el abastecimiento público en ciertos caseríos y veredas, donde se aprovecha principalmente a través de manantiales y aljibes.

1.1. Objetivo

El objetivo general de este capítulo, es presentar un modelo hidrogeológico preliminar de la zona de la Cuenca del Río Risaralda, a partir de información existente, para identificar las unidades potencialmente acuíferas, estimar zonas de recarga y descarga de los acuíferos, que permitan identificar y localizar áreas de manejo y construir las estrategias que puedan garantizar la preservación de este recurso.

1.2. Marco de referencia

La hidrogeología es la ciencia que estudia el almacenamiento, circulación y distribución de las aguas terrestres en las zonas saturada y no saturada de las formaciones geológicas, teniendo en cuenta sus propiedades físicas y químicas, sus interacciones con el medio físico y biológico y sus reacciones a la acción del hombre (Galvez, 2011).

De acuerdo a la clasificación de las unidades roca frente al comportamiento hidrogeológico, se consideran los siguientes tipos:

- Acuíferos: Estrato o formación geológica que permite el almacenamiento y circulación del agua por sus poros y/o grietas. Dentro de estas formaciones se puede encontrar con materiales muy variados como gravas, calizas fracturadas, areniscas porosas, arenas de playa, algunas formaciones volcánicas, depósitos de dunas, estas son económicamente explotables.
- Acuicludos: Formación geológica que, conteniendo agua en su interior incluso hasta la saturación, no la transmite y por lo tanto no es posible su explotación. Se pueden citar como ejemplos los depósitos de arcillas de cualquier origen.

- Acuitardos: Formación geológica que conteniendo apreciables cantidades de agua la transmiten muy lentamente, por lo que no son aptos para el emplazamiento de captaciones de aguas subterráneas, sin embargo, bajo condiciones especiales permiten una recarga vertical de otros acuíferos, que puede llegar a ser muy importante en ciertos casos.
- Acuífugos: Aquellas formaciones geológicas que no contienen agua ni la pueden transmitir, como por ejemplo un macizo granítico que no esté fisurado o unas rocas metamórficas sin meteorización ni fracturación, estos se consideran impermeables.

La recarga es el proceso por el cual el agua lluvia y/o de escorrentía, que una vez satisface las necesidades de humedad de suelo, entra al sistema hidrogeológico o más precisamente percola y alcanza la zona freática y renueva las reservas del acuífero; la zona de recarga o alimentación es el área en la superficie del terreno donde se dan los procesos de infiltración del agua y generalmente se presenta en donde las unidades acuíferas afloran en la superficie o a través de otros acuíferos por goteo o por recarga lateral. Estas zonas son por lo general muy vulnerables y de ellas puede depender el abastecimiento de agua en el futuro, son sensibles a la contaminación y sobre las mismas se deben tomar medidas de protección.

La descarga es la tasa de flujo de una corriente, manantial o sistema de agua subterráneo.

La zona de descarga es la zona donde el agua, sale del acuífero puede ser por un manantial, por la descarga a un río o al mar.

El Modelo hidrogeológico conceptual: Corresponde a una descripción física cualitativa de cómo se comporta el sistema hidrogeológico.

1.3. Metodología

Para la elaboración del Modelo Hidrogeológico Conceptual Preliminar de la zona de evaluación y descripción de las unidades hidrogeológicas se llevó a cabo las siguientes actividades:

- Se realizó la recopilación, análisis, validación y articulación de la información hidrogeológica existente de la zona de estudio y de las áreas aledañas, que permitiera elaborar un modelo hidrogeológico conceptual preliminar de la zona, relacionado con inventario de puntos de agua subterránea, con Sondeos Eléctricos Verticales - SEV, pruebas de bombeo y análisis de calidad del agua subterránea.

- Se recopiló y evaluó la información de puntos de agua subterránea (pozos, aljibes y manantiales), con la que contaban las Corporaciones Autónomas Regionales de Risaralda y Caldas CARDER y CORPOCALDAS (listados de concesiones y expedientes), de inventarios de puntos de agua subterránea de estudios ambientales.
- Se utilizó el Mapa Geológico realizado durante el desarrollo del Plan de Ordenación y Manejo del Río Risaralda a escala 1:25.000, el cual a su vez utilizó la información oficial del Servicio Geológico Colombiano SGC, del cual se tomaron las descripciones de las unidades de roca presentes y se valoraron desde su potencial hidrogeológico.
- Se recogió información de estudios geoelectrónicos realizados en la zona y se llevó a cabo la interpretación y correlación de datos con la geología e hidrogeología local, como parte de la evaluación hidrogeológica, para determinar las características de los acuíferos, su geometría y continuidad.
- Se siguieron los lineamientos propuestos en los estándares internacionales, para categorizar las unidades hidrogeológicas, adoptando la nomenclatura de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos (IAH) “Leyenda internacional de los mapas hidrogeológicos” (UNESCO, IAH, IAHS, 1983), la cual se basa en la asignación de categorías hidrogeológicas con base en el potencial de rocas y sedimentos para almacenar y transmitir agua subterránea, en función de la composición, permeabilidad y capacidad específica de cada unidad geológica evaluada.
- Se elaboró el Mapa Hidrogeológico y su respectiva memoria técnica.

1.4. Estudios anteriores

En la zona de evaluación se han realizado diversas investigaciones hidrogeológicas por parte de las entidades oficiales y de la academia. Los estudios que se han utilizado como fuente de información para la presente actualización del POMCA del Río Risaralda se describen a continuación:

- **Caracterización hidrogeológica Valle del Río Risaralda**

Estudio realizado en el año 1994 haciendo parte del proyecto CARDER – CANADÁ y que tuvo como objetivo general evaluar el potencial hídrico subterráneo del valle del río Risaralda. Las actividades realizadas incluyen el inventario de puntos de agua subterránea y muestreo de agua para análisis físicoquímicos, ejecución de 24 Sondeos Eléctricos Verticales y nivelación topográfica de 60 puntos de agua para la

determinación de la piezometría. Las principales conclusiones derivadas del estudio son:

- Se inventariaron 67 puntos de agua subterránea correspondientes a 64 aljibes y 3 pozos profundos donde el 67% de las captaciones son utilizadas para el abastecimiento doméstico y el 19% no tienen uso alguno.
 - Se realiza la estimación de las características hidrogeológicas de las unidades acuíferas de la cuenca pero basado en estudios hidrogeológicos realizados en cercanías de la región.
 - A partir de los 24 sondeos eléctricos realizados se identificaron cuatro capas asociadas a unidades hidrogeológicas: La primera capa se considera como acuicludo con un espesor entre 2 y 6 m y se asocia a arcillas con arenas y gravas en matriz limo arcillosa; la segunda capa con espesores variando entre 25 y 60 m compuesta por gravas y arenas en matriz limoarenosa por lo que se considera como acuífero; la tercera capa compuesta por arcillolitas y areniscas que se comportan como acuicludo con espesor entre 30 y 70 m; y finalmente se identifica un acuífero compuesto por conglomerados y areniscas donde su espesor se estima cercano a los 150 m. Las dos primeras capas se correlacionan con los depósitos cuaternarios aluviales mientras que las capas 3 y 4 se correlacionan con las Formaciones de edad Terciaria.
 - La recarga de los acuíferos aluviales viene principalmente de la precipitación, la cual cae directamente sobre el valle bajo, y por la infiltración de las aguas superficiales transportadas por los ríos y quebradas. Los acuíferos más profundos y confinados del Terciario reciben las aguas de infiltración de la precipitación sobre las vertientes de la cuenca.
 - De acuerdo al Estudio Hidroclimático de la Universidad del Tolima en (Proyecto CARDER - CANADA, 1995), la precipitación media anual para toda la cuenca es de 2086.4 mm. En la parte baja del valle, la precipitación media anual estimada es de 1720 mm, y teniendo en cuenta una superficie de 185 km² de valle aluvial, el volumen de agua que cae sobre esta parte del valle es de 318 Hm³/año, el valor de la evapotranspiración real para la zona del valle del río Risaralda es de 1076 mm por año. En la parte del valle aluvial, el escurrimiento es débil y se puede estimar en un máximo de 10%, entonces la infiltración aproximada sería de 500 mm. Es decir que la recarga potencial para esta parte de la cuenca sería del orden de 92 Hm³/año o de 0,5 Hm³/año por Km².
- **Informe final del proyecto “Construcción de un modelo hidrogeológico conceptual del acuífero del Río Risaralda Fase I”**

Realizado por la Universidad Tecnológica de Pereira para CORPOCALDAS en el año 2014 teniendo como objetivos principales llevar a cabo el inventario de puntos de agua subterránea (pozos y aljibes), en el acuífero de la Cuenca Baja del Río Risaralda, analizar la calidad del agua subterránea del acuífero de la Cuenca Baja del Río Risaralda, determinar la geofísica del acuífero de la cuenca baja del río Risaralda. Como contenido relevante para el presente estudio se encuentra:

- Presenta la caracterización geológica, geomorfológica y de suelos de la Cuenca Baja del Río Risaralda en la jurisdicción del departamento de Caldas (municipios de Viterbo, San José y Belalcázar).
- Recoge información del inventario de puntos de agua subterránea realizado en el año 1994 y registra la actualización del mismo (realizada en el año 2014) y se incluyen nuevos puntos inventariados.
- Se presentan mapas de parámetros medidos en campo (año 2014).
- Reporta los resultados de análisis físicoquímico realizado en 15 puntos de agua subterránea.
- Para los inventarios reportados no se tuvieron en cuenta los manantiales.
- Incluye la ejecución de 8 SEV, incluye la interpretación de los SEV y presenta secciones geoeléctricas (esta información será consultada en la fuente). El estudio geoeléctrico concluye que “los depósitos aluviales son de gran importancia para el aprovechamiento del agua subterránea, en especial el nivel detectado entre 20 y 50 m” (Universidad Tecnológica de Pereira, 2014).
- **Informe final del proyecto “Construcción de un modelo hidrogeológico conceptual del acuífero del Río Risaralda Fase II”**

Realizado para CORPOCALDAS por la Universidad Tecnológica de Pereira en el año 2015 teniendo como contenido relevante para el presente estudio que:

- Reporta información para la cuenca media del río Risaralda en los municipios de Risaralda y Anserma, incluyendo geología, geomorfología y suelos.
- Presenta el balance hídrico para el acuífero el río Risaralda e incluye la delimitación preliminar del acuífero del río Risaralda.
- En el inventario de puntos de agua de 1994 solo se encontraba un aljibe. Para el 2014 se realiza un nuevo inventario encontrando cinco puntos de agua subterránea (no se habla de manantiales).
- Se presentan los resultados del muestreo de agua realizado en abril de 2015 en 17 puntos de la red de monitoreo.
- Se incluye estudio geoeléctrico de seis Sondeos Eléctricos Verticales.
- Entre otros, el informe concluye que:
 - Hay escaso aprovechamiento de aguas subterráneas en la Cuenca Media del Río Risaralda.

- La Cuenca Media del Río Risaralda, por las características topológicas y geológicas se convierte en una zona de transición que facilita la recarga del acuífero en el valle del Risaralda.
 - El área de estudio se ubica sobre rocas resistivas correlacionables con diabasas y basaltos del Grupo Cañas Gordas, donde localmente reposan depósitos aluviales del Río Risaralda y rocas terciarias. Desde el punto de vista hidrogeológico estas rocas resistivas de la Cuenca Media del Río Risaralda se convierten en zonas de infiltración y recarga de acuíferos locales y regionales.
 - En el acuífero del río Risaralda, se analizó que el proceso de recarga estará alterado por el comportamiento de la precipitación en periodos de sequía y lluvia prolongados.
 - El mayor aprovechamiento de agua subterránea en el acuífero se genera en la parte baja de la Cuenca del Río Risaralda, la cual coincide con la zona donde la precipitación es más baja.
 - Para conocer las características hidráulicas del acuífero de la Cuenca del Río Risaralda en jurisdicción de Caldas, es necesario realizar adecuaciones en los pozos existentes y/o considerar la construcción de pozos de monitoreo. En el marco del proyecto no fue posible realizar pruebas de bombeo debido a que los pozos profundos no tenían adecuada tubería para medición de niveles de agua con sonda eléctrica (Universidad Tecnológica de Pereira, 2015),
- **Informe Perforación e instalación de pozo de monitoreo ambiental. Finca San Diego. Viterbo, Caldas**

Por encargo de la Universidad Tecnológica de Pereira, en Septiembre de 2016, GEOSUB perfora e instala un pozo de monitoreo ambiental en la Finca San Diego del municipio de Viterbo, Caldas.

De acuerdo al registro estratigráfico el subsuelo está compuesto por sedimentos finos, materiales arcillo limosos de coloraciones café oscuras con matices de óxidos rojas y naranjas hasta los 4 m, seguido de materiales arcillo arenosos de color gris verdoso con presencias de gravas hasta los 13 m. Hacia la parte media se observó roca ígnea de color verde azulosa hasta los 17 m, a partir de esta profundidad se identifica una capa arcillo limosa hasta los 30 m de color café a negro con clastos de rocas básicas. En la base de la perforación se encontró una capa de arcillas limosas color gris claro sobre una capa de gravas de negro a verde en matriz arcillosa.

Dicho pozo se ubica sobre los depósitos cuaternarios del río Risaralda, tuvo una profundidad de perforación de 34 m y una profundidad de entubado de 30 m. Se reporta un nivel estático de 3.57 m, un caudal de 1.05 l/seg con una capacidad específica asociada de 2.71 l/seg/m.

2. INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA SUBTERRÁNEA

El inventario es un método de recopilación y análisis de los datos relacionados con la hidrogeología y que proceden de la información de usuarios de los denominados puntos de agua (lugares donde se tiene un acceso directo o indirecto a un acuífero determinado); es el sistema más idóneo para empezar a conocer rápidamente las características hidrogeológicas de una zona dada.

En sentido estricto se puede definir un punto de agua subterránea como un lugar, obra civil o circunstancia que permita un acceso directo o indirecto a un acuífero, estos pueden incluir perforaciones existentes (pozos o aljibes), ya sean o no explotadas o abandonadas. También se cuentan las fuentes o surgencias que deben considerarse como descargas naturales de los acuíferos (manantiales).

El inventario permite evaluar la disponibilidad y uso del recurso subterráneo en el área de estudio y tener una visión global de las características y comportamiento de las diferentes unidades geológicas potencialmente acuíferas.

En las Cuencas Media y Baja del Río Risaralda se han realizado tres campañas de inventario y actualización de puntos de agua subterránea (pozos y aljibes), la primera realizada en 1994 en el Convenio CARDER – CANADÁ, la segunda en el año 2014 realizada por la Universidad Tecnológica de Pereira (UTP) en la Cuenca Baja del Río Risaralda y la tercera realizada en el año 2015 por la UTP en la cuenca media. A continuación se retoman los principales resultados obtenidos en estas tres campañas.

2.1. Inventario de puntos de agua año 1994

En el estudio “Caracterización hidrogeológica Valle del Río Risaralda” realizado dentro del Proyecto CARDER – CANADÁ en el año 1994, se realiza el inventario de 64 aljibes y tres pozos profundos. De estos se encontró que el 50% de los puntos se ubicaba en Viterbo, 18% en La Virginia, 12% en Belalcázar, 18% en Risaralda y 1.5% en cada uno de los municipios de Anserma y Santuario.

Las cantidades de agua utilizada por las captaciones de agua que se encontraban en operación se relacionan tal y como se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Consumo de agua en captaciones inventariadas en el año 1994

| Consumo (l/día) | Cantidad de puntos |
|----------------------|--------------------|
| Menor o igual a 1000 | 22 |
| 1000 – 2000 | 11 |
| 2000 – 10000 | 8 |
| Más de 10000 | 13 |

Fuente: (Proyecto CARDER - CANADA, 1995).

Las características de los tres pozos profundos reportados en dicho estudio se presentan a continuación en la Tabla 2.

Tabla 2. Características de pozos profundos ubicados en Cuenca del Río Risaralda

| CÓDIGO | CA-VI-41 | RI-VR-49 | RI-VR-66 |
|---------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------|
| Coordenada X | 1133388.63 | 1134838.19 | 1134338.30 |
| Coordenada Y | 1044007.52 | 1034957.41 | 1037307.44 |
| Municipio | Viterbo | La Virginia | La Virginia |
| Departamento | Caldas | Risaralda | Risaralda |
| Nombre Predio | El Danubio | Miralindo | El Paraíso |
| Unidad Geológica captada | Depósito cuaternario (Qal) | Depósito cuaternario (Qal) | Formación Zarzal (Tplz) |
| Material de revestimiento | PVC | PVC | PVC |
| Sistema de bombeo | Sumergible 4" | No tiene | Sumergible 4" |
| Diámetro (m) | 0.3 | 0.31 | 0.2 |
| Profundidad (m) | 60 | - | 70 |
| Nivel agua (m) | 2 | 23.1 | 7 |
| Uso | Domestico | Ninguno | Domestico |
| Caudal (l/s) | 34 | 0 | - |

Fuente: (Proyecto CARDER - CANADA, 1995)

2.2. Inventario y actualización de puntos de agua año 2014

Inventario llevado a cabo como parte del proyecto “Construcción de un modelo hidrogeológico conceptual del acuífero del río Risaralda Fase I” (Contrato 242 del 2013) realizado por la Universidad Tecnológica de Pereira en el año 2014. En éste se actualizó la información de 35 puntos y se inventariaron 20 puntos nuevos los cuales se distribuyen tal y como se presenta en la Figura 1.

En cuanto a las condiciones de los puntos de agua inventariados se encontró que 26 están activos, 22 en reserva, 5 inactivos y 2 abandonados.

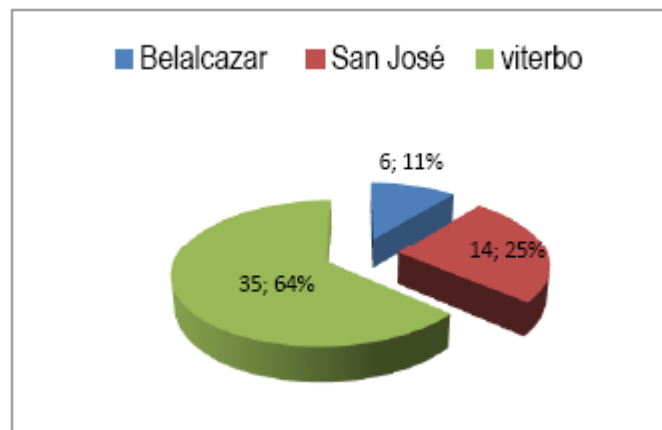


Figura 1. Distribución de puntos de agua actualizados e inventariados en el año 2014

Fuente: (Universidad Tecnológica de Pereira, 2014)

2.3. Actualización de puntos de agua año 2015

En el año 2015, la Universidad Tecnológica de Pereira realiza el proyecto “Construcción de un modelo hidrogeológico conceptual del acuífero del río Risaralda Fase I” (Contrato 151 de 2014), dentro de este se lleva a cabo la actualización de los puntos de agua subterránea de los municipios de Risaralda y Anserma (Cuenca Media del Río Risaralda) que fueron reportados inicialmente en el año 1994. De estos se encontró que dos puntos están productivos, dos están en reserva y uno está sellado.

2.4. Concesiones de agua subterránea

De acuerdo a la base de datos suministrada por CARDER, la Cuenca del Río Risaralda cuenta con 351 concesiones de agua subterránea en manantiales y dos concesiones más para pozos.

2.4.1. Concesiones de agua en pozos

La concesión de agua identificada con el expediente 7021 se ubica en el municipio de Santuario, vereda Limones, cuenta con un caudal total de 0.007 l/s y es utilizado en cultivos de tomate. La concesión de agua asociada al expediente 4318, se encuentra en la vereda Buenavista del municipio de Apia y cuenta con un caudal de 0.01 l/s.

2.4.2. Concesiones de agua en manantiales

De las 351 concesiones en manantiales se encuentra que 100 se ubican en el municipio de Belén de Umbría, 85 en Guática, 75 en Apía, 41 en Santuario, 33 en Balboa, 10 en Mistrató, 6 en La Celia y 1 en La Virginia. En la Figura 2 se presenta la distribución porcentual de las ubicaciones de concesiones en manantiales por municipio.

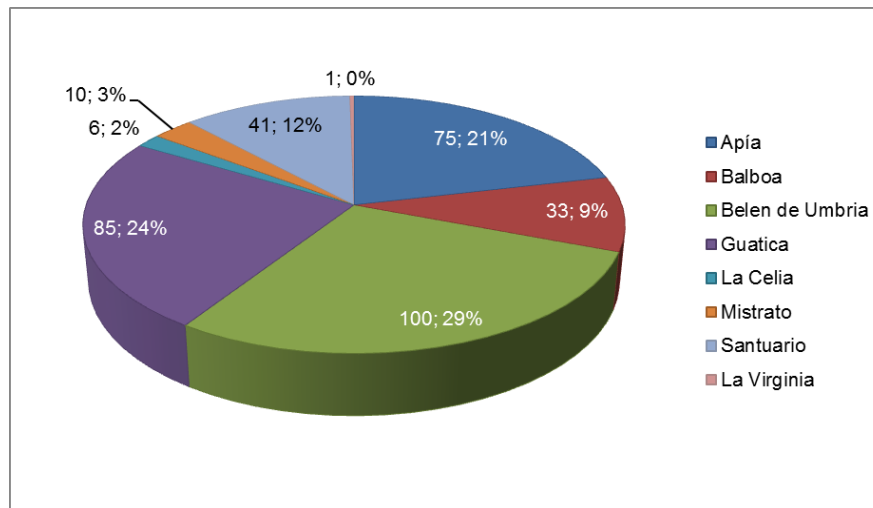


Figura 2. Distribución porcentual de concesiones de agua en manantiales por municipio
Fuente: Consorcio Ordenamiento Cuenca Risaralda 2016

El caudal total concesionado para estos 351 puntos de agua subterránea es de 24.27 l/s, de éste, 18.13 l/s son utilizados en consumo humano y doméstico, 1.33 l/s son para uso pecuario, 0.45 l/s son utilizados para acuicultura, 3.76 l/s están concesionados a la agricultura y 0.6 l/s pertenecen a uso industrial. En la Figura 3 se presenta la distribución de acuerdo al uso que se da al agua subterránea.

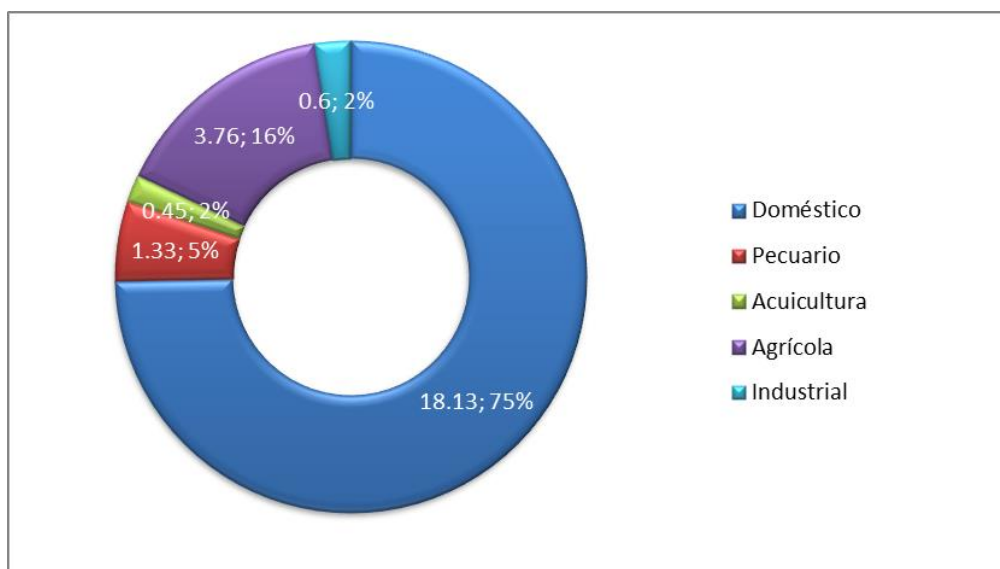


Figura 3. Distribución porcentual de caudales asociados a usos del agua en concesiones de manantiales

Fuente: Consorcio Ordenamiento Cuenca Risaralda 2016

En la Tabla 3, se presenta de manera resumida el inventario actualizado a 2015 y las concesiones de agua con algunas de las principales características por tipo de captación, así como el número correspondiente a cada una de ellas.

Tabla 3. Puntos de agua subterránea ubicados dentro de la Cuenca del Río Risaralda

| Tipo de captación | No. de puntos | Nivel del agua* (m) | Profundidad de la captación* (m) | Caudal* (l/s) |
|-------------------|---------------|---------------------|----------------------------------|---------------|
| Aljibes | 57 | 3.45 ± 2.69 | 9.91 ± 7.04 | 1.1 ± 0.72 |
| Manantiales | 351 | superficial | - | 0.069 ± 0.187 |
| Pozos | 5 | 10.7 ± 11 | 65 ± 7.1 | 11.34 ± 19.63 |

*Se indican los valores promedio más o menos una desviación estándar

Fuente: Consorcio Ordenamiento Cuenca Risaralda 2016

3. PROSPECCIÓN GEOELÉCTRICA

La exploración geofísica en la modalidad de Sondeos Eléctricos Verticales – SEV, se realiza con el objeto de evaluar las condiciones geométricas y de profundidad de las unidades geológicas potencialmente acuíferas y para estimar la continuidad de las mismas.

3.1. Fundamentos Teóricos

Los Sondeos Eléctricos Verticales muestran las variaciones de la resistividad aparente con la profundidad. Cuando se realiza un Sondeo Eléctrico Vertical (SEV), la distancia entre los electrodos de potencial y de corriente aumenta, esto significa que la corriente viajará progresivamente a mayor profundidad y se obtendrán mediciones de resistividad aparente a mayores profundidades.

El método se basa en el principio físico, donde la distribución de potencial eléctrico en el subsuelo a partir de un punto (electrodo) de inducción de corriente eléctrica, depende de las resistividades eléctricas y las características litológicas de los suelos y rocas que hay alrededor de dicho electrodo (Ley de Ohm).

El arreglo Schlumberger es lineal y los electrodos de potencial se colocan cerca. Típicamente AB es igual o hasta 5 veces más grande que el valor de MN y la resistividad aparente está dada por:

$$\bar{R} = \pi \frac{\left(\frac{AB}{2}\right)^2 - \left(\frac{MN}{2}\right)^2}{MN} \frac{\Delta V}{I}$$

Esta técnica se basa en la inducción de corriente eléctrica en el subsuelo utilizando dos electrodos de corriente denominados A y B (Figura 4) y en la medición de las diferencias de potencial que se crean entre estos dos electrodos mediante la utilización de un par adicional de electrodos intermedios (M y N).

Los sondeos eléctricos verticales muestran las variaciones de la resistividad aparente con la profundidad. Cuando se realiza un Sondeo Eléctrico Vertical (SEV), la distancia entre los electrodos de potencial y de corriente aumenta, esto significa que la corriente viajará progresivamente a mayor profundidad y se obtendrán mediciones de resistividad aparente a mayores profundidades.

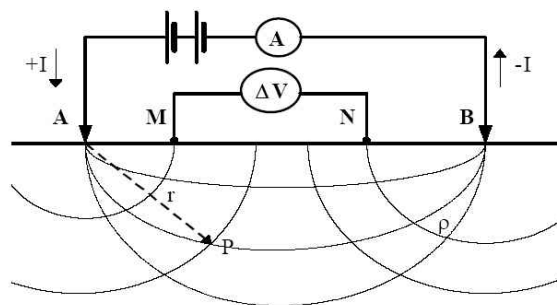


Figura 4. Arreglo Schlumberger utilizado en estudios geoelectricos de sondeos eléctricos

Fuente: (Anaya, 2010)

Aunque existen datos de valores de resistividad típicos para algunas de las rocas, sedimentos y fluidos que se encuentran más frecuentemente dentro de la corteza terrestre, estos valores pueden variar localmente dependiendo especialmente de la calidad del agua de los acuíferos.

En la Tabla No. 4 se presentan los valores de resistividad típicos para algunas de las rocas, sedimentos y fluidos que se encuentran más frecuentemente dentro de la corteza terrestre.

Tabla 4. Resistividades reales típicas de los diferentes sedimentos y rocas

| Rocas y sedimentos | Resistividad (Ohm-m) |
|---|----------------------|
| Arcilla | 2 – 15 |
| Arena seca | >1000 |
| Arena saturada con agua dulce | 20-150 |
| Arena saturada con agua salobre | 5 - 15 |
| Arena saturada con agua salada | < 5 |
| Grava saturada con agua dulce | 50-300 |
| Arenisca con agua dulce | 30 - 50 |
| Caliza porosa con agua dulce | < 500 |
| Caliza compacta | > 500 |
| Roca ígnea o metamórfica fracturada saturada con agua dulce | 200 - 1000 |
| Roca ígnea o metamórfica maciza | > 1000 |

Fuente: Tomado y modificado de Astier, 1975

3.2. Procesamiento e interpretación de datos

La interpretación del modelo de capas geoelectricas, se realiza con el fin de hacer correlaciones con la información geológica disponible. Para el presente estudio se recogió la información de campo de 102 Sondeos Eléctricos Verticales que se han realizado en la Cuenca del Río Risaralda.

Tabla 5. Estudios geoelectricos consultados

| Estudio consultado | Autor | Año | Cantidad de sondeos utilizados |
|---|-----------------|------|--------------------------------|
| Estudio geoelectrico para prospección de Agua hacienda La Reforma - Viterbo | GEOSUB | 2016 | 4 |
| Exploración Geoelectrica Villa Helena. Viterbo | GEOSUB | 2015 | 7 |
| Exploración Geoelectrica Rio Risaralda | GEOSUB - UTP | 2015 | 6 |
| Geoelectrica Zona Franca De Pereira | GEOSUB | 2014 | 1 |
| Geoelectrica Ingenio Risaralda | GEOSUB | 2014 | 7 |
| Exploración Geoelectrica Rio Risaralda | GEOSUB - UTP | 2014 | 8 |
| Estudio de Vulnerabilidad de Acuíferos | GEOSUB | 2013 | 11 |
| Estudio Geoelectrico zona urbana municipio de Balboa | GEOSUB | 2011 | 4 |
| Estudio Geoelectrico Parque de la salud. Apía | GEOSUB | 2011 | 6 |
| Prospección geoelectrica del subsuelo Talud Km 4 vía Santuario | GEOSUB | 2007 | 5 |
| Estudio geoelectrico en las inmediaciones de los ríos Mapa y Risaralda | GEOSUB | 2007 | 2 |
| Exploración geoelectrica del subsuelo perímetro urbano municipio Santuario | GEOEX | 2003 | 7 |
| Exploración geoelectrico para aguas subterráneas Sector Tanque La Virginia | GEOEX | 2001 | 3 |
| Prospección geofísica para aguas subterráneas al noroeste del municipio de Pereira, Risaralda | GEOEX | 1996 | 2 |
| Estudio geoelectrico para prospección de Aguas Subterráneas en la Finca El Paraíso. La Virginia | GEOEX | 1994 | 3 |
| Convenio CARDER - CANADÁ | CARDER | 1994 | 24 |
| Estudio hidrogeológico en la Finca El Danubio. Viterbo | Hidrominas Ltda | 1987 | 2 |

Fuente: Consorcio Ordenamiento Cuenca Risaralda 2016.

A partir de las curvas de campo, se obtienen modelos de capas con las resistividades, ajustándolos mediante inversión directa y generando una serie de modelos alternativos, definiendo así el más adecuado.

Una vez obtenidos los modelos matemáticos de los sondeos eléctricos, se definieron a partir de los valores de conductividad eléctrica del agua subterránea los horizontes de interés hidrogeológico y finalmente, teniendo como referencia la geología del sitio se realiza la interpretación geológica de los sondeos eléctricos.

3.2.1. Secciones geoelectricas

Las curvas interpretadas se correlacionan con el fin de obtener secciones o cortes geoelectricos del subsuelo que muestran la continuidad o discontinuidad de las capas espacialmente.

Utilizando los Sondeos Eléctricos recopilados para el presente estudio y la información disponible de las captaciones de agua subterránea, se realizaron tres cortes geoelectricos, obteniéndose un modelo que refleja la situación geológica del subsuelo. En la Figura 5 y Anexo 4 se presenta la localización de los Sondeos Eléctricos Verticales y la dirección de los cortes que se describen a continuación.

- **Corte Geoelectrico A-A'**

Corte geoelectrico con dirección NE-SW y ubicado sobre depósitos cuaternarios del Río Risaralda, es realizado utilizando la información de once Sondeos Eléctricos Verticales. Su localización se presenta en la Figura 5 y Anexo 4.

En el corte A-A' se identifican tres unidades geoelectricas principales (Ver Figura 6). Una primera capa ubicada al techo de la sección caracterizada por resistividades muy variables de 6 a 130 ohm-m, y con un espesor mínimo de 50 m hacia el sector noreste que llega a ser hasta de 150 m en el sector suroeste. Esta capa se interpreta como sedimentos finos a gruesos pertenecientes a la unidad cuaternaria que se asocia a la acción del río Risaralda (Qal).

La segunda unidad de interés se ubica en el sector noreste del corte subyaciendo los sedimentos cuaternarios. Esta unidad se caracteriza por presentar resistividades entre 54 y 176 ohm-m por lo que se interpreta como sedimentos medios a gruesos pertenecientes a la Formación La Paila (n1n5?-VCc). Se estima que en la zona esta unidad presenta espesores mayores a 60 m aunque no se ha identificado su base a través de SEVs.

La tercera unidad de interés se encuentra en el sector suroeste del corte bajo los sedimentos cuaternarios, se caracteriza por presentar resistividades medias, entre 20 y 50 ohm-m, y que se interpreta como los sedimentos finos a medios que caracterizan la Formación Zarzal (Q1-I).

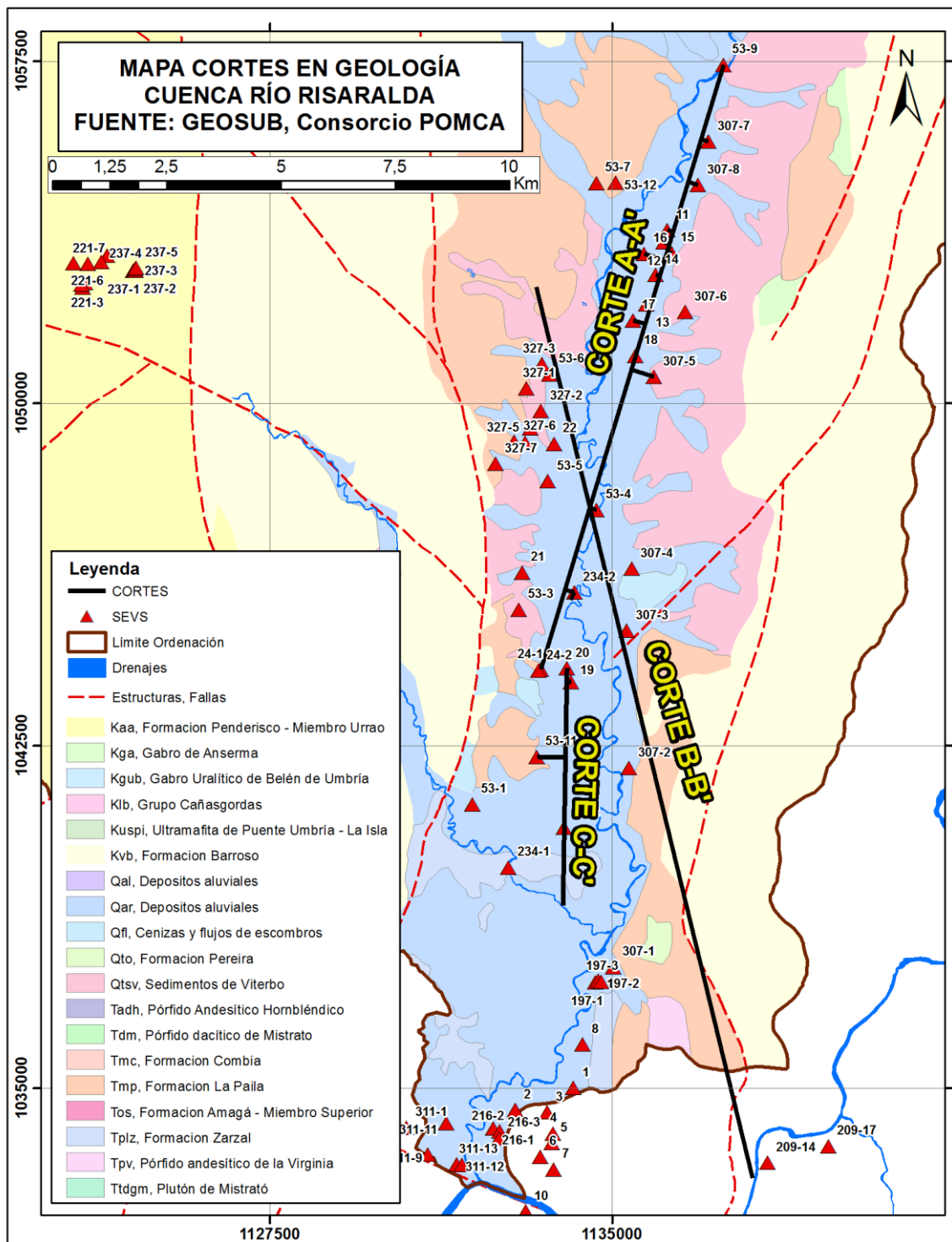


Figura 5. Localización de Sondeos Eléctricos Verticales y cortes geoelectrónicos
Fuente: Consorcio Ordenamiento Cuenca Risaralda 2016



- **Corte Geoelectrico B-B'**

Sección realizada en dirección NW – SE a lo largo del valle del río Risaralda (Ver Figura 5). Está conformada por seis Sondeos Eléctricos Verticales y se identifican cuatro diferentes unidades geoelectricas.

La primera unidad se encuentra al techo de la sección, asociada al valle del río Risaralda se caracteriza por presentar resistividades muy variables, entre 9 y 100 Ohm-m, características de los depósitos aluviales debido a la variación de los tamaños de grano. Esta unidad llega a reportar espesores de hasta 50 m en el centro de la sección (Ver Figura 7). La segunda unidad geoelectrica se encuentra subyaciendo los depósitos cuaternarios aluviales, se caracteriza por presentar resistividades bajas a medias (4 a 30 ohm-m) por lo que se ha interpretado como la Formación Zarzal Q1-I? presentando un cambio de facies desde arenosa en el sector NW hasta arcillosa en el centro de la sección realizada. El espesor de esta unidad no ha podido ser determinado con los sondeos eléctricos realizados.

Subyaciendo la Formación Zarzal y los depósitos cuaternarios aluviales se ha identificado una tercera unidad geoelectrica con resistividades medias a altas, 30 a 175 ohm-m, por lo que se han correlacionado con las facies arenosas y conglomeráticas de la Formación La Paila.

- **Corte Geoelectrico C-C'**

Sección ubicada al sur de la Cuenca del Río Risaralda con dirección N-S. Se construyó con datos de cinco sondeos eléctricos verticales, su localización se presenta en la Figura 5 y Anexo 4.

Tal y como se observa en la Figura 8 para este corte se identifican tres diferentes unidades geoelectricas. La primera ubicada al techo de la sección, presenta resistividades entre 7 y 132 ohm-m y un espesor de más de 100 m al centro de la sección que disminuye paulatinamente tanto hacia el sur como al norte, esta sección se interpreta como la unidad cuaternaria asociada al río Risaralda que se compone por sedimentos finos a gruesos.

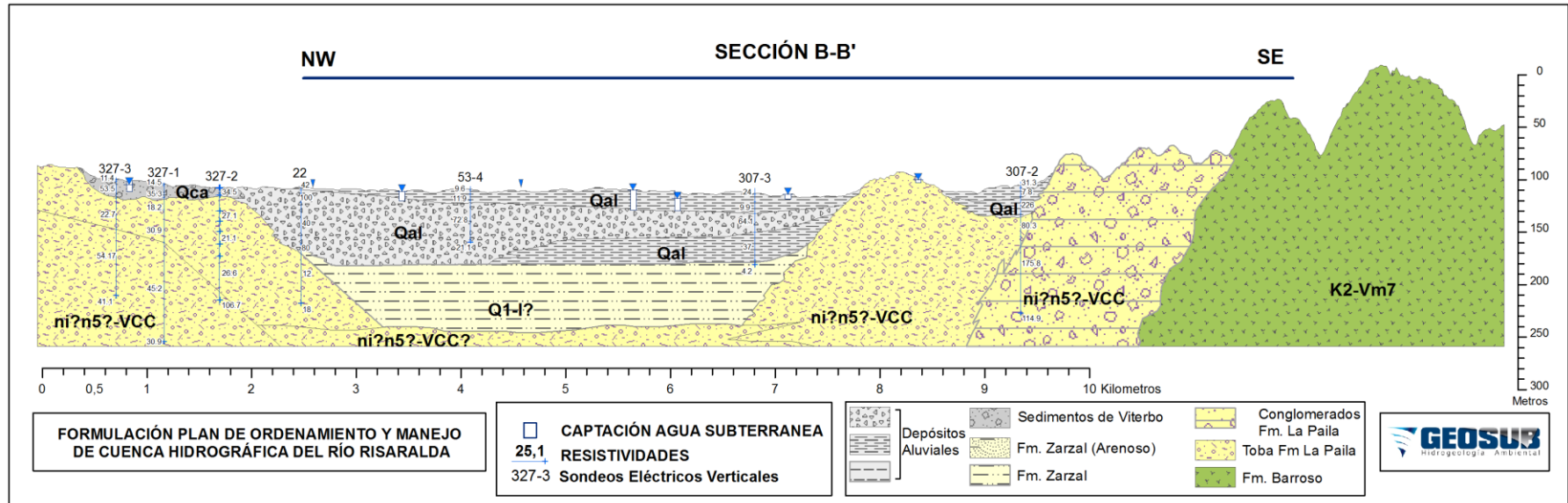


Figura 7. Corte Geoeléctrico B – B'

Fuente: Consorcio Ordenamiento Cuenca Risaralda 2016

A continuación, bajo los sedimentos aluviales cuaternarios, en el sector norte de la sección se encuentran resistividades bajas, entre 11 y 27 Ohm-m, que se interpretan como sedimentos finos asociados a la Formación Zarzal (Q1-I).

La tercera unidad se encuentra en el sector sur de la sección, y se caracteriza por manifestarse en superficie como cerros de baja altura. El rango de resistividad es amplio, entre 17 y 161 ohm-m, y se correlaciona con sedimentos medios a gruesos de la Formación Zarzal (Q1-I).

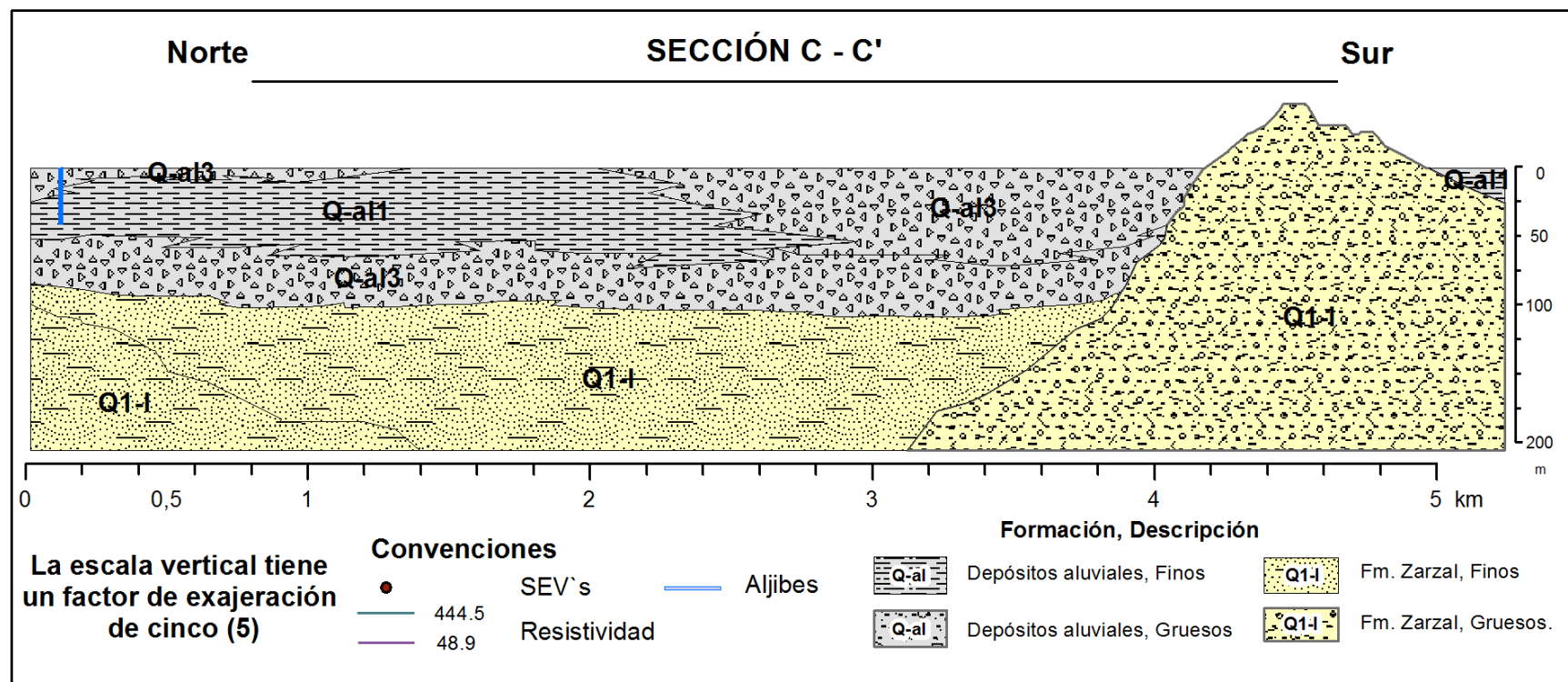


Figura 8. Corte Geoeléctrico C-C'
Fuente: Consorcio Ordenamiento Cuenca Risaralda 2016

4. CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS

Los ensayos o pruebas de bombeo son utilizados para determinar las propiedades hidráulicas de los pozos y de los acuíferos que captan. Consisten en extraer agua de los pozos, bien a caudal constante o bien a caudal variable, monitoreando la evolución del nivel del agua. El monitoreo de niveles se puede hacer tanto en el mismo pozo de bombeo como en otros pozos cercanos. Además de las mediciones durante el bombeo, se pueden hacer análisis de parámetros hidráulicos con base en las pruebas de recuperación. Una vez se detiene el bombeo, los niveles de agua empiezan a subir, hasta recuperar total o parcialmente el nivel inicial.

Estas pruebas, respecto al pozo, pueden suministrar información sobre el caudal de bombeo más aconsejable y lugar donde debe colocarse la bomba para un caudal determinado de explotación y respecto al acuífero, pueden suministrar datos sobre su transmisividad (T), almacenamiento (S), grado de comunicación entre la zona acuífera inmediata al pozo y otras más lejanas; existencia de barreras y bordes impermeables cercanos, zonas de recarga, etc.

Los métodos de recuperación consisten en efectuar las interpretaciones del ensayo, con base en los datos que se obtienen una vez paralizado el bombeo. A partir de la parada, los niveles empiezan a subir, hasta recuperar total o parcialmente el nivel inicial. Los ensayos de recuperación, nos permiten calcular igualmente el parámetro de transmisividad (T).

- ✓ **Transmisividad (T)** es el volumen de agua que atraviesa una banda de acuífero de ancho unitario en la unidad de tiempo y bajo la carga de un metro. Es representativa de la capacidad que tiene el acuífero para ceder agua (Villanueva Martínez & Iglesias López, 1984).
- ✓ **Coeficiente de almacenamiento (S)** puede definirse como la cantidad de agua que cede un prisma de acuífero de base cuadrada unitaria cuando se le deprime la unidad. Consecuentemente no tiene dimensiones. En el caso de que el acuífero trabaje como libre, el coeficiente de almacenamiento representa el volumen de agua que puede ceder un volumen unitario de acuífero; se puede representar en tanto por ciento y coincide con la porosidad eficaz (Villanueva Martínez & Iglesias López, 1984). El coeficiente de almacenamiento varía de acuerdo al tipo de acuífero, como se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6. Coeficiente de almacenamiento de acuerdo al tipo de acuífero

| Acuífero | Exponencial |
|---------------|---------------------|
| Libre | $10^{-1} - 10^{-2}$ |
| Semiconfinado | $10^{-3} - 10^{-4}$ |
| Confinado | $10^{-4} - 10^{-7}$ |

Fuente: (Villanueva Martínez & Iglesias López, 1984)

- ✓ **Capacidad específica (CE)** Se traduce como la relación del caudal extraído de un pozo dividido para el abatimiento que produce dicho bombeo, se expresa en litros por segundo y por metro, es decir esta relación indica el volumen extraído por cada metro de abatimiento (Villanueva Martínez & Iglesias López, 1984).

Para la Cuenca del Río Risaralda, en la información existente de inventario de puntos de agua se han identificado 57 aljibes y 2 pozos profundos, estos puntos no cuentan con pruebas de bombeo que brinden información de conductividades hidráulicas ni capacidad específica con las que realizar la caracterización hidráulica de las unidades acuíferas presentes en la zona.

5. UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS

De acuerdo al Estudio Nacional del Agua 2014 (IDEAM, 2014), la zona de estudio se encuentra localizada en la Provincia Hidrogeológica Cauca Patía pero no ha sido clasificada como Sistema Acuífero puesto que no se cuenta con un nivel de información y conocimiento suficiente para la gestión del agua subterránea.

La Cuenca del Río Risaralda cubre un área de aproximadamente 1302.09 km² y su corriente principal empieza a formarse en el Alto del Morro Plancho, en los límites entre Caldas y Antioquia, sobre los 3750 m.s.n.m. y desemboca en el río Cauca frente al municipio de La Virginia a 896 m.s.n.m., recorriendo un trayecto aproximado de 95 Km, en sentido Norte–Sur. Sus principales afluentes son los ríos Guática por el Norte, Chapatá, Guarne, Mapa y Totuí por la margen derecha.

Con base en la información geológica, el inventario de puntos de agua subterránea y la prospección geofísica se realizó la evaluación del potencial hidrogeológico y la conceptualización sobre el funcionamiento hidrogeológico. Cabe anotar que en la zona no se cuenta con pruebas de bombeo en pozos o aljibes que brinden información de capacidad específica por lo que el mapa de unidades hidrogeológicas se presenta como una primera aproximación que debe ser refinado con la adquisición de datos hidráulicos.

Los análisis y resultados de este componente del estudio, son apoyados en la cartografía desarrollada de manera específica, a través del plano temático a escala 1:25.000 (Mapa Hidrogeología, Anexo 4) y en la Tabla 7 se hace una primera aproximación a la valoración de las unidades litoestratigráficas presentes en la Cuenca del Río Risaralda, de acuerdo a su potencialidad hidrogeológica.

Tabla 7. Potencialidad hidrogeológica de las unidades litoestratigráficas en la Cuenca del Río Risaralda

| UNIDAD CRONOESTRATIGRÁFICA | UNIDAD LITOESTRATIGRÁFICA | LITOLOGÍA | PUNTOS DE AGUA INVENTARIADOS | POTENCIAL HIDROGEOLÓGICO |
|--|---|--|--|---|
| Qal - Depósitos aluviales | Q-al (Aluvión) | Depósitos aluviales recientes | - | Conforman acuíferos locales, pobres, por porosidad primaria, limitados por su espesor y extensión. Pueden ser importantes en la recarga hacia los acuíferos infrayacentes |
| Qar - Depósitos aluviales | Q-al (Aluvión) | Depósitos aluviales recientes | 3 pozos profundos, 41 aljibes y 11 manantiales | Conforman acuíferos locales, pobres, por porosidad primaria, limitados por su espesor y extensión. Pueden ser importantes en la recarga hacia los acuíferos infrayacentes |
| Qfl - Depósitos de pendiente | Sin denominación en el Atlas (Coluvión) | Depósitos de pendiente | 2 aljibes | Podrían conformar acuíferos locales, pobres, por porosidad primaria, limitados por su espesor y extensión. Pueden ser importantes en la recarga hacia los acuíferos infrayacentes |
| Qto - Formación Pereira | Q-vc (vulcano-clástico) | Flujos de lodo y cenizas recientes | - | Unidad acuífera de carácter regional, semiconfinada a confinada con capacidades específicas entre 0.05 y 7 l/s/m (IDEAM, 2014). |
| Qtsv - Sedimentos de Viterbo | Q-ca (de abanico) | Gravas, arenas y arcillas con niveles tobáceos y de cenizas volcánicas hacia el techo | 8 aljibes | Podrían conformar acuíferos locales, pobres, por porosidad primaria, limitados por su espesor y extensión. |
| Tplz - Formación Zarzal | Q1-I (Paludal) | Areniscas y arcillolitas tobáceas con bancos de diatomitas | 1 pozo profundo | Puede conformar acuíferos locales a semiregionales, con alta a media permeabilidad. (CARDER, 2007) |
| Tadh - Pórfido Andesítico Hornbléndico | n4n6-Hi (Hipoabisal intermedio) | Pórfido Andesítico Hornbléndico | - | Por sus características litológicas es de baja importancia hidrogeológica |
| Tdm - Pórfido dacítico de Mistrató | n4n6-Hi (Hipoabisal intermedio) | Pórfido dacítico de Mistrató | 1 manantial | Por sus características litológicas es de baja importancia hidrogeológica |
| Tmc - Formación Combia | K2-Pf7 (Plutónico félsico) | Conglomerados, brechas sedimentarias, areniscas y arcillolitas, intercaladas con piroclastos | 51 manantiales | De acuerdo a su litología y puntos de agua que la captan se asume como unidad acuífera de carácter local libre a semiconfinada |

| UNIDAD CRONOESTRATIGRÁ FICA | UNIDAD LITOESTRATIGRÁ FICA | LITOLOGÍA | PUNTOS DE AGUA INVENTARIADOS | POTENCIAL HIDROGEOLÓGICO |
|--|---|--|---------------------------------|--|
| Q-vc | Formación Armenia | Aglomerados, conglomerados, flujos de ceniza y tobas. | - | Unidad acuífera de carácter regional, semiconfinada a confinada con capacidades específicas entre 0.05 y 7 l/s/m (IDEAM, 2014). |
| Tmp - Formación La Paila | n1?n5?-VCc (Volcano-clástico continental) | Conglomerados y areniscas de color pardo. Matriz arcillosa | 2 aljibes | Acuífero continuo de extensión regional con porosidad primaria, de tipo semiconfinado y confinado donde comúnmente los pozos son saltantes (INGEOMINAS, Memoria Técnica Plancha 5:13. Atlas del agua subterránea de Colombia Esc. 1:500.000, 2004). |
| Tos - Formación Amagá | E3-Sc (Sedimentario continental) | Miembro superior. Areniscas bien cementadas de color crema, arcillas pizarrosas y de color ocre | - | Puede conformar acuíferos locales a semiregionales, con alta a media permeabilidad (Ingeominas 2008). |
| Tpv - Pórfido Andesítico de La Virginia | n4n6-Hi (Hipoabisal intemedio) | Pórfido Andesítico de la Virginia | - | Por sus características litológicas es de baja importancia hidrogeológica |
| Ttdgm - Plutón de Mistrató | K2-Pf7 (Plutónico félsico) | Tonalita de grano grueso con variaciones a diorita y gabro | 46 manantiales | Por sus características litológicas, es de baja importancia hidrogeológica. Localmente puede llegar a generar acuíferos limitados al grado de fracturamiento de la roca y al espesor de suelo residual. |
| Kaa - Formación Penderisco - Miembro Urrao | k2k6-Sm7 (Sedimentario Marino) | Limolitas, arcillolitas y areniscas con niveles conglomeráticos | 2 pozos y 77 manantiales | De acuerdo a su litología puede considerarse como unidad acuífera de extensión local a regional. |
| Kga - Gabro de Anserma | K2-Pm7 (Plutónico máfico) | Melagabronoritas olivínicas, gabronoritas y lherzolitas | - | Por sus características litológicas es de baja importancia hidrogeológica |
| Kgub - Gabro uralítico de Belén de Umbria | K2-Pm7 (Plutónico máfico) | Gabro uralítico de Belén de Umbria | 18 manantiales | Por sus características litológicas, es de baja importancia hidrogeológica. Localmente puede llegar a generar acuíferos limitados al grado de fracturamiento de la roca y al espesor de suelo residual. |

| UNIDAD CRONOESTRATIGRÁ FICA | UNIDAD LITOESTRATIGRÁ FICA | LITOLOGÍA | PUNTOS DE AGUA INVENTARIADOS | POTENCIAL HIDROGEOLÓGICO |
|--|--------------------------------------|---|---------------------------------|---|
| Klb - Grupo Cañasgordas | k2k6-Sm7 (Sedimentario Marino) | Liditas asociadas en cuerpos lenticulares | 15 manantiales | Por sus características litológicas, es de baja importancia hidrogeológica. Localmente puede llegar a generar acuíferos limitados al grado de fracturamiento de la roca y al espesor de suelo residual. |
| Kuspi - Ultramafita de Puente Umbría - La Isla | K2-Pu7 (Plutónico ultramáfico) | Dunitas serpentizadas | 2 manantiales | Por sus características litológicas es de baja importancia hidrogeológica |
| Kvb - Formación Barroso | K2-Vm7 (Volcánico máfico) | Diabasas, diabasas espilitizadas, basaltos, tobas y aglomerados | 2 aljibes y 124 manantiales | Por sus características litológicas, es de baja importancia hidrogeológica. Localmente puede llegar a generar acuíferos limitados al grado de fracturamiento de la roca y al espesor de suelo residual. |

Fuente: Consorcio Ordenamiento Cuenca Risaralda 2016

Desde el punto de vista hidrogeológico, y tal y como se observa en la Tabla 8 y Anexo 4, los acuíferos presentes se agrupan teniendo en cuenta dos categorías: Sedimentos y rocas con flujo intergranular y sedimentos y rocas con limitados recursos de aguas subterráneas, consideradas estas últimas como impermeables o con limitadas posibilidades acuíferas, a continuación se presentan las características de las unidades identificadas dentro de la Cuenca del Río Risaralda:

5.1. Sedimentos y Rocas con Flujo Intergranular / Porosidad Primaria






5.1.1. Acuíferos de alta productividad, capacidad específica mayor a 2 l/s/m

La **Formación La Paila (n1?n5?-VCC)** ha sido considerada por (Velez & INGEOMINAS, 2004) como una unidad acuífera de extensión regional con porosidad primaria, de tipo semiconfinado y confinado donde comúnmente los pozos son saltantes, recargado directamente por la precipitación y las corrientes superficiales. Su descarga ocurre a través de flujos laterales que recargan al acuífero Cuaternario del valle del río Cauca y mediante pozos con profundidades entre 100 y 200 que producen caudales promedios de 40 l/s y capacidades específicas desde 2.0 hasta 5.0 l/s/m. El valor de la transmisividad oscila entre 160 y 420 m²/día y el coeficiente de almacenamiento promedio es de 6.0 E-04. Cuando presenta condiciones de semiconfinamiento, el coeficiente de goteo es del orden de 1.8 E-03.¹

Dentro de la Cuenca del Río Risaralda la unidad acuífera de La Paila está siendo captada por dos aljibes con profundidades de 8.1 y 10 m y nivel de agua promedio de 0.8 m. El caudal medio de explotación para estos dos aljibes es de 1.15 l/s.

¹ Velez, G. H., & INGEOMINAS. (2004). Memoria Técnica de la Plancha 5-13. Proyecto Atlas de Aguas Subterráneas de Colombia Escala 1:500.000. Bogotá: INGEOMINAS.

Tabla 8. Unidades Hidrogeológicas para la cuenca del Río Risaralda

| Sistema acuifero | | Características de los acuiferos | Unidades hidrogeológicas |
|--|---|--|---|
| SEDIMENTOS Y ROCAS CON FLUJO INTERGRANULAR / POROSIDAD PRIMARIA | | | |
|  | Acuíferos de alta productividad, capacidad específica mayor a 2 l/s/m | Sistema acuifero continuo de extensión regional, depositado en ambiente fluvial, conformado por rocas terciarias poco consolidadas que desarrollan acuiferos de tipo confinado. (Velez & INGEOMINAS, 2004) | n1?n5?-VCc – Fm. La Paila * |
|  | Acuíferos de moderada productividad, capacidad específica entre 1 y 2 l/s/m | Unidades acuíferas de extensión regional con edades Cretácicas a Cuaternarias compuestas por rocas sedimentarias marinas y continentales y sedimentos de paludal. | Q1-I – Fm. Zarzal ** E3-Sc – Fm. Amagá ** k2k6-Sm7 – Fm. Penderisco – Miembro Urrao k2k6-Sm7 – Grupo Cañasgordas |
|  | Acuíferos de baja productividad, capacidad específica entre 0.05 y 1 l/s/m | Unidades acuíferas de extensión local a regional compuestas por sedimentos y depósitos volcánoclasticos que desarrollan acuiferos libres a semiconfinados. | Qal – Depósitos aluviales ** Qar – Depósitos aluviales Qca – Sedimento de Viterbo Qvc – Fm. Armenia ** K2-Pf7 – Fm. Combia |
| SEDIMENTOS Y ROCAS CON LIMITADOS RECURSOS DE AGUAS SUBTERRÁNEAS | | | |
|  | Acuíferos con muy baja productividad, capacidad específica promedio menor de 0.05 l/s/m. Acuicludos | Rocas ígneas volcánicas y plutónicas de edad cretácica de baja permeabilidad que se comportan como acuicludos. | K2-Pf7- Plutón de Mistrató K2-Pm7 - Gabro uralítico de Belén de Umbría K2-Pu7 - Ultramafita de Puente Umbría K2-Vm7 – Fm. Barroso ** Depósitos de pendiente |
|  | Unidades con muy baja productividad, capacidad específica promedio menor de 0.05 l/s/m. Acuífugos | Complejo de rocas ígneas muy compactas y de muy baja permeabilidad que se comportan como acuífugos. | K2-Vm7 - Pórfido dacítico de Mistrató K2-Pm7 – Gabro de Anserma n4n6-Hi – Pórfido Andesítico Hombléndico n4n6-Hi – Pórfido Andesítico de La Virginia n4n6-Hi – Pórfido dacítico de Mistrató |

* Información tomada del Mapa Hidrogeológico (Velez & INGEOMINAS, 2004)

** Información tomada de POMCA Cuenca Río Otún

Fuente: Consorcio Ordenamiento Cuenca Risaralda 2016

5.1.2. Acuíferos de moderada productividad, capacidad específica entre 1 y 2 l/s/m

Unidades acuíferas de extensión regional con edades Cretácicas a Cuaternarias compuestas por rocas sedimentarias marinas y continentales y sedimentos de paludal.

La **Formación Zarzal (Q1-I)** presenta una conformación muy característica, constituida por una secuencia de baja consolidación, que corresponde a areniscas tobáceas, areniscas conglomeráticas con fragmentos de chert, materiales arcillosos y diatomitas.

Dentro de los inventarios de puntos de agua de la Cuenca del Río Risaralda solo se ha identificado un pozo profundo, captación de 70 m de profundidad con nivel del agua a 7 m. De esta captación no se ha reportado caudal.

La unidad Q1-I ha sido clasificada por el Ingeominas como de baja permeabilidad mientras que en el Plan de Manejo Integral de Aguas Subterráneas de la (CARDER, Abril 2007) se ha considerado como acuífero de alta productividad.

La **Formación Amaga (E3-Sc)** aflora en reducidos sectores de la cuenca del Río Risaralda, que incluyen la cabecera de la microcuenca Cauyá del municipio de Anserma y específicamente su Miembro Superior. Litológicamente consiste de limolitas y arcillolitas de color ocre, que son deleznales, y eventualmente con concreciones calcáreas (González, H. 1990).

Dentro de la Cuenca del Río Risaralda no ha sido inventariado ningún punto de agua que capte esta unidad acuífera sin embargo dentro del Mapa de Permeabilidades Escala 1:500. (Pacheco H, Morales A, Veloza F, Villate C, & INGEOMINAS, 2008), la clasifica como de alta a media permeabilidad.

El **Grupo Cañasgordas (k2k6-Sm7)** está integrado por una secuencia volcánica y sedimentaria, que construye la mayor parte de la estructura de la Cordillera Occidental, donde la unidad volcánica corresponde a la Formación Barroso (K2-Vm7), mientras que la secuencia sedimentaria, corresponde a la **Formación Penderisco (k2k6-Sm7)**, que está dividida en el Miembro Urrao, sedimentos de tipo turbidítico de tipo areno-arcilloso, y el Miembro Nutibara conformado sedimentos biogénicos o químicos, de carácter fino, como son calizas y chert, aunque se considera que al interior de la Cuenca del Río Risaralda, predominan litologías asociada principalmente al Miembro Urrao.

En la Cuenca del Río Risaralda se encuentra el Miembro Urrao evidenciado como areniscas en paquetes de espesor de decenas de metros con intercalaciones de limolitas con laminación delgada, arcillolitas y en menor proporción conglomerados.

La **Formación Penderisco (k2k6-Sm7)** de acuerdo a la información recolectada y analizada cuenta con 106 manantiales localizados con caudales entre 0.001 y 1 l/s, los cuales representan un caudal total de 5.35 l/s. Adicionalmente se tiene que los dos únicos pozos que se han registrado en los inventarios están captando agua de sedimentos de dicha Formación. Mientras que para el **Grupo Cañasgordas (k2k6-Sm7)** se tienen 11 manantiales con un caudal promedio de 0.064 l/s y un caudal total de extracción de 0.705 l/s.

5.1.3. Acuíferos de baja productividad, con capacidad específica entre 0.05 y 1 l/s/m

Unidades acuíferas de extensión local a regional compuestas por sedimentos y depósitos volcanoclásticos que desarrollan acuíferos libres a semiconfinados.

La **Formación Combia (K2-Pf7)** se presenta en la Cuenca del Río Risaralda con un miembro sedimentario, conformado por conglomerados, brechas sedimentarias, areniscas de grano medio a fino y arcillolitas intercaladas con material piroclástico y como un miembro volcánico con la presencia de basaltos aflorantes en el río del Oro. Esta Formación se encuentra alimentando en la cuenca del río Risaralda a 53 manantiales que presentan un caudal total de extracción de 3.23 l/s con caudales entre 0.001 y 1.5 l/s.

El acuífero de la **Formación Armenia (Qvc)** está conformado por flujos volcanoclásticos constituidos por piroclastos y epiclastos de composición andesítica y alcanzando espesores de hasta 1000 m (CARDER, 2007). Este acuífero se encuentra suprayacido por una unidad de cenizas (Qp) con un espesor promedio de 30 m que le confiere un carácter semiconfinado a confinado.

Esta unidad hace parte del sistema acuífero SAM6.1 - Glacis del Quindío (IDEAM, 2014) que es clasificada como acuífero libre con transmisividades de 1 a 65 m²/día y capacidades específicas de 0.05 a 7 l/s/m.

Los **Sedimentos de Viterbo (Qca)** corresponden a una secuencia de sedimentos no consolidados de gravas, arenas, arcillas y niveles tobáceos y hacia el tope cenizas volcánicas (Estrada, J.J. y Viana, R. 1998), que en algunos lugares presentan delgadas capas de composición carbonosa. Los estratos de gravas forman secuencias de hasta 15 m, presentando fragmentos líticos angulares a redondeados, cuya composición consiste de basaltos, gabros dioritas, chert, lodolitas y arenitas en una matriz areno - lodosa con predominio de arena de grano medio, y las cenizas volcánicas, de color pardo y pardo rojizo no superan los 2 m de espesor. A su vez los estratos arenosos presentan tamaño de grano variable, y están constituidos

predominantemente por líticos cuya composición es similar a la descrita para los conglomerados, y en menor proporción se presentan minerales de cuarzo.

Sobre esta unidad se han inventariado 11 aljibes con profundidades entre 0.25 y 32 m y con niveles de agua subterránea que varían entre 0 y 9.3 m en ninguno de los aljibes inventariados se han tomados datos de caudal.

Los **Depósitos aluviales (Qal - Qar)** se han identificado como sedimentos que rellenan principalmente los valles de los ríos Risaralda, río Mapa y río Totuí, así como algunos tributarios de estos, que dan lugar extensas llanuras de inundación y terrazas bajas, y que corresponden a secuencias de conglomerados, arenas y limos. Dentro de la Cuenca del Río Risaralda se han identificado 12 manantiales que se alimentan de estos depósitos con un caudal total de 0.84 l/s. Adicionalmente se identificó que 42 de los aljibes inventariados se encuentran captando esta unidad, dichas captaciones presentan profundidades entre 1.9 y 39 m con un nivel de agua promedio de 3m y un caudal promedio de extracción de 1.09 l/s.

En el proyecto CARDER Canadá del año 1994 se presentan dos pozos profundos que captan esta unidad acuífera, donde el pozo del predio Danubio tiene una profundidad de 60 con nivel del agua a 2 m, el caudal de aprovechamiento se reporta en 34 l/s. Para el pozo de la finca Miralindo no se encuentra la profundidad de la captación ni caudal de explotación pero se evidencia un nivel del agua de 23 m de profundidad.

Cabe resaltar que en esta unidad acuífera se perforó en el año 2016 un pozo de monitoreo de 30 m de profundidad, para el que se obtuvo una capacidad específica de 2.71 l/s/m con un nivel de agua de 3.57 m y un caudal de 1.05 l/s.

5.2. Sedimentos y Rocas con limitados Recursos de Aguas Subterráneas

5.2.1. Acuíferos con muy baja productividad, capacidad específica promedio menor de 0.05 l/s/m, que se comportan como acuícludos

Sistemas de extensión local y regional compuestos por rocas ígneas volcánicas y plutónicas de edad cretácica.

Dentro de este sistema hidrogeológico se encuentra la **Formación Barroso (K2Vm7)**, que se compone de por basaltos, diabasas, tobas y aglomerados, distribuidos en diversas proporciones, según el área, y presentándose intercalaciones lenticulares de chert y limolitas silíceas. Su suelo residual de carácter laterítico, presenta variación textural, entre limo-arcilloso hasta limo-arenoso. Dicha degradación de la roca es la que permite que se dé el almacenamiento de agua subterránea posibilitando la existencia de 100 manantiales que representan un caudal de descarga de 6.27 l/s y

dos aljibes con nivel del agua promedio de 5 m y profundidades de 8.8 y 10 m, sin embargo dadas sus características litológicas esta unidad se ha considerado como un acuífero de muy baja productividad (acuicludo).

La **Ultramafita de Puente Umbría – La Isla (K2-Pu7)** se presenta como un estrecho cinturón de rocas ultramáficas litológicamente conformado por rocas de grano medio a fino, con estructura masiva a esquistosa y en algunos casos foliada y con efectos de cizalladura, con color verde manzana, gris oscuro o negro, que reflejan su conformación predominantemente por minerales de serpentinita. En la cuenca en estudio esta unidad alimenta dos manantiales con un caudal de descarga de 0.04 l/s.

El **Gabro Uralítico de Belén de Umbría (K2-Pm7)** se presenta como un cuerpo irregular aflorante cerca de Belén de Umbría, Puente Umbría y La Isla en una franja de hasta 2 km de ancho donde la roca se presenta masiva, con tamaño de grano fino a medio y media a grueso, con color gris oscuro a negro. Para esta unidad fueron inventariados 17 manantiales con una descarga total de agua subterránea de 2.37 l/s. Debido a su naturaleza ígnea masiva esta unidad se considera de muy baja productividad (acuicludo).

El **Plutón de Mistrató (K2-Pf7)** se distribuye desde el sector entre Belén de Umbría y San Antonio de Chamí, su composición varía entre tonalítica, diorítica y gabroide (Calle y González, 1982), conformado por materiales masivos de grano medio a fino, con colores variables, siendo notorio un avanzado estado de alteración y meteorización, que las hace altamente friables. Para esta unidad se han inventariado 46 manantiales con un caudal total de descarga de 4.31 l/s, siendo el caudal promedio 0.094 l/s.

5.2.2. Unidades con muy baja productividad, capacidad específica promedio menor de 0.05 l/s/m, que se comportan como acuifugos

Complejo de rocas ígneas muy compactas, con muy baja a ninguna productividad, a nivel superficial que se comportan como acuifugos. Dentro de este sistema hidrogeológico se encuentran las unidades **Pórfido dacítico de Mistrató (K2-Vm7)**, **Gabro de Anserma (K2-Pm7)**, **Pórfido Andesítico Hombléndico (n4n6-Hi)**, **Pórfido Andesítico de La Virginia (n4n6-Hi)**, y **Rocas Porfídicas Hipoabisales (n4n6-Hi)**.

6. FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA Y ZONAS DE RECARGA Y DESCARGA

6.1. Flujo del agua subterránea

La caracterización del flujo subterráneo local para el acuífero de la Cuenca del Río Risaralda, se realizó con los datos de elevación del nivel de la tabla de agua en aljibes y la elevación del punto de surgencia en manantiales, aunque no se tiene información que cubra toda la cuenca, especialmente en la parte alta de la cuenca, se interpolaron estos datos para obtener la elevación de la superficie piezométrica o potenciométrica, la dirección del flujos somero o local y posibles zonas de recarga y descarga.

En la Figura 9, se presenta la superficie potenciométrica para el acuífero libre de la Cuenca del Río Risaralda, se observa que sigue de manera general la superficie topográfica de la zona. Las zonas más altas se encuentran hacia el sector norte y oeste de la cuenca y las más bajas hacia el sur. En la Figura 9, los puntos negros corresponden con los puntos de agua subterránea. Cabe aclarar que la piezometría presentada fue realizada con niveles de agua medidos en diferentes épocas puesto que para la zona no se cuenta con campañas de medición de niveles, lo óptimo sería tener niveles contemporáneos. Las líneas equipotenciales muestran claramente que el almacenamiento de agua subterránea se presenta en la zona baja de la cuenca.

6.2. Zonas de recarga y descarga de acuíferos

En términos generales se denomina recarga al proceso por el cual se incorpora a un acuífero agua procedente del exterior o del contorno que lo limita. Son varias las procedencias de esa recarga, desde la infiltración de la lluvia (la más importante en general) y de las aguas superficiales (importante en climas poco lluviosos), hasta la transferencia desde otro acuífero, si los mismos son externos al acuífero o sistema acuífero en consideración (Custodio & Llamas, 2001).

La recarga procedente de la infiltración de la lluvia es la entrada neta de agua al terreno (infiltración menos evaporación, menos escorrentía superficial), que se transmite hacia los acuíferos; se mide como una tasa (altura, tiempo o un caudal) (UNESCO, 1998).

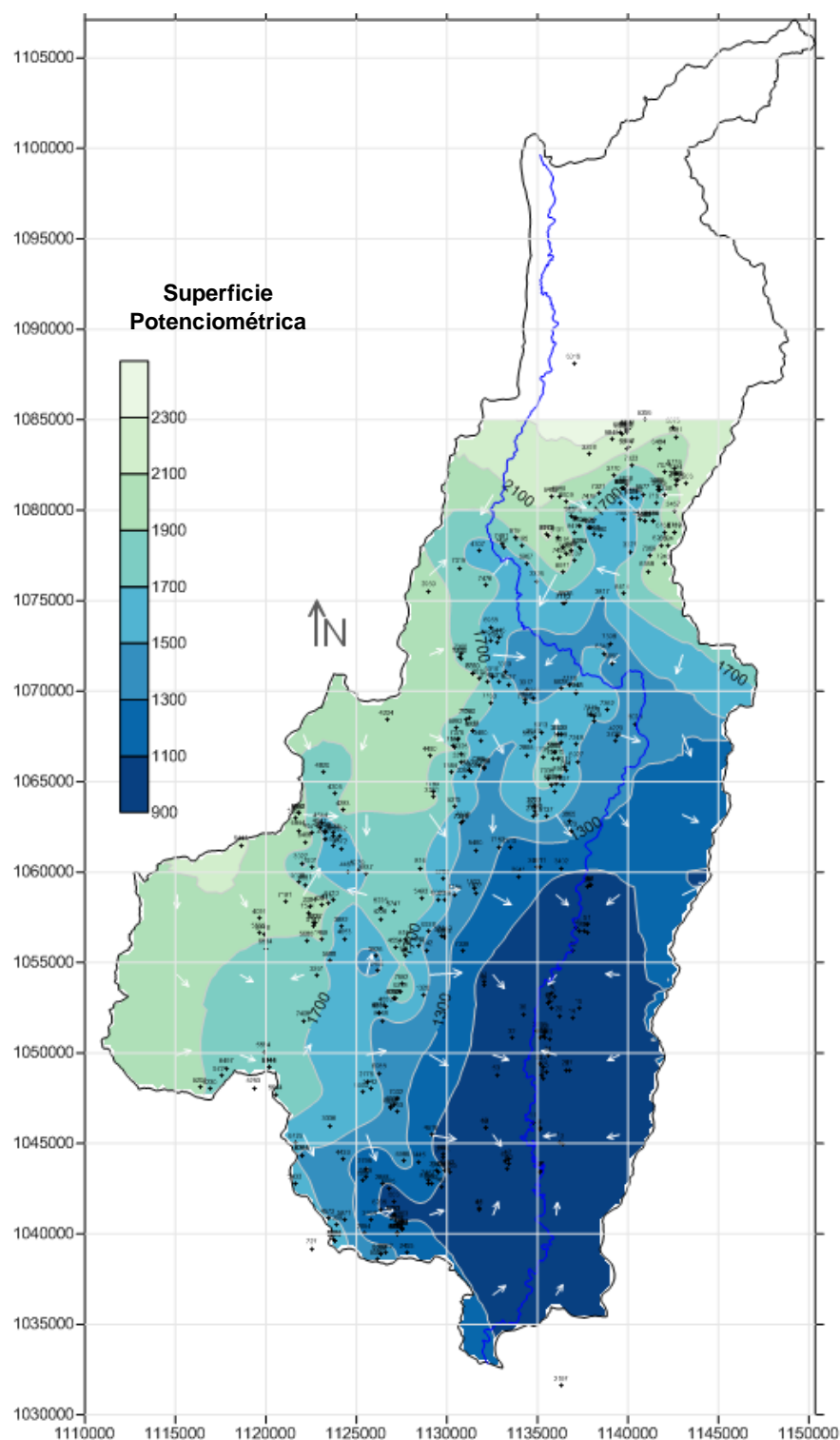


Figura 9. Direcciones del flujo subterráneo local para acuífero de la Cuenca del Río Risaralda
 Fuente: Consorcio Ordenamiento Cuenca Risaralda 2016

Este proceso ocurre de manera natural cuando el agua lluvia se infiltra hacia el acuífero a través del suelo con alta capacidad de infiltración o roca suficientemente permeable y la zona en donde ocurre este proceso se define como el área o zona de recarga (Matus Silva, 2007).

Conocer las zonas de recarga de los acuíferos permite tomar medidas de protección ya que son la principal entrada de agua a los acuíferos, pero también son áreas de alta susceptibilidad a la entrada de contaminantes en la parte más superficial de estos.

La infiltración es el volumen de agua procedente de las precipitaciones (a veces también de los ríos o de la recarga artificial), que en un determinado tiempo, atraviesa la superficie del terreno y ocupa total o parcialmente los poros del suelo o de las formaciones geológicas subyacentes, este volumen es lo que se considera infiltración eficaz, recarga natural o recarga profunda, no toda la infiltración alcanza la zona saturada (Custodio & Llamas, 2001).

La recarga natural tiene el límite de la capacidad de almacenamiento del acuífero de tal forma que en un determinado momento el agua que llega al acuífero no puede ser ya almacenada y pasa a otra área, superficie terrestre, río, lago, o incluso a otro acuífero; la capacidad de almacenamiento de un acuífero dependerá del espesor y profundidad, esto se refiere a la geometría de los acuíferos solos, en conjunto o interconectados, Faustino J. (2006) citado por (Matus Silva, 2007).

La recarga hacia los acuíferos cuaternarios aluviales y vulcanoclásticos, se da directamente por la precipitación en periodo lluvioso, es posible que también se presenten aportes de los drenajes en periodos lluviosos, pero al parecer el mayor aporte lo da el acuífero a los drenajes y no los drenajes a los acuíferos. Es así que al observar el plano piezométrico realizado a partir de manantiales y aljibes para el acuífero superior, se encuentra que los drenajes principales actúan como zonas de descarga del agua subterránea.

- **Delimitación de las zonas de recarga potencial**

La zona en donde ocurre el proceso de infiltración de agua hacia el acuífero, que presenta un suelo con alta capacidad de infiltración o roca suficientemente permeable se define como el área o zona de recarga.

La mayoría de los métodos aplicados para este tipo de zonificación se basan en la evaluación del potencial del terreno para permitir la infiltración del agua lluvia (Bueso Campos, M, 2010), (Charles, E. B, 1993), (Matus Silva, 2007). Para ello se analizan variables relacionadas a la topografía, geología, suelos, uso del suelo y factores climáticos. La definición del tipo y cantidad de

variables depende en gran medida de la escala del estudio y del objeto específico de esta zonificación. En general las zonas de recarga se presentan categorizadas (como altas, medias o bajas).

En este estudio se adoptó la metodología desarrollada por Silva (2007), para la clasificación del terreno con base en su potencial para funcionar como zona de recarga, las variables que utiliza el método son insumos generados dentro del presente estudio.

En la metodología propuesta por Silva, 2007, las variables que determinan el potencial de una región para funcionar como zona de recarga de acuíferos son: la pendiente del terreno, el tipo de suelo, el tipo de roca, la cobertura vegetal, y el uso del suelo. Cada una de estas variables es discretizada en cinco (5) rangos. A cada rango, dependiendo de su potencial para contribuir a la recarga se le asigna un valor de 1 a 5, siendo 5 el potencial “muy alto” y 1 “muy bajo”, como se presenta en la Tabla 9. La suma de todos estos factores, cada uno con un peso diferente, determina el valor del potencial de recarga, con base en la siguiente ecuación:

$$ZR = (0,27 * Pendiente) + (0,23 * Tipo\ suelo) + (0,12 * Tipo\ de\ roca) + (0,25 * Cobertura\ vegetal) + (0,13 * Uso\ del\ suelo)$$

Una vez discretizada y ponderada cada variable, mediante la superposición y suma de las capas de información, usando Sistemas de Información Geográfica - SIG, se obtuvo la delimitación de las zonas de recarga

Tabla 9. Valoración del potencial de recarga

| Potencial De Recarga | Valor Resultante |
|----------------------|------------------|
| Muy alta | 4.1 – 5.0 |
| Alta | 3.5 – 4.09 |
| Moderada | 2.6 – 3.49 |
| Baja | 2.0 – 2.59 |
| Muy baja | 0.75 -1.99 |

Fuente: (Matus Silva, 2007)

Las categorías usadas para cada variable, establecidas por la metodología de Silva, 2007 y los valores asignados para cada una, según las características de la zona se presentan a continuación:

- **Pendientes:**

La pendiente es un factor importante, pues determina el momento de la escorrentía y sus efectos en el suelo, es así que las planicies planas no favorecen la escorrentía del agua y permiten un mayor tiempo de contacto del agua con el suelo ayudando la infiltración, mientras que altas pendientes aumentan la velocidad de la escorrentía, considerándose críticas estas áreas por el grado de degradación que pueden causar y la alteración de las condiciones de recarga.

Los valores de ponderación usados para las pendientes establecidos en la metodología y el área ocupada por cada rango en la zona de evaluación se presentan en la Tabla 10 junto con la distribución porcentual y en la Figura 10 su distribución areal.

La Cuenca del Río Risaralda presenta un amplio rango de pendientes que varían desde ligeramente inclinada hasta totalmente escarpadas; en general predominan las pendientes ligeramente escarpadas y fuertemente inclinadas, que ofrecen un potencial de recarga moderado y ocupan el 70.81% la zona de interés. En la Figura 10 se observa que las pendientes mayores a 75% se encuentran principalmente en el sector occidental de la cuenca y que las pendientes que favorecen el potencial de recarga se encuentran ubicadas sobre la unidad acuífera de interés.

Tabla 10. Ponderación del parámetro pendiente en la cuenca del Río Risaralda

| Pendiente (%) | Potencial de Recarga | Ponderación | Área (Ha) | Área (%) |
|--|----------------------|-------------|-------------------|------------|
| Ligeramente inclinada, 3-7% (b) | Muy alta | 5 | 3622.178 | 2.88 |
| Moderadamente inclinada, 7-12% (c) | Alta | 4 | 24613.646 | 19.60 |
| Fuertemente inclinada, 12-25% (d) | Moderada | 3 | 88942.293 | 70.81 |
| Ligeramente escarpada o ligeramente empinada, 25-50% (e) | Moderada | 3 | | |
| Moderadamente escarpada o moderadamente empinada, 50-75% (f) | Baja | 2 | 3657.336 | 2.91 |
| Fuertemente escarpada o fuertemente empinada, 75-100% (g) | Muy Baja | 1 | 4764.618 | 3.79 |
| Totalmente escarpada, >100% (g) | Muy Baja | 1 | | |
| Total | | | 125600.071 | 100 |

Fuente: Tomado de (Matus Silva, 2007) y modificado por Consorcio Ordenamiento Cuenca Risaralda 2016

- **Suelos:**

Entre las características de los suelos que influyen en la recarga se encuentra la textura, que corresponde a una propiedad básica del suelo, que ejerce influencia en propiedades como las relaciones hídricas, la fuerza o succión con que el agua es retenida por los coloides o arcillas del suelo y el rango de disponibilidad del agua para las plantas. La infiltración es siempre mayor en suelos de textura gruesa que en suelos de textura fina.

Para la asignación del parámetro, se tuvo en cuenta la granulometría de los suelos a escala 1:25.000, de la zona de evaluación, donde se identificaron 12 diferentes tipos de material con sus granulometrías asociadas. La categorización según la textura se presenta en la Tabla 11 y la distribución areal del parámetro se muestra en la Figura 11.

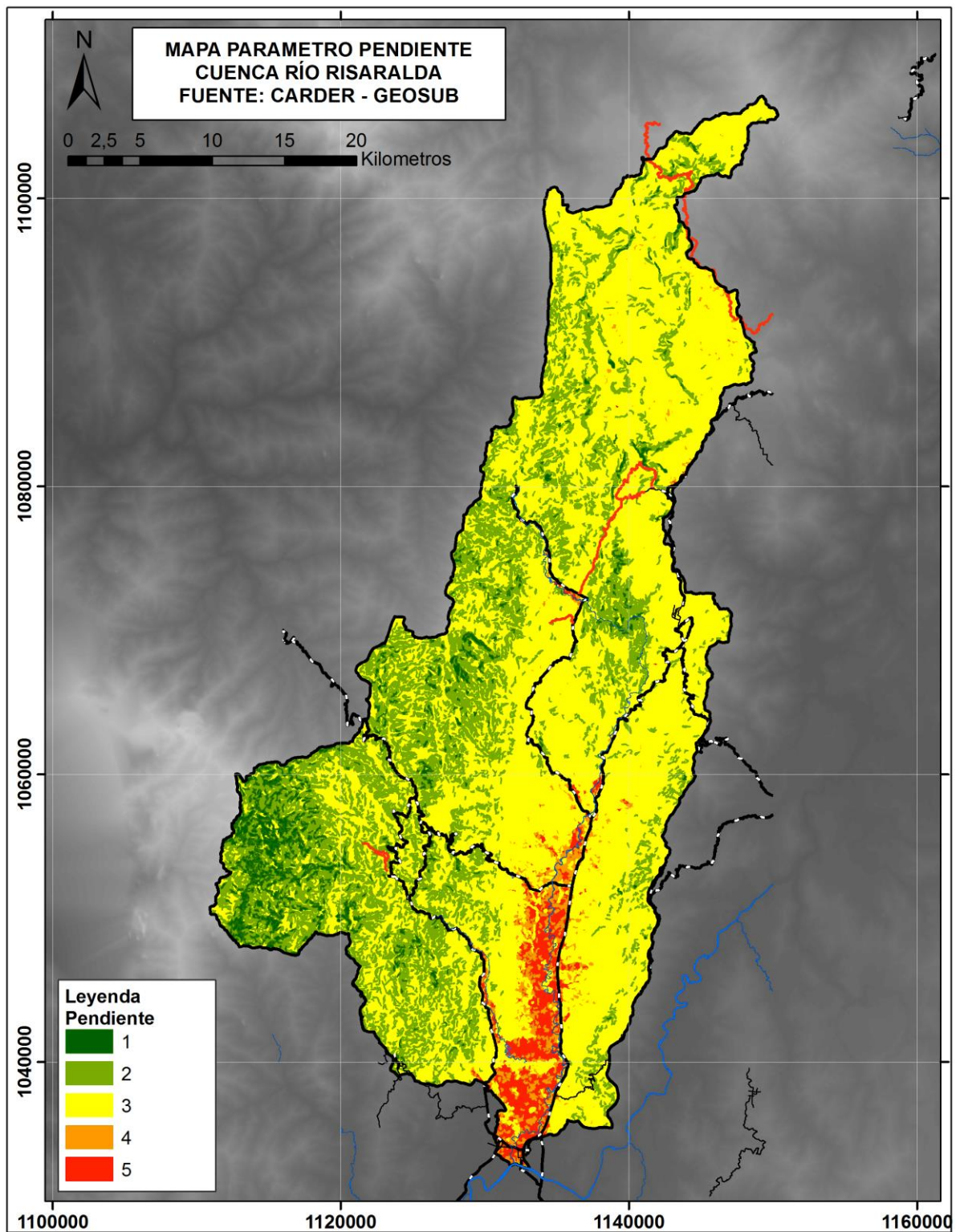


Figura 10. Distribución del parámetro Pendiente en la Cuenca del Río Risaralda
 Fuente: Consorcio Ordenamiento Cuenca Risaralda 2016

Tabla 11. Ponderación del parámetro Tipo de suelos en la cuenca del Río Risaralda

| Tipo de material | Granulometría | Potencial de recarga | Ponderación | Área (Ha) | Área (%) |
|--|------------------------------|----------------------|-------------|-------------------|------------|
| Sedimentario | Gruesa de guijos a bloques | Alto | 4 | 10344.753 | 8.235 |
| Volcánico | Gruesa de guijos a bloques | Alto | 4 | | |
| Aluvial | Gruesa de guijos a guijarros | Alto | 4 | | |
| Flujos sedimentarios por el cauce | Gruesa de guijos a guijarros | Alto | 4 | | |
| Combinado entre ígneo intermedio y volcánico | Gruesa de guijos a bloques | Moderado | 3.5 | 22132.975 | 17.620 |
| Flujos de lodo volcánico | Media a gruesa | Moderado | 3.5 | | |
| Aluvial | Fina | Moderado | 3.5 | | |
| Caída de material piroclástico | Fina | Moderado | 3 | 25481.958 | 20.286 |
| Sedimentario | Fina | Moderado | 3 | | |
| Ígneo volcánico | Fina a media | Bajo | 2 | 45183.341 | 35.970 |
| Ígneo intrusivo | Media a gruesa | Bajo | 2 | | |
| Rocas | Fina y media fina | Muy bajo | 1.5 | 22470.027 | 17.888 |
| Total | | | | 125613.055 | 100 |

Fuente: Tomado de (Matus Silva, 2007) y modificado por Consorcio Ordenamiento Cuenca Risaralda 2016

La variable suelo, presenta un potencial de recarga bajo para el 35.97% de la zona de estudio, debido a la predominancia de cuerpos ígneos volcánicos e intrusivos a lo largo de la cuenca; los potenciales de recarga moderado y alto se asocian principalmente a los suelos ubicados a lo largo del río Risaralda.

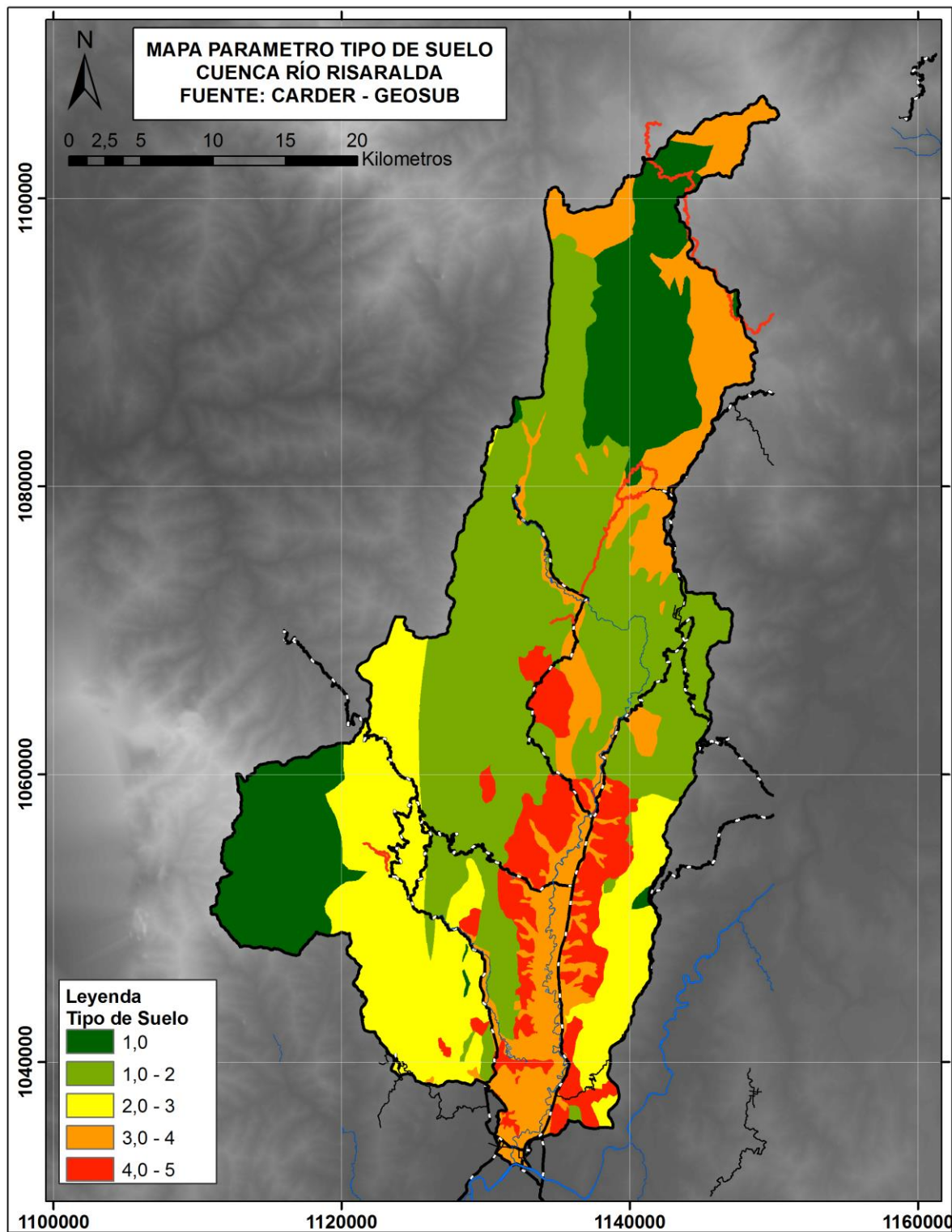


Figura 11. Distribución del parámetro Tipo de suelo en la Cuenca del Río Risaralda
Fuente: Consorcio Ordenamiento Cuenca Risaralda 2016

- **Tipo de roca**

Las ponderaciones son asignadas con base en las características del material geológico en función de su permeabilidad; así, rocas ígneas o metamórficas no fracturadas tienen una baja permeabilidad y las arenas gruesas y gravas, poseen poros de gran tamaño a través de los cuales circula el agua con gran facilidad favoreciendo la recarga de los acuíferos. Esta variable se obtuvo de la cartografía geológica a escala 1:25.000, realizada para el presente estudio. En la Tabla 12 se presenta la ponderación por unidad geológica y su extensión y en la Figura 12 su distribución areal.

Tabla 12. Ponderación del parámetro Tipo de roca en la Cuenca del Río Risaralda

| NOMBRE DE FORMACIÓN | NOMENC LATURA | POTENCIAL DE RECARGA | PONDERACI ÓN | ÁREA (HA) | ÁREA (%) |
|--|---------------|----------------------|--------------|------------|----------|
| Depósitos aluviales | Qal | Alto | 4 | 10707.3803 | 8.525 |
| Depósitos aluviales recientes | Qar | Alto | 4 | | |
| Terrazas | Qt | Alto | 4 | | |
| Secuencia de limolitas macizas, a veces silíceas, lutitas, shales | Kaa | Moderado | 3.5 | 30354.5357 | 24.167 |
| Conglomerados y areniscas. Matriz arcillosa | Tmp | Moderado | 3.5 | | |
| Areniscas y arcillolitas tobáceas con bancos de diatomitas | Tplz | Moderado | 3.5 | | |
| Unidad constituida por un alto porcentaje aglomerados, brechas y tobas. | Tmc | Moderado | 3 | 23189.0096 | 18.462 |
| Miembro superior. Areniscas bien cementadas, arcillas pizarrosas. | Tos | Moderado | 3 | | |
| Lentes de Chert asociados con rocas volcánicas | Kch | Bajo | 2 | 42558.04 | 33.884 |
| Diabasas, diabasas espilitizadas, basaltos, tobas y aglomerados | Kvb | Bajo | 2 | | |
| Basaltos, diabasas y piroclastos. | Kvo | Bajo | 2 | | |
| Flujos de lodo volcánico, compuestos principalmente por cenizas, arena, fragmentos de roca | Qfl | Bajo | 2 | | |
| Tonalita porfirítica con fenocristales de cuarzo y hornblenda | Kcdgm | Bajo | 1.5 | 18791.8319 | 14.962 |

| NOMBRE DE FORMACIÓN | NOMENC LATURA | POTENCIAL DE RECARGA | PONDERACI ÓN | ÁREA (HA) | ÁREA (%) |
|---|---------------|----------------------|--------------|-------------------|------------|
| Gabros, rocas de composición gabroide. | Kgo | Bajo | 1.5 | | |
| Ultramafita de puente de Umbría-La Isla Dunitas serpentinizadas | Kuspi | Bajo | 1.5 | | |
| Pórfido Andesítico Hornbléndico | Tadh | Bajo | 1.5 | | |
| Pórfido dacítico de Mistrató | Tdm | Bajo | 1.5 | | |
| Pórfido andes itico de la Virginia | Tpv | Bajo | 1.5 | | |
| Total | | | | 125600.798 | 100 |

Fuente: Tomado de (Matus Silva, 2007) y modificado por Consorcio Ordenamiento Cuenca Risaralda 2016

En la Figura 12 se observa que el potencial alto a moderado de recarga asociado al tipo de roca se encuentra principalmente en las inmediaciones de los drenajes principales y puntualmente en el sector occidental de la cuenca. Adicionalmente se encuentra que cerca del 33.88% de la cuenca tiene un potencial bajo de recarga debido a la presencia de rocas ígneas y metamórficas.

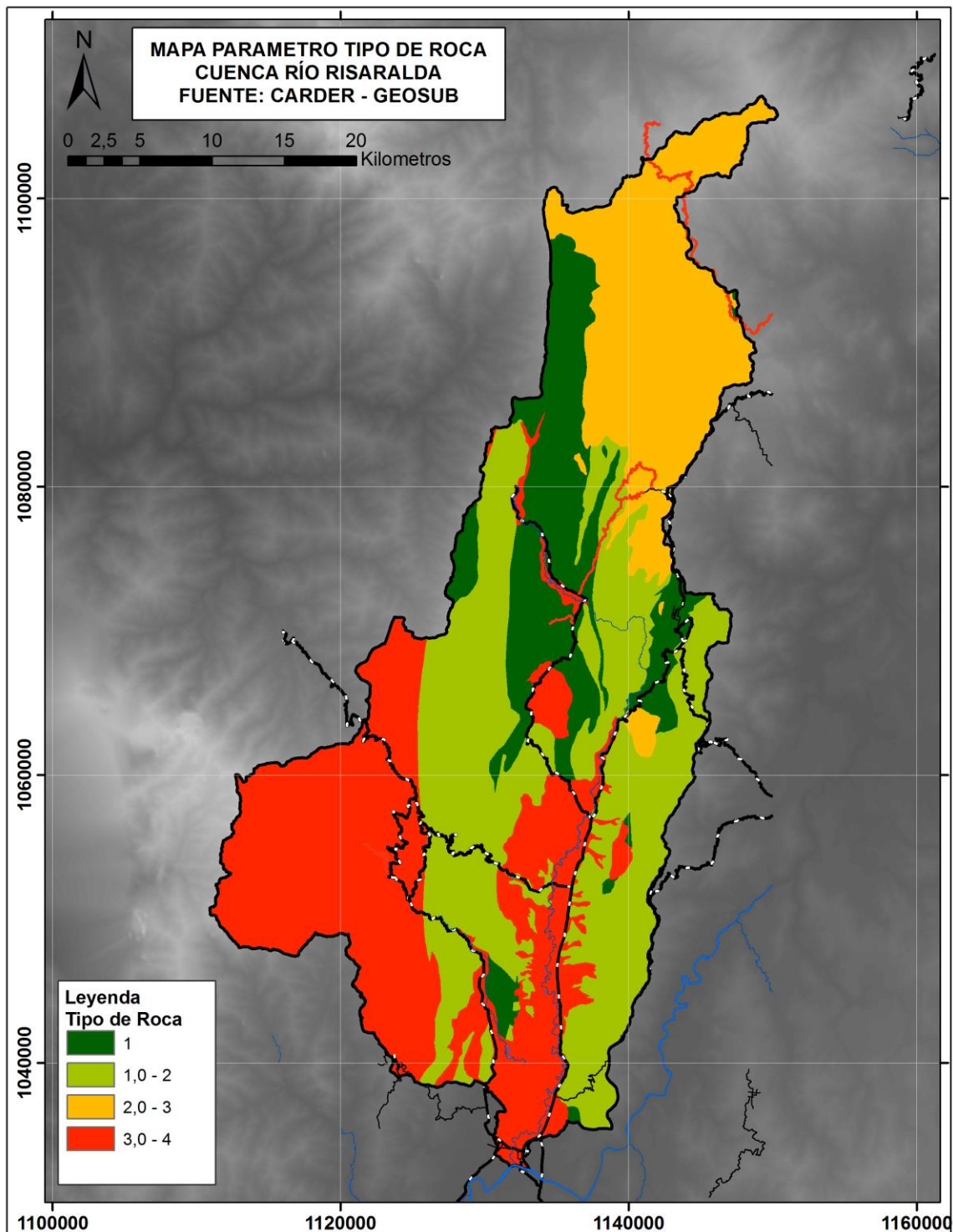


Figura 12. Distribución del parámetro Tipo de roca en la Cuenca del Río Risaralda
Fuente: Consorcio Ordenamiento Cuenca Risaralda 2016

- **Cobertura vegetal**

La cobertura vegetal disminuye la escorrentía superficial, permitiendo mayor contacto del agua con la superficie, atenuando la velocidad de escorrentía, la erosión, el impacto de la gota de lluvia y la resequedad producto de los rayos del sol, contribuyendo de esta manera a conservar las características del suelo que favorecen al recarga hídrica. Las superficies desnudas, hacen que el suelo esté expuesto al impacto directo de las gotas de lluvia, lo que puede dar lugar a la compactación del mismo, por el contrario, cuando el suelo está cubierto por vegetación, las plantas lo protegen de la lluvia y por tanto de la compactación, retardando además el recorrido superficial del agua, que de este modo está más tiempo expuesta a su posible infiltración; adicionalmente, las raíces de los vegetales abren conductos en el suelo que facilitan la penetración del agua.

Para la Cuenca del Río Risaralda se consideró que las áreas abiertas sin o con poca vegetación y los pastos ofrecen una cobertura muy baja <30%, para las zonas en donde se presentan cultivos permanentes, áreas agrícolas heterogéneas y áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva, se asignaron dos valores de ponderación, ya que por su densidad pueden ofrecer una cobertura del suelo entre 30% y 50%; áreas donde se presentan bosques pueden presentar una cobertura de aproximadamente entre el 50% y 70% en las zonas más densas. Para las zonas artificializadas como áreas urbanas y para los cuerpos de agua, no se asignó valor de ponderación, los valores de clasificación se presentan en la Tabla 13, y en la Figura 13 se muestra su distribución areal.

Teniendo en cuenta la variable cobertura, las áreas con potencial de recarga muy bajo corresponden a pastos, cultivos transitorios y espacios abiertos sin o con poca vegetación, puesto que estos sectores debido a la deficiencia o carencia de vegetación no se favorece la infiltración del agua; ocupan el 45.56% del área de interés y se localizan principalmente en la cuenca baja y media donde las pendientes son menores.

Algunos sectores localizados principalmente en la cuenca alta y en el sector occidental, donde se presentan bosques, tienden a conservar las características del suelo, por lo cual el 35.54% de la zona de evaluación tiene potencial de recarga moderado a alto.

Tabla 13. Ponderación del parámetro cobertura en la Cuenca del Río Risaralda

| COBERTURA (%) | TIPO DE COBERTURA | POTENCIAL DE RECARGA | PONDERACIÓN | ÁREA (HA) | ÁREA (%) |
|--|--|----------------------|-------------|------------------|------------|
| 50 – 70 | Bosques | Alta | 4 | 33945.701 | 27.027 |
| | Bosques fragmentados | Moderada | 3.5 | 3007.482 | 2.394 |
| 30 – 50 | Cultivos agroforestales | Moderada | 3 | 7689.437 | 6.122 |
| | Cultivos permanentes arbóreos | Baja | 2.5 | 1211.601 | 0.965 |
| | Cultivos permanentes arbustivos y café | | 2 | 19865.440 | 15.816 |
| <30 | Cultivos transitorios, Pastos | Muy baja | 1.5 | 57224.320 | 45.561 |
| | Tierras desnudas y degradadas y zonas quemadas | | 1 | 2656.084 | 2.115 |
| Territorios Artificializados, Áreas húmedas, Superficies de agua | | Ninguna | 1 | | |
| Total | | | | 125600.06 | 100 |

Fuente: Tomado de (Matus Silva, 2007) y modificado por Consorcio Ordenamiento Cuenca Risaralda 2016

En las zonas donde se encuentran cultivos permanentes arbóreos, áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva, áreas agrícolas heterogéneas, cultivos permanentes arbustivos y cultivos permanentes herbáceos, el suelo se encuentra menos expuesto, sin embargo puede sufrir procesos de compactación y erosión ya que la cobertura vegetal presente no ofrece la suficiente protección de la lluvia y el sol, en consecuencia el 16.78% de la zona de estudio presenta para esta variable potencial de recarga bajo, estas áreas se localizan principalmente en la Cuenca Media del Río Risaralda.

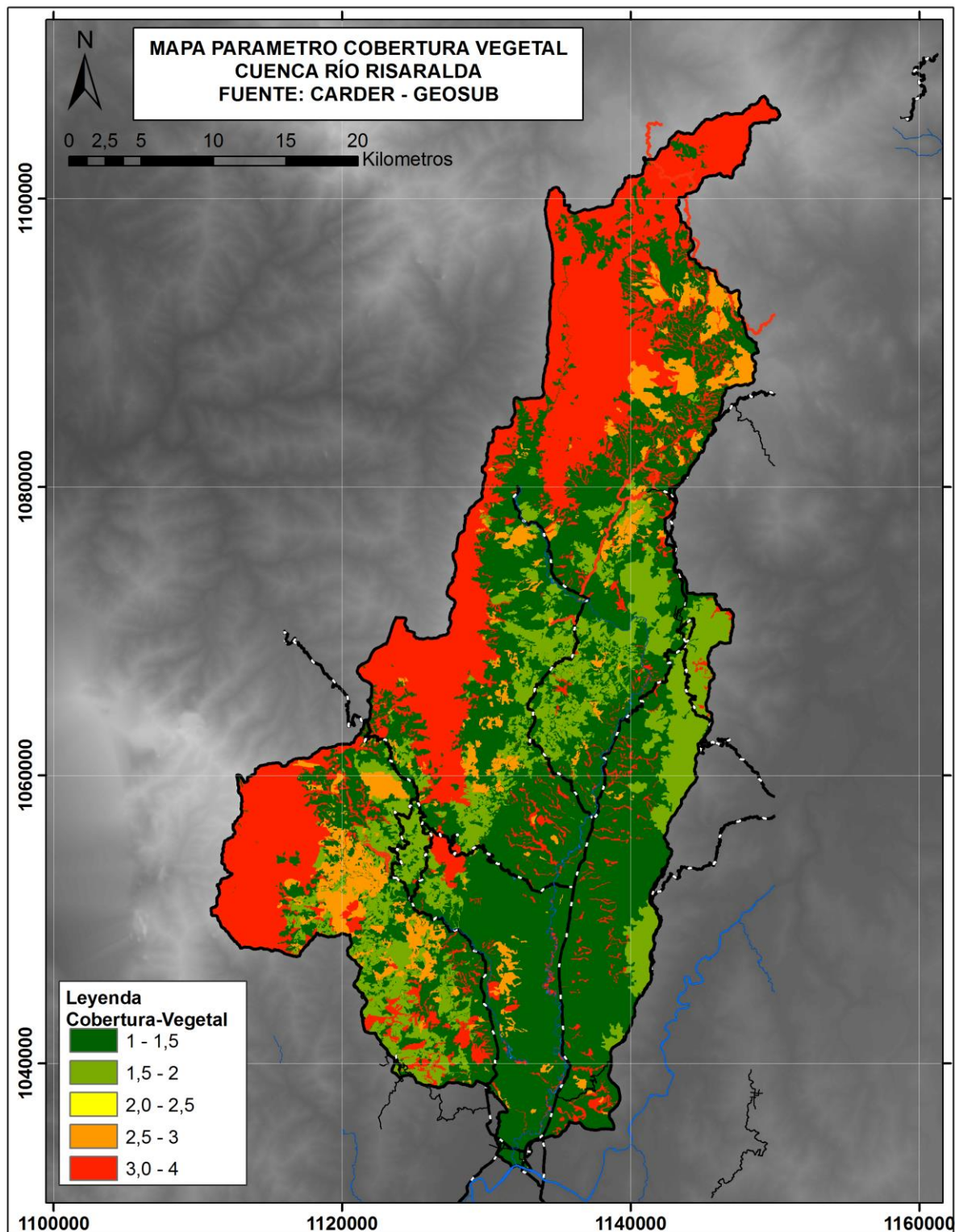


Figura 13. Distribución del parámetro cobertura en la Cuenca del Río Risaralda
Fuente: Consorcio Ordenamiento Cuenca Risaralda 2016

- **Uso del suelo**

El uso del suelo es el elemento más cambiante e influenciado por la actividad antrópica; el uso inadecuado del suelo contribuye a disminuir la recarga del acuífero hasta en un 50%, aumentando la pérdida del suelo por erosión hídrica o eólica y los riesgos naturales (Forges, citado por Matus, 2007). Adicionalmente es un elemento que establece el grado de influencia de una determinada actividad o cambio de uso, tanto en el deterioro de sus características (erosión y la compactación), como en la reducción de la infiltración y/o recarga hídrica.

En este aspecto se trata de establecer los usos que por su connotación y características favorecen la infiltración del agua como sistemas silvopastoriles y/o agroforestales, el uso e incorporación de materia orgánica, asociados de cultivos entre otros y diferenciar aquellos que afectan las características de suelo favoreciendo la evaporación, la compactación y el escurrimiento superficial del agua, como agricultura intensiva sin obras de conservación de suelo y agua, la ganadería extensiva, labranza convencional con excesivo uso de maquinaria, etc.

Se asignaron valores de potencial de recarga considerando que la mayor parte de las coberturas vegetales presentan algún tipo de intervención antrópica, que influye en las propiedades físicas de los suelos y finalmente en el potencial de recarga, así las zonas con menor grado de intervención del suelo se calificaron como altas y las de mayor intervención como de bajo potencial de recarga. Para los cuerpos de agua y zonas artificializadas se asignó la ponderación más baja. Los valores se establecieron como se presenta en la Tabla 14, y en la Figura 14 se muestra su distribución areal.

Para la variable uso del suelo, las áreas con pastos, cultivos permanentes, cultivos transitorios y áreas agrícolas heterogéneas, que demandan intervención sobre el suelo, pueden sufrir procesos de compactación y erosión, por lo cual se les asignó un valor de recarga bajo; ocupan el 64.46 % de la zona de interés.

Las zonas donde se encuentran bosques, aunque pueden presentar algún grado de intervención en el área de interés, se consideraron de alto potencial de recarga, ocupando el 29.42% del área; se distribuyen de forma dispersa en la cuenca media y como un bloque en la zona norte y occidental de la cuenca.

Tabla 14. Ponderación del parámetro Uso del suelo en la Cuenca del Río Risaralda

| COBERTURA VEGETAL | USO DEL SUELO | POTENCIAL DE RECARGA | PONDERACIÓN | ÁREA (HA) | ÁREA (%) |
|---|---|----------------------|-------------|-----------|----------|
| Bosques | Bosques | Alta | 4 | 36953.18 | 29.42 |
| Cultivos | Sistemas agroforestales o silvopastoriles | Moderada | 3 | 7689.44 | 6.12 |
| | Cultivos permanentes arbóreos | Baja | 2.5 | 1211.6 | 0.96 |
| | Cultivos permanentes arbustivos y café | Baja | 2 | 19865.44 | 15.82 |
| | Cultivos transitorios, Pastos | Muy baja | 1.5 | 57224.32 | 45.56 |
| Territorios artificializados, Superficies de agua, Áreas húmedas y tierras degradadas | | Muy baja | 1 | 2656.08 | 2.11 |
| Total | | | | 125600.06 | 100 |

Fuente: Tomado de (Matus Silva, 2007) y modificado por Consorcio Ordenamiento Cuenca Risaralda 2016

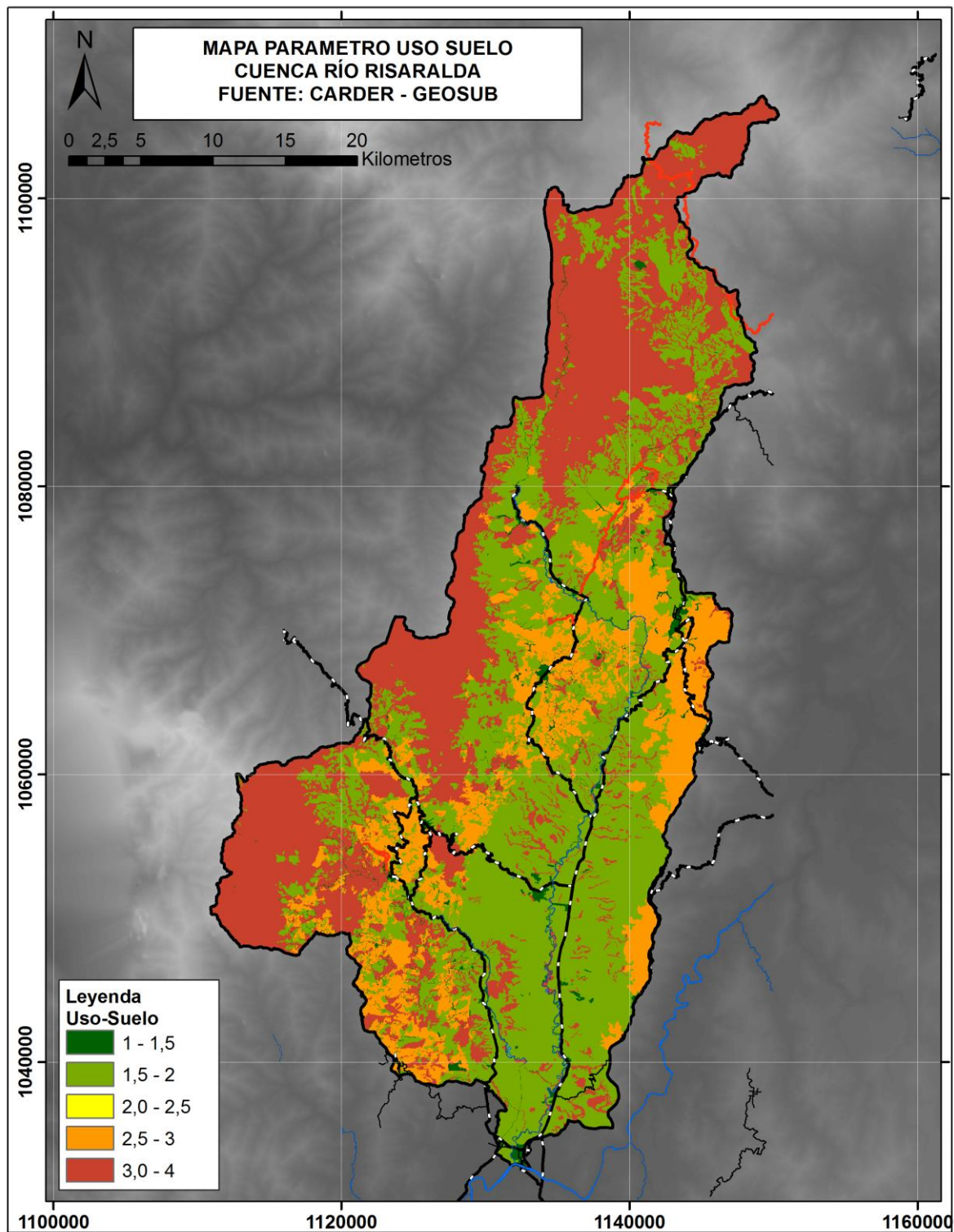


Figura 14. Distribución del parámetro Uso del suelo en la Cuenca del Río Risaralda
Fuente: Consorcio Ordenamiento Cuenca Risaralda 2016

- **Delimitación de las zonas de recarga potencial**

Al realizar el cruce de los mapas obtenidos anteriormente, se tiene que para la Cuenca del Río Risaralda hay sectores con potencial de recarga que va desde muy bajo hasta muy alto, el área que ocupa cada una se presentan en la Tabla 15 y su distribución areal en la Figura 15.

Tabla 15. Potencial de recarga de los acuíferos libres en la cuenca del Río Otún

| Potencial de recarga | Valor Resultante | Área (ha) | Área (%) |
|----------------------|------------------|-----------|----------|
| Muy alta | 4.1 – 5.0 | 7271.15 | 5.79 |
| Alta | 3.5 – 4.09 | 236.26 | 0.19 |
| Moderada | 2.6 – 3.49 | 67026.85 | 53.37 |
| Baja | 2.0 – 2.59 | 34901.94 | 27.79 |
| Muy baja | 0.75 -1.99 | 16153.2 | 12.86 |
| Total | | 125589.4 | 100 |

Fuente: Consorcio Ordenamiento Cuenca Risaralda 2016

Para la Cuenca del Río Risaralda, la delimitación de las zonas de recarga potencial por precipitación directa, se categorizó principalmente como moderada en un 53.37% del área total, estos sectores se encuentran ampliamente influenciados por las pendientes inclinadas que determinan en mayor medida su disposición, del mismo modo la litología de las unidades aflorantes, asociadas en general depósitos de granulometría media a gruesa. Le siguen en extensión, zonas de baja potencialidad de infiltración, que ocupan el 27.79% del área de la cuenca, se localizan principalmente en el sector en la cuenca media y baja, relacionados con pendientes inclinadas y usos de suelo que no favorecen la infiltración como lo son los pastizales y cultivos transicionales.

La descarga natural del acuífero libre se da tanto por los ríos y quebradas como por los manantiales, de los cuales se tiene reporte de 351 puntos, aunque la cifra puede ser mayor, lo cual muestra a un acuífero saturado, dando formación a drenajes cuyo flujo base proviene del agua subterránea. La descarga artificial de las unidades acuíferas libres se da a través de los aljibes y pozos existentes en la zona.

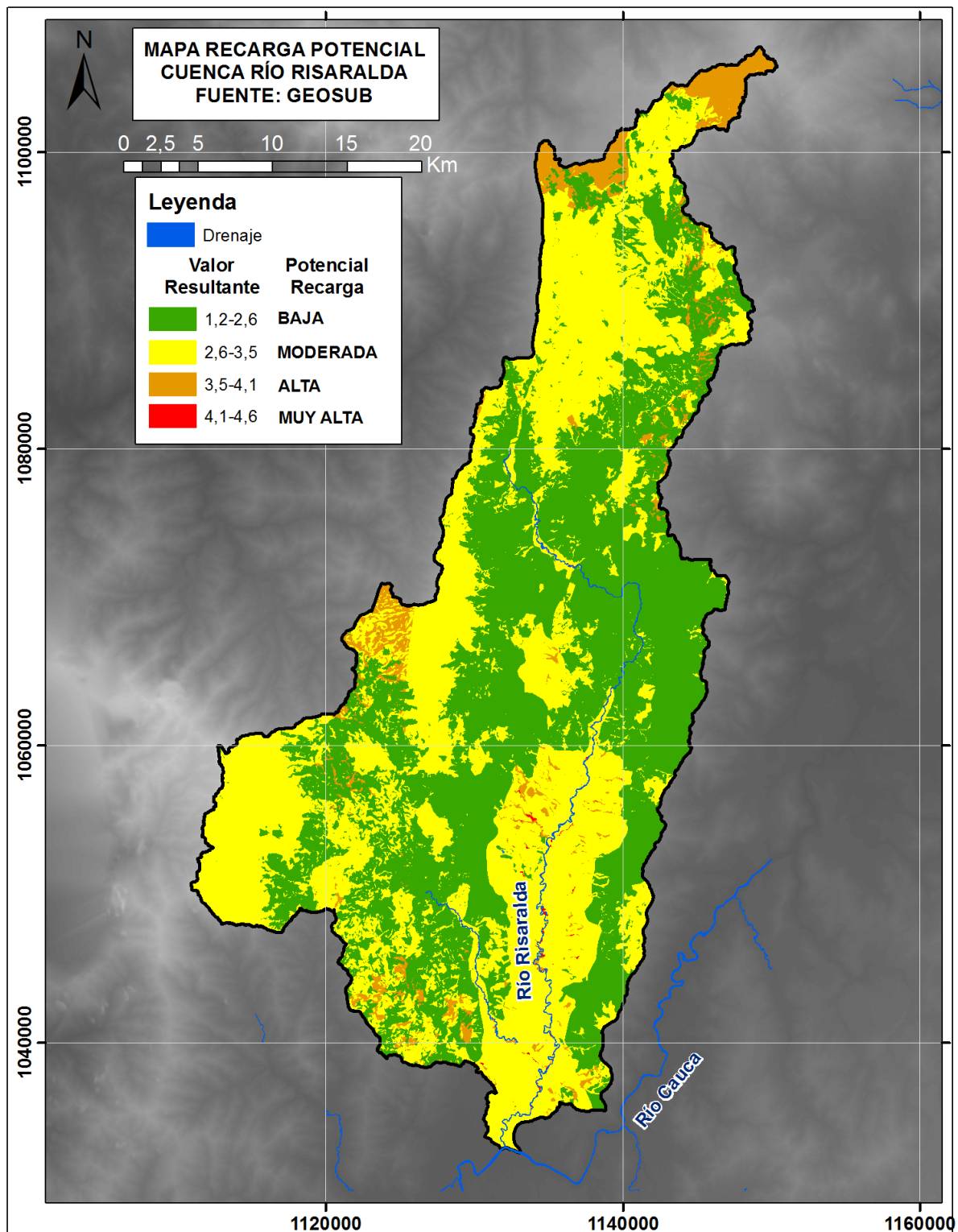


Figura 15. Zonas de Recarga Potencial
Fuente: Consorcio Ordenamiento Cuenca Risaralda 2016

7. HIDROGEOQUÍMICA

Las características físico químicas del agua subterránea se van adquiriendo desde el momento en que el agua lluvia se infiltra y se incorpora al flujo subterráneo, ya que gases, aerosoles y diversas sales presentes en la atmósfera reaccionan con el agua, marcando la composición del agua de infiltración.

Una vez al agua entra en contacto con los sedimentos y las rocas, va adquiriendo sales. Este enriquecimiento en sales del agua subterránea estará controlado por la composición mineralógica de los sedimentos y las rocas, así como de la solubilidad de las sales; siendo por su solubilidad el carbonato de calcio, el carbonato de magnesio, el cloruro de sodio y el sulfato de magnesio, las que se encuentran generalmente en mayores proporciones en el agua subterránea.

El grado de mineralización de las aguas subterráneas depende del tiempo de contacto con la roca por la cual circula el agua. Generalmente aguas subterráneas cercanas a la zona de recarga o de infiltración (con cortos periodos de residencia), tendrán una mineralización más baja que las aguas subterráneas de circulación regional (las cuales han tenido largos periodos de residencia).

Para el presente estudio se contó con información de tres estudios hidrogeológicos realizados en la cuenca del Río Risaralda. El primero realizado en el año 1995 y denominado Proyecto CARDER – CANADÁ en el que se muestrearon 21 aljibes, con profundidades entre 4.7 y 19 m y dos pozos El Danubio, con profundidad de 50 m y El Paraíso, con una profundidad de 60 m. De la clasificación hidrogeoquímica realizada se determina que las aguas en los puntos muestreados son en general Bicarbonatadas – cálcico – magnésicas lo cual responde a la composición mineralógica de las rocas ígneas de composición dacítica y andesítica que conforman los sedimentos cuaternarios y los cantos y sedimentos de rocas terciarias que aportan calcio y magnesio en proporciones apreciables (Proyecto CARDER - CANADA, 1995).

El estudio realizado por la UTP en el año 2014 en la Cuenca Baja del Río Risaralda se realizó la clasificación de facies hidroquímicas para 15 muestras de agua subterránea encontrando que las principales especies catiónicas presentes en el grupo monitoreado son el calcio y el magnesio y que principales especies aniónicas son del tipo bicarbonatado y tipo clorurado (Universidad Tecnológica de Pereira, 2014).

En el año 2015 la UTP realiza un nuevo muestreo de aguas subterráneas en 17 puntos de agua subterránea y concluye que las principales especies catiónicas presentes en el grupo de puntos monitoreados son del tipo cálcico y magnésico y que las principales



especies aniónicas presentes son del tipo bicarbonatado (Universidad Tecnológica de Pereira, 2015).

8. VULNERABILIDAD DE LOS ACUÍFEROS A LA CONTAMINACIÓN

Foster establece el término vulnerabilidad a la contaminación del acuífero para representar las características intrínsecas que determina la susceptibilidad de un acuífero a ser adversamente afectado por una carga contaminante; ésta establece la facilidad con la cual ingresan las sustancias que puedan degradar la calidad del agua subterránea, mediante infiltración a través del suelo y la zona no saturada (Foster, S, 1991).

Existen varias metodologías para la determinación de la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación. Este autor también sugiere que la vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos debe ser medida según: 1) El grado de inaccesibilidad de los contaminantes a través de la zona no saturada de un acuífero y, 2) El grado de atenuación a la contaminación que posean los estratos de la zona no saturada (retención o reacción fisicoquímica). Así, la susceptibilidad de los acuíferos a la contaminación, se considera como una función de las propiedades intrínsecas del suelo y del estrato litológico que comprende la zona no saturada. Los métodos difieren en los parámetros utilizados para su determinación (Foster, S, 1991).

El método “GOD” propuesto por Foster (1991), permite evaluar áreas con escasa información, con regular distribución de datos y con incertidumbre de los mismos, considera los siguientes parámetros de evaluación:

- Groundwater – G: Se refiere a la condición de confinamiento del acuífero y establece las siguientes categorías: no confinado, no confinado-cubierto, semiconfinado, confinado y sin presencia de acuífero.
- Overall - O: Este parámetro incluye una caracterización global de la zona que suprayace al acuífero, en cuanto a la naturaleza litológica, al grado de consolidación y el fracturamiento de la roca.
- Depth - D: Profundidad del nivel freático en acuíferos libres o profundidad del estrato litológico confinante en acuíferos confinados.

Cada característica se sintetiza en coberturas cuya indexación final genera el mapa de vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación. En esta metodología se han establecido escalas numéricas para valorar cada parámetro de acuerdo con su capacidad de atenuación de contaminantes. El grado de vulnerabilidad total se determina multiplicando los valores asignados a cada parámetro, obteniéndose valores de 0 a 1, donde el cero "0" indica una vulnerabilidad despreciable y el "1" una vulnerabilidad extrema a la contaminación. Los valores de los parámetros propuestos por este método y que ha utilizado la CARDER en el Plan de Manejo de Aguas Subterráneas (CARDER, Abril 2007) se muestran en la Figura 16.

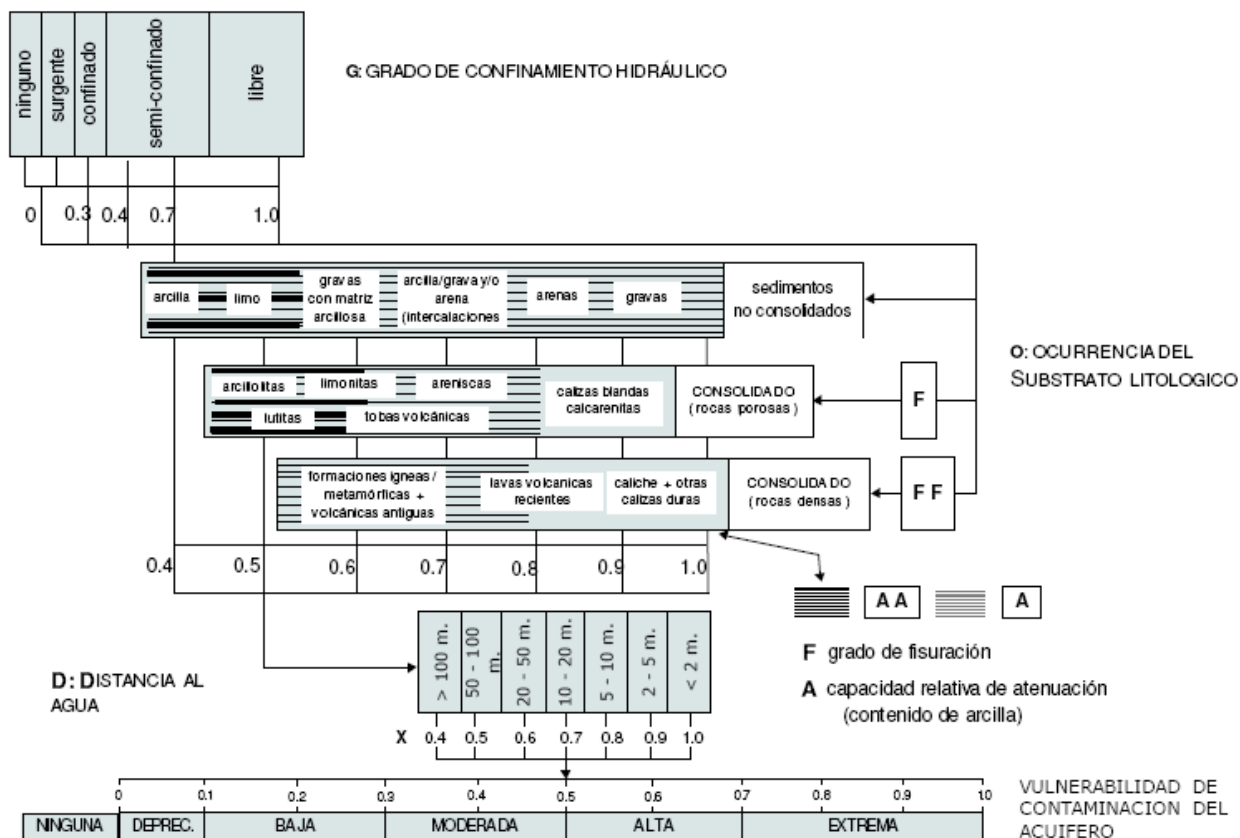


Figura 16. Sistema de indexación GOD para evaluación de Vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación

Fuente: (CARDER, Abril 2007) Modificado de (Foster, S, 1991)

Por tanto se definen las siguientes categorías de vulnerabilidad, de acuerdo con el método de indexación GOD, así:

- Acuíferos con Vulnerabilidad Extrema (índices entre 0.7 y 1.0), se consideran susceptibles a la mayoría de contaminantes y con impacto relativamente rápido.
- Acuíferos con Vulnerabilidad Alta (índices entre 0.5 y 0.7), son vulnerables a muchos contaminantes, excepto a los absorbibles y/o fácilmente transformables.
- Acuíferos con Vulnerabilidad Moderada (índices entre 0.3 y 0.5), son vulnerables a mediano plazo a la mayoría de contaminantes.
- Acuíferos con Vulnerabilidad Baja (índices entre 0.1 y 0.3), son vulnerables a largo plazo a contaminantes persistentes.

- Acuíferos con Despreciable Vulnerabilidad (índices entre 0 y 0.1), las capas confinantes no permiten un flujo significativo hacia el acuífero.

La metodología para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca, se enfoca hacia los acuíferos más someros o la parte más superficial de los acuíferos de interés, ya que se considera que las características de la zona no saturada, son las que finalmente determinan el grado de protección, porque son los más susceptibles a ser afectados adversamente por una carga contaminante y una vez contaminados, este fenómeno se puede inducir fácilmente hacia los horizontes profundos.

Cabe resaltar que los resultados de la metodología tienen un grado considerable de incertidumbre asociada a la disponibilidad de información puesto que, por ejemplo, áreas identificadas con vulnerabilidad baja, puede deberse a que carezcan de información de referencia, y en tal sentido pueden subvalorarse, mientras en el lado opuestos algunas zonas con mucha información el efecto pudiera ser el inverso.

Es así, que para disminuir el grado de incertidumbre se recomienda adquirir información distribuida uniformemente a lo largo de toda la cuenca incluyendo un inventario completo de manantiales en el que se especifiquen, entre otros, el tipo de manantial, permanencia, geoforma a la que se asocia y método de surgencia. Adicionalmente se recomienda complementar los estudios geoeléctricos en las zonas donde actualmente no exista información.

Teniendo en cuenta lo anterior la distribución espacial de los parámetros y del índice de vulnerabilidad final GOD, se tomó hasta las coordenadas 1090000 Norte, puesto que hacia la parte superior del perímetro de la cuenca en ordenación no se cuenta con mas información.

La información que genera el mapa de vulnerabilidad, parte del análisis de datos existentes:

- Condición del acuífero, Parámetro “G”: Se analiza el acuífero más somero a partir de la evaluación hidrogeológica realizada en el presente documento.
- Predominio litológico de la zona no saturada, Parámetro “O”: Se utilizó la interpretación de los Sondeos Eléctricos Verticales que se han realizado dentro de la cuenca del Río Risaralda.
- Profundidad de la tabla de agua, Parámetro “D”: se analiza a partir de información del nivel de la tabla de aguade los aljibes y manantiales del inventario de puntos de agua.

Mediante la superposición de las capas de información y la multiplicación de los parámetros “G” “O” y “D”, usando Sistemas de Información Geográfica - SIG, se obtiene la zonificación de vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación. En el Anexo 5 se encuentra la calificación de cada uno de los parámetros.

8.1. Grado de confinamiento hidráulico – Parámetro “G”

Para la determinación de la condición del acuífero en cuanto a su grado de confinamiento, se tuvo en cuenta el tipo de captación de agua, si se trataba de un aljibe (calificación de 0.8) o de un manantial (calificación de 1) y el tipo de suelo que se interpretó en cada uno de los sondeos eléctricos verticales, es así que las cenizas se calificaron con 0.8 y los depósitos de granulometría más gruesa con 1. En el Anexo 5 se presenta la calificación para cada uno de los puntos del inventario y de los sondeos eléctricos y en la Figura 17 se encuentra la distribución espacial para este parámetro al realizar la interpolación para la parte media y baja de la cuenca.

Cabe anotar que la calificación asociada a los manantiales puede estar siendo sobrevalorada puesto que no se cuenta con información asociada a permanencia ni método de surgencia, factores que pueden estar atenuando la vulnerabilidad de los puntos.

8.2. Ocurrencia del substrato litológico – Parámetro “O”

Para la obtención del parámetro O se utilizaron las descripciones de los Sondeos Eléctricos Verticales que se han realizado en la Cuenca del Río Risaralda. Es así que para los sondeos que en las primeras capas se interpretaron arcillas se calificó con 0.4, las cenizas y limos se calificaron con 0.5, y los sondeos en que se interpretaron arenas y gravas en las primeras capas se calificaron con 0.7. En el Anexo 5 se presenta la calificación realizada para los sondeos eléctricos verticales y en la Figura 18 se encuentra la distribución espacial para este parámetro al realizar la interpolación.

Debe tenerse en cuenta que la distribución del Parámetro O se ve altamente influenciada por la disponibilidad y distribución de la información geoeléctrica, por lo que probablemente al obtener nueva información esta calificación se verá afectada.

8.3. Distancia al agua subterránea – Parámetro “D”

La parametrización de la distancia al agua subterránea se llevó a cabo teniendo en cuenta la ubicación de los manantiales (calificación de 1) y los niveles del agua de los

aljibes. En el Anexo 5 se presenta la calificación realizada para los sondeos eléctricos verticales y en la se encuentra la distribución espacial para este parámetro una vez realizada la interpolación.

Es de anotar que la calificación asociada a manantiales puede verse atenuada una vez se cuente con información asociada a permanencia y tipo de surgencia.

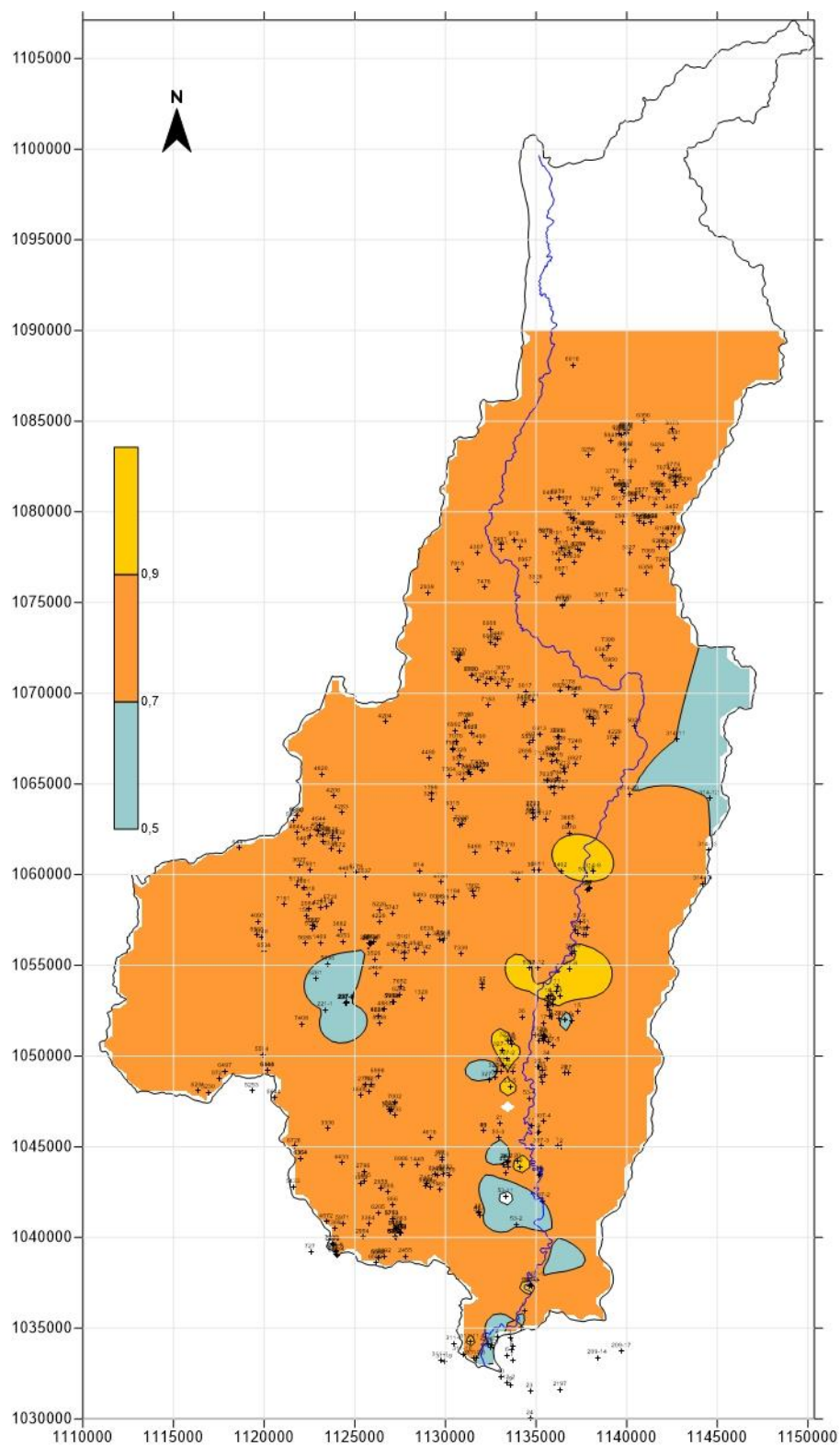


Figura 17. Distribución espacial del parámetro G – Condición del acuífero

Fuente: Consorcio Ordenamiento Cuenca Risaralda 2016

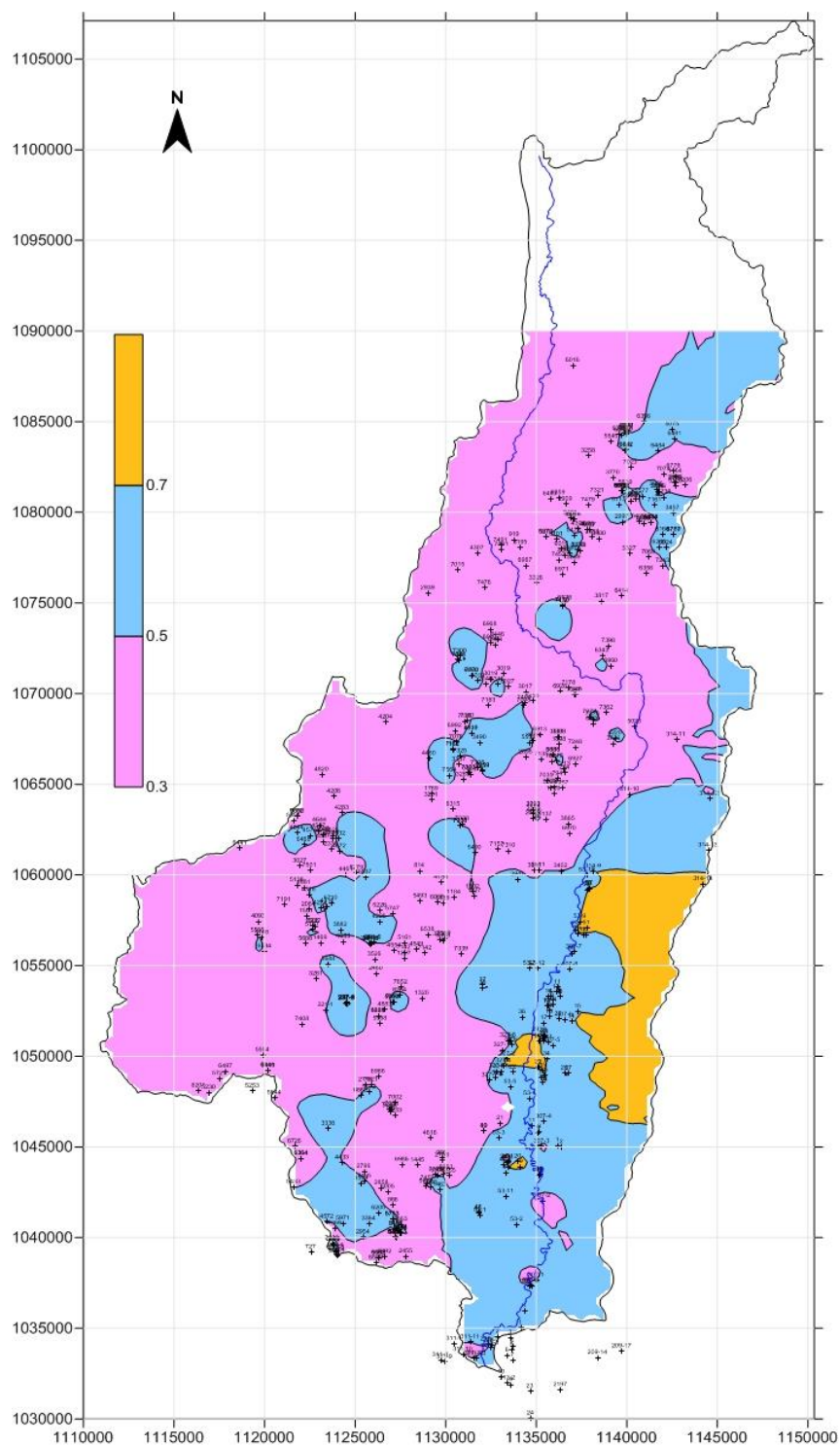


Figura 18. Distribución espacial del parámetro O – Predominio litológico en zona no saturada
 Fuente: Consorcio Ordenamiento Cuenca Risaralda 2016

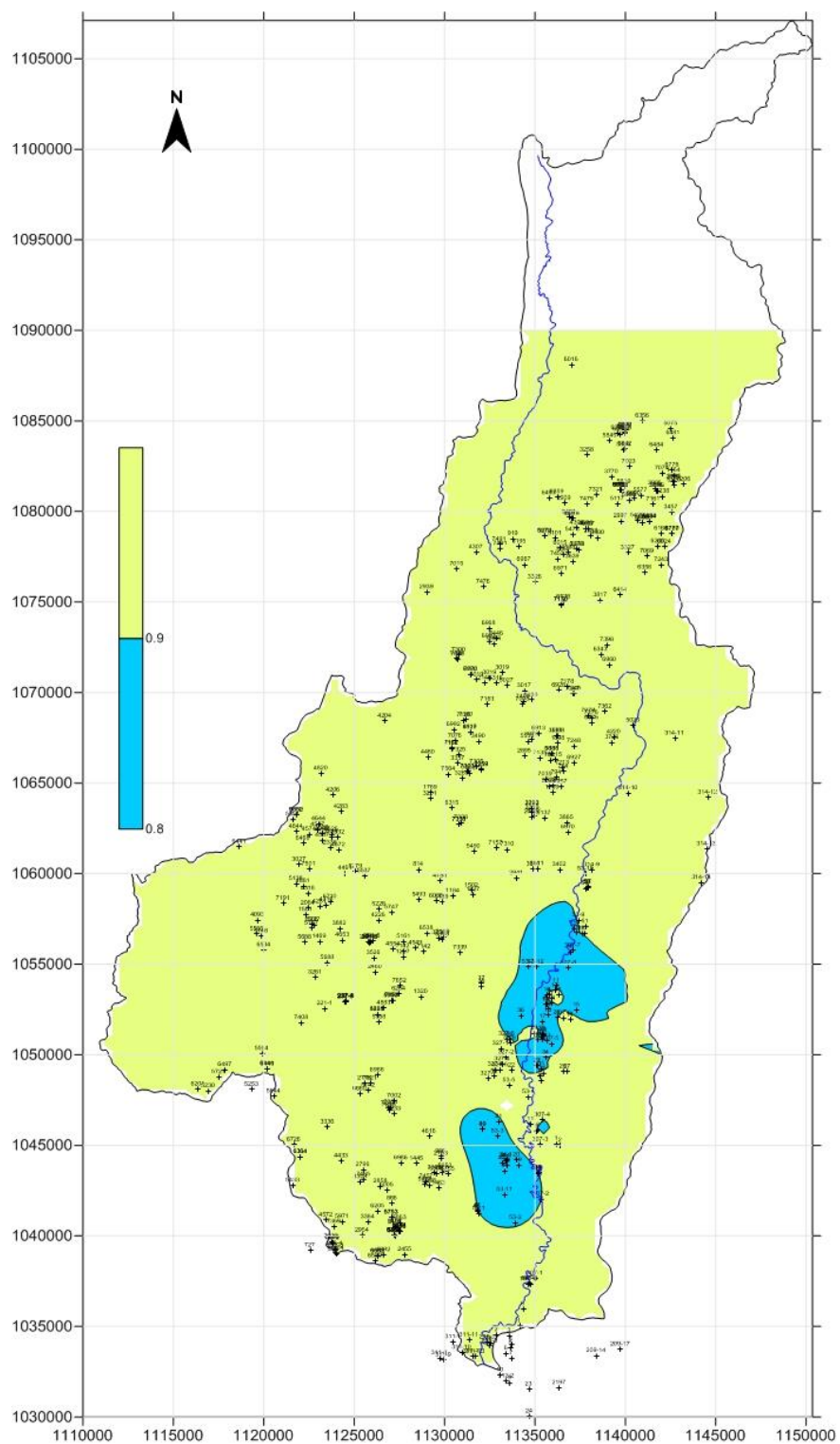


Figura 19. Distribución espacial del parámetro D – Distancia al agua subterránea
 Fuente: Consorcio Ordenamiento Cuenca Risaralda 2016

8.4. Zonificación del grado de vulnerabilidad

La zonificación de vulnerabilidad se obtuvo mediante la indexación de los mapas de los tres parámetros, “G” de la ocurrencia del agua subterránea, “O” de la litología predominante sobre el acuífero y “D” de la profundidad del agua, el resultado final de la indexación de estos mapas nos da un resultado numérico. Para el área de la cuenca del Río Risaralda se encontraron tres grados de vulnerabilidad a la contaminación establecidos en la metodología, desde bajo hasta alto.

En la Figura 20 se encuentra el resultado de la indexación de vulnerabilidad del acuífero superior de la Cuenca del Río Risaralda. En esta se observa que alrededor del 88% de la zona evaluada presenta un índice de vulnerabilidad medio (957,4 Km²) mientras que la vulnerabilidad alta 7% se observa como sectores aislados a lo largo de la cuenca (76,14 Km²) en los que predominan los manantiales. Las zonas de baja vulnerabilidad cubren unos 3,95% del total analizado distribuidas en toda la zona de ordenación (42,53 Km²).

Las distribuciones de las zonas de vulnerabilidad obtenidas para el presente estudio están directamente relacionadas con la distribución y calidad de la información utilizada, por lo que al tener información distribuida uniformemente a lo largo de la cuenca y conocer más características de los manantiales la distribución del índice de vulnerabilidad intrínseca del acuífero superior probablemente cambiará.

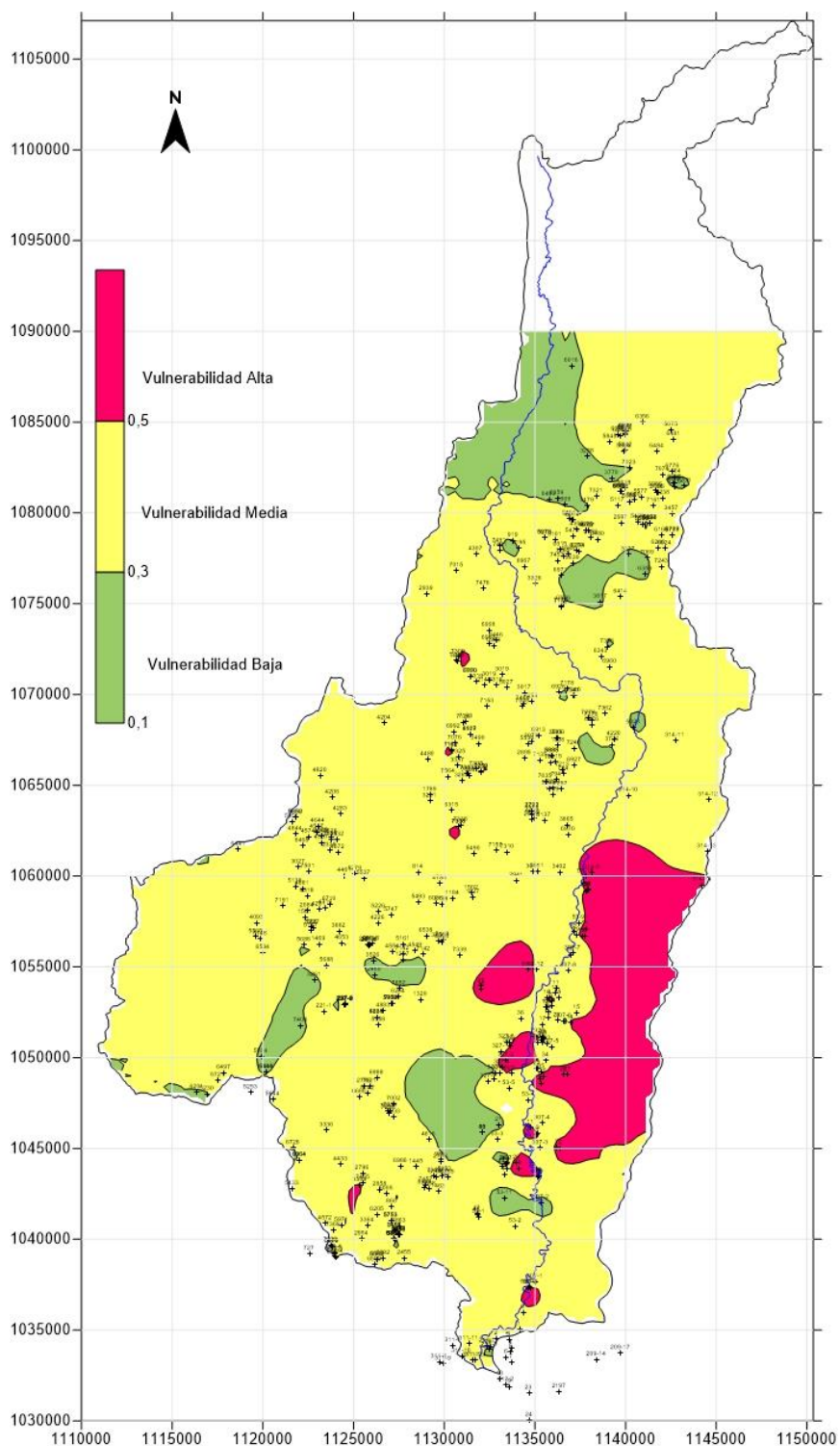


Figura 20. Distribución espacial del índice de vulnerabilidad del acuífero superior de la Cuenca del Río Risaralda.

Fuente: Consorcio Ordenamiento Cuenca Risaralda 2016

9. MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL

De acuerdo al Estudio Nacional del Agua 2014 (IDEAM, 2014), la zona de estudio se encuentra localizada en la Provincia Hidrogeológica Cauca Patía pero no ha sido clasificada como Sistema Acuífero puesto que no se cuenta con un nivel de información y conocimiento suficiente para la gestión del agua subterránea.

La Cuenca del Río Risaralda cubre un área de aproximadamente 1302.09 km² y su corriente principal empieza a formarse en el Alto del Morro Planchó, en los límites entre Caldas y Antioquia, sobre los 3750 m.s.n.m. y desemboca en el río Cauca frente al municipio de La Virginia a 896 m.s.n.m., recorriendo un trayecto aproximado de 95 Km, en sentido Norte–Sur. Sus principales afluentes son los ríos Guática por el Norte, Chapatá, Guarne, Mapa y Totuí por la margen derecha.

El clima de la cuenca es cálido y húmedo, en virtud de su localización en el valle interandino de los ríos Risaralda y Mapa. Conforme a las características climáticas enunciadas en las Agendas para la Gestión Ambiental de los municipios de influencia, tiene una temperatura media máxima de 24°C que se encuentra en la cota 900 m en el valle del río Risaralda, al tiempo que se registra una temperatura mínima de 6°C en el cerro de Tatamá. Como consecuencia de las variaciones de temperatura y altitudinales.

La variedad altimétrica de la cuenca influye de manera directa sobre el régimen de distribución de las lluvias, la temperatura y la humedad del territorio. La precipitación media anual para la cuenca es de 2.086 mm, con valores que oscilan entre los 2900 y 1600 mm. La cuenca se caracteriza por presentar dos periodos de relativa sequía y dos periodos húmedos. Esta distribución corresponde a un régimen de precipitación tipo ecuatorial (bimodal), con influencia mitigada de los alisios norte que penetran en la región desde el Chocó por el boquerón que corta la Cordillera Occidental entre los cerros Tatamá y Caramanta, influencia ésta que se advierte porque el periodo seco de principio de año es más prolongado que el de mitad de año.

En la Figura 21 se presenta la esquematización del modelo hidrogeológico conceptual propuesto para la Cuenca del Río Risaralda.

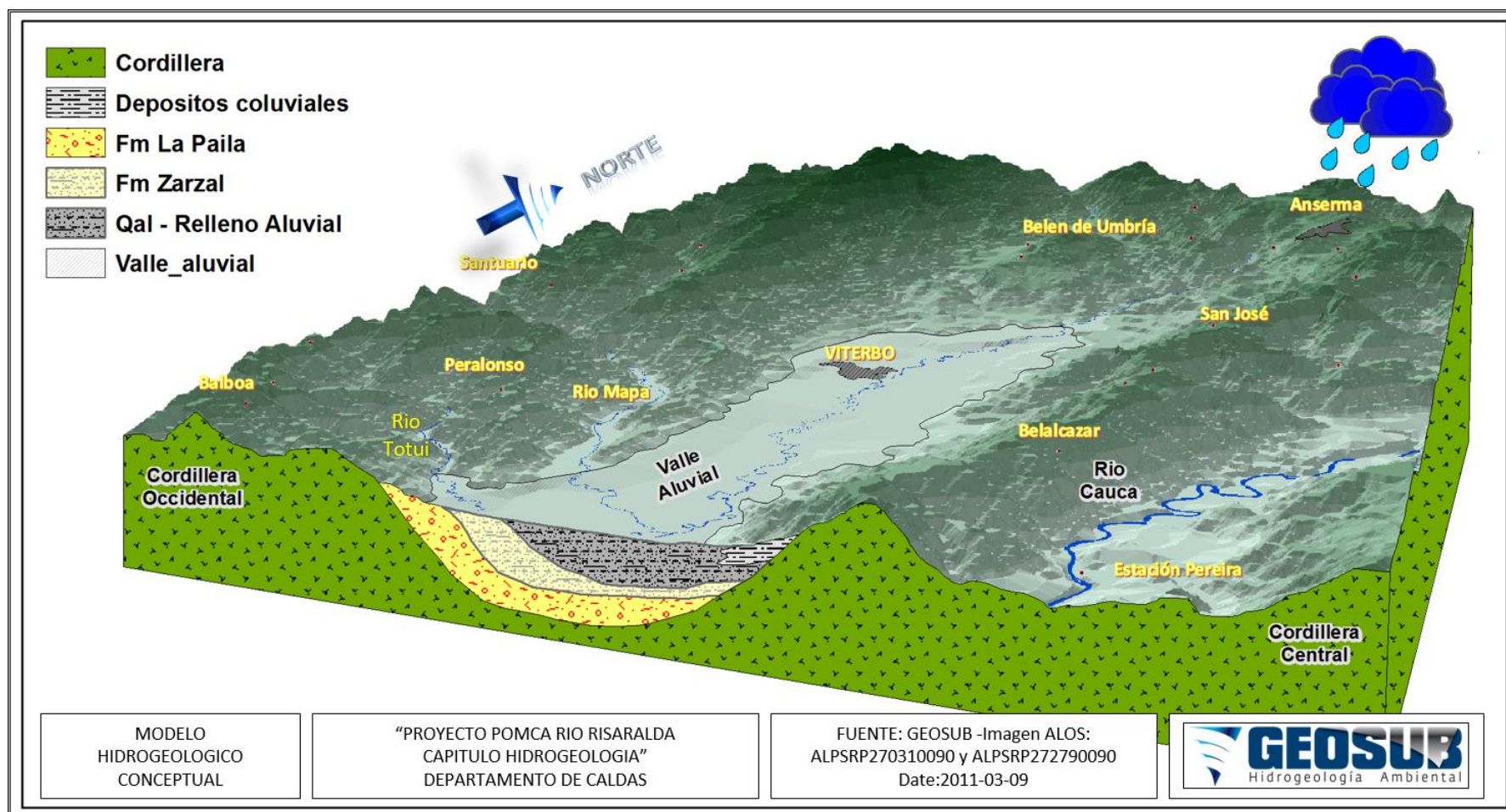


Figura 21. Esquema del Modelo Hidrogeológico Conceptual de la Cuenca del Río Risaralda
Fuente: Consorcio Ordenamiento Cuenca Risaralda 2016

Las unidades acuíferas identificadas dentro de la Cuenca del Río Risaralda incluyen: La Formación La Paila (n1?n5?-VCc) que ha sido considerada por el Ingeominas como una unidad acuífera de extensión regional con porosidad primaria, de tipo semiconfinado y confinado, se caracteriza por presentar capacidades específicas desde 2 hasta 5 l/s/m.

El valor de la transmisividad oscila entre 160 y 420 m²/día y el coeficiente de almacenamiento promedio es de 6.0 E-04. Cuando presenta condiciones de semiconfinamiento, el coeficiente de goteo es del orden de 1.8 E-03 (Velez & INGEOMINAS, 2004). Dentro de la Cuenca del Río Risaralda la unidad acuífera de La Paila está siendo captada por dos aljibes con profundidades de 8.1 y 10 m y nivel de agua promedio de 0.8 m. El caudal medio de explotación para estos dos aljibes es de 1.15 l/s.

La Formación Zarzal (Q1-I) está constituida por una secuencia de baja consolidación, que corresponde a areniscas tobáceas, areniscas conglomeráticas con fragmentos de chert, materiales arcillosos y diatomitas. Dentro de los inventarios de puntos de agua de la Cuenca del Río Risaralda se ha identificado únicamente un pozo profundo, y de acuerdo a estudios realizados en los alrededores de la Cuenca del Río Risaralda se considera como una unidad acuífera de moderada productividad.

La Formación Amaga (E3-Sc) consiste de limolitas y arcillolitas de color ocre, que son deleznales, y eventualmente con concreciones calcáreas (González, H. 1990). Dentro de la Cuenca del Río Risaralda no ha sido inventariado ningún punto de agua que capte esta unidad acuífera sin embargo (Pacheco H, Morales A, Veloza F, Villate C, & INGEOMINAS, 2008), dentro del Mapa de Permeabilidades Escala 1:500.000 (Ingeominas, 2008), la clasifica como de alta a media permeabilidad.

La Formación Penderisco (k2k6-Sm7), en la Cuenca del Río Risaralda se encuentra representada por el Miembro Urrao evidenciado como areniscas en paquetes de espesor de decenas de metros con intercalaciones de limolitas con laminación delgada, arcillolitas y en menor proporción conglomerados. Esta está alimentando 106 manantiales con caudales entre 0.001 y 1 l/s, los cuales representan un caudal total de 5.35 l/s.

Dentro de las unidades acuíferas de baja productividad se cuenta con La Formación Combia (K2-Pf7) que se presenta en la cuenca del Río Risaralda con un miembro sedimentario, conformado por conglomerados, brechas sedimentarias, areniscas de grano medio a fino y arcillolitas intercaladas con material piroclástico y como un miembro volcánico con la presencia de basaltos aflorantes en el río del Oro. Esta formación se encuentra alimentando en la Cuenca del Río Risaralda a 53 manantiales que presentan un caudal total de extracción de 3.23 l/s con caudales entre 0.001 y 1.5 l/s.

El acuífero de la Formación Armenia (Qvc) está conformado por flujos volcanoclásticos constituidos por piroclastos y epiclastos de composición andesítica y alcanzando espesores de hasta 1000 m (CARDER, 2007). Este acuífero se encuentra suprayacido por una unidad de cenizas (Qp) con un espesor promedio de 30 m que le confiere un carácter semiconfinado a confinado. Esta unidad hace parte del sistema acuífero SAM6.1 - Glacis del Quindío (IDEAM, 2014) que es clasificada como acuífero libre con transmisividades de 1 a 65 m²/día y capacidades específicas de 0.05 a 7 l/s/m. Dentro de la Cuenca del Río Risaralda no se evidencian dentro de los inventarios puntos de agua que capten esta unidad acuífera.

Los Sedimentos de Viterbo (Qca) corresponden a una secuencia de sedimentos no consolidados de gravas, arenas, arcillas y niveles tobáceos y hacia el tope cenizas volcánicas (Estrada, J.J. y Viana, R. 1998) Sobre esta unidad se han inventariado 11 aljibes con profundidades entre 0.25 y 32 m y con niveles de agua subterránea que varían entre 0 y 9.3 m en ninguno de los aljibes inventariados se han tomados datos de caudal.

Los Depósitos aluviales (Qal) se han identificado como sedimentos que rellenan principalmente los valles de los ríos Risaralda, río Mapa y río Totuí, así como algunos tributarios de estos, que dan lugar extensas llanuras de inundación y terrazas bajas, y que corresponden a secuencias de conglomerados, arenas y limos. Dentro de la Cuenca del Río Risaralda se han identificado 12 manantiales que se alimentan de estos depósitos con un caudal total de 0.84 l/s. Adicionalmente se identificó que 42 de los aljibes inventariados se encuentran captando esta unidad, dichas captaciones presentan profundidades entre 1.9 y 39 m con un nivel de agua promedio de 3 m y un caudal promedio de extracción de 1.09 l/s. Dos de los pozos profundos reportados dentro del proyecto CARDER Canadá están captando esta unidad acuífera.

En esta unidad acuífera se ubica un pozo de monitoreo de 30 m de profundidad, para el que se obtuvo una capacidad específica de 2.71 l/s/m con un nivel de agua de 3.57 m y un caudal de 1.05 l/s.

En la Cuenca del Río Risaralda se identificaron cuatro unidades geológicas que presentan un comportamiento de acuicludo, incluyendo: La Formación Barroso (K2Vm7), que se compone de por basaltos, diabasas, tobas y aglomerados, con intercalaciones lenticulares de chert y limolitas silíceas. Su suelo residual de carácter laterítico, presenta variación textural, entre limo-arcilloso hasta limo-arenoso. Dicha degradación de la roca es la que permite que se dé el almacenamiento de agua subterránea posibilitando la existencia de 100 manantiales que representan un caudal de descarga de 6.27 l/s y dos aljibes con nivel del agua promedio de 5 m y profundidades de 8.8 y 10 m.

La Ultramafita de Puente Umbría – La Isla (K2-Pu7) que corresponde a se rocas ultramáficas de grano medio a fino, con estructura masiva a esquistosa y en algunos

casos foliada y con efectos de cizalladura. En la cuenca en estudio esta unidad alimenta dos manantiales con un caudal de descarga de 0.04 l/s.

El Gabro Uralítico de Belén de Umbría (K2-Pm7) que es una roca masiva, con tamaño de grano fino a medio y media a grueso. Para esta unidad fueron inventariados 17 manantiales con una descarga total de agua subterránea de 2.37 l/s. Debido a su naturaleza ígnea masiva esta unidad se considera de muy baja productividad (acuicludo).

El Plutón de Mistrató (K2-Pf7), donde su composición varía entre tonalítica, diorítica y gabroide (Calle y González, 1982), conformado por materiales masivos de grano medio a fino, con colores variables, siendo notorio un avanzado estado de alteración y meteorización, que las hace altamente friables. Para esta unidad se han inventariado 46 manantiales con un caudal total de descarga de 4.31 l/s, siendo el caudal promedio 0.094 l/s.

Por ultimo en la cuenca en estudio se ha identificado un complejo de rocas ígneas muy compactas, con muy baja a ninguna productividad, a nivel superficial que se comportan como acuífugos, el cual incluye las formaciones geológicas: Pórfido dacítico de Mistrató (K2-Vm7), Gabro de Anserma (K2-Pm7), Pórfido Andesítico Hombléndico (n4n6-Hi), Pórfido Andesítico de La Virginia (n4n6-Hi), y Rocas Porfídicas Hipoabisales (n4n6-Hi).

Teniendo como base la información geoelectrica, se encuentra que el espesor promedio para las unidades acuífera cuaternarias es de 39 m, teniendo en general los menores espesores al norte del acuífero y los mayores espesores cerca de la confluencia de los ríos Mapa y Risaralda. Conforman un acuífero multicapa de extensión regional, con porosidad primaria, de tipo libre en algunas áreas y semiconfinado en sitios donde se encuentran horizontes arcillosos y limosos.

De acuerdo a los resultados obtenidos, muy probablemente la recarga de las unidades acuíferas se deba a la precipitación de la zona, por lo que al realizar algebra de mapas asociados a la capacidad de infiltración del suelo se encuentra que la recarga en la Cuenca del Río Risaralda se clasifica como moderada para un 53.37% del área y como baja para un 27.79% del área.

Los muestreos fisicoquímicos de agua subterránea realizados en aljibes de la cuenca concluyen que las principales especies catiónicas presentes en el grupo de puntos monitoreados son del tipo cálcico y magnésico y que las principales especies aniónicas presentes son del tipo bicarbonatado.

La Vulnerabilidad del acuífero a la contaminación se calculó con base en el Método de Indexación "GOD", el cual tiene en cuenta la ocurrencia del agua subterránea de acuerdo al grado de confinamiento de los acuíferos ("G"), la litología predominante

sobre el acuífero o texturas del suelo (“O”) y la profundidad de la tabla de agua (“D”). La indexación de los tres parámetros determinó que en la Cuenca del Río Risaralda se presentan tres grados de vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos, desde baja hasta alto, donde alrededor del 60% de la zona evaluada presenta un índice de vulnerabilidad media mientras que la vulnerabilidad alta se observa como sectores aislados a lo largo de la cuenca en los que predominan los manantiales. Las zonas de baja vulnerabilidad se presentan puntualmente en la cuenca baja en inmediaciones del Río Risaralda.

10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Se elaboró el Modelo Hidrogeológico preliminar y orientativo, con base en información secundaria de estudios geológicos, geofísicos, de inventario de puntos de agua subterránea, de análisis fisicoquímicos y de estudios hidráulicos.
- En la Cuenca del Río Risaralda se han realizado diversos trabajos en el campo de la hidrogeología por parte de entidades oficiales, la academia y empresas privadas que han sido la base para la generación del modelo hidrogeológico conceptual que se ha presentado, sin embargo el conocimiento de las unidades acuíferas es aún muy limitado en cuanto a sus características hidráulicas más aun en los acuíferos del terciario que son más profundos.
- A partir de información secundaria de la CARDER y la UTP, se presenta un inventario de puntos de agua subterránea conformado por 57 aljibes y dos pozos. Adicionalmente se identificaron 351 manantiales dentro de la base de datos de concesiones de agua y tres pozos profundos que hacen parte del inventario presentado por el proyecto CARDER Canadá del año 1994.
- Se evidencia que dentro de los inventarios de puntos de agua subterránea no se ha tenido en cuenta la información de los manantiales y que dentro de las concesiones que maneja la autoridad ambiental estos son considerados como puntos de agua superficial. Se recomienda que en una futura actualización de los puntos de agua de la cuenca se tomen en cuenta los manantiales puesto que en muchos casos son utilizados por la comunidad para consumo doméstico.
- Al realizar la unificación de la información de puntos de agua se encuentra que a la fecha los puntos no cuentan con un identificador único. Se recomienda codificar cada punto para facilitar el manejo de la información y evitar la duplicidad en los registros.
- Para la definición de la geometría de los acuíferos se recopiló información de 98 Sondeos Eléctricos Verticales que se han realizado en la cuenca en estudio. A partir de estos se identificaron dos zonas de interés hidrogeológico, la primera con un espesor aproximado de 50 m se asocia con los depósitos aluviales del Río Risaralda, siendo la unidad que abastece los 57 aljibes que se han inventariado en la cuenca. La segunda unidad de interés se compone por sedimentos terciarios de las formaciones Zarzal y La Paila, de las cuales no se tiene certeza de su espesor y que en la zona solo están siendo captadas por dos aljibes y dos pozos profundos.
- En las captaciones de agua subterránea de la Cuenca del Río Risaralda no se han realizado pruebas de bombeo por lo que no cuenta con información hidráulica de

las unidades acuíferas, se recomienda la realización de pruebas de bombeo en pozos de abastecimiento y aljibes que se ubiquen en diferentes unidades geológicas para precisar la valoración hidrogeológica.

- Al realizar la valoración hidrogeológica cualitativa y preliminar de las unidades litoestratigráficas presentes en la Cuenca del Río Risaralda, se encuentra que el acuífero asociado a la Formación La Paila (n1n5?-VCc) se clasifica como un acuífero libre, de extensión regional y de alta productividad puesto que se reportan capacidades específicas entre 2 y 5 l/s/m. Como acuíferos de mediana productividad se han clasificado la Formación Zarzal (Q1-I), la Formación Amagá (E3-Sc) y la Formación Penderisco (k2k6-Sm7). Los sistemas acuíferos de baja productividad se encuentran representados en la Cuenca del Río Risaralda por la Formación Combia (K2-Pf7), la Formación Armenia (Qvc), Sedimentos de Viterbo (Qca) y Depósitos aluviales (Qal). Las unidades geológicas clasificadas como acuíclados son Formación Barroso (K2Vm7), la Ultramafita de Puente Umbría – La Isla (K2-Pu7), el Gabro Uralítico de Belén de Umbría (K2-Pm7) y el Plutón de Mistrató (K2-Pf7). Finalmente como acuífugos se identificaron el Pórfido dacítico de Mistrató (K2-Vm7), Gabro de Anserma (K2-Pm7), Pórfido Andesítico Hombléndico (n4n6-Hi), Pórfido Andesítico de La Virginia (n4n6-Hi), y Rocas Porfídicas Hipoabisales (n4n6-Hi).
- De acuerdo a los resultados obtenidos, muy probablemente la recarga de las unidades acuíferas se deba a la precipitación de la zona, por lo que al realizar algebra de mapas asociados a la capacidad de infiltración del suelo se encuentra que la recarga en la Cuenca del Río Risaralda se clasifica como moderada para un 53.37% del área y como baja para un 27.79% del área.
- La interpolación de datos de altura de agua para los manantiales y aljibes sugieren que el flujo del agua subterránea en el acuífero, sigue la topografía y busca como nivel base el río Risaralda y demás drenajes principales de la cuenca.
- Los muestreos físicoquímicos de agua subterránea realizados en aljibes de la cuenca concluyen que las principales especies catiónicas presentes en el grupo de puntos monitoreados son del tipo cálcico y magnésico y que las principales especies aniónicas presentes son del tipo bicarbonatado.
- La Vulnerabilidad del acuífero a la contaminación se calculó con base en el Método de Indexación "GOD", el cual tiene en cuenta la ocurrencia del agua subterránea de acuerdo al grado de confinamiento de los acuíferos ("G"), la litología predominante sobre el acuífero o texturas del suelo ("O") y la profundidad de la tabla de agua ("D"). La indexación de los tres parámetros determinó que en la Cuenca del Río Risaralda se presentan tres grados de vulnerabilidad a la

contaminación de los acuíferos, desde baja hasta alto, donde alrededor del 60% de la zona evaluada presenta un índice de vulnerabilidad media mientras que la vulnerabilidad alta se encuentra como pequeños sectores a lo largo de toda la cuenca y la vulnerabilidad baja se encuentra como dos pequeños sectores en la cuenca baja.

- En cuanto a la distribución del índice de vulnerabilidad del acuífero libre de la Cuenca del Río Risaralda debe tenerse en cuenta que este se obtuvo a partir de información secundaria por lo que el resultado presenta incertidumbre asociada a la distribución y calidad de los datos disponibles. Es así que se recomienda realizar campañas de inventarios de manantiales en las que se recojan, entre otros, las características asociadas a tipo de manantial, método de surgencia, permanencia y geoforma. Adicionalmente se sugiere complementar la información geoeléctrica a lo largo de la cuenca para así realizar una nueva distribución de parámetros que cuenten con un mejor respaldo geoestadístico
- Las zonas de recarga, tránsito y descarga para la unidad acuífera, los perímetros de protección de pozos de abastecimiento humano y zonas con mayor vulnerabilidad a la contaminación se encuentran identificadas en el Anexo 6
- Para mejorar el conocimiento hidrogeológico de la zona se deben hacer estudios detallados de esta que incluyan todos los aspectos involucrados con una evaluación hidrogeológica regional. Específicamente, hacer una campaña intensa de geofísica, perforación de pozos exploratorios para determinar estratigrafía y potencial hidráulica del acuífero y determinación de parámetros hidráulicos en los pozos existentes.

11. BIBLIOGRAFÍA

- Anaya, E. P. (2010). *Implementación del código zondres2D para la modelación directa e inversa de datos de tomografía de resistividad eléctrica 2D*. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Appelo, C. A. J. & Postma, D. (1999). *Geochemistry Groundwater And Pollution*. Rotterdam, Netherlands: Edit. A. A. Balkema.
- Astier, J. L. (1975). *Geofísica aplicada a la hidrogeología*. Madrid: Paraninfo.
- Banco Mundial. (2002). *Requerimientos de Monitoreo del Agua Subterránea para manejar la respuesta de los acuíferos y las amenazas*. Obtenido de www.worldbank.org/gwmate
- Biosfera. (2010). *Estudio de vulnerabilidad a la contaminación del acuífero en predios del Ingenio Risaralda*. Balboa, Risaralda.
- Bueso Campos, M. (2010). *Identificación y caracterización de las zonas con mayor potencial de recarga hídrica en las subcuencas de los ríos Tacó y Shusho, municipio de Chiquimula, Guatemala*. Chiquimula, Guatemala: Proyecto FODECYT No. 046-2009.
- CARDER . (Octubre de 1995). *Caracterización Hidrogeológica Valle del Río Risaralda. Proyecto Carder Canada*. Pereira.
- CARDER - UAESPNN. (2008). *Plan de ordenación y manejo de la cuenca Hidrográfica del río Otún*. Pereira.
- CARDER. (2005). *Conocimiento de la Cantidad del Recurso Hídrico en el Departamento de Risaralda, a escala semidetallada*.
- CARDER. (Abril 2007). *Plan de manejo integrado de aguas subterráneas en Pereira*. Pereira.
- Cenicaña. (s.f.). *Cenicaña*. Recuperado el 2013, de http://www.cenicana.org/clima_/index.php
- Charles, E. B. (1993). *A Method for Evaluating Ground-Water-Recharge Areas in New Jersey*. New Jersey Geological Survey.

- Consorcio Llanopozos y Perfoaguas SAS. (2014). *Memoria técnica de la perforación de un pozo exploratorio para la generación de conocimiento del modelo hidrogeológico de la zona sur del departamento de Risaralda*. Bogotá.
- CORPOCALDAS - Universidad Nacional de Colombia, S. M. (2008). Estudio de exploración de los sedimentos en el río Risaralda con fines de aprovechamiento sostenible, Fase I.
- Custodio, E., & Llamas, M. (2001). *Hidrología Subterránea. Segunda Edición*. Barcelona: Ediciones Omega S.A.
- CVC. (s.f.). Entorno geológico y geomorfológico del río Cauca. En http://www.cvc.gov.co/portal/images/CVC/Recurso_Hidrico/Libro_Rio_Cauca/2-EntornoGeologicoGeomorfologico.pdf.
- Diezemann, W., & INGEOMINAS. (1951). *Informe preliminar sobre posibilidades de agua subterránea en la región de La Paila - Informe 773*. Bogotá: INGEOMINAS.
- Estrada, J., Viana, R., & Gonzáles, H. (2001). *Geología de la Plancha 205 Chinchiná. Escala 1:100.000*. Medellín: INGEOMINAS.
- F. Suter, R. N. (2008). (Plio-)Pleistocene alluvial-lacustrine basin infill evolution in a strike-slip active zone. Northern Andes, Western-Central Cordilleras, Colombia. *Geologica Acta*, 231-249.
- Foster Stephen, H. R. (2002). *Protección de la calidad del agua subterránea. Guía para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales*. Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento/Banco Mundial.
- Foster, S. (1991). *Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas, una metodología basada en datos existentes*. Lima: CEPIS-OPS.
- Galvez, J. J. (2011). Cartilla Técnica: Aguas subterráneas - Acuíferos. *Sociedad Geográfica de Lima*.
- Girón Tejada, M. A. (2008). *Evaluación de la posible contaminación del suelo y agua subterránea con elementos pesados por el uso de vinazas en el cultivo de la caña de azúcar*. España: Universidad Politécnica de Cataluña.

- Gómez Calle, D. (1995). *Diagnostico de la Calidad y Riesgo de contaminación del agua aprovechada de pozos y aljibes en la cuenca baja del rio Risaralda*. Pereira: Proyecto Carder-Canada.
- Gómez Calle, D., & Aristizabal Restrepo, J. J. (1990). *Evaluación Hidrogeológica del área de Cerritos – Departamento de Risaralda*. Manizales: Universidad de Caldas, Programa de Geología, Tesis de grado para optar al título de geólogo.
- González, H. (2001). *Geología de las Planchas 206-Manizales y 225 Nevado del Ruíz. Escala 1:100000*. Santafé de Bogotá: INGEOMINAS.
- IDEAM. (2014). *Estudio Nacional del Agua 2014*. Bogotá.
- IGAC. (2004). Estudio General de Suelos del Departamento de Caldas.
- IGAC. (2004). Estudio General de Suelos del Departamento de Risaralda.
- INGEOMINAS. (2004). *Memoria Tecnica Plancha 5:13. Atlas del agua subterránea de Colombia Esc. 1:500.000*. Bogota.
- Ingeominas. (2008). *Mapa de permeabilidades de Colombia. Plancha 5-08. Esc: 1:500.000*. Bogotá.
- Lopez. Eduardo, M. C. (Junio de 1999). Geología de la zona del eje cafetero Esc. 1:200.000. *Terremoto del Quindío (Enero 25 de 1999) Informe Técnico - Científico*.
- Matus Silva, O. D. (2007). *Elaboración Participativa de una Metodología para la Identificación de Zonas Potenciales de Recarga Hídrica en Subcuencas Hidrográficas, Aplicada a la Subcuenca del Rio JUCUAPA, Matagalpa Nicaragua. Tesis de Maestría*. Turrialba, Costa Rica: CATIE.
- Michael J. Focazio, T. E. (s.f.). *Assessing Ground-Water Vulnerability to Contamination: Providing Scientifically Defensible Information for Decision Makers*. Obtenido de USGS: http://pubs.usgs.gov/circ/2002/circ1224/pdf/circ1224_ver1.01.pdf
- Ministerio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). *Decreto Número 3930*. Bogotá.

- Ministerio de la Protección Social y Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2007). *Resolución Número 2115*. Bogota.
- Mosquera, D., Marín, P., Vesga, C., & Gonzalez, H. (1998). *Geología de la plancha 206 Manizales. Escala 1:100.000*. Ibagué: INGEOMINAS.
- Otalvaro, L. (2007). *Plan de manejo integrado del agua subterranea de Pereira y Dosquebradas*. Pereira: Carder.
- P.J. Martin, D. G. (s.f.). An Integrated Approach to Groundwater Protection Using Modelling and GIS. <http://www.environmental-expert.com>.
- Pacheco H, S. M., Morales A, C. J., Veloza F, J., Villate C, J., & INGEOMINAS. (2008). *Mapa de Permeabilidades de Colombia Plancha 5-08 Escala 1:500.000*. Bogotá.
- Presidencia de la República de Colombia. (26 de junio de 1984). *Decreto 1594 de 1984*. Bogotá: Diario Oficial No. 36.700.
- Proyecto CARDER - CANADA. (1995). *Caracterización hidrogeológica del valle del río Risaralda*. Pereira.
- Román, F. J. (2001). *Hidráulica de captaciones*. Salamanca: Universidad de Salamanca, Departamento de Geología.
- Solera, I. M. (1985). Las vinazas en la fertilizacion de la caña de azucar. *El Agricultor Costarricense*, 43 (3-4).
- UNESCO. (1998). *International Glossary of Hydrology*.
- UNESCO, IAH, IAHS. (1983). *International Legend for Hydrogeological maps*.
- Universidad Tecnológica de Pereira. (2012). *Identificación de impactos sobre los recursos hídricos subterráneos, por procesos urbanísticos en la zona de expansión occidental de Pereira, y la definición de alternativas para prevenirlos, mitigarlos o restaurarlos fase I*. Pereira.
- Universidad Tecnológica de Pereira. (2014). *Apoyo técnico para la implementación del plan de manejo de aguas subterráneas formulado para Pereira, Fase II*. Pereira.
- Universidad Tecnológica de Pereira. (2014). *Construcción de un modelo hidrogeológico conceptual del acuífero del río Risaralda Fase I*. Pereira.

Universidad Tecnológica de Pereira. (2014). *Formulación del plan de ordenamiento del río Otún y quebrada Dosquebradas*. Pereira.

Universidad Tecnológica de Pereira. (2015). *Construcción de un modelo hidrogeológico conceptual del acuífero del río Risaralda. Fase II*. Pereira.

Velez, G. H., & INGEOMINAS. (2004). *Memoria Técnica de la Plancha 5-13. Proyecto Atlas de Aguas Subterráneas de Colombia Escala 1:500.000*. Bogotá: INGEOMINAS.

Villanueva Martínez, M., & Iglesias López, A. (1984). *Pozos y acuíferos. Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo*.