

**MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL DEL CENTRO POBLADO DE
PUERTO CALDAS, MUNICIPIO DE GRANADA, META.**

JHURLEY ISABEL PUERTO ALFONSO

CESAR AUGUSTO NIETO BORDA

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE ESPECIALIZACIÓN EN RECURSOS HÍDRICOS

BOGOTÁ D.C – 2018

**MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL DEL CENTRO POBLADO DE
PUERTO CALDAS, MUNICIPIO DE GRANADA, META.**

JHURLEY ISABEL PUERTO ALFONSO

CESAR AUGUSTO NIETO BORDA

Trabajo de grado para obtener el título de especialista en Recursos Hídricos.

ASESOR: DIEGO ALEJANDRO PULGARÍN MONTOYA

INGENIERO CIVIL, MSC.

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE ESPECIALIZACIÓN EN RECURSOS HÍDRICOS

BOGOTÁ D.C –2018



Atribución-NoComercial-SinDerivadas 2.5 Colombia (CC BY-NC-ND 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 2.5 Colombia (CC BY-NC-ND 2.5)

Para leer el texto completo de la licencia, visita:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/co/>

Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra

Bajo las condiciones siguientes:



Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



No Comercial — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.



Sin Obras Derivadas — No se puede alterar, transformar o generar una obra derivada a partir de esta obra.

Nota de aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Bogotá D.C., noviembre de 2018.

Dedicatoria

Este trabajo va dedicado a quien siempre ha confiado en mí y con su ayuda me ha permitido lograr muchos sueños, mi Padre Dios que lo amo con todo el corazón y me ha regalado grandes bendiciones, y para toda mi familia que siempre los llevo en mi corazón y hacen parte fundamental de mi vida.

Agradecimientos

Agradezco a Dios que me ha ayudado en cada paso de mi vida, a mi esposo que sin su apoyo sería más difícil el caminar diario, a mi madre y hermanas que has estado conmigo siempre y a la Universidad Católica de Colombia por permitirme hacer parte de su comunidad educativa.

Agradezco a Dios a mi Familia y personas que contribuyeron con su confianza y apoyo. Para mis hijos que vean un ejemplo positivo y que Dios los lleve a donde ellos quieran.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	13
1 GENERALIDADES DEL TRABAJO DE GRADO	15
1.1 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN.....	15
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	15
1.2.1 Antecedentes del problema.....	15
1.2.2 Pregunta de investigación.....	17
1.3 JUSTIFICACIÓN	17
1.4 OBJETIVOS	17
1.4.1 Objetivo general.....	17
1.4.2 Objetivos específicos	17
2 MARCOS DE REFERENCIA	19
2.1 MARCO CONCEPTUAL.....	19
2.2 MARCO TEÓRICO.....	20
2.3 MARCO JURÍDICO.....	21
2.4 MARCO GEOGRÁFICO.....	22
2.5 MARCO DEMOGRÁFICO.....	24
2.6 ESTADO DEL ARTE.....	24
3 METODOLOGÍA.....	27
3.1 FASES DEL TRABAJO DE GRADO	27
3.2 INSTRUMENTOS O HERRAMIENTAS UTILIZADAS.....	33
4 MODELO GEOLÓGICO	34
4.1 MARCO GEOLÓGICO REGIONAL.....	34
4.2 ESTRATIGRAFÍA REGIONAL	35
4.2.1 Geología local.....	36
4.2.2 Depósitos de Llanura de Aluvial (Q2-al1).....	39
4.2.3 Depósitos Aluviales Recientes (Q2-al 3).....	41
4.2.4 Depósitos de Llanura de Inundación.....	43
5 MODELO GEOMORFOLÓGICO.....	46

5.1	JERARQUIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA	46
5.2	UNIDADES Y SUBUNIDADES GEOMORFOLÓGICAS	47
5.2.1	<i>Planos y Planicies Aluviales (Fpp)</i>	49
5.2.2	<i>Plano o Llanura de Inundación Fpi</i>	51
5.2.3	<i>Barras Longitudinales</i>	51
5.2.4	<i>Vallecito (Fv)</i>	52
6	HIDROLOGÍA Y CLIMATOLOGÍA.	54
6.1	PRECIPITACIÓN.....	54
6.2	TEMPERATURA.	55
7	MODELO COMPONENTE SUELOS.....	57
7.1	CONSOCIACIÓN TYPIC DYSTROPEPTS (PVFA)	58
7.2	ASOCIACIÓN AQUIC DYSTROPEPTS-FLUVENTIC DYSTROPEPTS (RVHAY).....	58
7.3	CONSOCIACIÓN AQUIC DYSTROPEPTS (RVLAX)	58
7.4	. GRUPO INDIFERENCIADO MISCELÁNEO DE PLAYONES E ISLOTES TYPIC TROPOFLUVENTS, FASE INUNDABLE (RVOAX).....	59
8	MODELO HIDROGEOLÓGICO	60
8.1	ESTABLECIMIENTO DE LAS UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS	60
8.1.1	<i>Acuífero de Los Depósitos de Llanura de Inundación</i>	61
8.1.2	<i>Acuífero de Depósitos Aluviales Recientes</i>	62
8.1.3	<i>Acuífero de Depósitos de Llanura Aluvial</i>	63
8.2	INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA SUBTERRÁNEA.....	64
8.3	PROSPECCIÓN GEOELÉCTRICA.....	66
8.3.1	<i>SEV 1</i>	69
8.3.2	<i>SEV 2</i>	71
8.3.3	<i>SEV 3</i>	73
8.3.4	<i>SEV 4</i>	75
8.4	PRUEBAS DE BOMBEO.....	76
8.4.1	<i>PRUEBAS DE BOMBEO REVISADAS</i>	78
8.5	ESTABLECIMIENTO DE ZONAS DE RECARGA Y DESCARGA.....	80
8.5.1	<i>Delimitación de las zonas de recarga potencial</i>	81
8.6	DIRECCIONES DE FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA	83
8.7	VULNERABILIDAD A LA CONTAMINACIÓN.....	85

8.7.1	<i>Metodología para la determinación de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación por el método GOD</i>	86
8.7.2	<i>Zonificación del grado de vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación</i>	88
9	ANÁLISIS DE RESULTADOS: MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL	90
10	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	94
	BIBLIOGRAFÍA	96
1.	ANEXO 1: DELIMITACIÓN DE ZONAS DE RECARGA	98
	➤ Pendientes.....	98
	➤ Suelos	98
	➤ Tipo de roca.....	99
	➤ Cobertura vegetal.....	100
	➤ Uso del suelo	103

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2-1. LOCALIZACIÓN DEL CENTRO POBLADO DE PUERTO CALDAS	23
FIGURA 4-1. MODELO DE ELEVACIÓN DEL TERRENO PARA EL DEPARTAMENTO DEL META	30
FIGURA 4-1. MAPA GEOLÓGICO REGIONAL PARA EL ÁREA DE ESTUDIO CORRESPONDIENTE A LA CUENCA DEL RÍO ARIARI, PARTE MEDIA Y BAJA.	35
FIGURA 4-2. MAPA GEOLÓGICO LOCAL PARA EL CENTRO POBLADO DE PUERTO CALDAS	39
FIGURA 4-3. DEPÓSITOS ALUVIALES RECIENTES DENTRO DEL ÁREA DE ESTUDIO	43
FIGURA 4-4. LLANURA DE INUNDACIÓN DENTRO DEL ÁREA DE ESTUDIO	44
FIGURA 5-1. MAPA GEOMORFOLÓGICO LOCAL PARA EL CENTRO POBLADO DE PUERTO CALDAS	49
FIGURA 5-2. BARRAS LONGITUDINALES PARA EL CENTRO POBLADO DE PUERTO CALDAS	52
FIGURA 6-1. VALORES TOTALES DE PRECIPITACIÓN-ESTACIÓN LA HOLANDA.	55
FIGURA 6-2. VALORES MEDIA-MÁX. MENSUALES DE TEMPERATURA-ESTACIÓN LA HOLANDA.....	55
FIGURA 6-3. VALORES MEDIA-MIN MENSUALES DE TEMPERATURA-ESTACIÓN LA HOLANDA.....	56
FIGURA 7-1. MAPA DE SUELOS PARA EL CENTRO POBLADO DE PUERTO CALDAS	57
FIGURA 8-1. UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS PARA EL CENTRO POBLADO DE PUERTO CALDAS	61
FIGURA 8-2. PUNTOS DE AGUA SUBTERRÁNEA DENTRO DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	66
FIGURA 8-3. LOCALIZACIÓN DE LOS SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES DENTRO DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	67
FIGURA 8-4. PRUEBAS DE BOMBEO CERCANAS AL ÁREA DE ESTUDIO	78
FIGURA 8-5. ZONAS DE RECARGA POTENCIAL DE LOS ACUÍFEROS DENTRO DE LA ZONA DE ESTUDIO	83
FIGURA 8-6. DIRECCIONES DE FLUJO REGIONALES (IZQUIERDA) Y LOCALES (DERECHA)	84
FIGURA 8-7. SISTEMA DE INDEXACIÓN GOD PARA LA VULNERABILIDAD DE LOS ACUÍFEROS A LA CONTAMINACIÓN. .	87
FIGURA 8-8. VULNERABILIDAD A LA CONTAMINACIÓN DE LOS ACUÍFEROS.....	89
FIGURA 9-1. MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARA EL ÁREA DE ESTUDIO.....	93

LISTA DE TABLAS

TABLA 4-1. UNIDADES GEOLÓGICAS AFLORANTES DENTRO DEL ÁREA DE ESTUDIO	38
TABLA 5-1. NOMENCLATURA DE LAS UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS AFLORANTES DENTRO DEL ÁREA DE ESTUDIO...	48
TABLA 6-1. MATRÍCULA POR NIVEL DE FORMACIÓN. EDUCACIÓN SUPERIOR.....	54
TABLA 8-1. UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS PRESENTES DENTRO DEL ÁREA DE ESTUDIO.	60
TABLA 8-2. COORDENADAS SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES REALIZADOS.....	67
TABLA 8-3. INTERPRETACIÓN SONDEO ELÉCTRICO VERTICAL N° 1.....	69
TABLA 8-4. INTERPRETACIÓN SONDEO ELÉCTRICO VERTICAL N° 2.....	71
TABLA 8-5. INTERPRETACIÓN SONDEO ELÉCTRICO VERTICAL N° 3.....	73
TABLA 8-6. INTERPRETACIÓN SONDEO ELÉCTRICO VERTICAL N° 4.....	75
TABLA 8-7. VALORACIÓN DEL POTENCIAL DE RECARGA.	82
TABLA 8-8. CLASIFICACIÓN DE LA VULNERABILIDAD DE LOS ACUÍFEROS A LA CONTAMINACIÓN, MÉTODO GOD	88
TABLA 8-9. GRADO DE VULNERABILIDAD DE LOS ACUÍFEROS A LA CONTAMINACIÓN.....	89

RESUMEN

El Centro Poblado de Puerto Caldas se localiza geográficamente dentro del municipio de Granada-Meta, en la cuenca sedimentaria de los Llanos Orientales, sobre Depósitos Cuaternarios acumulados como consecuencia de los procesos de levantamiento y erosión de la Cordillera Oriental. En superficie se definieron los Depósitos Aluviales Recientes, Depósitos de Llanura Aluvial y Depósitos de Llanura de Inundación, mientras que a profundidad se localiza la Formación Caja Superior. Esta zona presenta gran relevancia desde el punto de vista hidrogeológico, con rocas terciarias y sedimentos cuaternarios, que conforman acuíferos por porosidad primaria, destacándose en superficie los Acuíferos de depósitos cuaternarios y a profundidad el Acuífero de la Formación Caja Superior, siendo este último acuífero el más importante dentro del área de estudio, puesto que corresponde a la unidad hidrogeológica de donde se capta el agua subterránea para todo el Centro Poblado de Puerto Caldas. Para la caracterización hidrogeológica del área de estudio se realizaron cuatro (4) sondeos eléctricos verticales (Sev's) con extensión de AB=400 metros, obteniendo espesores de 27 metros para los Depósitos de Llanura Aluvial, 2,5 metros para los Depósitos Aluviales Recientes y 140 metros para la Formación Caja Superior.

Palabras clave: Puerto Caldas, Granada-Meta, Depósitos Cuaternarios, Formación Caja Superior, acuíferos, sondeos, porosidad, levantamiento, erosión, Cordillera Oriental.

ABSTRACT

The Populated Center of Puerto Caldas is located geographically within the municipality of Granada-Meta, in the sedimentary basin of the Eastern Plains, over Quaternary Deposits accumulated because of the processes of uplift and erosion of the Eastern Cordillera. On the surface the Recent Alluvial Deposits, Alluvial Plain Deposits and Floodplain Deposits were defined, while

the Superior Box Formation is located at depth. This area has great relevance from the hydrogeological point of view, with tertiary rocks and Quaternary sediments, which make up aquifers by primary porosity, highlighting on the surface the Aquifers of Quaternary deposits and at depth the Aquifer of the Caja Superior Formation, the latter being the most aquifer important within the study area, since it corresponds to the hydrogeological unit from where the groundwater is collected for the entire Settlement Center of Puerto Caldas. For the hydrogeological characterization of the study area, four (4) vertical electric soundings (Sev's) with an extension of AB = 400 meters were made, obtaining thicknesses of 27 meters for the Alluvial Plain Deposits, 2.5 meters for the Recent Alluvial Deposits and 140 meters for the Upper Caja Formation.

Keywords: Puerto Caldas, Granada-Meta, Quaternary Deposits, Upper Caja Formation, aquifers, soundings, porosity, uplift, erosion, Eastern Cordillera

INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia, el agua ha sido un recurso vital para la subsistencia de todas las formas de vida que conocemos, este recurso ha sido obtenido principalmente del fluido superficial que es más accesible a las comunidades, esta razón hace que el recurso hídrico superficial sea el más utilizado y explotado en el mundo, pero a su vez también contaminado de manera excesiva por vertimientos, basura y cualquier otro tipo de desechos que se tiran constantemente a las fuentes hídricas. Este deterioro constante del agua nos ha hecho mirar otras opciones de abastecimiento, ahí juega un papel muy importante el recurso hídrico subterráneo, que a mediano plazo, será la fuente de abastecimiento de agua para muchas comunidades en el país. Es importante conocer que de acuerdo al foro económico mundial realizado el año 2017, Colombia hace parte del grupo que sufre escasez económica de agua, lo que indica que por razones de costos de extracción o niveles de contaminación en el agua, la población no dispone fácilmente de este recurso; adicional, según el Estudio Nacional del Agua ¹(2014), el 80% de la población del país se encuentra en las zonas de menor oferta hídrica superficial, por lo que el recurso hídrico subterráneo podría verse a futuro como un solución de abastecimiento viable y efectivo para la población.

En Colombia el aprovechamiento del recurso hídrico subterráneo aún es muy bajo, principalmente por el desconocimiento que se tiene en esta área de investigación, dejando exclusivamente el estudio de aguas subterráneas estrictamente ligado a los estudios ambientales que se realicen para obtener algún tipo de licenciamiento ambiental, encaminada a desarrollar algún tipo de actividad que represente beneficios económicos, pero desde el punto de vista investigativo, los estudios existentes de quedan cortos ante el potencial hídrico subterráneas que posee el país.

Por la importancia de este recurso y con el panorama innegable de desconocimiento que hay respecto a este tema, el propósito del presente proyecto, se enfoca en realizar un análisis general

¹¹ IDEAM, et al. Estudio Nacional del Agua. 2014.

de la dinámica hidrogeológica de las aguas subterráneas que sean identificadas durante el presente estudio en el centro poblado de Puerto Caldas, localizada en el municipio de Granada, Meta; con el fin de identificar el comportamiento de las unidades hidrogeológicas que se presenten en el sector y que abastecen a la comunidad que habita en la zona.

1 GENERALIDADES DEL TRABAJO DE GRADO

1.1 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.2.1 Antecedentes del problema

El conocimiento por la exploración de agua subterránea en Colombia se inicia a partir del año 1950, con el fin de plantear soluciones de abastecimiento de agua potable en algunas poblaciones del país (MINAMBIENTE, 2018)².

Estos estudios se han enfocado al reconocimiento de las unidades acuíferas, definición de regímenes de flujo, determinación de la calidad del agua y caracterización de parámetros hidrogeológicos para conocer las condiciones de almacenamiento, caudal, transmisividad y capacidades específicas de los pozos en las unidades acuíferas.

En el año 1977, INGEOMINAS publica el primer Mapa Hidrogeológico Nacional en escala 1:3.000.000 y el Departamento Nacional de Planeación en el año 1984 publica el Mapa Hidrogeológico General de Colombia, en planchas 1:500.000. En 1989, el INGEOMINAS elaboró el Mapa Hidrogeológico de Colombia en escala 1: 2.500.000, como parte integrante del Mapa Hidrogeológico de América del Sur, patrocinado por el Programa Hidrogeológico Internacional de la UNESCO (MINAMBIENTE, 2018).

En el año 1996, el Servicio Geológico Colombiano antiguo INGEOMINAS inició la elaboración del Atlas de Aguas Subterráneas de Colombia (escala 1:500.000), el cual presenta a nivel orientativo la potencialidad de unidades geológicas, localización y características hidrogeológicas,

² MINIAMBIENTE, pagina oficial, 2018.

plasmadas en mapas temáticos correspondientes a las coberturas unidades hidrogeológicas, estado del recurso, geoelectrica, hidrogeoquímica, recursos hidrotermales y vulnerabilidad. Adicionalmente en el año 2009 se adicionó una cobertura de permeabilidades (MINAMBIENTE, 2018).

En el año 2005 el SGC elabora el “programa de exploración de aguas subterráneas 2005”. En este documento se presenta entre muchos aspectos el avance en el conocimiento hidrogeológico del país. Este programa divide el territorio colombiano en tres (3) zonas, denominadas “Zonas para investigación y generación de nuevo conocimiento hidrogeológico”; “Zonas sin estudios hidrogeológicos regionales y con información del subsuelo para evaluación” y “Zonas con estudios hidrogeológicos y necesidad de completar modelo conceptual” (MINAMBIENTE, 2018).

En el año 2010 el IDEAM junto con el Ministerio de Medio Ambiente elaboró el Estudio Nacional del agua, actualizado en el año 2014 dentro del cual se realiza una descripción de la oferta y el uso de agua subterránea en Colombia.

Los modelos hidrogeológicos conceptuales para Colombia se desarrollan a partir de la metodología emitida por el ENA 2014, la cual incluye el apoyo de todas las entidades involucradas en el estudio de las aguas subterráneas, en esta se identifican los componentes que se involucran dentro del desarrollo del modelo, y que hasta la fecha se aplican exclusivamente para polígonos puntuales que solicitan algún tipo de licenciamiento ambiental.

En el caso particular del Centro Poblado de Puerto Caldas, no existen estudios puntuales del potencial hídrico subterráneo con el que cuenta esta área, a pesar de que toda la población de la zona se aprovisiona del recurso hídrico subterráneo.

1.2.2 Pregunta de investigación.

¿Cuál es el potencial hidrogeológico presente en el área correspondiente al Centro Poblado de Puerto Caldas, las zonas de recarga y la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación que puede tener el recurso hídrico subterráneo?

1.3 JUSTIFICACIÓN

La elaboración del modelo hidrogeológico conceptual del Centro Poblado de Puerto Caldas, localizado en el municipio de Granada-Meta tiene como finalidad brindar un mayor conocimiento sobre el comportamiento del recurso hídrico subterráneo en la región del Ariari. En este aspecto, es importante mencionar que esta región cuenta con pocos estudios hidrogeológicos de carácter regional y local los cuales han sido elaborados por entes gubernamentales y empresas privadas. Los pocos estudios hidrogeológicos realizados en esta zona no han permitido tener un conocimiento amplio sobre las características de las unidades hidrogeológicas en dicha región lo que ocasiona un mal uso del agua subterránea en relación con su aprovechamiento y grado de vulnerabilidad a la contaminación

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo general

Conocer el comportamiento hidrogeológico en el área del Centro Poblado de Puerto Caldas, localizado en el municipio de Granada-Meta, referente al potencial hidrogeológico, zonas de recarga, unidades hidrogeológicas y la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación.

1.4.2 Objetivos específicos

1. Identificar las unidades hidrogeológicas que componen la zona de estudio del Centro Poblado de Puerto Caldas, localizado en el municipio de Granada, Meta.

2. Conocer las direcciones de flujo que recorre el recurso hídrico y su comportamiento dentro de la zona de estudio.
3. Conocer las zonas de recarga y descarga que hacen parte de la estructura hidrogeológica en la zona de estudio.
4. Evaluar la vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos presentes en el área de estudio, mediante la aplicación de la metodología GOD, propuesta por el Ministerio de Medio Ambiente.

2 MARCOS DE REFERENCIA

2.1 MARCO CONCEPTUAL

El concepto teórico de un modelo hidrogeológico conceptual, es la representación en varias dimensiones de las condiciones estáticas y dinámicas de sistemas hidrogeológicos, esta grafica es la representación de las características hidrogeológicas intrínsecas que presenta un área determinada.

Dentro de estos rasgos, es importante evaluar las características geológicas del área de interés, puesto que el desarrollo de un sistema de acuíferos, está íntimamente ligado con las características litológicas de la masa rocosa, el tipo de roca, la composición, nivel de compactación y la permeabilidad, son datos relevantes para determinar las unidades hidrogeológicas y acuíferos potenciales. Sumado a esta información, se debe realizar un perfil a profundidad de las unidades geológicas identificadas en superficie, que permitan verificar la continuidad lateral de las unidades hidrogeológicas potenciales.

Otro de los datos relevantes a tener en cuenta, está relacionado con las características climatológicas regionales, el volumen de agua que se descargue en superficie por medio de la pluviosidad, hace parte del líquido que recarga los acuíferos potenciales, puesto que parte de este volumen de agua, se infiltra en el suelo, completando el ciclo hidrológico natural del agua. Realizando una compilación de toda la información que distinguen el área, se puede obtener el bloque diagrama que representa el modelo hidrogeológico conceptual, este permite analizar el comportamiento y la dinámica de las aguas subterráneas, se identifica la profundidad del nivel freático y el potencial de uso de las aguas en la región; adicional se puede interpretar la geometría de las capas que contienen el recurso hídrico y la vulnerabilidad a la contaminación que puede presentar el acuífero al medio. Observando la multiplicidad de la información que alimenta el bloque diagrama, se demuestra la importancia de este tipo de estudios, los cuales permiten identificar el potencial hídrico de cualquier región y conocer sus características hidrogeológicas

principales, esto con propósito de mejorar el conocimiento de los recursos con los que cuente cualquier región, que permita generar planes para el buen aprovechamiento del recurso.

2.2 MARCO TEÓRICO

Para tener un entendimiento general del alcance que se deben tener en cuenta al momento del desarrollo del modelo hidrogeológico conceptual, es necesario conocer las definiciones teóricas de los elementos que se van a evaluar durante el procesamiento de la información para obtener un resultado satisfactorio, para lo cual se presenta a continuación conceptos de gran relevancia que abarca el tema de aguas subterráneas.

- Unidad Hidrogeológica. Conjunto de unidades hidrogeológicas, que en su estructura pueden tener acuíferos, acuitardos o acuicludos, que están conectados de modo que su funcionamiento (entradas, salidas, balances) hay que estudiarlo en modo conjunto.
- Acuífero. Formación geológica que almacena agua y que permite que circule a través de ella con facilidad.
- Acuitardo. Formación geológica que permite el almacenamiento de agua, pero que la circulación del agua a través de dicha unidad se realiza con dificultad.
- Acuicludo. Formación geológica que tiene la capacidad de almacenar agua, pero a diferencia del acuífero no permite la circulación a través de ella.
- Acuífuga: Formación geológica que no contiene ni almacena agua, pues no permite la circulación a través de ella.
- Dirección de flujo. Orientación que presenta un fluido en movimiento.
- Permeabilidad. Facilidad que un cuerpo ofrece a ser atravesado por un fluido.
- Transmisividad. Este parámetro indica la facilidad que tiene el fluido para circular horizontalmente por una formación geológica.
- Unidad geológica. Cuerpo de roca de extensión considerable que se han depositado en un lugar durante el mismo periodo geológico.
- Nivel freático. Es el punto donde la presión del agua es igual a la presión atmosférica, es considerado como la altura física que presenta la columna de agua.

- Agua subterránea. Es el fluido que se filtra a través de grietas y poros de las rocas que yacen debajo de la superficie de la tierra, acumulándose en las capas arenosas o rocas porosas del subsuelo.
- Acuífero libre. Acuíferos en los que existe una superficie en contacto con el aire y la presión atmosférica. Entre la superficie del terreno y el nivel freático se encuentra una zona no saturada que representa el límite superior.
- Acuífero confinado. Acuíferos cuyo límite superior se encuentra a presión superior a la atmosférica y ocupa totalmente los poros de la unidad geológica. La capa superior es impermeable, lo que impide la filtración de agua.
- Acuífero semiconfinado. Acuíferos a presión, que alguna de las capas confinantes son semipermeables y a través de ellas le llegan filtraciones.
- Porosidad. Es el porcentaje de volumen de poros, espacio poroso o el volumen de roca que puede contener fluidos.
- Modelo hidrogeológico conceptual. Son representaciones en dos o tres dimensiones de las condiciones de las condiciones estáticas y dinámicas de sistemas hidrogeológicos.
- Sondeos eléctricos verticales. Técnica geofísica que distinguen o reconocen las formaciones geológicas que se encuentran en profundidad, mediante prospección eléctrica por resistividad.
- Resistividad. Medida que cuantifica la fuerza con que se opone un material dado al flujo de corriente eléctrica.

2.3 MARCO JURÍDICO

De acuerdo a lo establecido por la Ley 99 de 1993 y el Decreto-Ley 216 de 2003, el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial –MAVDT hoy Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible - MADS, es el organismo rector de la gestión del medio ambiente y de los recursos naturales renovables, encargado de definir y formular, garantizando la participación de la comunidad, las políticas y regulaciones a las que se sujetarán la recuperación, conservación, protección, ordenamiento, manejo, uso y aprovechamiento de los recursos naturales renovables, entre ellos el agua.

Adicional, el Ministerio de Medio Ambiente cuenta con el apoyo de cinco institutos de investigación, estos institutos son el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales –IDEAM, el cual gestiona información relacionada, entre otros temas, con hidrología, hidrogeología, meteorología y ecosistemas, realiza estudios e investigaciones y emite conceptos en dichas materias; el Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras “José Benito Vives de Andreis” -INVEMAR, que presta asesoría y apoyo científico y técnico sobre los recursos naturales renovables y los ecosistemas costeros y oceánicos de los mares adyacentes al territorio nacional; el Instituto de Investigación de Recursos Biológicos “Alexander von Humboldt”, encargado de la investigación relacionada con biodiversidad; el Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas “Sinchi” y; el Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico “John Von Neumann”, cuyos objetivos son desarrollar investigación científica y tecnológica que contribuya al desarrollo sostenible en la Amazonia y en el Pacífico³.

Junto con el MADS, en Colombia existen 33 Autoridades Ambientales Regionales, creadas con la ley 99 de 1993, en su artículo 5 que les otorga autonomía administrativa y financiera, patrimonio propio y personería jurídica y están encargadas de la administración del medio ambiente y de los recursos naturales renovables.

La Ley 161 de 1994, en virtud del mandato constitucional, creó además la Corporación Autónoma Regional del Río Grande de La Magdalena –CORMAGDALENA, con el fin de promover la recuperación, el aprovechamiento sostenible y la preservación del medio ambiente, los recursos ictiológicos y demás recursos naturales renovables del que constituye el río más importante en la zona andina colombiana.

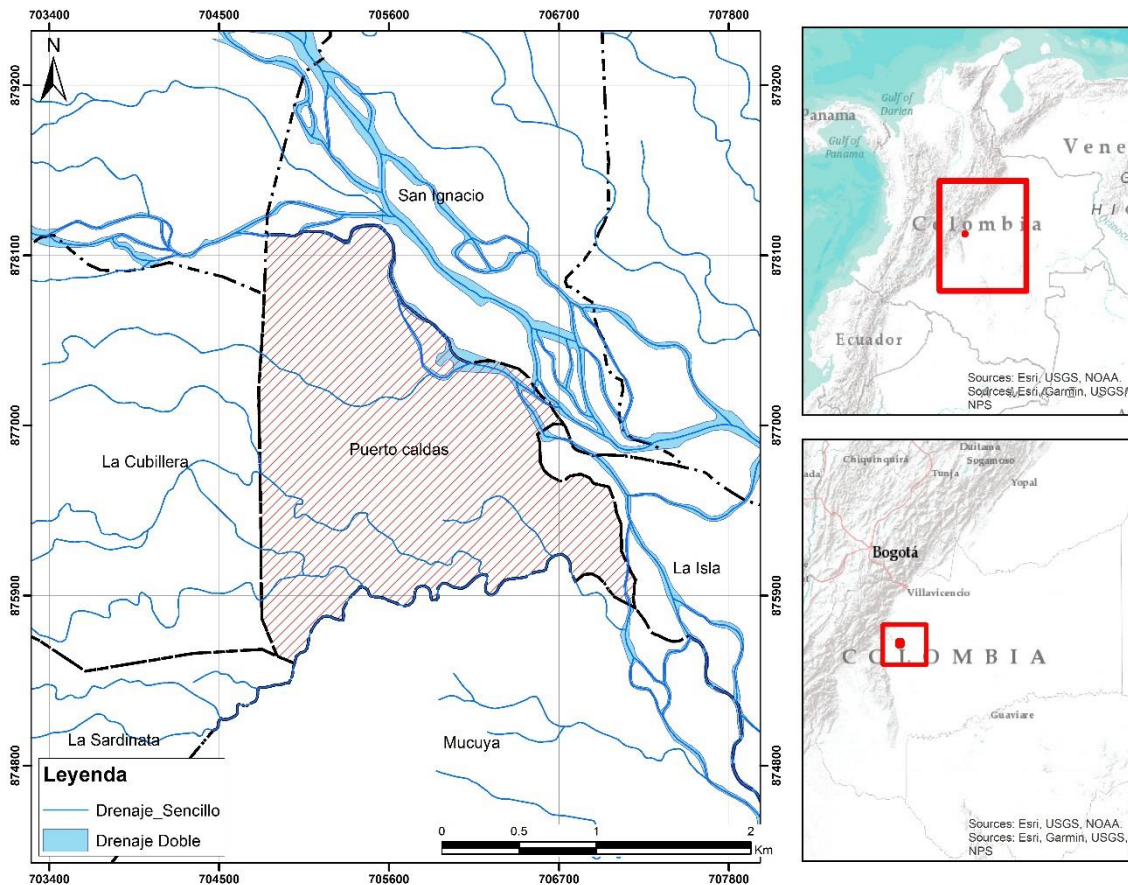
2.4 MARCO GEOGRÁFICO.

El centro poblado de Puerto Caldas se encuentra localizado en el municipio de Granada, departamento del Meta, a 180 Km al Sur - Oriente de Bogotá D.C. y a 80 Km Al Sur de

³ MADS. Política Nacional Para la Gestión Integral del Recurso Hídrico. 2010. Bogotá D.C.

Villavicencio, capital del departamento del Meta⁴; cuenta con una extensión de 3.96 Km² de acuerdo a la delimitación del POMCA del río Ariari y es uno de los cinco (5) centros poblado con los que cuenta el municipio. Limita al norte con el río Ariari y la vereda San Ignacio, al oriente con la vereda La Isla, al sur con las veredas Mucuya y Sardinata y al occidente con la vereda la Cubillera (Figura 2-1).

Figura 2-1. Localización del Centro Poblado de Puerto Caldas.



Fuente: Plan Básico de Ordenamiento Territorial (PBOT), 2011

⁴ Caracterización de Municipio de Granda, departamento del Meta. Gobernación del Meta, 2011.

2.5 MARCO DEMOGRÁFICO.

El Centro Poblado de Puerto Caldas, cuenta con una población aproximada de 2500 habitantes, de acuerdo a lo reportado por el informe de gestión del año 2016⁵, emitido por la alcaldía municipal de Granada. En cuanto a la oferta de servicios de salud, el centro poblado cuenta con 1 de los 5 puestos de salud que existen en la zona rural del municipio de Granada⁶.

2.6 ESTADO DEL ARTE.

Luego de realizar una búsqueda detallada de información relacionada con la ejecución de diferentes proyectos de construcción de modelos hidrogeológicos conceptuales, se extrajo la información más relevante como apoyo para la realización del presente documento, la cual se describe a continuación.

- Acuífero Guaraní (SAG): una herramienta para la gestión, realizado en el año 2012 y publicado en el boletín Geológico Minero, tiene como fin la caracterización del SAG, teniendo en cuenta la geología, geometría, hidrodinámica e hidroquímica. Se obtiene como resultado la redelimitación del SAG, las condiciones de flujo subterráneo y el balance hídrico del mismo.
- Modelo hidrogeológico conceptual para la evaluación del acuífero de la planicie aluvial del río Motatán (Venezuela), publicado en el 2008 por la revista Geográfica Venezolana; este estudio abarco información topográfica, fisiográfica, geológica, geomorfológica e hidrográfica, con el fin de obtener el modelo hidrogeológico del acuífero y realizar el cálculo de reservas permanentes del recurso hídrico subterráneo.
- Hydrogeologic Setting and Conceptual Hydrologic Model of the Spring Creek Basin, Centre Country, Pennsylvania, publicado en el año 2005 por la U.S.

⁵ Granada cultivando desarrollo, gestión 2016. Alcaldía municipal de Granda Meta, 2016.

⁶ Caracterización de Municipio de Granda, departamento del Meta. Gobernación del Meta, 2011.

Geological Survey, en el cual se realizó la caracterización hidrológica del área de estudio a partir de precipitación, temperatura, humedad, radiación solar y evaporación, y la caracterización geológica e hidrogeológica, que permitió conocer las propiedades físicas de los acuíferos y la calidad del agua subterránea presente.

- Modelo hidrogeológico conceptual de la mina de sal de Nemocón, contrato de concesión HIQO-01, publicado en el año 2016 por la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, en el cual se abarcaron variables como la geología, geomorfología, estudios geofísicos, hidrología, hidrogeoquímica e hidrogeología, con el propósito de conocer la relación litológica con el potencial hidrogeológico, determinar los espesores de las unidades de interés, conocer la calidad del agua subterránea de la zona y conocer las zonas de recarga que alimentan el acuífero.
- Hydrogeological conceptual model development and numerical modelling using Connectflow, fue publicado en el año 2002 por Svensk Karnbranslehantering AB (Gestión de Combustible Nuclear), a través de diferentes variables físicas se realiza la caracterización de la geológica, hidrológica, química, para la modelación de agua subterránea a través de la herramienta Connectflow.
- Modelo Conceptual del Acuífero Libre del Valle de Quetzaltenango, ciudad de Quetzaltenango, Guatemala. Publicado en el año 2011 por la Universidad del Valle, teniendo en cuenta las características geológicas e hidrológicas, se caracteriza un acuífero libre, las pendientes hidráulicas, direcciones de flujo y la oferta y la demanda anual del recurso hídrico subterráneo, aportado por el acuífero del Valle de Quetzaltenango.
- Modelo hidrogeológico conceptual a partir de información secundaria, en los alrededores del centro urbano del municipio de Chiquinquirá, se publica en el año 2017 por la Universidad Católica de Colombia, en este documento se hace una relación entre la geología, el balance hídrico superficial y el modelo hidráulico para obtener la recarga potencial anual del acuífero e identificar la zona de mayor infiltración.
- Estudio Nacional del Agua, ENA 2014, publicado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), uno de los principales

documentos generados en el país con información relacionada al recurso hídrico tanto superficial como subterráneo, en él se muestra una metodología para el desarrollo de modelos hidrogeológicos conceptuales.

3 METODOLOGÍA

3.1 FASES DEL TRABAJO DE GRADO

El presente proyecto se realizará en tres fases distribuidas de la siguiente manera:

FASE I: En esta fase se recopila información secundaria; para el desarrollo de la fase de consulta se realiza la adquisición de información regional de las unidades geológicas que afloran en la superficie del área de estudio, es necesario adquirir datos hidrológicos e hidrogeológicos de estudios que se hayan realizado en la zona o en áreas aledañas y si no existen estudios puntuales, se verifica la información a escala regional que pueda dar una visión preliminar de las condiciones de la zona.

FASE II: Se realizará un trabajo de campo donde se desarrollaran las siguientes actividades:

- Identificación a escala local de las unidades geológicas que afloran en el área de estudio.
- Inventario de puntos de agua subterránea (manantiales, aljibes y pozos) al 100%, identificando los usos y usuarios del recurso hídrico subterráneo.
- Identificación de las áreas potenciales de contaminación al acuífero, generados por efectos antrópicos.
- Realización de Sondeos Eléctricos Verticales (SEV).

FASE III: en esta fase se realizará el análisis y la compilación de toda la información obtenida, tanto de los datos primarios obtenidos en el trabajo de campo, como la información secundaria con la que se complementará la información puntual del área.

Finalmente se obtendrá la caracterización puntual del área de estudio, definiendo las unidades hidrogeológicas que existan en el área, se proyectarán las direcciones de flujo predominantes, se identificarán las zonas potenciales de recarga y descarga, y se identificarán los usuarios que dependan de recurso hídrico subterráneo y sus respectivos usos, adicionalmente se caracterizarán las zonas potenciales de contaminación que pueda presentar el acuífero. Con esta información se

obtendrá en bloque diagrama del área donde se compilara como resultado final todos los análisis realizados a lo largo del desarrollo del proyecto.

3.1.1. Metodología componente geología

La metodología implementada para el establecimiento del modelo geológico para el área de estudio se dividió en tres etapas claramente diferenciables: etapa de precampo, etapa de campo y etapa de postcampo. Las actividades desarrolladas durante la etapa de precampo consistieron en la compilación, análisis y validación de información existente, así como la interpretación de imágenes satelitales disponibles en la plataforma de Google Earth. Dentro de esta primera fase se consultó la cartografía geológica a escala 1:100.000 y 1:500.000 elaborada por el Servicio Geológico Colombiano dentro de sus planchas 306 (escala 1:100.000) y 5-14 (escala 1:500.000). Fueron consultados además el documento técnico del Plan de Ordenación y Manejo de Cuenca (POMCA) del río medio y bajo Ariari, así como el Plan de ordenamiento Básico (PBOT) del municipio de Granada Meta. Con esta información fue construido el mapa preliminar en escala 1:25.000 del área de estudio.

La segunda etapa dentro del establecimiento del modelo geológico para el área de estudio consistió en la realización de un trabajo de campo con el objetivo de corroborar y ajustar la cartografía geológica preliminar, efectuando estaciones de campo para obtener una descripción puntal de litología presente. Finalmente en la etapa de postcampo, se utilizó la información obtenida en las fases de campo, para ajustar el mapa precampo y se generaron los ajustes necesarios en la cartografía preliminar (especialmente en contactos geológicos), generando de esta manera el mapa geológico de la zona de estudio a una escala 1:25.000 (Fotografía 3-1 y Fotografía 3-2).



Fotografía 3-1 Estaciones de campo para la caracterización del componente geológico



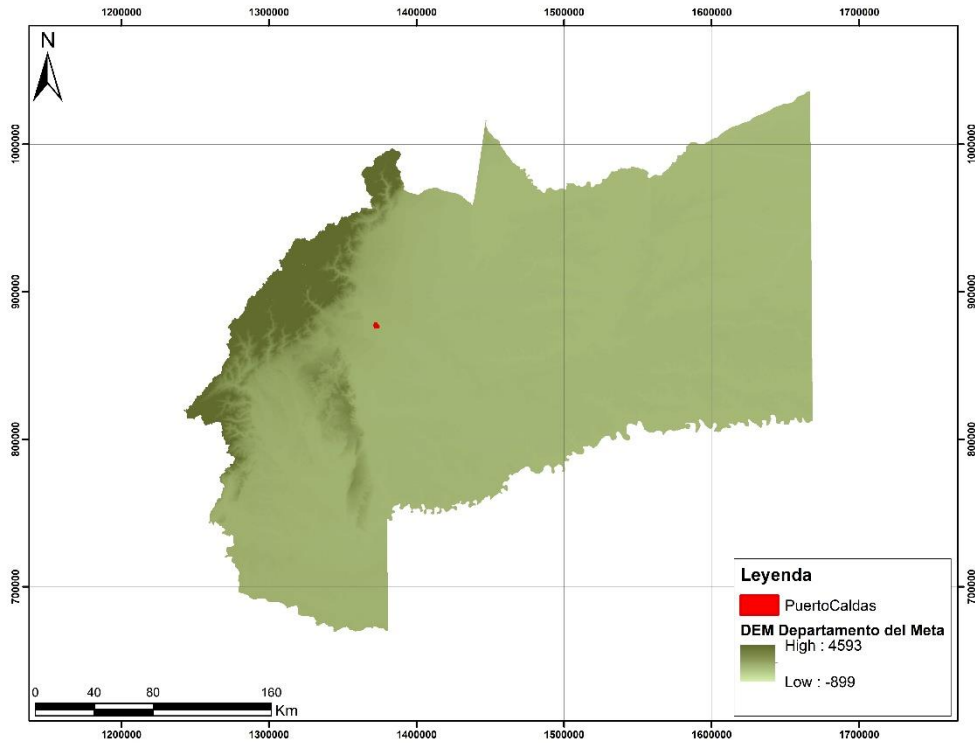
Fotografía 3-2 Estaciones de campo para la caracterización del componente geológico

3.1.1. Metodología componente geomorfología

El análisis geomorfológico del Centro Poblado Puerto Caldas fue realizado en tres fases claramente diferenciables: fase de precampo, fase de campo y fase de postcampo. Dentro de la fase de precampo se realizaron actividades relacionadas con la compilación, análisis y validación de información existente, además de la interpretación de imágenes satelitales y la construcción de un modelo de elevación digital del terreno (DEM) (Figura 3-1). Para la elaboración del mapa geomorfológico preliminar en escala 1:25.000, se tuvo en cuenta los mapas geomorfológicos del

Servicio Geológico Colombiano y los presentados dentro del POMCA del río Ariari (parte media y alta).

Figura 3-1. Modelo de elevación del terreno para el departamento del Meta



Fuente: Elaboración propia, 2018

Para la caracterización de las unidades geomorfológicas delimitadas de forma preliminar, se realizó un trabajo de campo, con el fin de identificar los rasgos morfogenéticos, morfográficos, morfodinámicos y morfoestructurales de cada unidad geomorfológica. El trabajo de campo tuvo como objetivo principal corroborar y ajustar la cartografía geomorfológica preliminar, efectuando estaciones de campo para identificar tipo de relieve, forma de las laderas, presencia o ausencia de procesos morfodinámicos. Finalmente dentro de la etapa de postcampo se efectuaron actividades con el fin de ajustar el mapa precampo, generando los ajustes necesarios en la cartografía geomorfológica preliminar; obteniendo de esta manera las principales características de las unidades geomorfológicas del Centro Poblado de Puerto Caldas (Fotografía 3-3 y Fotografía 3-4).



Fotografía 3-3 Estaciones de campo para la caracterización del componente geomorfológico



Fotografía 3-4 Estaciones de campo para la caracterización del componente geomorfológico

3.1.1. Metodología componente hidrogeología

La caracterización hidrogeológica de un sitio permite establecer el potencial hidrogeológico de las rocas y sedimentos presentes, la productividad de los acuíferos, la geometría y extensión de los mismos, los usos y usuarios, la calidad del agua subterránea, la sensibilidad de los acuíferos a ser adversamente contaminados y en general describir el funcionamiento del sistema hidrogeológico de la zona de evaluación (POMCA, 2016).

Para el establecimiento del modelo hidrogeológico del Centro Poblado Puerto Caldas se realizaron las siguientes actividades:

1. Recopilación, análisis y validación de la información hidrogeológica existente de la zona de estudio, en relación con información de inventario de puntos de agua subterránea, sondeos eléctricos verticales, pruebas de bombeo.
2. Se recopiló la información existente de puntos de agua subterránea (aljibes, pozos, manantiales) de inventarios realizados en estudios anteriores, especialmente los presentados en el POMCA del río Ariari (parte media y baja).
3. Se recopiló información de pruebas de bombeo presentadas en el POMCA del río Ariari (parte media y baja).
4. Se realizaron cuatro (4) sondeos eléctricos verticales (SEV'S) en el Centro Poblado Puerto Caldas (Fotografía 3-5).



Fotografía 3-5 Elaboración de sondeos eléctricos verticales dentro del área de estudio.

5. Se realizó un control de campo de las unidades geológicas presentes dentro del área de estudio, con el fin de evaluar su potencial hidrogeológico.

6. Se delimitaron las zonas de recarga potencial del área de estudio a partir de la metodología desarrollada por Silva (2007), la cual evalúa el potencial del terreno para permitir la infiltración del agua de precipitación.
7. Se evaluó la vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos a la contaminación mediante la metodología del GOD.
8. Se categorizaron las unidades hidrogeológicas dentro del área de estudio de acuerdo con los lineamientos propuestos en los estándares internacionales, adoptando la nomenclatura de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos (IAH).

Se elaboró el mapa hidrogeológico para el área de estudio

3.2 INSTRUMENTOS O HERRAMIENTAS UTILIZADAS

Lo elementos utilizados para la adquisición de la información son:

- GPS.
- Brújula.
- Formatos de campo.
- Equipo geoelectrico.
- Sonda piezométrica.

4 MODELO GEOLÓGICO

4.1 MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

El centro poblado de Puerto Caldas se localiza geológicamente dentro de la cuenca sedimentaria de los Llanos Orientales, la cual corresponde a una cuenca de tipo ante país; cuya evolución está estrechamente relacionada con el desarrollo de la margen convergente occidental de Sur América, así como con el levantamiento de la Cordillera Oriental, presentado de esta manera una espesa secuencia de rocas sedimentarias depositadas durante el Mesozoico-Cenozoico ⁷(POMCA, 2016).

Por su evolución geológica, la Cuenca de los Llanos Orientales se puede dividir en dos dominios principales: dominio del Piedemonte y dominio de los Llanos y este último puede dividirse a la vez en dos sub-dominios bien definidos: Llanos de Casanare-Arauca y Llanos del Meta (Gómez, 2009)⁸. El área de estudio se encuentra en su totalidad bajo el subdominio de Llanos del Meta.

En términos generales la cuenca de los Llanos Orientales se encuentra conformada por materiales siliciclásticos metamorfoseados, así como por unidades formadas en ambientes deltaicos a fluviales de alta energía. En la parte superior de esta secuencia sedimentaria se localizan los depósitos cuaternarios, los cuales se han generado a partir de la erosión, arrastre y depositación de los sedimentos provenientes de la Cordillera Oriental, apoyados además por la sucesión de las diferentes épocas glaciares del Cuaternario, eventos que produjeron grandes cauces por los cuales se transportaron enormes cantidades de sedimentos, los cuales conformaron abanicos aluviales en cercanía al piedemonte y depósitos de llanura aluvial que constituyen morfológicamente la Sabana

⁷ PLAN DE ORDENAMIENTO Y MANEJO DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA (POMCA) DEL RÍO ARIARI. 2016.

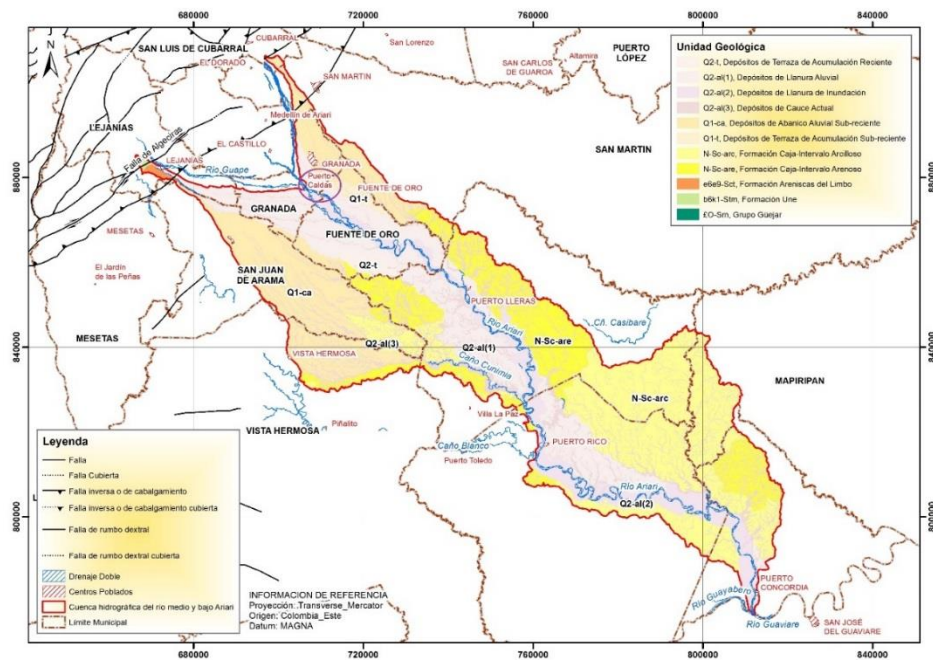
⁸ GÓMEZ, Y.; YORIS, F.; RODRÍGUEZ, J.; PORTILLO, F.; ARAUJO, Y. Aspectos hidrodinámicos, estructurales y estratigráficos del Campo Rubiales. Cuenca de los Llanos Orientales, Colombia. Pacific Rubiales Energy. Bogotá D.C. 2009.

de los Llanos Orientales; adicionalmente la dinámica fluvial genera depósitos de sedimentos que se disponen paralelamente a los principales drenajes⁹ (POMCA, 2016).

4.2 ESTRATIGRAFÍA REGIONAL

Para un mayor entendimiento de las unidades geológicas que hacen parte de la estratigrafía regional del área de estudio, se ha determinado la cuenca hidrográfica del río Medio y Bajo Ariari como el área de geología regional para el presente proyecto. Desde el punto de vista estratigráfico y cronológico, en la cuenca hidrográfica del río Medio y Bajo Ariari, afloran rocas de edad Cambro Ordovícica, pertenecientes al dominio del Piedemonte, hasta sedimentos que cubren principalmente el dominio de los Llanos Orientales. El Centro Poblado de Puerto Caldas se localiza en su totalidad dentro de Depósitos Cuaternarios. En la Figura 4-1 se muestran las unidades geológicas que hacen parte de la estratigrafía regional del área de estudio. Dicha figura corresponde a la geología presenta durante el desarrollo del POMCA del río Ariari.

Figura 4-1. Mapa geológico regional para el área de estudio correspondiente a la cuenca del río Ariari, parte media y baja.



Fuente: POMCA, 2016

⁹ PLAN DE ORDENAMIENTO Y MANEJO DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA (POMCA) DEL RÍO ARIARI. 2016.

Dentro de la cuenca hidrográfica de la parte media y baja del río Ariari se encuentra rocas denominadas como Grupo Güejar, Formación Une, Formación Areniscas del Limbo, Formación Caja intervalo arenoso, Formación Caja intervalo arcilloso, así como los depósitos cuaternarios clasificados en Depósitos de Terraza de Acumulación Subreciente, Depósitos de Abanico Aluvial Subreciente, Depósitos de Cauce Actual, Depósitos de Llanura de Inundación, Depósitos de Llanura Aluvial y Depósitos de Terraza de Acumulación Reciente.

La Formación Une (Hubach, 1957), corresponde a una secuencia exclusiva de areniscas, en bancos gruesos, separados por lutitas delgadas, con un espesor de 500 m (POMCA, 2016)¹⁰. La Formación Caja (Valencia, 1938) se encuentra compuesta por areniscas y conglomerados con intercalaciones de arcillolitas dependiendo del nivel en el que se encuentre: nivel arcilloso o nivel arenoso. La Formación Areniscas del Limbo corresponde a una secuencia de areniscas conglomeráticas, areniscas y arcillolitas. Por su parte el Grupo Güejar se encuentran compuestas por arcillas oscuras algo filíticas o pizarras que alternan con areniscas cuarcíticas y grauwas.

El área de estudio se localiza en superficie sobre depósitos cuaternarios.

4.2.1 Geología local

El centro poblado de Puerto Caldas se localiza en su totalidad dentro de Depósitos Cuaternarios. Los Depósitos Cuaternarios se han acumulado de manera continua, como consecuencia de los procesos de levantamiento y erosión de la Cordillera Oriental y sus efectos sobre el comportamiento del drenaje; unos corresponden a depósitos de abanicos aluviales, generados por los últimos levantamientos de la cordillera durante el Pleistoceno, apoyados por la sucesión de las diferentes épocas glaciares del Cuaternario, que produjeron grandes cauces por los que se transportaron enormes cantidades de sedimentos debido a cambios de pendiente, durante eventos

10 PLAN DE ORDENAMIENTO Y MANEJO DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA (POMCA) DEL RÍO ARIARI. 2016.

fluviotorrenciales; y otros corresponden a depósitos aluviales asociados a la dinámica fluvial de la cuenca durante el Holoceno¹¹ (Rodríguez, 2001).

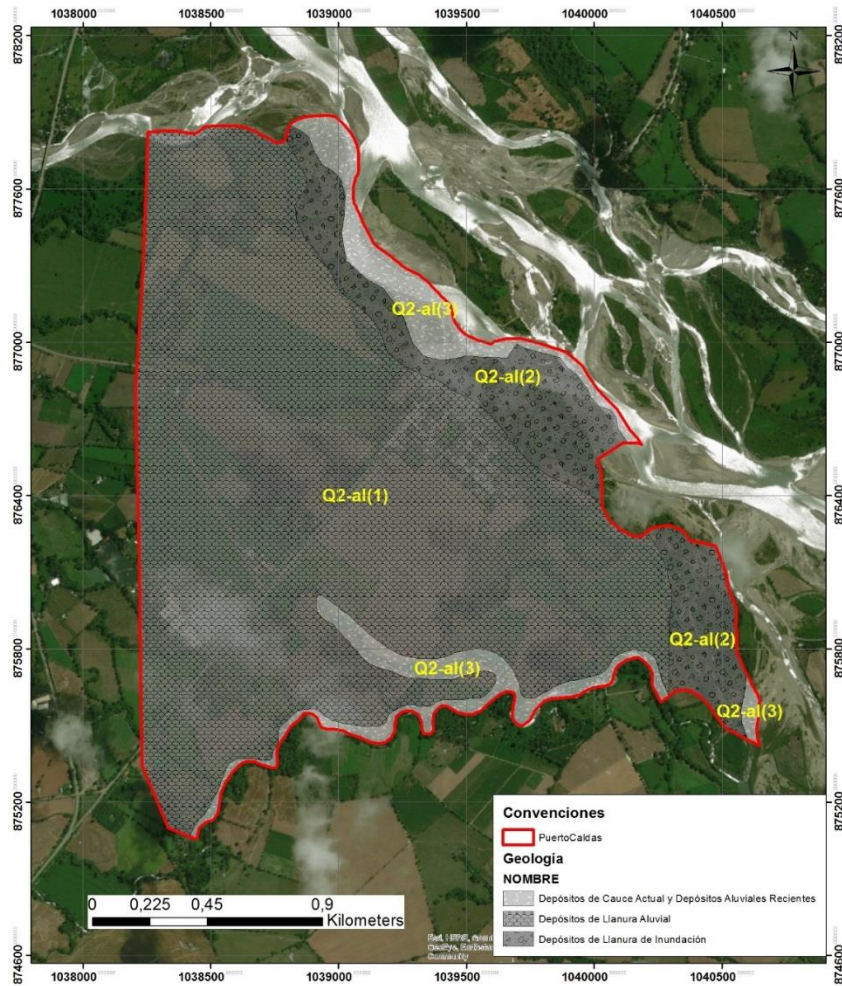
Estos Depósitos Cuaternarios se han clasificado en tres (3) unidades denominadas Depósitos Aluviales Recientes, Depósitos de Llanura Aluvial y Depósitos de Llanura de Inundación. La nomenclatura de las unidades geológicas fue tomada del POMCA del río Ariari. Las características más importantes de estas unidades geológicas se presentan en la Tabla 4-1. Por su parte la distribución de las unidades geológicas dentro del centro poblado de Puerto Caldas se muestra en la Figura 4-2.

11 RODRÍGUEZ, A. Mapa geológico del departamento del Meta, Memoria explicativa. Instituto Colombiano de Geología y Minería – INGEOMINAS, Bogotá, 2001. INSTITUTO COLOMBIANO DE GEOLOGÍA Y MINERÍA-INGEOMINAS. Mapa geológico del departamento del Meta, Memoria explicativa. Bogotá, 2001

Tabla 4-1. Unidades geológicas aflorantes dentro del área de estudio

NOMBRE UNIDAD GEOLÓGICA	EDAD	DESCRIPCIÓN	ÁREA (Ha)	% ÁREA
Depósitos Aluviales Recientes	Cuaternario	Corresponden a sedimentos sueltos, recientes, que son transportados y depositados a lo largo de las diferentes corrientes, especialmente el río Ariari, el río Cubillera, además de todos los afluentes menores, disponiéndose como franjas a lo largo de los mismos y sus áreas más próximas	35,38	8,93
Depósitos de Llanura Aluvial		Corresponden a depósitos de sedimentos cuaternarios de origen aluvial, producto de la disección y retrabajamiento de los Abanicos Aluviales Sub-recientes y otros depósitos cuaternarios del Pleistoceno, que debido a la divagación de los principales drenajes como el río Ariari, se re-depositaron y conformaron un depósito delgado	308,84	77,92
Depósitos de Llanura de Inundación		Corresponden a sedimentos recientes que han sido transportados por crecientes normales o interanuales de los principales ríos (Ariari, Cubillera) y caños del área y están bajo el régimen de los periodos climáticos, formando terrazas bajas con alturas no mayores a 2 m con respecto al nivel de los drenajes, presentando un relieve plano de topografía baja	52,14	13,15
TOTAL			396,36	100

Figura 4-2. Mapa geológico local para el centro poblado de Puerto Caldas



Fuente: POMCA, 2016, modificación propia

4.2.2 Depósitos de Llanura de Aluvial (Q2-al1)

Es la unidad cuaternaria más predominante dentro del área de estudio. Corresponden a depósitos de sedimentos cuaternarios de origen aluvial, producto de la disección y retrabajamiento de los Abanicos Aluviales Sub-recientes y otros depósitos cuaternarios del Pleistoceno, que debido a la divagación de los principales drenajes como el río Ariari, se re-depositaron y conformaron un depósito delgado, de aproximadamente 20 m (definido mediante la prospección geoelectrónica), de relieve plano y ligeramente inclinado hacia el sureste. Estos depósitos son utilizados para

actividades ganaderas y para la siembra de arroz, plátano, maíz, entre otros cultivos (**Fotografía 4-1 y Fotografía 4-2**).



Fotografía 4-1 Depósitos de Llanura Aluvial



Fotografía 4-2 Depósitos de Llanura Aluvial

Dentro de la zona de estudio, estos depósitos están dispuestos como una franja en dirección NW-SE, paralelos al río Ariari, ocupando cerca del 80% del área de estudio. A partir de la interpretación de imágenes de satélite, se observa que morfológicamente estos depósitos se asemejan a abanicos aluviales en la zona más cercana al sector de piedemonte, sin embargo, por el control litológico y los rasgos observados, se considera que se tratan de depósitos de llanuras aluviales, que como se mencionó anteriormente han socavado, re-trabajado y re-depositado materiales más antiguos. La mayor parte del centro poblado de Puerto Caldas, se localiza dentro de esta unidad geológica.

Litológicamente se encuentran constituidos por sedimentos limo-arcillosos de color gris, por lo general presentan tonalidades marrones y naranjas debido a los procesos de meteorización; también se pueden encontrar como arenas de grano fino a medio, arcillosas y de tonalidades naranja por el contenido de óxidos de hierro. En algunos sectores, están constituidos en la base por guijos y cantos sub-redondeados de hasta 20 cm de diámetro, moderadamente seleccionados, matriz-soportados, con matriz areno-arcillosa de color pardo rojizo, hacia el techo se encuentra

constituido por limos masivos de tonalidades pardas (Fotografía 4-3). Sin embargo, en la mayoría de la zona, estos depósitos solo se evidencian como materiales limosos en superficie, de varios metros de espesor.



Fotografía 4-3 Composición litológica de la unidad Depósitos de Llanura Aluvial

4.2.3 Depósitos Aluviales Recientes (Q2-al 3)

Corresponden a sedimentos sueltos, recientes, que son transportados y depositados a lo largo de las diferentes corrientes, especialmente el río Ariari, el río Cubillera, además de todos los afluentes menores, disponiéndose como franjas a lo largo de los mismos y sus áreas más próximas. Dentro del área de estudio estos depósitos alcanzan un ancho cercano a los 300 metros de amplitud, asociado a que en este sector el río tiene un comportamiento tipo Meándrico.

Litológicamente se encuentran constituidos por clastos de todos los tamaños, desde bloques de fragmentos de rocas metamórficas y areniscas cuarzosas principalmente, hasta sedimentos de tamaño limo y arcilla. Los materiales moderadamente redondeados y mal seleccionados, se encuentran actualmente siendo explotados para materiales de construcción (Fotografía 4-4, Fotografía 4-5, Fotografía 4-6). En este aspecto es importante mencionar que dentro del área de estudio se encuentran activas varias licencias ambientales para la explotación de estos materiales.



Fotografía 4-4 Composición litológica de la unidad Depósitos Aluviales Recientes



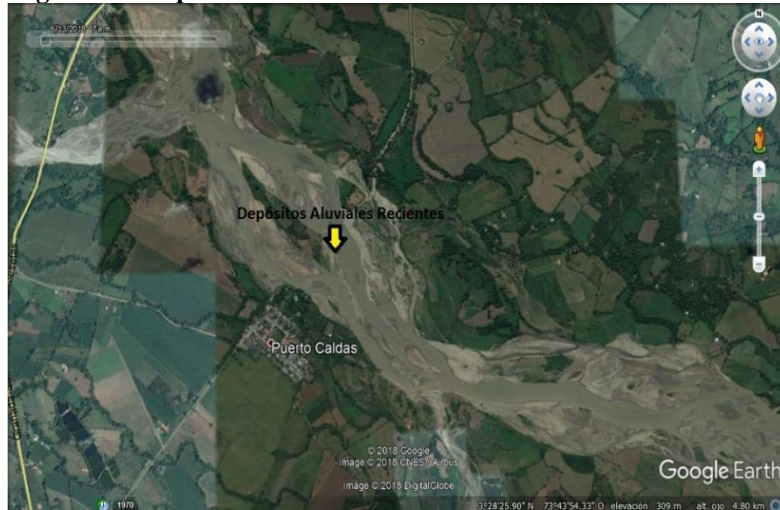
Fotografía 4-5 Composición litológica de la unidad Depósitos Aluviales Recientes



Fotografía 4-6 Composición litológica de la unidad Depósitos Aluviales Recientes

La delimitación de esta unidad geológica fue realizada a partir de imágenes satelitales (Figura 4-3).

Figura 4-3. Depósitos Aluviales Recientes dentro del área de estudio



Fuente: Google Earth, 2018

4.2.4 Depósitos de Llanura de Inundación

Corresponden a sedimentos recientes que han sido transportados por crecientes normales o interanuales de los principales ríos (Ariari, Cubillera) y caños del área y están bajo el régimen de los periodos climáticos, formando terrazas bajas con alturas no mayores a 2 m con respecto al nivel de los drenajes, presentando un relieve plano de topografía baja. Se estima que su espesor no debe superar los 3 m (Fotografía 4-7 y Fotografía 4-8).



Fotografía 4-7 Depósitos de Llanura de Inundación, asociados al río Ariari



Fotografía 4-8 Depósitos de Llanura de Inundación, asociados al río Ariari

Estos depósitos se presentan principalmente como una franja paralela a lo largo del río Ariari, de forma contigua a los Depósitos de Llanura Aluvial. Su extensión lateral o anchura es variable y en algunos sectores pueden no presentarse, específicamente en los sitios en los que el cauce del río está socavando directamente los Depósitos de Llanura Aluvial (Figura 4-4).

Figura 4-4. Llanura de Inundación dentro del área de estudio



Fuente: Google Earth, 2018

Estos depósitos se encuentran compuestos por sedimentos sueltos, conformados por limos y arenas de grano fino y muy fino, bien seleccionadas y de color gris oscuro. En general, por tratarse de zonas planas adyacentes al río, estos depósitos son terrenos inundables y se pueden observar encharcamientos de agua (Fotografía 4-9).



Fotografía 4-9 Depósitos de Llanura de Inundación, asociados al río Ariari: Limos y arenas de tamaño de grano fino

5 MODELO GEOMORFOLÓGICO

La geomorfología es la ciencia de la tierra que estudia de manera sistemática, la génesis, clasificación y evolución de las formas antiguas y actuales del terreno, como respuesta a los diferentes procesos naturales, que se encargan de esculpir y modelar la superficie terrestre, unas veces de manera lenta, casi imperceptible para el hombre y en otras tan rápida, que causa catástrofes (POMCA, 2016)¹².

5.1 JERARQUIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA

Para la jerarquización geomorfológica del área de estudio se utilizó la metodología propuesta por Carvajal 2011 (Propuesta de Estandarización de la Cartografía geomorfológica en Colombia), la cual clasifica el área en zona geoestructural, provincia geomorfológica, región geomorfológica y por último unidades y subunidades geomorfológicas. La zona geoestructural se refiere a grandes áreas geográficas o amplios espacios continentales o intra-continentales caracterizados y definidos por estructuras geológicas y topográficas regionales (megageoformas de origen tectónico), estando establecidas por una escala 1:2.500.000. Para la zona de evaluación, corresponde principalmente a una geomorfoestructura de megacuencas de sedimentación, relacionada con la Cuenca de los Llanos Orientales.

La provincia geomorfológica corresponde a un conjunto de regiones con geoformas parecidas y definidas por un macro relieve y una génesis geológica similar. Localmente se relacionan con las regiones naturales y con los terrenos geológicos de Colombia, los cuales están delimitados por el trazo de mega fracturas y suturas definidas o inferidas. Se diferencian y delimitan las formas del relieve tomando como base sus características geológicas, morfológicas y geográficas, estando establecidas para escalas entre 1:1.000.000 – 1:500.000. El área de estudio corresponde a la provincia geomorfológica de Llanuras del Meta, asociado con los relieves planos a ligeramente

¹² PLAN DE ORDENAMIENTO Y MANEJO DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA (POMCA) DEL RÍO ARIARI. 2016.

inclinados, donde se produce principalmente sedimentación. La región geomorfológica es la agrupación de geoformas relacionadas genética y geográficamente. Están definidas por los ambientes morfogenéticos y geológicos afectados por procesos geomórficos parecidos. La escala de trabajo está definida entre 1: 250.000 y 1: 500.000. De acuerdo a lo anterior, la zona de estudio se localiza en la región geomorfológica de Llanuras Aluviales.

La morfogénesis se relaciona con la definición y evolución de las formas del terreno; para el área de estudio se presenta el ambiente morfogenético fluvial correspondiente a relieves de morfología plana, horizontales a subhorizontales distribuidos de forma paralela al río Ariari, relacionados principalmente con los depósitos cuaternarios de origen aluvial.

5.2 UNIDADES Y SUBUNIDADES GEOMORFOLÓGICAS

Las unidades geomorfológicas dentro del área de estudio, son el resultado de la interacción de procesos acumulativos y climáticos, ampliamente influenciados por el levantamiento de la Cordillera Oriental y la posterior depositación en la Cuenca de los Llanos Orientales, que determinaron las geoformas del relieve en el área de estudio. Las geoformas han sido modeladas sobre depósitos cuaternarios. De acuerdo a la jerarquización sugerida en la metodología del Servicio Geológico Colombiano (2011)¹³, a continuación se presentan las unidades geomorfológicas dentro del Centro Poblado de Puerto Caldas. Las unidades y sub-unidades se denotan con letras, las primeras en mayúscula para indicar el origen y hasta tres letras en minúscula para representar la geoforma (POMCA, 2016) (Figura 5-1 y Tabla 5-1).

¹³ SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO, PROPUESTA DE ESTANDARIZACIÓN DE LAS UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS EN COLOMBIA, 2011

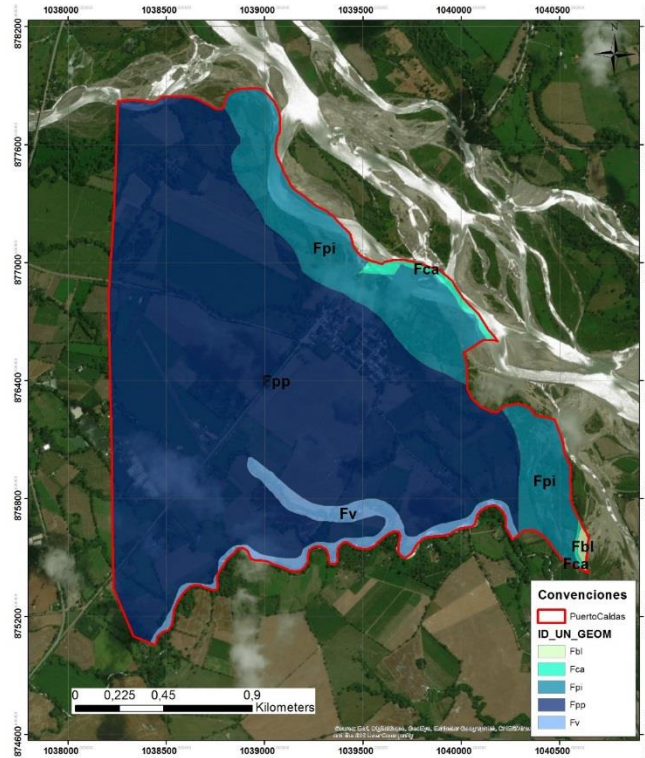
Tabla 5-1. Nomenclatura de las unidades geomorfológicas aflorantes dentro del área de estudio

Zona Geoestructural Geomorfoestructura	Provincia Geomorfológica	Región Geomorfológica	Ambiente Morfogenético	Unidad Geomorfológica	Sub-Unidad Geomorfológica	Nomenclatura
Megacuencas de sedimentación	Llanuras del Meta	Llanuras Aluviales	Fluvial	Abanico-Llanura Aluvial	Planos y Planicies Aluviales	Fpp
				Plano de inundación o nivel 0	Plano o Llanura de Inundación	Fpi
					Barras longitudinales	Fbl
				Vallecito	Vallecito	Fv
Cuerpo de Agua						Fca

Fuente: Elaboración propia, 2018

Básicamente dentro del Centro Poblado de Puerto Caldas se tienen geoformas generadas por la sedimentación fluvial y fluviotorrencial, de materiales provenientes del Piedemonte de la Cordillera Oriental, en la cual, el agua impulsada por la gravedad en forma de escorrentía es el agente de erosión, transporte y sedimentación. Corresponde a una morfología plana y sub-horizontal; las geoformas de este ambiente están distribuidas principalmente de forma paralela al río Ariari.

Figura 5-1. Mapa geomorfológico local para el centro poblado de Puerto Caldas



Fuente: Elaboración propia, 2018

5.2.1 Planos y Planicies Aluviales (Fpp)

Los Planos y Planicies Aluviales (Fpp) corresponden a una sub-unidad geomorfológica cuyo origen está relacionado con procesos de acumulación torrencial y fluvial. Geológicamente se desarrolla sobre los Depósitos de Llanura Aluvial. Los Planos y Planicies Aluviales producen un relieve de superficies planas (Fotografía 5-1), de gran amplitud dentro de la zona de estudio, el índice de contraste de relieve es muy bajo y tienen inclinación leve hacia el sureste. Presentan laderas planas, extremadamente largas y las crestas son planas. Una característica relevante de esta

geoforma es el patrón de drenaje sub-paralelo, en donde los caños que drenan la unidad se dirigen hacia el río Ariari ¹⁴(POMCA, 2016).



Fotografía 5-1 Morfología Plana de la unidad Planos y Planicies Aluviales

Las pendientes de los Planos y Planicies Aluviales son principalmente planas o suavemente inclinadas ($<5^\circ$) (**Fotografía 5-2**).



Fotografía 5-2 Morfología Plana de la unidad Planos y Planicies Aluviales

¹⁴ PLAN DE ORDENAMIENTO Y MANEJO DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA (POMCA) DEL RÍO ARIARI. 2016.

5.2.2 Plano o Llanura de Inundación Fpi

El Plano o Llanura de Inundación corresponde a una sub-unidad geomorfológica asociada a los Depósitos de Llanura de Inundación, generados principalmente por la dinámica fluvial actual del río Ariari. Ésta unidad presenta un relieve de superficies planas y el índice de contraste de relieve es muy bajo. Las laderas son planas, largas y muy largas, y las crestas son planas. Al igual que los Planos y Planicies Aluviales, una característica relevante de esta geoforma es el patrón de drenaje sub-paralelo con respecto al cauce del río Ariari, que es donde finalmente desemboca el drenaje desarrollado sobre esta geoforma (Fotografía 5-3 y Fotografía 5-4).



Fotografía 5-3 Morfología característica de la unidad Llanura de Inundación



Fotografía 5-4 Morfología característica de la unidad Llanura de Inundación

5.2.3 Barras Longitudinales

Esta sub-unidad geomorfológica está compuesta por cuerpos de arena, gravas y cantos que tienen forma elongada y/o en medialuna, y que se encuentran adheridos a las márgenes del cauce del río Ariari, donde su formación se debe a la dinámica fluvial y la geometría del cauce. Las barras fluviales longitudinales son cuerpos elongados de forma romboidal en planta y convexa en

superficie, dispuestos de forma paralela en el centro de los cauces fluviales mayores, y con la punta más aguda en la dirección de las corrientes¹⁵ (POMCA, 2016).

La delimitación de las barras longitudinales se realizó a partir de las imágenes satelitales disponibles en Google Earth (Figura 5-2).

Figura 5-2. Barras Longitudinales para el centro poblado de Puerto Caldas



Fuente: Elaboración propia, 2018

5.2.4 Vallecito (Fv)

El Vallecito corresponde a una unidad geomorfológica relacionada a la actividad fluvial actual de los ríos y caños que discurren dentro de la zona de estudio. Geológicamente corresponden con los Depósitos de Cauce Actual. Los Vallecitos se encuentran distribuidos en toda la zona de estudio,

¹⁵ PLAN DE ORDENAMIENTO Y MANEJO DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA (POMCA) DEL RÍO ARIARI. 2016.

presentándose sobre las otras geoformas y se caracterizan por ser zonas de formas alargadas cóncavas (**Fotografía 5-5**).



Fotografía 5-5 Morfología característica de la unidad Vallecito

6 HIDROLOGÍA Y CLIMATOLOGÍA.

Para la caracterización hidrológica y climatológica del área de estudio, se adquirió como información inicial del Instituto de Meteorología, Hidrología y Estudios Ambientales, datos de tres estaciones meteorológicas cercanas al área de influencia, para realizar la caracterización de precipitación y temperatura que se presenta en esta zona del país. De estas estaciones, se obtuvo los datos históricos de precipitación y temperatura, y con ayuda del software ArcGis 10.2, se realizó la interpolación de los datos para obtener el comportamiento climático del Centro Poblado de Puerto Caldas.

Tabla 6-1. Matrícula por nivel de formación. Educación Superior.

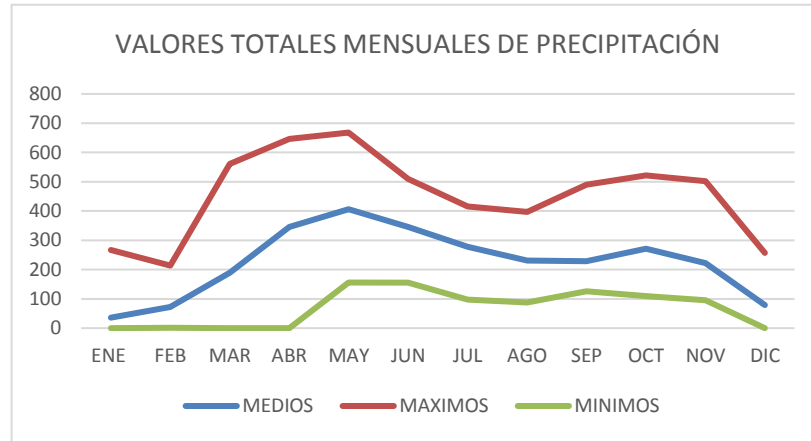
Código	Nombre de la Estación.	Tipo	Coordenadas (<i>Magnas Sirgas Bogotá</i>)		Altura (m.s.n.m.)	Estado
			Este	Norte		
32075010	Los Naranjos	Meteorológica	875104.06	1040095.92	220	Suspendida
32075040	La Holanda	Climatológica Ordinaria	883113.01	1059042.66	360	Activa.
32070060	Fuente de Oro	Pluviométrica	875107.99	1049355.91	300	Activa

Fuente: IDEAM, 2018

6.1 PRECIPITACIÓN.

Para realizar el análisis de precipitación del centro poblado de Puerto Caldas, se utilizaron los datos de la estación La Holanda, ya que presenta información completa, detallada y actualizada de las precipitaciones históricas del área; de acuerdo a esta información se observa que la zona presenta precipitaciones promedio que oscilan entre los 2400 a 2700 mm/año, presentando en promedio de 165 días de lluvia anuales y dos periodos de alta precipitación, el primero en los meses de marzo, abril y mayo, y el segundo en los meses de octubre, noviembre y diciembre (Figura 6-1).

Figura 6-1. Valores totales de precipitación-Estación La Holanda.

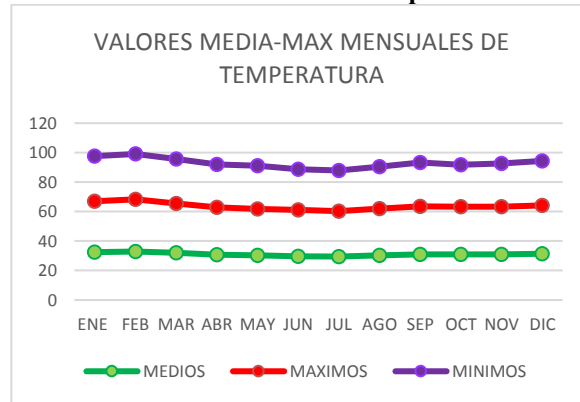


Fuente: Elaboración propia, 2018

6.2 TEMPERATURA.

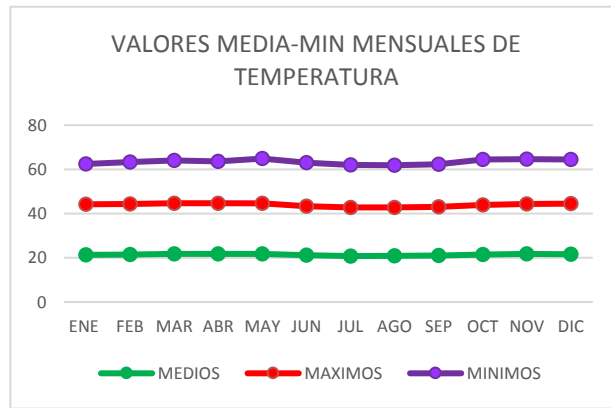
Para el área de estudio la temperatura media anual multianual varía entre los 24,6°C y 27,6°C, para un promedio de 26,1°C, En la **Figura 6-2** se representa la variación media-máximas mensual multianual de temperatura de la estación referenciada y en la **Figura 6-3** se representa la variación media-mínima mensual multianual de temperatura para el área de estudio, estas figuras nos permiten observar que la temperatura promedio en la zona de estudio es constante durante todo el año.

Figura 6-2. Valores media-máx. mensuales de temperatura-Estación La Holanda.



Fuente: Elaboración propia, 2018

Figura 6-3. Valores media-min mensuales de temperatura-Estación La Holanda



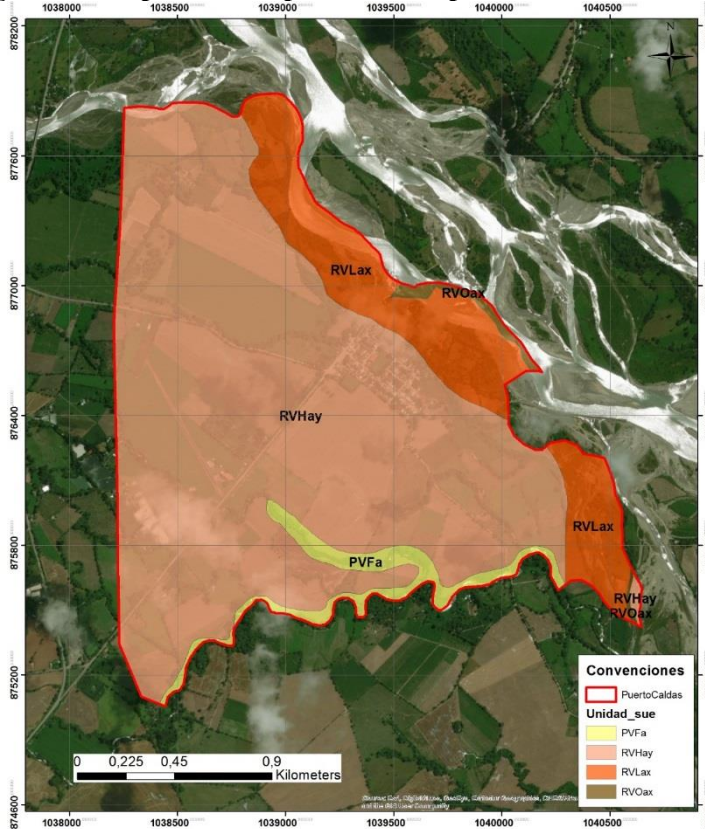
Fuente: Elaboración propia, 2018

De acuerdo a las características anteriormente mencionadas, se puede concluir que el área del Centro Poblado de Puerto Caldas, presenta una clasificación climática Cálido Semihúmedo (Csh) de acuerdo a la clasificación de Caldas – Lang.

7 MODELO COMPONENTE SUELOS

La caracterización de los suelos en el área de estudio, fue realizada teniendo en cuenta el “Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del Departamento del Meta”, elaborado por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (2004)¹⁶, con un respectivo control de campo y teniendo en cuenta las unidades geomorfológicas previamente definidas. La distribución de las unidades cartográficas de suelo dentro del Centro Poblado de Puerto Caldas se presenta en la Figura 7-1.

Figura 7-1. Mapa de suelos para el centro poblado de Puerto Caldas



Fuente: IGAC, 2004; modificación propia 2018

¹⁶ IGAC. Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del Departamento del Meta.2004

7.1 CONSOCIACIÓN TYPIC DYSTROPEPTS (PVFA)

Estos suelos se han desarrollado a partir de sedimentos mixtos aluviales; son en términos generales bien drenados, profundos a superficiales limitados por capa de fragmentos de roca (gravilla, cascajo, piedra). La Consociación está integrada por los suelos Typic Dystropepts en una proporción estimada del 65%, Fluventic Dystropepts en un 25% e inclusiones de Typic Troprothent en un 10%. Son suelos poco a mediamente evolucionados con una distribución de horizontes genéticos A-B-C. El primer horizonte tiene un espesor de 15 a 20 cm, color pardo grisáceo oscuro con moteados pardo rojizo, textura franco arcillosa y estructura en bloques subangulares débilmente desarrollada. El horizonte B tiene 30 a 35 cm de espesor, textura arcillosa y estructura en bloques subangulares débil a moderadamente desarrollada. Finalmente el horizonte C está constituido por fragmentos de roca de poca alteración, en una matriz de suelo con textura franco arcillo arenosa (IGAC, 2004)

7.2 ASOCIACIÓN AQUIC DYSTROPEPTS-FLUVENTIC DYSTROPEPTS (RVHAY)

Los suelos se desarrollan a partir de depósitos aluviales heterométricos, transportados desde la cordillera Oriental y depositada paralelamente a las márgenes del río Ariari principalmente. Se caracterizan por ser moderada a pobremente drenados, de texturas finas a moderadamente gruesas y profundos a superficies limitados por el nivel freático. La unidad cartográfica está conformada en un 45% por los suelos Aquic Dystropepts, por suelos Fluventic Dystropepts en un 35% e inclusiones en un 20%. La textura en estos suelos es franco arenosa a franco arcillosa (IGAC, 2004).

7.3 CONSOCIACIÓN AQUIC DYSTROPEPTS (RVLAX)

Estos suelos se han desarrollado a partir de sedimentos aluviales medios y gruesos, son moderadamente profundos a muy superficiales, limitados por nivel freático fluctuante, moderado a pobremente drenados y susceptibles a inundaciones. La Consociación la integran en un 85% los suelos Aquic Dystropepts e inclusiones de los suelos Aeric Troproquepts en un 10% y Fluventic Dystropepts en un 5%. Son suelos poco evolucionados y presentan una distribución de horizontes

A-B-BC-C con texturas franca y estructura en bloques subangulares, débilmente a moderadamente desarrollada (IGAC, 2004).

7.4 . GRUPO INDIFERENCIADO MISCELÁNEO DE PLAYONES E ISLOTES TYPIC TROPOFLUVENTS, FASE INUNDABLE (RVOAX)


En esta unidad se encuentran depósitos aluviales recientes e inestables (playones e islotes) y otros más estabilizados; en los primeros no existen suelos, los segundos son de formación incipiente, superficiales limitados por pedregosidad subsuperficial y nivel freático fluctuante y con drenaje natural moderado. La mayoría de estos suelos presentan gravilla, cascajo y piedra generalmente a partir de los 50 cm de profundidad y su grupo textural es moderadamente grueso. Estos depósitos son producto del mismo río Ariari y están compuestas en su mayor parte por cantos, gravas y arenas (IGAC, 2004).

8 MODELO HIDROGEOLÓGICO

8.1 ESTABLECIMIENTO DE LAS UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS

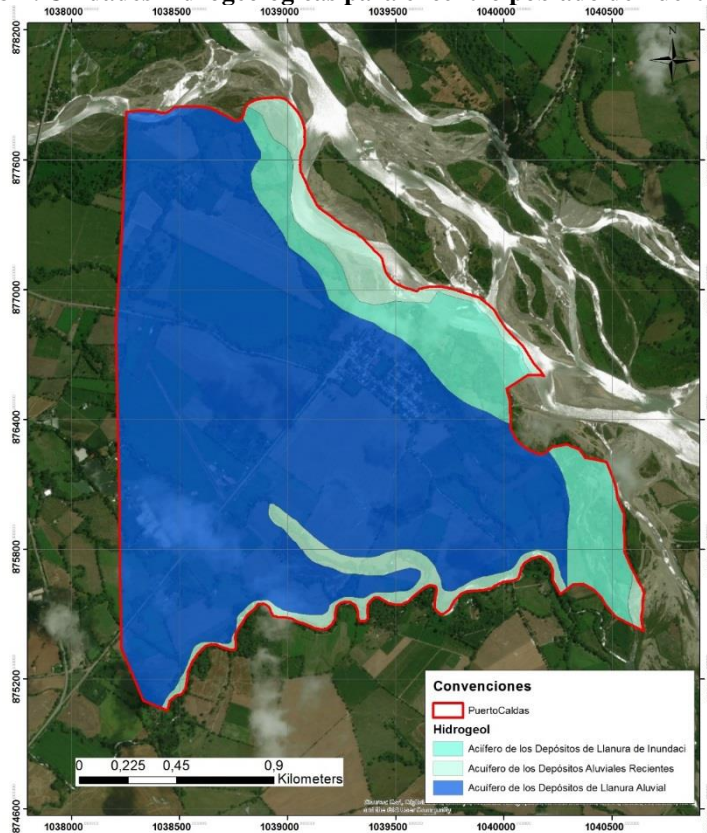
El área estudio se localiza dentro de un sistema de acuíferos de baja productividad y con capacidad específica entre 0,05 y 1,0 l/s/m. Las características de este sistema de acuíferos se presentan en la Tabla 8-1, mientras que la distribución dentro del Centro Poblado de Puerto Caldas se muestra en la Figura 8-1.

Tabla 8-1. Unidades hidrogeológicas presentes dentro del área de estudio.

Sistema Acuífero	Características de los Acuíferos	Unidades Hidrogeológicas
SEDIMENTOS Y ROCAS CON FLUJO INTERGRANULAR / POROSIDAD PRIMARIA		
 Acuíferos de Baja productividad, capacidad específica entre 0,05 y 1,0 l/s/m	Sistemas acuíferos discontinuos de extensión local, conformados por sedimentos cuaternarios no consolidados, de ambiente fluvial, que conforman acuíferos principalmente de tipo libre y libre cubierto. Almacenan aguas dulces recomendable para cualquier uso	Q2-al (1) Depósitos de Llanura Aluvial Q2-al (2) Depósitos de Llanura de Inundación Q2-al (3) Depósitos de Cauce Actual y Depósitos Aluviales Recientes

Fuente: POMCA, 2016

Figura 8-1. Unidades hidrogeológicas para el centro poblado de Puerto Caldas



Fuente: Elaboración propia, 2018

8.1.1 Acuífero de Los Depósitos de Llanura de Inundación

Está conformado por sedimentos que han sido transportados por las crecientes normales o interanuales de los principales ríos y caños del área, se componen de intercalaciones de limos y arenas de grano fino y muy fino que pueden alcanzar un espesor promedio estimado de 3 m. Reposan discordantemente sobre los Depósitos de Llanura Aluvial (**Fotografía 8-1**). Conforman acuíferos locales, por porosidad primaria, con limitada extensión y espesor, aunque se desconocen sus parámetros hidráulicos se estima que es de baja productividad y de tipo libre a libre cubierto,

debido a que en las crecidas de los cauces se depositan capas de materiales finos ¹⁷(POMCA, 2016).



Fotografía 8-1 Acuífero de los Depósitos de Llanura Aluvial

8.1.2 Acuífero de Depósitos Aluviales Recientes

Corresponden a los sedimentos de los cauces actuales y a los acumulados en las márgenes divagantes de los drenajes de la zona, su extensión horizontal depende de la dinámica de los cuerpos de agua a los cuales están asociados, disponiéndose como franjas a lo largo de los mismos; se estima que su espesor puede estar entre los 3 a 5 metros. Están constituidos por clastos de todos los tamaños, desde bloques hasta sedimentos de tamaño limo y arcilla (**Fotografía 8-2**).

¹⁷ PLAN DE ORDENAMIENTO Y MANEJO DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA (POMCA) DEL RÍO ARIARI. 2016.



Fotografía 8-2 Acuífero de Depósitos Aluviales Recientes

8.1.3 Acuífero de Depósitos de Llanura Aluvial

Corresponde a un acuífero constituido principalmente por sedimentos limo-arcillosos y arenas arcillosas de grano fino a medio y con un espesor estimado de 20 m; formando un acuífero local a semiregional, con moderada permeabilidad y de porosidad primaria (**Fotografía 8-3**).



Fotografía 8-3 Acuífero de Depósitos de Llanura Aluvial

Presentan conductividades hidráulicas entre 60 y 103,4 m/día y capacidades específicas (Ce) entre 0,26 y 1,4 l/s/m, aunque las capacidades específicas son bajas a medias, se considera que es predominantemente de baja productividad, limitado por su espesor (POMCA, 2016).

8.2 INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA SUBTERRÁNEA

El inventario es un método de recopilación y análisis de los datos relacionados con la hidrogeología, que procede de la información proporcionada por los usuarios de los denominados puntos de agua, es el sistema más idóneo para empezar a conocer 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, ya sean o no explotadas, abandonadas o colapsadas como pozos, aljibes y piezómetros; también se cuentan los manantiales o surgencias, que deben considerarse como descargas naturales de los acuíferos¹⁸ (POMCA, 2016).

El inventario de puntos de agua subterránea para el área de estudio se obtuvo de información primaria y secundaria. La información primaria fue recolectada a partir de un trabajo de campo realizado dentro del Centro Poblado Puerto Caldas. Mientras que la información secundaria fue la consultada a través de las concesiones y permisos otorgados por Cormacarena para el aprovechamiento del recurso hídrico, dentro del área de estudio.

Una vez efectuado el trabajo de campo y con la información secundaria consultada a través de los permisos otorgados por Cormacarena, se pudo establecer que dentro del área de estudio sólo existe un punto de agua subterránea, el cual abastece de agua a todo el centro poblado. Dentro de este punto de agua existe un sistema de tratamiento por medio de filtros. La profundidad del pozo es de 65 metros, contando con una protección ambiental adecuada (**Fotografía 8-4**).

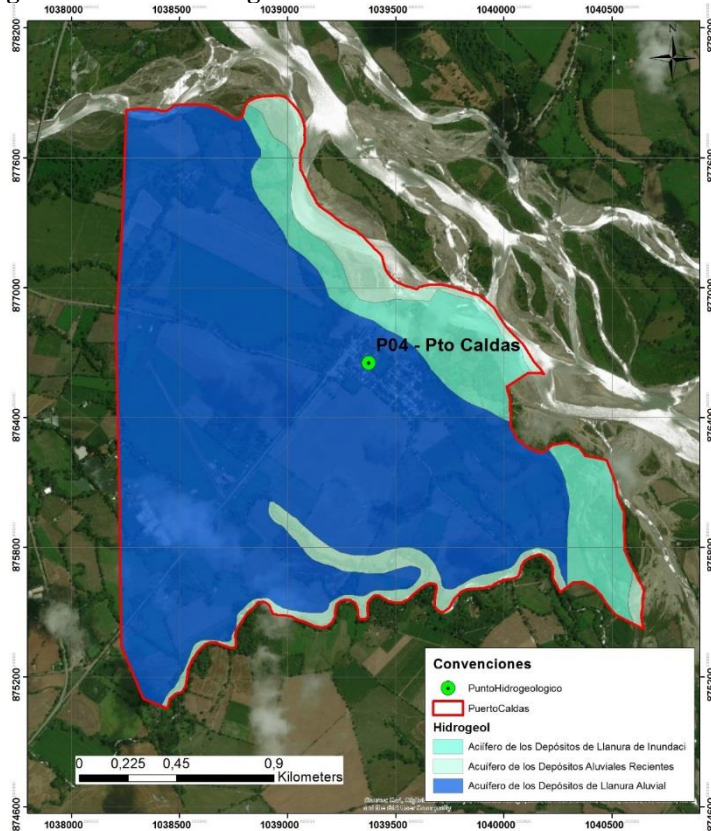
¹⁸ PLAN DE ORDENAMIENTO Y MANEJO DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA (POMCA) DEL RÍO ARIARI. 2016.



Fotografía 8-4 Punto de agua subterránea identificado dentro del área de estudio

Según informaron los residentes de este centro poblado, este pozo profundo corresponde al acueducto de toda la zona; por lo que en ocasiones el pozo es insuficiente para el abastecimiento de toda la comunidad. La localización de este pozo profundo se encuentra en la **Figura 8-2**.

Figura 8-2. Puntos de agua subterránea dentro del área de estudio

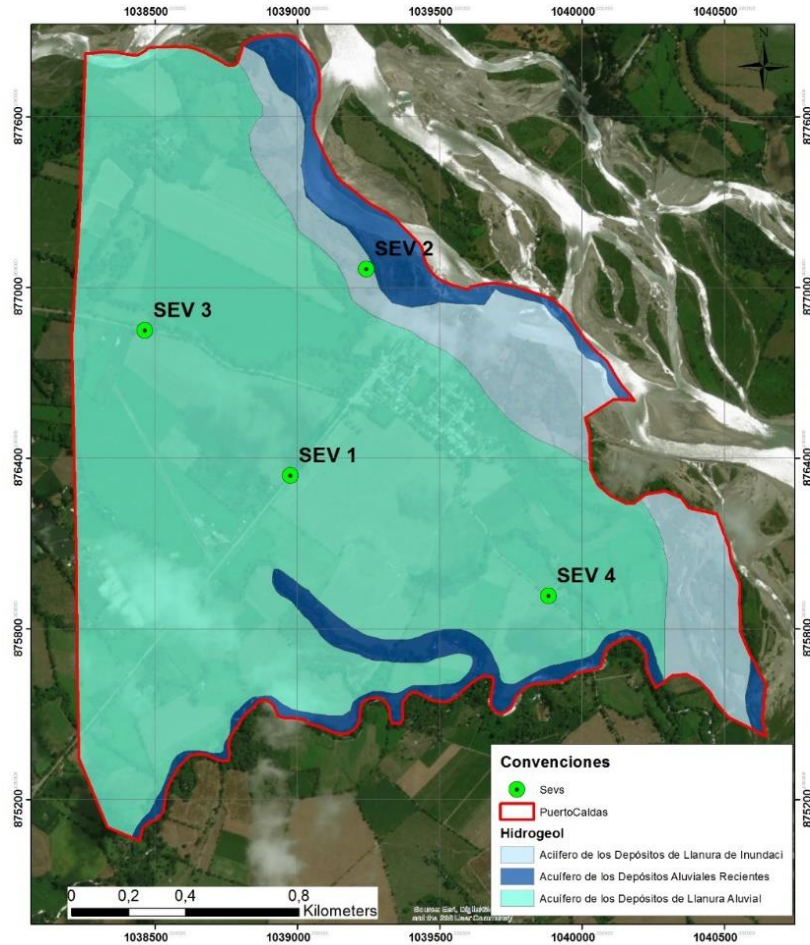


Fuente: Elaboración propia, 2018

8.3 PROSPECCIÓN GEOELÉCTRICA

La exploración geofísica en la modalidad de Sondeos Eléctricos Verticales – SEV, se realiza con el objetivo de evaluar las condiciones geométricas y de profundidad de las unidades geológicas potencialmente acuíferas y para estimar la continuidad de las mismas. Para el presente estudio se realizaron cuatro (4) Sondeos Eléctricos Verticales (SEV'S) distribuidos en todo el Centro Poblado de Puerto Caldas. La ubicación de estos sondeos se presenta en la Figura 8-3 y Tabla 8.2.

Figura 8-3. Localización de los sondeos eléctricos verticales dentro del área de estudio



Fuente: Elaboración propia, 2018

Tabla 8-2. Coordenadas Sondeos Eléctricos Verticales realizados

SEV	ESTE	NORTE	RUMBO	GEOLOGÍA
SEV_1	1038976	876338	N278E	Acuífero de Depósitos de Llanura Aluvial
SEV_2	1039242	877064	N7E	Acuífero de Depósitos de Llanura de Inundación
SEV_3	1038463	876847	N30E	Acuífero de Depósitos de Llanura Aluvial

SEV	ESTE	NORTE	RUMBO	GEOLOGÍA
SEV_4	1039883	875914	N10E	Acuífero de Depósitos de Llanura Aluvial

Fuente: Elaboración propia, 2018

En la prospección geoelectrica, se utilizó un equipo de resistividad, *MIBSEV*, consistente en un amperímetro y un voltímetro digitales, una unidad generadora de fuerza electromotriz, que introduce la corriente en el subsuelo. Así se obtiene la intensidad de la corriente (I), en miliamperios y la diferencia de potencial (V), en milivoltios. Las relaciones delta V/I, multiplicadas por factores geométricos exclusivos para cada arreglo, producen las resistividades aparentes, que son ploteadas en papel bilogarítmico en función de AB/2 (semidistancia electródica de corriente) (Fotografía 8-5)



Fotografía 8-5 Equipo de geoelectrica utilizado para la prospección

El dispositivo utilizado fue el Schlumberger, con variación de electrodos de potencial desde 0.5 hasta 50 metros (o sea MN/2 semidistancia electródica de potencial). La distancia AB/2, varió desde 1.0 hasta 200 metros, es una representación del arreglo de Schlumberger. El cálculo y la determinación y profundidades reales se hizo mediante el programa IPI2WIN versión 3.0.1, desarrollado por la Universidad estatal de Moscú, el cual crea archivos con los datos de campo e interpretando las curvas de resistividades aparentes y obteniendo de esta forma modelos de capas geoelectricas para cada sondeo.

8.3.1 SEV 1

El Sev1 fue realizado sobre el Acuífero de Depósitos de Llanura Aluvial, en la vía que conduce del centro poblado de Puerto Caldas hacia la trocha 4 (vía San Juan de Arama). Las coordenadas de ubicación son Este: 1038976, Norte: 876338 origen Bogotá; longitud AB: 400 metros con dirección N278E (Fotografía 8-6 y Fotografía 8-7).



Fotografía 8-6 Sondeo eléctrico vertical N° 1 Vía
Puerto Caldas-Trocha 4



Fotografía 8-7 Sondeo eléctrico vertical N° 1 Vía
Puerto Caldas-Trocha 4

Las capas interpretadas dentro del SEV 1, se presentan en la Tabla 8-3

Tabla 8-3. Interpretación Sondeo Eléctrico Vertical N° 1

SEV	CAPA	RESISTIVIDAD (Ohm-m)	Espesor (m)	Tope (m)	Interpretación
SEV-1	1	35	4,61 m	0	Arenas saturadas intercaladas con limos y arcillas pobremente saturadas
	2	97	20	4,61	Gravas y arenas saturadas

SEV	CAPA	RESISTIVIDAD (Ohm-m)	Espesor (m)	Tope (m)	Interpretación
	3	15	2	24,61	Arcillas y limos pobremente saturados
	4	322	125	26,61	Areniscas saturadas de la Formación Caja
MEDIDA TOTAL (m)			147 m		

Fuente: Elaboración propia, 2018

Se interpretaron cuatro (4) niveles de diferentes resistividades para el modelo del SEV-1. La información se encuentra resumida en la Tabla 8-3. La primera capa corresponde a Arenas saturadas intercaladas con limos y arcillas pobremente saturados con una resistividad de 35 Ohm-m y espesor de 4,61 metros. La capa (2) con un espesor de 20 metros, tope a los 4,61 m y resistividad de 970hm-m, corresponde a Gravas y Arenas saturadas. La siguiente capa (3) identificada en este modelo corresponde a Arcillas y limos pobremente saturados con resistividad de 15 Ohm-m, tope a los 24,61 m y espesor de 2 metros; La siguiente capa corresponde a Areniscas saturadas de la Formación Caja superior (4) con resistividad de 322 Ohm-m, tope a los 26,61 m y espesor de 125 metros.

Esto muestra que los Depósitos de Llanura Aluvial donde se realizó el Sondeo eléctrico vertical presenta un espesor de 26,61 metros. El espesor restante de 125 metros corresponde a rocas consolidada pertenecientes a las areniscas saturadas de la Formación Caja.

8.3.2 SEV 2

El Sev2 fue realizado sobre el Acuífero de Depósitos de Llanura de Inundación, cercano al cauce actual del río Ariari. Las coordenadas de ubicación son Este: 1039242, Norte: 877064 origen Bogotá; longitud AB: 400 metros con dirección N7E (Fotografía 8-6 y Fotografía 8-7).



Fotografía 8-8 Sondeo eléctrico vertical N° 2 Vía
Puerto Caldas-Trocha 4



Fotografía 8-9 Sondeo eléctrico vertical N° 2 Vía
Puerto Caldas-Trocha 4

Las capas interpretadas dentro del SEV 2, se presentan en la Tabla 8-4

Tabla 8-4. Interpretación Sondeo Eléctrico Vertical N° 2

SEV	CAPA	RESISTIVIDAD (Ohm-m)	Espesor (m)	Tope (m)	Interpretación
SEV-2	1	365	0,7	0	Suelo
	2	90	1,5	0,7	Arenas saturadas

SEV	CAPA	RESISTIVIDAD (Ohm-m)	Espesor (m)	Tope (m)	Interpretación
	3	30	23	2,2	Arenas saturadas intercaladas con limos y arcillas pobremente saturados
	4	350	122	25,5	Areniscas saturadas de la Formación Caja
MEDIDA TOTAL (m)			147,2 m		

Fuente: Elaboración propia, 2018

Se interpretaron cuatro (4) niveles de diferentes resistividades para el modelo del SEV-2. La información se encuentra resumida en la Tabla 8-4. La primera capa corresponde a suelo con una resistividad de 365 Ohm-m y espesor de 0,7 metros. La capa (2) con un espesor de 1,5 metros, tope a los 0,7 m y resistividad de 90 Ohm-m, corresponde a y Arenas saturadas. La siguiente capa (3) identificada en este modelo corresponde a Arenas saturadas intercaladas con limos y arcillas pobremente saturados con resistividad de 30 Ohm-m, tope a los 2,2 m y espesor de 23 metros; La siguiente capa corresponde a Areniscas saturadas de la Formación Caja superior (4) con resistividad de 350 Ohm-m, tope a los 25,5 m y espesor de 122 metros.

Esto muestra que los Depósitos de Llanura de Inundación donde se realizó el Sondeo eléctrico vertical presenta un espesor de 2,2 metros. El espesor restante de 145 metros corresponde a los Depósitos de Llanura Aluvial (22 metros) y las rocas consolidadas de la Formación Caja Superior (122 metros).

8.3.3 SEV 3

El Sev3 fue realizado sobre el Acuífero de Depósitos de Llanura Aluvial, en la vía que conduce del centro poblado de Puerto Caldas hacia el casco urbano de Granada Meta. Las coordenadas de ubicación son Este: 1038463, Norte: 876847 origen Bogotá; longitud AB: 400 metros con dirección N30E (**Fotografía 8-10** y **Fotografía 8-11**).



Fotografía 8-10 Sondeo eléctrico vertical N° 3 Vía Puerto Caldas-Casco urbano Granada-Meta



Fotografía 8-11 Sondeo eléctrico vertical N° 3 vía Puerto Caldas-Casco urbano de Granada-Meta

Las capas interpretadas dentro del SEV 3, se presentan en la Tabla 8-5.

Tabla 8-5. Interpretación Sondeo Eléctrico Vertical N° 3

SEV	CAPA	RESISTIVIDAD (Ohm-m)	Espesor (m)	Tope (m)	Interpretación
SEV-3	1	45	3,5	0	Arenas saturadas intercaladas con limos y arcillas pobremente saturados
	2	110	15	3,5	Gravas y arenas saturadas

SEV	CAPA	RESISTIVIDAD (Ohm-m)	Espesor (m)	Tope (m)	Interpretación
	3	18	6	18,5	Arcillas y limos pobremente saturados
	4	350	130	24,5	Areniscas saturadas de la Formación Caja
MEDIDA TOTAL (m)			154,5 m		

Fuente: Elaboración propia, 2018

Se interpretaron cuatro (4) niveles de diferentes resistividades para el modelo del SEV-3. La información se encuentra resumida en la Tabla 8-5. La primera capa corresponde a Arenas saturadas intercaladas con limos y arcillas pobremente saturados con una resistividad de 45 Ohm-m y espesor de 3,5 metros. La capa (2) con un espesor de 15 metros, tope a los 3,5 m y resistividad de 110 Ohm-m, corresponde a Gravas y Arenas saturadas. La siguiente capa (3) identificada en este modelo corresponde a Arcillas y limos pobremente saturados con resistividad de 18 Ohm-m, tope a los 18,5 m y espesor de 6 metros; La siguiente capa corresponde a Areniscas saturadas de la Formación Caja superior (4) con resistividad de 350 Ohm-m, tope a los 24,5 m y espesor de 130 metros.

Esto muestra que los Depósitos de Llanura Aluvial donde se realizó el Sondeo eléctrico vertical presenta un espesor de 24,5 metros. El espesor restante de 130 metros corresponde a rocas consolidada pertenecientes a las areniscas saturadas de la Formación Caja.

8.3.4 SEV 4

El Sev4 fue realizado sobre el Acuífero de Depósitos de Llanura Aluvial, sobre una vía veredal. Las coordenadas de ubicación son Este: 1039883, Norte: 875914 origen Bogotá; longitud AB: 400 metros con dirección N10E (Fotografía 8-12 y Fotografía 8-13).



Fotografía 8-12 Sondeo eléctrico vertical N° 4 vía veredal



Fotografía 8-13 Sondeo eléctrico vertical N° 4 vía veredal

Las capas interpretadas dentro del SEV 4, se presentan en la Tabla 8-6

Tabla 8-6. Interpretación Sondeo Eléctrico Vertical N° 4

SEV	CAPA	RESISTIVIDAD (Ohm-m)	Espesor (m)	Tope (m)	Interpretación
SEV-4	1	39	4,0	0	Arenas saturadas intercaladas con limos y arcillas pobremente saturados
	2	100	22	4	Gravas y arenas saturadas

SEV	CAPA	RESISTIVIDAD (Ohm-m)	Espesor (m)	Tope (m)	Interpretación
	3	13	2	26	Arcillas y limos pobremente saturados
	4	400	135	28	Areniscas saturadas de la Formación Caja
MEDIDA TOTAL (m)			163 m		

Fuente: Elaboración propia, 2018

Se interpretaron cuatro (4) niveles de diferentes resistividades para el modelo del SEV-4. La información se encuentra resumida en la Tabla 8-6. La primera capa corresponde a suelo con una resistividad de 39 Ohm-m y espesor de 4 metros. La capa (2) con un espesor de 22 metros, tope a los 4 m y resistividad de 100 Ohm-m, corresponde a Gravas y Arenas saturadas. La siguiente capa (3) identificada en este modelo corresponde a Arcillas y limos pobremente saturados pobremente con resistividad de 13 Ohm-m, tope a los 26 m y espesor de 2 metros; La siguiente capa corresponde a Areniscas saturadas de la Formación Caja superior (4) con resistividad de 400 Ohm-m, tope a los 28 m y espesor de 135 metros.

Esto muestra que los Depósitos de Llanura Aluvial donde se realizó el Sondeo eléctrico vertical presenta un espesor de 2,2 metros. El espesor restante de 163 metros corresponde a los Depósitos de Llanura Aluvial (26 metros) y las rocas consolidadas de la Formación Caja Superior (135 metros).

8.4 PRUEBAS DE BOMBEO

Los ensayos o pruebas de bombeo son utilizados para determinar propiedades hidráulicas de los acuíferos y consisten en la extracción de agua de pozos o aljibes por un tiempo determinado, bien

sea a caudal constante o variable, monitoreando la evolución del nivel del agua en el pozo de bombeo y de ser posible también el de pozos cercanos. Una vez cesa el bombeo los datos de recuperación de los niveles de agua igualmente son registrados y utilizados en el análisis¹⁹. Respecto al acuífero, los ensayos de bombeo pueden suministrar datos sobre su Transmisividad (T), Coeficiente de almacenamiento (S) y Conductividad hidráulica (K) de capas acuíferas y capas semi-confinantes. La interpretación cualitativa de las curvas generadas en los ensayos (curvas de tiempo-abatimiento) también pueden indicar la existencia de barreras y bordes impermeables cercanos, zonas de recarga, etc. Adicionalmente, estas pruebas pueden suministrar información acerca de la productividad del pozo que está siendo bombeado.

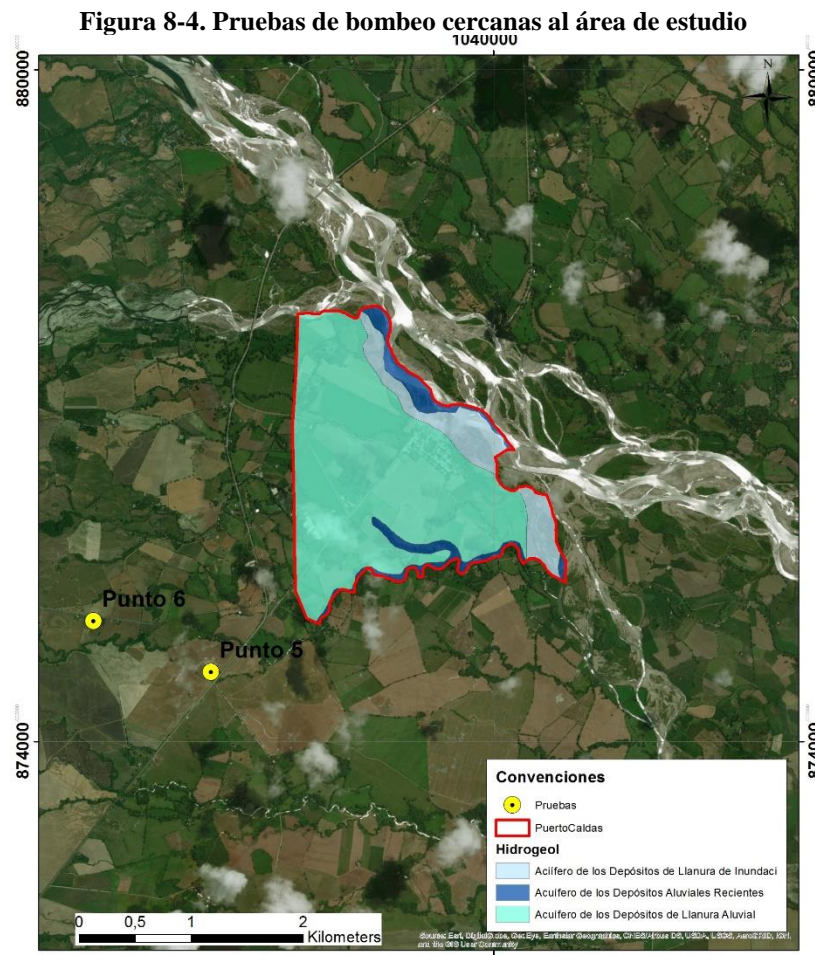
Los métodos de recuperación consisten en efectuar las interpretaciones de la prueba con base en los datos que se obtienen una vez se detiene el bombeo. A partir de este momento, los niveles empiezan a subir, hasta recuperar total o parcialmente el nivel inicial. Los ensayos de recuperación, permiten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

Con el fin de determinar parámetros hidráulicos como Conductividad Hidráulica (K) (mide la facilidad que un acuífero ofrece a ser atravesado por un fluido), Transmisividad (T) (indica la facilidad del agua para circular horizontalmente por una formación acuífera), Capacidad específica (Ce) (se reduce como la relación del caudal extraído de un pozo dividido por el abatimiento que produce dicho bombeo), Coeficiente de almacenamiento (S) (describe el volumen de agua que un acuífero puede almacenar y ceder después); se revisaron las pruebas de bombeo realizadas en el marco del desarrollo del POMCA del río Ariari (2016).

¹⁹ PLAN DE ORDENAMIENTO Y MANEJO DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA (POMCA) DEL RÍO ARIARI. 2016.

8.4.1 PRUEBAS DE BOMBEO REVISADAS

Dentro del documento de POMCA del río Ariari 2016, se presentan un total de siete (7) pruebas de bombeo, efectuadas sobre las unidades hidrogeológicas de Acuífero Formación Caja Superior, Acuífero de los Depósitos de Llanura Aluvial, y Acuífero de los Depósitos de Abanico Aluvial, este último no aflora dentro del Centro Poblado de Puerto Caldas. La localización de las pruebas de bombeo se presenta en la Figura 8-4. Las pruebas de bombeo número 5 y número 6 (según enumeración del POMCA del río Ariari, 2016), son las pruebas más cercanas respecto al área de estudio.



Fuente: Elaboración propia, 2018

La prueba de bombeo número 5 revisada en dicho estudio fue ejecutada en un pozo de 8 metros de profundidad, que capta del acuífero de los Depósitos de Llanura Aluvial. Las transmisividades (T) obtenidas son de 374 y 590 m²/d, para una conductividad hidráulica de 103,4 m/día en los niveles captados, correspondiente a permeabilidades muy altas; la capacidad específica es de 1,4 l/s/m, valores asociados a productividades medias.

La sexta prueba de bombeo revisada en dicho estudio fue ejecutada en un aljibe de 7 metros de profundidad, que capta del acuífero de los Depósitos de Llanura Aluvial. Las transmisividades (T) obtenidas, son de 10,1 y 10,2 m²/día, para una conductividad hidráulica de 52,7 m/día, correspondiente a valores de permeabilidad altos; su capacidad específica de 0,26 l/s/m, valores asociados a productividades bajas.

La prueba de bombeo sobre la Formación Caja Superior presentada en dicho estudio se ejecutó en un pozo de 199 metros de profundidad, ubicado dentro de una plataforma petrolera (por fuera del área de estudio). Se obtuvo un coeficiente de almacenamiento de 8,36E-5, denotándolo como un acuífero de tipo confinado de forma coherente con la derivativa. La transmisividad (T) en las pruebas de bombeo y recuperación es de 67,3 y 42,1 m²/día respectivamente, para un promedio de 54,7 m²/día. La conductividad hidráulica (K) promedio varía entre 1,87 y 1,17 m/día correlacionable con una permeabilidad baja. La capacidad específica obtenida es de 0,6 l/s/m, indicando un acuífero de baja productividad, coincidiendo con el valor promedio de la transmisividad.

Una vez revisadas las pruebas de bombeo ejecutadas durante el desarrollo del POMCA del río Ariari (2016), es posible determinar que para el Acuífero de la Formación Caja Superior se tienen los siguientes parámetros hidráulicos; transmisividades (T) bajas que varían entre 16,1 y 86,4 m²/día; conductividades hidráulicas (K) entre 1,17 y 1,87 m/día, asociadas a permeabilidades bajas; capacidad específica (Ce) entre 0,31 y 0,6 l/m/s, correspondiente a acuíferos de baja productividad y coeficientes de almacenamiento (S) entre 3,10 E-3 y 8,36 E-5. Se considera que el acuífero es de mediana a baja productividad y de tipo confinado a semiconfinado, aunque los

horizontes más superficiales que se encuentran aflorando deben comportarse como acuíferos libres.

Por su parte los Acuíferos de los Depósitos de Llanura Aluvial, presentan transmisividades (T) entre 10,1 y 590 m²/día, conductividades hidráulicas entre 60 y 103,4 m/día y capacidades específicas entre 0,26 y 1,4 l/s/m, aunque las capacidades específicas son bajas a medias, se considera que el acuífero es predominantemente de baja productividad, limitado por su espesor; en algunos sectores se espera que esté en conexión hidráulica con los drenajes más cercanos.

Finalmente para el Acuífero de los Depósitos Aluviales Recientes no es posible determinar parámetros de Transmisividad, Capacidad específica, Conductividad hidráulica, debido a que por el espesor que muestran estos acuíferos no son aprovechados por la comunidad.

8.5 ESTABLECIMIENTO DE ZONAS DE RECARGA Y DESCARGA

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, 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) 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, la zona en donde ocurre este proceso se define como el área o zona de recarga (Matus, 2007).

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, 2001).

8.5.1 Delimitación de las zonas de recarga potencial

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, 2010). 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 potencial, se presentan categorizadas como altas, medias o bajas.

Para establecer la zonas de recarga y descarga dentro del área de 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 utilizadas 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: pendiente del terreno, tipo de suelo, tipo de roca, cobertura vegetal y uso del suelo. Cada una de estas variables es discretizada en rangos, a los cuales se les asigna un valor de 1 a 5 dependiendo de su potencial para contribuir a la recarga, siendo 5 el potencial “muy alto” y 1 “muy bajo”.

A cada factor se le establece un peso relativo, que se ajustan de acuerdo a las características del área de estudio posteriormente se suman estos factores mediante la siguiente ecuación

$$ZR = (0,12 * Pendiente) + (0,23 * Tipo suelo) + (0,2712 * Tipo de roca) + (0,25 * Cobertura vegetal) + (0,13 * Uso del suelo).$$

Los resultados obtenidos determinan el potencial de recarga para el área de estudio según su valor, como se muestra en la Tabla 8-7.

Tabla 8-7. Valoración del potencial de recarga.

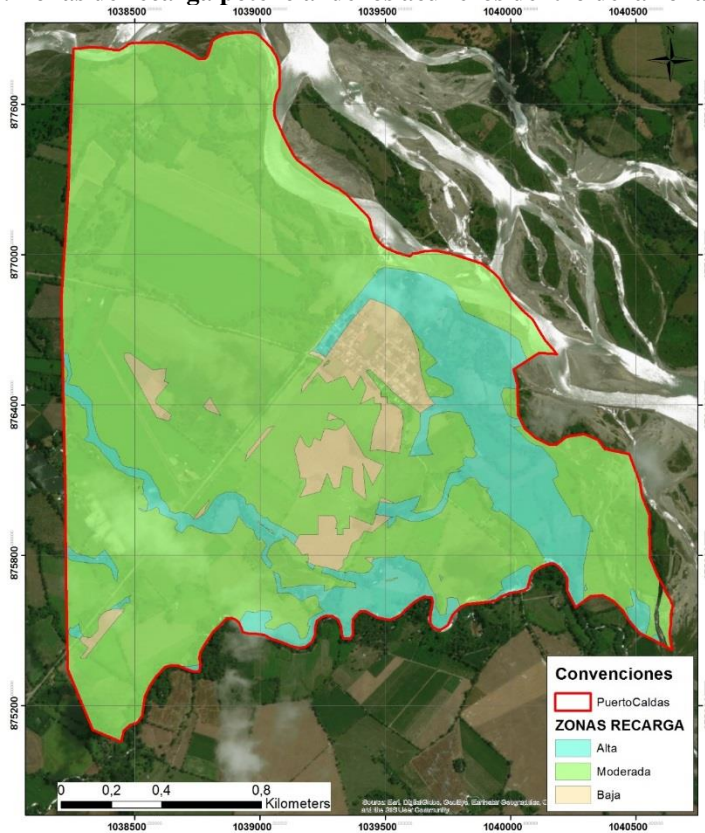
Potencial de recarga	Valor resultante
Muy alta	4,1 – 5,0
Alta	3,5 – 4,09
Moderada	2,6 – 3,49
Baja	2,0 – 2,59
Muy baja	0,75 -1,99

Fuente: Tomado de Silva, M. (2007).

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. La ponderación de cada una de las variables utilizadas para el establecimiento de las zonas de recarga se puede consultar en el **ANEXO 2-Zonas de Recarga**

Como resultado de la zonificación de las áreas de recarga potencial se obtuvo que el área de estudio tiene un potencial de recarga que varía entre bajo a alto, predominando el potencial de recarga moderado. Las zonas de recarga potencial moderada se encuentra influenciada por las pendientes planas, asociados a los depósitos cuaternarios, en texturas de suelos fina y franca fina (conglomerados, arenas, limos y arcillas), sobre los cuales se disponen pastos, cultivos permanentes y transitorios. La distribución de las zonas de recarga dentro del área de estudio se presentan en la Figura 8-5

Figura 8-5. Zonas de recarga potencial de los acuíferos dentro de la zona de estudio



Fuente: Elaboración propia, 2018

8.6 DIRECCIONES DE FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA

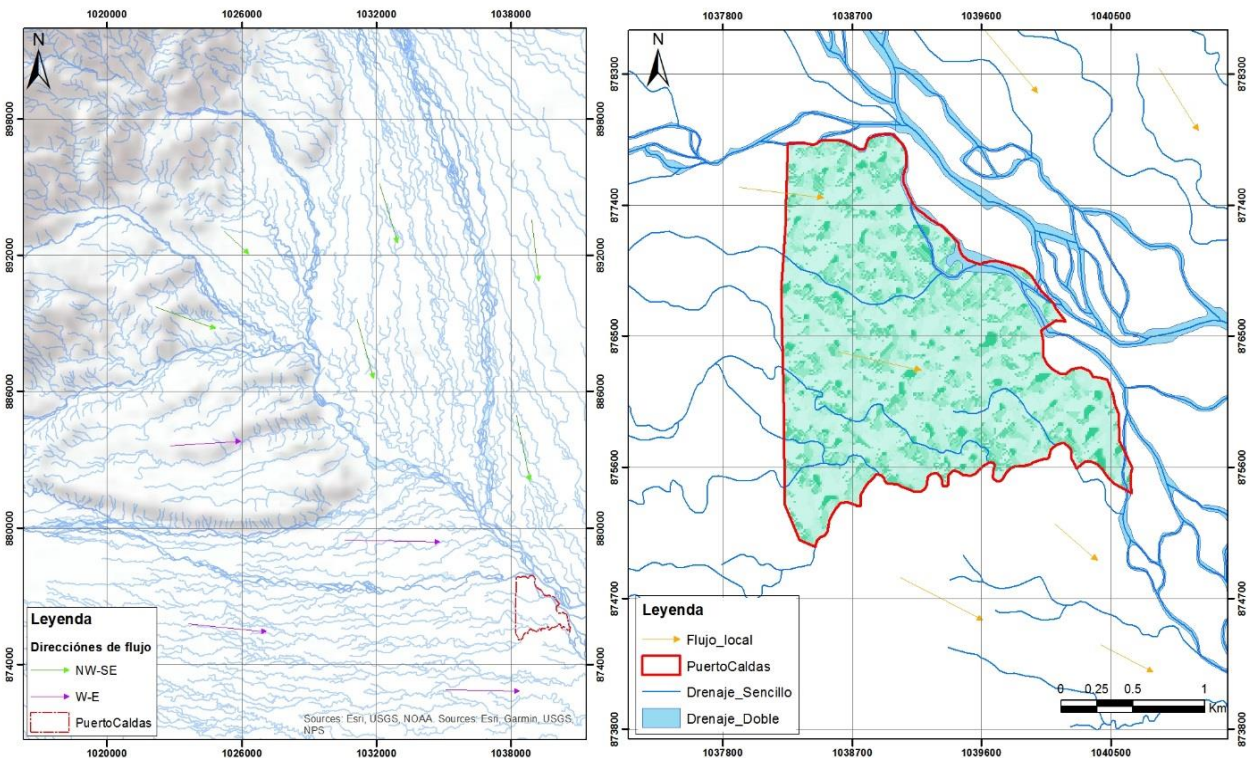
Para la determinación de las direcciones de flujo de agua subterránea dentro del área de estudio, se analizó el inventario de puntos de agua subterránea realizado dentro del Centro Poblado de Puerto Caldas, así como el inventario de puntos de agua subterránea presentado dentro del estudio del POMCA del río Ariari, 2016. Esta información fue complementada con el Modelo de Elevación del Terreno (DEM) elaborado para el presente estudio.

La metodología utilizada para el establecimiento de las direcciones de flujo de agua subterránea consistió en establecer las cotas de los pozos y aljibes (restándole la profundidad del nivel de la tabla de agua), obteniéndose así la elevación de la superficie piezométrica.

La caracterización del flujo subterráneo somero o local, que fluye a través de los niveles más superficiales del acuífero de la Formación Caja Superior y de los acuíferos Cuaternarios, se realizó con base en la cota de elevación del nivel de la tabla de agua de la mayoría de aljibes y de los pozos con menos de 20 m de profundidad.

Las direcciones de flujo somero se observa que en general siguen la topografía del área, que aunque sea plana en algunos sectores de la cuenca, en general converge hacia el río Ariari. Las zonas más elevadas topográficamente, se encuentran hacia el extremo occidental del área de estudio y las zonas más bajas hacia el oriente, estando la tendencia regional del flujo somero en dirección NW-SE, con notables variaciones locales (Figura 8-6).

Figura 8-6. Direcciones de flujo regionales (izquierda) y locales (derecha)



Fuente: Elaboración propia, 2018

8.7 VULNERABILIDAD A LA CONTAMINACIÓN

Foster (1991) establece el término vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación, para representar las características intrínsecas que determinan la susceptibilidad de un acuífero a ser adversamente afectado por una carga contaminante; ésta establece la facilidad con la cual ingresan las sustancias que pueden degradar la calidad del agua subterránea, mediante infiltración a través del suelo y la zona no saturada; Zaporozec (2002) la define como una propiedad intrínseca del sistema de agua subterránea que depende de la sensibilidad del mismo a los impactos humanos y/o naturales.

Para estimar la vulnerabilidad existen diferentes métodos, de los cuales pueden mencionarse: 1) métodos de índice y superposición, los cuales evalúan la vulnerabilidad de manera cualitativa y relativa; 2) los modelos de simulación, que cuantifican el tiempo de viaje de la sustancia hasta la superficie del agua y requieren gran cantidad de información y 3) los modelos estadísticos, donde la vulnerabilidad se expresa como una probabilidad a la contaminación.

Dentro de los métodos paramétricos (de superposición e índices), se distinguen: a) los métodos de matriz, que utilizan parámetros muy seleccionados y solo tiene aplicabilidad local; b) los métodos de puntuación, en los que cada parámetro está dividido en clases a las que se les atribuye una puntuación, la metodología más destacada es GOD; c) también existen métodos de puntuación y ponderación, en los que además de asignar una puntuación para cada parámetro, este es multiplicado por un factor ponderador, entre ellos se destaca el método DRASTIC, y d) los métodos de relaciones antagónicas (MAVDT, 2010).

Para la determinación y mapeo de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación en el área de estudio, y de acuerdo a la información disponible, se seleccionó el método GOD propuesto por Foster (1987), en CEPIS (1991), el cual corresponde a un método de índice y superposición, que ofrece claridad conceptual y simplicidad de aplicación y que es el único que contempla tangencialmente el tipo de acuífero en lo referente a su comportamiento hidráulico y grado de consolidación.

Esta metodología sugiere que la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación 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 comprenden la zona no saturada.

8.7.1 Metodología para la determinación de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación por el método GOD

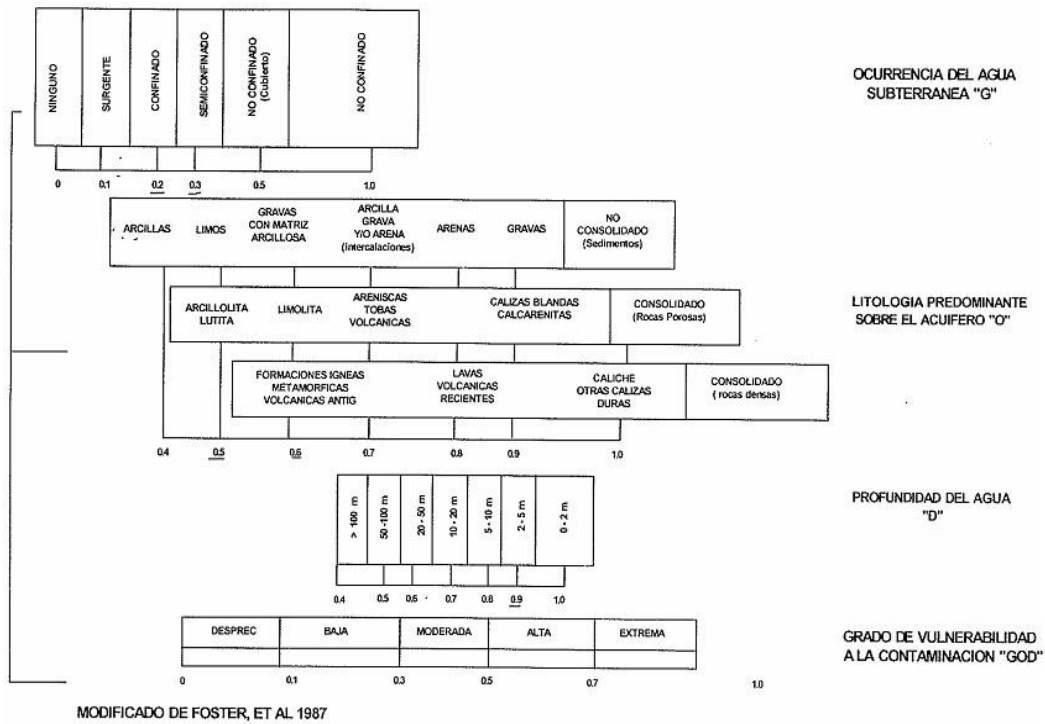
El método “GOD” permite evaluar áreas con escasa información, con regular distribución de datos y con incertidumbre de los mismos y considera los siguientes parámetros de evaluación:

- 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.

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 se muestran en la Figura 8-7

Figura 8-7. Sistema de indexación GOD para la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación.



Fuente: Foster (1991)

Por tanto se definen las siguientes categorías de vulnerabilidad de acuerdo con el método de indexación GOD, como se presentan en la Tabla 8-8

Tabla 8-8. Clasificación de la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación, método GOD

Categoría de vulnerabilidad	Índice	Definición
Acuíferos con Vulnerabilidad Extrema	Entre 0,7 y 1,0	Se consideran susceptibles a la mayoría de contaminantes y con impacto relativamente rápido.
Acuíferos con Vulnerabilidad Alta	Entre 0,5 y 0,7	Son vulnerables a muchos contaminantes, excepto a los absorbibles y/o fácilmente transformables
Acuíferos con Vulnerabilidad Moderada	Entre 0,3 y 0,5	Son vulnerables a mediano plazo a la mayoría de contaminantes.
Acuíferos con Vulnerabilidad Baja	Entre 0,1 y 0,3	Son vulnerables a largo plazo a contaminantes persistentes.
Acuíferos con Despreciable Vulnerabilidad	Entre 0 y 0,1	Las capas confinantes no permiten un flujo significativo hacia el acuífero.

Fuente: MAVDT, 2010

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.

8.7.2 Zonificación del grado de vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación

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 la Tabla 8-9 se muestra la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación para el área de estudio. De acuerdo con el análisis realizado se presenta una vulnerabilidad desde moderada hasta baja. La Vulnerabilidad baja se asocia con los Depósitos de Llanura de Inundación, debido a que por sus características litológicas se comportan como un acuífero de tipo libre cubierto. Estas zonas son vulnerables a largo plazo a contaminantes persistentes. La Vulnerabilidad moderada se asocia con los Depósitos de Llanura Aluvial y los Depósitos Aluviales Recientes, los cuales se comportan como un acuífero de tipo

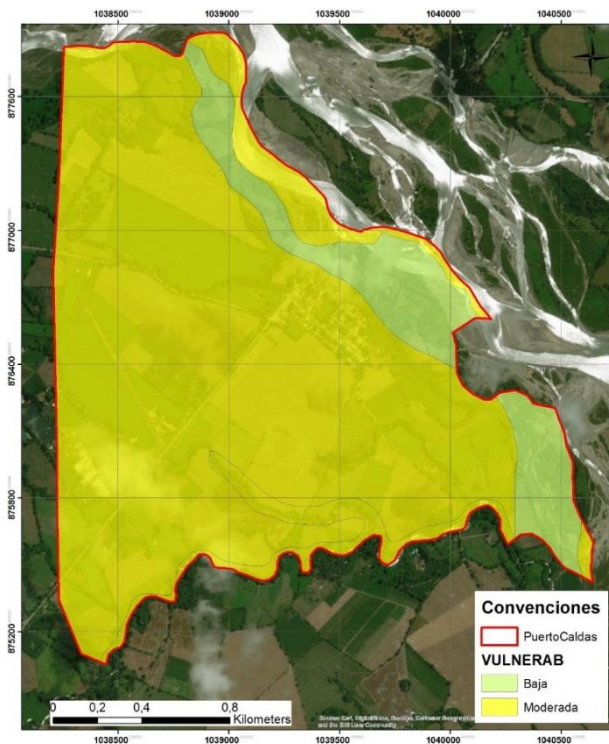
libre, en donde el nivel de la tabla de agua varía desde la superficie hasta los 10 m de profundidad. Estas zonas podrían ser vulnerables a mediano plazo a la mayoría de contaminantes. La vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos se presenta en la Figura 8-8

Tabla 8-9. Grado de vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación

Grado de vulnerabilidad	Definición	Unidad Hidrogeológica
Alta	Vulnerables a muchos contaminantes, excepto a los absorbibles y/o fácilmente transformables	
Moderada	Vulnerables a mediano plazo a la mayoría de contaminantes.	Depósitos de Llanura Aluvial. Depósitos Aluviales Recientes
Baja	Vulnerables a largo plazo a contaminantes persistentes.	Depósitos de Llanura de Inundación
Despreciable	Las capas confinantes no permiten un flujo significativo hacia el acuífero.	

Fuente: Elaboración propia, 2018

Figura 8-8. Vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos



Fuente: Elaboración propia, 2018

9 ANÁLISIS DE RESULTADOS: MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL

El modelo hidrogeológico conceptual corresponde a una descripción física cualitativa de cómo se comporta el sistema hidrogeológico de una zona determinada (POMCA, 2016). Los modelos hidrogeológicos conceptuales son representaciones en dos o tres dimensiones de las condiciones estáticas y dinámicas de sistemas hidrogeológicos. Esta representación incluye la geometría de los acuíferos, delimitación de unidades hidrogeológicas de acuerdo con sus posibilidades de almacenar y transmitir agua, características hidráulicas de los acuíferos, posición de los niveles piezométricos, condiciones del flujo de las aguas subterráneas y su relación con los componentes del ciclo hidrológico y delimitación de zonas de recarga, tránsito y descarga. En términos generales, sintetiza las condiciones básicas del estado y dinámica de las aguas subterránea en el subsuelo y sus relaciones con los cuerpos de agua superficial y los aportes atmosféricos.²⁰

En términos generales el Centro Poblado de Puerto Caldas se localiza dentro de la denominada provincia hidrogeológica de la Orinoquía. Geológicamente dicha provincia se encuentra dentro de la cuenca sedimentaria de los Llanos Orientales, la cual representa una espesa secuencia de rocas sedimentarias y depósitos cuaternarios depositada durante el Cretácico y Cuaternario. Esta zona presenta gran relevancia desde el punto de vista hidrogeológico, con rocas terciarias y sedimentos cuaternarios, que conforman acuíferos por porosidad primaria, destacándose en superficie los Acuíferos de depósitos cuaternarios y a profundidad el Acuífero de la Formación Caja Superior.

El acuífero de la Formación Caja Superior es el más importante de la zona de estudio (aunque no aflora en superficie dentro del área de estudio), debido a sus características litológicas, continuidad lateral y espesor. Está constituido por intercalaciones de areniscas, conglomerados, limolitas y arcillolitas, depositados en un ambiente fluvial de alta energía, con un espesor promedio estimado de 120 m (a partir de los sondeos eléctricos verticales). Conforman un acuífero por porosidad

²⁰ IDEAM. Modelos hidrogeológicos conceptuales. 2018.

primaria, continuo, multicapa y de extensión regional, con transmisividades (T) que varían entre 16,1 y 86,4 m²/día, capacidades específicas (Ce) en el sitio entre 0,31 y 0,6 l/s/m y pozos con producciones de hasta 25 l/s, lo cual indica que el acuífero es de baja a mediana productividad, los niveles arcillo-limosos conforman niveles confinantes. La conductividad hidráulica (K) varía entre 1,17 y 1,87 m/día, asociada a permeabilidades bajas y el coeficiente de almacenamiento (S) varía desde 3,10E-3 y 8,36 E-5, denotándolo como un acuífero de tipo confinado a semiconfinado.

Los Depósitos de Llanura Aluvial están constituidos principalmente por sedimentos limo-arcillosos y arenas arcillosas de grano fino a medio; conforman acuíferos locales a semiregionales, con moderada permeabilidad y de porosidad primaria. Su espesor se estima en 27 m (a partir de los sondeos eléctricos verticales realizados). Presentan conductividades hidráulicas entre 60 y 103,4 m/día y capacidades específicas (Ce) entre 0,26 y 1,4 l/s/m, que lo ubica entre baja a media productividad, pero por su espesor limitado, se considera que es principalmente de baja productividad.

Los Depósitos de Llanura de Inundación, se componen de intercalaciones de limos y arenas de grano fino y muy fino, se estima que pueden alcanzar un espesor alrededor de 2,50 m (a partir de los sondeos eléctricos verticales realizados). Conforman acuíferos locales, por porosidad primaria, con limitada extensión y espesor, aunque se desconocen sus parámetros hidráulicos, se consideran por su litología de baja productividad y de tipo libre a libre cubierto.

Los Depósitos Aluviales Recientes, están constituidos por clastos de todos los tamaños, desde bloques hasta sedimentos de tamaño limo y arcilla; se estima que su espesor puede estar entre 3 y 4 m (medidos a partir de los sondeos eléctrico verticales realizados dentro del área de estudio).

Dentro del Centro Poblado de Puerto Caldas se tiene un pozo de agua subterránea, el cual abastece a toda la comunidad. Tiene una profundidad de 65 metros, captando del Acuífero de la Formación Caja Superior.

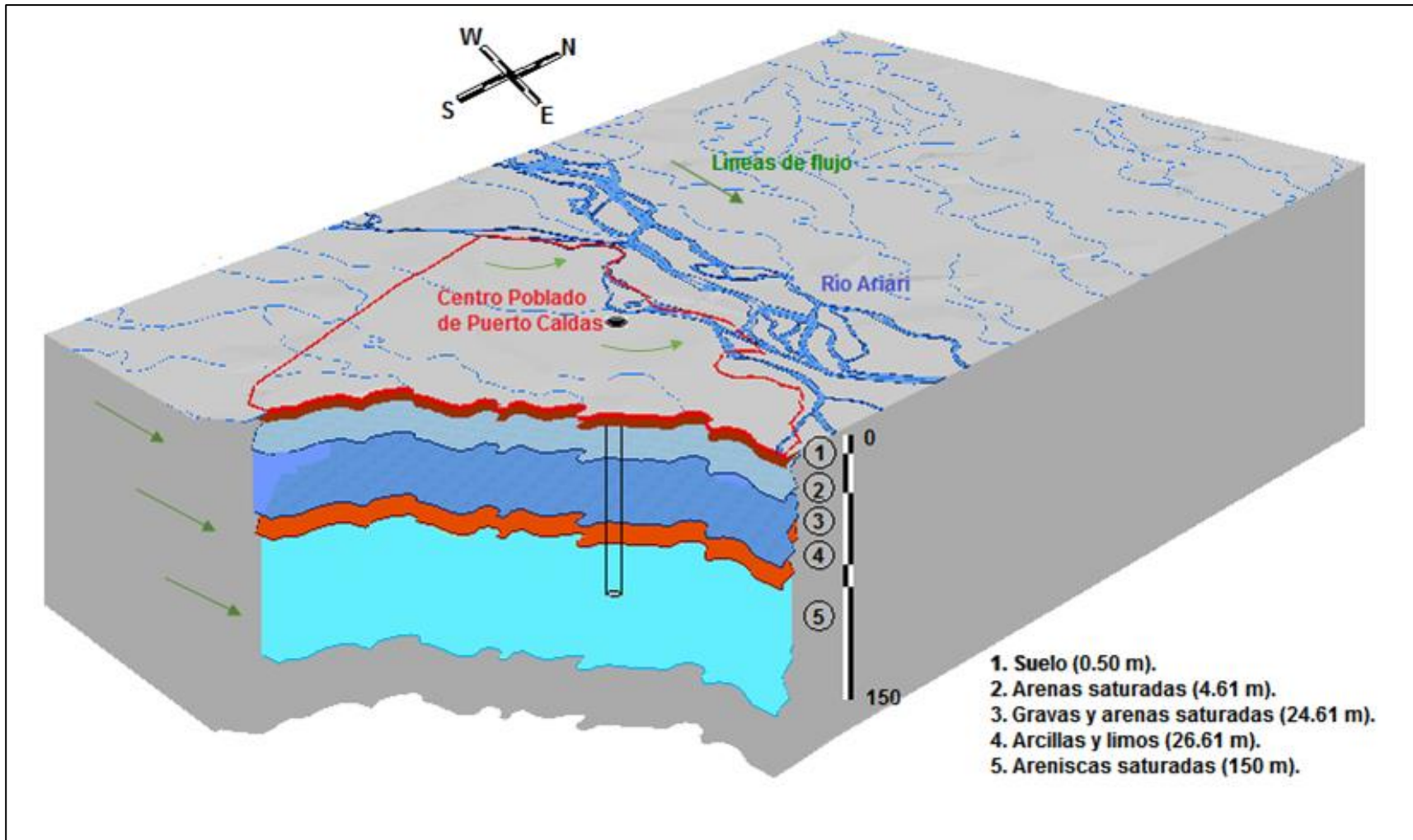
Los flujos someros o locales de agua subterránea siguen de manera general la topografía del área, y confluyen hacia el río Ariari. Los flujos intermedios siguen la tendencia regional NW-SE, en la misma dirección del río Ariari, pero sin variaciones locales.

La recarga hacia los acuíferos cuaternarios se daría directamente por la precipitación en periodo lluvioso, es posible que también se presenten aportes de los drenajes especialmente en periodos climáticos lluviosos, la recarga de los niveles más someros del acuífero de la Formación Caja Superior, se daría por infiltración directa en las áreas de afloramiento de sus niveles más permeables y hacia los niveles inmediatamente inferiores, por goteo y desde los acuíferos cuaternarios suprayacentes.

Finalmente la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación es principalmente moderada, asociada a los Depósitos de Llanura Aluvial y Depósitos Aluviales Recientes. La vulnerabilidad baja se encuentra asociada a los niveles arcillosos de los Depósitos de Llanura de Inundación.

En la Figura 9.1 se presenta un esquema del modelo hidrogeológico conceptual dentro del área de estudio.

Figura 9-1. Modelo hidrogeológico conceptual para el área de estudio



Fuente: Elaboración propia, 2018

10 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El Centro Poblado de Puerto Caldas se localiza dentro del municipio de Granada Meta sobre Depósitos Cuaternarios asociados a la actividad de los afluentes principales como el río Ariari y el río Cubillera, los cuales han depositado los materiales provenientes de la Cordillera Oriental. Dentro de los Depósitos Cuaternarios fueron diferenciadas tres (3) unidades geológicas denominadas como: Depósitos de Llanura Aluvial, Depósitos de Llanura de Inundación y Depósitos Aluviales Recientes, cada una de las cuales presentan características litológicas, hidrogeológicas y morfológicas que las diferencian entre sí.

Las unidades geológicas definidas dentro del área de estudio presentan características hidrogeológicas referentes a sistemas de acuíferos discontinuos de extensión local, conformados por sedimentos cuaternarios no consolidados, generados en un ambiente fluvial, que constituyen acuíferos principalmente de tipo libre y libre cubierto. Las unidades hidrogeológicas definidas corresponden a Acuífero de Depósitos de Llanura Aluvial, Acuífero de Depósitos de Llanura de Inundación y Acuífero de Depósitos Aluviales Recientes. El Acuífero de Depósitos de Llanura Aluvial corresponde a la unidad hidrogeológica más importante dentro del área de estudio, la cual almacena aguas dulces recomendables para cualquier uso.

De acuerdo con la prospección geoelectrica realizada para el desarrollo del presente estudio, es posible determinar que el Acuífero de Depósitos de Llanura Aluvial (unidad hidrogeológica más importante dentro del área de estudio), tiene un espesor que oscila entre los 24,5 a 27 metros constituido por capas de Arenas saturadas intercaladas con limos y arcillas pobremente saturados, Gravas y arenas saturadas y Arcillas y limos pobremente saturados. Por su parte el Acuífero de Depósitos de Llanura de Inundación tiene un espesor de 2,2 metros constituido por arenas saturadas. El Acuífero de Depósitos Aluviales Recientes presenta un espesor variable asociado con la dinámica del río Ariari, dicho espesor no supera los 2 metros.

El inventario de puntos de agua subterránea realizado dentro del área de estudio pudo establecer que el Centro Poblado de Puerto Caldas tiene un pozo de agua que abastece a toda la comunidad. Dicho pozo tiene una profundidad de 65 metros, captando agua del acuífero de la Formación Caja Superior. Este pozo de agua en ocasiones es insuficiente para abastecer a la comunidad del Centro Poblado de Puerto Caldas.

La evaluación de vulnerabilidad a la contaminación por el método GOD determina una vulnerabilidad desde moderada hasta baja para el área de estudio. La Vulnerabilidad baja se asocia con los Depósitos de Llanura de Inundación, debido a que por sus características litológicas se comportan como un acuífero de tipo libre cubierto; estas zonas son vulnerables a largo plazo a contaminantes persistentes. La Vulnerabilidad moderada se asocia con los Depósitos de Llanura Aluvial y los Depósitos Aluviales Recientes, los cuales se comportan como un acuífero de tipo libre, en donde el nivel de la tabla de agua varía desde la superficie hasta los 10 m de profundidad. Estas zonas podrían ser vulnerables a mediano plazo a la mayoría de contaminantes.

BIBLIOGRAFÍA

BUESO & CAMPOS, M. 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. Proyecto FODECYT No. 046-2009. 2010.

CARVAJAL, J. Propuesta de Estandarización de la Cartografía Geomorfológica en Colombia. Instituto Colombiano de Geología y Minería – INGEOMINAS, Bogotá D.C., 2011.

CEPIS-OPS. Determinación de los Riesgos de Contaminación de las Aguas Subterráneas, Una Metodología basada en datos existentes. 1991.

CUSTODIO, E., LLAMAS M.R. Hidrología Subterránea, Segunda Edición. Barcelona: ediciones Omega. 2001. P 2290

FOSTER, Stephen e HIRATA, Ricardo. Determinación de los Riesgos de Contaminación de las Aguas Subterráneas, Una Metodología basada en datos existentes. CEPIS-OPS, 1991.

GÓMEZ, Y.; YORIS, F.; RODRÍGUEZ, J.; PORTILLO, F.; ARAUJO, Y. Aspectos hidrodinámicos, estructurales y estratigráficos del Campo Rubiales. Cuenca de los Llanos Orientales, Colombia. Pacific Rubiales Energy. Bogotá D.C. 2009.

INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI (IGAC). Estudio general de suelos y zonificación de tierras del departamento del Meta. 2004.

MAVDT, Viceministerio de ambiente, grupo de recurso hídrico. Propuesta Metodológica para la Evaluación de la Vulnerabilidad Intrínseca de los Acuíferos a la Contaminación, 2010. p. 15.

MATUS, O. Elaboración Participativa de una Metodología para la Identificación de Zonas Potenciales de Recarga Hídrica en Subcuencas Hidrográficas, Aplicada a la Subcuenca del Río

Jucuapa, Matagalpa Nicaragua. Tesis de grado para optar al título de Magister Scientiae en Manejo Integrado de Cuencas Hidrográficas. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza CATIE. Turrialba Costa Rica. 2007. p 247.

PLAN DE ORDENAMIENTO Y MANEJO DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA (POMCA) DEL RÍO ARIARI. 2016.

RODRÍGUEZ, A. Mapa geológico del departamento del Meta, Memoria explicativa. Instituto Colombiano de Geología y Minería – INGEOMINAS, Bogotá, 2001. INSTITUTO COLOMBIANO DE GEOLOGÍA Y MINERÍA-INGEOMINAS. Mapa geológico del departamento del Meta, Memoria explicativa. Bogotá, 2001

SILVA, M. Elaboración participativa de una metodología para la identificación de zonas potenciales de recarga en cuencas hidrográficas, aplicada a la subcuenca del río Jucuapa, Matagalpa, Nicaragua. Tesis de Maestría. 2007.

ZAPOROZEC A. 2002. Groundwater Contamination Inventory. IHP-VI, Series on Groundwater N°2. UNESCO. p. 18.

1. ANEXO 1: DELIMITACIÓN DE ZONAS DE RECARGA

➤ Pendientes

La pendiente del terreno es un factor importante, pues determina el momento de la escorrentía y sus efectos en el suelo, así relieves planos no favorecen la escorrentía del agua y permiten un mayor tiempo de contacto del agua con el suelo ayudando a la infiltración, las altas pendientes aumentan la velocidad de la escorrentía. Las ponderaciones para el área de evaluación se presentan en la Tabla 1-1, junto con el área y porcentaje de cada rango de pendiente.

Tabla 1-1. Ponderación del parámetro “pendiente” Fuente: Tomado de Silva, M. (2007)

Pendiente (%), Silva 2007	Potencial de recarga	Ponderación
0-6	Muy alta	5
6-15	Alta	4
15-45	Moderada	3
45-65	Baja	2
>65	Muy Baja	1

➤ Suelos

Entre las características de los suelos que influyen en la recarga se encuentra la textura, que corresponde a una propiedad básica del suelo y ejerce influencia en 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 el área de evaluación se identificaron cinco (5) clases

texturales de suelo que varían de muy fina a franca gruesa. La categorización según la textura del suelo se presenta en la **Tabla 1-2**, junto con el área y porcentaje.

Tabla 1-2. Ponderación del parámetro “Tipo de suelo”

Clase textural, Silva 2007	Clase textural cuenca	Potencial de recarga	Ponderación
Franco arenoso- arenoso		Muy alta	5
Franco	Franca gruesa	Alta	4
Franco-limoso	Limoso fina	Moderada	3
Franco arcilloso-arenoso- Franco arcilloso	Franca fina	Baja	2
Arcilloso arenoso- arcilloso	Fina y muy fina	Muy baja	1

➤ **Tipo de roca**

Las ponderaciones son asignadas con base en las características de las unidades geológicas, en función de su permeabilidad, a través de las cuales circula el agua con gran facilidad, favoreciendo la recarga de los acuíferos. En la **Tabla 1-3** se presenta la ponderación por unidad geológica, además de las áreas y porcentajes para la zona de evaluación.

Tabla 1-3. Ponderación del parámetro “Tipo de Roca”

Tipo de roca, Silva 2007	Unidad Geológica	Símbolo	Litología	Ponderación	Potencial de recarga
Muy permeables, muy suaves	Depósitos de Cauce Actual y Depósitos Aluviales Recientes	Q2-al (3)	Bloques, clastos, gravas, arenas y limos, dependiendo del sitio dentro de la cuenca, sueltos, de pobre a buena selección.	4,5	Alta a muy alta
Permeables, suaves	Depósitos de Llanura Aluvial	Q2-al (1)	Sedimentos limo-arcillosos y de arenas de grano fino a medio, arcillosas.	4	Alta

➤ **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 las gotas de lluvia, la compactación y la resequedad producto de los rayos del sol, contribuyendo de esta manera a conservar las características del suelo que favorecen la recarga hídrica. La vegetación retarda además el recorrido superficial del agua, que de este modo está más tiempo expuesta a su posible infiltración y las raíces abren conductos en el suelo que facilitan la penetración del agua.

En la **Tabla 1-4** se presenta la ponderación que se le otorga a las coberturas vegetales

Tabla 1-4. Ponderación del parámetro “Cobertura Vegetal” Fuente: Tomado de Silva, M. (2007)

Cobertura (%)	Tipo de cobertura	Potencial de recarga	Ponderación
>80	Bosque denso	Alta a muy alta	4,5
	Bosque denso alto		4,5

Cobertura (%)	Tipo de cobertura	Potencial de recarga	Ponderación
	Bosque denso bajo		4,5
	Bosque de galería y/o ripario		4,5
70-80	Plantación	Alta	4
	Bosque abierto alto/ bajo inundable		4
	Vegetación secundaria o en transición		4
	Vegetación secundaria alta		4
	Vegetación secundaria baja		4
	Bosque abierto		Moderada a alta
	Bosque fragmentado	3,5	
	Bosque fragmentado con vegetación secundaria	3,5	
	Herbazal denso arbolado	3,5	
	Herbazal denso de tierra firme con arbustos	3,5	
	Arbustal	3,5	
50-70	Bosque fragmentado con pastos y cultivos	Moderada	3
	Herbazal		3
	Cultivos permanentes	Baja a moderada	2,5
	Cultivos permanentes herbáceos		2,5
	Plátano y banano/ Papaya		2,5
	Otros cultivos permanentes arbustivos		2,5
	Cacao		2,5
	Cultivos permanentes arbóreos		2,5
	Palma de aceite/Cítricos		2,5
	Pastos limpios		2,5
	Pastos arbolados		2,5

Cobertura (%)	Tipo de cobertura	Potencial de recarga	Ponderación
	Pastos enmalezados		2,5
	Áreas agrícolas heterogéneas		2,5
	Mosaico de cultivos/ Mosaico de pastos y cultivos		2,5
	Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales		2,5
	Mosaico de pastos con espacios naturales		2,5
	Mosaico de cultivos y espacios naturales		2,5
30-50	Arroz/Maíz/Yuca/ Otros cultivos transitorios	Baja	2
	Áreas abiertas, sin o con poca vegetación		2
	Zonas arenosas naturales		2
<30	Red vial, ferroviaria y terrenos asociados	Muy baja	1
	Instalaciones recreativas		1
	Tierras desnudas y degradadas		1
	Zonas quemadas		1
No aplica	Zonas pantanosas	No aplica	-
	Ríos (50 m)		
	Lagunas, lagos y ciénagas naturales		
	Cuerpos de agua artificiales		
	Estanques para acuicultura continental		
	Zonas urbanas		

➤ **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 aumentando la pérdida del suelo por erosión y los riesgos naturales (Forges, citado por Matus, 2007). 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 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 del suelo favoreciendo la evaporación, la compactación y el escurrimiento superficial, como la agricultura intensiva sin obras de conservación de suelo y agua, ganadería extensiva, labranza convencional con excesivo uso de maquinaria, etc.

Tabla 1-5. Ponderación del parámetro “Uso del suelo” Fuente: Tomado de Silva, M. (2007)

Cobertura de la tierra	Uso del suelo	Ponderación	Potencial de recarga
Bosque	Protección	4,5	Alta a muy alta
Plantación	Producción	4	Alta
Arbustal	Protección		
Vegetación secundaria			
Pastos	Pastoreo extensivo	3	Moderada
Mosaico de pastos y cultivos	Sistemas combinados de agricultura, ganadería y forestería		
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales			

Cobertura de la tierra	Uso del suelo	Ponderación	Potencial de recarga
Mosaico de pastos con espacios naturales	Sistemas combinados de ganadería y forestería		
Mosaico de cultivos y espacios naturales	Sistemas combinados de agricultura y forestería		
Herbazal	Pastoreo extensivo		
Arroz/ Maíz	Cultivos transitorios extensivos	2	Baja
Áreas abiertas, sin o con poca vegetación	Pastoreo extensivo		
Cultivos permanentes	Cultivos permanentes semi-intensivos	1,5	Muy baja a baja
Otros cultivos permanentes arbustivos			
Cacao			
Cultivos permanentes arbóreos			
Otros cultivos permanentes arbóreos			
Cítricos			
Zonas arenosas naturales	Protección		
Palma de aceite	Cultivos permanentes intensivos		
Red vial, ferroviaria y terrenos asociados	Infraestructura y transporte	1,0	Muy baja
Instalaciones recreativas	Recreacional, Deportivo o Turístico		
Yuca/Otros cultivos transitorios	Cultivos transitorios intensivos		
Plátano y banano/ Papaya			
Áreas agrícolas heterogéneas/ Mosaico de cultivos			
Tierras desnudas y degradadas	Pastoreo extensivo		
Zonas quemadas			
Zonas pantanosas	Protección	-	-

Cobertura de la tierra	Uso del suelo	Ponde- ración	Potencial de recarga
Ríos (50 m)			
Lagunas, lagos y ciénagas naturales			
Cuerpos de agua artificiales			
Estanques para acuicultura continental	Industrial		
Zonas urbanas	Residencial		