

**AUNAR ESFUERZOS TÉCNICOS, ADMINISTRATIVOS Y FINANCIEROS ENTRE LA
UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA Y LA CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CALDAS
(CORPOCALDAS) PARA ELABORAR UNA GUÍA METODOLÓGICA PARA EL
TRATAMIENTO TERCIARIO DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS EN ÁREAS
RURALES, ORIENTADA A LA PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN
ZONAS DE ESPECIAL INTERÉS HIDROGEOLÓGICO; EN EL DEPARTAMENTO DE
CALDAS**

CONVENIO NÚMERO 135 DE 2022
Universidad de Antioquia – CORPOCALDAS

INFORME FINAL



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**
Facultad de Ingeniería



**GRUPO DE INGENIERÍA Y GESTIÓN AMBIENTAL (GIGA)
ESCUELA AMBIENTAL, FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA
MEDELLÍN, JULIO DE 2023**



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**
Facultad de Ingeniería

AUNAR ESFUERZOS TÉCNICOS, ADMINISTRATIVOS Y FINANCIEROS ENTRE LA UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA Y LA CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CALDAS (CORPOCALDAS) PARA ELABORAR UNA GUÍA METODOLÓGICA PARA EL TRATAMIENTO Terciario DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS EN ÁREAS RURALES, ORIENTADA A LA PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN ZONAS DE ESPECIAL INTERÉS HIDROGEOLÓGICO; EN EL DEPARTAMENTO DE CALDAS



Un proyecto de:
Corporación Autónoma Regional de Caldas

Juan David Arango Gartner
Director General

Adriana Martínez Gómez
Subdirectora de Evaluación y Seguimiento Ambiental

Paola Alejandra Vásquez Cardona
Supervisora

Ejecuta:
Universidad de Antioquia

Equipo de trabajo

Directora Geóloga Teresita Betancur Vargas, Asesor en tratamiento de Aguas Residuales Ingeniero Darío Naranjo Fernández, Profesional en Hidrogeología Ingeniera Juliana Ossa V., Ingeniera Sanitaria Catalina González Mazo, Auxiliar de Ingeniería Keren Avendaño Mejía, Técnico administrativo Luz América Giraldo

Julio de 2023, Medellín

CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	8
2	GENERALIDADES	10
2.1	DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	10
2.2	HIDROGEOLOGÍA	12
2.2.1	Acuífero Santágueda-km 41.....	12
2.2.2	Acuífero río Risaralda	18
2.2.3	Acuífero río grande de La Magdalena	19
2.3	AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS (ARD) EN LA ZONA DE ESTUDIO	24
2.4	OBJETIVOS.....	26
2.4.1	Objetivo general.....	26
2.4.2	Objetivos específicos	26
2.5	METODOLOGIA	27
3	POSIBLES IMPACTOS DE LAS AGUAS RESIDUALES SOBRE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	29
3.1	ZONAS DE ESPECIAL INTERES HIDROGEOLÓGICO	29
3.1.1	Zonas de recarga en los acuíferos de interés	29
3.1.2	Vulnerabilidad intrínseca para los acuíferos de interés	33
3.2	CARACTERIZACIÓN DE LA CARGA CONTAMINANTE DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS (ARD) SOBRE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS	37
3.2.1	Clase de contaminante	38
3.2.2	Intensidad	39
3.2.3	Modo.....	39
3.2.4	Duración	39
3.2.5	Aplicación del ICC sobre las aguas residuales en la zona de estudio	41
4	SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO TERCIARIO EN ZONAS DE INTERES HIDROGEOLÓGICO	48
4.1	ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO TERCIARIO DE ARD	48
4.2	METODOLOGIA DE SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS PARA LA APLICACIÓN DE TRATAMIENTO TERCIARIO EN ZONAS RURALES	59
4.3	NIVELES SOSTENIBILIDAD TECNOLÓGICA.....	62
4.4	IMPACTOS Y SELECCIÓN DE LAS ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO TERCIARIO	76
4.5	CARACTERIZACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS (ARD).....	77
5	APLICACIÓN DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO TERCIARIO	81
5.1	DISEÑO DE ALTERNATIVAS SELECCIONADAS.....	84
5.2	CASO PILOTO.....	103
5.3	GUÍA METODOLOGICA	107
5.3.1	Consideraciones técnicas	108
6	CONCLUSIONES	114
7	RECOMENDACIONES	115
8	REFERENCIAS	116
9	ANEXOS.....	121

TABLAS

Tabla 1. Zonas priorizadas para el estudio de las ARD en el departamento de Caldas.....	13
Tabla 2. Descripción de las unidades hidrogeológicas del acuífero del río Risaralda.	19
Tabla 3. Descripción de las unidades geológicas presentes en el área del acuífero río grande de La Magdalena.....	22
Tabla 4. Descripción de las unidades hidrogeológicas del acuífero río grande de La Magdalena.	23
Tabla 5. Formas de disposición de ARD en las zonas priorizadas del acuífero río grande de La Magdalena.....	26
Tabla 6. Actividades para el cumplimiento de los objetivos del proyecto.....	28
Tabla 7. Categorías de actividades contaminantes asociadas a desarrollo urbano.....	38
Tabla 8. Intervalos de calificación del ICC.....	40
Tabla 9. Cronograma Recorrido de campo en cada acuífero.	41
Tabla 10. Descripción de los sitios monitoreados.....	45
Tabla 11. Resultados caracterización ARD de compuestos considerados para el ICC.	45
Tabla 12. Calificación de clase, modo y duración para los compuestos contaminantes derivados de ARD.....	46
Tabla 13. Límites de cuantificación y valores máximos propuestos.....	46
Tabla 14. Calificaciones de VRI y del ICC para cada una de las muestras analizadas.....	47
Tabla 15. Niveles de tratamiento de agua residual.....	48
Tabla 16. Descripción de alternativas de tratamiento terciario.	49
Tabla 17. Factores y variables considerados en el proceso de selección de tecnología de acuerdo con la guía elaborada por el Instituto CINARA y la Universidad del Valle.	60
Tabla 18. Factores y criterios considerados en el proceso de selección de tecnología de acuerdo con la metodología de decisión multicriterio elaborada por AECID.	62
Tabla 19. Criterios de sostenibilidad tecnológica con su respectivo peso.....	62
Tabla 20. Descripción de posibilidades de selección de niveles de sostenibilidad tecnológica..	63
Tabla 21. Niveles de sostenibilidad tecnológica de las zonas de estudio.	64
Tabla 22. Definición de los niveles de sostenibilidad tecnológica.....	66
Tabla 23. Criterios de sostenibilidad tecnológica y preguntas para su evaluación.....	67
Tabla 24. Localidades donde se realizaron encuestas a actores sociales identificados en la zona de estudio.	72
Tabla 25. Ponderación de criterios y niveles de sostenibilidad tecnológica en zonas de estudio.	72
Tabla 26. Nivel de sostenibilidad tecnológica mínimo para la implementación de tratamiento terciario.....	75
Tabla 27. Alternativas aplicables al nivel de sostenibilidad tecnológico III.....	76
Tabla 28. Alternativas aplicables al nivel de sostenibilidad tecnológico II.....	76
Tabla 29. Composición típica de aguas residuales domésticas (ARD) crudas.	78
Tabla 30. Resultados de laboratorio en relación con los límites de concentración (débil, medio y fuerte) considerados por Metcalf & Eddy (2014, 1996).	79
Tabla 31. Parámetros de muestras clasificados en el intervalo de tipo de concentración débil, medio y fuerte.....	80

Tabla 32. Criterios y condiciones de diseño específicos.	82
Tabla 33. Clasificación de las alternativas tecnológicas consideradas en el proyecto.	84
Tabla 34. Valores de porosidad (p) en humedales construidos de flujo superficial.	85
Tabla 35. Valores de la constante de velocidad y de temperatura, para diversos contaminantes en humedales de flujo superficial (HC-FS) y subsuperficial (HC-FSS).	86
Tabla 36. Valores de porosidad (p) en humedales construidos de flujo subsuperficial.	90
Tabla 37. Parámetros de diseño para filtros intermitentes de arena.	93
Tabla 38. Parámetros de escala para calcula el área requería en filtro verde.	95
Tabla 39. Precipitación media anual y diaria de las unidades hidrogeológicas objeto de estudio.	101
Tabla 40. Temperatura ambiente de los municipios correspondientes a cada acuífero en lo que va del año 2023.	109
Tabla 41. Dimensiones de los sistemas para el acuífero Santágueda-km 41.	111
Tabla 42. Dimensiones de los sistemas para el acuífero río Risaralda.	112
Tabla 43. Dimensiones de los sistemas para el acuífero río grande de La Magdalena.	113

FIGURAS

Figura 1. Generalidades del departamento de Caldas.	10
Figura 2. Zona de estudio y acuíferos identificados.	11
Figura 3. Modelo hidrogeológico de la parte baja de las cuencas de los ríos Chinchiná, Tapias-Tareas y zona baja del municipio de Anserma, departamento de Caldas.	14
Figura 4. Unidades hidrogeológicas para el acuífero Santágueda-km 41.	17
Figura 5. Columna estratigráfica tipo para el acuífero río Risaralda.	20
Figura 6. Unidades hidrogeológicas preliminares para el acuífero río Risaralda.	21
Figura 7. Unidades hidrogeológicas del acuífero río grande de La Magdalena.	25
Figura 8. Metodología para el cumplimiento de los objetivos del convenio.	27
Figura 9. Zonas de recarga para el acuífero Santágueda-km 41.	31
Figura 10. Identificación de zonas de recarga del acuífero río Risaralda.	32
Figura 11. Zonas de recarga para el acuífero río grande de La Magdalena.	33
Figura 12. Vulnerabilidad intrínseca para el acuífero Santágueda-km 41.	34
Figura 13. Vulnerabilidad intrínseca para el acuífero río Risaralda.	35
Figura 14. Vulnerabilidad intrínseca del acuífero río grande de La Magdalena.	36
Figura 15. Relaciones de clase, intensidad, modo y duración de cargas contaminantes para ICC	39
Figura 16. Metodología para evaluar el ICC, según categoría correspondiente a cada actividad.	40
Figura 17. Mapa de predios visitados en la unidad hidrogeológica acuífero Santágueda-km 41.	42
Figura 18. Mapa de predios visitados en la unidad hidrogeológica acuífero río Risaralda.	43
Figura 19. Mapa de predios visitados en la unidad hidrogeológica acuífero río grande de La Magdalena.	44
Figura 20. Metodología de selección de alternativa de tratamiento SELTAR.	60
Figura 21. Comportamiento de criterios de sostenibilidad tecnológica en zonas de estudio.	73
Figura 22. Vista en perfil de un humedal construido de flujo superficial.	89
Figura 23. Vista en perfil de un humedal construido de flujo subsuperficial.	92
Figura 24. Vista en planta y corte del filtro intermitente de arena.	94
Figura 25. Vista en perfil y planta del filtro verde.	97
Figura 26. Perforaciones en la tubería de distribución del agua residual.	98
Figura 27. Vista en perfil y en planta filtro verde descarga cero.	100
Figura 28. Vista en planta y perfil de un filtro evaporativo de flujo ascendente.	102
Figura 29. Flujograma de selección de tecnologías terciarias.	104
Figura 30. Vista en planta y corte filtro verde descarga cero, caso piloto CAV.	105
Figura 31. Modelo 3D del filtro verde descarga cero, caso piloto CAV.	106

ECUACIONES

Ecuación 1. Índice de carga contaminante (ICC).....	38
Ecuación 2. Área superficial de un humedal de flujo superficial.	84
Ecuación 3. Constante de velocidad de primer orden.....	86
Ecuación 4. Velocidad de flujo.	86
Ecuación 5. Número de Manning.	87
Ecuación 6. Longitud del humedal.....	87
Ecuación 7. Tiempo de retención hidráulico (TRH).	88
Ecuación 8. Carga hidráulica para el cálculo del área superficial.	89
Ecuación 9. Área superficial de un humedal de flujo subsuperficial.....	90
Ecuación 10. Área de la sección transversal de un humedal de flujo subsuperficial.	91
Ecuación 11. Área superficial del filtro intermitente de arena.	93
Ecuación 12. Área de filtro verde con modelo cinético de primer orden.	95
Ecuación 13. Área de aplicación.	96
Ecuación 14. Área superficial filtro verde evaporativo.	99

	<p>AUNAR ESFUERZOS TÉCNICOS, ADMINISTRATIVOS Y FINANCIEROS ENTRE LA UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA Y LA CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CALDAS (CORPOCALDAS) PARA ELABORAR UNA GUÍA METODOLÓGICA PARA EL TRATAMIENTO TERCIARIO DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS EN ÁREAS RURALES, ORIENTADA A LA PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN ZONAS DE ESPECIAL INTERÉS HIDROGEOLÓGICO; EN EL DEPARTAMENTO DE CALDAS</p>	
---	--	---

1 INTRODUCCIÓN

El propósito del Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026 (PND 2022-2026) Colombia, potencia mundial de la vida, es sentar las bases para que el país se convierta en un líder de la protección de la vida, a partir de la construcción de un nuevo contrato social que propicie la superación de injusticias y exclusiones históricas, la no repetición del conflicto, el cambio de nuestra forma de relacionarnos con el ambiente, y una transformación productiva sustentada en el conocimiento y en armonía con la naturaleza. Entre los tres elementos constitutivos de este plan el primero versa acerca del ordenamiento del territorio alrededor del agua.

De acuerdo con el Estudio Nacional del Agua del 2022 publicado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales en 2023 -IDEAM 2023- “Actualmente, Colombia no cuenta con información suficiente sobre el uso o la gestión de las aguas subterráneas de su territorio; esto se traduce en que se desconocen aspectos fundamentales, como la oferta y la demanda de aguas subterráneas. Esto hace que el estudio de las aguas subterráneas tenga muchas complejidades que, a nivel de país, aún no se tenga claro lo que implican. Unas de esas complejidades es que las aguas subterráneas pueden ser recursos renovables o no renovables. Hay acuíferos o sectores del país donde se extrae agua que no está conectada con el régimen de precipitación actual (acuíferos confinados); son zonas en donde se está haciendo una “minería del agua”, porque cada m³ que se explote o se consuma no se va a renovar por procesos naturales. Además, no existe información detallada que permita delimitar o identificar las zonas de recarga de los acuíferos”. Además, el IDEAM 2023 señala la actualidad que siguen teniendo las consideraciones planteadas en el Programa Nacional de Aguas Subterráneas (PNASUB), que forma parte de la Política Nacional para la Gestión integrada del Recurso Hídrico (promulgada por el MADS en 2010), en relación con la necesidad de definir acciones y estrategias para fortalecer la gestión de las aguas subterráneas en Colombia.

Las zonas de interés hidrogeológico corresponden a las zonas estratégicas para la protección de las aguas subterráneas y la prevención y reducción de los riesgos que puedan afectarlas en el sistema acuífero de interés. De acuerdo con el modelo hidrogeológico conceptual y los elementos del diagnóstico, estas zonas pueden comprender: zonas de recarga, categorizadas según su importancia o jerarquía; zonas de interacción de aguas superficiales y aguas subterráneas; ecosistemas interdependientes con el recurso hídrico subterráneo y las zonas de vulnerabilidad intrínseca; extrema y alta a la contaminación. Desde el punto de vista normativo, estas zonas deben ser objeto de manejo especial.

La disposición de aguas residuales y la implementación de sistemas de tratamiento para ellas representa una de las acciones que deben ser objeto de especial reglamentación y restricción en zonas de recarga; en ese sentido los asentamientos humanos que se localizan sobre o cerca de estas zonas deben contar con alternativas de disposición de aguas residuales domésticas (ARD) que garanticen el menor impacto posible sobre los acuíferos. En este sentido, las zonas urbanas deben tener la máxima cobertura en alcantarillado y los sistemas de tratamiento de aguas residuales adecuados; en las zonas rurales, igualmente se deben tener sistemas de tratamiento para estas aguas.

	<p>AUNAR ESFUERZOS TÉCNICOS, ADMINISTRATIVOS Y FINANCIEROS ENTRE LA UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA Y LA CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CALDAS (CORPOCALDAS) PARA ELABORAR UNA GUÍA METODOLÓGICA PARA EL TRATAMIENTO Terciario DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS EN ÁREAS RURALES, ORIENTADA A LA PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN ZONAS DE ESPECIAL INTERÉS HIDROGEOLÓGICO; EN EL DEPARTAMENTO DE CALDAS</p>	
---	--	---

Según consta en la actualización los Planes de Manejo Ambiental de Acuíferos para el río Risaralda y Santágueda-km 41 (CORPOCALDAS y UTP, 2018), al efectuar durante la fase de diagnóstico la identificación de las principales fuentes de contaminación, se inventariaron vertimientos de ARD de forma individual y colectiva.

Respecto al acuífero río Risaralda, con relación a los vertimientos individuales, en la zona rural, estas se disponen a través de sistema sépticos, al terreno o a fuentes superficiales. Dentro de la fase de formulación del PMAA se definió la línea estratégica de Seguimiento y control a la calidad y riesgo de contaminación del recurso hídrico subterráneo, contándose dentro de esta con un proyecto formulado: Control y seguimiento a los vertimientos líquidos.

Para el caso de Santágueda-km 41, se encontró que los vertimientos individuales de viviendas rurales dispersas generalmente cuentan con un Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas (STARD), consistente en una trampa de grasas, tanque séptico y filtro anaerobio de flujo ascendente; seguidos por la disposición en pozos de absorción o directamente al suelo o a fuentes superficiales; se llama especial atención sobre la situación en el municipio de Palestina, donde se indica que los vertimientos se realizan sin ningún tratamiento previo. Para este acuífero, también, en la fase de formulación del PMAA se definió la línea estratégica de Seguimiento y control a la calidad y riesgo de contaminación del recurso hídrico subterráneo, contándose dentro de esta con un proyecto formulado: Control y seguimiento a los vertimientos líquidos.

Para el acuífero río grande de La Magdalena, no se ha adelantado aún la formulación de un PMAA; por esta razón no se conocen detalles de la situación que se da en La Dorada y Victoria, en el sentido de los modos de disposición de las aguas residuales en las áreas rurales.

Bajo este contexto se plantea, por parte de CORPOCALDAS, la necesidad de la elaboración de una guía metodológica para el tratamiento terciario de las ARD en áreas rurales, orientada a la protección de las aguas subterráneas en zonas de especial interés hidrogeológico, particularmente las zonas de recarga directa o indirecta de mayor importancia, en el departamento de Caldas. Los alcances se enfocan fundamentalmente en soluciones individuales para viviendas rurales dispersas y, eventualmente, a colectivas.

2 GENERALIDADES

2.1 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

El departamento de Caldas está situado en el centro occidente de la región andina de Colombia, tiene una superficie de 7.888 km². Limita por el norte con el departamento de Antioquia, por el este con el departamento de Cundinamarca, por el sur con los departamentos del Tolima y Risaralda, y por el oeste con el departamento de Risaralda. El departamento cuenta con 27 municipios (Figura 1).

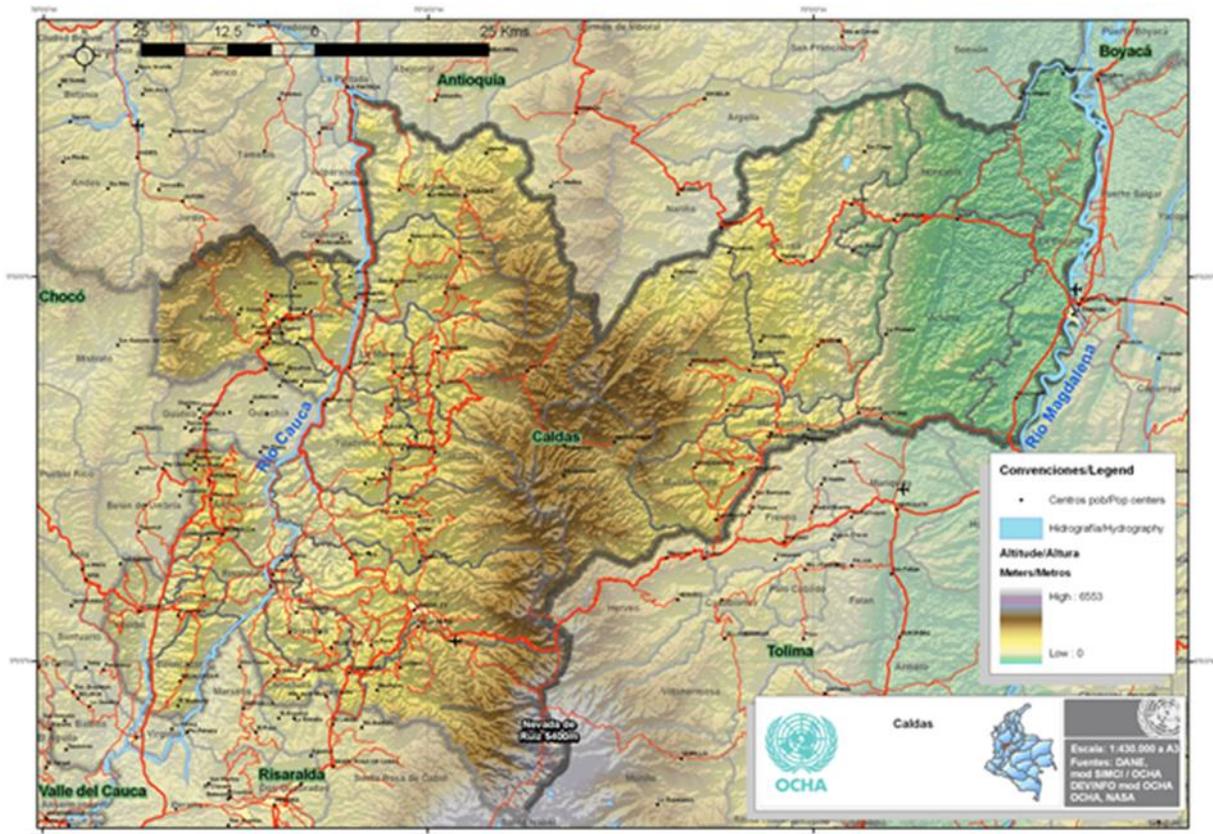


Figura 1. Generalidades del departamento de Caldas.

Fuente: Colombiamania (s.f.)

El relieve del territorio se enmarca dentro del sistema andino entre las cordilleras Occidental y Central. Dentro del departamento de Caldas, se distinguen cuatro unidades morfológicas: 1) los valles de los ríos Cauca y Risaralda; 2) la cordillera Occidental; 3) la cordillera Central y 4) el valle del río Magdalena.

La temperatura del departamento de Caldas varía de acuerdo con la altitud y el relieve. Sobre el flanco oriental de la cordillera Central se localizan los sectores más lluviosos, entre los 1.200 y 1.600 metros de altura, donde la precipitación supera los 3.000 mm anuales. Los sectores con menos de 1.500 mm anuales se ubican sobre los 3.500 m de altura, en el Parque Nacional Natural de Los Nevados, que incluye las máximas alturas del departamento. La distribución de los pisos térmicos es cálido el 32% del total del departamento, templado 36%, frío 23% y el piso bioclimático de páramo 9%.

El patrimonio hídrico subterráneo representa en las zonas acuíferas de Caldas la fuente principal o secundaria para el abastecimiento de comunidades rurales y para el desarrollo de actividades agrícolas, pecuarias e industriales (CORPOCALDAS y UTP, 2019). La Corporación Autónoma Regional de Caldas -CORPOCALDAS, ha avanzado significativamente en el desarrollo de estudios técnicos para conocer el potencial hidrogeológico en el departamento. Como resultado, se tienen identificados tres importantes sistemas acuíferos: Santágueda – km 41 Irra, río grande de La Magdalena y río Risaralda (Figura 2).

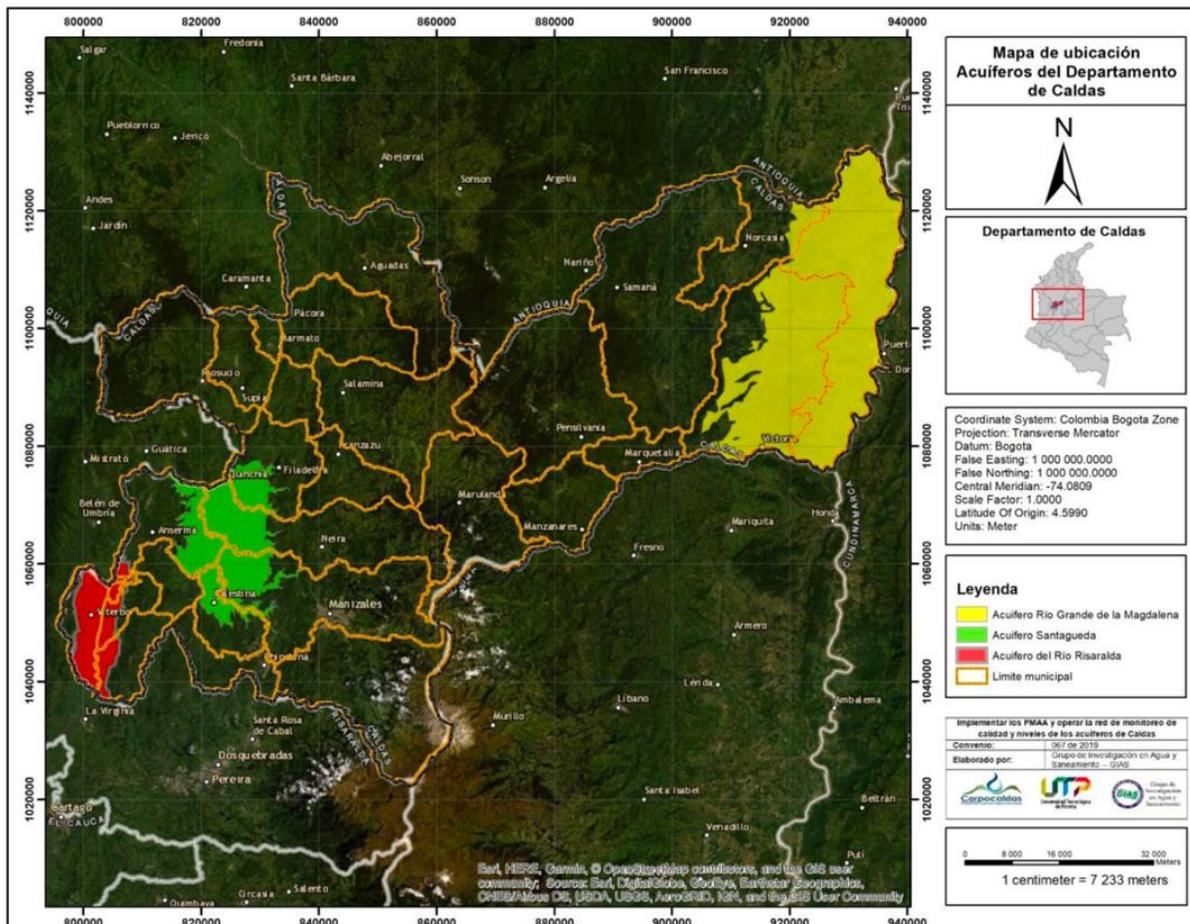


Figura 2. Zona de estudio y acuíferos identificados.
Fuente: CORPOCALDAS y UTP (2019b).

	<p>AUNAR ESFUERZOS TÉCNICOS, ADMINISTRATIVOS Y FINANCIEROS ENTRE LA UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA Y LA CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CALDAS (CORPOCALDAS) PARA ELABORAR UNA GUÍA METODOLÓGICA PARA EL TRATAMIENTO Terciario DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS EN ÁREAS RURALES, ORIENTADA A LA PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN ZONAS DE ESPECIAL INTERÉS HIDROGEOLÓGICO; EN EL DEPARTAMENTO DE CALDAS</p>	
---	--	---

En estos sistemas acuíferos se han adelantado ejercicios encaminados a su protección, como los PMAA y la protección de las zonas de especial interés hidrogeológico. Cabe señalar que el acuífero Santágueda-km 41 ha sido recientemente reconocido como nuevo sistema de interés nacional en el Estudio Nacional del Agua -ENA 2022 (IDEAM, 2023).

Los municipios y el área que hacen parte de las zonas que cubren los tres acuíferos de interés. 1) Acuífero Santágueda – km 41: Palestina, Anserma, Filadelfia, Neira, Manizales y Risaralda; ordenados de mayor a menor porcentaje de área dentro de la zona de estudio. 2) Acuífero río grande de La Magdalena: La Dorada, gran parte del municipio de Victoria y una pequeña porción del municipio de Norcasia, el área de este acuífero es de 1.001,41 km². 3) Acuífero río Risaralda: seis (6) municipios hacen parte del acuífero en el departamento de Caldas: Viterbo, Belalcázar, San José, Anserma, Risaralda y 13 municipios en el departamento de Risaralda: Guática, Mistrató, Belén de Umbría, Apia, Santuario, La Celia, Balboa, La Virginia; en el departamento de Caldas este acuífero cubre un área de 150,49 km² (CORPOCALDAS y UTP, 2019).

A partir de un estudio realizado entre CORPOCALDAS y la Universidad Tecnológica de Pereira (UTP) en el año 2019, denominado “Generar insumos para la Gestión Integral de Aguas Residuales Domésticas -ARD en zonas de interés”, se abordaron acciones para comprender el estado actual en el manejo de ARD en las áreas que comprenden los acuíferos de Caldas. En este estudio fueron definidas unas zonas de interés relacionadas con las áreas de influencia de las redes de monitoreo de calidad y niveles; para cada acuífero fueron establecidas en función de diferentes criterios. Estas zonas se resumen en la Tabla 1.

2.2 HIDROGEOLOGÍA

A partir de la información recopilada de los estudios que la Corporación ha realizado para el conocimiento de los sistemas hidrogeológicos se sintetizan a continuación las características principales de los sistemas acuíferos priorizados en la ejecución de este estudio.

2.2.1 Acuífero Santágueda-km 41

A partir del estudio realizado en el año 2006 de CORPOCALDAS y la fundación Proaguas se han identificado las rocas y sedimentos con porosidad primaria y secundaria que estarían relacionadas con la presencia de agua subterránea en la zona de estudio (Figura 3).

En cuanto a las rocas con porosidad primaria se clasificaron las unidades geológicas cuaternarias como los Depósitos de Flujo de Lodo y la Formación Terciaria Irra-Tres Puertas. En este sentido se diferenciaron los Depósitos de flujo de Lodo de Santágueda (Qfls), el Depósito de flujo de Lodo del km 41 (Qflk) y el Depósito de flujo de Lodo del Plan de Anserma (Qflp). Igualmente se identificaron rocas y sedimentos con porosidad primaria y secundaria como la Formación Irra-Tres Puertas (Tsic, Tsiv) y formaciones con porosidad secundaria como la Formación Barroso.

Por otro lado, se identifican rocas y sedimentos con limitados recursos de agua subterránea, a esta categoría pertenecen las formaciones geológicas Esquistos de Lisboa-Palestina (Kies,

	<p>AUNAR ESFUERZOS TÉCNICOS, ADMINISTRATIVOS Y FINANCIEROS ENTRE LA UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA Y LA CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CALDAS (CORPOCALDAS) PARA ELABORAR UNA GUÍA METODOLÓGICA PARA EL TRATAMIENTO TERCIARIO DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS EN ÁREAS RURALES, ORIENTADA A LA PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN ZONAS DE ESPECIAL INTERÉS HIDROGEOLÓGICO; EN EL DEPARTAMENTO DE CALDAS</p>	
---	--	---

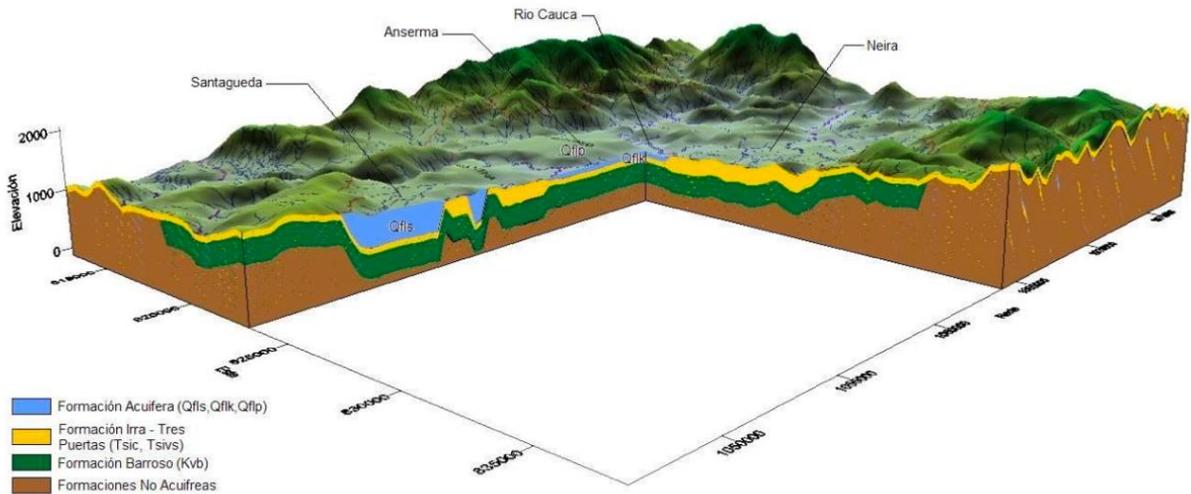
Kiea), Anfibolita Saussurítica de Chinchiná (Kadp), Rocas Ultramáficas de Filadelfia (Kusf), Stock Monzonítico de Irra (Kmi), y Porfidos Dacíticos y Andesíticos de Irra (Tadi).

Tabla 1. Zonas priorizadas para el estudio de las ARD en el departamento de Caldas.

Acuífero	Criterio de priorización principal	Zonas priorizadas
Río grande de La Magdalena	Áreas de influencia de Puntos de Agua Subterránea – PAS (pozos, aljibes, manantiales) que hacen parte de la red de monitoreo de aguas subterráneas donde se tienen datos de calidad.	Seis centros poblados rurales Vereda Horizonte Vereda Las Camelias Vereda El Tigre Vereda La Agustina Vereda La Atarraya Vereda Los Isaza sede Los Limones
	El PAS se encuentra en un centro poblado rural	
	El PAS perteneciente a la red de monitoreo es la fuente principal de abastecimiento de agua para comunidades rurales.	
Río Risaralda	Puntos de Agua Subterránea – PAS (pozos, aljibes, manantiales) donde se tienen datos de calidad y pozos de monitoreo de propiedad de CORPOCALDAS.	PAS de la red optimizada de calidad: 7 PAS . Condominio Los Andes Hacienda La Cruz Hacienda El Danubio Piezómetro San Diego Centro Empresarial Ágora** Condominio Los Seis y Punto Trituradora Acapulco**
	PAS priorizado para la red.	
Santágueda-km 41-Irra*	Puntos de Agua Subterránea – PAS (pozos, aljibes, manantiales) donde se tienen datos de calidad y pozos de monitoreo de propiedad de CORPOCALDAS.	Predios donde se tienen los PAS que pertenecen a la red de monitoreo: Hotel Villas del Café** Pescador Capri (pz) Granja Montelindo (pz) Casa Loma Santa Ana (pz) El Jordán (pz) La Rochela ** Hacienda Malvinas Hacienda Zaragoza Vivero las Palmeras Hacienda la Fé Sub-Estación Irra Condominio el Jardín Condominio Makadamia** Granja la Argentina Finca la Albania Finca Leticia
	PAS con parámetros (bacteriológicos y químicos) críticos.	

**No se visitaron, la información se obtuvo del expediente de la concesión de agua subterránea o permiso de vertimientos.

Fuente: CORPOCALDAS y UTP (2019).



	<p>AUNAR ESFUERZOS TÉCNICOS, ADMINISTRATIVOS Y FINANCIEROS ENTRE LA UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA Y LA CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CALDAS (CORPOCALDAS) PARA ELABORAR UNA GUÍA METODOLÓGICA PARA EL TRATAMIENTO TERCIARIO DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS EN ÁREAS RURALES, ORIENTADA A LA PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN ZONAS DE ESPECIAL INTERÉS HIDROGEOLÓGICO; EN EL DEPARTAMENTO DE CALDAS</p>	
---	--	---

aproximadamente 109 millones de metros cúbicos. En cuanto a parámetros fisicoquímicos se tiene que el agua se encuentra a una temperatura promedio de 25,63°C, con conductividades entre 63 y 470 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y pH promedio de 6,53.

A partir de la información obtenida a través de la geoelectrónica, registros de pozo, columnas litológicas, relaciones geológicas de campo y del inventario de puntos de agua se puede concluir que el Flujo de Lodo de Santágueda está compuesto en sus primeros metros (Techo) por cenizas volcánicas con alteración a arcilla. Es en esta capa donde la mayoría de aljibes hacen su captación. Igualmente, a una mayor profundidad esta formación se considera un multiacuífero semiconfinado el cual está compuesto por arenas y gravas, donde su capa acuitada son las cenizas y el cual está siendo aprovechado por las perforaciones profundas existentes en la zona y con un basamento compuesto por rocas cretácicas y terciarias a una profundidad mayor a 140 m.

Depósito de Flujo de Lodo del km 41 (Qflk)

Acuífero de extensión local de carácter semiconfinado a libre el cual aparece como una franja alargada en dirección NW sobre el río Cauca ubicada al centro-occidente de la zona de estudio, cubriendo un área aproximada de 11,2 km². Este depósito se caracteriza por presentar cantos subangulares de composición ígnea como lavas basálticas, pórfidos andesíticos, granitoides y un gran aporte de fragmentos piroclásticos y algunos esquistos verdes y negros; los tamaños varían de 4 cm hasta 50 cm de diámetro y en general el depósito es matriz-soportado y su matriz es lodoso-arenosa compuesta esencialmente por líticos (50-70%), cuarzo (10-20%) y feldspatos (10-5%), también presenta restos de plantas carbonizadas. El espesor máximo de este acuífero de acuerdo a Martínez y Quintero (1993) es de 15 m.

Esta unidad acuífera es aprovechada mediante 18 aljibes y 5 pozos. La profundidad de los aljibes varía entre 2,2 y 16 m y el nivel estático medido para estas captaciones se encuentra entre 0 y 9 m de profundidad. En cuanto a parámetros fisicoquímicos se tiene que en los puntos medidos la temperatura media es 26,7°C, la conductividad varía entre 183 y 358 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y el pH varía en un intervalo de 6,57 a 7,66. Esta unidad no cuenta con datos de hidráulica.

Depósito de Flujo de Lodo del Plan de Anserma (Qflp)

Unidad acuífera de extensión local de comportamiento libre a semiconfinado. El área aflorante de esta unidad es 16,1 km² sobre el municipio de Anserma, al occidente de la zona de estudio.

Este depósito se encuentra en contacto discordante con las terrazas antiguas del río Cauca y la secuencia volcano-sedimentaria Irra-Tres puertas; en algunos lugares se pueden distinguir clastos con características de basaltos y pórfido andesítico, la matriz es lodoso-arenosa de colores habanos, grises y rojizos, localmente con óxidos de hierro; el espesor de esta unidad puede alcanzar hasta 50 m o más (CORPOCALDAS y PROAGUA, 2006).

Este acuífero es aprovechado por 3 aljibes con profundidades promedio de 9.6 m y niveles estáticos promedio de 1,15 m. La temperatura promedio del agua para estas captaciones es 26,75°C y la conductividad y pH promedios son 204,5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 7.47 respectivamente. Igualmente, esta unidad es captada por 3 pozos con profundidades entre 60 y 150 m con

 <p>UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA Facultad de Ingeniería</p>	<p>AUNAR ESFUERZOS TÉCNICOS, ADMINISTRATIVOS Y FINANCIEROS ENTRE LA UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA Y LA CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CALDAS (CORPOCALDAS) PARA ELABORAR UNA GUÍA METODOLÓGICA PARA EL TRATAMIENTO TERCIARIO DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS EN ÁREAS RURALES, ORIENTADA A LA PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN ZONAS DE ESPECIAL INTERÉS HIDROGEOLÓGICO; EN EL DEPARTAMENTO DE CALDAS</p>	 <p>Corpocaldas Corporación Autónoma Regional de Caldas</p>
---	--	---

niveles estáticos promedio de 32,03 m. Los pozos inventariados en esta unidad tienen un caudal medio de 6,64 L/s con abatimientos promedio de 20,4 m y capacidades específicas entre 0,23 y 0,43 L/s.m

Formación Irra-Tres Puertas (Tsic, Tsiv)

que corresponde a una unidad acuífera de extensión regional que puede comportarse como acuífero libre, semiconfinado o confinado que aparece a lo largo de toda la zona de estudio como una franja en dirección Norte-Sur, esta unidad está afectada por las fallas Tapias, Piedecuesta y por un sinnúmero de fracturas relacionadas a estas fallas. Esta formación está compuesta por conglomerados ricos en rocas verdes, arenas, limos, arcillas y delgadas capas de carbón, conglomerados ricos en cuarzo lechoso y chert negro y por un conjunto de estratos compuestos por arenas cuarzosas ricas en pómez y conglomerados ricos en pórfidos andesíticos. Estratigráficamente esta unidad se encuentra suprayaciendo rocas ígneas y metamórficas cretácicas.

Captando esta formación se encuentran 8 aljibes con profundidades entre 1 y 10 m con niveles estáticos entre 0,15 y 6 m. El agua de estas captaciones presenta temperaturas entre 24.8 y 26.7°C, conductividades entre 179 y 392 $\mu\text{S/cm}$ y pH en un intervalo de 6,39 a 7,21.

De igual forma este acuífero es aprovechado por 2 manantiales y 2 pozos. El pozo inventariado en esta unidad presenta un caudal de aprovechamiento de 0.5 L/s con un abatimiento asociado de 56.3 m, un caudal muy bajo en comparación a los pozos que se encuentran en la zona en otras unidades acuíferas.

Formación Barroso (Kvb)

Esta formación puede ser definida como un acuífero de tipo local de comportamiento libre, debido al fracturamiento y meteorización de la roca. Presenta un área aflorante de 35,37 km^2 . Este acuífero puede considerarse como colgado debido a que su volumen de agua más o menos aislado se encuentra por encima de del nivel general del agua freática (Davis, 1971). La unidad se encuentra suprayacida por la formación terciaria Irra-Tres Puertas y los depósitos de lodo de Santágueda-km 41 y el Plan de Anserma.

Al sur de la zona de estudio este horizonte acuífero es captado en la zona por 13 aljibes con profundidades que varían entre 3 y 13,9 m, con un nivel estático desde superficiales hasta 4,9 m. En cuanto a parámetros fisicoquímicos, se tienen temperaturas entre 23,6 y 27,4°C, conductividades variables entre 72,5 y 343 $\mu\text{S/cm}$ y pH en un amplio intervalo entre 5,95 y 7,11.

Para el acuífero Santágueda-km 41, se definieron de manera preliminar tres (3) unidades hidrogeológicas (Figura 4):

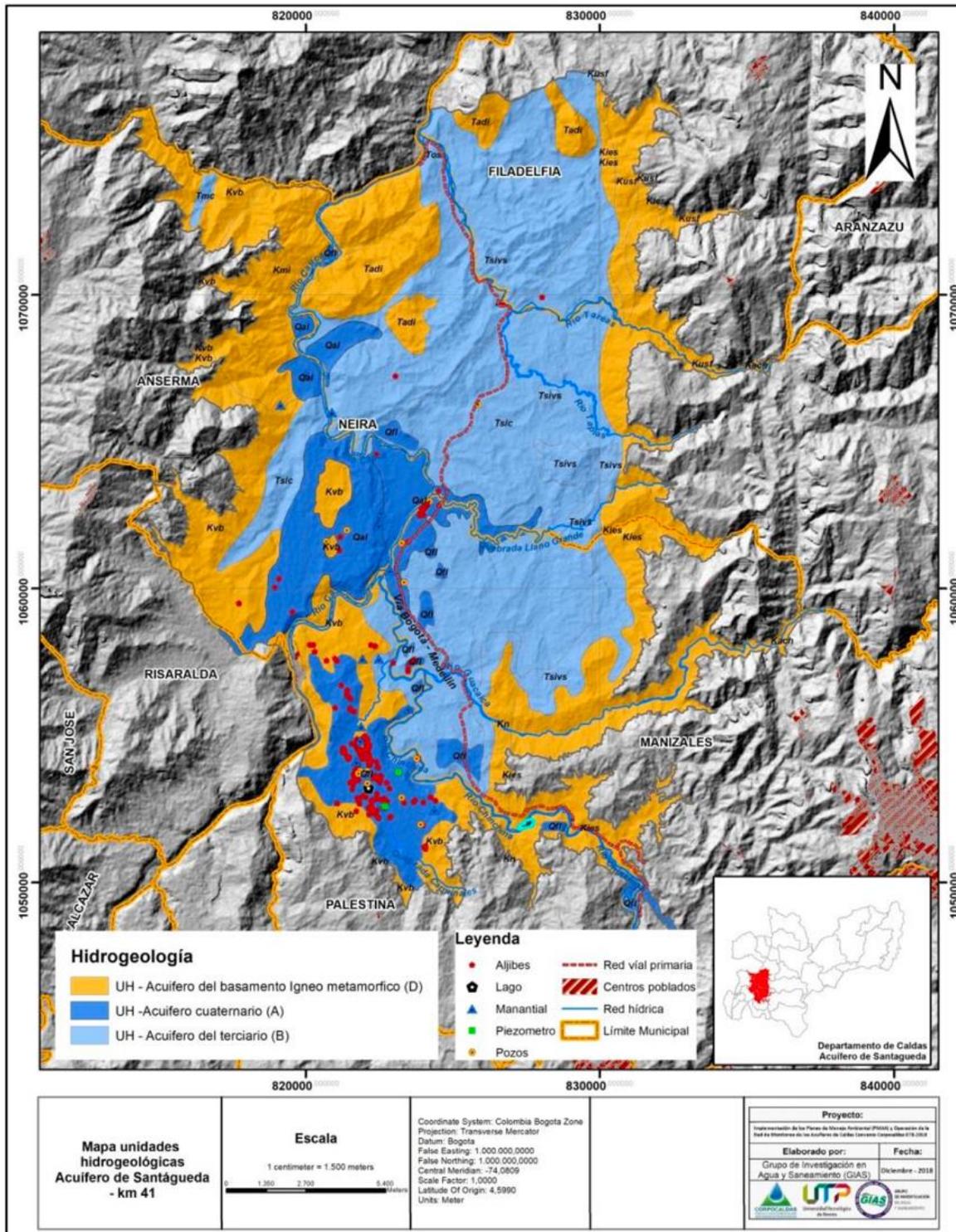


Figura 4. Unidades hidrogeológicas para el acuífero Santágueda-km 41.
Fuente: CORPOCALDAS y UTP (2018).



- Unidad Hidrogeológica Acuífero Cuaternario “A”. Esta unidad, de extensión local, la conforman principalmente los sedimentos aluviales volcánoclasticos y fluvio-torrenciales consolidados y no consolidados (Qal, Qfls, Qflk y Qflp) que suprayacen discordantemente las rocas de cobertura terciaria e ígneo-metamórfico de la zona, cubiertos a su vez por depósitos de caída piroclástica (ceniza), los cuales representan la actividad volcánica del macizo cordillerano (cordillera Central); presenta porosidad primaria y buena a moderada permeabilidad. El acuífero de esta unidad conformado por gravas y arenas se considera de tipo libre a semiconfinado multicapa, debido a que hacia la parte alta de la columna estratigráfica se presentan paquetes de ceniza que al meteorizarse generan arcillas, comportándose como un acuífero, la profundidad del agua para esta unidad es variable (144 m a 50 m).
- Unidad Hidrogeológica Acuífero del Terciario “B”. Esta unidad de extensión regional, está conformada por las formaciones principalmente terciarias como la Formación Amaga (Tos), Formación Combia (Tcm) y la Formación Irra-Tres Puertas (Tsic- Tsivs), siendo esta última la de mayor área de exposición en el sistema acuífero; los materiales de estas unidades se consideran principalmente volcánoclasticos a clásticos, re TRABAJADOS, presentando variaciones granulométricas desde sedimentos finos a gruesos, depositados en ambientes sedimentarios asociados a abanicos aluviales y corrientes trenzadas a meándricas principalmente.
- Unidad Hidrogeológica Acuífero de Basamento Ígneo-Metamórfico “D”: Las litologías que conforman esta unidad, de extensión regional, están conformadas por rocas metamórficas de tipo esquistos (Kies-Kiea) negros y verdes, anfíbolitas (Kach) y ultramafitas (Kusf), basaltos (Kvb), sedimentarias de grano fino (Kn), intrusivos de tipo andesítico-dacítica (Tadi) y monzoníticas (Kmi), presentando conductividades hidráulicas muy bajas o casi nulas, debido a su baja porosidad o a su alto grado de cristalinidad. Son consideradas como el constituyente del basamento de las unidades acuíferas principalmente terciarias en las zonas donde se identifican, generando acuíferos libres de tipo fracturado a libres en las zonas de desarrollo de suelos y saprolitos de espesor variable, como también colgado (CORPOCALDAS y PROAGUA, 2006). La unidad de mayor importancia para este acuífero es la Formación Barroso.

2.2.2 Acuífero río Risaralda

El acuífero río Risaralda está ubicado en la parte media baja de la cuenca de dicho río, entre los municipios de Anserma, Viterbo, San José y Belalcázar y Risaralda en el departamento de Caldas.

Este sistema hidroestratigráfico está contenido en rocas de origen volcánico formadas en un arco de islas de edad cretácico y cuya molasa terciaria está conformada por sedimentos de origen principalmente aluvial en el que se incluyen a las Formaciones La Paila, Zarzal, Sedimentos de Viterbo y los depósitos aluviales recientes o cuaternarios que rellenan el valle del río Risaralda. El acuífero, que ha sido caracterizado geofísicamente, se presenta en general bien definido, con cambios en su comportamiento a profundidad debido a la variabilidad litológica de las rocas que lo contiene (CORPOCALDAS y UTP, 2016).

	<p>AUNAR ESFUERZOS TÉCNICOS, ADMINISTRATIVOS Y FINANCIEROS ENTRE LA UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA Y LA CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CALDAS (CORPOCALDAS) PARA ELABORAR UNA GUÍA METODOLÓGICA PARA EL TRATAMIENTO TERCIARIO DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS EN ÁREAS RURALES, ORIENTADA A LA PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN ZONAS DE ESPECIAL INTERÉS HIDROGEOLÓGICO; EN EL DEPARTAMENTO DE CALDAS</p>	
---	--	---

El análisis geofísico realizado para afianzar el conocimiento de este sistema hidrogeológico permitió definir tres (3) capas en las cuales se encuentran alojados los acuíferos en la cuenca, los cuales están principalmente dispuestos en las rocas cuaternarias (Qal- Qtsv) que rellenan el valle del río Risaralda y las dos unidades terciarias presentes (Formación Zarzal y Formación La Paila) (CORPOCALDAS y UTP, 2016).

En la Figura 5 se presenta la columna estratigráfica tipo para este sistema acuífero, en la Tabla 2 se describen las unidades hidrogeológicas identificadas y en la Figura 6 se presenta su distribución espacial.

Tabla 2. Descripción de las unidades hidrogeológicas del acuífero del río Risaralda.

Unidad	Descripción
Acuíferos de alta productividad- A1	Conformadas por sedimentos aluviales terciarios del orden local a regional (Formación La Paila y Zarzal), permitiendo el desarrollo de acuíferos semiconfinados a confinados de tipo multicapa en el terciario.
Acuíferos de moderada productividad- A2	Conformando acuíferos libres de tipo fracturado de moderada productividad, la Formación Barroso se presenta conformando acuíferos locales asociados a la cobertura de cenizas presentes ampliamente en la región.
Acuíferos de baja productividad- A3	Conformadas por depósitos cuaternarios, se presentan acuíferos de tipo libre a semiconfinados, a multicapa en las zonas donde se presentan manantiales.
Acuíferos con muy baja productividad- B1	Conformado por rocas gabroicas presentes en las márgenes del acuífero tanto al oriente como al occidente, presentan características de muy baja productividad debido a su baja porosidad y su composición.

Fuente: CORPOCALDAS y UTP (2016).

2.2.3 Acuífero río grande de La Magdalena

El acuífero río grande de La Magdalena se encuentra ubicado al oriente del departamento de Caldas. Ocupa la extensión total del municipio de La Dorada, un alto porcentaje del municipio de Victoria y una pequeña porción del municipio de Norcasia (CORPOCALDAS y UTP, 2019b).

En esta cuenca acuífera afloran rocas con edades desde el Paleozoico hasta el Reciente; las rocas de edad Paleozoica corresponden al denominado Complejo Ígneo Metamórfico de la cordillera Central o Complejo Cajamarca (Maya y González, 1995), sobre las cuales suprayacen las rocas de cobertera Terciarias (Grupo Honda y Formación Mesa) y sedimentos Cuaternarios en general, estos últimos conforman las unidades con propiedades de interés hidrogeológico como porosidad primaria a localmente secundaria (CORPOCALDAS y UTP, 2019b). En la Tabla 3 se presenta la descripción de las unidades geológicas presentes en el acuífero río grande de La Magdalena.

A partir de lo anterior se identificaron las unidades hidrogeológicas que se reportan en la Tabla 4 y en la Figura 7.

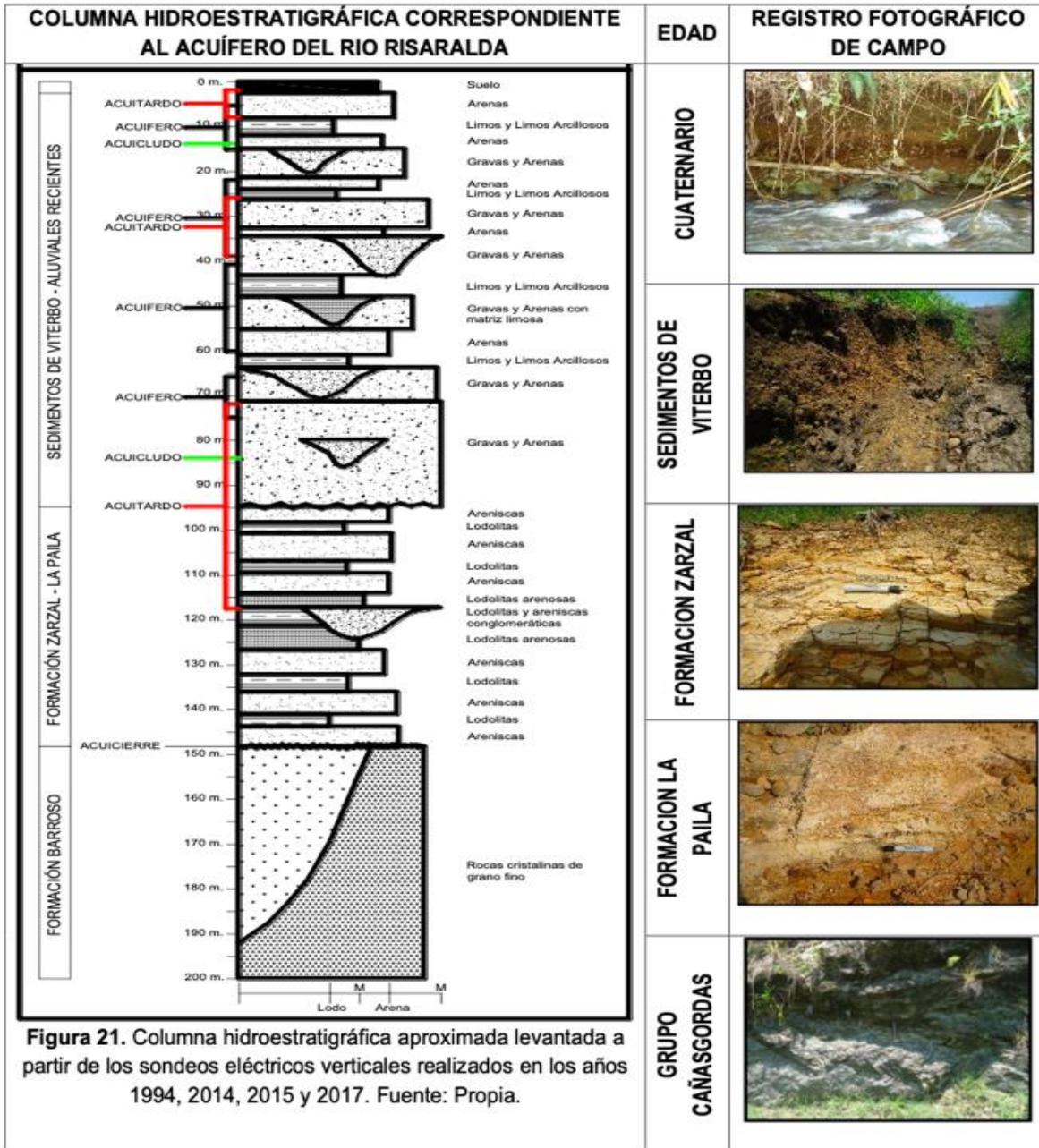


Figura 21. Columna hidroestratigráfica aproximada levantada a partir de los sondeos eléctricos verticales realizados en los años 1994, 2014, 2015 y 2017. Fuente: Propia.

Figura 5. Columna estratigráfica tipo para el acuífero río Risaralda. Fuente: CORPOCALDAS y UTP (2016).

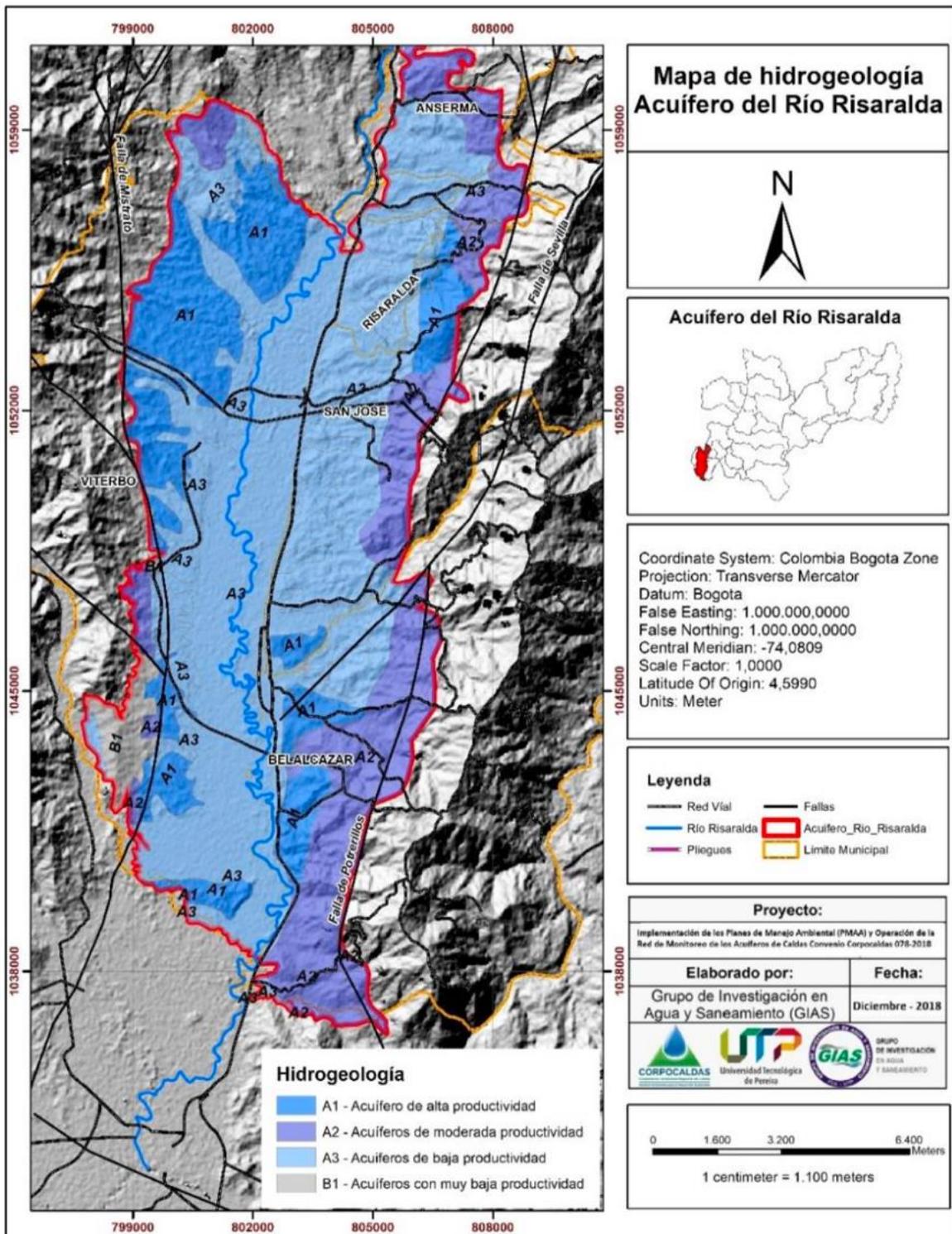


Figura 6. Unidades hidrogeológicas preliminares para el acuífero río Risaralda.
Fuente: CORPOCALDAS y UTP (2018).

	<p style="text-align: center;">AUNAR ESFUERZOS TÉCNICOS, ADMINISTRATIVOS Y FINANCIEROS ENTRE LA UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA Y LA CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CALDAS (CORPOCALDAS) PARA ELABORAR UNA GUÍA METODOLÓGICA PARA EL TRATAMIENTO TERCARIO DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS EN ÁREAS RURALES, ORIENTADA A LA PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN ZONAS DE ESPECIAL INTERÉS HIDROGEOLÓGICO; EN EL DEPARTAMENTO DE CALDAS</p>	
---	---	---

Tabla 3. Descripción de las unidades geológicas presentes en el área del acuífero río grande de La Magdalena.

Nombre	Descripción
<p style="text-align: center;">Complejo Cajamarca (PES – PM, CCJ)</p>	<p>Conjunto de rocas consideradas litoestratigráficamente como complejo, conformado principalmente por rocas metamórficas que constituyen el núcleo de la cordillera Central, corresponden a un conjunto incompleto de rocas en la cual no se conoce ni el techo ni la base, ni es posible estimar el espesor debido al plegamiento complejo y ausencia de capas guías (González, 1993). En general se encuentra constituido por rocas metamórficas como esquistos sericíticos, cuarcitas, mármoles y esquistos verdes, que estarían incluidas en la definición original de Botero (1963) para el Grupo Ayurá–Montebello o en la de Nelson (1957) para el Complejo Cajamarca.</p>
<p style="text-align: center;">Grupo Honda (TSH)</p>	<p>Aflora en el flanco oriental de la cordillera Central y está relacionado a la sedimentación continental del valle medio del Magdalena. Reposa discordantemente sobre metamorfitas del Complejo Cajamarca y es suprayacido concordantemente por la Formación Mesa (González, 1993). Para el área de influencia del acuífero río grande de la Magdalena, se ha determinado que aflora la parte superior de este grupo, caracterizado por la ausencia casi total de rocas volcánicas y el predominio de sedimentos rojos con lutitas y arenitas. De Porta (1966) divide el Grupo Honda en tres formaciones: Cambrás, San Antonio y Los Limones y para el sitio específico de estudio el interés se limita a la Formación San Antonio, ya que esta se desarrolla por debajo de la Formación Mesa.; por lo tanto, la Formación San Antonio se divide en tres (3) miembros con características litológicas constituida principalmente por intercalaciones de areniscas conglomeráticas, conglomerados y lutitas, como son: Flor Colorada, con 816 m de espesor, Los Cocos con espesor aproximado de 1.128 m y La Ceibita con espesor aproximado de 1.128 m.</p>
<p style="text-align: center;">Formación Mesa (TSM)</p>	<p>Esta formación, de origen continental clástico a volcanoclástico, aflora a lo largo del valle del Magdalena, se caracteriza por una morfología de “mesetas o mesas” con taludes verticales. Esta formación reposa concordantemente sobre el Grupo Honda (González, 1993). Los conglomerados se caracterizan por la abundancia de clastos de pórfidos y pumitas, con baja proporción relativa de rocas metamórficas, sedimentarias y plutónicas (González, op. cit.). Esta unidad aflora principalmente hacia el oeste de la zona de influencia del acuífero, donde se presenta topográficamente más alta, con una diferencia de altura de hasta 230 m por encima de la zona plana que conforma los depósitos aluviales recientes del valle del río Magdalena y tributarios menores. A continuación se describen los miembros en los que se divide la Formación Mesa:</p> <p>1-Miembro Palmas: miembro inferior, con espesor aproximado de 40 m y suprayace el Miembro La Ceibita, el contacto se infiere por el aumento considerable de material volcánico.</p> <p>2-Miembro Bernal: miembro intermedio, con espesor de 330 m, litológicamente presenta predominio de areniscas conglomeráticas tobáceas, con intercalaciones de conglomerados polimícticos, gravas tobáceas y arcillas limolíticas hacia la base, conglomerados grises de clastos efusivos al medio y areniscas de grano fino cuarzosas al techo. Es notorio en este miembro el aumento de tamaño de grano, como de la composición volcánica, es característica la presencia de piedra pómez.</p> <p>3-Miembro Lumbí: miembro superior, con espesor de 50 m, en general presenta un color rojo característico debido seguramente a la composición ferruginosa de sus arcillas.</p> <p>La sucesión litológica comienza con un banco de arcilla tobácea, intercalada con</p>

 UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA Facultad de Ingeniería	AUNAR ESFUERZOS TÉCNICOS, ADMINISTRATIVOS Y FINANCIEROS ENTRE LA UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA Y LA CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CALDAS (CORPOCALDAS) PARA ELABORAR UNA GUÍA METODOLÓGICA PARA EL TRATAMIENTO TERCIARIO DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS EN ÁREAS RURALES, ORIENTADA A LA PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN ZONAS DE ESPECIAL INTERÉS HIDROGEOLÓGICO; EN EL DEPARTAMENTO DE CALDAS	 Corpocaldas Corporación Autónoma Regional de Caldas
---	---	---

Nombre	Descripción
	limolitas blancas que presenta cantos redondeados volcánicos de hasta 25 cm de gravas; el techo está formado por una arcilla rojiza limosa, con cantos arena fina de biotita, moscovita, cuarzo, feldespatos y hornblenda. La composición no varía con el miembro anterior ya que continúan predominando los efusivos, aunque es notoria la presencia de clastos intrusivos.
Depósitos Cuaternarios	Una gran proporción de la zona de influencia del acuífero del río grande de La Magdalena se encuentra conformada por los depósitos Cuaternarios, que se distribuyen en la zona plana, generando depósitos de llanura aluvial, de terrazas, de cauces aluviales, playones y de caída piroclástica. Compuestos generalmente por materiales volcánicos, aglomerados volcánicos andesíticos, gravas y material tobáceo de textura fina y arenas gruesas.

Fuente: (CORPOCALDAS y UTP, 2019b).

Tabla 4. Descripción de las unidades hidrogeológicas del acuífero río grande de La Magdalena.

Tipo de porosidad	Unidades geológicas	Descripción
Sedimentos, rocas sedimentarias y volcánicas de alta permeabilidad o porosidad primaria	<p>Caen en esta clasificación los sedimentos y rocas que conforman a los depósitos recientes y las terrazas aluviales de los ríos Guarín, Purnio y La Miel, al igual que los sedimentos (gravas, arenas y limos) que rellenan los valles de los ríos y quebradas principales de la zona, constituyendo los depósitos coluvio-aluviales y depósitos de caída piroclástica que suprayacen los relieves antiguos de la zona.</p> <p>Las rocas sedimentarias que conforman la Formación Mesa y la Formación San Antonio del Grupo Honda, están conformadas por rocas sedimentarias compactas que varían composicionalmente, siendo a nivel general lutitas, arenitas y arenitas conglomeráticas con la ausencia casi total de rocas volcánicas con tonalidades rojizas a pardo amarillentas para la Formación San Antonio, y predominantemente volcánicas a la Formación Mesa, representada por episodios de depositación sinéptica con periodos intereruptivos, conformando bancos de lutitas, tobas, brechas, conglomerados, entre otros.</p>	<p>Unidad Hidrogeológica Acuífero Cuaternario (A1)</p> <p>Clasificación dada a los sistemas acuíferos de orden regional o local con porosidades, primarias para este caso, que favorecen el flujo de agua, a causa de su bajo a ausente grado de consolidación y el tamaño de grano, transmisividades regionales bajas a altas del orden de 0,21 L/s a 6,67 L/s (puntual) y locales, bajas a altas en el orden de 0,170 L/s hasta 1,4 L/s en la zona del Guarín (Malagón, 2017), y de manera general, según inventario (2010), de 0,66 L/s. Este conjunto está conformado principalmente por depósitos coluviales, terrazas aluviales y llanuras de inundación, asociadas a las principales corrientes de agua del municipio y al río Magdalena, presentando importantes cambios laterales de facies sedimentarias y espesores, conformando principalmente acuíferos libres a confinados multicapa a localmente semiconfinados según factor geológico hacia los límites con las formaciones terciarias.</p> <p>Unidad Hidrogeológica Acuífero del Terciario "A1"</p> <p>Debido a que en gran parte del sistema acuífero de La Dorada predominan las unidades cuaternarias, las cuales son aprovechables en su mayoría, se tiene muy</p>

	<p>AUNAR ESFUERZOS TÉCNICOS, ADMINISTRATIVOS Y FINANCIEROS ENTRE LA UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA Y LA CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CALDAS (CORPOCALDAS) PARA ELABORAR UNA GUÍA METODOLÓGICA PARA EL TRATAMIENTO TERCIARIO DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS EN ÁREAS RURALES, ORIENTADA A LA PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN ZONAS DE ESPECIAL INTERÉS HIDROGEOLÓGICO; EN EL DEPARTAMENTO DE CALDAS</p>	
---	--	---

Tipo de porosidad	Unidades geológicas	Descripción
		<p>poca información que determine la capacidad productiva de la Formación Terciaria; sin embargo, Malagón (2017) menciona que este sistema de acuífero de orden regional está conformado “por rocas sedimentarias terciarias y sedimentos cuaternarios poco consolidados de ambiente fluvial a transicional que desarrollan acuíferos de tipo libres y confinados [...]”. La información obtenida en el inventario del 2010, se consideran caudales de 0,03 L/s en manantiales y de 0,19 L/s hasta los 1,51 L/s para aljibes, permitiendo su clasificación en este intervalo.</p>

Fuente: (CORPOCALDAS y UTP, 2019b).

2.3 AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS (ARD) EN LA ZONA DE ESTUDIO

En las zonas acuíferas de Caldas, las aguas subterráneas representan la fuente principal o secundaria para el abastecimiento de comunidades rurales y para el desarrollo de actividades agrícolas, pecuarias e industriales. Con los resultados de calidad obtenidos se han identificado problemas de contaminación bacteriológica y química posiblemente relacionada con el manejo inadecuado de ARD y residuos sólidos en zonas rurales y el desarrollo de actividades agrícolas que dependen principalmente de la aplicación de fertilizantes; por otro lado, se tienen identificadas las actividades potencialmente contaminantes de los acuíferos, donde la disposición inadecuada de ARD representa una de estas actividades que afecta el agua subterránea en términos de calidad.

En este sentido en el año 2019, CORPOCALDAS en convenio con la UTP realizaron el diagnóstico sobre manejo de ARD en las zonas priorizadas mencionadas anteriormente, realizando entrevistas semiestructuradas y observación directa sobre los sistemas (CORPOCALDAS y UTP, 2019).

En el acuífero río grande de La Magdalena se realizaron 215 visitas en las que se encontraron diversas formas para la disposición de ARD en los seis (6) centros poblados visitados, siendo el suelo el principal receptor de vertimientos, por lo que es una actividad potencialmente contaminante de los sistemas acuíferos (Tabla 5) (CORPOCALDAS y UTP, 2019).

Para el acuífero Santágueda-km 41 se realizó la caracterización a partir de visitas técnicas y revisión de expedientes de CORPOCALDAS. En esta zona se presenta mayor manejo de las ARD en sistemas de tratamiento y pozos de absorción, de los predios visitados se mencionan solo dos vertimientos directos al suelo. Sin embargo, en la mayoría de los Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas (STARD) el vertimiento final es dispuesto al suelo.

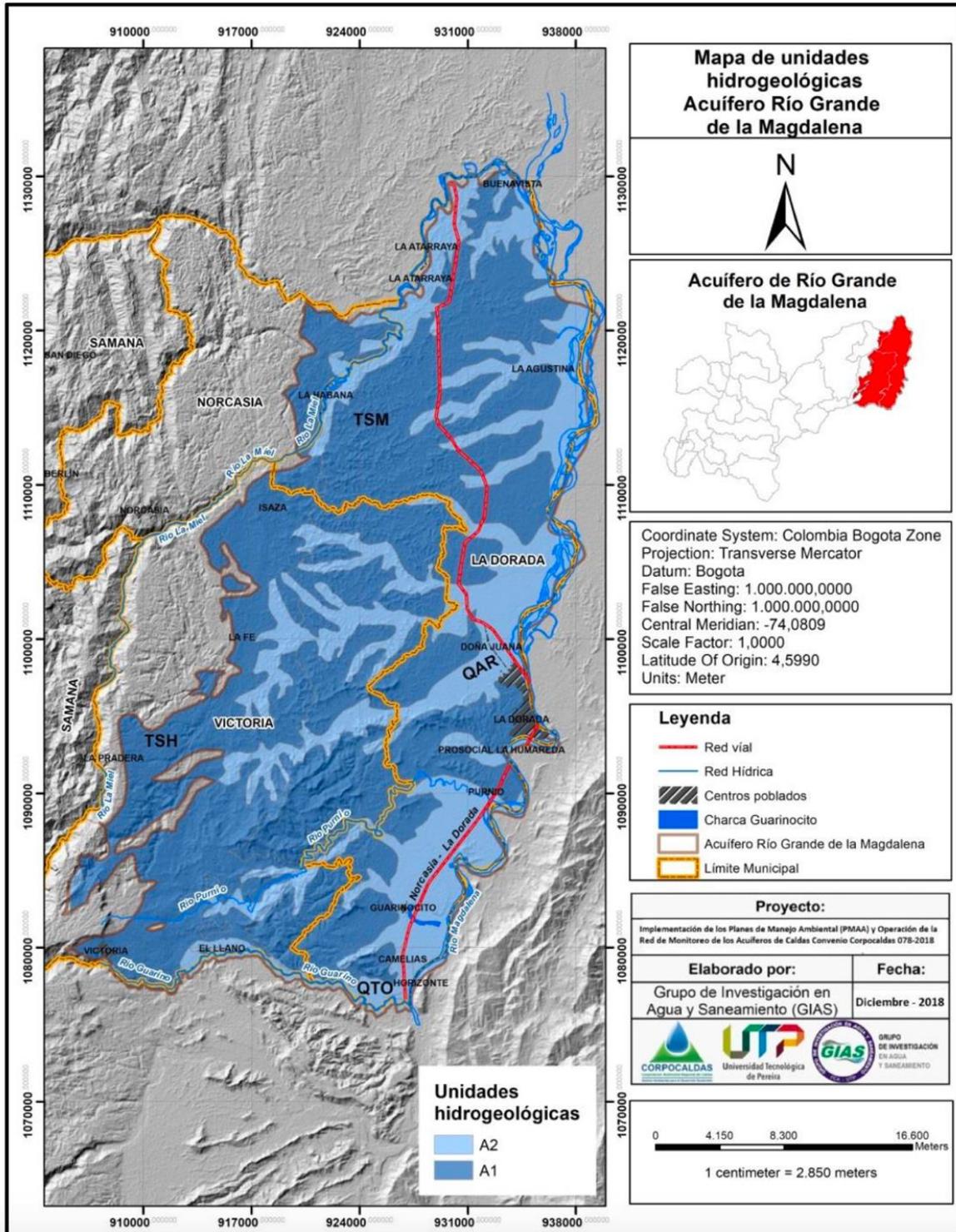


Figura 7. Unidades hidrogeológicas del acuífero río grande de La Magdalena.
Fuente: CORPOCALDAS y UTP (2019b).

 UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA Facultad de Ingeniería	AUNAR ESFUERZOS TÉCNICOS, ADMINISTRATIVOS Y FINANCIEROS ENTRE LA UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA Y LA CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CALDAS (CORPOCALDAS) PARA ELABORAR UNA GUÍA METODOLÓGICA PARA EL TRATAMIENTO TERCIARIO DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS EN ÁREAS RURALES, ORIENTADA A LA PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN ZONAS DE ESPECIAL INTERÉS HIDROGEOLÓGICO; EN EL DEPARTAMENTO DE CALDAS	 Corpocaldas <small>Corporación Autónoma Regional de Caldas</small>
---	---	--

En cuanto al mantenimiento y operación de los STARD en algunos predios hay un desconocimiento de los usuarios sobre las condiciones de operación y mantenimiento, en otros se reporta una frecuencia de mantenimiento semestral (CORPOCALDAS y UTP, 2019).

Tabla 5. Formas de disposición de ARD en las zonas priorizadas del acuífero río grande de La Magdalena.

Manejo de ARD	Las Camelias	La Atarraya	La Agustina	Horizonte	Izasa sede Limones	El Tigre
Sistema Colectivo (STARD)				14		
Red alcantarillado		10				
Pozo de absorción	56	6	4	11	10	1
STARD	1	5	22	1	5	
Sin manejo	1		0		1	1
Disposición directa al suelo o fuente superficial		20	3		1	5
SI	4		5	3	3	2
Total	62	41	34	29	20	9

SI: Predios sin información

Sin Manejo: Correspondiente a viviendas sin unidad sanitaria

Fuente: CORPOCALDAS y UTP (2019).

En el acuífero río Risaralda las principales actividades desarrolladas son agrícolas y pecuarias, lo cual puede incidir en la presencia de nutrientes en el agua por el uso de fertilizantes. En este acuífero, los vertimientos finales domésticos generados en las zonas priorizadas son infiltrados en el suelo y en algunos de los predios visitados el STARD funciona deficientemente y se encuentra deteriorado; en otros, casos ha superado la capacidad para la cual fueron diseñados.

2.4 OBJETIVOS

2.4.1 Objetivo general

Elaborar una guía metodológica para el tratamiento terciario de las ARD en áreas rurales, orientada a la protección de las aguas subterráneas en zonas de especial interés hidrogeológico, particularmente las zonas de recarga directa o indirecta de mayor importancia, en el departamento de Caldas.

2.4.2 Objetivos específicos

Para alcanzar el objetivo general, se formulan los siguientes objetivos específicos:

- Caracterizar los impactos que las aguas residuales pueden tener sobre los sistemas acuíferos y las zonas de recarga.

- Identificar alternativas de tratamiento terciario de aguas residuales domésticas (ARD) que minimicen los impactos sobre los sistemas acuíferos y las zonas de recarga.
- Determinar el proceso para la implementación de la mejor alternativa de tratamiento terciario para la zona de estudio.

2.5 METODOLOGIA

Para el cumplimiento de los objetivos descritos, inicialmente se precisaron los límites de las zonas de especial interés hidrogeológico, en relación a las zonas de interés hidrogeológico, con el fin de cruzar esta información con la ubicación de las actividades de desarrollo urbano concernientes a presencia de viviendas; ello permitió seleccionar conjuntamente las zonas en las que se programó la toma muestras para completar una caracterización de potencial carga contaminante, acoplado a los lineamientos propuestos por Foster e Hirata (2002).

Partiendo de una exhaustiva revisión bibliográfica, considerando la normatividad ambiental inherente a la protección de zonas de recarga y según los niveles de sostenibilidad tecnológica de la zona de interés, luego de evaluar posibles impactos que las ARD podrían tener sobre las aguas subterráneas, se propuso la mejor alternativa de tratamiento terciario para las ARD vertidas y pretratadas en las zonas seleccionadas.

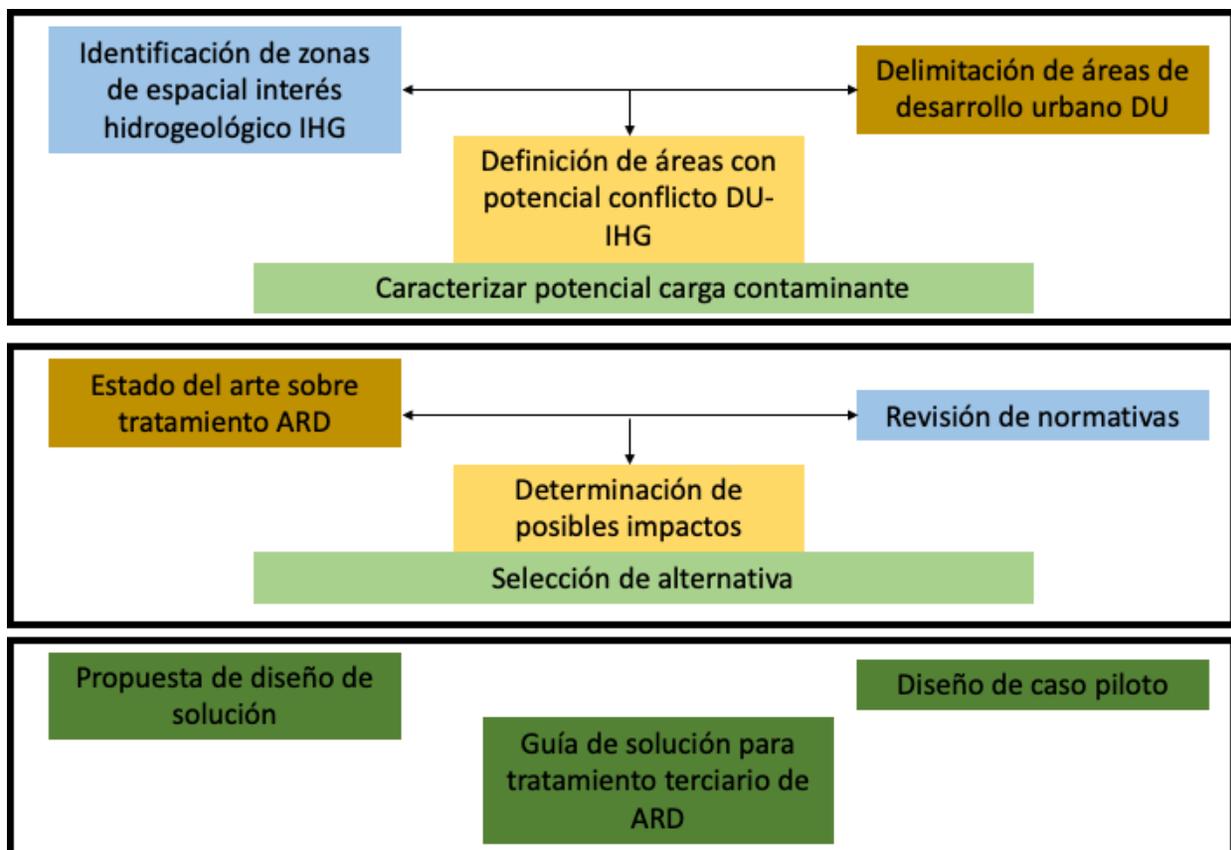


Figura 8. Metodología para el cumplimiento de los objetivos del convenio.

	<p>AUNAR ESFUERZOS TÉCNICOS, ADMINISTRATIVOS Y FINANCIEROS ENTRE LA UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA Y LA CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CALDAS (CORPOCALDAS) PARA ELABORAR UNA GUÍA METODOLÓGICA PARA EL TRATAMIENTO TERCIARIO DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS EN ÁREAS RURALES, ORIENTADA A LA PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN ZONAS DE ESPECIAL INTERÉS HIDROGEOLÓGICO; EN EL DEPARTAMENTO DE CALDAS</p>	
---	--	---

Para la alternativa seleccionada se elaboró una guía de aplicación y se diseñó un ejercicio piloto para un caso particular, acordado con CORPOCALDAS. La metodología se resume en la Figura 8 y en la Tabla 6 se presentan las actividades necesarias para el cumplimiento de los objetivos específicos descritos.

Tabla 6. Actividades para el cumplimiento de los objetivos del proyecto.

OBJETIVOS	ACTIVIDADES
<p>Caracterizar los impactos que las aguas residuales pueden tener sobre los sistemas acuíferos y las zonas de recarga.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Recopilar la información hidrogeológica de las zonas priorizadas en los sistemas acuíferos de interés. • Identificar las características hidrogeológicas y socioeconómicas de las zonas priorizadas para la posible aplicación de sistemas de tratamiento terciario. • Caracterizar la carga contaminante de las ARD tratadas y sin tratar sobre los sistemas acuíferos y zonas de recarga a través de un muestro y revisión de fuentes de información secundarias. • Aplicar la metodología para caracterización de carga contaminante adaptada por Gaviria (2012), de Foster e Hirata (2002), en las zonas priorizadas.
<p>Identificar alternativas de tratamiento terciario de ARD que minimicen los impactos sobre los sistemas acuíferos y las zonas de recarga.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Realizar una revisión bibliográfica del estado del arte acerca de los tratamientos terciarios de ARD tratadas. • Evaluar la aplicación de las alternativas de tratamiento en zonas rurales. • Determinar los impactos de las alternativas en áreas rurales sobre los sistemas acuíferos y las zonas de recarga. • Seleccionar la alternativa de tratamiento que minimice los impactos de esta sobre los sistemas acuíferos y zonas de recarga • Revisar el marco normativo y armonizar lo encontrado con la estrategia de solución planteada.
<p>Determinar el proceso de aplicación de la mejor alternativa de tratamiento terciario para la zona de estudio.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Evaluar las características ambientales de las zonas de interés para la aplicación de la alternativa seleccionada. • Elaborar unos estándares de diseño de acuerdo a la población atendida. • Diseñar un piloto para la aplicación de la alternativa de tratamiento seleccionada en la zona de interés. • Consolidar la información para elaborar una guía metodológica para la aplicación de la alternativa seleccionada en la zona de interés.

Por otro lado, luego de tener los resultados de las actividades anteriores se procedió con el diseño y diagramación de la guía metodológica. Finalmente, con los resultados del estudio se elaborará un artículo para someter a una revista indexada. En el Anexo 9.1 se adjunta el plan operativo definido para la realización del proyecto.

	<p>AUNAR ESFUERZOS TÉCNICOS, ADMINISTRATIVOS Y FINANCIEROS ENTRE LA UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA Y LA CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CALDAS (CORPOCALDAS) PARA ELABORAR UNA GUÍA METODOLÓGICA PARA EL TRATAMIENTO Terciario DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS EN ÁREAS RURALES, ORIENTADA A LA PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN ZONAS DE ESPECIAL INTERÉS HIDROGEOLÓGICO; EN EL DEPARTAMENTO DE CALDAS</p>	
---	--	---

3 POSIBLES IMPACTOS DE LAS AGUAS RESIDUALES SOBRE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

La probabilidad de ocurrencia de alguna acción o circunstancia que pueda afectar negativamente el agua subterránea existente en un acuífero, limitando o disminuyendo la disponibilidad de ella, ya sea porque que pueda verse afectada la cantidad y/o la calidad del recurso, determina una amenaza al sistema hidrogeológico. La presencia o posibilidad de estas potenciales amenazas cobran mayor relevancia si ocurren en las denominadas zonas de especial interés hidrogeológico. En este sentido se planteó el primer objetivo de este estudio: caracterizar los impactos que las aguas residuales pueden tener sobre los sistemas acuíferos y las zonas de recarga.

3.1 ZONAS DE ESPECIAL INTERES HIDROGEOLÓGICO

Las zonas de especial interés hidrogeológico corresponden a las zonas estratégicas para la protección de las aguas subterráneas y la prevención y reducción de los riesgos que puedan afectarlas. Dentro de esta categoría se cuentan: zonas de recarga directa o indirecta de mayor importancia (según jerarquías que establezca la Corporación), zonas de vulnerabilidad extrema y alta; zonas de interacción de aguas superficiales y aguas subterráneas y áreas de ecosistemas interdependientes con el recurso hídrico subterráneo.

Para los propósitos de este estudio se consideran las zonas de recarga según su importancia, teniendo en cuenta que estas se definen en la normatividad colombiana como ecosistemas estratégicos; y las asociadas a suelo rural como suelo de protección. Igualmente se describen las condiciones de vulnerabilidad de los acuíferos estudiados.

3.1.1 Zonas de recarga en los acuíferos de interés

A continuación, se describen las zonas de recarga identificadas a partir de estudios anteriores para los acuíferos: Santágueda–km41, río Risaralda y río grande de La Magdalena.

3.1.1.1 Zonas de recarga para el acuífero Santágueda-km 41

En el año 2009, GEOSUB realizó un análisis de las posibles zonas de recarga para el acuífero Santágueda-km 41, basado principalmente en fotointerpretación de imágenes satelitales. Se identificó que en la zona de estudio los bordes de las cuencas de los ríos Chinchiná, Cauca y Tapias-Tareas están rodeados por una cadena de montañas (límites hidrogeológicos) en forma de herradura, formando hacia el centro una depresión topográfica, la cual favorece la recarga a través de la infiltración y la escorrentía por aguas lluvias desde las partes altas de la cuenca. A partir de lo anterior y con el apoyo y superposición de cartografía de unidades geológicas, el modelo isométrico y las curvas piezométricas disponibles, se diferenciaron tres (3) zonas homogéneas morfoestructuralmente en referencia a recarga hidrológica (Figura 9) (CORPOCALDAS y UTP, 2018).

	<p style="text-align: center;">AUNAR ESFUERZOS TÉCNICOS, ADMINISTRATIVOS Y FINANCIEROS ENTRE LA UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA Y LA CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CALDAS (CORPOCALDAS) PARA ELABORAR UNA GUÍA METODOLÓGICA PARA EL TRATAMIENTO Terciario DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS EN ÁREAS RURALES, ORIENTADA A LA PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN ZONAS DE ESPECIAL INTERÉS HIDROGEOLÓGICO; EN EL DEPARTAMENTO DE CALDAS</p>	
---	--	---

La zona 1 corresponde a la cordillera Central entre el piedemonte y el sistema de fallas de Romeral, está conformada por rocas ígneas básicas, ultrabásicas y rocas metamórficas esquistosas. Entorno montañoso con relieve prominente, con máximas diferencias del orden de 850 m. En esta zona se presenta una permeabilidad secundaria regida por alta densidad de fracturamiento, en dos sistemas principales Norte-Sur (Romeral) y Noreste-Suroeste; este segundo sistema facilita la recarga al corresponder con el gradiente topográfico (CORPOCALDAS y UTP, 2018).

La zona 2 está asociada al sector de Santágueda compuesto por rocas básicas con espesos suelos residuales. Relieve moderado a bajo que circunda el relieve plano de Santágueda, con máximas diferencias de relieve del orden de 500 m. Permeabilidad secundaria regida por fracturamiento de dirección Norte-Sur (CORPOCALDAS y UTP, 2018).

La zona 3 está asociada al sector de piedemonte de la cordillera Central confirmada por rocas sedimentarias continentales con estratos de grava y arcilla. En esta zona se presenta un entorno colimado con máximas diferencias de relieve del orden de 350 m y la permeabilidad identificada es primaria localizada (CORPOCALDAS y UTP, 2018).

Se asume en este estudio que la zona donde aflora el acuífero es considerada como zona de recarga directa.

3.1.1.2 Zonas de recarga para el acuífero río Risaralda

En la cuenca del río Risaralda se identificaron las zonas de recarga con base en la aplicación de la metodología propuesta por Matus et al. (2007), incluyendo factores como la pendiente del terreno, el tipo de suelo, el tipo de roca, la cobertura vegetal y el uso del suelo. Estas fueron categorizadas como muy alta, alta moderada, baja y muy baja (POMCA, 2016).

En la Figura 10 se presentan las zonas de recarga potencial alta en el acuífero río Risaralda. Las áreas de mayor extensión se localizan al Sur-Oeste y Norte-Este del acuífero, específicamente en el piedemonte que cubre el valle del río, definiendo que la recarga se extiende de la zona plana donde se considera una zona de recarga potencial por las actividades en el uso del suelo como el arado y la labranza (CORPOCALDAS y UTP, 2019).

3.1.1.3 Zonas de recarga del acuífero río grande de La Magdalena

Para identificar las zonas de recarga en el acuífero río grande de La Magdalena se utilizó la metodología propuesta por Matus et al. (2009) que considera los factores: pendiente y micro-relieve, tipo de suelo, tipo de roca, cobertura vegetal permanente y uso del suelo. En el mapa de la Figura 11 se presentan las zonas de recarga identificadas para este acuífero (CORPOCALDAS y UTP, 2018c).

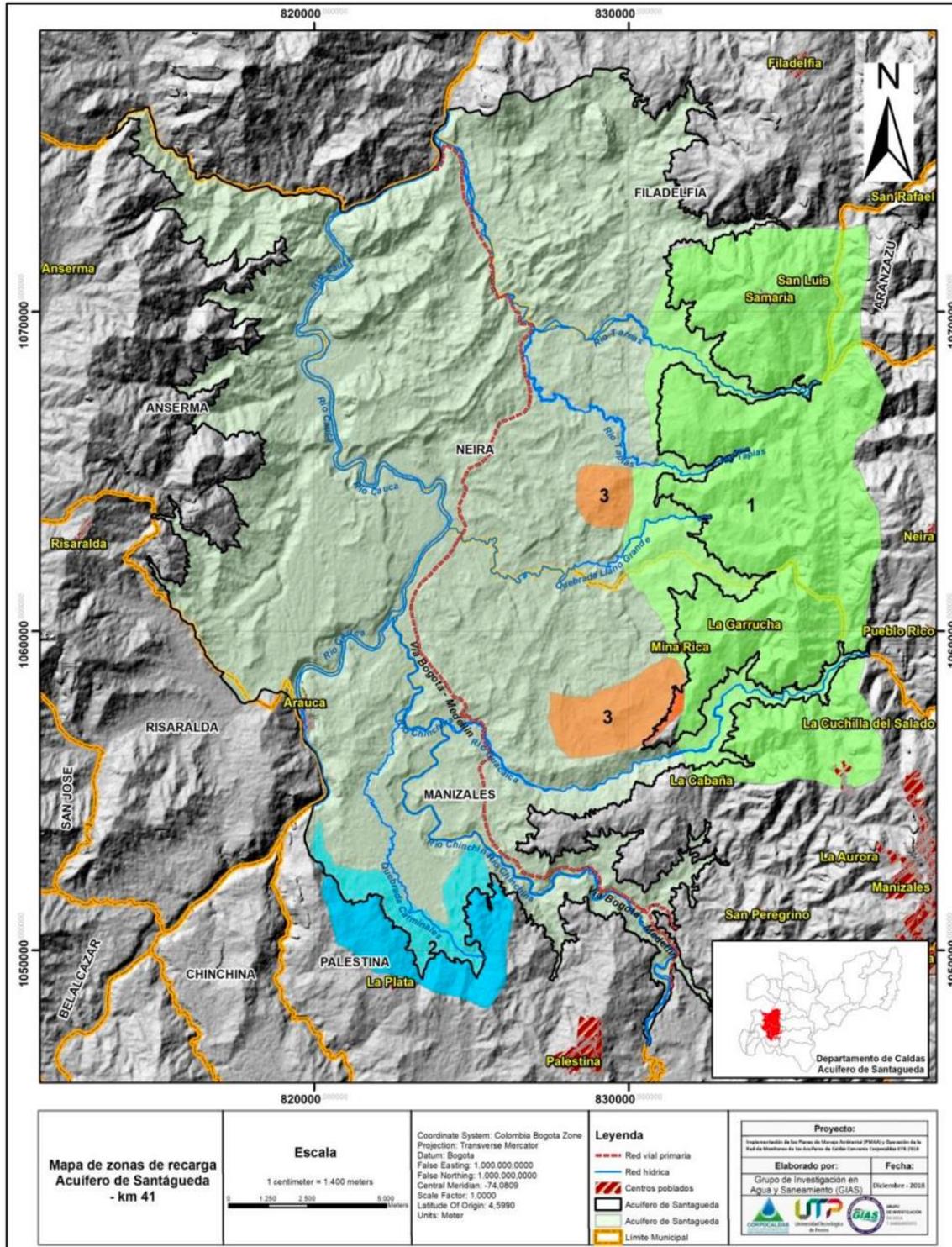


Figura 9. Zonas de recarga para el acuífero Santagüeda-km 41.
Fuente: CORPOCALDAS y UTP (2018).

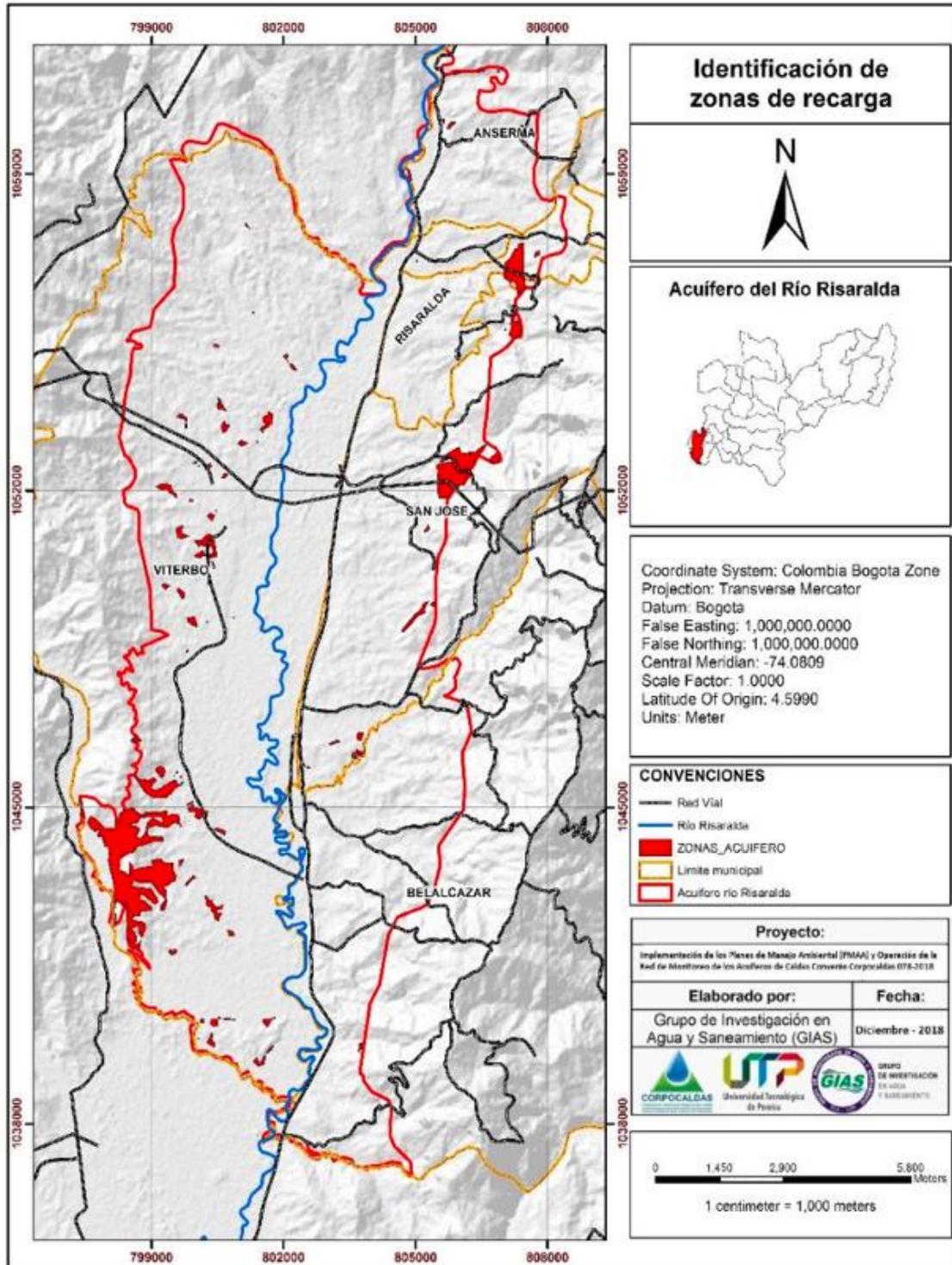


Figura 10. Identificación de zonas de recarga del acuífero río Risaralda.
Fuente: CORPOCALDAS y UTP (2018b).

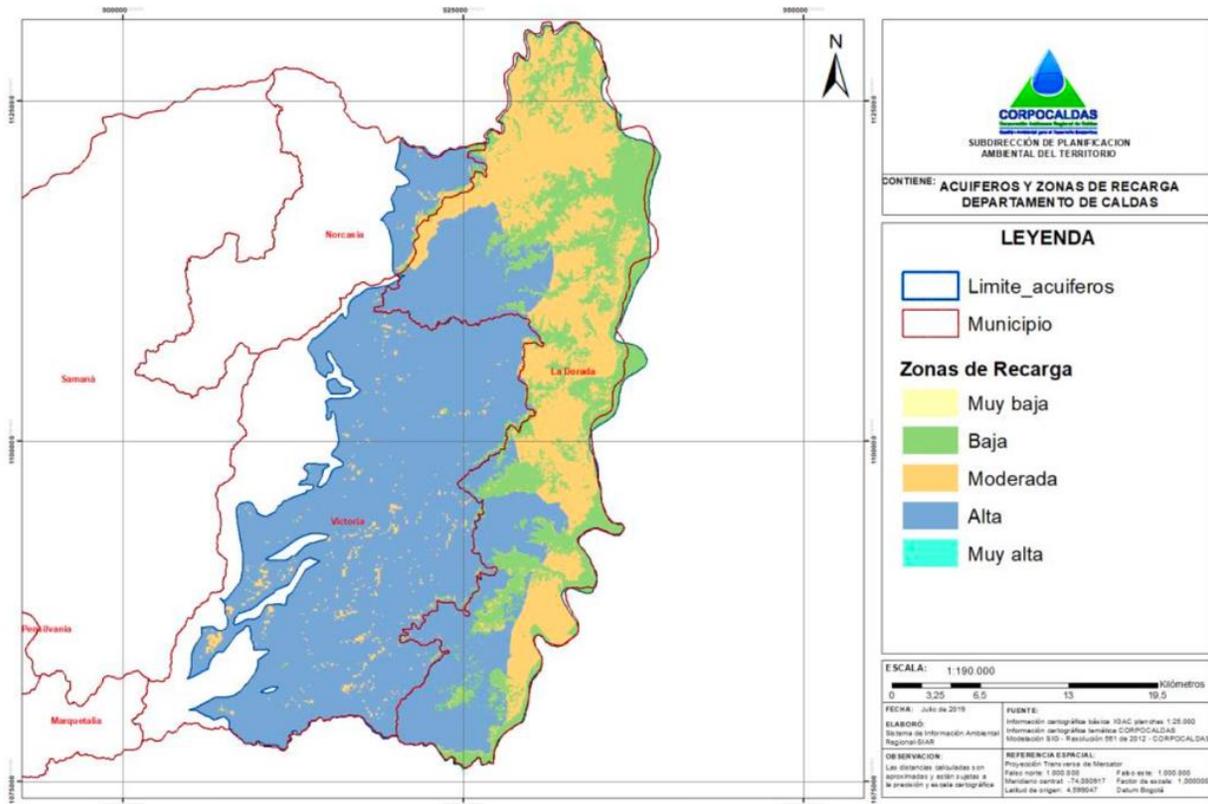


Figura 11. Zonas de recarga para el acuífero río grande de La Magdalena.
Fuente: CORPOCALDAS y UTP (2018c).

3.1.2 Vulnerabilidad intrínseca para los acuíferos de interés

3.1.2.1 Vulnerabilidad intrínseca para el acuífero Santágueda-km 41

Para el análisis de la vulnerabilidad intrínseca del acuífero Santágueda-km41 se aplicaron los métodos “GOD” (Foster e Hirata, 2002) y “DRASTIC”. Como resultado de la integración de las variables de cada método se obtuvieron los mapas con la delimitación de las zonas más susceptibles a la contaminación mediante la superposición de capas temáticas (CORPOCALDAS y UTP, 2018). De acuerdo con lo planteado en el PMAA del acuífero Santágueda-km 41, el método “GOD” a pesar de clasificar con tres variables la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero los resultados obtenidos son más coherentes para la zona de estudio (CORPOCALDAS y UTP, 2018).

De acuerdo con el método GOD, se observa que la vulnerabilidad para los acuíferos asociados con los depósitos Cuaternarios (Flujos de lodo, Santágueda) se presentan vulnerabilidad ALTA y los sistemas acuíferos aluviales, terciarios y Cretáceos, se encuentra en el límite entre BAJA a DESPRECIABLE para los depósitos aluviales (Qal), y BAJA para las otras Formaciones (Figura 12) (CORPOCALDAS y UTP, 2018).

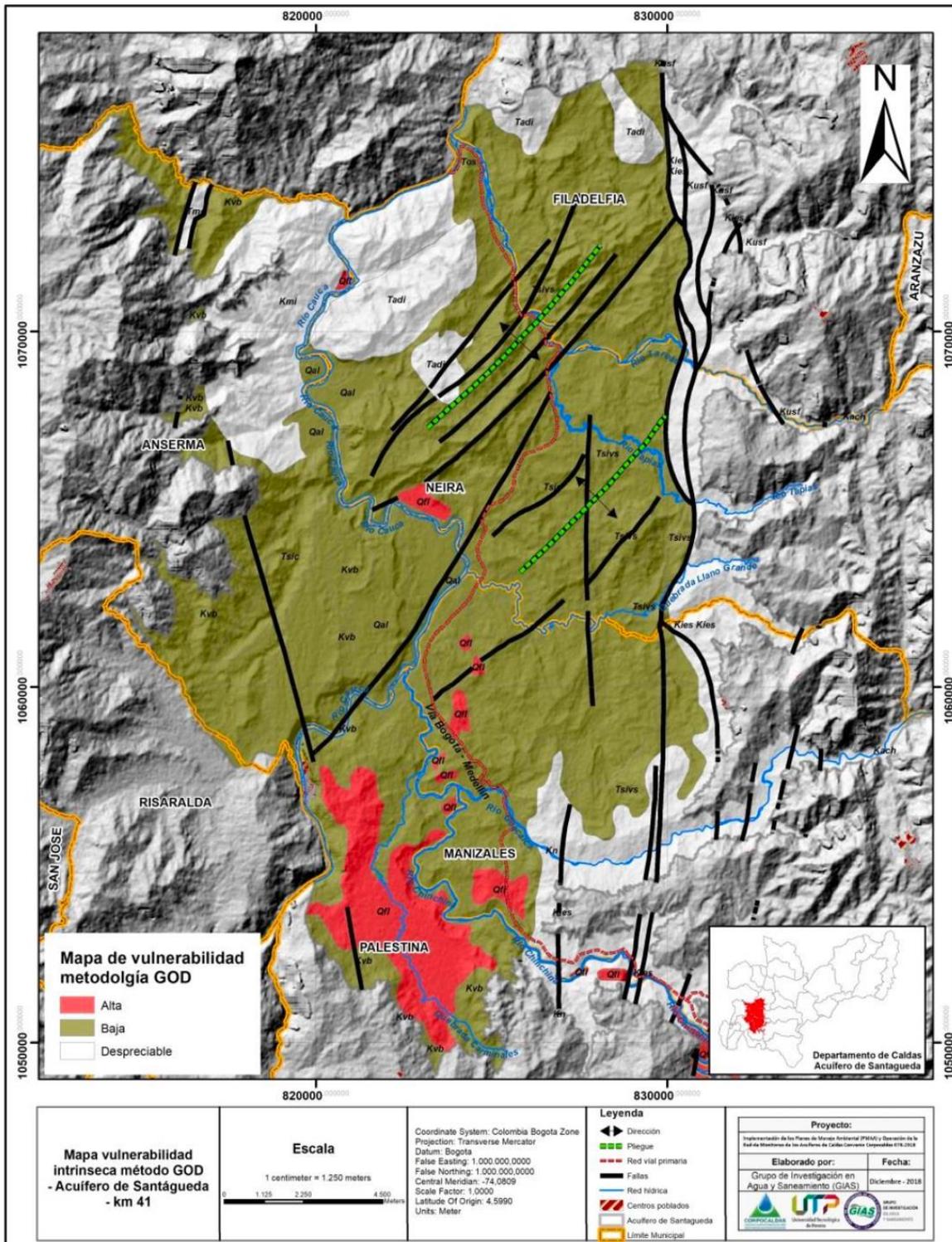


Figura 12. Vulnerabilidad intrínseca para el acuífero Santágueda-km 41.
Fuente: CORPOCALDAS y UTP (2018).

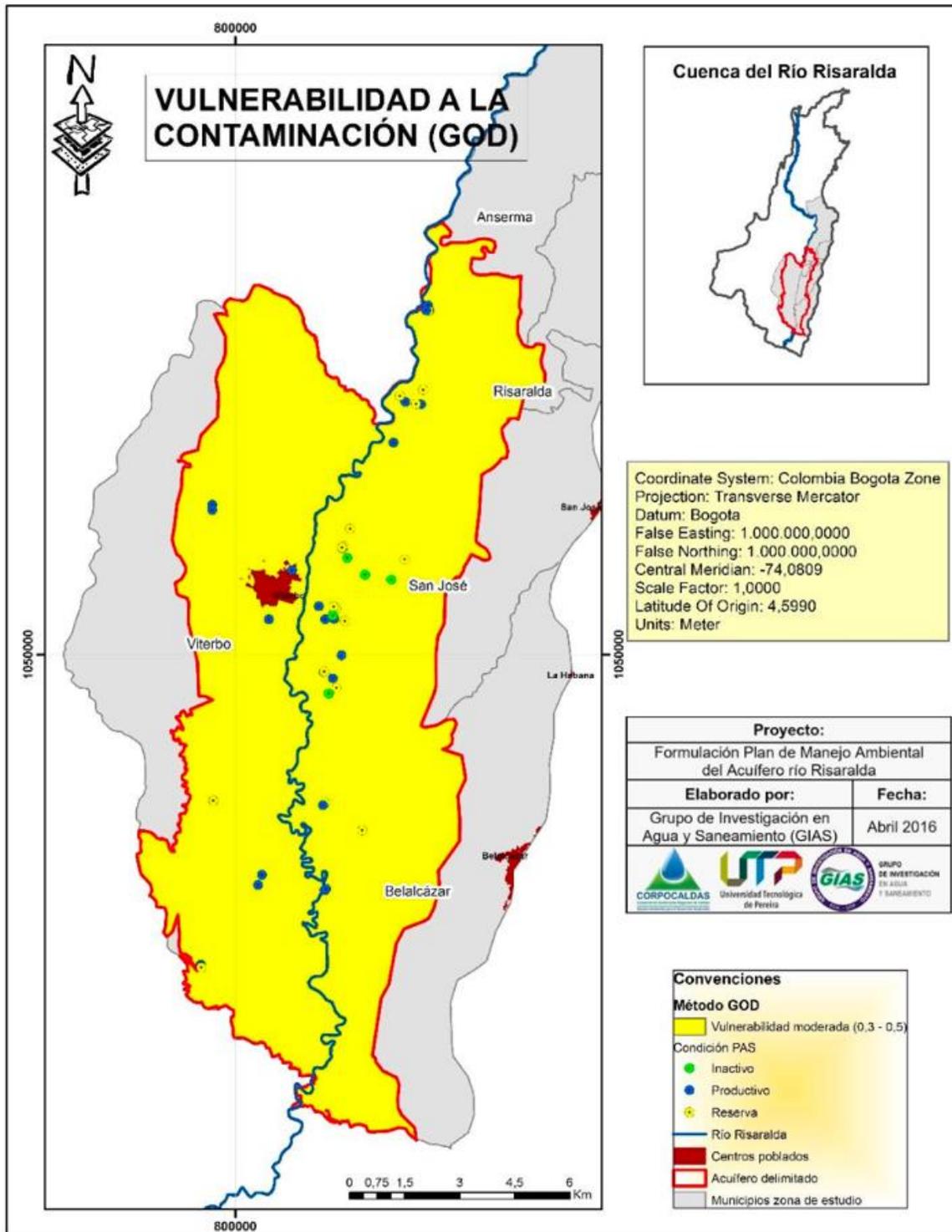


Figura 13. Vulnerabilidad intrínseca para el acuífero río Risaralda.
Fuente: CORPOCALDAS y UTP (2018).

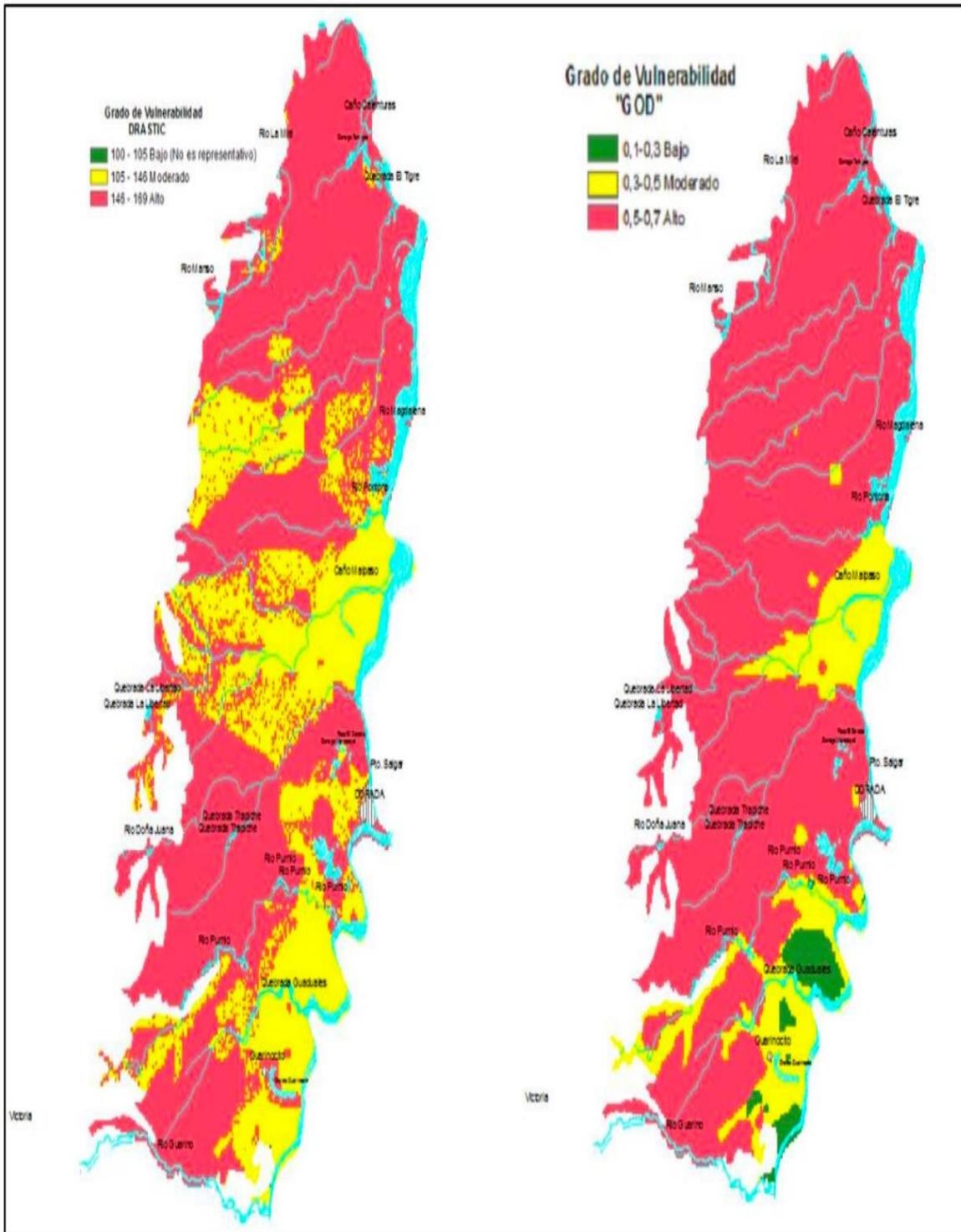


Figura 14. Vulnerabilidad intrínseca del acuífero río grande de La Magdalena.
Fuente: CORPOCALDAS (2015), citado por CORPOCALDAS y UTP (2018).

	<p>AUNAR ESFUERZOS TÉCNICOS, ADMINISTRATIVOS Y FINANCIEROS ENTRE LA UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA Y LA CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CALDAS (CORPOCALDAS) PARA ELABORAR UNA GUÍA METODOLÓGICA PARA EL TRATAMIENTO TERCIARIO DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS EN ÁREAS RURALES, ORIENTADA A LA PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN ZONAS DE ESPECIAL INTERÉS HIDROGEOLÓGICO; EN EL DEPARTAMENTO DE CALDAS</p>	
---	--	---

3.1.2.2 Vulnerabilidad intrínseca para el acuífero río Risaralda

La evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero del río Risaralda en jurisdicción de Caldas se elaboró a partir de la aplicación de la metodología GOD. La clasificación de la vulnerabilidad es MODERADA para toda la zona que comprende el acuífero (Figura 13) (CORPOCALDAS y UTP, 2018).

3.1.2.3 Vulnerabilidad intrínseca para el acuífero río grande de La Magdalena

Para el acuífero río grande de La Magdalena se realizó el cálculo de la vulnerabilidad intrínseca desarrollado por los métodos GOD y DRASTIC. En el mapa de la Figura 14 se presenta el resultado de la aplicación de estas metodologías. Se observa de manera general que los grados de vulnerabilidad moderado y alto predominan en casi toda el área de estudio (CORPOCALDAS 2014, citado en CORPOCALDAS y UTP, 2018c).

3.2 CARACTERIZACIÓN DE LA CARGA CONTAMINANTE DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS (ARD) SOBRE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

Las potenciales amenazas que pueden impactar un acuífero obedecen a causas de origen antrópico o natural. Dentro de las amenazas antrópicas se consideran tanto las relacionadas con el desarrollo urbano como las actividades socioeconómicas que podrían impactar la calidad de las aguas subterráneas, la explotación no planificada que puede acarrear un uso intensivo, y la perturbación de las condiciones físicas del sistema que pueden alterar las propiedades hidráulicas.

La afectación a la calidad del agua, al incorporar sustancias que ocasionan cambios en las características físicas y químicas de estas, genera efectos negativos en la salud humana y pone en riesgo la calidad de los ecosistemas dependientes. La preocupación por la contaminación de las aguas subterráneas es más relevante en los acuíferos no confinados o libres, sobre todo en los lugares donde la zona no saturada es delgada y el nivel freático poco profundo (Universidad de Antioquia & CORPOGUAJIRA, 2011). Sin embargo, bajo una concepción sistémica, la responsabilidad en el conocimiento debe trascender a visualizar y prevenir efectos a largo plazo.

De acuerdo con la propuesta adaptada de Foster e Hirata (2002), Gaviria (2005) establece una ruta para la determinación de Índices de Carga Contaminante (ICC) asociada a distintas actividades humanas, entre ellas las de desarrollo urbano; en este sentido se consideran particularmente aquellas asociadas a inadecuado manejo de las ARD (Tabla 7), bien sea por la insuficiente cobertura en alcantarillado, por el manejo inadecuado de pozos sépticos o de soluciones de tratamiento a ellas, circunstancia que se puede dar tanto en áreas urbanas como rurales.

El impacto que se genera sobre las aguas subterráneas está asociado a cuatro características: clase, intensidad, modo y duración de la carga contaminante. La relación entre estos factores se establece mediante una función que calcula el ICC como un promedio ponderado, en el que cada variable tiene un peso y una calificación, como lo indica la Ecuación 1.

Tabla 7. Categorías de actividades contaminantes asociadas a desarrollo urbano.

Subclase 1	Subclase 2	Subclase 3	Subclase 4	Subclase 5	Categoría
Saneamiento	Aguas residuales	Zona urbana	Alcantarillado		DU1
			Lagunas de oxidación		DU2
			Plantas de tratamiento	Corriente	DU3
				Terreno	DU4
			Descarga de ARD	Corriente	DU5
				Terreno	DU6
				Laguna	DU7
		Zona rural	Alcantarillado		DU8
			Lagunas de oxidación		DU9
			Plantas de tratamiento	Corriente	DU10
				Terreno	DU11
			Descarga de ARD	Corriente	DU12
				Terreno	DU13
				Laguna	DU14
		Zona urbana/rural	Pozo séptico		DU15
			Letrina		DU16
			Zanjas		DU17

Fuente: Gaviria (2005).

$$ICC = W_c \cdot C_c + W_i \cdot C_i + W_m \cdot C_m + W_d \cdot C_d$$

Ecuación 1. Índice de carga contaminante (ICC)

Donde:

ICC: Índice de Carga Contaminante

W_c, W_i, W_m, W_d : pesos relativos para clase, intensidad, modo y duración. están definidos por expertos dentro de la metodología del ICC así:
 $W_c = 0,307, W_i = 0,250, W_m = 0,207, W_d = 0,236$

C_c, C_i, C_m, C_d : calificación para clase, intensidad, modo y duración.

La calificación que cada uno de ellos puede aportar al ICC se establece a partir de su ubicación en los gráficos presentados en la Figura 15, esto de acuerdo con las características del contaminante, la disposición del vertimiento y las condiciones del acuífero.

3.2.1 Clase de contaminante

Los principales compuestos que, provenientes de las aguas residuales, pueden impactar la calidad del agua subterránea son: Demanda Química de Oxígeno (DQO), surfactantes (SAAM), grasas y aceites (G&A), fósforo total (FT) y Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK).

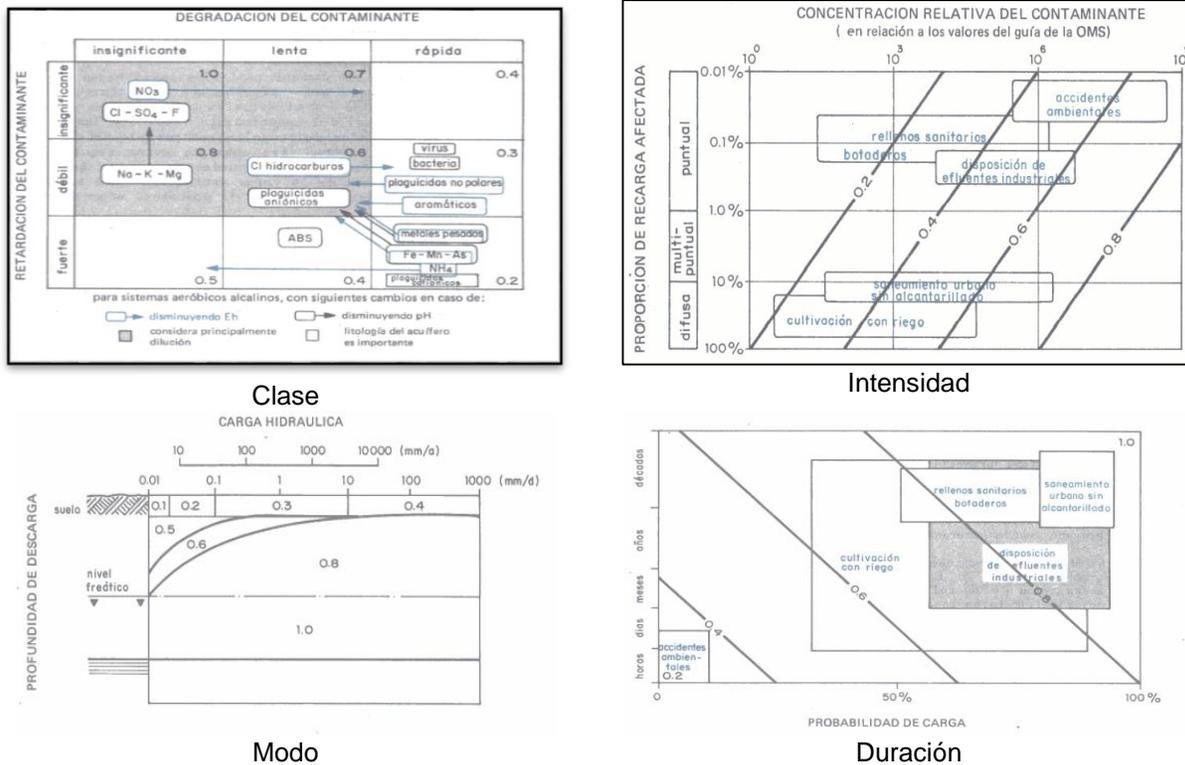


Figura 15. Relaciones de clase, intensidad, modo y duración de cargas contaminantes para ICC
Fuente: Foster e Hirata (2002).

3.2.2 Intensidad

Para evaluar la intensidad se tomaron como referencia las concentraciones límites, establecidas por la Organización Mundial de la Salud, para las clases de contaminantes considerados y, en cada caso, el límite de cuantificación del método de medición y el límite superior según Metcalf y Eddy (2014).

Por otra parte, se considera que, al estudiar viviendas rurales dispersas, esta carga tiene el carácter de multipuntual.

3.2.3 Modo

La disposición de aguas residuales suele hacerse a corrientes, sobre la superficie o en el suelo; en la zona de estudio. Para efectos de este estudio se consideran las ARD dispuestas en el suelo y se tiene en cuenta que, según información dispuesta en los modelos hidrogeológicos conceptuales, la recarga es superior a 100 mm/año.

3.2.4 Duración

La disposición de aguas subterráneas en las zonas rurales, para este caso, se considera una práctica continua.

Luego de aplicar el ICC se puede diferenciar su clasificación de acuerdo con la Tabla 8.

Tabla 8. Intervalos de calificación del ICC.

ICC	Elevado	Moderado	Reducido
Intervalos	1.0-0,61	0,60-0,31	0,30-0

En la Figura 16 se esquematiza en un diagrama de flujo el paso a paso para la aplicación de la metodología de evaluación del ICC: luego de identificar en campo las fuentes potenciales de contaminación, estas se relacionan con una actividad contaminante; para el caso de estudio, sería desarrollo urbano, subclase 1: saneamiento y subclase 2: aguas residuales. Los análisis que se practican a las muestras que se toman en campo permiten identificar y seleccionar los principales potenciales contaminantes que se generan, estos se clasifican según clase, modo, intensidad y duración de la disposición y se calcula el ICC.

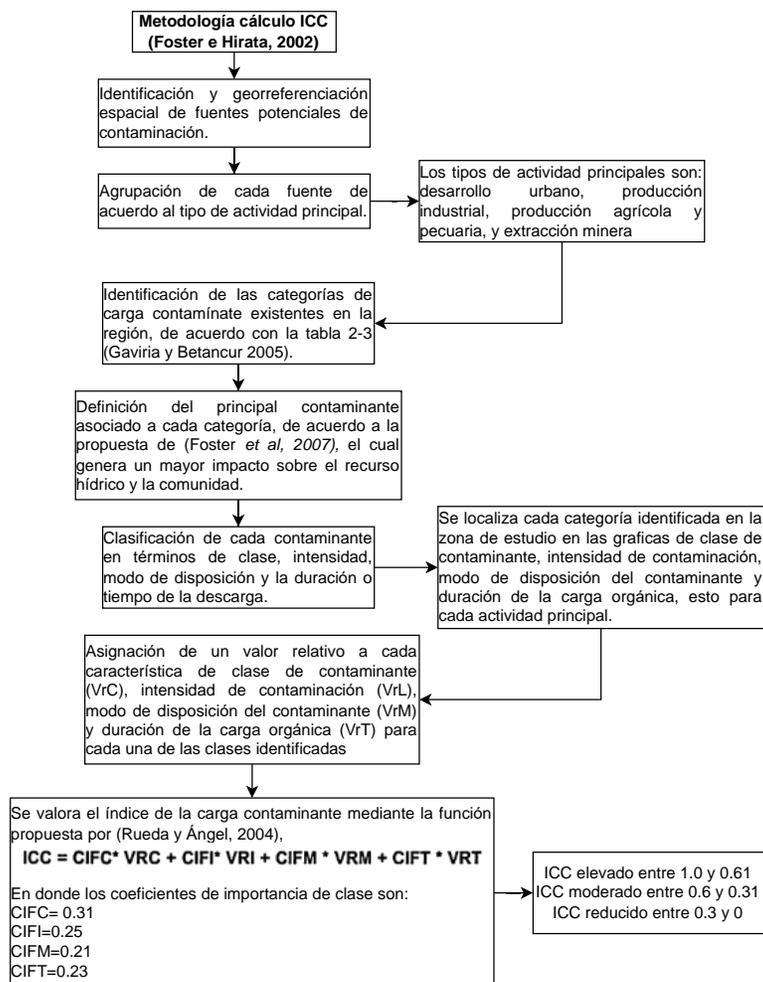


Figura 16. Metodología para evaluar el ICC, según categoría correspondiente a cada actividad.

	<p>AUNAR ESFUERZOS TÉCNICOS, ADMINISTRATIVOS Y FINANCIEROS ENTRE LA UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA Y LA CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CALDAS (CORPOCALDAS) PARA ELABORAR UNA GUÍA METODOLÓGICA PARA EL TRATAMIENTO TERCIARIO DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS EN ÁREAS RURALES, ORIENTADA A LA PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN ZONAS DE ESPECIAL INTERÉS HIDROGEOLÓGICO; EN EL DEPARTAMENTO DE CALDAS</p>	
---	--	---

3.2.5 Aplicación del ICC sobre las aguas residuales en la zona de estudio

Para la caracterización de las ARD que será objeto de la aplicación del ICC se programaron salidas de campo en los tres (3) sistemas de acuíferos (acuífero Santágueda-km 41, acuífero río Risaralda y acuífero río grande de La Magdalena). Las zonas donde se realizaron los muestreos se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9. Cronograma Recorrido de campo en cada acuífero.

Fechas	Municipio	Veredas	Unidad hidrogeológica
22, 23, 24, 25 y 26 de marzo	Palestina	Santágueda	Acuífero Santágueda-km 41
	Viterbo	Asia	Acuífero río Risaralda
		Valle del Risaralda	
3, 4 y 5 de abril	Victoria	Guayabito	Acuífero río grande de La Magdalena
		Canaán	
		Márzala	

La ruta del muestreo en cada unidad hidrogeológica de interés fue seleccionada por un funcionario de CORPOCALDAS encargado de cada zona objeto de estudio, y para ello se definieron tres (3) puntos por sistema acuífero. Los criterios de selección de los sitios de monitoreo incluían que contaran con un sistema séptico completo (trampa de grasas, tanque séptico y filtro anaerobio de flujo ascendente) con un adecuado funcionamiento y donde fuera posible además tomar una muestra de agua residual antes del tratamiento.

El Anexo 9.2 (diario de campo) detalla el itinerario realizado en cada vivienda visitada en los acuíferos estudiados durante el trabajo de campo; además, las Figura 17, Figura 18, y Figura 19 ilustran todos los puntos visitados en cada unidad hidrogeológica: acuífero Santágueda-km 41, río Risaralda y río grande de La Magdalena, respectivamente; además se indica cuáles fueron los puntos en los que fue posible realizar el muestreo de ARD y las visitas fallidas debido a que no era posible recolectar la muestra o porque el STARD se encontraba en mal estado. El Anexo 9.3 presenta el informe detallado de la caracterización del ARD en cada punto estudiado, incluye tanto los datos medidos en campo como los entregados por el laboratorio. En la Tabla 10 se presenta la descripción de los sitios donde se procedió a la toma de muestras.

A partir del muestreo realizado se definió que los compuestos a considerar para la evaluación del ICC, relacionados con las ARD, son Demanda Química de Oxígeno (DQO), surfactantes (SAAM), grasas y aceites (G&A), fósforo total (FT) y Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK). La Tabla 11 muestra las concentraciones de estos parámetros obtenidas de la caracterización del ARD en cada zona de estudio.

Para cada uno de estos compuestos se asignaron los valores para calificación de clase, modo y duración, de acuerdo con lo establecido en cada grafica (Figura 15), las cuales se indican en la Tabla 12. Respecto a la intensidad, con el propósito de escalar las concentraciones obtenidas en la caracterización del ARD con las concentraciones relativas acorde con los límites admisibles por la OMS, se consideraron en cada caso el límite de cuantificación como límite inferior en la escala y el límite superior según la composición típica de ARD para concentración fuerte propuesta por Metcalf y Eddy (2014) (Tabla 13).



UNIVERSIDAD DE ANTOQUIA
Facultad de Ingeniería

AUNAR ESFUERZOS TÉCNICOS, ADMINISTRATIVOS Y FINANCIEROS ENTRE LA UNIVERSIDAD DE ANTOQUIA Y LA CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CALDAS (CORPOCALDAS) PARA ELABORAR UNA GUÍA METODOLÓGICA PARA EL TRATAMIENTO TERCIARIO DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS EN ÁREAS RURALES, ORIENTADA A LA PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN ZONAS DE ESPECIAL INTERÉS HIDROGEOLÓGICO; EN EL DEPARTAMENTO DE CALDAS

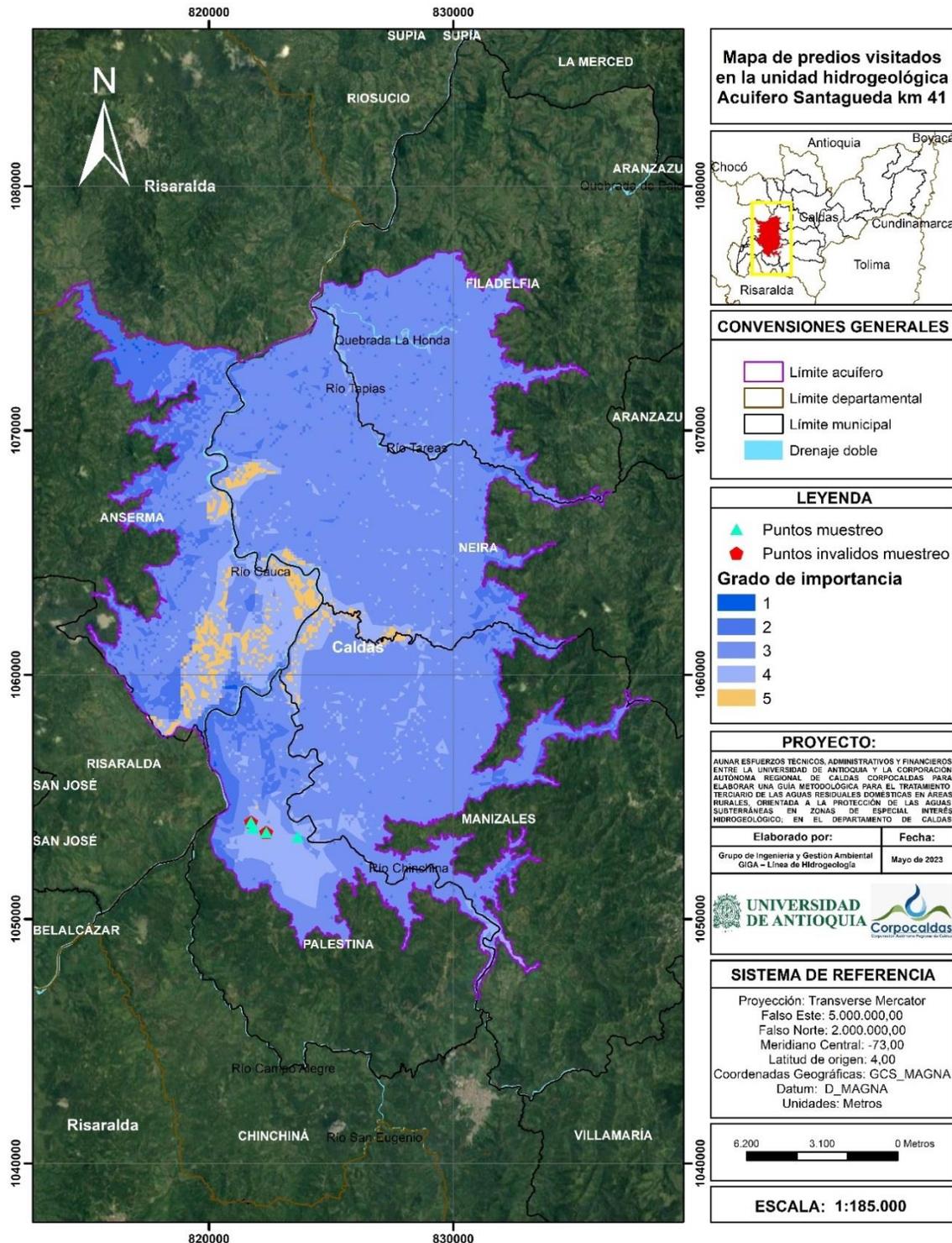


Figura 17. Mapa de predios visitados en la unidad hidrogeológica acuífero Santaguada-km 41.



UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA
Facultad de Ingeniería

AUNAR ESFUERZOS TÉCNICOS, ADMINISTRATIVOS Y FINANCIEROS ENTRE LA UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA Y LA CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CALDAS (CORPOCALDAS) PARA ELABORAR UNA GUÍA METODOLÓGICA PARA EL TRATAMIENTO TERCIARIO DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS EN ÁREAS RURALES, ORIENTADA A LA PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN ZONAS DE ESPECIAL INTERÉS HIDROGEOLÓGICO; EN EL DEPARTAMENTO DE CALDAS

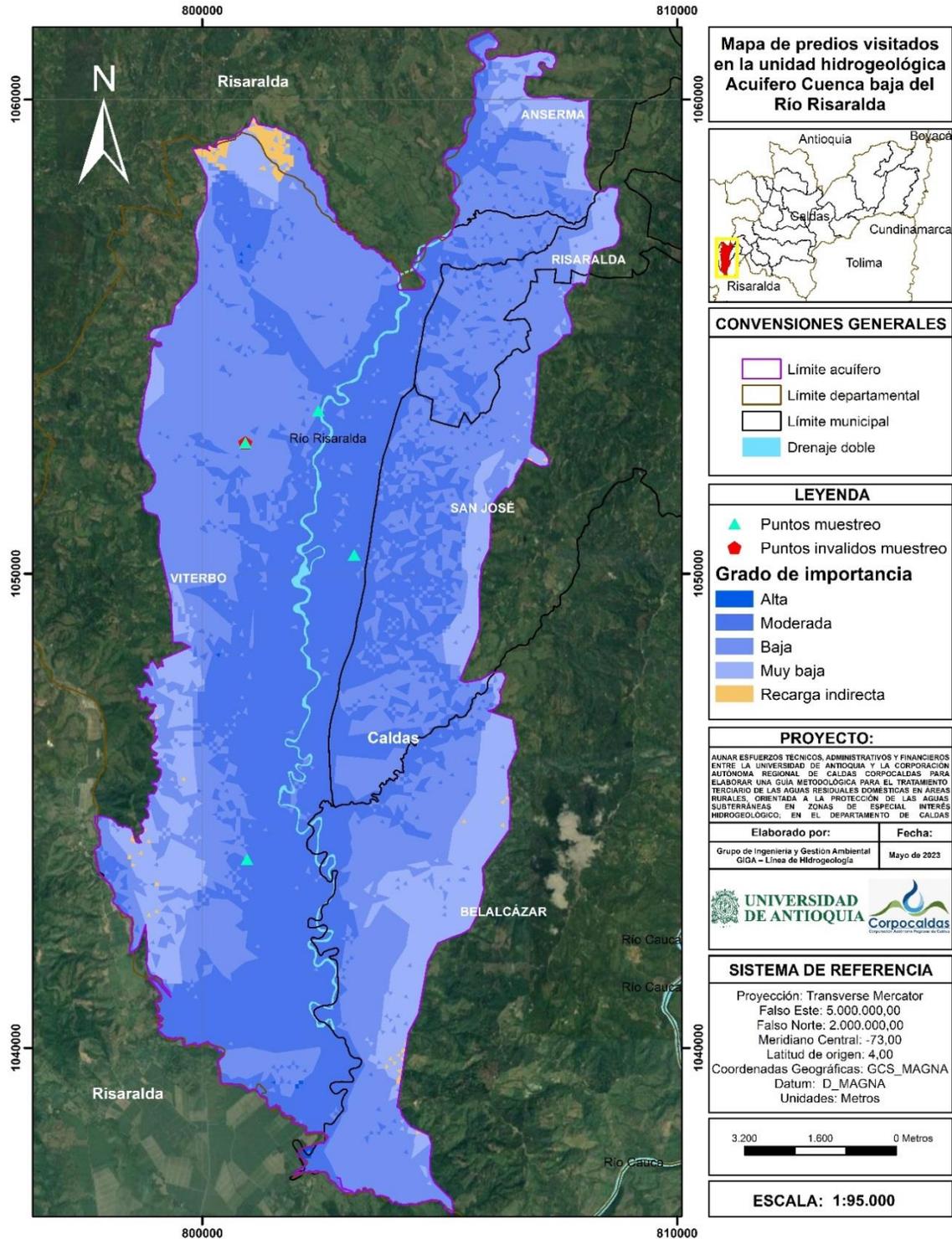


Figura 18. Mapa de predios visitados en la unidad hidrogeológica acuífero rio Risaralda.

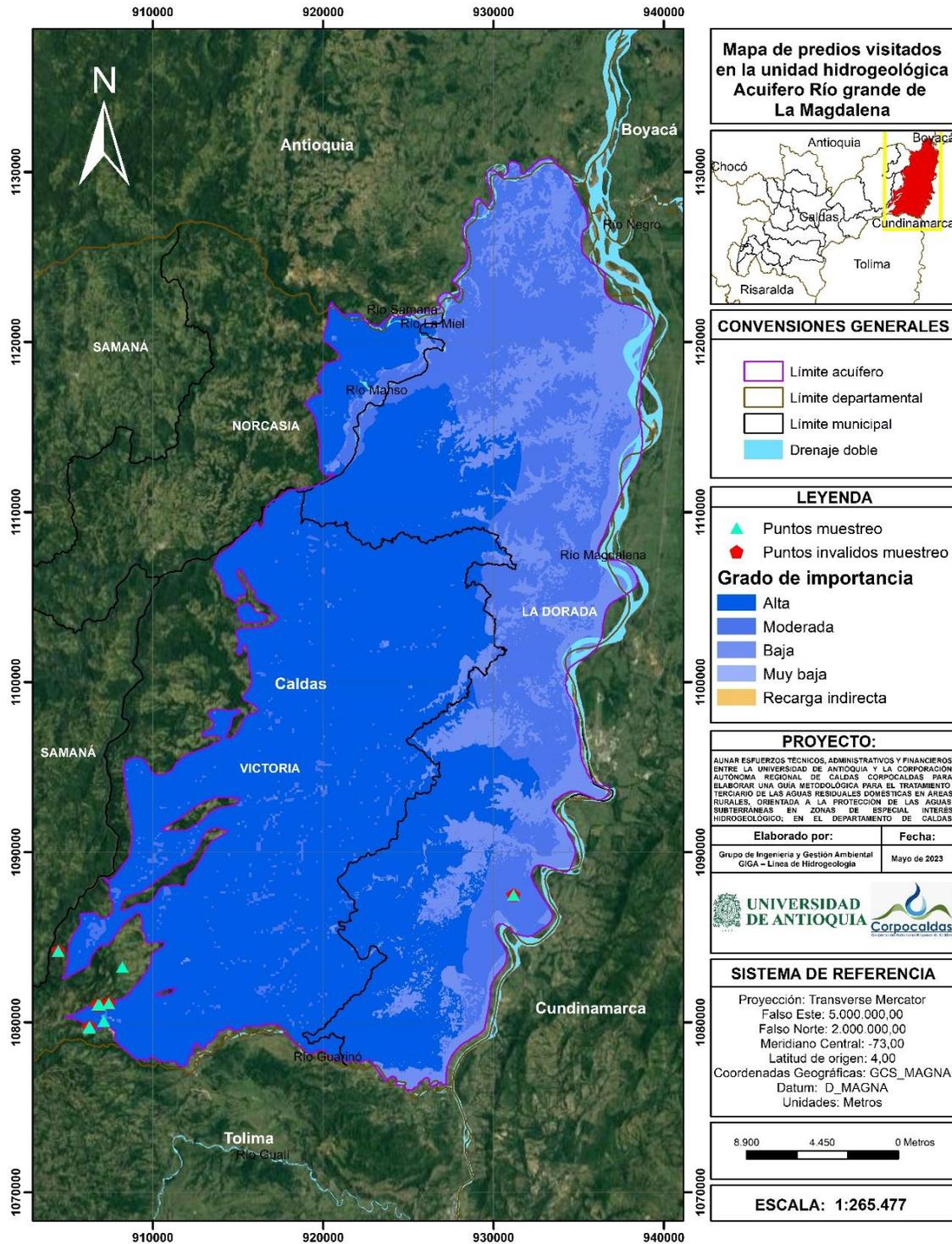


Figura 19. Mapa de predios visitados en la unidad hidrogeológica acuífero rio grande de La Magdalena.

 UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA Facultad de Ingeniería	AUNAR ESFUERZOS TÉCNICOS, ADMINISTRATIVOS Y FINANCIEROS ENTRE LA UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA Y LA CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CALDAS (CORPOCALDAS) PARA ELABORAR UNA GUÍA METODOLÓGICA PARA EL TRATAMIENTO TERCIARIO DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS EN ÁREAS RURALES, ORIENTADA A LA PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN ZONAS DE ESPECIAL INTERÉS HIDROGEOLÓGICO; EN EL DEPARTAMENTO DE CALDAS	 Corporación Autónoma Regional de Caldas
---	---	--

Tabla 10. Descripción de los sitios monitoreados.

Muestra	Acuífero	Municipio/localización	Tipo de muestra
Muestra 01 (Villa Marcela)	Santágueda-km 41	Palestina Condominio Villa Marcela	ARD con tratamiento
Muestra 02 (CAV)		Palestina Centro de Atención Veterinario (CAV)	ARD de tratamiento primario
Muestra 03 (CAV)		Palestina/Centro de Atención Veterinario (CAV)	ARD con tratamiento
Muestra 04 (El Remanso)	Río Risaralda	Viterbo/Condominio El Remanso	ARD con tratamiento
Muestra 05 (Los Alpes)		Viterbo/Condominio Los Alpes	ARD con tratamiento
Muestra 06 (El Danubio)		Viterbo/Hacienda El Danubio	ARD de tratamiento primario
Muestra 07 (Hojas Verdes)	Río grande de La Magdalena	Victoria/Finca don Mauricio Matiz	ARD con tratamiento
Muestra 08 (La Zoraida)		Victoria/Finca doña Zoraida	ARD con tratamiento
Muestra 09 (Santa Lucía)		Victoria/Granja Santa Lucía	ARD con tratamiento
Muestra 10 (Santa Lucía)		Victoria/Granja Santa Lucía	ARD en tratamiento primario

Tabla 11. Resultados caracterización ARD de compuestos considerados para el ICC.

Parámetro/ muestra	DQO	SAAM	G&A	FT	NTK
Unidad	mg O ₂ /L	mg/L	mg/L	mg P/L	mg N/L
Muestra 01 (Villa Marcela)	382,267	3,804	18	8,375	68,833
Muestra 02 (CAV)	81,554	1,436	<8	1,988	21,595
Muestra 03 (CAV)	34,533	<0,100	<8	0,632	5,71
Muestra 04 (El Remanso)	35,098	<0,100	<8	1,02	10,436
Muestra 05 (Los Alpes)	19,433	<0,100	<8	0,319	2,789
Muestra 06 (El Danubio)	179,135	3,824	12	1,317	9,407
Muestra 07 (Hojas Verde)s	383,99	<0,100	20	13,36	117,417
Muestra 08 (La Zoraida)	1145,89	0,325	152,75	16,005	149,584
Muestra 09 (Santa Lucía)	617,294	0,119	55	9,958	11,013
Muestra 10 (Santa Lucía)	3938,101	0,25	1176	78,353	129,345

Nota: Las muestras señaladas en gris se encuentran como agua cruda o con un tratamiento primario.

 UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA Facultad de Ingeniería	AUNAR ESFUERZOS TÉCNICOS, ADMINISTRATIVOS Y FINANCIEROS ENTRE LA UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA Y LA CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CALDAS (CORPOCALDAS) PARA ELABORAR UNA GUÍA METODOLÓGICA PARA EL TRATAMIENTO Terciario DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS EN ÁREAS RURALES, ORIENTADA A LA PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN ZONAS DE ESPECIAL INTERÉS HIDROGEOLÓGICO; EN EL DEPARTAMENTO DE CALDAS	 Corpocaldas <small>Corporación Autónoma Regional de Caldas</small>
---	---	--

Tabla 12. Calificación de clase, modo y duración para los compuestos contaminantes derivados de ARD.

Parámetro	Clase	Modo	Duración
DQO	0,4	0,8	1,0
SAAM	0,7		
G&A	0,7		
FT	1,0		
NTK	1,0		

Tabla 13. Límites de cuantificación y valores máximos propuestos.

Parámetro	Unidad	Límite de cuantificación LCM	Límite superior Metcalf y Eddy (2014)
DQO	mg O ₂ /L	10,00	1016,00
SAAM	mg/L	0,10	10,00
G&A	mg/L	8,00	153,00
FT	mg P/L	0,05	11,00
NTK	mg N/L	1,00	70,00

Fuente: Adaptado de Metcalf y Eddy (2014).

Los resultados de la determinación del ICC se presentan en la Tabla 14. En todos los casos, para todas las muestras, el resultado del ICC es mayor o igual a 0,60, lo que corresponde a un ICC elevado (según la clasificación de la Tabla 8), exceptuando las muestras 02, 03, 04, 05 y 06 para la DQO el valor es aproximado a 0,50, lo que indica un ICC moderado.

Considerando los parámetros definidos, se compararon los ICC obtenidos para las muestras con un tratamiento y las muestras sin tratamiento, con el fin de identificar el impacto que tendría la aplicación de un STARD sobre la carga contaminante generada a las aguas subterráneas. A partir de los resultados del ICC de la Tabla 14, no se observan cambios significativos en la calificación cuando se aplica un tratamiento (entre muestras 02 y 03 y entre 09 y 10). Sin embargo, cuando se comparan los valores obtenidos para el valor relativo de la intensidad (VRI), sí se presentan cambios significativos en la calificación de este factor, por consiguiente, se realiza un análisis respecto a los intervalos establecidos para el ICC con relación al resultado del VRI.

El comportamiento uniforme del ICC en la mayoría de las muestras se debe a que el único valor que varía en el aporte del cálculo es la calificación de la intensidad, ya que esta depende del resultado obtenido en la caracterización del ARD realizada en el trabajo de campo, la cual tiene un peso de importancia de 0,25, de acuerdo con lo definido en la Ecuación 1, lo que representa un mínimo aporte en la variación del resultado del ICC, pues en las calificaciones de modo y duración se tiene un valor fijo en cada uno de los compuestos considerados y en la calificación de clase hay muy baja variación (Tabla 12), sumando entre las tres un peso de importancia de 0,75.

El resultado del VRI para las muestras de ARD con tratamiento y sin tratamiento correspondientes a un mismo STARD muestran que para el caso de la granja Santa Lucía

(muestras 09 y 10), en Victoria, presentó un cambio de un intervalo elevado a uno moderado en el parámetro de la DBO y para las grasas y aceites un comportamiento de elevado a reducido, lo que indica que la aplicación del STARD genera un impacto en la reducción de la carga contaminante, cumpliendo con la remoción de los contaminantes para los que tiene como objetivo tratar, que para este caso es un tratamiento primario y secundario, por consiguiente no se remueve nitrógeno y fósforo. Caso similar ocurre en el STARD ubicado en el Centro de Atención Veterinario (CAV) (muestras 02 y 03), en Palestina, presentando un comportamiento dentro del intervalo bajo para los dos tipos de muestra en todos los parámetros.

Tabla 14. Calificaciones de VRI y del ICC para cada una de las muestras analizadas.

Parámetro/ muestra	Índice	DQO	SAAM	G&A	FT	NTK
Muestra 01 (Villa Marcela)	VRI	0,31	0,31	0,03	0,66	0,87
	ICC	0,60	0,69	0,62	0,87	0,93
Muestra 02 (CAV)	VRI	0,03	0,10	0,00	0,12	0,23
	ICC	0,53	0,64	0,62	0,74	0,77
Muestra 03 (CAV)	VRI	0,00	0,00	0,00	0,02	0,03
	ICC	0,52	0,62	0,62	0,71	0,72
Muestra 04 (El Remanso)	VRI	0,00	0,00	0,00	0,05	0,12
	ICC	0,52	0,62	0,62	0,72	0,74
Muestra 05 (Los Alpes)	VRI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
	ICC	0,52	0,62	0,62	0,71	0,71
Muestra 06 (El Danubio)	VRI	0,12	0,31	0,00	0,10	0,10
	ICC	0,55	0,69	0,62	0,73	0,73
Muestra 07 (Hojas Verdes)	VRI	0,31	0,00	0,04	0,90	0,90
	ICC	0,60	0,62	0,63	0,93	0,93
Muestra 08 (La Zoraida)	VRI	0,90	0,00	0,89	0,90	0,90
	ICC	0,75	0,62	0,84	0,93	0,93
Muestra 09 (Santa Lucía)	VRI	0,51	0,00	0,28	0,80	0,90
	ICC	0,65	0,62	0,69	0,91	0,93
Muestra 10 (Santa Lucía)	VRI	0,90	0,00	0,90	0,24	0,90
	ICC	0,75	0,62	0,84	0,77	0,93

Nota: Las muestras señaladas en gris se encuentran como agua cruda o con un tratamiento primario, mientras que los colores corresponden a la clasificación presentada en la Tabla 8.

Respecto a las demás muestras provenientes de sistemas sépticos, se encuentra que las muestras 04, 05 y 06 tienen un intervalo reducido en todos los parámetros (a excepción de surfactantes en la 06, que es moderado), indicando una disminución en la carga contaminante en la aplicación del sistema séptico. La muestra 01 presenta un intervalo reducido en el parámetro de grasas y aceites y moderado para la DQO y surfactantes; la muestra 07 para los parámetros de grasas y aceites y en surfactantes un intervalo reducido y para la DQO un intervalo moderado, reflejando que en estos sistemas sépticos se logra una reducción en la carga contaminante.

Para el caso de la muestra 08 únicamente en el parámetro de surfactantes muestra un intervalo reducido, lo que sugiere que el STARD no está operando adecuadamente y no genera un impacto en la disminución de la carga contaminante.

4 SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO TERCIARIO EN ZONAS DE INTERES HIDROGEOLÓGICO

El tratamiento de ARD implica una serie de procesos físicos, químicos y biológicos para eliminar los contaminantes antes de ser liberados al medio ambiente. Estos procesos incluyen la eliminación de sólidos suspendidos, materia orgánica, nutrientes como nitrógeno y fósforo, la eliminación de patógenos y otros contaminantes orgánicos. El tratamiento de las aguas residuales domésticas se clasifican en cuatro categorías, las cuales son ilustradas en la Tabla 15.

Tabla 15. Niveles de tratamiento de agua residual.

Nivel de tratamiento	Objetivos	Tecnologías más usadas
Preliminar	Eliminar materiales suspendidos y flotantes de gran tamaño, remover sólidos inorgánicos pesados y las cantidades excesivas de aceites y grasas.	Trampa de grasas Rejillas de cribado Tamices
Primario	Eliminar materiales sedimentables o flotantes dado el caso.	Tanques sépticos Sedimentadores Flotación por aire disuelto
Secundario	Remueve la materia orgánica soluble y coloidal, además elimina sólidos suspendidos que no se removieron en el sistema primario.	Lodos activados Biofiltros Filtro anaerobio de flujo ascendente
Terciario	Remover nutrientes como nitrógeno, fósforo, remanentes de sólidos suspendidos (incluyendo DBO ₅).	Humedales construidos Filtros verdes Filtros intermitentes

Fuente: Lee y Shun (2007).

Dentro del marco del convenio, se evaluaron las tecnologías de tratamiento terciario, las cuales pueden tratar las aguas residuales mediante procesos físicos, biológicos o químicos, y se analizan a continuación.

4.1 ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO TERCIARIO DE ARD

A medida que avanza la tecnología, se han desarrollado diferentes alternativas de tratamiento terciario, en donde se implementan distintos procesos para obtener un efluente final con características que permitan la reutilización del agua residual tratada en zonas donde las fuentes de suministro de agua son limitadas, además la implementación de los sistemas terciarios tiene como fin proteger zonas de importante interés ambiental (Metcalf y Eddy, 2014).

Con el fin de seleccionar la alternativa de tratamiento terciario que se ajuste a la disminución de los impactos que estas pueden tener sobre las aguas subterráneas, se realizó una búsqueda bibliográfica de las alternativas que se han implementado a nivel mundial. Los elementos principales de esta búsqueda se resumen en la Tabla 16, donde se menciona el tipo de

	<p>AUNAR ESFUERZOS TÉCNICOS, ADMINISTRATIVOS Y FINANCIEROS ENTRE LA UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA Y LA CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CALDAS (CORPOCALDAS) PARA ELABORAR UNA GUÍA METODOLÓGICA PARA EL TRATAMIENTO Terciario DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS EN ÁREAS RURALES, ORIENTADA A LA PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN ZONAS DE ESPECIAL INTERÉS HIDROGEOLÓGICO; EN EL DEPARTAMENTO DE CALDAS</p>	
---	--	---

Tabla 16. Descripción de alternativas de tratamiento terciario.

Proceso	Descripción del sistema	Características	Bibliografía
TRATAMIENTOS BIOLÓGICOS			
<p>Humedal construido de flujo superficial (FLS)</p>	<p>El agua fluye horizontalmente sobre la superficie del suelo con vegetación desde un punto de entrada hasta el punto de descarga. Contienen plantas acuáticas que tienen sus raíces en una capa de suelo en el fondo del humedal con agua que fluye a través de las hojas y tallos de las plantas. Los sistemas de humedales no producen biosólidos ni lodos residuales que requerirían tratamiento subsiguiente y disposición.</p>	<p>El tamaño de los sistemas de humedales FLS va de pequeñas unidades para tratamiento en el sitio de efluentes de tanques sépticos hasta grandes unidades de más de 16.888 hectáreas. Por lo general más grandes, debido a la limitada interacción del agua con un medio de soporte. Los intervalos oscilan entre 3 a 5 m²/habitante. Requieren un área relativamente extensa, especialmente si se requiere la remoción de nitrógeno o fósforo. El tratamiento es efectivo y requiere muy poco en cuanto a equipos mecánicos, electricidad o la atención de operadores adiestrados.</p>	<p>Gordon <i>et al.</i> (2021) Gunes <i>et al.</i> (2021) U.S.EPA (2000)</p>
<p>Humedal construido de lecho sumergido y flujo subsuperficial (VSB)</p>	<p>Contienen un lecho de medios (como roca triturada, piedras pequeñas, grava, arena o tierra) que ha sido plantado con vegetación acuática en la superficie. Cuando se diseña y opera correctamente, las aguas residuales permanecen debajo de la superficie del lecho, fluyendo horizontalmente por el medio de soporte en contacto con las raíces y los rizomas de las plantas y no son visibles ni están disponibles para la vida silvestre. Los sistemas de humedales no producen biosólidos ni lodos residuales que requerirían tratamiento subsiguiente y disposición.</p>	<p>Los humedales subsuperficiales proporcionan tratamiento efectivo en forma pasiva y minimizan la necesidad de equipos mecánicos, electricidad y monitoreo por parte de operadores calificados. Requiere un área extensa y de largos tiempos de retención para lograr una remoción de amoníaco por nitrificación biológica, debido a la disponibilidad limitada de oxígeno. Los humedales de flujo horizontal tienen un intervalo típico entre 3 a 5 m² per cápita. Mientras el nivel subsuperficial de flujo se mantenga, se elimina el riesgo de mosquitos y vectores, además se evita que niños y mascotas estén expuestos al agua residual parcialmente tratada.</p>	<p>Badejo <i>et al.</i> (2017) MAVDT (2000) U.S.EPA (2000b) Rodríguez <i>et al.</i> (2022b)</p>
<p>Humedal construido evaporativo</p>	<p>Es un sistema de flujo vertical ascendente subsuperficial, modificados. El ARD ingresa en el sistema a través de una cámara de recepción en el fondo</p>	<p>El área superficial de los sistemas depende de la cantidad y la calidad de las aguas residuales que se van a tratar, de la precipitación anual local, el clima y la evapotranspiración de la vegetación que se va a</p>	<p>Valencia (2014) Paulo <i>et al.</i> (2019)</p>

Proceso	Descripción del sistema	Características	Bibliografía
	del tanque, donde se produce la digestión anaeróbica de la materia orgánica. A medida que aumenta el nivel del agua en el sistema, las capas superiores de grava y arena también se inundan, hasta que el agua alcanza la capa superior de suelo, donde las fuerzas capilares, el viento y el calor, así como la absorción por las raíces de las plantas, eliminan el agua a través de la evapotranspiración, mientras que los nutrientes son eliminados por la incorporación de las plantas. Si se diseña adecuadamente, no se produce ningún efluente, excepto en casos de sobrecarga hidráulica severa.	emplear. Por ejemplo, en el caso de Brasil, para una vivienda de 2 personas en la ciudad de Campo Grande, se estimó un área de 4 m ² y 1 m de profundidad, plantando arboles bananeros, Taioba y Beri. Son sistemas ecológicos que no implican consumo de energía eléctrica, no necesitan insumos químicos, y requieren de una simple operación y mantenimiento.	
Fotobiorreactor de consorcios de microalgas	En estos sistemas se permite una penetración eficiente de la luz, las microalgas viven en estrecha asociación con otros microorganismos formando un consorcio mixto de microalgas, bacterias, protozoos y otros organismos. Las bacterias son las principales responsables de la eliminación de carbono orgánico mientras liberan dióxido de carbono y metabolitos, como la vitamina B 12, que ayudan al crecimiento de las microalgas. A su vez, las microalgas eliminan los nutrientes inorgánicos de nitrógeno y fósforo, así como los contaminantes emergentes del agua tratada.	Es una alternativa sostenible con bajas emisiones de gases de efecto invernadero, pero se utilizan menos debido a su alto costo de capital y uso de energía, lo que aumentaría drásticamente los costos de tratamiento de aguas residuales, además de requerir personal capacitado. El espacio de tierra que ocupa este sistema es alrededor de tres veces menor que los sistemas <i>raceway</i> convencionales; y por su versatilidad el sistema es sencillo de escalar ya que se pueden interconectar más módulos de acuerdo al volumen y carga orgánica del efluente a tratar, lo que permite un mantenimiento más sencillo del sistema. La recuperación eficiente de la biomasa algal es complicada y solo es posible mediante técnicas costosas como la floculación-flotación o centrifugación.	Morais et al. (2022)
Estanque de <i>raceway</i> abiertos	Tiene una estructura muy simple que consta de un canal cerrado y una rueda	Los reactores más utilizados son estanques de <i>raceway</i> abiertos, que tienen bajos costos de capital	Barroso et al. (2022) Morais et al. (2022)

Proceso	Descripción del sistema	Características	Bibliografía
(Sistema de estanque de canal abierto para el cultivo de microalgas)	de paletas. La canalización cerrada se puede construir utilizando materiales de bajo costo, como cemento y plásticos. Las microalgas se inoculan y se cultivan en la canaleta, y la rueda de paletas promueve la circulación de medios de cultivo o aguas residuales en la canaleta. Dado que el sistema de estanques de canalización abierta funciona al aire libre, las microalgas podrían realizar la fotosíntesis bajo la luz solar.	y operación, no obstante, requieren de personal capacitado, pero son más fáciles de operar en comparación con un sistema de fotobiorreactor. Tienen grandes requerimientos de tierra debido a la baja columna de agua necesaria para la penetración de la luz, que tiende a ser corta, alrededor de 15 a 30 cm. Por esta razón, los <i>raceways</i> suelen presentar relaciones volumen/áreas muy altas, de 150 a 300 L/m ² . La recuperación eficiente de la biomasa algal es complicada y solo es posible mediante técnicas costosas como la floculación-flotación o centrifugación.	
Zanja de oxidación	Es una modificación del sistema de lodos activados, es un proceso de tratamiento biológico de lodos que utiliza largos tiempos de retención de sólidos, y también puede ser operado para lograr una desnitrificación parcial. La ventaja principal es la capacidad de lograr la eliminación de nitrógeno, mediante la aireación extendida, en donde el tiempo de retención del tanque de aireación es entre 4 a 5 veces más que en el tiempo de proceso de lodos activados.	Es un sistema eficiente y de complejidad operacional alta. Requiere un área de terreno más grande que otras opciones de tratamiento de lodos activados. Esto puede resultar costoso, limitando la viabilidad de las zanjas de oxidación en áreas urbanas, suburbanas u otras áreas donde los costos de adquisición de terrenos son relativamente altos. Es utilizado comúnmente en pequeñas comunidades y zonas rurales. Los costos de operación son elevados y se requiere de personal capacitado para operar el sistema. Las operaciones energéticamente eficientes resultan en costos de energía reducidos en comparación con otros procesos de tratamiento biológico.	Gao et al. (2006) U.S.EPA (2000c)
Filtro Intermitente de Arena (ISF)	La aplicación de aguas residuales discontinuas puede crear un ciclo de fases alternas de "inundación/húmedo" y "drenaje/secado" que actúa como una bomba pasiva para expulsar y aspirar aire en el medio de arena para facilitar los procesos aeróbicos y anóxicos transportados por biopelículas bacterianas, las cuales no deben de	Son sistemas que tienen lechos de filtración entre 0,45 y 0,91 m de profundidad, con medios filtrantes cuidadosamente clasificados. Los ISF tienen bajos requerimientos de energía y son fácilmente accesibles para el monitoreo y no requieren personal calificado para funcionar eficientemente, no obstante, se requiere mantenimiento regular (pero mínimo). Si los medios de filtración apropiados no están disponibles localmente, los costos podrían ser más	Achak et al. (2019) U.S.EPA (1999) EPA (1980)

Proceso	Descripción del sistema	Características	Bibliografía
	saturarse.	altos. Además, los costos de construcción son moderadamente bajos, y la mano de obra es mayoritariamente manual. Los ISF se pueden instalar para combinar con el paisaje que lo rodea.	
Sistema de Infiltración Subsuperficial	Se divide principalmente en diferentes escenarios de aplicación en cuatro tipos: sistema de pozo de filtración, sistema de zanja de drenaje, sistema de cámara y sistema Niimi. Los cuerpos principales del mecanismo de eliminación de nitrógeno en SWIS involucran el suelo, las plantas y los microorganismos, entre los cuales los microorganismos realizan la mayor parte del trabajo de eliminación de nitrógeno.	Se ha utilizado ampliamente en el tratamiento descentralizado de aguas residuales rurales debido a su bajo costo, bajo consumo de energía, alta eficiencia, estructura simple, disponibilidad de materiales locales y mantenimiento conveniente. El uso de diferentes tipos de rellenos optimiza la permeabilidad, el rendimiento de adsorción y complementa las fuentes de carbono del sistema; no obstante, el costo de construcción se eleva. El intervalo recomendado de sedimentos de tasa de carga hidráulica es de 0,01 a 0,08 m ³ /m ² -d, y se ajusta de acuerdo con la calidad específica del agua para obtener un mejor efecto de eliminación de nitrógeno.	Yang et al. (2022)
Laguna de maduración	Utilizados para depurar efluentes de otros procesos biológicos; se diseñan para mantener las condiciones aeróbicas en toda la profundidad del líquido, son poco profundos de 0,6 a 1,5 m. El oxígeno disuelto se obtiene a través de la fotosíntesis y la aireación de la superficie, se utilizan comúnmente como tratamientos de pulimento y usualmente se implementan para eliminar patógenos.	Es un sistema que funciona por flujo a gravedad, por lo tanto, no necesita de electricidad, ahorrando costos operacionales, y su operación es relativamente sencilla y no es necesario tener personal capacitado. El requerimiento de área es extenso, se ha estimado de 3 a 5 m ² per cápita.	Silva et al. (1995) USEPA (1973) Von Sperling y Chernicharo (2005) Arceivala y Shyam (2007a)
Laguna con lenteja de agua	Se pueden utilizar de manera efectiva en el tratamiento de aguas residuales debido a que crecen de forma abundante recuperando nutrientes como el nitrógeno y fósforo, además que pueden ser cosechadas fácilmente	El requerimiento de terreno generalmente puede ser de hasta alrededor de 6 m ² per cápita, para una detención de 20 días para obtener un efluente de alta calidad. Los nutrientes de las aguas residuales se recuperan y se transforman en subproductos ricos en proteínas fáciles de recolectar. La lenteja de agua	EI-Shafai et al. (2007) Arceivala y Shyam (2007b)

 <p>UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA Facultad de Ingeniería</p>	<p>AUNAR ESFUERZOS TÉCNICOS, ADMINISTRATIVOS Y FINANCIEROS ENTRE LA UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA Y LA CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CALDAS (CORPOCALDAS) PARA ELABORAR UNA GUÍA METODOLÓGICA PARA EL TRATAMIENTO Terciario DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS EN ÁREAS RURALES, ORIENTADA A LA PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN ZONAS DE ESPECIAL INTERÉS HIDROGEOLÓGICO; EN EL DEPARTAMENTO DE CALDAS</p>	 <p>Corpocaldas Corporación Autónoma Regional de Caldas</p>
---	--	---

Proceso	Descripción del sistema	Características	Bibliografía
	<p>para usarse como alimento para peces. Estos sistemas se utilizan para proporcionar un tratamiento adicional a los efluentes y así brindar una desnitrificación mejorada previo a su descarga.</p>	<p>tiene alta productividad, alto contenido de proteína, gran absorción de nutrientes y fácil manejo, cosecha y procesamiento, por lo tanto, no requiere de personal capacitado y constante monitoreo. Además, tiene un período de crecimiento prolongado, bajo contenido de fibra y reduce el desarrollo de mosquitos.</p>	
Filtro verde de descarga cero	<p>Los filtros verdes son un método de tratamiento de aguas residuales que utiliza la vegetación y el suelo para eliminar los contaminantes en el efluente. El sistema consiste en la aplicación de las aguas residuales a un área con vegetación, ya sea forestal o herbácea, para que el sistema suelo-vegetación-microorganismos degrade los contaminantes. El efluente es sometido a procesos de evapotranspiración, filtración, biodegradación, adsorción y captación de nutrientes por la vegetación. Además, si el efluente tratado es recolectado y recirculado sobre el filtro verde, se puede lograr un sistema "descarga cero".</p>	<p>La profundidad suele ser entre 0,9 y 1,2 m. El tamaño de la superficie del sistema dependerá de la cantidad y calidad de las aguas residuales a tratar, así como de la cantidad de precipitación que se presente en la zona donde se construya. Para que este sistema opere adecuadamente se debe garantizar que el filtro permanezca siempre inundado, para así optimizar los procesos de degradación y remoción de contaminantes. Para dispersar las aguas residuales se utiliza un sistema que distribuya de manera uniforme el agua residual sobre el área de cultivo verde, esto mediante una tubería perforada. Adicionalmente cuenta con una unidad de drenado, la cual almacena los drenajes que puedan surgir en el área de cultivo para luego ser incorporada nuevamente al área de cultivo del filtro verde.</p>	Rodríguez et al. (2022)
Humedal de flujo vertical subsuperficial	<p>En los humedales de flujo vertical subsuperficial el agua fluye de manera descendente. Esta se vierte y se distribuye homogéneamente sobre toda la superficie del lecho, percola y fluye entre el material filtrante de relleno. El material de relleno que se usa en los lechos es típicamente material inerte (arenas, gravas) que favorece la adhesión y crecimiento de biopelículas</p>	<p>El lecho debe tener una profundidad efectiva de alrededor de 1,0 m y se diseñan con flujo intermitente, es decir, tienen fases de llenado, reacción y vaciado. La intermitencia en la alimentación mejora mucho la transferencia de oxígeno y por tanto el medio granular se encuentra en condiciones más oxidadas si se compara con lo que se observaría en un sistema de tipo horizontal. Esto permite que los sistemas verticales puedan operar con cargas superiores a las de los</p>	Vidal y Hormazábal (2018) García y Corzo (2008)

Proceso	Descripción del sistema	Características	Bibliografía
	y, además, el medio sirve para facilitar el arraigo de las plantas y la filtración del agua que se trata. Una vez el agua percola a través del lecho, se recoge en el fondo y se evacúa por medio de tubería, para permitir que el lecho se recargue de aire y el siguiente pulso tenga suficiente oxígeno para facilitar los procesos de degradación.	horizontales (entre 20 y 40 g DBO/m ² -día) y por tanto ocupan menor espacio para tratar un mismo caudal. Los sistemas se pueden dimensionar tomando 2,5 m ² per cápita. El sistema de distribución del caudal de agua del afluente está en la superficie, debe repartir el agua homogéneamente y sobre toda la superficie del lecho.	
Filtro percolador	Se basa en comunidades microbianas autóctonas adheridas a medios granulares o sintéticos en procesos de filtración profunda para biotransformar sustancias químicas orgánicas, nitrógeno, fósforo y constituyentes metálicos disueltos. La aireación de este sistema puede ser natural o inducida.	El uso de materiales sintéticos que tienen mejor porosidad, área de superficie alta y resiliencia a la obstrucción facilita una mayor carga, en comparación con los medios granulares, lo que da como resultado un menor requerimiento de área, pero el costo de construcción y operación incrementan. Para aumentar la eficiencia del proceso en cuanto a la remoción de nutrientes, es necesario airear el sistema, por lo cual se requiere electricidad para su correcto funcionamiento. Los filtros de baja tasa se utilizan mejor para servir a comunidades pequeñas o viviendas unifamiliares en las que se desea una operación simple y resistente. El requerimiento de tierra varía de 0,5 a 0,7 m ² per cápita, con profundidades de 1,8 a 3,0 m.	Chen et al. (2022) Rout et al. (2021) Arceivala y Shyam (2007c)
Tratamiento terrestre de filtración rápida (TT RI)	También conocido como tratamiento del acuífero del suelo, y utiliza el ecosistema del suelo para tratar las aguas residuales. Esta tecnología consiste en aplicar el agua residual en embalses poco profundos construidos sobre depósitos permeables de suelo altamente poroso. El tratamiento incluye filtración, absorción, intercambio iónico, precipitación y acción microbiana. A medida que el agua residual se percola	TT RI es un tratamiento de aguas residuales simple y de bajo costo. El proceso es muy fiable con suficientes periodos de descanso y es adecuado para plantas pequeñas donde la experiencia del operador es limitada. Requiere de un área significativa para el tratamiento, entre 0,4 a 4 ha, con beneficios secundarios mínimos, como los que son posibles con otros sistemas de tratamiento natural (es decir, producción de cultivos o bosques, mejora del hábitat, etc.). Es muy flexible en términos de ubicación del sitio, a	U.S. EPA (2002)

Proceso	Descripción del sistema	Características	Bibliografía
	a través del suelo, esta puede ser recolectada o puede fluir hacia cuerpos de agua superficial o acuíferos libres. En zonas donde los acuíferos son muy profundos, se utiliza tubería para recuperar el agua tratada y utilizarla para irrigación o usos industriales.	menos que se pretenda recargar y recuperar las aguas subterráneas.	
Tratamiento terrestre de filtración lenta (TT SI)	En este tratamiento el agua residual se aplica en un suelo vegetado, tal que los nutrientes que contiene contribuyan al crecimiento de plantaciones o el mantenimiento de parques, pastos y bosques. El efluente puede filtrarse a las aguas subterráneas nativas o a desagües subterráneos o pozos para la recuperación de agua y la reutilización del efluente. Los desagües subterráneos sirven para evitar la acumulación de agua subterránea debajo del sitio, para controlar el flujo de agua subterránea y para minimizar el movimiento de lixiviados a la propiedad adyacente. Si bien se puede alcanzar un agua percolada de alta calidad. Esta es la tecnología que más espacio requiere comparada con los otros tratamientos terrestres. Resulta una opción económica y atractiva respecto a sistemas de tratamiento convencionales.	El filtro lento se caracteriza por ser un sistema sencillo, limpio y a la vez eficiente para el tratamiento de agua. Comparado con el filtro rápido, requiere de áreas más grandes para tratar el mismo caudal, aproximadamente entre 8,62 a 86,17 ha/m ³ -min, por lo tanto, tiene mayor costo inicial. Sin embargo, su simplicidad y bajo costo de operación y mantenimiento lo convierte en un sistema ideal para zonas rurales y pequeñas comunidades. Los requisitos operativos, laborales, químicos y energéticos son significativamente reducidos, y existe una rentabilidad económica del uso y reutilización de agua y nutrientes para proporcionar cultivos comercializables; no obstante, es necesario una investigación exhaustiva de la idoneidad del sitio antes de su implementación.	U.S. EPA (2002b)
Reactor secuencial por lotes (SBR)	Consiste en un sistema de lodos activados en una sola unidad operativa lo que requiere fases de llenado, reacción, sedimentación y vaciado de manera repetida y continua. En el	El sistema SBR requiere una pequeña extensión de terreno, son útiles para áreas donde la tierra disponible es limitada, además los ciclos dentro del sistema se pueden ajustar para alcanzar remociones deseadas; no obstante, este sistema necesita un	U.S.EPA (1999b) Rout et al. (2021)

Proceso	Descripción del sistema	Características	Bibliografía
	<p>proceso de aireación, controlado por computadora, el afluente se expone a condiciones anaeróbicas y aeróbicas en el reactor discontinuo. Una parte del lote se recicla a la unidad anóxica para la eliminación adicional de nitrógeno.</p>	<p>mayor nivel de sofisticación, especialmente para sistemas más grandes, de unidades de tiempo y controles; mayor nivel de mantenimiento asociado con controles más sofisticados, interruptores y válvulas automáticas, por consiguiente se requiere de altos costos de operación, construcción y mantenimiento, y de un nivel avanzado y complejo de operación, haciendo que esta tecnología sea insostenible en las regiones rurales.</p>	
<p>Reactor biológico de discos (RBC)</p>	<p>Consiste en un disco giratorio que se sumerge parcialmente en una unidad de reactor de flujo continuo. Con cada rotación del disco, la biopelícula microbiana adherida al disco queda expuesta a las aguas residuales de manera intermitente. El tratamiento está mediado tanto por los organismos suspendidos en las aguas residuales como por la biopelícula adherida a los discos giratorios.</p>	<p>Los sistemas RBC son comúnmente implementadas en comunidades pequeñas, pero también existe la posibilidad de encontrarlas en instalaciones de mayor tamaño. Los requisitos de terreno para su instalación suelen ser bastante pequeños, menores a 0,1 m² per cápita. En cuanto a la eliminación de lodos, para el caso de plantas pequeñas se pueden mantener en un tanque o laguna (con la adición de cal si se desea) para ser transportados periódicamente y así ser dispuestos finalmente, lo que representa un costo adicional. Respecto a los requerimientos energéticos, estos suelen ser más altos con el objetivo de remover el nitrógeno, por lo que puede ser necesario contar con energía adicional para la eliminación de lodos. Además, es necesario contar con personal capacitado para operar correctamente el sistema.</p>	<p>USEPA (1992) Arceivala y Shyam (2007c)</p>
<p>Biorreactor de lecho fluidizado (FBR)</p>	<p>En este tipo de reactor se pasa un fluido que con la velocidad suficiente viaja a través de las partículas del lecho y las suspende en la masa líquida. El AFBR puede ser operado en forma aeróbica, anaeróbica o anóxica y combina las mejores características de lodos activados y filtros percoladores. El FBBR es un proceso de crecimiento</p>	<p>Es una tecnología probada en el laboratorio y piloto, pero no se ha utilizado ampliamente en el tratamiento de aguas residuales a gran escala. Este proceso produce menos de un tercio de los lodos biológicos que el proceso de lodos activados convencional. También se puede utilizar para reducir el tamaño y el requerimiento de área del sistema. Además, es mucho mejor en el manejo y la recuperación de cargas dinámicas (es decir, volumen</p>	<p>Van de Graaf et al. (1996) Dornelles et al. (2023) Nelson et al. (2021)</p>

Proceso	Descripción del sistema	Características	Bibliografía
	<p>adherido: los microorganismos se adhieren al medio fluidizado y forman una biopelícula en la superficie. La fluidización en la columna es causada por el agua residual recirculante y/o por la corriente de aire, si el proceso incluye aireación. Las principales ventajas de los FBR son el aumento del área de interfaz biopelícula-líquido, la alta concentración de biomasa inmovilizada, la transferencia de masa mejorada y la operación con un tiempo de retención de líquido más corto. Estos biorreactores se pueden ejecutar en un sistema de columna simple o doble, según el proceso de tratamiento que se lleve a cabo.</p>	<p>y concentraciones variables del afluente) que los sistemas actuales. En general, se ha demostrado que el FBR es un medio muy eficaz para tratar aguas residuales y es capaz de tratar volúmenes más grandes de aguas residuales utilizando un volumen de reactor más pequeño y un tiempo de residencia más corto. Además, su diseño compacto tiene potencial para sistemas de tratamiento de aguas residuales más aislados y localizados geográficamente. Este proceso requiere de personal capacitado y los gastos operativos aumentan respecto a la energía de fluidización requerida, además los costos de capital iniciales suelen ser elevados</p>	
TRATAMIENTOS QUÍMICOS			
<p>Intercambio iónico</p>	<p>El intercambio iónico es un proceso en el que se intercambian iones con carga similar entre la fase acuosa y la fase de resina sólida. Las resinas de intercambio iónico catiónicas intercambian iones positivos y las aniónicas intercambian iones negativos. Los tipos de resinas de intercambio iónico son: resinas catiónicas de ácido fuerte, resinas catiónicas de ácido débil, resinas aniónicas de base fuerte, resinas aniónicas de base débil y resinas quelantes selectivas de metales pesados. Este proceso puede utilizarse para remover contaminantes inorgánicos como el nitrato, fluoruro, arseniato, uranio, selenio, entre otros.</p>	<p>El tratamiento de aguas residuales por intercambio iónico implica una secuencia de pasos operativos, en donde un sistema normalmente se conforma de dos o más lechos de resinas contenidas en depósitos de presión con bombas adecuadas, tuberías y equipos auxiliares para la regeneración. Los depósitos de presión suelen tener 4 m de diámetro y una capa de resina de 0,6 a 1,5 m de profundidad. La capacidad de la resina para intercambiar iones y la cantidad de regenerante requerida determinan el rendimiento y la economía del intercambio iónico. Para garantizar el contacto del líquido con la resina y minimizar las fugas, la profundidad mínima del lecho es de 61 a 76 cm. El caudal de tratamiento puede variar entre 0,27 y 0,67 m³/min-m³. El caudal de regenerante es de 0,13 a 0,27 m³/min-m³. Un volumen de agua de enjuague de 4 a 13,4 m³, aplicado a un caudal de</p>	<p>OMS (2018) Guerrero y Anaya (2019) Arceivala y Shyam (2007d)</p>

Proceso	Descripción del sistema	Características	Bibliografía
		0,13 a 0,20 m ³ /min-m ³ , generalmente será suficiente para lavar un lecho de regenerante residual. Este sistema es altamente eficiente en la remoción de nutrientes, no obstante, su alto costo de construcción y la complejidad operativa hacen que este sistema resulte ser insostenible en algunas localidades.	
TRATAMIENTOS FISICO			
Filtración por membranas: Microfiltración Ultrafiltración Nanofiltración Ósmosis inversa	Los procesos de membrana de más importancia en el tratamiento del agua son: microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración y ósmosis inversa. Son procesos físicos de separación en el que los materiales que contaminan el agua (esencialmente sustancias disueltas) quedan retenidos en poros que varían en su tamaño dependiendo del tipo de membrana, para los cuales se tiene que: microfiltración: 0,01 a 12 µm, ultrafiltración: 0,002 a 0,03 µm, nanofiltración: 0,001 a 0,01 µm, ósmosis inversa: 0,001 a 0,0001 µm. Estos procesos son eficientes para la desalación y en la remoción de contaminantes orgánicos e inorgánicos específicos.	La configuración de membrana más utilizada en el tratamiento y reutilización de aguas residuales es la de fibra hueca ya que tienen el área de superficie más alta para un espacio determinado. Por lo general, se requiere el reemplazo de la membrana cada 3 a 5 años. La tasa de flujo por unidad de área de membrana depende del espesor, la composición química de la alimentación, la porosidad de la membrana, el tiempo de operación, la presión a través de la membrana y la temperatura del agua de alimentación. Para microfiltración las tasas de flujo promedian entre 400 y 1600 L/m ² -d; ultrafiltración varían de 400 a 800 L/m ² -d; nanofiltración las tasas de flujo varían entre 200 y 800 L/m ² -d; ósmosis inversa varían de 300 a 500 L/m ² -d. La operación en este tipo de procesos juega un papel fundamental, puesto que el rendimiento del sistema va a depender de los pretratamientos para evitar el ensuciamiento de la membrana. El tratamiento por este tipo de procesos son lo suficientemente competentes en la eliminación de nutrientes, no obstante, el ensuciamiento y costo de las membranas y su operación compleja, hacen que este sistema sea insostenible en regiones rurales.	OMS (2018) Arceivala y Shyam (2007d) Rout et al. (2021)

	<p>AUNAR ESFUERZOS TÉCNICOS, ADMINISTRATIVOS Y FINANCIEROS ENTRE LA UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA Y LA CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CALDAS (CORPOCALDAS) PARA ELABORAR UNA GUÍA METODOLÓGICA PARA EL TRATAMIENTO TERCIARIO DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS EN ÁREAS RURALES, ORIENTADA A LA PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN ZONAS DE ESPECIAL INTERÉS HIDROGEOLÓGICO; EN EL DEPARTAMENTO DE CALDAS</p>	
---	--	---

tratamiento, se describen los procesos a implementar, sus principales características y las fuentes bibliográficas consultadas.

La implementación de tecnologías que utilizan procesos físicos y químicos para tratar las aguas residuales puede resultar en un gasto financiero excesivo. Investigaciones han comprobado que los tratamientos físicos son mucho más costosos debido a la aplicación de membranas, las cuales no son tan eficientes, ya que eliminan aproximadamente el 10% de los nutrientes totales, además el ensuciamiento de estas representa más costos y complicaciones. Asimismo, el tratamiento químico utiliza la dosificación de productos químicos para reducir la concentración de nutrientes en el efluente, no obstante, este método es costoso y peligroso en su manipulación y almacenamiento, además de generar más lodos que aumentan los costos operativos y de mantenimiento (Rout et al., 2021). Por tanto, los métodos convencionales de tratamiento físico y químico no son suficientes para cumplir con las estrictas normas de eliminación de nutrientes que se exigen en algunos países, como en Estados Unidos. Esta situación ha impulsado el desarrollo y la investigación de tecnologías de tratamiento biológico (Rout et al., 2021).

Los métodos biológicos naturales se presentan como una alternativa sostenible para pequeñas y medianas comunidades debido a su alta eficiencia, bajos costos de operación, mantenimiento y facilidad de construcción; no obstante, la selección de la tecnología depende del análisis de diferentes criterios integrales enfocados en las necesidades particulares que pueda presentar una comunidad (Bernal et al., 2015).

4.2 METODOLOGIA DE SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS PARA LA APLICACIÓN DE TRATAMIENTO TERCIARIO EN ZONAS RURALES

La selección de tecnologías sostenibles para el tratamiento de ARD en pequeñas y medianas poblaciones en Colombia y América Latina es un desafío debido a las diferentes características sociales, topográficas, tecnológicas, demográficas, económicas y climatológicas de cada región (Bernal et al., 2015). Como parte de las estrategias orientadas a dar solución a esta situación el Instituto CINARA ha desarrollado desde 1999 una estrategia para seleccionar tecnologías de control de la contaminación por ARD. En 2004, en colaboración con IDEAM y UTP, se formalizó un convenio para continuar con el proceso y formular un modelo conceptual de selección de tecnología llamado SELTAR (Selección de Tecnología para el Control de la Contaminación por Aguas Residuales Domésticas). Considerando nueve (9) factores temáticos, los cuales se ilustran en la Figura 20.

A nivel institucional en el país, no se han desarrollado más modelos conceptuales de selección de tecnología para el tratamiento de ARD, no obstante, se han formulado guías para determinar la mejor alternativa de tratamiento. El instituto CINARA en conjunto con la Universidad del Valle, desarrollan una guía de selección matricial, en donde integran aspectos ambientales, sociales, económicos y tecnológicos particulares de cada comunidad, analizando diferentes variables de acuerdo con el factor considerado, tal y como se presenta en la Tabla 17.

Este modelo y guía conceptual pueden considerarse como un sistema cualitativo de selección de alternativas de tratamiento que reúne un conjunto de factores de posible ponderación, convirtiéndose en la base para la elaboración de sistemas de selección cuantitativos.

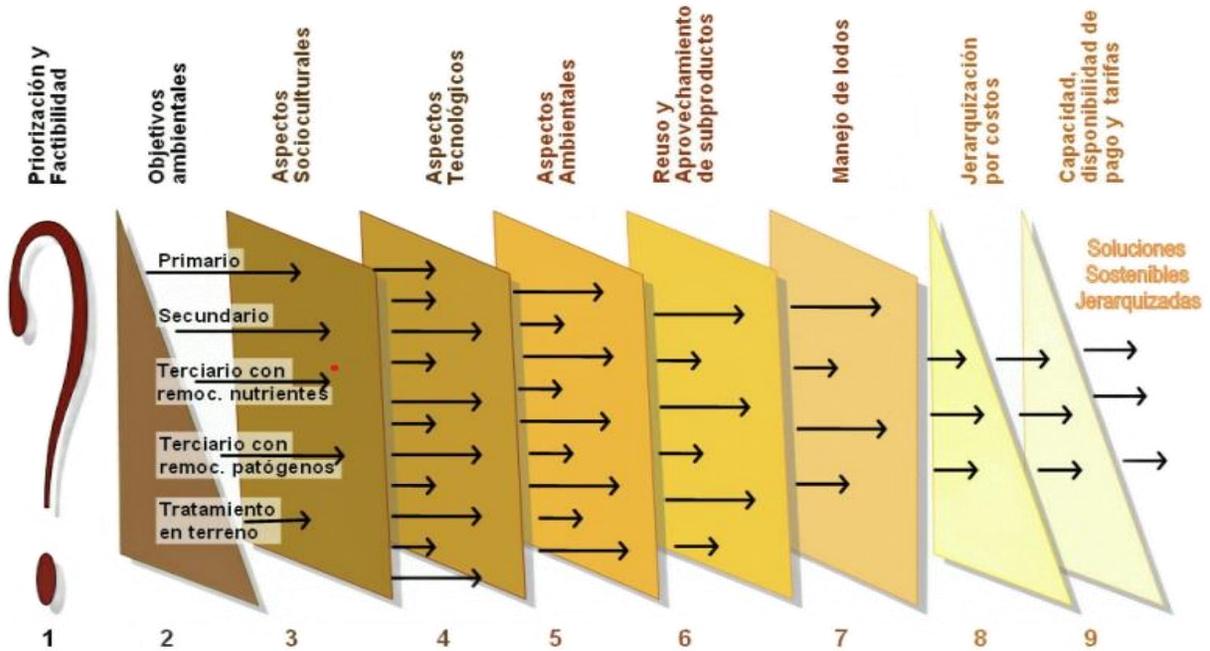


Figura 20. Metodología de selección de alternativa de tratamiento SELTAR.
Fuente: Tomada de Galvis et al. (2005)

Tabla 17. Factores y variables considerados en el proceso de selección de tecnología de acuerdo con la guía elaborada por el Instituto CINARA y la Universidad del Valle.

Factor	Variable
Factores demográficos y socioculturales	Tamaño de población
	Nivel educativo
	Cobertura y cantidad de agua potable
	Existencia y tipo de alcantarillado
Características del agua residual	Origen del agua residual
	Composición del agua residual
	Caudal de agua residual
Factores climáticos	Temperatura
	Precipitaciones
	Vientos
Características del terreno	Topografía
	Permeabilidad del suelo
	Nivel freático
Capacidad y disponibilidad a pagar	Capacidad de pago
	Tarifa
	Disponibilidad a pagar
Costos	Costos de inversión
	Costos de operación y mantenimiento (O&M)
	Costo del terreno
	Recuperación de recursos

	<p>AUNAR ESFUERZOS TÉCNICOS, ADMINISTRATIVOS Y FINANCIEROS ENTRE LA UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA Y LA CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CALDAS (CORPOCALDAS) PARA ELABORAR UNA GUÍA METODOLÓGICA PARA EL TRATAMIENTO TERCIARIO DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS EN ÁREAS RURALES, ORIENTADA A LA PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN ZONAS DE ESPECIAL INTERÉS HIDROGEOLÓGICO; EN EL DEPARTAMENTO DE CALDAS</p>	
---	--	---

Factor	Variable
Objetivos de tratamiento	Expectativas de calidad del efluente
	Nivel de tratamiento
	Descarga del efluente
	Estándares de reúso en agricultura
	Estándares de calidad del efluente
Disponibilidad de recursos	Recursos locales
	Requerimientos y disponibilidad de insumos químicos
	Requerimientos de energía
	Disponibilidad de mano de obra local (diseño, construcción, O&M)
	Necesidad de equipos mecánicos
	Disponibilidad local de materiales para la construcción
Aspectos tecnológicos	Impacto ambiental del sistema de tratamiento (STARD)
	Disponibilidad del terreno
	Generación de subproductos con potencial de aprovechamiento
	Eficiencia de la tecnología
	Facilidad de operación y mantenimiento
	Datos de calidad mínima deseada para el efluente tratado

Fuente: Bernal et al. (2015).

A nivel mundial se han desarrollado investigaciones enfocadas al desarrollo de programas de selección de alternativas de tratamiento, ejemplo de esto es la investigación realizada por la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID), la cual se centra en implementar una metodología que permita seleccionar la mejor tecnología de tratamiento mediante la implementación del análisis de decisión multicriterio, teniendo en cuenta la evaluación de los seis (6) criterios más habituales, enunciados así: condiciones del tratamiento y de la construcción, sostenibilidad técnica, económica, social, y ambiental (AECID, 2022). En cada uno de estos criterios se evalúan diferentes factores mediante pesos de importancia, y por medio de una matriz se calcula la valoración de cada criterio en las tecnologías consideradas, seleccionando la alternativa de tratamiento con mayor puntaje. La Tabla 18 presenta los criterios que se analizan para cada uno de los factores.

Considerando los aspectos y criterios que se analizaron en las metodologías de selección de tecnología investigadas, se propone evaluar las comunidades objeto de estudio bajo factores sociales, ambientales, tecnológicos y económicos, teniendo en cuenta diferentes criterios por cada uno de los aspectos considerados, y con el fin de convertir la metodología en un sistema de selección cuantitativo, se le fue asignado a cada criterio un peso que representa su importancia relativa, el cual fue ponderado de acuerdo con el criterio técnico de los profesionales del proyecto. La Tabla 19 presenta cada uno de estos criterios con su respectivo peso.

Para desarrollar la metodología de selección de alternativas de tratamiento terciario en las zonas de interés, se examinan las tecnologías de tratamiento previamente presentadas en la Tabla 16 bajo un primer filtro social. Este proceso determina los sistemas de tratamiento que pueden ser implementadas de acuerdo con las condiciones sociales, ambientales, tecnológicas y económicas de las comunidades. Esto incluye su capacidad para operar, mantener y administrar un STARD sostenible a largo plazo, un concepto denominado "nivel de

	<p>AUNAR ESFUERZOS TÉCNICOS, ADMINISTRATIVOS Y FINANCIEROS ENTRE LA UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA Y LA CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CALDAS (CORPOCALDAS) PARA ELABORAR UNA GUÍA METODOLÓGICA PARA EL TRATAMIENTO Terciario DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS EN ÁREAS RURALES, ORIENTADA A LA PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN ZONAS DE ESPECIAL INTERÉS HIDROGEOLÓGICO; EN EL DEPARTAMENTO DE CALDAS</p>	
---	--	---

sostenibilidad tecnológica" por este proyecto. En consecuencia, las comunidades ubicadas en las zonas de estudio se clasifican de acuerdo con su nivel de sostenibilidad tecnológica.

Tabla 18. Factores y criterios considerados en el proceso de selección de tecnología de acuerdo con la metodología de decisión multicriterio elaborada por AECID.

Factores	Criterios
Condicionantes del tratamiento	Calidad requerida del efluente
	Calidad requerida en el lodo
	Variables ambientales
	Características del agua residual a tratar
Condicionantes de la construcción	Características del terreno donde se ubicará la PTAR
	Disponibilidad de elementos necesarios para la construcción
Sostenibilidad técnica	Complejidad de operación y mantenimiento (capacidad del operador)
	Accesibilidad a equipos de repuesto y mantenimiento especializado
Sostenibilidad económica	Costos de construcción
	Costos de operación y mantenimiento
Sostenibilidad social	Aceptación por parte de la población
	Impactos potenciales sobre la población (Ruidos, Olores, Impacto visual)
	Aceptación por parte del prestador del servicio
Sostenibilidad ambiental	Emisión de gases de efecto invernadero
	Balance energético
	Valorización de lodos
	Reutilización de aguas

Fuente: AECID (2022).

Tabla 19. Criterios de sostenibilidad tecnológica con su respectivo peso.

Factores	Criterio	Peso
Ambiental	Aprovechamiento de subproductos	14
	percepción ambiental sobre la vulnerabilidad del acuífero	
Sociales	Presencia de organizaciones	8
	Presencia institucional	8
	Capacidad de gestión	9
	Tolerancia a efectos negativos	9
Técnicos	Recursos locales	6
	Infraestructura productiva y de servicios	14
	Mantenimiento del STARD	14
Económicos	Actividades económicas	6
	Disponibilidad de pago	12
Suma		100

4.3 NIVELES SOSTENIBILIDAD TECNOLÓGICA

Se evaluaron cinco opciones para seleccionar los intervalos correspondientes a cada uno de los niveles de sostenibilidad tecnológica, incluyendo la propuesta adecuada por CEPIS (Pérez, 1984) y desarrollada por la Universidad de Oklahoma con el apoyo de la Agencia para el Desarrollo Internacional de los Estados Unidos (USAID). Esta propuesta define cuatro niveles

de desarrollo tecnológico para las comunidades, cada uno con un intervalo de valores seleccionados que aparentemente no sigue un orden lógico: nivel I (1-23), nivel II (24-51), nivel III (52-93) y nivel IV (94-133). Para facilitar la comparación, se ajustaron los intervalos a una escala de 0 a 100 (presentados en la Tabla 20), ya que la escala original de 1 a 133 parece incongruente y no permitiría hacer comparaciones precisas entre los diferentes niveles (Naranjo, 2010).

Tabla 20. Descripción de posibilidades de selección de niveles de sostenibilidad tecnológica.

INTERVALO	NIVEL	OBSERVACIÓN	INTERPRETACIÓN GRÁFICA
CEPIS	71-100	IV	
	39-70	III	
	18-38	II	
	0-17	I	
OPCIÓN 1	76-100	IV	
	51-75	III	
	26-50	II	
	0-25	I	
OPCIÓN 2	86-100	IV	
	66-85	III	
	36-65	II	
	0-35	I	
OPCIÓN 3	81-100	V	
	61-80	IV	
	41-60	III	
	21-40	II	
	0-20	I	
OPCIÓN 4	91-100	V	
	76-90	IV	
	56-75	III	
	31-55	II	
	0-30	I	

Fuente: Naranjo (2010).

Dado que los intervalos propuestos por CEPIS presentan una incongruencia, se descarta esta opción para la selección de los intervalos correspondientes a los niveles de sostenibilidad

tecnológica. Como resultado, quedan cuatro opciones planteadas por el proyecto, dos de las cuales dividen los niveles en cuatro intervalos y las otras dos en cinco intervalos. Además, dos de estas opciones proponen una división en intervalos iguales y las otras dos en intervalos diferentes (Naranjo, 2010).

Es importante señalar que se emplearon los resultados de la evaluación ponderada de las zonas de estudio para asignar los niveles correspondientes a cada una de las opciones consideradas, con el fin de reforzar el proceso de selección de la opción más conveniente. Los resultados de esta evaluación se muestran en la Tabla 21. Observando que en la opción 1 todas las zonas de estudio se clasifican como nivel III dentro de los cuatro niveles considerados, induciendo a que no se garantiza una distribución en los diferentes niveles y, por tanto, se descarta esta opción.

Tabla 21. Niveles de sostenibilidad tecnológica de las zonas de estudio.

ZONA	PONDERACIÓN	OPCIÓN 1	OPCIÓN 2	OPCIÓN 3	OPCIÓN 4
Santágueda	69,6	NIVEL III	NIVEL III	NIVEL IV	NIVEL III
Viterbo	66,0		NIVEL II	NIVEL III	NIVEL II
Victoria	52,2				

La opción 3 propone un nivel IV en dos zonas de estudio, lo cual se pondera como un nivel muy alto de acuerdo con la información que se tiene de estas zonas, tanto dentro del grupo como en relación con los criterios de selección evaluados en el proceso; por ende, no se considera esta opción para representar la evaluación de las comunidades objeto de estudio.

La opción 2 establece que los niveles de las zonas de estudio son II y III dentro de un total de cuatro niveles, situación similar se presenta en la opción 4 para cinco niveles, no obstante, en la construcción de la opción 2 se observa una deficiencia, ya que los intervalos no siguen una variación lógica como se explica en la Tabla 20. Esta deficiencia en la construcción de la opción 2, que es similar a la que presenta la propuesta de CEPIS, sugiere que la opción 4 es más apropiada para determinar los niveles de sostenibilidad tecnológica, debido a su coherencia en la construcción y la congruencia en la ponderación con las condiciones de las zonas de estudio. Por último, se debe validar esta ponderación seleccionada en zonas de estudio extremas que puedan ser categorizadas como nivel I o V (Naranjo, 2010).

Después de elegir la opción 4 como la mejor forma de categorizar los niveles de sostenibilidad tecnológica, se obtienen cinco niveles definidos para la clasificación en el marco de este convenio, así:

- **Nivel I (0-30):** Comunidades asentadas en zona rurales muy lejanas a centros urbanos y/o centros regionales y con muy baja accesibilidad a estos; en las que posiblemente no existe un sistema de tratamiento de aguas residuales comunitario o con acceso limitado a un sistema individual de saneamiento básico, con muy baja capacidad para operar, mantener y administrar el sistema; con muy bajas o nulas fortalezas para mantener relaciones organizacionales y de gestión. Las alternativas de tratamiento terciario posibles son aquellas adaptables a una implementación domiciliaria.

 <p>UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA Facultad de Ingeniería</p>	<p>AUNAR ESFUERZOS TÉCNICOS, ADMINISTRATIVOS Y FINANCIEROS ENTRE LA UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA Y LA CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CALDAS (CORPOCALDAS) PARA ELABORAR UNA GUÍA METODOLÓGICA PARA EL TRATAMIENTO TERCIARIO DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS EN ÁREAS RURALES, ORIENTADA A LA PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN ZONAS DE ESPECIAL INTERÉS HIDROGEOLÓGICO; EN EL DEPARTAMENTO DE CALDAS</p>	 <p>Corpocaldas Corporación Autónoma Regional de Caldas</p>
---	--	---

- **Nivel II (31-55):** Comunidades asentadas en zonas rurales lejanas a centros urbanos y/o regionales y con baja accesibilidad a estos; con sistema de tratamiento de aguas residuales individuales u otros sistemas de saneamiento básico comunitario, con baja capacidad para operar, mantener y administrar el sistema; con bajas fortalezas para mantener relaciones organizacionales y de gestión. Las alternativas de tratamiento terciario posibles en las comunidades de este nivel pueden ser domiciliarias o centralizadas.
- **Nivel III (56-75):** Comunidades asentadas en zonas rurales con distancia intermedia a centros regionales y/o urbanos, con accesibilidad regular a estos; con sistemas de tratamiento de aguas residuales individuales u otros sistemas saneamiento básico comunitario, con capacidad media para operar, mantener y administrar el sistema; con fortalezas regulares para mantener relaciones organizacionales y de gestión. Las alternativas de tratamiento terciario posibles en las comunidades de este nivel pueden ser domiciliarias o centralizadas.
- **Nivel IV (76-90):** Comunidades asentadas en zonas rurales cercanas a centros regionales y/o urbanos con alta accesibilidad a estos; con sistemas de tratamiento de aguas residuales individuales u otros sistemas de saneamiento básico comunitario, con alta capacidad para operar, mantener y administrar el sistema; con altas fortalezas para mantener relaciones organizacionales y de gestión. Las alternativas de tratamiento terciario posibles en las comunidades de este nivel pueden ser domiciliarias o centralizadas.
- **Nivel V (91-100):** Comunidades asentadas en zonas rurales, muy cercanas a centros urbanos y/o regionales, que tienen sistemas de tratamiento de aguas residuales comunitarios; con muy alta capacidad para operar, mantener y administrar el sistema; con muy altas fortalezas para mantener relaciones organizacionales y de gestión. Las alternativas de tratamiento terciario posibles son de carácter centralizado.

En la Tabla 22 se presenta un resumen de estas características definidas para los niveles de sostenibilidad tecnológica.

Para clasificar las comunidades asociadas a los sistemas acuíferos de la zona de interés en un nivel de sostenibilidad tecnológica, fue necesario cuantificar sus condiciones sociales, ambientales, tecnológicas y económicas para alcanzar una calificación, escogida en este caso entre 0 y 100, la cual se cuantifica de acuerdo con los criterios mencionados anteriormente, con su respectivo valor de importancia relativo (Tabla 19). A cada uno de estos criterios se le asocia una serie de preguntas con sus respectivas opciones de respuesta, a las que se les asigna un valor de acuerdo con la proporción entre el número de opciones de respuesta por pregunta y el valor de importancia del criterio.

Los criterios seleccionados con su valor de importancia, adecuados para cumplir con el objetivo asignado de evaluar la capacidad de las comunidades para sostener un sistema de tratamiento terciario, y las preguntas con sus respuestas para evaluar cada uno, se presentan en la Tabla 23.

	<p>AUNAR ESFUERZOS TÉCNICOS, ADMINISTRATIVOS Y FINANCIEROS ENTRE LA UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA Y LA CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CALDAS (CORPOCALDAS) PARA ELABORAR UNA GUÍA METODOLÓGICA PARA EL TRATAMIENTO Terciario DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS EN ÁREAS RURALES, ORIENTADA A LA PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN ZONAS DE ESPECIAL INTERÉS HIDROGEOLÓGICO; EN EL DEPARTAMENTO DE CALDAS</p>	
---	--	---

Tabla 22. Definición de los niveles de sostenibilidad tecnológica.

ASPECTOS	NIVEL I (0-30)	NIVEL II (31-55)	NIVEL III (56-75)	NIVEL IV (76-90)	NIVEL V (91-100)
Comunidades	Rurales	Rurales	Rurales	Rurales	Rurales
Conectividad urbana y/o regional	Muy lejana (mayor a 100 km) Accesibilidad muy baja	Lejana (mayor a 100 km) Accesibilidad baja	Intermedia (20 – 100 km) Accesibilidad regular	Cercana (menor a 20 km) Accesibilidad alta	Muy cercana (menor a 20 km) Accesibilidad muy alta
STARD	Posiblemente no existe un sistema individual de saneamiento básico	Sistema individual de saneamiento básico u otro sistema comunitario	Sistema individual de saneamiento básico u otro sistema comunitario	Sistema individual de saneamiento básico u otro sistema comunitario	Planta de tratamiento de agua residual domestica local
Capacidad de administrar, operar y mantener un sistema de tratamiento terciario	Muy baja	Baja	Media	Alta	Muy alta
Fortalezas para mantener relaciones organizacionales y de gestión	Muy bajas o nulas	Bajas	Medias	Altas	Muy altas
Posibles alternativas de sistema terciario	Adaptables a una implementación domiciliaria	Domiciliarias o centralizadas	Domiciliarias o centralizadas	Domiciliarias o centralizadas	Centralizadas

Fuente: Adaptada de Naranjo (2010).

 UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA Facultad de Ingeniería	AUNAR ESFUERZOS TÉCNICOS, ADMINISTRATIVOS Y FINANCIEROS ENTRE LA UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA Y LA CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CALDAS (CORPOCALDAS) PARA ELABORAR UNA GUÍA METODOLÓGICA PARA EL TRATAMIENTO Terciario DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS EN ÁREAS RURALES, ORIENTADA A LA PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN ZONAS DE ESPECIAL INTERÉS HIDROGEOLÓGICO; EN EL DEPARTAMENTO DE CALDAS	 Corporación Autónoma Regional de Caldas
---	---	--

Tabla 23. Criterios de sostenibilidad tecnológica y preguntas para su evaluación.

FACTORES AMBIENTALES	Criterio	Aprovechamiento de subproductos	Peso	14	
		Descripción	Permite identificar la percepción ambiental por parte de la comunidad sobre la vulnerabilidad del acuífero y del aprovechamiento de nutrientes.		
		Pregunta	Respuesta	Valor	
	1. ¿Sabe qué es un acuífero?	Sí		8,3	
		Parcialmente		4,2	
		No		0,0	
	2. ¿Reconoce la importancia de las zonas de recarga de un acuífero y su vulnerabilidad?	Sí		8,3	
		Parcialmente		4,2	
		No		0,0	
	3. ¿Conoce los riesgos que ocasiona en el acuífero no tener un tratamiento de agua residual adecuado?	Sí		8,3	
		Parcialmente		4,2	
		No		0,0	
	4. ¿Conoce qué es un STARD (Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas)?	Sí		8,3	
		Parcialmente		4,2	
		No		0,0	
	5. ¿Estaría dispuesto a implementar un tratamiento terciario en su STARD para evitar o minimizar los impactos que genera la descarga de las aguas residuales en el acuífero?	Sí		8,3	
		Parcialmente		4,2	
		No		0,0	
	6. ¿Conoce usted los beneficios y usos que le puede dar al subproducto generado por el tratamiento terciario? Los subproductos que se puede generar son: - Plantas y semillas, las cuales se puede utilizar como abono en jardines o en plantaciones, además dependiendo de la especie de la planta se puede utilizar como alimento para peces y otro tipo de animales. -Lodos y biosólidos, pueden ser tratados y estabilizados mediante compostaje y obtener fertilizantes orgánicos que se pueden utilizar en la agricultura y la horticultura.	Sí		8,3	
		Parcialmente		4,2	
		No		0,0	
	7. ¿Si se generara un subproducto del tren de tratamiento del STARD, usted estaría dispuesto a aprovecharlo en otra actividad agrícola?	Sí		8,3	
		Parcialmente		4,2	
		No		0,0	
	8. ¿Con qué regularidad usted recogería los subproductos generados para su aprovechamiento?	0-3 meses		8,3	
		3-6 meses		4,2	
		> 1 año		0,0	
Suma				100,0	

FACTORES SOCIALES	Criterio	Presencia de organizaciones	Peso	8	
		Descripción	Permite analizar la existencia activa y dinámica de las organizaciones comunitarias en cada una de las zonas de estudio, su organización, funcionamiento de roles, temporalidad y estructura administrativa.		
		Pregunta	Respuesta	Valor	
	1. ¿Cuántas organizaciones sociales activas usted reconoce en su comunidad?	> 3		33,3	
		1-2		16,7	
		0		0,0	
	2. ¿Qué tipo de organizaciones son?	Formales		50	
		Informales		0	
	Suma				100,0

Criterio	Capacidad de gestión	Peso	9
Descripción	Anudado a la presencia de organizaciones, recoge los atributos de gestión importante para la consecución de recursos con los miembros de la comunidad y con la administración pública para actividades y necesidades específicas de la comunidad.		
Pregunta		Respuesta	Valor
1. ¿Han realizado acercamientos o procesos de gestión con instituciones o entes gubernamentales para la instalación, manejo, adecuación y mantenimiento del STARD?		Sí	9,5
		Parcialmente	4,8
		No	0,0
2. ¿La comunidad ha presentado proyectos o peticiones ante las organizaciones sociales y municipales?		Sí	9,5
		Parcialmente	4,8
		No	0,0
3. Los proyectos o peticiones han sido:		Aprobados	4,8
		Ejecutados	9,5
		Desaprobados	0,0
4. Los conflictos en la comunidad se resuelven de manera:		Diálogo de vecinos	9,5
		Acudiendo a la mediación externa	4,8
		No se resuelven	0,0
¿Hacen recolectas de dinero para acciones que beneficien a la comunidad en general? Describa cuáles		Sí	14,3
		No	0
6. ¿Realizan convites al interior de la comunidad? Describa en qué ocasiones		Sí	14,3
		No	0
7. ¿Cómo percibe usted la participación general de la comunidad?		Alta	9,5
		Media	4,8
		Baja	0,0
Suma			100,0
Criterio	Presencia Institucional	Peso	8
Descripción	Indaga en la presencia de diferentes instituciones de carácter público y privado: administración pública u ONG, que hubieran realizado o estuvieran realizando una intervención en las comunidades para mejorar su calidad de vida.		
Pregunta		Respuesta	Valor
1. ¿La comunidad ha recibido un STARD por parte de la administración municipal, instituciones privadas y/u ONG?		Sí	16,7
		Parcialmente	8,3
		No	0,0
2. ¿La comunidad ha recibido capacitaciones y asesorías realizadas por la administración municipal y/u otras instituciones para la operación y mantenimiento del STARD?		Sí	16,7
		Parcialmente	8,3
		No	0,0
3. ¿Han recibido recursos económicos por parte de la administración municipal y/u otras instituciones para la operación y mantenimiento del STARD?		Sí	16,7
		Parcialmente	8,3
		No	0,0
4. ¿La vereda o el corregimiento está incluido en el actual plan de desarrollo?		Sí	25,0
		No	0,0
Suma			100,0
Criterio	Tolerancia a efectos negativos	Peso	9
Descripción	Permite analizar cuál es el nivel de aceptación y tolerancia por parte de la comunidad ante los efectos negativos que puede generar una tecnología para el tratamiento de ARD.		

Pregunta	Respuesta	Valor
1. De acuerdo con la ubicación de su sistema de tratamiento domiciliario respecto al área de su domicilio, ¿qué tanto podría disgustarle la presencia de malos olores?	Demasiado	22,2
	Medianamente	11,1
	No mucho	0,0
2. De acuerdo con la ubicación de su sistema de tratamiento domiciliario respecto al área de su domicilio, ¿qué tanto podría disgustarle la presencia de mosquitos?	Demasiado	22,2
	Medianamente	11,1
	No mucho	0,0
3. De acuerdo con la ubicación de su sistema de tratamiento domiciliario respecto al área de su domicilio y las actividades económicas que realiza, ¿qué tanto podría afectarle visualmente?	Demasiado	22,2
	Medianamente	11,1
	No mucho	0,0
Suma		100,0

Criterio	Recursos locales	Peso	6
Descripción	Permite fijar la atención en aspectos relacionados con los oficios predominantes en la comunidad, en materia de construcción, electricidad, mecánicos y otros; posibilitando focalizar los oficios existentes y predominantes en las zonas de estudio.		
Pregunta		Respuesta	Valor
1. Número de mecánicos capacitados o empíricos	0		0,0
	1 - 2		6,7
	> 2		13,3
2. Número de electricistas capacitados o empíricos	0		0,0
	1 - 3		6,7
	> 3		13,3
3. Número de maestros de obra capacitados o empíricos	0		0,0
	1 - 5		6,7
	> 5		13,3
4. Número de oficiales de construcción capacitados o empíricos	0		0,0
	1 - 7		6,7
	>7		13,3
5. ¿Existe en la vereda o corregimiento la posibilidad de conseguir materiales de construcción?	Sí		20,0
	No		0,0
Suma			100,0
Criterio	Infraestructura productiva y de servicios	Peso	14
Descripción	Proporciona el reconocimiento de la infraestructura productiva y de servicios existente en cada una de las zonas de estudio, identificando la infraestructura básica, económica, de accesibilidad a la zona, educativa y de salud, reconociendo a la vez la complejidad de cada zona de estudio de acuerdo con la calidad y cantidad de la infraestructura existente.		
Pregunta		Respuesta	Valor
1. ¿Existe la instalación de alcantarillado en la zona?	Sí		5,9
	No		0,0
2. ¿Cuál es el tipo de infraestructura predominante en la vereda o corregimiento para el tratamiento de agua residual doméstica?	Comunitaria		3,9
	Individual		2,0
3. ¿En la vereda o corregimiento existe la cobertura de alguna empresa que preste servicio de mantenimiento a los STARD?	Sí		5,9
	No		0,0
4. ¿La vereda o corregimiento cuenta con acueducto veredal?	Sí		5,9
	No		0,0
5. ¿Cómo es la calidad del agua que distribuye el acueducto veredal?	Buena		3,9

FACTORES TECNOLÓGICOS

		Regular	2,0
		Mala	0,0
6. ¿La vereda o corregimiento cuenta con servicio de recolección de residuos sólidos?		Sí	5,9
		No	0,0
7. ¿Cuánta es el área disponible aproximadamente que tienen las viviendas de la vereda o corregimiento?		0	0,0
		1 - 10 m ²	2,0
		> 10 m ²	3,9
8. La infraestructura predominante en la vereda o corregimiento es		Individual	2,0
		Comunitaria	3,9
9. ¿Existen hosterías o centros recreativos en la vereda o corregimiento?		Sí	5,9
		No	0,0
10. ¿Existen restaurantes en la vereda o corregimiento?		Sí	5,9
		No	0,0
11. ¿Existen centros de salud u hospitales en la vereda o corregimiento?		Sí	5,9
		No	0,0
12. ¿Existen centros educativos en la vereda o corregimiento?		Sí	5,9
		No	0,0
13. ¿Cuál es el estado de la rutas o vías?		Bueno	3,9
		Regular	2,0
		Malo	0,0
14. Distancia al centro regional (sólo si el transporte es terrestre)		<20 km	3,9
		20-100 km	2,0
		>100 km	0,0
15. ¿La vereda o corregimiento cuentan con cobertura de internet?		Sí	5,9
		No	0,0
16. ¿Cómo es el estado de las telecomunicaciones en la vereda o corregimiento?		Buena	3,9
		Regular	2,0
		Mala	0,0
17. ¿Cuál es la frecuencia del transporte al centro regional?		Ocasionalmente	0,0
		1 vez al día	2,0
		> 1 vez al día	3,9
Suma			100,0
Criterio	Mantenimiento al STARD	Peso	14
Descripción	Permite reconocer las aptitudes del encargado del mantenimiento en relación con el manejo del STARD, devela fortalezas y dificultades en términos de capacitación para mantener el sistema.		
Pregunta		Respuesta	Valor
1. ¿Quién considera usted que debe realizar el mantenimiento del sistema?		Usuario	4,8
		Municipio	0,0
		Personal capacitado	9,5
2. ¿Quién realiza el mantenimiento del STARD en su domicilio?		Usuario	4,8
		Un tercero	9,5
3. ¿La persona que realiza el mantenimiento del sistema ha recibido alguna capacitación?		Sí	14,3
		No	0,0
4. ¿El encargado del mantenimiento cuenta con las herramientas adecuadas?		Sí	14,3
		No	0,0
5. ¿Cada cuánto le realiza mantenimiento al sistema?		Nunca	0,0
		Cada 6 meses	9,5

	<p style="text-align: center;">AUNAR ESFUERZOS TÉCNICOS, ADMINISTRATIVOS Y FINANCIEROS ENTRE LA UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA Y LA CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CALDAS (CORPOCALDAS) PARA ELABORAR UNA GUÍA METODOLÓGICA PARA EL TRATAMIENTO TERCARIO DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS EN ÁREAS RURALES, ORIENTADA A LA PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN ZONAS DE ESPECIAL INTERÉS HIDROGEOLÓGICO; EN EL DEPARTAMENTO DE CALDAS</p>	
---	---	---

		Cada año	4,8
6. ¿Cuántas veces al año la autoridad ambiental ha realizado visitas de control y seguimiento sobre el manejo y operación del sistema?		0	0,0
		1 - 2	9,5
		> 2	4,8
7. ¿Estaría dispuesto a recibir capacitaciones para el adecuado manejo y mantenimiento del STARD?		Sí	14,3
		No	0,0
Suma			100,0

FACTORES ECONÓMICOS	Criterio	Actividades económicas	Peso	6
	Descripción	Al igual que la cuantificación de la infraestructura productiva y de servicios, permite reconocer la complejidad de las zonas de estudio de acuerdo con la orientación de sus actividades económicas y a la diversidad de las mismas.		
	Pregunta		Respuesta	Valor
	1. ¿Cuántas actividades de subsistencia hay en la vereda o corregimiento?		0	0,0
			1 - 3	16,7
			> 3	33,3
	2. ¿Cuántas actividades comerciales hay en la vereda o corregimiento?		0	0,0
			1 - 3	16,7
			> 3	33,3
	Suma			100,0
	Criterio	Disponibilidad de pago	Peso	12
	Descripción	Permite conocer cuál es la disponibilidad de las personas en incurrir en gastos asociados al mantenimiento del STAR		
	Pregunta		Respuesta	Valor
	1. ¿Quién cree usted que debe pagar los costos de mantenimiento del STARD?		Usuario	16,7
			En conjunto	8,3
		Municipio	0,0	
2. ¿Estaría de acuerdo en crear una asociación con el municipio para realizar el correcto mantenimiento del STARD?		Sí	25,0	
		No	0,0	
3. ¿En la vereda o corregimiento existen proyectos o programas gubernamentales de apoyo económico?		Sí	25,0	
		No	0,0	
4. ¿Cuál es el estrato social de la vereda o corregimiento?		1 - 2	0,0	
		3 - 4	8,3	
		5 - 6	16,7	
Suma			100,0	

Para llevar a cabo una investigación de los criterios de sostenibilidad tecnológica, se realizaron encuestas a actores sociales identificados durante las visitas realizadas por el equipo técnico. Estas visitas tuvieron lugar en la zona de estudio correspondiente a los acuíferos de Santáguada-km 41 y río Risaralda durante los días 23 al 26 de marzo, y en el acuífero río grande de La Magdalena del 10 al 12 de abril. Cabe destacar que esta actividad se realizó en simultáneo con la toma de muestras de ARD en las zonas mencionadas. La Tabla 24 enuncia las localidades donde se realizaron las encuestas.

Una vez recolectada la información de las comunidades, se procede a cuantificar los criterios utilizando los valores establecidos en la Tabla 23, los cuales oscilan entre 0 y 100. Posteriormente, se ponderan estos valores respecto al peso correspondiente de cada criterio, lo que determina el nivel de sostenibilidad tecnológica de las comunidades, según las definiciones previamente proporcionadas. Finalmente, en la Tabla 25 se presentan los resultados obtenidos

	<p>AUNAR ESFUERZOS TÉCNICOS, ADMINISTRATIVOS Y FINANCIEROS ENTRE LA UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA Y LA CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CALDAS (CORPOCALDAS) PARA ELABORAR UNA GUÍA METODOLÓGICA PARA EL TRATAMIENTO TERCARIO DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS EN ÁREAS RURALES, ORIENTADA A LA PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN ZONAS DE ESPECIAL INTERÉS HIDROGEOLÓGICO; EN EL DEPARTAMENTO DE CALDAS</p>	
---	---	---

para cada criterio en cada zona de estudio y se muestra el nivel de sostenibilidad tecnológica correspondiente.

Tabla 24. Localidades donde se realizaron encuestas a actores sociales identificados en la zona de estudio.

Fechas	Municipio	Veredas	Unidad hidrogeológica
22, 23, 24, 25 y 26 de marzo	Palestina	Santágueda	Acuífero Santágueda-km 41
	Viterbo	Asia	Acuífero río Risaralda
		Valle del río Risaralda	
		La María	
		Guayabito	
3, 4 y 5 de abril	Victoria	Canaán	Acuífero río grande de La Magdalena
		Marzala	
		El Aguacate	
		Bella Vista	

Tabla 25. Ponderación de criterios y niveles de sostenibilidad tecnológica en zonas de estudio.

Aspecto	Criterios	Peso	Santágueda-km 41 (Santágueda)	Río Risaralda (Viterbo)	Río grande de La Magdalena (Victoria)
Ambiental	Aprovechamiento de subproductos	14	69,1	85,0	69,0
Social	Presencia de organizaciones	8	77,2	71,5	80,0
	Capacidad de gestión	8	52,6	57,8	29,7
	Presencia institucional	9	33,3	49,9	9,7
	Tolerancia a efectos negativos	9	69,5	44,5	35,5
Tecnológico	Recursos locales	6	78,3	88,8	85,4
	Infraestructura productiva y de servicios	14	84,4	69,4	38,3
	Mantenimiento al STARD	14	82,5	75,2	75,6
Económicos	Actividades económicas	6	68,5	50,1	60,8
	Disponibilidad de pago	12	66,2	54,8	40,1
Calificación			69,6	66,0	52,2
Nivel de sostenibilidad tecnológica			III	III	II

Los resultados presentados en la Tabla 25 indican que las zonas de interés hidrogeológico visitadas tienen dos niveles distintos de sostenibilidad tecnológica. Tanto el acuífero Santágueda-km 41, donde se realizó el recorrido de campo en la vereda Santágueda, en el municipio de Palestina, como en el acuífero río Risaralda, en el que se llevaron a cabo las visitas técnicas en diferentes veredas del municipio de Viterbo, tienen un nivel de sostenibilidad tecnológica III, lo que sugiere cierta uniformidad entre las dos zonas.

En referencia al acuífero río grande de La Magdalena, el cual fue analizado en el municipio de Victoria, se identificó un nivel de sostenibilidad tecnológica II. Este resultado era previsible debido a las observaciones realizadas durante el recorrido de campo en las veredas del

municipio, identificando un déficit en cuanto a la calidad de la infraestructura y una falta de acompañamiento institucional para capacitar a los usuarios acerca del mantenimiento de los sistemas sépticos. Esta situación se ve reflejada en el comportamiento de los criterios de sostenibilidad tecnológica en la Figura 21, reflejando un nivel bajo en la capacidad que tiene la comunidad para sostener un sistema de tratamiento terciario en el tiempo.

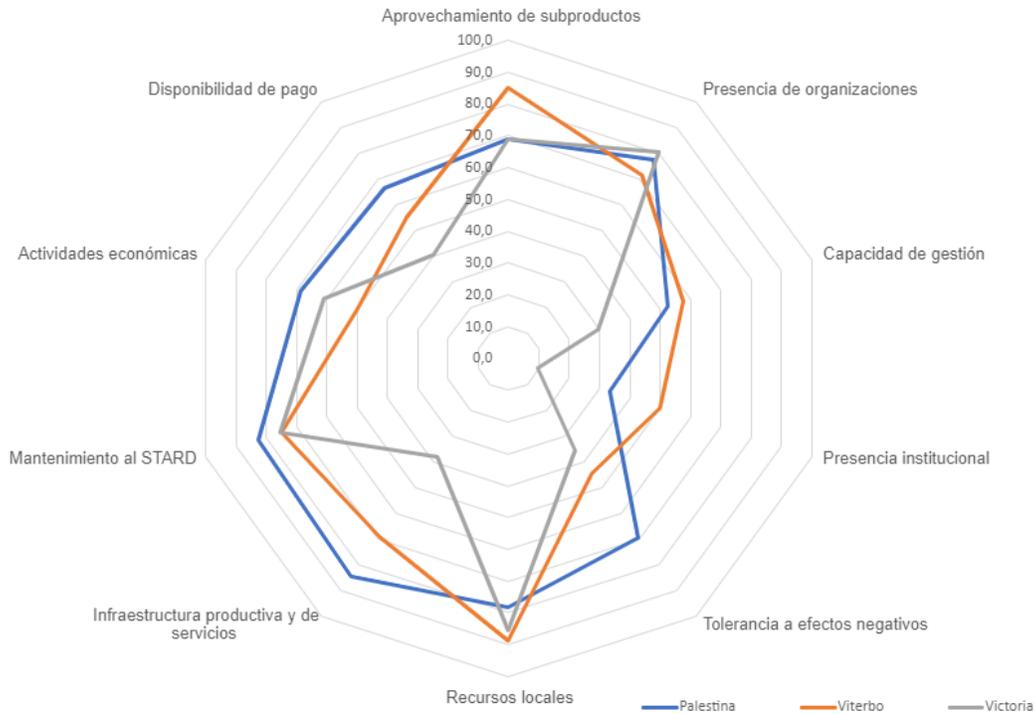


Figura 21. Comportamiento de criterios de sostenibilidad tecnológica en zonas de estudio.

Continuando con el análisis de la Figura 21, se pueden observar variaciones significativas en el comportamiento de los criterios de sostenibilidad tecnológica en cada una de las zonas de estudio. En cuanto a las condiciones sociales necesarias para la implementación de una tecnología de tratamiento terciario, es importante que exista cierta disponibilidad de área, lo cual se refleja en el criterio de tolerancia a los efectos negativos que pueda generar la tecnología. Para el municipio de Victoria (35,5) y Viterbo (44,5) se presentan puntajes inferiores a 50, lo que implica la necesidad de implementar en estas zonas tecnologías que requieran de menos área. En el caso de Santágueda (69,5), se puede pensar en la posibilidad de implementar alternativas con requerimientos de mayor área y que satisfagan necesidades centralizadas en la comunidad, como en el caso de un sistema de tratamiento terciario implementada en un condominio. No obstante, es importante mencionar que los alcances de aplicabilidad a la propuesta de diseños y alternativas de tratamiento son para viviendas unifamiliares rurales.

Respecto a los demás criterios sociales, los resultados muestran que en las tres (3) zonas de estudio las organizaciones comunitarias tienen una puntuación superior a 70, lo que indica una presencia activa y dinámica de estas organizaciones. Sin embargo, se observa que Victoria

tiene una menor capacidad para atender necesidades específicas de la comunidad, siendo su puntuación más baja (29,7) en comparación con Santágueda (52,6) y Viterbo (57,8). Además, se destaca que Victoria también tiene la puntuación más baja en el criterio de presencia institucional (9,7), lo que sugiere que su fortaleza en términos de sostenibilidad tecnológica es menor en relación con la presencia institucional.

Al igual que los criterios sociales, los criterios tecnológicos también se evalúan a través de tres criterios de sostenibilidad tecnológica, entre ellos, los recursos locales, se observa que en las tres zonas objeto de estudio presentan un buen comportamiento, en Santágueda (78,3), Viterbo (88,8) y Victoria (85,4), revelando que cuentan con diversidad de oficios en las comunidades, en materia de construcción, electricidad y mecánicos, además cuentan con las posibilidades de acceder a recursos para construcción. Similarmente, en la evaluación del criterio del mantenimiento de los STARD, todas las zonas de estudio presentan puntajes altos, superiores a 70, siendo comunidades con fortalezas en el manejo de los sistemas sépticos. Continuando con el análisis de los criterios tecnológicos, se determinó que Santágueda (84,4) y Viterbo (69,4), presentan una infraestructura productiva y de servicios superior en comparación con Victoria (38,3).

Respecto a las actividades económicas, las tres zonas muestran un comportamiento medio-alto, Santágueda (68,5), Viterbo (50,1) y Victoria (60,8), indicando que no hay una gran diversidad de actividad comercial. Por otro lado, la disponibilidad de pago muestra que Santágueda (66,2) y Viterbo (54,8) son las zonas en donde la comunidad muestra una mayor disponibilidad en pagar los gatos asociados al mantenimiento del sistema de tratamiento séptico, en comparación con Victoria (40,1) correspondiendo a un puntaje medio-bajo en este criterio.

Finalmente, respecto al criterio de aprovechamiento de los subproductos que podrían generarse al implementar una tecnología de tratamiento terciario, Viterbo (85,0) muestra un puntaje alto, mostrando que la comunidad identifica la importancia de implementar un sistema terciario orientado a la protección de las aguas subterráneas. Para el caso de Santágueda (69,1) y Victoria (69,0) el puntaje es medio-alto, y la percepción ambiental por parte de la comunidad es menor.

Teniendo el análisis individual de los criterios de sostenibilidad tecnológica se acepta la ponderación global entre Santágueda y Viterbo como comunidades con un nivel de sostenibilidad tecnológica III, aunque se presenten variaciones en el comportamiento de los criterios, y un nivel II para Victoria. Ahora, es importante identificar las opciones de tratamiento de nivel terciario que se pueden aplicar en comunidades con un nivel determinado de capacidad tecnológica sostenible, por consiguiente, el equipo de investigación establece el nivel mínimo requerido de sostenibilidad tecnológica en cada una de las alternativas presentadas en la Tabla 16.

La Tabla 26 muestra los niveles mínimos requeridos de sostenibilidad tecnológica para la implementación de los tratamientos terciarios, junto con algunas observaciones relevantes. Este enfoque está directamente relacionado con la aplicación del concepto de "tecnología apropiada", que busca seleccionar alternativas que las comunidades puedan gestionar y controlar de manera efectiva en sus condiciones ambientales, sociales, tecnológicas y económicas específicas.

	<p style="text-align: center;">AUNAR ESFUERZOS TÉCNICOS, ADMINISTRATIVOS Y FINANCIEROS ENTRE LA UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA Y LA CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CALDAS (CORPOCALDAS) PARA ELABORAR UNA GUÍA METODOLÓGICA PARA EL TRATAMIENTO TERCIARIO DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS EN ÁREAS RURALES, ORIENTADA A LA PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN ZONAS DE ESPECIAL INTERÉS HIDROGEOLÓGICO; EN EL DEPARTAMENTO DE CALDAS</p>	
---	--	---

Tabla 26. Nivel de sostenibilidad tecnológica mínimo para la implementación de tratamiento terciario.

Alternativa de tratamiento	Nivel mínimo	Observaciones
TRATAMIENTOS BIOLÓGICOS		
Humedal construido de flujo superficial (FLS)	II	
Humedal construido de lecho sumergido y flujo subsuperficial (VSB).	II	
Humedal construido evaporativo	II	
Fotobiorreactor de consorcios de microalgas	V	
Estanque de <i>raceway</i> abierto (Sistema de estanque de canal abierto para el cultivo de microalgas)	IV	
Zanja de oxidación	IV	
Filtro Intermitente de Arena (ISF)	III	
Sistema de Infiltración Subsuperficial		No aplicable para este proyecto
Laguna de maduración	III	
Laguna con lenteja de agua	II	
Filtro verde de descarga cero	III	
Humedal de flujo vertical subsuperficial	III	
Filtro percolador	IV	
Tratamiento terrestre de filtración rápida (TT RI)		No aplicable para este proyecto
Tratamiento terrestre de filtración lenta (TT SI)		No aplicable para este proyecto
Reactor secuencial por lotes (SBR)		No en áreas rurales
Reactor biológico de discos (RBC)	V	
Biorreactor de lecho fluidizado (FBR)		No en áreas rurales
TRATAMIENTOS QUÍMICOS		
Intercambio iónico	V	
TRATAMIENTOS FÍSICOS		
Filtración por membranas		No en áreas rurales

Los sistemas de infiltración subsuperficial, así como los tratamientos terrestres de filtración rápida (TT RI) y filtración lenta (TT SI), no cumplen con el requisito principal de evitar la infiltración o recargar el agua residual en el acuífero y, por lo tanto, no son aplicables para este proyecto. En cuanto a las alternativas de tratamiento que podrían ser viables, se ha descartado la posibilidad de implementar el reactor secuencial por lotes (SBR), el biorreactor de lecho fluidizado (FBR) y la filtración por membranas debido a sus altos requerimientos tecnológicos, lo que los hace inadecuados para su uso en comunidades rurales.

Finalmente, de los resultados obtenidos en la aplicación del filtro social (Tabla 25), se observa en la Tabla 27 las alternativas que pueden implementarse en el municipio de Palestina y Viterbo pertenecientes al nivel III de desarrollo tecnológico, y la Tabla 28 presenta las tecnologías aplicables para Victoria con nivel II.

	<p>AUNAR ESFUERZOS TÉCNICOS, ADMINISTRATIVOS Y FINANCIEROS ENTRE LA UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA Y LA CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CALDAS (CORPOCALDAS) PARA ELABORAR UNA GUÍA METODOLÓGICA PARA EL TRATAMIENTO TERCIARIO DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS EN ÁREAS RURALES, ORIENTADA A LA PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN ZONAS DE ESPECIAL INTERÉS HIDROGEOLÓGICO; EN EL DEPARTAMENTO DE CALDAS</p>	
---	--	---

Tabla 27. Alternativas aplicables al nivel de sostenibilidad tecnológico III.

Alternativa	Palestina Santágueda-km 41	Viterbo Río Risaralda
Humedal construido de flujo superficial (FLS)	II	II
Humedal construido de lecho sumergido y flujo subsuperficial (VSB)	II	II
Humedal construido evaporativo	II	II
Filtro Intermitente de Arena (ISF)	III	III
Laguna de maduración	III	III
Filtro verde de descarga cero	III	III
Humedal de flujo vertical subsuperficial	III	III
Laguna con lenteja de agua	II	II

Tabla 28. Alternativas aplicables al nivel de sostenibilidad tecnológico II.

Alternativa	Victoria Río grande de La Magdalena
Humedal construido de flujo superficial (FLS)	II
Humedal construido de lecho sumergido y flujo subsuperficial (VSB).	II
Humedal construido evaporativo	II
Laguna con lenteja de agua	II

4.4 IMPACTOS Y SELECCIÓN DE LAS ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO TERCIARIO

Las aguas subterráneas son un recurso vital para el suministro de agua potable y la conservación de los ecosistemas acuáticos. Para protegerlas, es esencial identificar y manejar adecuadamente las zonas de especial interés hidrogeológico, incluyendo las zonas de recarga y aquellas altamente vulnerables a la contaminación. La normatividad colombiana presenta las mayores restricciones en estas zonas.

De acuerdo con el Decreto 050 de 2018 (MADS, 2018), en su artículo 2.2.3.3.4.3, no se admiten vertimientos al suelo en zonas de recarga alta de acuíferos y zonas de extrema a alta vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos, por otro lado, el Decreto 1076 de 2015 (MADS, 2015) en su artículo 2.2.3.2.20.1, establece que los cuerpos de agua Clase I, los cuales incluyen las aguas subterráneas, no admiten ningún tipo de vertimiento, y los Clase II admiten vertimientos con algún tipo de tratamiento. Además, el artículo 2.2.3.3.4.3 del mismo decreto prohíbe específicamente los vertimientos en acuíferos.

Los componentes contaminantes encontrados con mayor frecuencia en el agua subterránea relacionados con la actividad de saneamiento *in situ* son los patógenos fecales, nutrientes (nitrógeno y fósforo), carga orgánica general y microorganismo tóxicos (Foster e Hirata, 2002). Las sustancias orgánicas se encuentran en su mayoría en los compuestos farmacéuticos y los productos químicos utilizados en las actividades domésticas, como los detergentes y los productos de limpieza (Gil et al., 2012).

Estos elementos persisten en el efluente del tratamiento secundario, el cual puede infiltrarse hasta el acuífero y afectar negativamente su calidad. Las tecnologías de tratamiento terciario aplicables en los niveles de sostenibilidad tecnológica en las comunidades objeto de estudio tienen la facultad de remover o pulir los componentes contaminantes que pueden afectar la calidad del agua subterránea (Tabla 27 y Tabla 28); no obstante, al realizar la descarga del efluente al suelo en zonas de especial interés hidrogeológico se debe considerar la aplicación de alternativas con características de descarga cero como lo son los humedales evaporativos y los filtros verdes de descarga cero.

En los casos donde el efluente final es descargado a un cuerpo de agua superficial se puede considerar implementar las alternativas de descarga cero o las demás alternativas presentadas en el proyecto, de acuerdo con el nivel de sostenibilidad tecnológico aplicable en la comunidad, esto con la intención de mitigar el impacto ambiental.

4.5 CARACTERIZACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS (ARD)

Para realizar la caracterización de las ARD en la zona de estudio se tomaron muestras de agua en STARD de acuerdo con lo descrito en el numeral 3.2.5.

Con el fin de evaluar el estado de los sistemas sépticos muestreados se analizaron los resultados en relación con las concentraciones típicas de ARD presentadas por Metcalf & Eddy (1996 y 2014). La Tabla 29 en lista los intervalos que proponen los autores para los tres tipos de concentraciones de ARD típica, con concentración débil, media y alta, para cada uno de los parámetros considerados.

El análisis de los parámetros se realiza tomando en cuenta los intervalos establecidos en la edición más actualizada de Metcalf & Eddy (2014) para cada uno de los resultados, con la excepción de la alcalinidad total, ya que este parámetro no es considerado en la edición de 2014. Los resultados se presentan en la Tabla 30, y se codifican mediante colores para indicar el intervalo del tipo de concentración. El verde representa un intervalo débil, el amarillo medio y el rojo fuerte.

Para implementar un sistema terciario eficiente, es crucial asegurarse de que el tratamiento previo esté funcionando adecuadamente y cumpla con la remoción de contaminantes específicos en cada nivel del tratamiento. Con el fin de evaluar la eficacia de implementar una alternativa de tratamiento terciario, se define que, en el caso de una concentración de contaminante alta (intervalo fuerte), el sistema se colmataría, causando problemas ambientales. En el intervalo medio, el sistema terciario podría funcionar medianamente bien, presentando dificultades en su operación y mantenimiento. Por último, cuando las concentraciones estén por debajo del límite del intervalo débil, se lograría un correcto funcionamiento en el sistema terciario.

Para cada zona de estudio, se recolectó una muestra de ARD sin tratamiento y su correspondiente muestra con tratamiento perteneciente al mismo sistema. En la Tabla 30 se identifican las muestras sin tratamiento con un relleno en color gris y las demás muestras corresponden a ARD con tratamiento, por lo tanto, se visitaron en total siete (7) STARD, tres (3) en Victoria, dos (2) en Palestina y dos (2) en Viterbo.

Tabla 29. Composición típica de aguas residuales domésticas (ARD) crudas.

PARÁMETRO	UNIDADES	Concentraciones típicas de ARD. (Metcalf & Eddy 2014)			Concentraciones típicas de ARD. (Metcalf & Eddy 1996)		
		Débil	Media	Fuerte	Débil	Media	Fuerte
Sólidos Sedimentables	mL/L	8	12	23	5	10	20
Alcalinidad Total	mg CaCO ₃ /L				50	100	200
DBO5 Total	mg O ₂ /L	133	200	400	110	220	400
DQO Total	mg O ₂ /L	339	508	1016	250	500	1000
Sólidos Suspendedos Totales	mg SST/L	130	195	389	100	220	350
Grasas y Aceites	mg G&A/L	51	76	153	50	100	150
Fósforo Reactivo Total (Ortofosfatos)	mg P/L	1,6	2,4	4,7	3	5	10
Fósforo Total	mg P/L	3,7	5,6	11	4	8	15
Fósforo orgánico	mg P/L	2,1	3,2	6,3	1	5	10
Nitrógeno Kjeldahl	mg N/L	23	35	69	20	40	85
Nitrógeno Amoniacal	mg N/L	14	20	41	12	25	50
Nitrógeno orgánico	mg N/L	10	14	29	8	15	35
Nitrato	mg N/L	0	0	0	0	0	0
Nitrito	mg N/L	0	0	0	0	0	0
Nitrógeno Total	mg N/L	24	34	70	20	40	85

Fuente: Metcalf & Eddy (1996 y 2014).

Los dos sistemas sépticos en Viterbo y el sistema correspondiente a la muestra 02 y 03 (sistema 2), en Santágueda, presentan la mayoría de los parámetros por debajo del límite débil, como se muestra en la Tabla 30 y Tabla 31, incluso en las muestras sin tratamiento (02 y 06) se evidencia esta situación, por consiguiente, la implementación de una alternativa de tratamiento terciario sería viable.

Caso contrario ocurre en los tres (3) sistemas sépticos de Victoria y el sistema de tratamiento correspondiente a la muestra 01 en Santágueda; estos cuentan con resultados críticos, pues el valor de casi todas las concentraciones se encuentra en el intervalo fuerte de concentraciones típicas de ARD sin tratamiento. Esta situación indica el mal funcionamiento de los sistemas, ya que no se está realizando la remoción de los contaminantes en cada nivel de tratamiento de los sistemas sépticos y por ende no se podría implementar un sistema de tratamiento terciario.

Tabla 30. Resultados de laboratorio en relación con los límites de concentración (débil, medio y fuerte) considerados por Metcalf & Eddy (2014, 1996).

Parámetro	Unidad	Palestina			Viterbo			Victoria			
		Sistema 1	Sistema 2		Sistema 3	Sistema 4		Sistema 5	Sistema 6	Sistema 7	
		Muestra 01	Muestra 02	Muestra 03	Muestra 04	Muestra 05	Muestra 06	Muestra 07	Muestra 08	Muestra 09	Muestra 10
Sólidos Sedimentables	mL/L	0	0	0	0	0	1	1	3	3	12
Alcalinidad total	mg CaCO ₃ /L	360,432	112,418	40,198	103,857	139,836	241,755	467,84	540,446	358,413	365,762
DBO ₅ total	mg O ₂ /L	232,05	57,2	19,7	14,7	6,5	58,5	167,85	776,4	374,85	2150
DQO total	mg O ₂ /L	382,267	81,554	34,533	35,098	19,433	179,135	383,99	1145,89	617,294	3938,101
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	65	17	9	9	6	24	60	96	166	1300
Grasas y Aceites	mg/L	18	<8	<8	<8	<8	12	20	152,75	55	1176
Fósforo reactivo total (ortofosfatos)	mg P/L	2,53	0,505	0,094	0,3	0,072	0,253	4,14	4,678	2,896	3,4
Fósforo total	mg P/L	8,375	1,988	0,632	1,02	0,319	1,317	13,36	16,005	9,958	11,013
Fósforo orgánico	mg P/L	5,842	1,483	0,538	0,72	0,247	1,064	9,22	11,327	7,062	7,613
Nitrógeno Kjeldahl	mg N/L	68,833	21,595	5,71	10,436	2,789	9,407	117,42	149,584	78,353	129,345
Nitrógeno amoniacal	mg N/L	59,754	15,987	4,715	9,701	2,668	4,873	108,42	133,28	74,577	76,906
Nitrógeno orgánico	mg N/L	9,079	5,608	0,995	0,735	0,121	4,534	9	16,304	3,776	52,439
Nitrato	mg N/L	<0,013	0,019	0,348	1,646	0,729	0,021	<0,013	0,063	0,024	0,021
Nitrito	mg N/L	<0,009	<0,009	0,617	0,279	<0,009	<0,009	<0,009	<0,009	<0,009	<0,009
Nitrógeno total	mg N/L	68,833	21,614	6,675	12,361	3,518	9,428	117,42	149,647	78,377	129,366

*En el reporte de laboratorio se nombran la muestra 07 como la 10; la muestra 08 como la 11; la muestra 09 como la 12; y la muestra 10 como la 13.

Tabla 31. Parámetros de muestras clasificados en el intervalo de tipo de concentración débil, medio y fuerte.

Zona de estudio	Sistemas	Muestras	Parámetros intervalo Débil	Parámetros intervalo Medio	Parámetros intervalo Fuerte	Total
Palestina	Sistema 1	Muestra 1	6	1	8	15
	Sistema 2	Muestra 2	13	0	2	15
		Muestra 3	13	0	2	15
Viterbo	Sistema 3	Muestra 4	12	0	3	15
	Sistema 4	Muestra 5	13	0	2	15
		Muestra 6	13	0	2	15
Victoria	Sistema 5	Muestra 7	6	2	7	15
	Sistema 6	Muestra 8	3	0	12	15
	Sistema 7	Muestra 9	3	2	10	15
		Muestra 10	1	1	13	15

	<p>AUNAR ESFUERZOS TÉCNICOS, ADMINISTRATIVOS Y FINANCIEROS ENTRE LA UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA Y LA CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CALDAS (CORPOCALDAS) PARA ELABORAR UNA GUÍA METODOLÓGICA PARA EL TRATAMIENTO TERCIARIO DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS EN ÁREAS RURALES, ORIENTADA A LA PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN ZONAS DE ESPECIAL INTERÉS HIDROGEOLÓGICO; EN EL DEPARTAMENTO DE CALDAS</p>	
---	--	---

5 APLICACIÓN DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO TERCIARIO

Cada alternativa de tratamiento requiere de condiciones de diseño particulares para garantizar su óptimo funcionamiento. La Tabla 32 detalla los criterios y condiciones de diseño específicos. Para ello, se realizó una revisión bibliográfica, encontrando referencias que muestran la variabilidad de los criterios de diseño en cada tecnología.

De acuerdo con la bibliografía investigada, las alternativas aplicables al nivel de sostenibilidad tecnológico de las comunidades estudiadas no superan una profundidad de diseño de 1 m, a excepción de las dos lagunas. De acuerdo con Arceivala y Shyam (2007a, 2007b), la profundidad de diseño para la laguna de maduración oscila entre 1 y 2 m y para la laguna con lenteja de agua es de mínimo 2 m. Por tanto, se ha decidido no implementar estas dos tecnologías debido a que las comunidades se encuentran en zona de interés hidrogeológico, por lo cual, si se supera una profundidad de 1 m, se corre el riesgo de alcanzar el nivel freático, lo que podría generar daños en la estructura de tratamiento y poner en riesgo la calidad del agua subterránea.

Por otro lado, el valor de la carga hidráulica se calcula empleando un caudal de 100 L/persona-d ($0,1 \text{ m}^3/\text{persona-d}$) para ocupantes permanentes en residencia clase baja (por referirse a un predio rural) y 50 L/persona-d ($0,051 \text{ m}^3/\text{persona-d}$) para personas transitorias (se considera el valor de oficinas temporales, teniendo en cuenta las horas laborales) de acuerdo con lo establecido en el Título E del Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS-2000), expedido por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT, 2000). De esta forma, se obtiene un caudal de $0,15 \text{ m}^3/\text{persona-d}$, el cual se divide por los límites de cada área, obteniendo el resultado de la carga hidráulica.

Antes de comenzar con las descripciones de los diseños para cada alternativa aplicable al caso de estudio, es de relevancia realizar una aclaración conceptual respecto al nombre de las tecnologías, pues existen características entre ellas que se pueden asociar para así estandarizar el nombre de cada una.

Para el caso de los filtros, en este proyecto se van a nombrar bajo esta denominación cuando son de flujo vertical (descendente o ascendente) y la composición variada de los materiales que requieren para su correcta operación: grava y arena. En caso de tener biomasa vegetal como parte del tratamiento, el filtro tiene suelo en su capa más superficial y se denomina filtro verde. Por otro lado, los humedales se van a nombrar bajo esta denominación cuando son de flujo horizontal y su material de soporte es grava. La Tabla 33 presenta las tecnologías que se nombran bajo la denominación de filtro y humedal.

También es de relevancia mencionar que la aplicabilidad de las tecnologías seleccionadas es para viviendas unifamiliares rurales, con la finalidad de implementar una alternativa de tratamiento terciario descentralizada, brindando una solución individual *in situ* para proteger y minimizar el impacto y la contaminación del recurso hídrico subterráneo.

	<p style="text-align: center;">AUNAR ESFUERZOS TÉCNICOS, ADMINISTRATIVOS Y FINANCIEROS ENTRE LA UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA Y LA CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CALDAS (CORPOCALDAS) PARA ELABORAR UNA GUÍA METODOLÓGICA PARA EL TRATAMIENTO Terciario DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS EN ÁREAS RURALES, ORIENTADA A LA PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN ZONAS DE ESPECIAL INTERÉS HIDROGEOLÓGICO; EN EL DEPARTAMENTO DE CALDAS</p>	
---	--	---

Tabla 32. Criterios y condiciones de diseño específicos.

Tecnología	Profundidad (m)	Carga hidráulica (m ³ /m ² -d)		Área (m ² /PE)		Carga orgánica (g DBO ₅ /m ² -d)	Relación largo:ancho	Tipo de relleno	Pendiente del fondo (%)	Referencia
HC-FS	0,10 - 0,60	0,05	0,03	3,00	5,00	< 6,70	2:1 hasta 4:1	Grava	1%	Rodríguez et al. (2022b)
	<0,40	0,03	0,01	5,00	20,00	6,00	10:1	Grava	NA	Vidal y Hormazábal (2018)
HC-FSS	0,50 agua 0,60 medio	0,05		3,15		4000	-	Gravas	1%	MAVDT, (2000) Título J
	0,46 - 0,76 medio 0,30 - 0,61 agua	0,05	0,03	3,00	5,00	< 6,70	2:1 hasta 4:1	Arenas y gravas	-	Rodríguez et al. (2022b)
	0,30 - 0,90	-	-	-	-	7,41 – 17,30	<4:1	Arenas y gravas	-	U.S.EPA (2000b)
	0,30 - 1,00 Usual 0,60	0,06	0,03	2,50	5,00	3 – 7,5	2:1; 3:1 y 4:1	Arenas y gravas	0,10 – 1,00 Usual 0,50	Delgadillo et al. (2010)
	<0,60	0,03	0,02	5,00	10,00	6	3:1	Arenas y gravas	<0,10	Vidal y Hormazábal (2018)
FIA	0,45 - 0,92 medio	0,08	0,20	1,88	0,75	2 - 10	-	Gravas	0 - 1	MAVDT, (2000) Título J
	0,45 - 0,90 medio	0,02		8,40		2,69 – 10,76	-	Arenas y gravas	-	U.S.EPA (1999)
	0,6 - 0,9	0,04		3,75		-	-	Arenas y gravas	0,5 - 1	U.S.EPA (1980)
FV	0,60 - 0,80	0,19	0,15	0,80	1,00	-		Gravas	0,50 – 2,00	Delgadillo et al. (2010)
	> 0,80	0,15	0,05	1,00	3,00	40	NA	Gravas	NA	Vidal y Hormazábal (2018)
	0,50 - 0,80	0,06		2,50		20 - 40	NA	Arena y Gravas	mínimo 1:1	García y Corzo (2008)
FV-DZ	0,90 - 1,20	0,06	0,01	2,50	12,50	70	-	-	-	Rodríguez et al. (2022)

Tecnología	Profundidad (m)	Carga hidráulica (m ³ /m ² -d)		Área (m ² /PE)		Carga orgánica (g DBO ₅ /m ² -d)	Relación largo:ancho	Tipo de relleno	Pendiente del fondo (%)	Referencia
FV-EFA	0,40	0,04		3,2		-	-	Grava, arena y suelo		Paulo et al. (2019)
Laguna con* lenteja de agua	2	0,30	0,10	0,50	1,50	10,62	> 3:1	-	-	Arceivala y Shyam (2007b)
Laguna de* maduración	0,8 - 1,2	0,05	0,03	3,00	5,00	-	> 10	-	1:2 - 1:3	Von Sperling y Chernicharo, (2005)
	1 – 2 Min. 1,5	0,05	0,01	3,00	12,00	10 - 30	L = < 4 W	-	2,0 y 2,5 horizontal y 1,0 vertical	Arceivala y Shyam (2007a)

* No se implementarán como opción de aplicación para el caso de estudio en el proyecto.

	<p style="text-align: center;">AUNAR ESFUERZOS TÉCNICOS, ADMINISTRATIVOS Y FINANCIEROS ENTRE LA UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA Y LA CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CALDAS (CORPOCALDAS) PARA ELABORAR UNA GUÍA METODOLÓGICA PARA EL TRATAMIENTO TERCIARIO DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS EN ÁREAS RURALES, ORIENTADA A LA PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN ZONAS DE ESPECIAL INTERÉS HIDROGEOLÓGICO; EN EL DEPARTAMENTO DE CALDAS</p>	
---	--	---

Tabla 33. Clasificación de las alternativas tecnológicas consideradas en el proyecto.

Nombre en la bibliografía	Nombre en este proyecto
HUMEDALES	
Humedal construido de flujo superficial	Humedal construido de flujo superficial (HC-FS)
Humedal construido de flujo subsuperficial	Humedal construido de flujo subsuperficial (HC-FSS)
FILTROS	
Filtro intermitente de arena	Filtro intermitente de arena (FIA)
Humedal construido de flujo vertical subsuperficial	Filtro verde (FV)
Filtro verde descarga cero	Filtro verde descarga cero (FV-DZ)
Tanque evaporativo	Filtro verde evaporativo de flujo ascendente (FV-EFA)

Para el óptimo funcionamiento de las alternativas de tratamiento terciario presentadas en la Tabla 33, es aconsejable que no lleguen aguas lluvias desde la red de aguas residuales o directas. Para cumplir con esta recomendación, es necesario que la red de aguas grises y negras se encuentre separada de la tubería de aguas lluvias y que el sistema pueda contar con techo para evitar el ingreso directo.

Finalmente, para las alternativas de tratamiento terciario que utilizan pasto vetiver, los restos obtenidos durante el mantenimiento, según Alegre (2007), pueden ser utilizados para compostaje, repelentes de insectos y controlador de plagas contra la malaria y dengue o si se trata de brotes tiernos pueden emplearse como forraje para alimentar al ganado, además de otras múltiples aplicaciones.

5.1 DISEÑO DE ALTERNATIVAS SELECCIONADAS

HUMEDAL CONSTRUIDO DE FLUJO SUPERFICIAL (HC-FS)

La bibliografía propuesta por Rodríguez et al. (2022b) presentan el diseño simplificado de humedales artificiales pequeños descentralizados, para el postratamiento de las ARD generadas en fincas cafeteras (adaptado de Steiner y Watson, 1993, citado por Crites et al., 2006), para ello recomiendan seguir los siguientes pasos:

1. Determine el área de la superficie del humedal (A_s), utilizando la Ecuación 2.

$$A_s = \frac{Q(\ln C_o - \ln C_e)}{K_T * d * p}$$

Ecuación 2. Área superficial de un humedal de flujo superficial.

Donde:

A_s : Área superficial, m^2 .

Q : Caudal diario de ARD, m^3/d . En caso de que no se tengan datos, se supone la producción de aguas residuales de 100 L/persona-d para personal permanente y de 50 L/persona-d, para personal temporal, de acuerdo con lo establecido en el Título E del RAS-2000 (MAVDT, 2000).

C_o : Concentración del contaminante en el afluente (ingreso al humedal) como DBO_5 , mg/L. Suponga que la DBO_5 que sale del Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente (FAFA) tiene un valor constante de 40 mg/L. Según el Ministerio del Medio Ambiente (2002), las ARD tienen una concentración media de DBO_5 de 200 mg/L y la eficiencia del sistema séptico hasta el FAFA es del 80%.

C_e : Concentración del contaminante en el efluente (salida del humedal) como DBO_5 , mg/L. Suponga que la DBO_5 del efluente del humedal no excederá los 10 mg/L.

d : Profundidad del agua en el humedal, m. Para el diseño, suponga que la profundidad efectiva del agua en el humedal es de 0,55 m. Metcalf y Eddy (1996), recomiendan un intervalo de 0,10 a 0,60 m y deje un borde libre de 0,10 m.

p : Porosidad o espacio utilizado por el agua para fluir a través del humedal, adimensional. En los humedales horizontales de flujo superficial (HC-FS) la vegetación, los sólidos sedimentados y las plantas secas ocupan un espacio en la columna de agua. Utilice un valor de porosidad planteado en la Tabla 34. No obstante, se puede utilizar un valor de porosidad promedio basado en el porcentaje de cubrimiento de la vegetación. Por ejemplo, un humedal con el 50% de espejo de agua sin plantas emergentes y 50% de cubrimiento con vegetación emergente tendría una $p = 1,0$ en el área sin vegetación y una $p = 0,75$ en el área con vegetación. El promedio de este humedal sería $p = 0,875$ (U.S.EPA, 2000).

Tabla 34. Valores de porosidad (p) en humedales construidos de flujo superficial.

Característica del humedal	p	Referencia
Sin vegetación	1,00	U.S.EPA (2000)
Completamente colonizados por la vegetación	0,65–0,75	U.S.EPA (2000)
Con vegetación completa densa (0,65) hasta vegetación menos madura (0,75)	0,65–0,75	Reed et al. (1998), citados por U.S.EPA (2000)
Con vegetación poco densa	0,95–1,00	Kadlec y Knight (1996), citados por U.S.EPA (2000)
Con vegetación madura	0,75	Gearheart (1997), citado por U.S.EPA (2000)

Fuente: Tomado de Rodríguez et al. (2022b), citando a Crites et al. (2000).

K_T : Constante de velocidad de primer orden, d^{-1} . Depende del contaminante a eliminar (DBO_5 , SST, NT, PT y coliformes, entre otros) y de la temperatura a la que se realiza el proceso de tratamiento. Los valores de esta constante a $20^\circ C$ se presentan en la Tabla 35. Registre la temperatura del agua en el humedal, si no la puede medir, suponga que

está por debajo de la temperatura ambiente en 2°C. Para calcular la constante se emplea la Ecuación 3.

$$K_T = 0,75 * K_{20} * \theta^{(T-20)}$$

Ecuación 3. Constante de velocidad de primer orden.

Donde:

K_T : Constante de velocidad de primer orden, d^{-1} .

K_{20} : Constante de velocidad a 20°C, d^{-1} (Tabla 35).

θ : Coeficiente de temperatura a 20°C, d^{-1} (Tabla 35).

T: Temperatura promedio del agua residual en el humedal durante el proceso de depuración, °C.

Tabla 35. Valores de la constante de velocidad y de temperatura, para diversos contaminantes en humedales de flujo superficial (HC-FS) y subsuperficial (HC-FSS).

Contaminante	Tipo de humedal	θ	K_{20} (d^{-1})	Referencia
DBO ₅	HC-FS	1,1	0,0057	U.S.EPA (1988)
	HC-FS con vegetación escasa	1,06	0,149	Rodríguez (2009)
		1,09	0,15	Crites et al. (2006)
		1,06	0,486	Cenicafé (2010)
	HC-FS con vegetación densa	1,06	0,678	Crites et al. (2006)
		1,06	0,906	Cenicafé (2010)
	HC-FSS con vegetación densa	1,06	1,1	Crites et al. (2006)
		1,06	1,1	Crites et al. (2006)
		1,06	1,104	Recomendado por USEPA, citado por Crites et al. (2006)
N-NH ₃	HC-FS	1,048	0,219	Crites et al. (2006)
Coliformes		1,19	2,6	Crites et al. (2006)

Fuente: Tomada de Rodríguez et al. (2022b), citando a U.S.EPA (2000).

- Adopte una relación de aspecto del humedal (largo a ancho) de, máximo, 4:1, con lo cual se permite que se cumpla la ley de Darcy y, por lo tanto, no se tendrían inconvenientes en el diseño hidráulico del humedal, no siendo necesarios los cálculos hidráulicos. Si las condiciones del sitio no permiten que se adopte la relación largo:ancho de máximo 4:1, será necesario realizar los cálculos hidráulicos. El flujo está descrito por la ecuación de Manning (Ecuación 4), que define el flujo en canales abiertos.

$$\frac{Q}{d * W} = \frac{1}{n} * d^{2/3} * s^{1/2}$$

Ecuación 4. Velocidad de flujo.



Donde:

Q: Caudal diario de ARD, m³/s.

d: Profundidad del agua en el humedal, m. Para el diseño suponga que la profundidad efectiva del agua en el humedal es de 0,55 m.

W: Ancho del humedal, m.

s: Pendiente de fondo del humedal de flujo superficial, m/m.

n: Número de Manning, s/m^{1/3}.

Para los humedales de flujo superficial, el número de Manning (n) está en función de la profundidad del agua debido a la resistencia impuesta por la vegetación emergente. La resistencia también depende de la densidad de la vegetación y de la capa de residuos que puede variar. La relación está definida por la Ecuación 5.

$$n = \frac{a}{d^{1/2}}$$

Ecuación 5. Número de Manning.

Donde:

n: Número de Manning, s/m^{1/3}.

a: Factor de resistencia, s-m^{1/6} (Crites et al., 2006). Tiene valores de 0,4 para vegetación escasa y profundidad del agua > 0,4 m; un valor de 1,6 para vegetación moderadamente densa y profundidad del agua ≥ 0,3 m, y un valor de 6,4 para vegetación muy densa y capa de residuos y profundidades del agua < 0,3 m.

d: Profundidad del agua en el humedal, m, suponga una profundidad efectiva de agua en el humedal de 0,55 m.

Con la Ecuación 4 se realiza un proceso iterativo variando el ancho del humedal (W) (la profundidad es constante) hasta que se igualen ambos lados de la ecuación. El ancho que satisfaga esta condición será el ancho del humedal. Con este ancho y el área superficial obtenida mediante el procedimiento del punto 1, se determina la longitud del humedal (L) mediante la Ecuación 6.

$$L = \frac{A_s}{W}$$

Ecuación 6. Longitud del humedal.

Donde:

L: Longitud del humedal, m.

W: Ancho del humedal, m.

As: Área superficial, m².

3. Con este enfoque de diseño se obtendrá un tiempo de retención hidráulico (TRH) de aproximadamente 2 d (a 20°C) en el humedal, que es apropiado para obtener una DBO₅ de 10 mg/L. Si la eliminación de nitrógeno se requiere hasta 10 mg/L, el tamaño del sistema debe duplicarse para tener un TRH de aproximadamente 4 d. La Ecuación 7 determina el TRH.

$$TRH = \frac{L * W * p * d}{Q}$$

Ecuación 7. Tiempo de retención hidráulico (TRH).

Donde:

TRH: Tiempo de retención hidráulico, d.

L: Longitud del humedal, m.

W: Ancho del humedal, m.

p: Porosidad o espacio utilizado por el agua para fluir a través del humedal, adimensional.

d: Profundidad del agua en el humedal, m. Suponer una profundidad efectiva del agua en el humedal de 0,55 m.

Q: Caudal diario de ARD, m³/d.

4. Utilice grava limpia y lavada como medio de soporte en el humedal, con un tamaño efectivo entre 12,5 a 25,0 mm. Debido a que la grava carece de nutrientes, se recomienda que las semillas se planten en un medio fértil con el fin de evitar problemas posteriores.
5. Para prevenir la infiltración de contaminantes a las aguas subterráneas, es imprescindible contar con una barrera impermeable que confine el sistema. En la mayoría de estos sistemas se utilizan revestimientos sintéticos fabricados con materiales como el caucho EPDM (etileno propileno dieno monómero), PVC o polietileno de alta densidad. Se recomienda utilizar una geomembrana de 20 mils debido a su alta resistencia mecánica, su precio accesible y sus propiedades físico-mecánicas, que la convierten en un material ideal para la impermeabilización. También debe construirse una berma al menos 15,0 cm por encima del sustrato y 15 cm de ancho rodeando el humedal.

6. Se recomienda utilizar una planta emergente (enea, papiro, pasto elefante morado, pasto vetiver, heliconias).

La Figura 22 muestra el dibujo en perfil de un humedal de flujo superficial con las características de diseño anteriormente mencionadas.

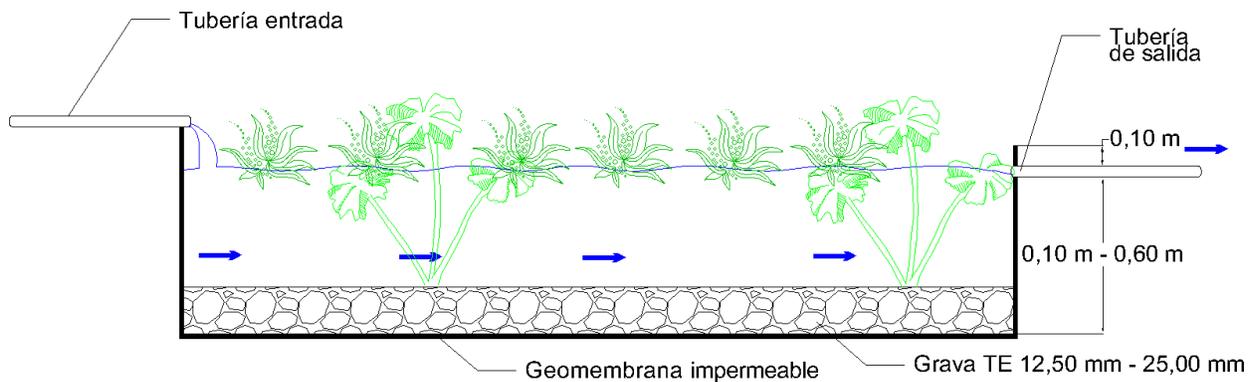


Figura 22. Vista en perfil de un humedal construido de flujo superficial.

HUMEDAL CONSTRUIDO DE FLUJO SUBSUPERFICIAL (HC-FSS)

La metodología para el diseño de este sistema se encuentra en el del RAS-2000 (MAVDT, 2000). El Título J presenta las alternativas tecnológicas en agua y saneamiento para el sector rural, de la sección 10.7.4.5.2. se sugieren algunos parámetros para el diseño del HC-FSS.

1. Para la determinación del área superficial del humedal se recomiendan dos alternativas:
 - a. Use los siguientes valores de carga hidráulica (L_w): 0,03125 m³/m²-d (para zonas frías o donde haya restricciones de espacio) o 0,04762 m³/m²-d (para zonas donde haya restricciones de espacio). Definiendo este valor y con el caudal de agua residual se despeja el área superficial de la Ecuación 8.

$$A_s = \frac{Q}{L_w}$$

Ecuación 8. Carga hidráulica para el cálculo del área superficial.

Donde:

A_s : Área superficial, m².

L_w : Carga hidráulica, m³/m²-d.

Q : Caudal diario de ARD, m³/d. En caso de que no se tengan datos, se supone la producción de aguas residuales de 100 L/persona-d para personal permanente y de 50

L/persona-d para personal temporal, de acuerdo con lo establecido en el Título E del RAS-2000 (MAVDT, 2000).

b. El método que incluye la cinética del proceso con la Ecuación 9.

$$A_s = \frac{Q(\ln C_o - \ln C_e)}{K_T * d * p}$$

Ecuación 9. Área superficial de un humedal de flujo subsuperficial.

Donde:

As: Área superficial, m².

Q: Caudal diario de ARD, m³/d. En caso de que no se tengan datos, se asume la producción de aguas residuales de 100 L/persona-d para personal permanente y de 50 L/persona-d para personal temporal, de acuerdo con lo establecido en el Título E del RAS-2000 (MAVDT, 2000).

C_o: Concentración del contaminante en el afluente (ingreso al humedal) como DBO₅, mg/L. Suponga que la DBO₅ que sale del Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente (FAFA) tiene un valor constante de 40 mg/L. Según el Ministerio del Medio Ambiente (2002), las ARD tienen una concentración media de DBO₅ de 200 mg/L y la eficiencia del sistema séptico hasta el FAFA es del 80%.

C_e: Concentración del contaminante en el efluente (salida del humedal) como DBO₅, mg/L. Suponga que la DBO₅ del efluente del humedal no excederá los 10 mg/L.

d: Profundidad del agua en el humedal, m. Para el diseño, suponga que la profundidad efectiva del agua en el humedal es de 0,45 m. Para esta profundidad del agua, la profundidad del medio recomendada es de 0,60 m y deje un borde libre de 0,10 m. Crites et al. (2000), recomienda para la profundidad del agua un intervalo de 0,30 a 0,61 m, y para la profundidad del medio entre 0,46 a 0,76 m.

p: Porosidad o espacio utilizado por el agua para fluir a través del humedal, adimensional. Los valores se presentan en la Tabla 36.

Tabla 36. Valores de porosidad (p) en humedales contruidos de flujo subsuperficial.

Tipo de medio	Tamaño efectivo d ₁₀ (mm)	p	K _s (m ³ /m ² -d)
Arena gruesa	2	0,28-0,32	100-1000
Arena con grava	8	0,30-0,35	500-5000
Grava fina	16	0,35-0,38	1000-10000
Grava mediana	32	0,36-0,40	10000-50000
Roca triturada	128	0,38-0,45	50000-250000

Fuente: Reed et al. (1998).

K_T : Constante de velocidad de primer orden, d^{-1} . Depende del contaminante a eliminar (DBO_5 , SST, NT, PT y coliformes, entre otros) y de la temperatura a la que se realiza el proceso de tratamiento. Los valores de esta constante a $20^\circ C$ se presentan en la Tabla 35. Registre la temperatura del agua en el humedal, si no la puede medir, suponga que está por debajo de la temperatura ambiente en $2^\circ C$. Para calcular la constante se emplea la Ecuación 3.

2. Adopte una relación de aspecto del humedal (largo a ancho) de, máximo, 4:1, con lo cual se permite que se cumpla la ley de Darcy y, por lo tanto, no se tendrían inconvenientes en el diseño hidráulico del humedal, no siendo necesarios los cálculos hidráulicos. Si las condiciones del sitio no permiten que se adopte la relación largo:ancho de máximo 4:1, será necesario realizar los cálculos hidráulicos. El flujo está descrito por la ley de Darcy con la Ecuación 10.

$$\frac{Q}{d * W} = (K_s * s)$$

Ecuación 10. Área de la sección transversal de un humedal de flujo subsuperficial.

Donde:

Q: Caudal diario de ARD, m^3/d .

d: Profundidad del agua en el humedal, m. Para el diseño, suponga que la profundidad efectiva del agua en el humedal es de 0,45 m. Para esta profundidad del agua, la profundidad del medio recomendada es de 0,60 m.

W: Ancho del humedal, m.

K_s : Conductividad hidráulica, m^3/m^2-d (Tabla 36). La conductividad hidráulica (K_s) utilizada para el diseño nunca puede ser mayor que la del medio de soporte. Se debe reducir dicha conductividad en un orden de magnitud para tener en cuenta los efectos de atascamiento asociados a la retención de sólidos en los humedales.

s: Pendiente de fondo del humedal de flujo subsuperficial, m/m. Se recomienda no usar la pendiente de fondo para ganar cabeza pues se corre el riesgo de dejar la entrada seca cuando haya condiciones de bajo caudal ($s = 0,01$).

Con la Ecuación 10 se realiza un proceso iterativo variando el ancho del humedal (W) (la profundidad es constante) hasta que se igualen ambos lados de la ecuación. El ancho que satisfaga esta condición será el ancho del humedal. Con este ancho y el área superficial obtenida mediante el procedimiento del punto 1, se determina la longitud del humedal (L) mediante la Ecuación 6.

3. Utilice grava limpia y lavada como medio de soporte en el humedal con el fin de eliminar los granos finos que puedan taponar los poros del sustrato y, posiblemente, causen flujo superficial. La grava debe tener un tamaño medio entre 50 a 10 mm y una profundidad media del lecho de 0,60 m y que la profundidad en la entrada no sea menor de 0,30 m.

Con profundidades mayores a 0,60 m, las raíces más profundas y los rizomas empiezan a debilitarse.

4. Para prevenir la infiltración de contaminantes a las aguas subterráneas, es imprescindible contar con una barrera impermeable que confine el sistema. En la mayoría de estos sistemas se utilizan revestimientos sintéticos fabricados con materiales como el caucho EPDM (etileno propileno dieno monómero), PVC o polietileno de alta densidad. se recomienda utilizar una geomembrana de 20 mils debido a su alta resistencia mecánica, su precio accesible y sus propiedades físico-mecánicas, que la convierten en un material ideal para la impermeabilización. También debe construirse una berma al menos 15,0 cm por encima del sustrato y 15 cm de ancho rodeando el humedal.
5. Algunas especies de plantas emergentes utilizadas en los humedales artificiales, de flujo horizontal subsuperficial, evaluadas en Cenicafé son: enea, bananito rojo, heliconias, pasto vetiver; además, Delgadillo et al. (2010) recomienda para este tipo de humedal utilizar totora, carrizo y plantas de la familia tífácea como espadaña, anea, junco, bayón, bayunco, bohordo, junco de la pasión, maza de agua. Cuando se utilice grava como medio, debido a que carece de nutrientes, se recomienda que las semillas se planten en un medio fértil con el fin de evitar problemas posteriores.
6. Por último, el Título J del RAS-2000 (MAVDT, 2000) da como sugerencia realizar una evaluación de las características del suelo, localización de cuerpos de agua, topografía, localización geográfica, líneas de propiedad y vegetación existente para ubicar adecuadamente el humedal.

La Figura 23 ilustra la vista en perfil de un humedal de flujo subsuperficial con las características de diseño presentadas.

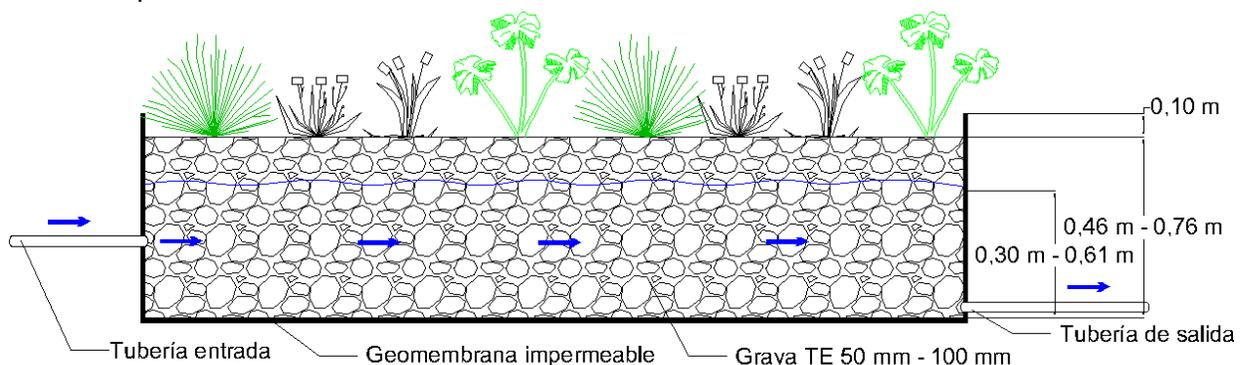


Figura 23. Vista en perfil de un humedal construido de flujo subsuperficial.

FILTRO INTERMITENTE DE ARENA (FIA)

De acuerdo con el RAS-2000 (MAVDT, 2000), el Título J en su sección 10.7.4.4.2. sugiere algunos parámetros de diseño para la aplicación de este tipo de filtro.

1. Se sugiere calcular el área superficial del filtro intermitente suponiendo una carga hidráulica (L_w) dentro del intervalo propuesto por el RAS-2000, el cual se presenta en la Tabla 37, y empleando la Ecuación 11.

$$A_s = \frac{Q}{L_w}$$

Ecuación 11. Área superficial del filtro intermitente de arena.

Donde:

A_s : Área superficial, m^2 .

L_w : Carga hidráulica, m^3/m^2-d .

Tabla 37. Parámetros de diseño para filtros intermitentes de arena.

Parámetro	Unidad	Intervalo
Carga hidráulica	m^3/m^2-d	0,3 - 0,6
Carga orgánica	$kg\ DBO_5/m^2-d$	0,002 - 0,010
Frecuencia de dosificación	veces/día	3,0 – 6,0
Volumen del tanque de dosificación	m^3 (igual al caudal de ARD generado en un día)	0,5 - 1,0
Pasos a través del filtro	Nº	1,0
Temperatura del medio filtrante	°C	> 15,0

Fuente: Título J RAS-2000 (MAVDT, 2000).

Q: Caudal diario de ARD, m^3/d . En caso de que no se tengan datos, se supone la producción de aguas residuales de 100 L/persona-d para personal permanente y de 50 L/persona-d para personal temporal, de acuerdo con lo establecido en el Título E del RAS-2000 (MAVDT, 2000).

2. Utilice como medio filtrante arena con tamaño efectivo entre 0,25 y 0,50 mm, coeficiente de uniformidad (CU) menor a 4,00 y de 0,45 a 0,92 m de altura.
3. Para la distribución se recomienda emplear tuberías de diámetro entre 1 y 2", con un tamaño de orificio entre $1/8$ y $1/4$ ". Asimismo, se sugiere mantener un intervalo de espaciamientos laterales entre tuberías de 0,46 a 1,22 m y entre orificios en cada tubería.
4. Para el drenaje se sugiere utilizar una capa de grava lavada resistente o piedra triturada con un tamaño efectivo de 9,5 a 19,0 mm en el lecho para facilitar el drenaje, así como tuberías de drenaje perforadas entre 7,6 a 10,2 cm de distancia entre orificios y tamaño de orificios entre $1/8$ y $1/4$ ", con una pendiente del 0 al 1,0%.

Adicionalmente, la U.S.EPA (1999) recomienda incluir dos capas de grava en el fondo del filtro, la primera capa recubriendo la línea de drenaje con grava gruesa y roca triturada (tamaño efectivo entre 12,0 y 19,0 mm), con una altura de 0,25 m, sobre esta

capa se coloca grava en grano con altura de 0,10 m. En la parte superior del filtro, deje 0,10 m de borde libre.

5. El extremo aguas arriba de la tubería de drenaje debe tener acoplada una tubería vertical de aireación, la cual sobresale a la superficie permitiendo el ingreso del aire para mantener aireadas las capas más profundas del medio, de esta manera se mejoran y favorecen los procesos de degradación aeróbica y la nitrificación.
6. Para prevenir la infiltración de contaminantes a las aguas subterráneas, es imprescindible contar con una barrera impermeable que confine el sistema. En la mayoría de estos sistemas se utilizan revestimientos sintéticos fabricados con materiales como el caucho EPDM (etileno propileno dieno monómero), PVC o polietileno de alta densidad. Se recomienda utilizar una geomembrana de 20 mils debido a su alta resistencia mecánica, su precio accesible y sus propiedades físico-mecánicas, que la convierten en un material ideal para la impermeabilización. También debe construirse una berma al menos 15,0 cm por encima del sustrato y 15 cm de ancho rodeando el humedal.

La Figura 24 ilustra el funcionamiento y características de un filtro intermitente de arena con las condiciones de diseño presentadas.

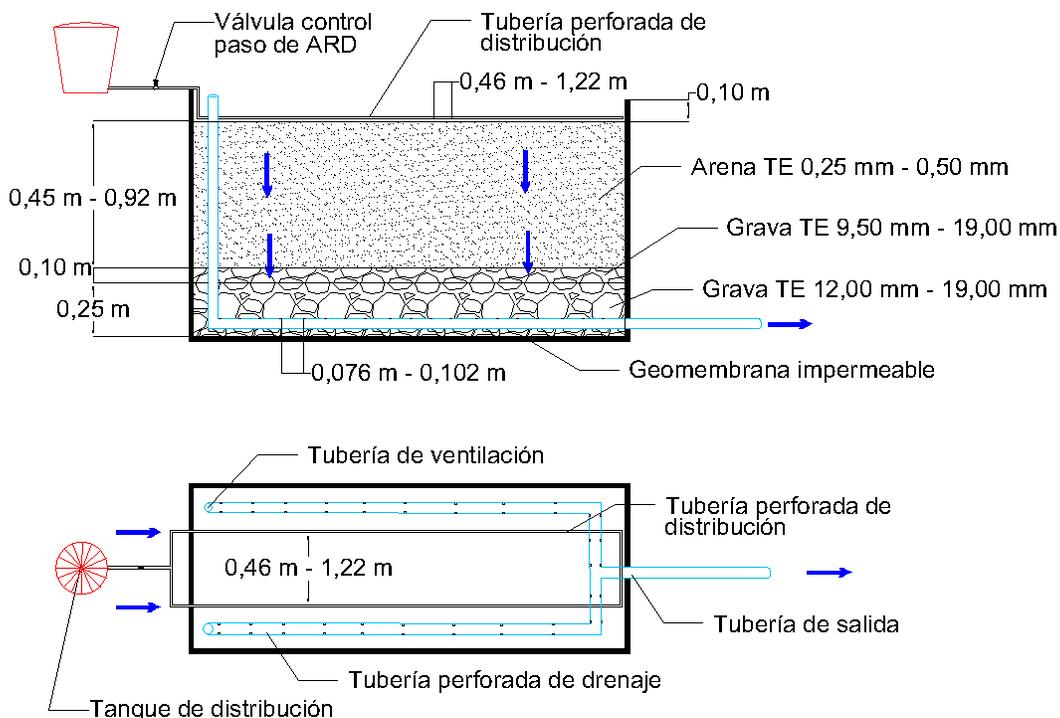


Figura 24. Vista en planta y corte del filtro intermitente de arena.

FILTRO VERDE (FV)

Los filtros verdes con descarga son sistemas con flujo subsuperficial vertical y operan con cargas de alrededor 20 g DBO/m²-d. Las recomendaciones para el diseño son extraídas de García y Corzo (2008).

1. El área superficial requerida se relaciona con la tasa de carga expresada en equivalentes de habitantes y varía según el nivel implícito de tratamiento (remoción de DBO o nitrógeno) (Kadlec & Wallace, 2009). La Ecuación 12, propuesta por Cooper (2005), relaciona los parámetros más utilizados para calcular el área superficial requerida para un filtro verde.

$$A_s = mh^b$$

Ecuación 12. Área de filtro verde con modelo cinético de primer orden.

Donde:

A_s: Área superficial, m².

h: Habitantes equivalentes.

m: Factor de escala, adimensional. Para el diseño, utilice un valor de 2 con el objetivo de remover DBO y nitrógeno amoniacal, de acuerdo con la Tabla 38.

b: Exponente. Con el objetivo de remover DBO y nitrógeno amoniacal utilice un valor de exponente de 1, según lo presentado en la Tabla 38.

2. Se recomienda implementar una profundidad total entre 0,50 y 0,80 m y un borde libre de 0,10 m. El medio granular se distribuye en tres capas horizontales con diferentes tamaños de partícula. La capa superior con espesor mayor o igual a 0,30 m, con arena gruesa de tamaño efectivo entre 0,25 a 0,40 mm, seguida por una capa intermedia de espesor entre 0,10 a 0,20 m con grava de 3,0 a 10,0 mm de tamaño efectivo, y finalmente una capa inferior de grava gruesa de 20 a 40 mm de tamaño efectivo, con un espesor de 0,10 a 0,20 m. Esta configuración se elige para regular el flujo del agua a través del lecho, evitando que sea demasiado rápido o lento.
3. Se recomienda instalar un tanque de almacenamiento del efluente secundario del STARD con capacidad igual o mayor al volumen de agua residual generado diariamente (se aconseja emplear tanques fabricados en polietileno).

Tabla 38. Parámetros de escala para calcula el área requería en filtro verde.

Bibliografía	País	m	b	Objetivos de remoción
Cooper et al. (1996)	Reino Unido	1,0	1,0	DBO
Cooper et al. (1996)	Reino Unido	2,0	1,0	DBO y nitrógeno amoniacal
Brix y Johansen (2004)	Dinamarca	3,0	1,0	Reducción del 95% de la DBO

Fuente: Adaptado de Kadlec y Wallace (2009).

4. Para la distribución del agua en todo el sistema se recomienda emplear tuberías de diámetro entre 1½” y 2” y deben tener orificios de 3/16” a ¼” colocados en la parte inferior de las tuberías separados entre 0,4 a 0,7 m (Brix y Arias, 2005).
5. El drenaje del agua se lleva a cabo mediante redes de tuberías perforadas ubicadas en el fondo y a lo largo del lecho, con diámetro de 6” (Brix y Arias, 2005). Esta tubería se cubre con una capa de grava gruesa (entre 0,10 y 0,20 m de espesor), con el fin de evitar que el medio granular más fino ingrese por las perforaciones de la tubería.
6. En la tubería de drenaje se acopla una tubería vertical de aireación, la cual sobresale a la superficie permitiendo el ingreso del aire para mantener aireadas las capas más profundas del medio, de esta manera se mejoran y favorecen los procesos de degradación aeróbica y la nitrificación. Se recomienda instalar las tuberías de aireación con 1 m de separación entre ellas (Brix y Arias, 2005).
7. Para prevenir la infiltración de contaminantes a las aguas subterráneas, es imprescindible contar con una barrera impermeable que confine el sistema. En la mayoría de estos sistemas se utilizan revestimientos sintéticos fabricados con materiales como el caucho EPDM (etileno propileno dieno monómero), PVC o polietileno de alta densidad. Se recomienda utilizar una geomembrana de 20 mils debido a su alta resistencia mecánica, su precio accesible y sus propiedades físico-mecánicas, que la convierten en un material ideal para la impermeabilización. También debe construirse una berma al menos 15,0 cm por encima del sustrato y 15 cm de ancho rodeando el humedal.
8. Para este tipo de humedal se recomienda utilizar macrófitas emergentes como tipo de vegetación, las más utilizadas son: Cortadera, Rume, Junco de Laguna, Hierba del Maná, Carrizo, Lirio Amarillo, Espadaña Amarilla, Eneas y Juncos y Espadañas en general.

La Figura 25 ilustra el funcionamiento y características de un filtro verde con las consideraciones de diseño presentadas.

FILTRO VERDE DESCARGA CERO (FV-DZ)

El diseño de las unidades de este sistema está basado en la investigación de Rodríguez et al. (2022).

1. El área requerida para un filtro verde de descarga cero de líquidos (ZLD por sus siglas en inglés) se calcula utilizando la Ecuación 13, la cual considera el volumen de agua residual generado, así como las tasas promedio de retención de humedad del suelo y de evapotranspiración de la vegetación sembrada.

$$A_s = \frac{Q}{T_{RE}}$$

Ecuación 13. Área de aplicación.

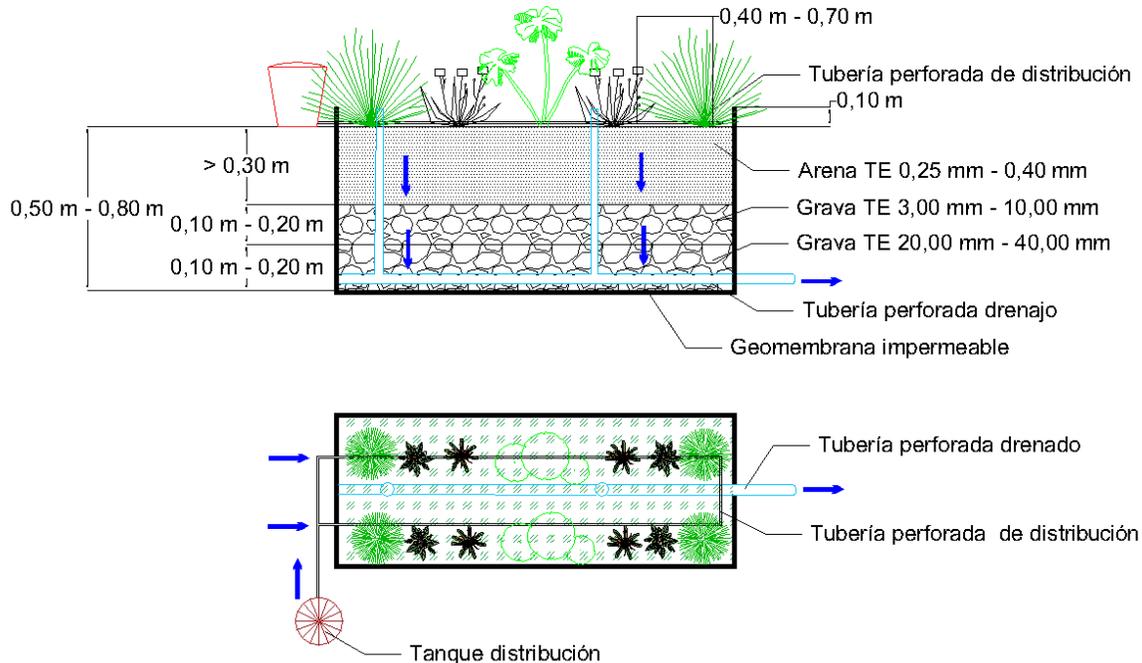


Figura 25. Vista en perfil y planta del filtro verde.

Donde:

A_s : Área superficial, m^2 .

Q : Caudal diario de ARD, L/d. En caso de que no se tengan datos, se supone la producción de aguas residuales de 100 L/persona-d para personal permanente y de 50 L/persona-d para personal temporal, de acuerdo con lo establecido en el Título E del RAS-2000 (MAVDT, 2000).

T_{RE} : Tasa promedio de retención de humedad del suelo y de evapotranspiración de la vegetación sembrada, mm/d. Para el caso de filtros verdes sembrados con pasto vetiver y operando con agua residuales de baja carga, como es el caso del ARD, puede utilizarse para su diseño el valor promedio de tasa de retención- evapotranspiración de 21,98 mm/d (21,98 L/ m^2 -d), de acuerdo con la investigación realizada por Rodríguez et al. (2022)

2. Se recomienda utilizar una profundidad total del filtro entre 0,9 y 1,2 m, con una pendiente máxima del 1,0% y deje un borde libre de 0,10 m.
3. Se recomienda instalar un tanque de almacenamiento del efluente secundario del STARD con capacidad igual o mayor al volumen de agua residual generado diariamente (se aconseja emplear tanques fabricados en polietileno).

- Para la distribución del agua residual en el área cultivada del filtro verde, se recomienda utilizar una tubería de PVC-P de $\frac{1}{2}$ " elevada mínimo 0,25 m. En esta tubería, se deben realizar perforaciones de $\frac{3}{32}$ ", espaciadas cada 10 cm. Estas perforaciones deben ubicarse en dos líneas en la parte inferior de la circunferencia del tubo, formando un ángulo de 45° y con un traslape de 5 cm entre las dos líneas de perforaciones, como se observa en la Figura 26.

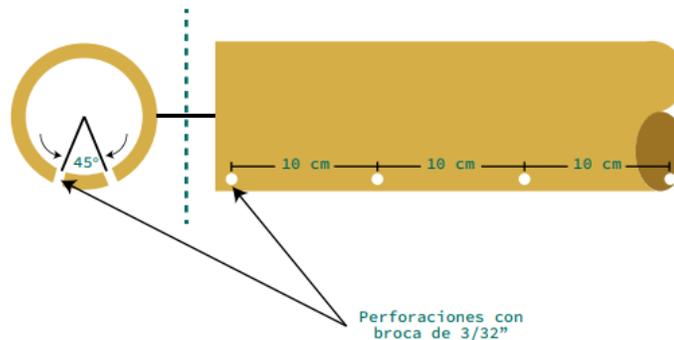


Figura 26. Perforaciones en la tubería de distribución del agua residual.

Fuente: Rodríguez et al. (2022).

- Los drenajes que puedan surgir en el área de cultivo van a depender de la temperatura del entorno; en días fríos, lluviosos o con escasa exposición solar, es posible que no se logre la completa evaporación y transpiración del agua aplicada, lo que puede resultar en una porción que requiere ser drenada. Por tanto, es crucial recolectarla y reintroducirla en el área cultivada del filtro verde, con el fin de alcanzar la meta de cero emisiones líquidas, esto es posible hacerlo mediante acarreo o con bombeo.
- Para la línea de drenaje se sugiere ubicar la tubería en un canal central recubierto de gravilla únicamente en el ancho y recubrirla en su base con polisombra. La tubería de drenaje debe tener un diámetro de 3" y estar perforada en la mitad superior de su circunferencia con agujeros de $\frac{5}{16}$ ".
- Con el fin de facilitar la aireación del suelo del filtro verde, se acoplan tuberías verticales de aireación a la tubería de drenaje cada 3 m. Estas tuberías sobresalen a la superficie permitiendo el ingreso del aire para mantener aireadas las capas más profundas del medio, de esta manera se mejoran y favorecen los procesos de degradación aeróbica y la nitrificación.
- El filtro verde debe permanecer inundado para favorecer los procesos de evapotranspiración. Por lo tanto, a la salida de la tubería de aireación y drenaje (una vez perforada la geomembrana), se acopla un adaptador hembra PVC-P de 2", un tramo de 50 cm de longitud de tubo PVC-S de 2", una unión PVC-S de 2" y una reducción de PVC de 2" a 1 $\frac{1}{2}$ " y allí se instala la unidad de control de inundación que está conformada por dos llaves PVC-P de 1 $\frac{1}{2}$ ", una instalada a nivel de piso y otra a 60 cm de altura. La primera sirve para realizar mantenimiento y eliminar lodos adheridos en la tubería de

descarga de drenados y la segunda sirve para mantener el nivel de inundación dentro del filtro verde a 60 cm de altura. Durante la operación del filtro verde la primera llave debe permanecer cerrada y la segunda llave debe permanecer abierta.

9. El agua drenada que supera el nivel de inundación (60 cm) se conduce a un tanque de drenados para ser incorporada a la unidad de aplicación. La capacidad de almacenamiento del tanque de recolección de drenados debe ser igual o mayor al volumen de agua residual generado diariamente (se aconseja emplear tanques fabricados en polietileno). El agua recolectada en el tanque de drenaje debe ser redirigida de manera efectiva hacia el tanque de distribución. Para lograr esto, existen dos métodos recomendados: el acarreo manual o el uso de una bomba sumergible, esta última se elige dependiendo de las necesidades específicas del sistema.
10. Para prevenir la contaminación de las aguas subterráneas, es imprescindible contar con una barrera impermeable que confine el sistema. En la mayoría de estos sistemas se utilizan revestimientos sintéticos fabricados con materiales como el caucho EPDM (etileno propileno dieno monómero), PVC o polietileno de alta densidad. se recomienda utilizar una geomembrana de 20 mils debido a su alta resistencia mecánica, su precio accesible y sus propiedades físico-mecánicas, que la convierten en un material ideal para la impermeabilización.
11. Se sugiere instalar una cobertura plástica tipo invernadero, en plástico agrolene calibre 7 o superior, hasta una altura de 2 m sobre el nivel del filtro y dejando una pestaña de 20 cm libre en la parte superior de las paredes para permitir la salida del aire húmedo y caliente.

La Figura 27 muestra el dibujo con vista en perfil y planta de un filtro verde descarga cero, de acuerdo con las características de diseño presentadas.

FILTRO VERDE EVAPORATIVO DE FLUJO ASCENDENTE (FV-EFA)

La metodología y consideraciones para el diseño del filtro evaporativo se realizan de acuerdo con lo planteado por Paulo et al. (2019) y Boulware (2013).

1. La Ecuación 14 planteada por (Boulware, 2013), permite estimar el área superficial requerida para evapotranspirar las ARD generadas, considerando que la tasa de evapotranspiración sea mayor a la precipitación local, de modo que habrá una transpiración neta de la humedad que ingresa al lecho para la ubicación y el uso específico.

$$A_s = \frac{K_i Q}{T_{RE} - P}$$

Ecuación 14. Área superficial filtro verde evaporativo.

Donde:

As: Área superficial, m².

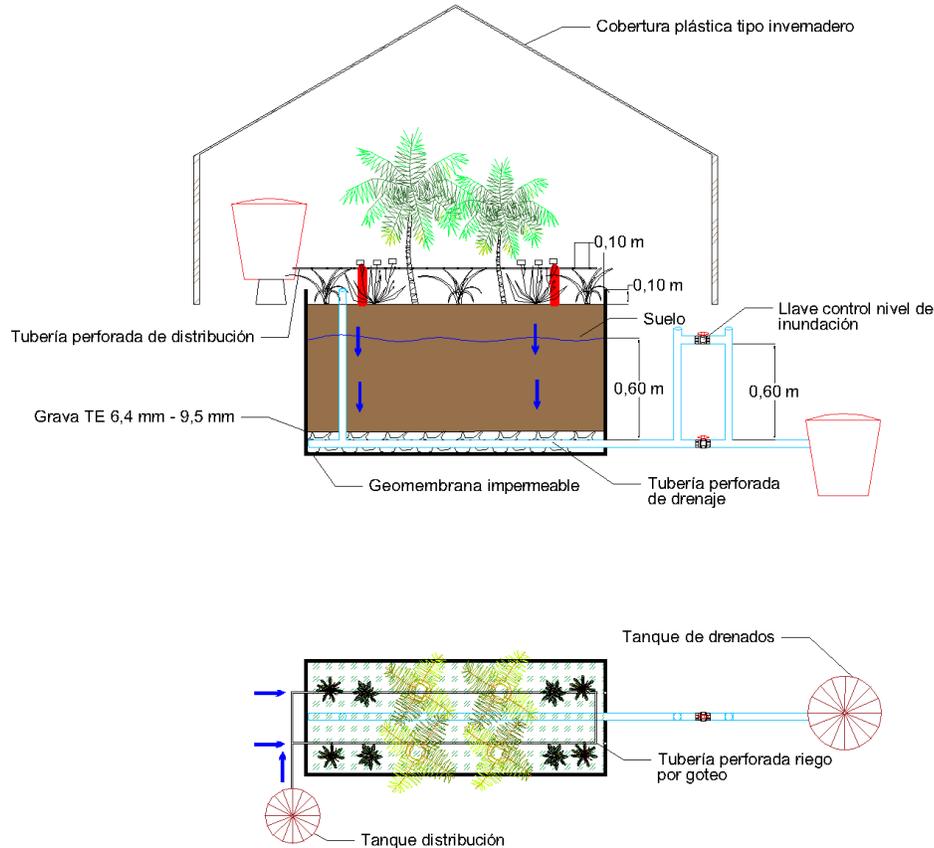


Figura 27. Vista en perfil y en planta filtro verde descarga cero.

Q: Caudal diario de ARD, L/d. En caso de que no se tengan datos, se asume la producción de aguas residuales de 100 L/persona-d para personal permanente y de 50 L/persona-d para personal temporal, de acuerdo con lo establecido en el Título E del RAS-2000 (MAVDT, 2000).

K_i: Coeficiente de infiltración, adimensional. Varía entre 0 y 1, y de acuerdo con lo estudiado por Paulo et al. (2019), se sugiere utilizar un valor de 0,5.

T_{RE}: Tasa promedio de retención de humedad del suelo y de evapotranspiración de la vegetación sembrada, mm/d. Para el caso de filtros verdes sembrados con pasto vetiver y operando con agua residuales de baja carga, como es el caso del ARD, puede utilizarse para su diseño el valor promedio de tasa de retención- evapotranspiración de 21,98 mm/d (21,98 L/m²-d), de acuerdo con la investigación realizada por Rodríguez et al. (2022)

P: Tasa de precipitación media diaria, mm/d. La Tabla 39 presenta la precipitación media diaria de cada zona de interés hidrogeológico objeto de estudio.

	<p>AUNAR ESFUERZOS TÉCNICOS, ADMINISTRATIVOS Y FINANCIEROS ENTRE LA UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA Y LA CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CALDAS (CORPOCALDAS) PARA ELABORAR UNA GUÍA METODOLÓGICA PARA EL TRATAMIENTO TERCARIO DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS EN ÁREAS RURALES, ORIENTADA A LA PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN ZONAS DE ESPECIAL INTERÉS HIDROGEOLÓGICO; EN EL DEPARTAMENTO DE CALDAS</p>	
---	---	---

Tabla 39. Precipitación media anual y diaria de las unidades hidrogeológicas objeto de estudio.

Unidad hidrogeológica	Precipitación media anual (mm/a)	Precipitación media diaria (mm/d)	Referencia
Acuífero Santágueda-km 41	189,58	0,52	CORPOCALDAS, UTP (2018)
Acuífero río Risaralda	179,93	0,49	CORPOCALDAS, UTP (2018b)
Acuífero río grande de La Magdalena	331,03	0,91	CORPOCALDAS, UTP (2018c)

2. La profundidad total del filtro debe ser máximo de 1,2 m y mínimo de 1,0 m (Boulware, 2013). Se sugiere suponer una profundidad total de 1,0 m y colocar un borde libre de 0,10 m de altura sobre el nivel del suelo para evitar inundaciones por la escorrentía de agua de lluvia (Paulo et al., 2019).
3. Es necesario instalar una línea de drenaje a la salida del filtro con la finalidad de derivar el agua desbordada; es decir, cuando no toda el agua que ingresa al sistema como afluente o lluvia pueda ser evaporada por las plantas, el efluente drenado sería dirigido hacia una caja de inspección. La tubería se localiza a 0,18 m por debajo de la superficie del suelo, en la capa superior (Paulo et al., 2019).
4. La cámara anaeróbica dentro del filtro es donde se reciben las aguas residuales. Esta cámara permite que los sólidos se sedimenten y se digieran parcialmente mediante digestión anaeróbica, evitando la obstrucción de los medios filtrantes del tanque. Cuando sube el nivel del agua en el sistema, las capas superiores, de grava y arena, también se inundan, hasta que el nivel del agua alcanza la capa superior (Paulo et al., 2019).

Se recomienda construir la cámara anaeróbica de acuerdo con lo planteado en el piloto desarrollado por Paulo et al. (2019). Se acondiciona un compartimento central a lo largo del fondo del filtro utilizando llantas de automóvil dispuestas con espacios entre ellas para permitir el flujo del efluente. El agua residual que ingresa es dirigida hacia este compartimento, que a su alrededor está recubierta con una capa de tejas de 0,45 m de espesor. Sobre las tejas se colocaron las siguientes capas: grava gruesa con un espesor de 0,10 m (con tamaños entre 4,8 a 9,5 mm y porosidad de 0,50), arena con un espesor de 0,10 m (con tamaños entre 0,15 a 4,75 mm) y suelo con un espesor de 0,35 m. Las tejas y la grava usadas actúan como medio filtrante y de soporte para la formación de biopelículas, lo que permite considerar el filtro verde evaporativo de flujo ascendente como un sistema 2 en 1.

9. Para prevenir la infiltración de contaminantes a las aguas subterráneas, es imprescindible contar con una barrera impermeable que confine el sistema. En la mayoría de estos sistemas se utilizan revestimientos sintéticos fabricados con materiales como el caucho EPDM (etileno propileno dieno monómero), PVC o polietileno de alta densidad. Se recomienda utilizar una geomembrana de 20 mils debido a su alta

resistencia mecánica, su precio accesible y sus propiedades físico-mecánicas, que la convierten en un material ideal para la impermeabilización. También debe construirse una berma al menos 15,0 cm por encima del sustrato y 15 cm de ancho rodeando el humedal.

5. Se recomienda emplear una mayor relación largo/ancho, con la finalidad de aumentar el perímetro del filtro y, en consecuencia, el índice de área foliar de las plantas, que tiende a ser significativamente mayor cerca de los bordes, por lo general se recomienda optar por una relación 4:1.
6. Es necesario incluir además del pasto vetiver, vegetación propia de la flora local, que pueda crecer fácilmente en las condiciones ambientales donde se va a instalar el filtro.

La Figura 28 muestra el esquema de un filtro verde evaporativo de flujo ascendente de acuerdo con la descripción de diseño realizada por Paulo et al. (2019).

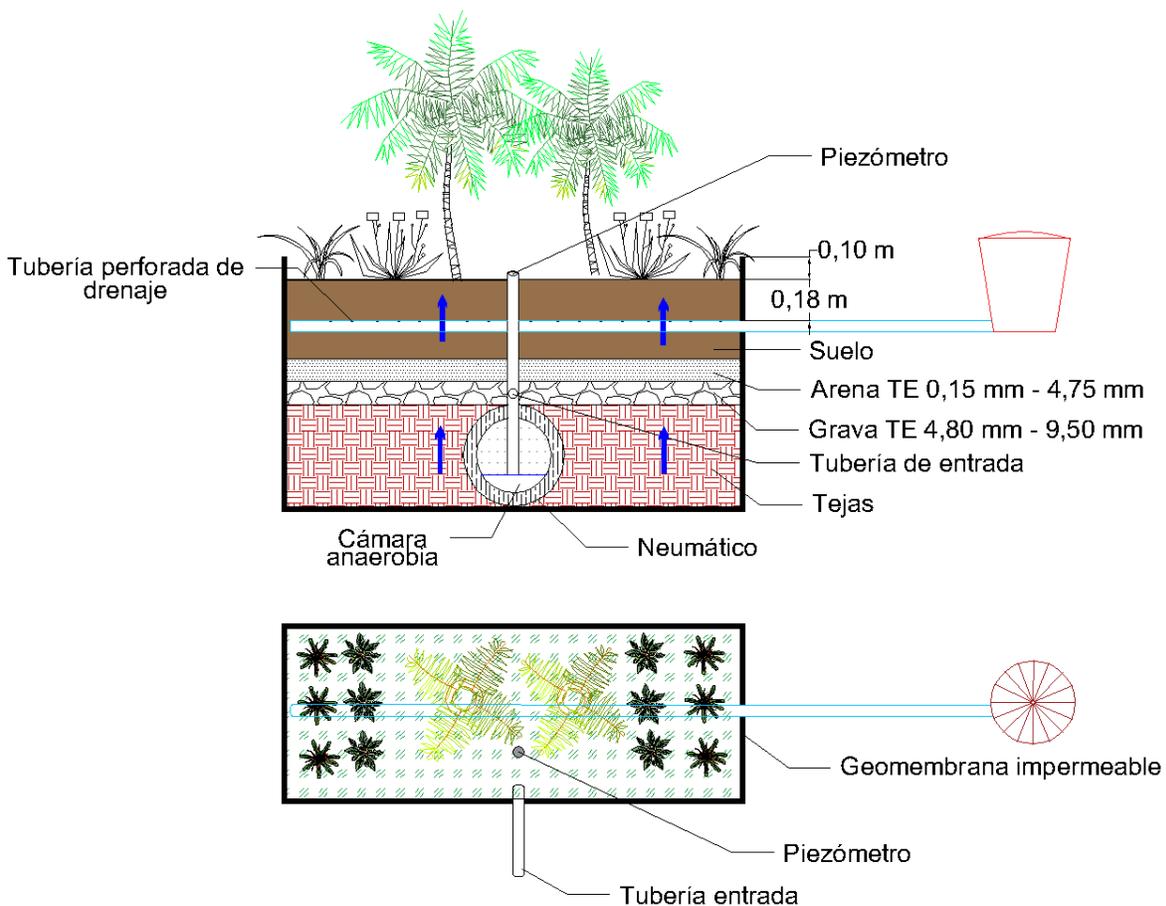


Figura 28. Vista en planta y perfil de un filtro evaporativo de flujo ascendente.

5.2 CASO PILOTO

El diseño piloto de este estudio es llevado a cabo para el Centro de Atención Veterinario (CAV) de CORPOCALDAS, ubicado en el municipio de Palestina, en el acuífero Santágueda-km 41, con coordenadas geográficas 5,0796889 N, -75,67119722 E.

El CAV cuenta con un STARD de tres (3) tanques de polietileno, el primero es una trampa de grasas, el siguiente un pozo séptico y el último corresponde a un Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente (FAFA). El efluente de este sistema es conducido por una tubería de 7 m y son descargadas al suelo, lo que conlleva a la infiltración de contaminantes a la zona de interés hidrogeológico, por lo que se requiere la implementación de un tratamiento terciario.

Para determinar la tecnología más adecuada en este caso, se utiliza un flujograma (Figura 29) que permite identificar rápidamente qué tecnología debe implementarse. Se considera inicialmente si el STARD actual del usuario se encuentra en una zona de interés hidrogeológico o no. En caso de ser afirmativa la respuesta, se evalúa la siguiente condición: si el efluente se vierte al suelo o a una fuente superficial de agua. Esto condiciona los vertimientos al suelo a tecnologías con descarga cero, como la implementación de un filtro verde de descarga cero o un filtro verde evaporativo de flujo ascendente. Por otro lado, si la descarga se realiza a una fuente superficial de agua, el factor limitante es el área disponible por el usuario.

Es importante enfatizar que el funcionamiento del STARD hasta el tratamiento secundario debe estar en buenas condiciones y operando correctamente antes de implementar un tratamiento terciario.

De esta forma el área requerida es de 72,79 m², siendo las dimensiones del sistema determinadas por una relación largo:ancho de 4:1; se calcula un largo de 17,1 m y ancho de 4,3 m. La Figura 30 muestra el diseño en planta y perfil del filtro verde descarga cero, mientras que la Figura 31 muestra el modelo 3D. El plano con los detalles e información constructiva se observan en el Anexo 9.4.

Para la construcción del filtro verde es necesario realizar una excavación con una profundidad de 0,7 m; adicionalmente, se requiere construir un canal central dispuesto para la tubería de drenaje, el cual debe tener una pendiente de 0,5%, un ancho de 0,2 m y profundidad 0,1 m. Teniendo la excavación, se instala la geomembrana y en el canal central se dispone la tubería de drenaje con perforaciones de $\frac{5}{16}$ " en la mitad superior de esta y se recubre con polisombra. Se agrega gravilla con un tamaño efectivo aproximado de 6,4 a 9,5 mm a lo largo del canal.

Al instalar la geomembrana, es crucial asegurarse de que el terreno esté libre de piedras u otros materiales cortantes o punzantes que puedan causar su ruptura. Además, se recomienda que el personal encargado de la manipulación de la geomembrana lo haga descalzo, a fin de evitar cualquier daño al material impermeabilizante. Se recomienda el uso de una geomembrana de 20 mils debido a su excelente resistencia. Esta geomembrana está disponible en un ancho comercial de 7 m. En el caso de este filtro que tiene un ancho de 4 m y una profundidad de 0,7 m, quedará un excedente de geomembrana, lo cual se aprovecha para construir una berma que se extiende al menos 15,0 cm por encima de la superficie del suelo. Esto permite asegurar una adecuada cobertura y protección del sistema.

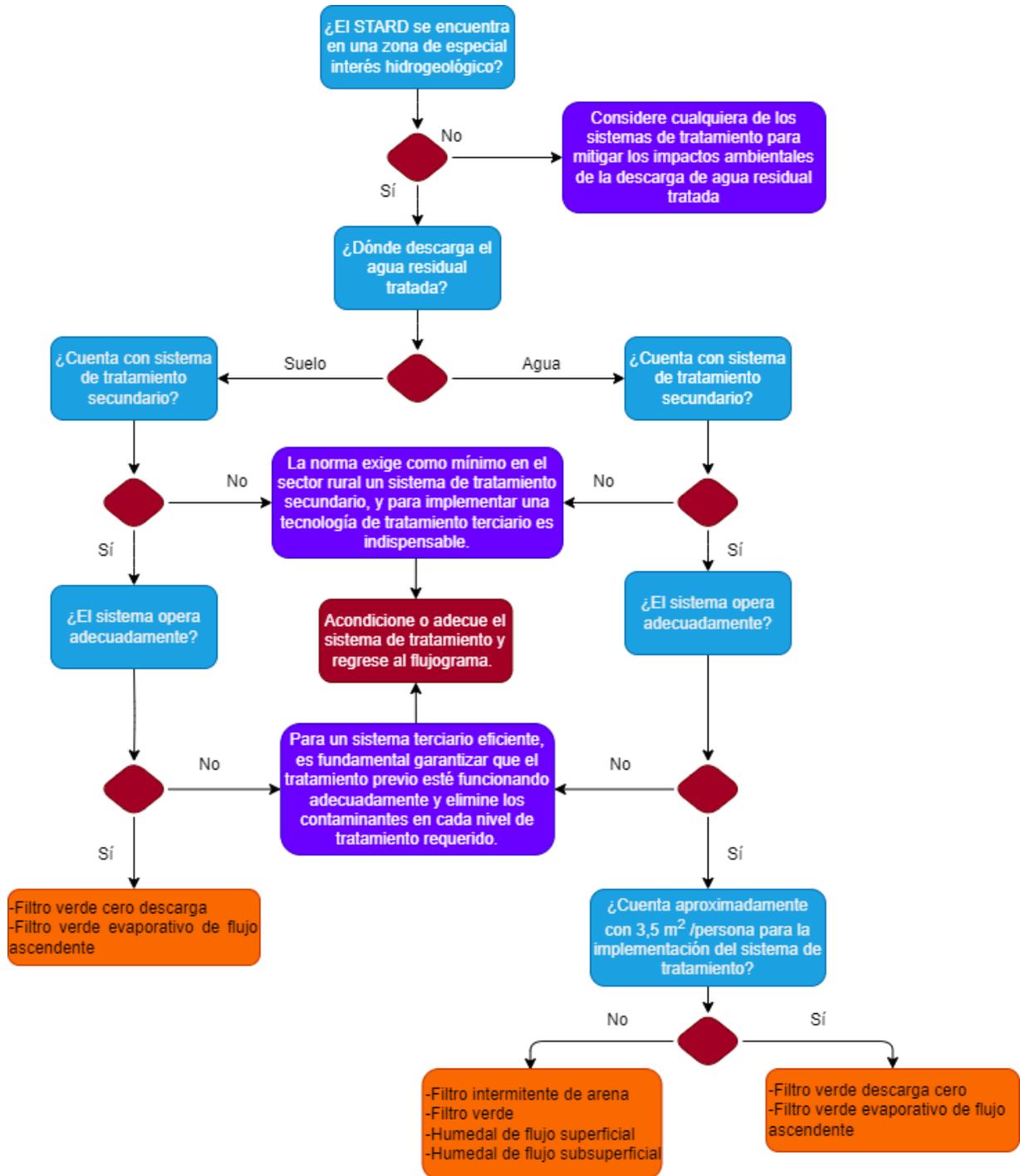


Figura 29. Flujograma de selección de tecnologías terciarias.

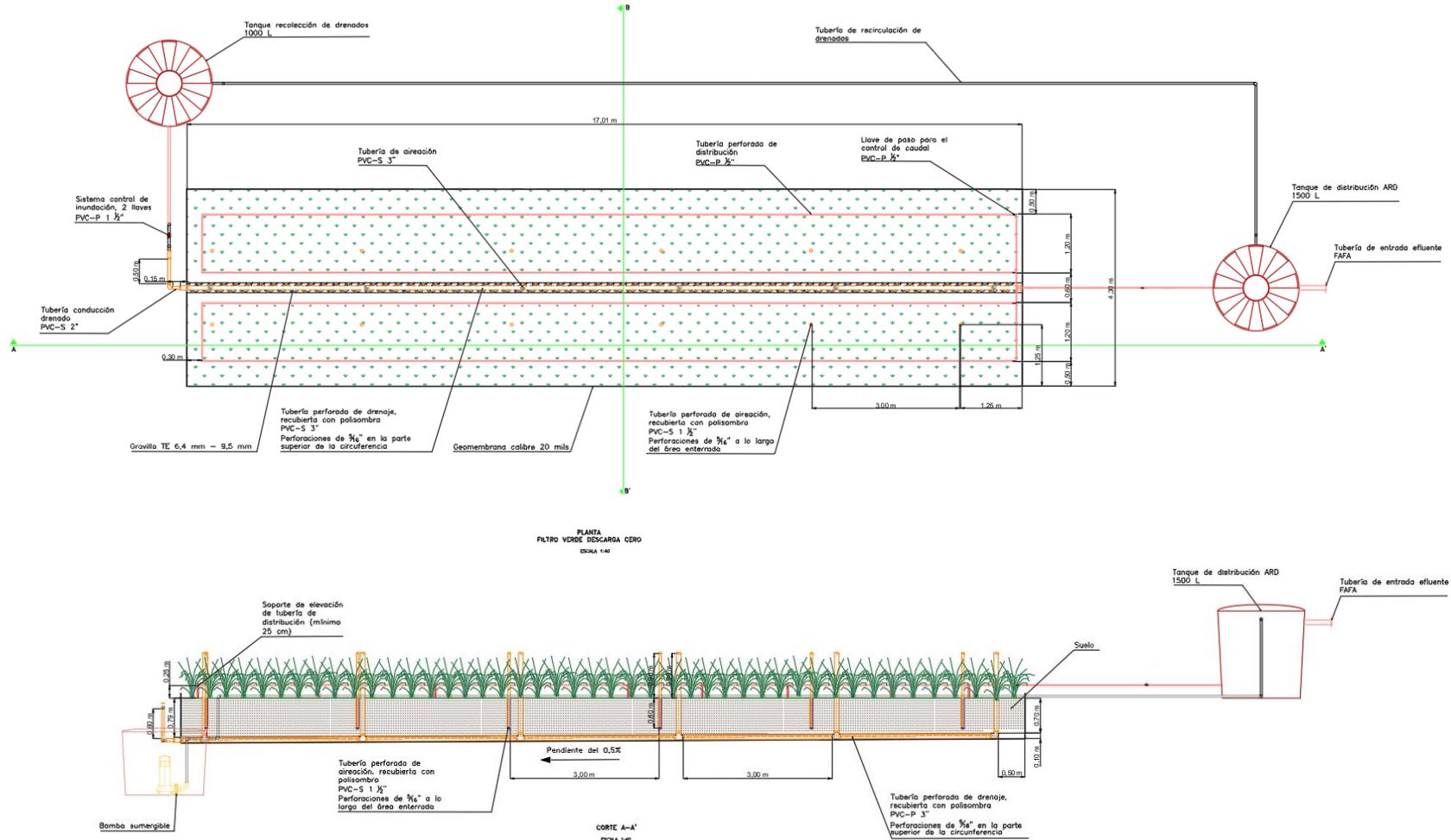


Figura 30. Vista en planta y corte filtro verde descarga cero, caso piloto CAV.



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**
Facultad de Ingeniería

AUNAR ESFUERZOS TÉCNICOS, ADMINISTRATIVOS Y FINANCIEROS ENTRE LA UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA Y LA CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CALDAS (CORPOCALDAS) PARA ELABORAR UNA GUÍA METODOLÓGICA PARA EL TRATAMIENTO Terciario DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS EN ÁREAS RURALES, ORIENTADA A LA PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN ZONAS DE ESPECIAL INTERÉS HIDROGEOLÓGICO; EN EL DEPARTAMENTO DE CALDAS



Corpocaldas
Corporación Autónoma Regional de Caldas

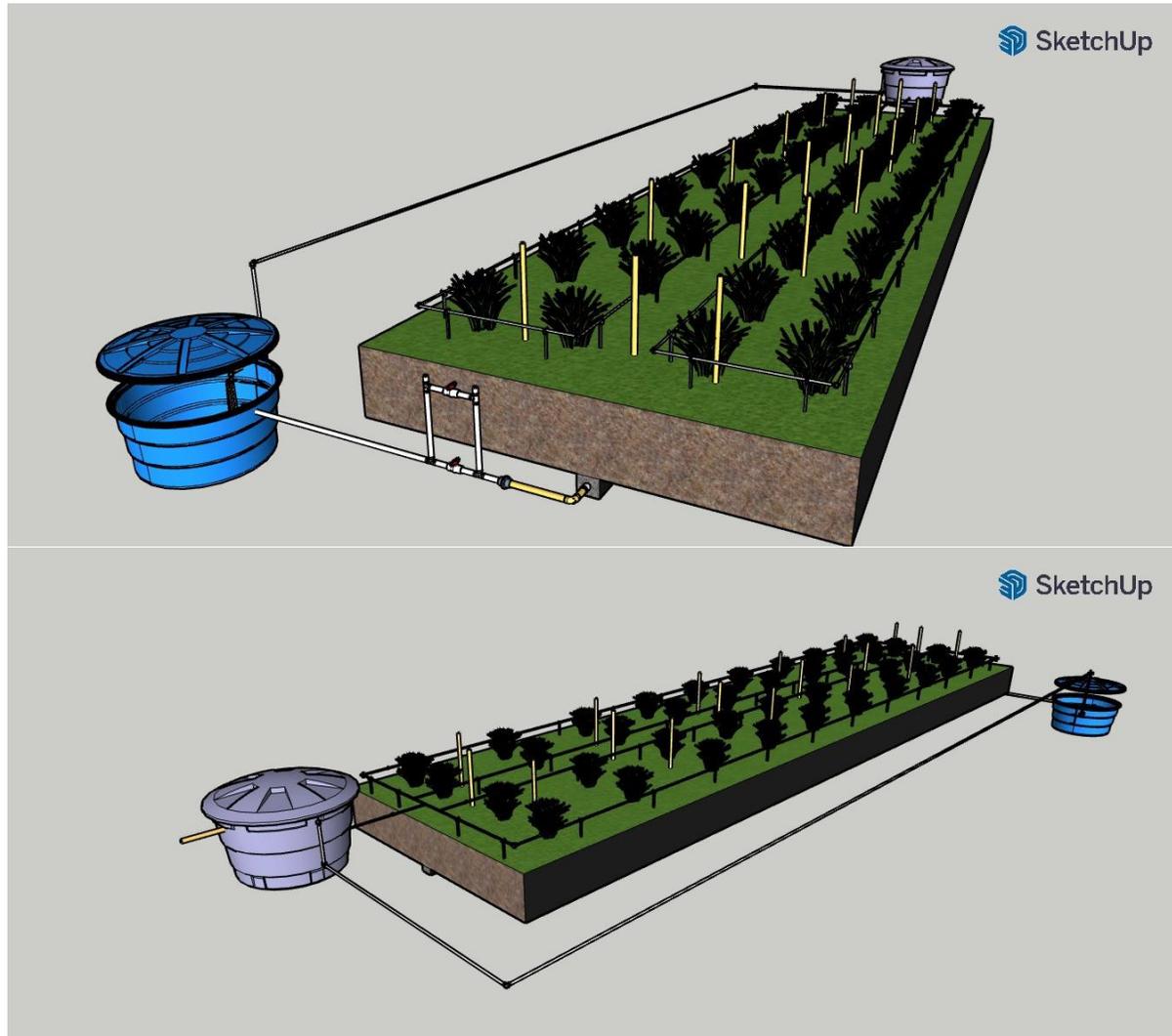


Figura 31. Modelo 3D del filtro verde descarga cero, caso piloto CAV.

Durante la excavación, es importante separar las capas superiores del suelo de las capas más profundas. Esto se debe a que, al impermeabilizar la excavación, se debe agregar primero las capas profundas y luego las superiores para mantener el perfil original del suelo.

Después de completar la excavación, se realiza la siembra del pasto vetiver por medio de esquejes, estos consisten en una porción de la planta que cuenta con un tallo de 10 cm y una raíz de 5 cm. Se siembran en forma de cuadros, con una separación de 30 cm entre cada uno, y se colocan tres (3) esquejes por sitio de siembra. Es aconsejable llevar a cabo la siembra del pasto vetiver al menos seis (6) meses antes de comenzar la implementación del filtro verde descarga cero. Esto garantizará su adecuado desarrollo y permitirá realizar resiembras en caso de que algún esqueje no haya crecido satisfactoriamente.

En cuanto al agua recolectada en el tanque de drenaje, es necesario reintegrarla al tanque de distribución. Aunque el acarreo manual es una opción, para este caso piloto se sugiere utilizar una bomba sumergible de $\frac{1}{2}$ hp (caballos de fuerza) por su practicidad. Es importante tener en cuenta la diferencia de altura entre el tanque de drenaje y el tanque de distribución al seleccionar la bomba adecuada para el sistema. En las especificaciones de la bomba, se encuentra la altura máxima a la que puede elevar el agua, lo cual debe coincidir con los requisitos de altura del sistema.

La tubería de recirculación del agua de drenados va a depender del acople o adaptador de salida de la bomba seleccionada, para el caso de bombas sumergibles de $\frac{1}{2}$ hp el acople para tubería es de 1" o 1½".

El manual de mantenimiento del filtro verde descarga cero es presentado como Anexo 9.5.

5.3 GUÍA METODOLOGICA

La guía metodológica corresponde a una cartilla práctica diseñada con la intención de informar a los usuarios de CORPOCALDAS, propietarios de un STARD, sobre la vulnerabilidad de las aguas subterráneas frente a los vertimientos de agua residual y así reconocer la necesidad de implementar un tratamiento terciario para proteger los acuíferos del departamento de Caldas. El propósito principal de esta guía es orientar al lector en la identificación de una serie de parámetros y condiciones de diseño, con el fin de seleccionar la tecnología de tratamiento terciario que mejor se ajuste a sus necesidades y haciendo hincapié que estas alternativas se enfocan fundamentalmente en soluciones individuales para viviendas rurales dispersas y, eventualmente, a colectivos.

En primer lugar, se describe qué son las aguas residuales y se explica el proceso de disposición de las mismas, abarcando los diferentes niveles de tratamiento existentes: preliminar, primario, secundario y terciario. Además, se define concisamente qué son las aguas subterráneas y se mencionan las zonas de interés hidrogeológico, como las zonas de recarga.

Posteriormente, se presenta una descripción de la zona de estudio mediante un mapa de localización, ilustrando las unidades hidrogeológicas ubicadas en el departamento de Caldas, que incluyen el acuífero Santágueda-km 41, el acuífero río Risaralda y el acuífero río grande de

La Magdalena, indicando mediante ilustraciones cómo afectan los vertimientos al suelo de agua residual cuando no se realiza un tratamiento terciario, al recurso hídrico subterráneo.

En la guía metodológica también se encuentra la descripción resumida de las seis (6) alternativas de tratamiento terciario seleccionadas para ser aplicadas en las zonas estudiadas en este proyecto, junto con su respectivo dibujo descriptivo: humedal construido de flujo superficial (HC- FS), humedal construido de flujo subsuperficial (HC- FSS), filtro intermitente de arena (FIA), filtro verde (FV), filtro verde descarga cero (FV- DZ), filtro verde evaporativo de flujo ascendente (FV- EFA).

Para la selección de la tecnología que más se adecúe a las condiciones de los usuarios, se propone seguir las indicaciones del diagrama de flujo (Figura 29); en este se considera inicialmente si el STARD se encuentra en una zona de interés hidrogeológica y si el vertimiento se descarga al suelo o a una fuente hídrica superficial; en caso de que el STARD se encuentre en esta zona de protección y el vertimiento se realice al suelo se condiciona la alternativa de tratamiento terciario a tecnologías de descarga cero y el usuario tiene la opción de implementar un filtro verde de descarga cero o un filtro verde evaporativo de flujo ascendente. Por otro lado, si la descarga se realiza a una fuente superficial de agua, el factor limitante es el área disponible por el usuario.

Las dimensiones de las tecnologías de tratamiento terciario propuestas se encuentran en la guía metodológica, de tal forma que el usuario de acuerdo a la tecnología seleccionada por medio del diagrama de flujo y la cantidad de personas permanentes en la vivienda, pueda saber cuál es el ancho, largo y profundidad requerida para instalar la tecnología en su predio. El dimensionamiento se realizó considerando habitantes permanentes desde 2 hasta 20 personas, teniendo en cuenta el cálculo del área superficial de cada alternativa de tratamiento, de acuerdo con las ecuaciones dispuestas en la sección 5.1 del presente informe.

El área de todas las alternativas depende del caudal diario de agua residual, por consiguiente, se supone la producción de aguas residuales de 100 L/persona-d para personal permanente, de acuerdo con lo establecido en el Título E del RAS-2000 (MAVDT, 2000), por ejemplo, para un hogar con 4 personas permanentes se multiplica $4 \times 100 \text{ L/persona-d} = 400 \text{ L/d}$.

5.3.1 Consideraciones técnicas

Para el caso del HC-FS, el área superficial se calcula suponiendo que la concentración de DBO_5 afluente del humedal es de 40 mg/L, la concentración de DBO_5 efluente del humedal es de 10 mg/L, una profundidad de agua en el humedal de 0,55 m y la porosidad por la cual fluye el agua a través del humedal depende si el área está con vegetación o sin vegetación, para este caso se supuso con vegetación, por lo cual tiene un valor de 0,75.

Por último, se calcula la constante de velocidad de primer orden (K_T), esta constante depende de la temperatura del agua en el humedal; puesto que cada acuífero maneja temperaturas muy variables, se debe hallar una constante K_T para el respectivo acuífero.

	<p style="text-align: center;">AUNAR ESFUERZOS TÉCNICOS, ADMINISTRATIVOS Y FINANCIEROS ENTRE LA UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA Y LA CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CALDAS (CORPOCALDAS) PARA ELABORAR UNA GUÍA METODOLÓGICA PARA EL TRATAMIENTO TERCARIO DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS EN ÁREAS RURALES, ORIENTADA A LA PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN ZONAS DE ESPECIAL INTERÉS HIDROGEOLÓGICO; EN EL DEPARTAMENTO DE CALDAS</p>	
---	---	---

Se realiza una búsqueda de la temperatura promedio de los municipios que componen cada acuífero, seleccionando la temperatura de menor valor como factor de seguridad. La Tabla 40 muestra las temperaturas encontradas.

Para el acuífero Santágueda-km 41 la temperatura más baja reportada corresponde al municipio de Anserma, para río Risaralda el municipio de Belalcázar y para río grande de La Magdalena el municipio de Victoria.

Tabla 40. Temperatura ambiente de los municipios correspondientes a cada acuífero en lo que va del año 2023.

Acuífero Santágueda-km 41	
Municipio	Temperatura media (°C)
Filadelfia	20
Neira	19
Manizales	18
Palestina	18
Anserma	17
Acuífero río Risaralda	
Municipio	Temperatura media (°C)
Viterbo	23
Belalcázar	16
San José	26
Acuífero río grande de La Magdalena	
Municipio	Temperatura media (°C)
Victoria	26,6
La Dorada	27
Norcasia	27

Continuando con el cálculo de la constante de velocidad, el valor de Θ y K_{20} se extraen de la Tabla 35, para lo cual de acuerdo con Crites et al. (2006), para un HC- FS con vegetación densa el valor de Θ y K_{20} se toman de 1,06 y 0,678 respectivamente. De esta manera se calcula la K_T para cada acuífero y se encuentra el área que requiere un HC- FS dependiendo del lugar donde se vaya a ubicar. Teniendo el área superficial que requiere el HC- FS y manteniendo una relación largo:ancho de 4:1, se hallan las dimensiones del sistema conservando una profundidad total de 0,6 m.

Ahora, para calcular el área superficial del HC- FSS, se hizo uso de la Ecuación 9, la cual incluye la cinética del proceso. La concentración del contaminante en el afluente, efluente y la profundidad de agua en el humedal se supusieron del mismo valor que para el HC- FS, pero el valor de la porosidad se extrajo de la Tabla 36, tomando este como 0,38.

Por otro lado, para calcular la constante de velocidad de primer orden (K_T) al igual que con el HC- FS debe buscarse el valor de Θ y K_{20} en la Tabla 35, para un HC- FSS con vegetación densa los valores supuestos respectivamente fueron de 1,06 y 1,104 (Crites et al., 2006). El valor de K_t al depender de la temperatura debe realizarse para cada acuífero, por consiguiente, se obtiene el área que requiere un HC- FSS dependiendo del lugar donde va a estar ubicado.

	<p style="text-align: center;">AUNAR ESFUERZOS TÉCNICOS, ADMINISTRATIVOS Y FINANCIEROS ENTRE LA UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA Y LA CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CALDAS (CORPOCALDAS) PARA ELABORAR UNA GUÍA METODOLÓGICA PARA EL TRATAMIENTO Terciario DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS EN ÁREAS RURALES, ORIENTADA A LA PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN ZONAS DE ESPECIAL INTERÉS HIDROGEOLÓGICO; EN EL DEPARTAMENTO DE CALDAS</p>	
---	--	---

Con el área superficial y manteniendo una relación 4:1 de largo:ancho, se hallan las dimensiones del sistema. Se recomienda que la profundidad total del humedal sea de 0,6 m.

El área superficial del FIA se calcula mediante la Ecuación 11, utilizando un valor de 0,45 m³/m²-d para la carga hidráulica; además, se emplea una relación largo:ancho de 2:1 y se fija una profundidad total del humedal de 1 m.

Para el FV se emplean los valores recomendados para la remoción de DBO₅ y nitrógeno amoniacal, dispuestos en la Tabla 38, siendo 2,0 para el factor de escala (m) y 1,0 para el exponente (b). Estos parámetros se reemplazan en la Ecuación 12 para calcular el área superficial, se establece una relación largo:ancho de 4:1 y se fija una profundidad total de 0,7 m.

El área requerida de aplicación para el FV-DZ depende del caudal y de la tasa promedio de retención de humedad del suelo y de la evapotranspiración del material vegetal sembrado (T_{RE}); se utiliza el valor recomendado para agua residual de baja carga y pasto vetiver como vegetación, de 21,98 mm/d; se reemplaza en la Ecuación 13 y se establece una relación largo:ancho de 4:1. Por último se fija una profundidad total de 0,7 m.

Para el FV-EFA el coeficiente de infiltración (K_i) se sugiere utilizar de 0,5 y el valor de la precipitación se toma de la Tabla 39, de acuerdo a dónde se encuentre la vida dentro de las unidades hidrogeológicas de interés. Se utiliza la Ecuación 14 para calcular el área superficial requerida; se establece una relación largo:ancho de 4:1 y se fija una profundidad total del filtro de 1,0 m.

El Anexo 9.6 contiene de manera detallada el cálculo de las áreas superficiales para cada una de las alternativas descritas.

En las Tabla 41, Tabla 42 y Tabla 43 están condensadas las dimensiones (largo, ancho y profundidad) para cada sistema dependiendo de la población para la que se requiera el diseño y el acuífero donde esté ubicado.

Tabla 41. Dimensiones de los sistemas para el acuífero Santágueda-km 41.

Datos de entrada			Alternativas de tecnología de tratamiento terciario (h: profundidad)					
Habitantes (permanentes)	Caudal de ARD generado (m ³ /d)	Dimensiones del sistema (m)	HC-FS* (h = 0,6 m)	HC-FSS* (h = 0,6 m)	FIA* (h = 1,0 m)	FV* (h = 0,7 m)	FV-DZ* (h = 0,7 m)	FV-EFA* (h = 1,0 m)
2	0,2	Ancho	0,7	0,7	0,4	1,0	1,6	1,3
		Largo	2,8	2,8	0,8	4,0	6,4	5,2
3	0,3	Ancho	0,8	0,9	0,5	1,3	1,9	1,6
		Largo	3,2	3,6	1,0	5,2	7,6	6,4
4	0,4	Ancho	0,9	1,0	0,5	1,5	2,2	1,8
		Largo	3,6	4,0	1,0	6,0	8,8	7,2
5	0,5	Ancho	1,0	1,1	0,6	1,6	2,4	2,0
		Largo	4,0	4,4	1,2	6,4	9,6	8,0
6	0,6	Ancho	1,1	1,2	0,6	1,8	2,7	2,2
		Largo	4,4	4,8	1,2	7,2	10,8	8,8
7	0,7	Ancho	1,2	1,3	0,7	1,9	2,9	2,4
		Largo	4,8	5,2	1,4	7,6	11,6	9,6
8	0,8	Ancho	1,3	1,4	0,7	2,0	3,1	2,6
		Largo	5,2	5,6	1,4	8,0	12,4	10,4
9	0,9	Ancho	1,4	1,5	0,8	2,2	3,2	2,7
		Largo	5,6	6,0	1,6	8,8	12,8	10,8
10	1,0	Ancho	1,5	1,6	0,8	2,3	3,4	2,9
		Largo	6,0	6,4	1,6	9,2	13,6	11,6
12	1,2	Ancho	1,6	1,7	0,9	2,5	3,7	3,1
		Largo	6,4	6,8	1,8	10,0	14,8	12,4
14	1,4	Ancho	1,7	1,9	0,9	2,7	4,0	3,4
		Largo	6,8	7,6	1,8	10,8	16,0	13,6
16	1,6	Ancho	1,8	2,0	1,0	2,9	4,3	3,6
		Largo	7,2	8,0	2,0	11,6	17,2	14,4
18	1,8	Ancho	1,9	2,1	1,0	3,0	4,6	3,8
		Largo	7,6	8,4	2,0	12,0	18,4	15,2
20	2,0	Ancho	2,0	2,2	1,1	3,2	4,8	4,0
		Largo	8,0	8,8	2,2	12,8	19,2	16,0

Tabla 42. Dimensiones de los sistemas para el acuífero río Risaralda.

Datos de entrada			Alternativas de tecnología de tratamiento terciario (h: profundidad)					
Habitantes (permanentes)	Caudal de ARD generado (m ³ /d)	Dimensiones del sistema (m)	HC-FS* (h = 0,6 m)	HC-FSS* (h = 0,6 m)	FIA* (h = 1,0 m)	FV* (h = 0,7 m)	FV-DZ* (h = 0,7 m)	FV-EFA* (h = 1,0 m)
2	0,2	Ancho	0,7	0,8	0,4	1,0	1,6	1,3
		Largo	2,8	3,2	0,8	4,0	6,4	5,2
3	0,3	Ancho	0,8	0,9	0,5	1,3	1,9	1,6
		Largo	3,2	3,6	1,0	5,2	7,6	6,4
4	0,4	Ancho	1,0	1,1	0,5	1,5	2,2	1,8
		Largo	4,0	4,4	1,0	6,0	8,8	7,2
5	0,5	Ancho	1,1	1,2	0,6	1,6	2,4	2,0
		Largo	4,4	4,8	1,2	6,4	9,6	8,0
6	0,6	Ancho	1,2	1,3	0,6	1,8	2,7	2,2
		Largo	4,8	5,2	1,2	7,2	10,8	8,8
7	0,7	Ancho	1,3	1,4	0,7	1,9	2,9	2,4
		Largo	5,2	5,6	1,4	7,6	11,6	9,6
8	0,8	Ancho	1,3	1,5	0,7	2,0	3,1	2,6
		Largo	5,2	6,0	1,4	8,0	12,4	10,4
9	0,9	Ancho	1,4	1,6	0,8	2,2	3,2	2,7
		Largo	5,6	6,4	1,6	8,8	12,8	10,8
10	1,0	Ancho	1,5	1,7	0,8	2,3	3,4	2,9
		Largo	6,0	6,8	1,6	9,2	13,6	11,6
12	1,2	Ancho	1,6	1,9	0,9	2,5	3,7	3,1
		Largo	6,4	7,6	1,8	10,0	14,8	12,4
14	1,4	Ancho	1,8	2,0	0,9	2,7	4,0	3,4
		Largo	7,2	8,0	1,8	10,8	16,0	13,6
16	1,6	Ancho	1,9	2,1	1,0	2,9	4,3	3,6
		Largo	7,6	8,4	2,0	11,6	17,2	14,4
18	1,8	Ancho	2,0	2,2	1,0	3,0	4,6	3,8
		Largo	8,0	8,8	2,0	12,0	18,4	15,2
20	2,0	Ancho	2,1	2,3	1,1	3,2	4,8	4,0
		Largo	8,4	9,2	2,2	12,8	19,2	16,0

Tabla 43. Dimensiones de los sistemas para el acuífero río grande de La Magdalena.

Datos de entrada			Alternativas de tecnología de tratamiento terciario (h: profundidad)					
Habitantes (permanentes)	Caudal de ARD generado (m ³ /d)	Dimensiones del sistema (m)	HC-FS* (h = 0,6 m)	HC-FSS* (h = 0,6 m)	FIA* (h = 1,0 m)	FV* (h = 0,7 m)	FV-DZ* (h = 0,7 m)	FV-EFA* (h = 1,0 m)
2	0,2	Ancho	0,5	0,6	0,4	1,0	1,6	1,6
		Largo	2,0	2,4	0,8	4,0	6,4	6,4
3	0,3	Ancho	0,6	0,7	0,5	1,3	1,9	1,9
		Largo	2,4	2,8	1,0	5,2	7,6	7,6
4	0,4	Ancho	0,7	0,8	0,5	1,5	2,2	2,2
		Largo	2,8	3,2	1,0	6,0	8,8	8,8
5	0,5	Ancho	0,8	0,9	0,6	1,6	2,4	2,4
		Largo	3,2	3,6	1,2	6,4	9,6	9,6
6	0,6	Ancho	0,9	1,0	0,6	1,8	2,7	2,6
		Largo	3,6	4,0	1,2	7,2	10,8	10,4
7	0,7	Ancho	0,9	1,0	0,7	1,9	2,9	2,9
		Largo	3,6	4,0	1,4	7,6	11,6	11,6
8	0,8	Ancho	1,0	1,1	0,7	2,0	3,1	3,1
		Largo	4,0	4,4	1,4	8,0	12,4	12,4
9	0,9	Ancho	1,1	1,2	0,8	2,2	3,2	3,2
		Largo	4,4	4,8	1,6	8,8	12,8	12,8
10	1,0	Ancho	1,1	1,2	0,8	2,3	3,4	3,4
		Largo	4,4	4,8	1,6	9,2	13,6	13,6
12	1,2	Ancho	1,2	1,3	0,9	2,5	3,7	3,7
		Largo	4,8	5,2	1,8	10,0	14,8	14,8
14	1,4	Ancho	1,3	1,4	0,9	2,7	4,0	4,0
		Largo	5,2	5,6	1,8	10,8	16,0	16,0
16	1,6	Ancho	1,4	1,5	1,0	2,9	4,3	4,3
		Largo	5,6	6,0	2,0	11,6	17,2	17,2
18	1,8	Ancho	1,5	1,6	1,0	3,0	4,6	4,6
		Largo	6,0	6,4	2,0	12,0	18,4	18,4
20	2,0	Ancho	1,5	1,7	1,1	3,2	4,8	4,8
		Largo	6,0	6,8	2,2	12,8	19,2	19,2

6 CONCLUSIONES

- Se definieron como zonas de especial interés hidrogeológico aquellas resultantes de homologar y categorizar las zonas de recarga directa y de identificar zonas de vulnerabilidad extrema y alta, las cuales, según la normatividad ambiental, deben ser consideradas como zonas de especial protección.
- En la estimación del impacto que tienen las aguas residuales sobre los sistemas acuíferos y las zonas de recarga, la metodología del ICC no es concluyente para este caso de estudio, puesto que el único valor que varía es la calificación de la intensidad que tiene un peso de 0,25 sobre la ponderación total, siendo este un aporte mínimo para el cálculo del índice, reflejando un comportamiento uniforme en los resultados de la caracterización.
- De acuerdo con los resultados de VRI se concluye que cuando el STARD opera correctamente, se genera un impacto en la reducción de carga contaminante, en términos de los intervalos asociados al ICC.
- Considerando los resultados de la caracterización de las ARD tratadas, se evidencia que los STARD tienen bajas eficiencias de remoción de contaminantes; una situación de alarma pues los sistemas de tratamiento terciario solo pueden implementarse cuando el tratamiento secundario, actualmente implementado en los STARD, funciona correctamente.
- De acuerdo a los resultados de la aplicación de la metodología de selección de alternativas de tratamiento terciario de ARD tratadas, las tecnologías aplicables a un nivel de sostenibilidad tecnológica III en zona rural son: humedal construido de flujo superficial (HC-FS), humedal construido de flujo subsuperficial (HC-FSS), filtro intermitente de arena (FIA), filtro verde (FV), filtro verde descarga cero (FV-DZ) y filtro verde evaporativo de flujo ascendente (FV-EFA).
- Para zonas de especial interés hidrogeológico solo son aplicables alternativas que garanticen un vertimiento cero como filtro verde descarga cero (FV-DZ) y filtro verde evaporativo de flujo ascendente (FV-EFA), con el fin de cumplir con la normatividad ambiental.
- Para la implementación del caso piloto, se seleccionó el CAV del municipio de Palestina como punto de instalación del sistema de tratamiento terciario de las ARD tratadas, a través de un filtro verde descarga cero (FV-DZ); alternativa obtenida de la aplicación del flujograma de selección de alternativas terciarias desarrollado.

7 RECOMENDACIONES

- No se puede perder de vista otras amenazas que pueden incluso ser mayores que el vertimiento de aguas residuales domésticas (ARD) tratadas como, por ejemplo, el vertimiento directo de vinazas, subproducto de la industria sucroalcoholera, utilizadas en el riego de cultivos de caña de azúcar e identificados en el acuífero río Risaralda.
- Es importante que la difusión de este informe, así como de la guía para el tratamiento de aguas residuales domésticas en zonas de interés hidrogeológico, esté acompañada de una guía de mantenimiento del sistema de tratamiento primario y secundario instalado en las zonas rurales, con el fin de informar de este proceso que es fundamental para tener un sistema secundario trabajando en buenas condiciones y que permita la instalación de un sistema de tratamiento terciario.

8 REFERENCIAS

- Achak, M., Boumya, W., Ouazzani, N., & Mandi, L. (2019). Preliminary evaluation of constructed wetlands for nutrients removal from olive mill wastewater (OMW) after passing through a sand filter. *Ecological Engineering*, 136, 141–151. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLENG.2019.06.007>
- Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID). (2022). Recomendaciones para proyectos de saneamiento y tratamiento de aguas residuales. Selección de tecnologías de tratamiento. <https://cpage.mpr.gob.es>
- Alegre, J. (2007). Manual sobre el uso y manejo del pasto Vetiver (*Chrysopogon zizanioides*). https://www.vetiver.org/TVN_manualvetiver_spanish-o.pdf
- Arceivala, Soli J, and Shyam R. Asolekar. (2007a). "Natural Systems – 1 Classical Algal Ponds for Treatment and Resource Recovery." Chap. 9 in *Wastewater Treatment for Pollution Control and Reuse*. 3rd ed. McGraw Hill Education (India) Private Limited. <https://www-accessengineeringlibrary-com.udea.lookproxy.com/content/book/9780070620995/chapter/chapter9>
- Arceivala, Soli J, and Shyam R. Asolekar. (2007b). "Natural Systems – 2 Hyacinth and Duckweed Ponds, Fish Ponds, Natural and Constructed Wetlands, and Vermiculture." Chap. 10 in *Wastewater Treatment for Pollution Control and Reuse*. 3rd ed. McGraw Hill Education (India) Private Limited. <https://www-accessengineeringlibrary-com.udea.lookproxy.com/content/book/9780070620995/chapter/chapter10>
- Arceivala, Soli J, and Shyam R. Asolekar. (2007c). "Some Aerobic Biological Treatment Methods." Chap. 6 in *Wastewater Treatment for Pollution Control and Reuse*. 3rd ed. McGraw Hill Education (India) Private Limited. <https://www-accessengineeringlibrary-com.udea.lookproxy.com/content/book/9780070620995/chapter/chapter6>
- Arceivala, Soli J, and Shyam R. Asolekar. (2007d). "Some Physico-Chemical Methods and Membrane Technologies." Chap. 12 in *Wastewater Treatment for Pollution Control and Reuse*. 3rd ed. McGraw Hill Education (India) Private Limited. <https://www-accessengineeringlibrary-com.udea.lookproxy.com/content/book/9780070620995/chapter/chapter12>
- Badejo, A. A., Omole, D. O., Ndambuki, J. M., & Kupolati, W. K. (2017). Municipal wastewater treatment using sequential activated sludge reactor and vegetated submerged bed constructed wetland planted with vetiveria zizanioides. *Ecological Engineering*, 99, 525–529. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLENG.2016.11.012>
- Barroso Júnior, J. C. A., Silva, M. C. de A., Hoyos, N. L. M., & Monteggia, L. O. (2022). Evaluation of UASB effluent post-treatment in pilot-scale by microalgae HRP and macrophytes pond for nutrient recovery. *Journal of Cleaner Production*, 357, 131951. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2022.131951>
- Bernal, D. P., Cardona, D. A., Galvis, A., & Peña, M. R. (2015). Guía de Selección de Tecnología para el Tratamiento de Aguas Residuales Domesticas por Métodos Naturales. Seminario Internacional sobre Métodos Naturales para el Tratamiento de Aguas Residuales, 1995, 19–27.
- Boulware, E. W. "Bob". (2013). "Biological Filter and Constructed Wetland Systems." Chap. 13 in *Alternative Water Sources and Wastewater Management*. 1st ed. New York: McGraw-

- Hill Education. <https://www-accessengineeringlibrary-com.udea.lookproxy.com/content/book/9780071719513/chapter/chapter13>
- Brix, H., & Arias, C. A. (2005). The use of vertical flow constructed wetlands for on-site treatment of domestic wastewater: New Danish guidelines. *Ecological Engineering*, 25(5), 491–500. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2005.07.009>
- Chen, S., Wang, M., Russo, F. M., Gobler, C. J., & Mao, X. (2022). Efficient nitrogen removal from onsite wastewater by a novel continuous flow biofilter. *Chemosphere*, 300, 134642. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2022.134642>
- Colombiamania. (s.f). Mapa del relieve del departamento de Caldas. https://www.colombiamania.com/AA_IMAGENES/mapas/dptos/caldas/03_Caldas-relieve-alturas-zoom.jpg
- Cooper P.F. (2005) The performance of vertical flow constructed wetland systems with special reference to the significance of oxygen transfer and hydraulic loading rate. *Water Science and Technology* 51(9), 81–90.
- CORPOCALDAS, PROAGUA. (2006). Modelo hidrogeológico Conceptual de la parte baja de las cuencas de los ríos Chinchiná, Tapias – Tareas y zona baja del municipio de Anserma Departamento de Caldas. Convenio C 146 – 2005.
- CORPOCALDAS, UTP. (2016). Ajuste del modelo hidrogeológico conceptual propuesto para el acuífero ubicado en la cuenca del Río Risaralda, en el departamento de Caldas. Contrato 223 del 2016.
- CORPOCALDAS, UTP. (2018). Actualización del Plan de Manejo Ambiental del Acuífero Santágueda-km 41. Convenio Interadministrativo 078 de 2018.
- CORPOCALDAS, UTP. (2018b). Actualización del Plan de Manejo Ambiental del Acuífero río Risaralda. Convenio Interadministrativo 078 de 2018.
- CORPOCALDAS, UTP. (2018c). Actualización del Plan de Manejo Ambiental del Acuífero río grande de La Magdalena. Convenio Interadministrativo 078 de 2018.
- CORPOCALDAS, UTP. (2019). Generar insumos para la Gestión Integral de Aguas Residuales Domésticas- ARD en zonas de interés. Convenio Interadministrativo 067 de 2019.
- CORPOCALDAS, UTP. (2019b). Modelos hidroestratigráficos preliminares de los sistemas acuíferos de Caldas. Convenio Interadministrativo 067 de 2019.
- CORPOCALDAS. (2015). Gestión Integral del agua subterránea en el departamento de Caldas.
- Crites, R. W., Middlebrooks, E. J., Bastian, R. K., & Reed, S. C. (2006). *Natural wastewater treatment systems*. CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Crites, R. W., Tchobanoglous, G., Camargo, M., & Pardo, L. P. (2000). *Sistemas de manejo de aguas residuales: Para núcleos pequeños y descentralizados*. McGraw-Hill.
- Delgadillo, O., Camacho A., Pérez. L. F., & Andrade, M. (2010). Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua (Centro AGUA). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*.
- Dornelles, H. de S., Camargo, F. P., Silva, E. L., & Varesche, M. B. A. (2023). Microbial community stratification in scale-up Anaerobic Fluidized Bed Reactor applied for 4-Nonylphenol degradation. *Bioresource Technology Reports*, 21, 101359. <https://doi.org/10.1016/J.BITEB.2023.101359>
- El-Shafai, S. A., El-Gohary, F. A., Nasr, F. A., Peter van der Steen, N., & Gijzen, H. J. (2007). Nutrient recovery from domestic wastewater using a UASB-duckweed ponds system. *Bioresource Technology*, 98(4), 798–807.
- Foster, S. e Hirata, R., 2002. *Protección de la calidad del agua subterránea: Guía para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales*. Mundi-prensa,

Banco

Mundial.

<https://documents1.worldbank.org/curated/en/229001468205159997/pdf/25071PUB01Spanish10BOX0334116B01PUBLIC1.pdf>

- Galvis, A., Cardona, D.A., & Bernal, D. P. (2005). Modelo conceptual de selección de tecnología para el control de contaminación por aguas residuales domésticas en localidades colombianas menores de 30.000 habitantes, SELTAR. Conferencia internacional: de la acción local a las metas globales. Universidad del valle. <https://www.virtualpro.co/biblioteca/modelo-conceptual-de-seleccion-de-tecnologia-para-el-control-de-contaminacion-por-aguas-residuales-domesticas-en-localidades-colombianas-menores-de-30-000-habitantes-seltar>
- Gao, S. you, Peng, Y. zhen, Wang, S. Ying, & Yan, J. (2006). Novel strategy of nitrogen removal from domestic wastewater using pilot Orbal oxidation ditch. *Journal of Environmental Sciences*, 18(5), 833–839. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(06\)60001-6](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(06)60001-6)
- García, J. & Corzo, A. (2008). Guía Práctica de Diseño, Construcción y Explotación de Sistemas de Humedales de Flujo Subsuperficial. Depuración con Humedales Construidos. Universidad Politécnica de Catalunya. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/2474>
- Gil, Miriam Janet, Soto, Adriana María, Usma, Jorge Iván, & Gutiérrez, Omar Darío. (2012). Contaminantes emergentes en aguas, efectos y posibles tratamientos. *Producción más Limpia*, 7(2), 52-73. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-04552012000200005&lng=en&tlng=es
- Gordon, B. A., Lenhart, C., Peterson, H., Gamble, J., Nieber, J., Current, D., & Brenke, A. (2021). Reduction of nutrient loads from agricultural subsurface drainage water in a small, edge-of-field constructed treatment wetland. *Ecological Engineering*, 160, 106128. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLENG.2020.106128>
- Guerrero Vejarano, Tania E, & Anaya Fernández, Óscar G. (2019). Eficiencia de la resina lewattit monoplus m 600 en la remoción de nitratos en aguas para consumo humano. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 85(2), 153-162. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1810-634X2019000200004&lng=es&tlng=es
- Gunes, K., Masi, F., Ayaz, S., Tuncsiper, B., & Besiktas, M. (2021). Domestic wastewater and surface runoff treatment implementations by constructed wetlands for Turkey: 25 years of experience. *Ecological Engineering*, 170, 106369. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLENG.2021.106369>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2023). Estudio Nacional del Agua. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. pp 179
- Kadlec, R. Wallace, S. (2009). *TREATMENT WETLANDS*. 2nd., pp. 611. CRC Press.
- Lee, C. C., & Shun Dar Lin. (2007). *Handbook of Environmental Engineering Calculations* 2nd Ed. McGraw Hill Professional.
- Metcalf y Eddy. (2014). *Wastewater Engineering Treatment and Resource Recovery*. 5nd Ed., pp. 221. McGraw- Hill Education.
- Metcalf y Eddy. (1996). *Ingeniería de aguas residuales Tratamiento, vertido y reutilización*. 3ª ed., Vol. 1., pp. 125. McGraw- Hill.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT). (2000). Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS-2000). pp. 282. https://minvivienda.gov.co/sites/default/files/documentos/100811_titulo_j_ras-_.pdf
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MinAmbiente). (2018). Decreto 050 de 2017 por el cual se modifica parcialmente el Decreto 1076 de 2015, Decreto Único

- Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible en relación con los Consejos Ambientales Regionales de la Macrocuencas (CARMAC), el Ordenamiento del Recurso Hídrico y Vertimientos y se dictan otras disposiciones. p.5
<https://www.minambiente.gov.co/documento-entidad/decreto-050-de-2018/>
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MinAmbiente). (2015). Decreto 1076 del 2015 por medio de la cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible. p.p. 217 - 232 <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/06/Decreto-1076-de-2015.pdf>
- Ministerio del Medio Ambiente. (2002). Gestión para el manejo, tratamiento y disposición final de las aguas residuales municipales. <http://hdl.handle.net/20.500.12324/18911>
- Morais, E. G. de, Amaro Marques, J. C., Cerqueira, P. R., Dimas, C., Sousa, V. S., Gomes, N., Ribau Teixeira, M., Nunes, L. M., Varela, J., & Barreira, L. (2022). Tertiary urban wastewater treatment with microalgae natural consortia in novel pilot photobioreactors. *Journal of Cleaner Production*, 378, 134521. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2022.134521>
- Naranjo F., D. (2010). Capítulo 5: Selección de Alternativas de Potabilización. (Capítulo de libro inédito). En: Procesos Innovadores para la Potabilización de Aguas en Comunidades Rurales Antioqueñas. Marín S., J.M. e Hincapié P., M.M. Proyecto: Expedición Antioquia 2013, Gobernación de Antioquia, Medellín, Colombia. pp. 44.
- Nelson, M. J., Nakhla, G., & Zhu, J. (2021). The circulating fluidized bed bioreactor as a biological nutrient removal process for municipal wastewater treatment: Process modelling and costing analysis. *Journal of Environmental Management*, 299, 113604. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2021.113604>
- OMS (2018). Guías para la calidad del agua de consumo humano, Cuarta Edición. Recuperado en 05 de febrero de 2023, de <https://apps.who.int/iris/handle/10665/272403>
- Paulo, P. L., Galbiati, A. F., Magalhães Filho, F. J. C., Bernardes F. S., Carvalho G. A., & Boncz, M. A. (2019). Evapotranspiration tank for the treatment, disposal and resource recovery of blackwater. 147, 61–66. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.04.025>
- Pérez Carrión J.M. (1984). Selección de Procesos de Tratamiento de Agua. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente –CEPIS–, Organización Panamericana de la Salud –OPS–, Lima, Perú.
- Reed, S. C., Crites, R. W., & Middlebrooks, E. J. (1998). *Natural Systems for Waste Management and Treatment*, 2 nd Ed. McGraw-Hill.
- Rodríguez Valencia, N., Castañeda, S. A., Osorio, A. F., Quintero, L. V. (2019). *Boletín Técnico Cenicafé*, 42, 1-46. <https://www.cenicafe.org/es/publications/BoletinTecnico42.pdf>
- Rodríguez-Valencia, N., Quintero-Yepes, L., & Castañeda, S. A. (2022). Tecnología de filtros verdes para el manejo, tratamiento y descarga de las aguas residuales de la finca cafetera. *Cenicafé*. <https://doi.org/10.38141/cenbook-0029>
- Rodríguez-Valencia, N., Quintero-Yepes, L., & Castañeda, S. A. (2022). Construya y opere un humedal artificial para el postratamiento de las aguas residuales de su finca cafetera. *Cenicafé*. <https://doi.org/10.38141/cenbook-0013>
- Rout, P. R., Shahid, M. K., Dash, R. R., Bhunia, P., Liu, D., Varjani, S., Zhang, T. C., & Surampalli, R. Y. (2021). Nutrient removal from domestic wastewater: A comprehensive review on conventional and advanced technologies. *Journal of Environmental Management*, 296(June), 113246. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113246>

- Silva, S. A., de Oliveira, R., Soares, J., Mara, D. D., & Pearson, H. W. (1995). Nitrogen removal in pond systems with different configurations and geometries. *Water Science and Technology*, 31(12), 321–330. [https://doi.org/10.1016/0273-1223\(95\)00520-W](https://doi.org/10.1016/0273-1223(95)00520-W)
- U.S. EPA. (1999). Folleto informativo de tecnología de aguas residuales Filtros intermitentes de arena. EPA 932-F-99-067. https://www3.epa.gov/npdes/pubs/septic_fs_intermittent_sp.pdf
- U.S. EPA. (1999b). Wastewater Technology Fact Sheet Sequencing Batch Reactors. EPA 932-F-99-073. https://www3.epa.gov/npdes/pubs/sbr_new.pdf
- U.S. EPA. (2000). Folleto informativo de tecnología de aguas residuales Humedales de flujo libre superficial. EPA 832-F-00-024. https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-06/documents/cs_00_024.pdf
- U.S. EPA. (2000b). Folleto informativo de tecnología de aguas residuales Humedales de flujo subsuperficial. EPA 832-F-00-023. https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-06/documents/cs_00_023.pdf
- U.S. EPA. (2000C). Wastewater Technology Fact Sheet Oxidation Ditches. EPA 832-F-00-013. https://www3.epa.gov/npdes/pubs/oxidation_ditch.pdf
- U.S. EPA. (2002). Wastewater Technology Fact Sheet. Slow Rate Land Treatment. United States Environmental Protection Agency, 1–7. <https://www3.epa.gov/npdes/pubs/sloratre.pdf>
- U.S. EPA. (2002b). Wastewater Technology Fact Sheet Rapid Infiltration Land Treatment. United States Environmental Protection Agency. EPA-625/4-73-001b. https://www3.epa.gov/npdes/pubs/final_rapidinfiltration.pdf
- U.S.EPA. (1973). Upgrading Lagoons. Recuperado el febrero de 2023, de National Service Center for Environmental Publications: <https://n9.cl/ade2g>
- U.S.EPA. (1980). Design Manual Wastewater Treatment and Disposal Systems. Retrieved May 24, 2023, from <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/300043XO.PDF?Dockey=300043XO.PDF>
- USEPA. (1992). Upgrading Lagoons. Retrieved febrero 2023, from National Service Center for Environmental Publications. <https://n9.cl/rku09>
- Valencia, J. (2014). Evaluación de humedales evaporativos para el post tratamiento de aguas residuales domésticas. Tesis de maestría en Ecotecnología, Universidad Tecnológica de Pereira.
- Van de Graaf, AA, de Bruijn, P., Robertson, LA, Jetten, MS y Kuenen, JG (1996). Crecimiento autótrofo de microorganismos anaerobios oxidantes de amonio en un reactor de lecho fluidizado. *Microbiología*, 142 (8), 2187-2196.
- Vidal, G., & Hormazábal, S. (2018). Humedales construidos. Diseño y operación. Universidad de Concepción.
- Von Sperling, M, & Chernicharo, C. A. (2005). Waste Stabilization Ponds. Vol 3. pp 17. <https://library.oapen.org/bitstream/handle/20.500.12657/31040/640166.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Yang, P., Hou, R., Li, D., Yuan, R., Wang, F., Chen, Z., Zhou, B., & Chen, H. (2022). Nitrogen removal from rural domestic wastewater by subsurface wastewater infiltration system: A review. *Process Safety and Environmental Protection*, 159, 309–322. <https://doi.org/10.1016/J.PSEP.2022.01.012>

9 ANEXOS

ANEXO 9.1. PLAN OPERATIVO DEL PROYECTO

ANEXO 9.2. DIARIO DE CAMPO

ANEXO 9.3. RESULTADOS DE LABORATORIO

ANEXO 9.4. PLANO CASO PILOTO

ANEXO 9.5. MANUAL DE MANTENIMIENTO PARA LOS FILTROS VERDES DE DESCARGA CERO

ANEXO 9.6. ESTIMACIÓN DE ÁREAS SUPERFICIALES PARA LAS TECNOLOGÍAS DE TRATAMIENTO TERCIARIO