



UNIVERSIDAD
SANTO TOMÁS
TUNJA

VIGILADA MINEDUCACIÓN - SNIES 1732

ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DE BOYACÁ

30 Años
Memoria que trasciende



ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DE BOYACÁ

MATHIUN EMILIO PRIETO ROJAS

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS SECCIONAL TUNJA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
TUNJA
2025

1996/2026
Memoria que trasciende

TUNJA - BOYACÁ - PBX: (608) 744 0404

Campus Centro Histórico: Cll. 19 No. 11 - 64 • Campus Avenida Universitaria:
Edificio Fray Giordano Bruno, O.P.: Av. Universitaria Cll. 48 No. 1-235 este.
Edificio Santo Domingo de Guzmán: Av. Universitaria No. 45 - 202.
Santoto Services: Centro Comercial Unicentro Tunja, Local 1-106.

ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DE BOYACÁ

MATHIUN EMILIO PRIETO ROJAS

Monografía de grado para obtener el título de Ingeniero civil

Director: Diana María Beltrán Beltrán

Codirectores: Brigid Hiomara Pacheco García y Néstor Iván Rojas Gamba

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS SECCIONAL TUNJA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
TUNJA
2025

1996/2026
Memoria que trasciende

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS	6
LISTA DE TABLAS	7
LISTA DE GRAFICAS	8
RESUMEN	9
ABSTRACT	10
1. INTRODUCCIÓN	11
2. JUSTIFICACIÓN	13
3. ESTADO DEL ARTE	15
4. OBJETIVOS	21
4.1. Objetivo General	21
4.2. Objetivos Específicos	21
5. METODOLOGÍA	22
5.1. Enfoque Descriptivo	23
5.2. Caracterización de los Sistemas	24
5.2.1. Definición de variables a analizar	25
5.2.1.2. Caudal:	26
5.2.1.3. Estado de Operación:	27
5.2.2. Trabajo de Campo.	27
5.3. Análisis Comparativo.	29
5.3.1. Distribución de procesos unitarios por municipio.	29
5.3.2. Clasificación de los sistemas	31
5.4. Documentación de Sistemas de Tratamiento	33
5.5. Propuesta de alternativas óptimas para la zona de estudios.	33
6. RESULTADOS	34
7. CONCLUSIONES	61
8. RECOMENDACIONES	63

1996/2026
Memoria que trasciende

8.1. Recomendaciones basadas en nuevas tecnologías.	63
8.1.1. Tecnologías de Membranas Avanzadas	63
8.1.2. Inteligencia Artificial y Automatización en Plantas de Tratamiento	64
8.1.3. Tecnología Nereda (Lodos Granulares Aeróbicos)	64
8.1.4. Omni Processor y Recuperación de Recursos	65
8.1.5. Tecnologías de Oxidación Avanzada	65
8.1.6. Celdas de Combustible Microbianas	65
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70

1996/2026
Memoria que trasciende

TUNJA - BOYACÁ - PBX: (608) 744 0404

Campus Centro Histórico: Cll. 19 No. 11 - 64 • **Campus Avenida Universitaria:**
Edificio Fray Giordano Bruno, O.P.: Av. Universitaria Cll. 48 No. 1-235 este.
Edificio Santo Domingo de Guzmán: Av. Universitaria No. 45 - 202.
Santoto Services: Centro Comercial Unicentro Tunja, Local 1-106.

ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL
— MULTICAMPUS —
DE ALTA CALIDAD POR 8 AÑOS
Resolución 014515 del 28 de julio de 2022

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Flujograma metodológico. Fuente elaboración Propia.	22
Figura 2. Código Qr. Del mapa de Boyacá con sus PTAR. Fuente elaboración Propia.	49
Figura 3. Mapa de Boyacá con los puntos de las PTAR existen dentro del departamento. Fuente elaboración propia ArGIS Pro.	50
Figura 4. Mapa de Boyacá con la tabla de atributos de la capa puntos. Fuente elaboración propia ArGIS Pro.	52
Figura 5. Tren de tratamiento propuesto. Fuente elaboración Propia NotebookLM	60
Figura 6. Recomendaciones basadas en nuevas tecnologías. Fuente elaboración Propia NotebookLM.	69

1996/2026
Memoria que trasciende

TUNJA - BOYACÁ - PBX: (608) 744 0404

Campus Centro Histórico: Cll. 19 No. 11 - 64 • **Campus Avenida Universitaria:**
Edificio Fray Giordano Bruno, O.P.: Av. Universitaria Cll. 48 No. 1-235 este.
Edificio Santo Domingo de Guzmán: Av. Universitaria No. 45 - 202.
Santoto Services: Centro Comercial Unicentro Tunja, Local 1-106.

ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL
— MULTICAMPUS —
DE ALTA CALIDAD POR 8 AÑOS
Resolución 014515 del 28 de julio de 2022

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Descripción procesos unitarios. Fuente adaptado de RAS.....	26
Tabla 2. Registro fotográfico de la Ptar del municipio de Tunja, con sus respectivas coordenadas. Fuente elaboración propia.....	28
Tabla 3. Registro fotográfico de la Ptar del municipio Aquitania, con sus respectivas coordenadas. Fuente elaboración propia.....	28
Tabla 4. Registro fotográfico de la Ptar del municipio de Sotaquirá, con sus respectivas coordenadas. Fuente elaboración propia.....	29
Tabla 5. Distribución de procesos unitarios por municipio. Fuente elaboración Propia.	31
Tabla 6. Clasificación de los sistemas. Fuente elaboración propia.....	31
Tabla 7. Agrupación de los sistemas. Fuente elaboración propia.....	32
Tabla 8. Información de reconocimiento espacial de las plantas de tratamiento de agua residual en Boyacá – Fuente adaptado de Corpoboyacá.....	36
Tabla 9. Información del estado de operación de las y los tratamientos que manejan las PTAR en Boyacá – Fuente adaptado de Corpoboyacá.....	39
Tabla 10. Análisis de la operatividad de las PTAR en términos de caudal. Fuente elaboración propia.....	45
Tabla 11. Propuesta de alternativas para la mejora de los sistemas de tratamiento de agua residual. Fuente elaboración propia.....	58
Tabla 12. Recomendaciones basadas en nuevas tecnologías. Fuente elaboración propia.....	68

1996/2026

Memoria que trasciende

TUNJA - BOYACÁ - PBX: (608) 744 0404

Campus Centro Histórico: Cll. 19 No. 11 - 64 • **Campus Avenida Universitaria:**
Edificio Fray Giordano Bruno, O.P.: Av. Universitaria Cll. 48 No. 1-235 este.
Edificio Santo Domingo de Guzmán: Av. Universitaria No. 45 - 202.
Santoto Services: Centro Comercial Unicentro Tunja, Local 1-106.

ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL
— MULTICAMPUS —
DE ALTA CALIDAD POR 8 AÑOS
Resolución 014515 del 28 de julio de 2022

LISTA DE GRAFICAS

Gráfica 1. Estado de operación PTAR en Boyacá. Fuente elaboración propia.	40
Gráfica 2. Uso de Procesos de las PTAR en Boyacá. Fuente elaboración propia.....	41
Gráfica 3. Tipos de pretratamiento en las PTAR de Boyacá. Fuente elaboración propia.	42
Gráfica 4. Tipos y Niveles de clasificación en las PTAR de Boyacá. Fuente elaboración propia.	43
Gráfica 5. Índice de PTAR con tratamiento primario en Boyacá. Fuente elaboración propia.....	46
Gráfica 6. Índice de predominio en los sistemas que se para tratamiento primario en Boyacá. Fuente elaboración propia.	47
Gráfica 7. Índice de predominio en los sistemas que se usa en tratamiento secundario en Boyacá. Fuente adaptado de CORPOPOYACA.	48

1996/2026

Memoria que trasciende

TUNJA - BOYACÁ - PBX: (608) 744 0404

Campus Centro Histórico: Cll. 19 No. 11 - 64 • **Campus Avenida Universitaria:**
Edificio Fray Giordano Bruno, O.P.: Av. Universitaria Cll. 48 No. 1-235 este.
Edificio Santo Domingo de Guzmán: Av. Universitaria No. 45 - 202.
Santoto Services: Centro Comercial Unicentro Tunja, Local 1-106.

ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL
— MULTICAMPUS —
DE ALTA CALIDAD POR 8 AÑOS
Resolución 014515 del 28 de julio de 2022

RESUMEN

Palabras clave: Aguas residuales; PTAR; procesos unitarios; Boyaca; saneamiento básico.

El tratamiento de aguas residuales constituye un elemento fundamental para la protección de los recursos hídricos y la salud pública. En el departamento de Boyacá, la operación y gestión de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) presenta diversas condiciones técnicas y operativas que influyen en su eficiencia y funcionamiento. En este contexto, el presente estudio realizó un análisis comparativo de los sistemas de tratamiento de aguas residuales implementados en diferentes municipios del departamento.

La investigación se desarrolló mediante la recopilación y análisis de información técnica proveniente de bases de datos institucionales, documentos técnicos y registros disponibles sobre las PTAR existentes en la zona de estudio. A partir de esta información se identificaron y caracterizaron los sistemas de tratamiento según variables como los procesos unitarios implementados, el caudal manejado, el estado de operación y la localización de las plantas.

Los resultados obtenidos permitieron identificar las tecnologías predominantes en los municipios analizados, evidenciando que la mayoría de los sistemas incorporan procesos de tratamiento secundario mediante tecnologías biológicas, tales como lagunas de estabilización, humedales artificiales y reactores biológicos. Asimismo, se identificaron diferencias en el nivel de implementación de procesos complementarios y en las condiciones operativas de las plantas.

Finalmente, el estudio permitió establecer una comparación entre los sistemas de tratamiento existentes y proponer alternativas tecnológicas orientadas a mejorar la eficiencia y sostenibilidad de las PTAR en los municipios analizados del departamento de Boyacá, contribuyendo a fortalecer los procesos de planificación y gestión del saneamiento básico en la región.

1996/2026

Memoria que trasciende

ABSTRACT

Keywords: Wastewater; WWTP; unit processes; Boyacá; basic sanitation.

Wastewater treatment plays a fundamental role in protecting water resources and public health. In the department of Boyacá, Colombia, the operation and management of Wastewater Treatment Plants (WWTPs) present diverse technical and operational conditions that directly influence their efficiency and performance. In this context, the present study conducted a comparative analysis of wastewater treatment systems implemented in several municipalities within the department.

The research was carried out through the collection and analysis of technical information obtained from institutional databases, technical reports, and available records related to existing WWTPs in the study area. Based on this information, the treatment systems were identified and characterized according to variables such as treatment processes, flow conditions, operational status, and geographical location.

The results showed that secondary treatment technologies are predominant among the municipalities analyzed, mainly involving biological treatment processes such as stabilization ponds, constructed wetlands, and biological reactors. Additionally, differences were identified in the implementation of complementary treatment stages and in the operational conditions of the facilities.

Finally, the study allowed the comparison of existing treatment systems and the proposal of technological alternatives aimed at improving the efficiency and sustainability of wastewater treatment plants in the analyzed municipalities of Boyacá, contributing to better planning and management of sanitation infrastructure in the region.

1996/2026

Memoria que trasciende

TUNJA - BOYACÁ - PBX: (608) 744 0404

Campus Centro Histórico: Cll. 19 No. 11 - 64 • Campus Avenida Universitaria:
Edificio Fray Giordano Bruno, O.P.: Av. Universitaria Cll. 48 No. 1-235 este.
Edificio Santo Domingo de Guzmán: Av. Universitaria No. 45 - 202.
Santoto Services: Centro Comercial Unicentro Tunja, Local 1-106.

ACREDITACIÓN
INSTITUCIONAL
— MULTICAMPUS —
DE ALTA CALIDAD POR 8 AÑOS
Resolución 014515 del 28 de julio de 2022

1. INTRODUCCIÓN

El manejo adecuado de las aguas residuales es un aspecto fundamental para la protección de los recursos hídricos y la salud pública. Cuando las aguas residuales son descargadas sin un tratamiento apropiado, pueden generar impactos negativos sobre ríos, quebradas y otros cuerpos de agua, afectando la calidad del recurso hídrico y las condiciones ambientales de los ecosistemas acuáticos [1]. Por esta razón, el desarrollo de sistemas de tratamiento de aguas residuales se ha convertido en una herramienta clave para reducir la contaminación y mejorar la gestión del agua.

Las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) permiten remover parte de los contaminantes presentes en el agua residual mediante diferentes procesos físicos, químicos y biológicos. A través de estos procesos es posible disminuir la carga orgánica, los sólidos suspendidos y los microorganismos presentes en el efluente antes de su descarga al medio natural [2]. La eficiencia de estos sistemas depende de diversos factores, entre los que se encuentran la tecnología utilizada, el caudal tratado y las condiciones de operación de cada planta.

En Colombia, el tratamiento de aguas residuales se encuentra regulado por diferentes instrumentos normativos que establecen los lineamientos técnicos para el diseño y funcionamiento de los sistemas de saneamiento. Entre estos se destaca el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS), el cual establece los criterios que deben cumplir los sistemas de tratamiento para garantizar la protección de las fuentes hídricas y el control de los vertimientos [3].

En el departamento de Boyacá, la implementación de sistemas de tratamiento de aguas residuales ha avanzado en diferentes municipios durante las últimas décadas. Sin embargo, las condiciones de operación, el tipo de tecnología utilizada y la disponibilidad de información técnica sobre estas plantas pueden variar entre los diferentes municipios. Esta situación hace necesario analizar las características de los sistemas existentes con el fin de comprender cómo están funcionando y qué tecnologías predominan en la región.

En este contexto, resulta pertinente desarrollar estudios que permitan analizar y comparar los sistemas de tratamiento de aguas residuales presentes en los municipios del

1996/2026

Memoria que trasciende

departamento. Este tipo de análisis contribuye a generar información útil para la planificación y el mejoramiento de los sistemas de saneamiento, así como para la toma de decisiones relacionadas con la gestión del recurso hídrico.

Por lo anterior, el presente estudio tiene como objetivo analizar de manera comparativa los sistemas de tratamiento de aguas residuales existentes en diferentes municipios del departamento de Boyacá, identificando las tecnologías utilizadas, sus características principales y su estado de operación, con el fin de aportar información que contribuya al fortalecimiento de la gestión del saneamiento básico en la región.

1996/2026

Memoria que trasciende

TUNJA - BOYACÁ - PBX: (608) 744 0404

Campus Centro Histórico: Cll. 19 No. 11 - 64 • Campus Avenida Universitaria:

Edificio Fray Giordano Bruno, O.P.: Av. Universitaria Cll. 48 No. 1-235 este.

Edificio Santo Domingo de Guzmán: Av. Universitaria No. 45 - 202.

Santoto Services: Centro Comercial Unicentro Tunja, Local 1-106.

2. JUSTIFICACIÓN

El presente estudio, “Estudio comparativo de sistemas de tratamiento de agua residual en Boyacá”, busca contribuir a la consolidación de la gestión ambiental y sanitaria de la región. El manejo de los vertimientos sigue siendo un desafío pendiente que afecta directamente la sostenibilidad ambiental y la vida de la comunidad en Boyacá. Aun cuando existen avances en la normativa y la infraestructura, las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) presentan deficiencias operativas y técnicas que impiden garantizar el cumplimiento de los límites de vertimiento establecidos por la ley colombiana. [1].

De los 123 municipios de Boyacá únicamente 24 cuentan con sistemas de tratamiento de agua residual. Algunos de estos, presentan problemas de diseño inadecuado, tecnologías obsoletas o insuficientemente adaptadas a las condiciones locales, así como deficiencias en el mantenimiento y en la capacitación del personal. Esta situación se deriva en vertimientos con alta carga contaminante hacia los cuerpos de agua receptores, afectando no solo los ecosistemas acuáticos, sino también las actividades económicas que dependen de ellos, como la agricultura, la ganadería y el turismo. Aunque a nivel internacional se han desarrollado soluciones innovadoras en tratamiento de aguas residuales, su incorporación en la región es escasa, ya sea por falta de estudios de adaptación tecnológica, fuentes de financiación adecuadas o por desconocimiento de su aplicabilidad [4].

El análisis del funcionamiento de las PTAR en los 24 municipios infiere que la mayoría de las plantas emplean tecnologías como humedales, biodigestores o lagunas de estabilización, encontrándose muchas en estado de operación parcial, con deficiencias o incluso inactivas. A pesar de los esfuerzos de los organismos públicos y algunas universidades con proyectos piloto para expansión, como la de la PTAR de Tunja, persisten desafíos en operación, monitoreo y sostenibilidad técnica.

En este escenario, el presente proyecto responde al impacto que genera que 99 de los municipios en Boyacá vierten sus aguas sin tratamiento a las fuentes hídricas y los 24 que cuentan con los sistemas, no se encuentran en operación o no cuentan con los

1996/2026

Memoria que trasciende

procesos adecuados, lo que permite identificar ventajas, limitaciones y oportunidades de mejora con base en la realidad regional. La relevancia de este enfoque radica en que responde a un problema crítico del departamento que se sustenta en la normativa nacional en el Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos (PSMV, Decreto 1076/2015) y en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), especialmente el ODS 6 sobre agua limpia y saneamiento [5].

1996/2026

Memoria que trasciende

TUNJA - BOYACÁ - PBX: (608) 744 0404

Campus Centro Histórico: Cll. 19 No. 11 - 64 • Campus Avenida Universitaria:

Edificio Fray Giordano Bruno, O.P.: Av. Universitaria Cll. 48 No. 1-235 este.

Edificio Santo Domingo de Guzmán: Av. Universitaria No. 45 - 202.

Santoto Services: Centro Comercial Unicentro Tunja, Local 1-106.

3. ESTADO DEL ARTE

La literatura especializada muestra una tendencia creciente hacia soluciones descentralizadas y sostenibles en relación con el tratamiento de aguas residuales: donde se destacan aspectos como reuso de agua, generación de biogás, recuperación de nutrientes y tecnologías naturales como los humedales. Sin embargo, en el contexto boyacense, la aplicación de estas innovaciones aún es incipiente.

En este sentido, uno de los estudios más representativos es el titulado “Estudio de patentes sobre tecnologías para tratamiento de agua y el agua residual”. Este trabajo recopiló más de 2.500 documentos de patentes relacionados con tecnologías de tratamiento de agua y aguas residuales. Se identificaron tendencias tecnológicas emergentes como la ósmosis inversa, la floculación, la adsorción, la irradiación UV, la oxidación con ozono y el uso de germicidas. Los países con mayor número de registros fueron China, Japón, Corea del Sur y Alemania, destacándose además el papel creciente de universidades y empresas transnacionales en la generación de patentes, junto con inventores líderes en la temática. Los indicadores obtenidos permitieron analizar la evolución de estas tecnologías, identificar actores clave y apoyar la toma de decisiones en investigación y proyectos hidráulicos. En conclusión, la investigación resalta la utilidad de las patentes como fuente primaria para la vigilancia tecnológica y la transferencia de conocimiento en el campo del tratamiento de aguas [6].

Otro aporte fundamental en la materia corresponde a la investigación titulada “Infraestructura sustentable: las plantas de tratamiento de aguas residuales”. Este artículo analiza de forma crítica la situación del tratamiento de aguas residuales en México, señalando que, aunque existen más de 1.800 plantas municipales, solo el 40,2% de las aguas recolectadas recibe tratamiento, y muchas de ellas funcionan con tecnologías ineficientes y contaminantes como los lodos activados. Se evidencia que gran parte de las PTAR no operan o lo hacen por debajo de su capacidad, lo que genera altos costos y desperdicio de recursos. Asimismo, se resalta que la mayoría de los sistemas produce subproductos tóxicos y demanda un elevado consumo energético, volviéndose ambiental y económicamente insostenibles. Como alternativa, se plantea la descentralización hacia plantas pequeñas con tecnologías limpias, bajo consumo energético y posibilidades de reúso, mostrando experiencias exitosas en Cañadas del Lago, Valle Escondido y en la

1996/2026

Memoria que trasciende

PTAR de Metepec con reactores anaerobios y humedales artificiales. En conclusión, el texto enfatiza que la sostenibilidad en el tratamiento de aguas residuales requiere innovación tecnológica, participación ciudadana y decisiones políticas de largo plazo, en lugar de continuar con plantas convencionales de alto costo y bajo rendimiento [7].

Dentro de los antecedentes recientes se encuentra la propuesta titulada “Propuesta de optimización de la planta de tratamiento de agua potable del acueducto Peña Negra del municipio de Paipa, Boyacá”. Este documento plantea un diagnóstico integral de la PTAP Peña Negra (Paipa, Boyacá) con visitas técnicas, caracterización fisicoquímica y microbiológica del agua en épocas de baja y alta precipitación (dic. 2023–abr. 2024), y evaluación normativa con base en Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS 0330) y guías OMS. Se evidenció dosificación empírica de coagulante y vacíos en control operacional; el Índice de Riesgo de la Calidad del Agua para Consumo Humano (IRCA) del agua tratada fue de 0 % (sin riesgo) en temporada seca y de 19,44 % (riesgo medio) en temporada de lluvias, señalando vulnerabilidad del sistema ante aumentos de turbiedad y carga. Como medidas de optimización, se proponen: instrumentación del aforo mediante canal Parshall y automatización básica para control de caudal; ajuste del tren de mezcla-coagulación-floculación con criterios hidráulicos de diseño; estandarización de jar tests y protocolos de dosificación; mejoras en filtración y rutinas de retrolavado; y fortalecimiento del plan de monitoreo y de la capacidad operativa (registros, manuales y formación). Estas acciones apuntan a robustecer el cumplimiento normativo y la resiliencia de la planta frente a la variabilidad hídrica y de calidad del agua. [8]

En la investigación titulada “Evaluación del sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas en el municipio de Sogamoso, Boyacá”, se realiza un diagnóstico técnico y ambiental profundo de la PTAR local. La evaluación de parámetros como Demanda Bioquímica de Oxígeno a cinco días (DBO_5), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sólidos Suspendidos Totales (SST) y coliformes reveló un panorama desigual: si bien el control de sólidos es aceptable, la eliminación de carga orgánica y patógenos presenta deficiencias marcadas. Sumado a esto, una gestión ineficiente de los lodos representa un riesgo de contaminación añadido. El informe destaca que el incumplimiento de las normas afecta directamente al río Chicamocha, principal receptor de los vertimientos. También se detectaron fallos operativos en los sistemas de aireación y sedimentación.

1996/2026

Memoria que trasciende

Por ello, la autora sugiere que, para asegurar un impacto ambiental sostenible, es crucial invertir en infraestructura, capacitar al personal y fortalecer el monitoreo continuo. En suma, si bien la planta cumple una función de mitigación, requiere mejoras sustanciales para ser totalmente efectiva [9].

Por otro lado, la literatura técnica aborda el caso de Duitama a través del estudio “Análisis del impacto ambiental de las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas en el municipio de Duitama, Boyacá”. Esta obra se centra en evaluar no solo la eficiencia operativa de las PTAR, sino también el efecto real de sus vertimientos en las fuentes hídricas. Para obtener un panorama completo, se combinaron caracterizaciones fisicoquímicas y bacteriológicas con visitas técnicas y encuestas. Los hallazgos indican que, a pesar de que las plantas cumplen con la normativa en ciertos aspectos, existen fallas importantes en la gestión de lodos y en la estabilidad del tratamiento biológico. Además, se detectaron problemas para controlar las descargas durante temporadas de lluvias fuertes. Estas situaciones vulneran la calidad de los ríos y quebradas locales, constituyendo un riesgo latente para la salud pública. El estudio recomienda fortalecer la capacitación del personal operativo, invertir en tecnologías más eficientes y robustecer los planes de gestión ambiental municipal. Asimismo, plantea la necesidad de articular las políticas locales de saneamiento básico con programas de educación ambiental comunitaria que garanticen la sostenibilidad de los sistemas de tratamiento de aguas residuales [10].

La experiencia recogida en el estudio “Evaluación del impacto ambiental de una planta de tratamiento de aguas residuales domésticas en la comunidad de Ocongate, Cusco” resulta de gran interés para el análisis regional. Esta investigación evaluó el funcionamiento de una PTAR en la comunidad de Ocongate con el objetivo de medir su impacto ambiental. Se aplicaron indicadores físicos, químicos y biológicos del efluente tratado, complementados con encuestas comunitarias que permitieron conocer la percepción social del proyecto. Los resultados evidenciaron que la planta logró una reducción significativa en la carga orgánica (DBO y DQO) y en los sólidos suspendidos, cumpliendo con los parámetros establecidos en la normativa ambiental peruana. No obstante, se identificaron limitaciones relacionadas con el mantenimiento de la infraestructura, particularmente en la operación de los sistemas de aireación y en la disposición final de los lodos generados. El estudio concluye que la PTAR ha contribuido

1996/2026

Memoria que trasciende

de manera positiva a mejorar la calidad del agua del río receptor y a reducir riesgos sanitarios en la población local. Sin embargo, resalta la importancia de fortalecer la gestión técnica, la capacitación comunitaria y el monitoreo ambiental para asegurar la sostenibilidad del sistema en el largo plazo [11].

Por su parte, un diagnóstico detallado fue presentado en el artículo titulado “Plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR): impacto ambiental esperado e impacto ambiental provocado”. Este trabajo expone que, aunque en Colombia existe una normatividad definida para la construcción y operación de las PTAR, su cumplimiento es limitado. En el año 2012, la Superintendencia de Servicios Públicos reportó que, de las 562 plantas existentes, 89 se encontraban fuera de operación y que además eran frecuentes los incumplimientos en vertimientos, protocolos y mantenimiento. Se identificaron deficiencias en la evaluación del impacto ambiental esperado frente al impacto realmente provocado, evidenciando que muchas plantas no cumplen con los planes de manejo ambiental ni con los criterios técnicos establecidos. Asimismo, se destaca que las descargas de aguas residuales domésticas e industriales han ejercido una fuerte presión sobre ecosistemas hídricos estratégicos como los ríos Bogotá, Cauca, Magdalena y Medellín, afectando la disponibilidad del recurso, la salud humana y la biodiversidad. El estudio también resalta que la generación de biosólidos plantea retos y oportunidades de aprovechamiento, aunque aún persisten limitaciones en su gestión. En conclusión, el artículo plantea la necesidad de mayor inversión, control y articulación institucional para garantizar la sostenibilidad ambiental y social de las comunidades, así como el cumplimiento efectivo de la normativa vigente [12].

La tesis académica realizada bajo el título “Diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) en la provincia de Cajamarca para minimizar la contaminación” aporta un enfoque innovador en el ámbito del saneamiento. Esta investigación desarrolla el diseño de una PTAR para Cajamarca, motivada por la grave deficiencia en el tratamiento de aguas residuales de la ciudad, donde gran parte de los caudales terminan sin procesar en el río Maschcón. La propuesta plantea la implementación del sistema AirLift MBR, que combina un biorreactor con inyección de aire y membranas de ultrafiltración externas, lo que permite alcanzar una alta eficiencia en la separación de sólidos y obtener un efluente de excelente calidad. La tesis diagnostica que solo se captan y tratan alrededor de 45 l/s, mientras que otros 133 l/s se vierten directamente al río, ocasionando contaminación

1996/2026

Memoria que trasciende

hídrica y riesgos sanitarios. Se destaca como principal ventaja del sistema AirLift MBR su facilidad de mantenimiento, su eficiencia operativa y la posibilidad de reutilizar el agua tratada, contribuyendo de manera significativa a la reducción de la contaminación ambiental. Finalmente, el estudio incorpora un análisis de viabilidad técnica, normativa, económica y financiera, concluyendo que la propuesta es sostenible, aplicable y generaría un impacto positivo en la salud pública y en la preservación de los recursos hídricos de Cajamarca [13].

Una alternativa tecnológica innovadora se describe en el estudio titulado “Tratamiento de aguas residuales de cargas industriales con oxidación avanzada en sistemas convencionales”. Esta investigación analizó el caso de las aguas residuales de la quebrada Chasinato, las cuales presentaban un índice de biodegradabilidad inicial bajo (0,22 en relación DBO_5/DQO), lo que dificultaba su tratamiento mediante sistemas convencionales. Para enfrentar esta problemática se aplicó el proceso de oxidación avanzada con Fenton modificado, utilizando peróxido de hidrógeno, sulfato ferroso y ácido cítrico. El procedimiento permitió incrementar el índice de biodegradabilidad hasta valores de 0,46–0,49, superando el umbral mínimo (0,4) necesario para un tratamiento efectivo en fosas sépticas. Los resultados evidenciaron una reducción parcial de contaminantes, logrando una disminución del 44,4% en la DQO y del 12,54% en la DBO_5 , aunque sin alcanzar aún los límites normativos ecuatorianos para vertimientos. El estudio resaltó que el Fenton modificado degrada preferencialmente compuestos no biodegradables, transformándolos en fracciones más asimilables para procesos biológicos. Por esta razón, se propone ubicar esta etapa entre el tratamiento físico y el biológico en las plantas de tratamiento. En conclusión, la investigación sostiene que la implementación de esta tecnología puede optimizar la eficiencia de las PTAR, extender su vida útil y proteger la inversión pública, especialmente en contextos donde los efluentes domésticos se combinan con descargas industriales y lixiviados [14].

Finalmente, cabe resaltar el estudio titulado “Aguas residuales municipales: características y tratamiento”. Este artículo presenta un análisis detallado de las aguas residuales municipales, describiendo su origen y su composición física, química y biológica, además de los riesgos ambientales y sanitarios que conlleva su inadecuado manejo. Se destacan las concentraciones típicas de DBO , DQO , sólidos suspendidos, nutrientes como nitrógeno y fósforo, así como la presencia de microorganismos

1996/2026

Memoria que trasciende

patógenos. El estudio revisa tanto tecnologías convencionales de tratamiento, procesos físicos como cribado y sedimentación; biológicos como lodos activados y lagunas de estabilización; y químicos como coagulación y desinfección, como alternativas emergentes, entre ellas el uso de membranas, humedales artificiales y procesos de oxidación avanzada. El autor enfatiza la necesidad de adaptar las soluciones tecnológicas a las condiciones locales, considerando factores de costo, operación y sostenibilidad. Asimismo, resalta la importancia de la normativa ambiental colombiana y la gestión municipal para asegurar el cumplimiento de los estándares de vertimiento. En conclusión, se subraya que una adecuada gestión de las aguas residuales municipales no solo protege la salud pública y los ecosistemas acuáticos, sino que también abre oportunidades para el reuso del agua y el aprovechamiento de subproductos como los biosólidos y el biogás [15].

A partir de la revisión de los antecedentes bibliográficos, se evidencia que el tratamiento de aguas residuales continúa siendo un desafío técnico y ambiental en diferentes regiones del mundo, especialmente en contextos donde existen limitaciones económicas, institucionales o de infraestructura. Diversos estudios coinciden en que la selección de tecnologías de tratamiento debe considerar factores como el caudal generado, las características del agua residual, las condiciones climáticas y la capacidad operativa de los municipios responsables de la gestión del sistema. En el caso del departamento de Boyacá, la información disponible sobre las tecnologías implementadas en las PTAR y su estado de operación aún es limitada y dispersa, lo que dificulta realizar evaluaciones comparativas sobre su eficiencia y funcionamiento. Por esta razón, el presente estudio busca aportar un análisis comparativo de los sistemas de tratamiento existentes en los municipios analizados, con el fin de identificar las tecnologías predominantes, analizar sus condiciones de operación y proponer alternativas que contribuyan a mejorar la gestión del tratamiento de aguas residuales en la región.

1996/2026

Memoria que trasciende

TUNJA - BOYACÁ - PBX: (608) 744 0404

Campus Centro Histórico: Cll. 19 No. 11 - 64 • Campus Avenida Universitaria:
Edificio Fray Giordano Bruno, O.P.: Av. Universitaria Cll. 48 No. 1-235 este.
Edificio Santo Domingo de Guzmán: Av. Universitaria No. 45 - 202.
Santoto Services: Centro Comercial Unicentro Tunja, Local 1-106.

ACREDITACIÓN
INSTITUCIONAL
— MULTICAMPUS —
DE ALTA CALIDAD POR 8 AÑOS
Resolución 014515 del 28 de julio de 2022



4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo General

Generar un diagnóstico del estado actual de las tecnologías de tratamiento de agua residual en Boyacá.

4.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar los sistemas de tratamiento de agua residual en la zona de estudio.
- Realizar un análisis de los sistemas de tratamiento de agua residual en función de los procesos existentes en cada planta.
- Documentar los sistemas de tratamiento de aguas residuales de la zona de estudio con información existente.
- Proponer posibles alternativas para el funcionamiento óptimo de los sistemas de tratamiento de agua residual en la zona de estudio.

1996/2026

Memoria que trasciende

5. METODOLOGÍA

Flujograma de la metodología desarrollada

En la siguiente ilustración se plasma el proceso desarrollado durante la investigación.

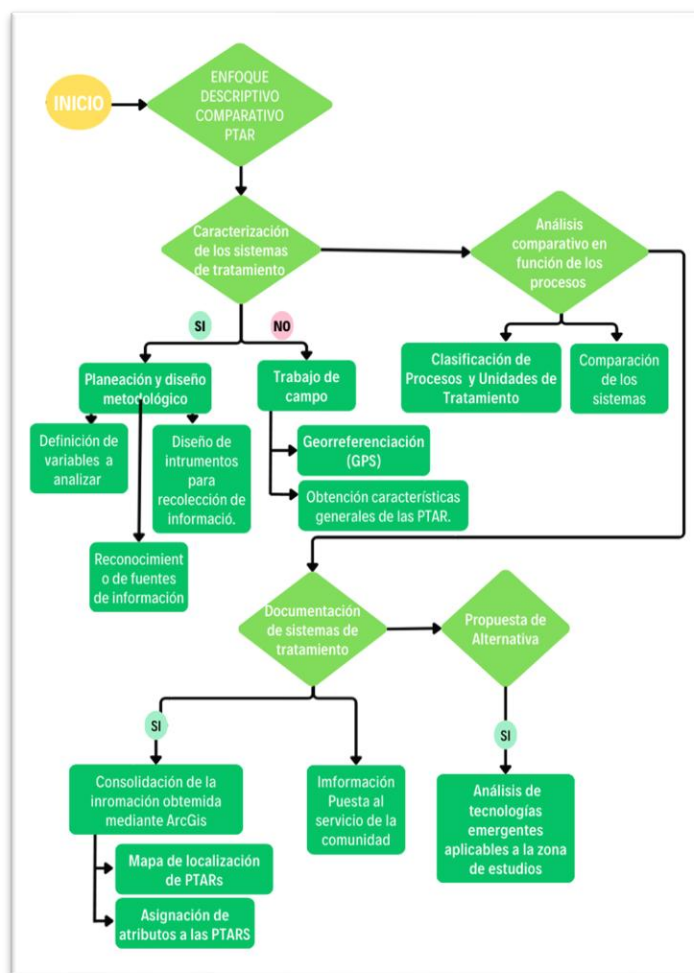


Figura 1. Flujograma metodológico. Fuente elaboración Propia.

5.1. Enfoque Descriptivo

Una Planta de Tratamiento de Agua Residual (PTAR) es una instalación diseñada para recibir y tratar el agua usada proveniente de viviendas, comercios, industrias o actividades agrícolas. En estas plantas, el agua residual pasa por procesos físicos, químicos y biológicos que permiten remover sólidos, materia orgánica, grasas, microorganismos patógenos y otros contaminantes antes de devolverla al ambiente o reutilizarla. Su propósito es eliminar los contaminantes presentes en el agua antes de ser vertida a ríos, quebradas o suelos, reducir la carga orgánica para mejorar su calidad, proteger los ecosistemas acuáticos evitando descargas de aguas contaminadas y prevenir enfermedades mediante la disminución de microorganismos patógenos. También facilita el reúso del agua en actividades como riego, procesos industriales o recarga de acuíferos según la calidad obtenida, y permite manejar adecuadamente los lodos generados, reduciendo riesgos ambientales. En esencia, su función principal es transformar el agua residual en un efluente más limpio y seguro [16].

Estas son fundamentales porque protegen la salud pública al evitar que contaminantes, bacterias, virus y parásitos lleguen a las fuentes de agua y provoquen enfermedades gastrointestinales, dérmicas o respiratorias. También cuidan el medio ambiente al reducir la contaminación de ríos, lagos y suelos, preservando la biodiversidad y manteniendo el equilibrio de los ecosistemas; contribuyen al desarrollo sostenible al permitir que las comunidades crezcan sin deteriorar los recursos hídricos y al facilitar el reúso del agua, disminuyendo la presión sobre las fuentes naturales. Además, garantizan el cumplimiento de la normativa ambiental, asegurando que los vertimientos se mantengan dentro de los límites máximos exigidos por la ley, evitando sanciones y promoviendo una gestión responsable del recurso hídrico. Finalmente, las PTAR mejoran la calidad de vida, ya que un saneamiento adecuado genera entornos más limpios, seguros y saludables, lo cual se refleja en el bienestar comunitario y en una mejor salud pública [17].

1996/2026

Memoria que trasciende



Ilustración 1. Planta de Tratamiento de Agua Residual de Tunja. Fuente Tomada de El Diario Boyacá.

5.2. Caracterización de los Sistemas

La caracterización se basa en variables que se desenvuelven en torno a los procesos de tratamiento que poseen las plantas de tratamiento de agua residual en Boyacá. En conjunto, estos elementos permiten caracterizar el estado real de funcionamiento de las PTAR analizadas, evidenciando tanto las fortalezas como las limitaciones de cada sistema, proporcionando insumos fundamentales para la formulación de alternativas de mejora en la gestión del tratamiento de aguas residuales en Boyacá.

1996/2026

Memoria que trasciende

5.2.1. Definición de variables a analizar

En este proyecto se identifican 4 variables principales a trabajar, las cuales se describen a continuación.

5.2.1.1. Procesos para el tratamiento:

En la siguiente tabla se definen los procesos de tratamiento.

Proceso	Descripción
Pretratamiento	Es la primera fase del sistema y se encarga de retener materiales gruesos, arenas, grasas y flotantes antes de que el agua residual ingrese a las unidades principales. Según el RAS, incluye rejillas, desarenadores y desengrasadores, cuya función es proteger equipos, evitar obstrucciones y estabilizar la carga que llega a las etapas siguientes [18].
Tratamiento Primario	Comprende procesos físicos destinados a separar sólidos sedimentables y parte de la materia orgánica. Utiliza unidades como sedimentadores y cámaras de flotación donde los sólidos pesados forman lodos primarios y las grasas se retiran en superficie. Su objetivo es reducir la carga inicial para facilitar el rendimiento del tratamiento biológico [18].
Tratamiento Secundario	Es el proceso biológico responsable de degradar la materia orgánica disuelta y coloidal mediante microorganismos. El RAS reconoce tecnologías como lodos activados, lagunas, filtros percoladores, reactores UASB y humedales construidos. Esta etapa logra las mayores reducciones de contaminación y se selecciona según caudal, clima, área disponible y capacidad operativa [18].
Tratamiento Complementario	Reúne los procesos avanzados destinados a mejorar la calidad final del efluente, especialmente cuando se deben cumplir límites de vertimiento rigurosos o cuando se proyecta el reúso del agua tratada. El RAS incluye

Proceso	Descripción
	métodos como desinfección (cloro, UV u ozono), filtración y remoción de nutrientes. Su función es “pulir” el efluente para cumplir la calidad exigida [18].

Tabla 1. Descripción procesos unitarios. Fuente adaptado de RAS.

En la zona de estudio, respecto a los procesos unitarios, se identifican: pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario y, en algunos casos, procesos complementarios destinados a mejorar la calidad final del efluente. Entre las unidades de tratamiento más comunes se encuentran rejillas, desarenadores, sedimentadores primarios, reactores biológicos, filtros, lagunas facultativas y unidades de desinfección.

5.2.1.2. Caudal:

El caudal de aguas residuales se define como el volumen de efluente que circula a través del sistema de alcantarillado y de las unidades de tratamiento durante un intervalo de tiempo determinado, constituyéndose en uno de los parámetros hidráulicos más importantes para el diseño, dimensionamiento y evaluación de sistemas de saneamiento básico.

De acuerdo con lo establecido en el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS 2021, en el diseño de sistemas de tratamiento de aguas residuales deben considerarse diferentes condiciones de caudal, tales como el caudal medio diario, el caudal máximo diario y el caudal máximo horario, con el propósito de garantizar el adecuado funcionamiento hidráulico de las estructuras y procesos unitarios frente a las variaciones temporales del servicio.

El análisis del comportamiento del caudal permite identificar condiciones de sobrecarga hidráulica, variaciones estacionales, aportes por infiltración e influjos pluviales, así como verificar la capacidad operativa de la planta de tratamiento. Asimismo, este análisis constituye una herramienta fundamental para determinar la necesidad de ampliaciones, optimización de procesos o ajustes en la configuración hidráulica del sistema, con el fin de asegurar el cumplimiento de los criterios de diseño y operación establecidos en la normativa vigente.

5.2.1.3. Estado de Operación:

El estado de operación corresponde a la condición en la que se encuentra cada Planta de Tratamiento de Agua Residual (PTAR) al momento del estudio, permitiendo identificar si el sistema se encuentra en funcionamiento o fuera de servicio. Esta variable es clave para evaluar la efectividad real de la infraestructura instalada, ya que la existencia de una planta no garantiza por sí sola el tratamiento adecuado de las aguas residuales.

El análisis del estado de operación permite reconocer deficiencias asociadas a problemas técnicos, de mantenimiento, diseño u operación, así como identificar la relación entre la capacidad instalada y el uso real del sistema. Esta información constituye un insumo fundamental para el análisis comparativo y la formulación de alternativas orientadas a mejorar el desempeño de las PTAR en el departamento de Boyacá.

5.2.2. Trabajo de Campo.

En ausencia de coordenadas precisas se realiza visita de campo a las plantas de tratamiento. Durante las visitas se realiza:

- Georreferenciación de cada sistema mediante GPS.
- Obtención de características generales de cada PTAR, como procesos existentes.

Municipio	Tunja	
Coordenada	73°19'12"	05°34'51"
Registro fotográfico		

Tabla 2. Registro fotográfico de la Ptar del municipio de Tunja, con sus respectivas coordenadas. Fuente elaboración propia.

Municipio	Aquitania	
Coordenada	72°53'27,89"	05°31'07,27"
Registro fotográfico		

Tabla 3. Registro fotográfico de la Ptar del municipio Aquitania, con sus respectivas coordenadas. Fuente elaboración propia.

1996/2026
Memoria que trasciende

Municipio	Sotaquirá	
Coordenada	73°06'27,8"	05°46'03,4"
Registro fotográfico		

Tabla 4. Registro fotográfico de la Ptar del municipio de Sotaquirá, con sus respectivas coordenadas. Fuente elaboración propia.

5.3. Análisis Comparativo.

5.3.1. Distribución de procesos unitarios por municipio.

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales presentes en el departamento de Boyacá se examinan con base en los procesos generales establecidos en el RAS 2021. Bajo este marco, se analiza la aplicación de los procesos unitarios en cada municipio, identificando las tecnologías empleadas y las etapas de tratamiento que se utilizan con mayor o menor frecuencia. Esta distribución a nivel municipal permite evidenciar las tendencias en la implementación de los procesos de tratamiento, así como las diferencias existentes entre los territorios en función de las soluciones adoptadas.

Procesos	Municipios
Pretratamiento	AQUITANIA

Procesos	Municipios
	ARCABUCO BERBEO CHIVATA COPER JERICÓ OTANCHE PAIPA PAUNA SAMACÁ SOGAMOSO SORACÁ TIBASOSA (CASCO URBANO) TIBASOSA (EL CHORRITO) TIBASOSA (SANTA TERESA) TOGÜÍ TUNJA TUNUNGUÁ
Tratamiento Primario	CHIVATA GUACAMAYAS OTANCHE PAUNA SOGAMOSO SOTAQUIRÁ TOGÜÍ TUNJA TUNUNGUÁ
Tratamiento Secundario	AQUITANIA ARCABUCO BERBEO CHIQUINQUIRA CHIQUIZA (S,P IGUAQUE) CHIVATA GUACAMAYAS MOTAVITA NOBSA (SECTOR CHAMEZA) NOBSA (UCUENGÁ- SUAZAPAWA)

1996/2026
Memoria que trasciende

TUNJA - BOYACÁ - PBX: (608) 744 0404

Campus Centro Histórico: Cll. 19 No. 11 - 64 • Campus Avenida Universitaria:
Edificio Fray Giordano Bruno, O.P.: Av. Universitaria Cll. 48 No. 1-235 este.
Edificio Santo Domingo de Guzmán: Av. Universitaria No. 45 - 202.
Santoto Services: Centro Comercial Unicentro Tunja, Local 1-106.

Procesos	Municipios
	NOBSA (PUNTA LARGA) OICATA OTANCHE PAIPA PAUNA SAMACÁ SOGAMOSO SORACÁ SOTAQUIRÁ TIBASOSA (CASCO URBANO) TIBASOSA (EL CHORRITO) TIBASOSA (SANTA TERESA) TOGÜÍ TUNJA
Tratamiento Complementario	CUÍTIVA (CENTRO POBLADO LLANO ALARCON) SORACÁ SOTAQUIRÁ

Tabla 5. Distribución de procesos unitarios por municipio. Fuente elaboración Propia.

5.3.2. Clasificación de los sistemas

El grado de tratamiento del agua residual en la zona de estudio se clasifica en el presente proyecto con base en los procesos que integran cada sistema. En la siguiente tabla se establecen cuatro categorías principales:

Tipo	Nivel	Procesos que agrupa
Tipo 1	Básico	1 proceso
Tipo 2	Funcional	2 procesos
Tipo 3	Óptimo	3 procesos
Tipo 4	Ideal	Todos los procesos

Tabla 6. Clasificación de los sistemas. Fuente elaboración propia.

A partir de lo anterior, se presenta la siguiente agrupación:

1996/2026
Memoria que trasciende

Tipo	Municipio	Nombres	Procesos Predominantes
1	18	AQUITANIA ARCABUCO BERBEO CHIVATA COPER JERICÓ OTANCHE PAIPA PAUNA SAMACÁ SOGAMOSO SORACÁ TIBASOSA (CASCO URBANO) TIBASOSA (EL CHORRITO) TIBASOSA (SANTA TERESA) TOGÜÍ TUNJA TUNUNGUÁ	Cribado
2	7	CHIVATA OTANCHE PAUNA SOGAMOSO TOGÜÍ TUNJA TUNUNGUÁ	Sedimentador
3	6	CHIVATA OTANCHE PAUNA SOGAMOSO TOGÜÍ TUNJA	Filtro anaerobio
4	0	N/A	N/A

Tabla 7. Agrupación de los sistemas. Fuente elaboración propia.

1996/2026
Memoria que trasciende

TUNJA - BOYACÁ - PBX: (608) 744 0404

Campus Centro Histórico: Cll. 19 No. 11 - 64 • Campus Avenida Universitaria:
Edificio Fray Giordano Bruno, O.P.: Av. Universitaria Cll. 48 No. 1-235 este.
Edificio Santo Domingo de Guzmán: Av. Universitaria No. 45 - 202.
Santoto Services: Centro Comercial Unicentro Tunja, Local 1-106.

5.4. Documentación de Sistemas de Tratamiento

Para este estudio se recopilan datos correspondientes a 28 Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) ubicadas en el departamento de Boyacá, cada una con sus coordenadas geográficas debidamente definidas y con información técnica asociada. La documentación obtenida incluye la identificación del municipio, estado de operación, tipo de procesos presentes en cada sistema como: pretratamiento, tratamiento primario, secundario y complementario, así como la información relacionada con caudales y variables establecidas previamente en el apartado 5.2.1.1.

Con base en estos datos, se construye una base de información organizada bajo criterios comunes que permite comparar las tecnologías implementadas en los diferentes municipios y establecer patrones de distribución territorial. Posteriormente, la información espacial se integra en el software ArcGIS para generar un mapa de puntos que representa la localización de cada PTAR dentro del departamento. Esta representación cartográfica facilita la visualización de la infraestructura existente, la identificación de zonas con ausencia en tratamiento y el análisis de la relación entre ubicación geográfica, disponibilidad tecnológica y condiciones operativas.

El mapa constituye un instrumento clave para documentar la situación actual del saneamiento en la zona de estudio, ya que permite identificar tendencias, contrastar la distribución de los tipos de tratamiento presentes y servir como base para el análisis comparativo y para la toma de decisiones en materia de planificación, priorización y mejoramiento de los sistemas de tratamiento de aguas residuales en Boyacá.

5.5. Propuesta de alternativas óptimas para la zona de estudios.

Se realiza una verificación de tecnologías en auge a nivel mundial estableciendo algunas propuestas orientadas a fortalecer el funcionamiento y sostenibilidad de los sistemas evaluados y/o como propuestas alternas para las zonas con ausencia de sistemas de tratamiento de agua residual.

6. RESULTADOS

6.1. Caracterización de los sistemas de tratamiento de aguas residuales en Boyacá según sus procesos unitarios.

Este apartado presenta la caracterización de los sistemas de tratamiento de aguas residuales existentes en el departamento de Boyacá, con el propósito de identificar y analizar los procesos unitarios que conforman cada planta. La caracterización se basa en la recopilación y sistematización de información técnica que permite establecer la ubicación de las PTAR, su relación con las fuentes hídricas receptoras y la cuenca hidrográfica a la que pertenecen, así como los esquemas de tratamiento implementados en cada municipio. Este análisis constituye la base para comprender la distribución territorial de las tecnologías de tratamiento, evaluar su coherencia con las condiciones locales y facilitar comparaciones entre los distintos sistemas presentes en la zona de estudio.

A partir de las variables establecidas en la metodología del proyecto, se consolida la tabla 8 que involucra los datos obtenidos de la CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE BOYACÁ, Corpoboyacá.

MUNICIPIO	CORDENADAS UTM		FUENTE HIDRICA	CUENCA
	LONGITUD	LATITUD		
AQUITANIA	-72,8910806	5,51868611	Quebrada La Mugre	Lago De Tota
ARCABUCO	-73,4552222	5,76891667	Rio Pomeca	Rio Suarez

MUNICIPIO	CORDENADAS UTM		FUENTE HIDRICA	CUENCA
	LONGITUD	LATITUD		
BERBEO	-73,1286667	5,22497222	Quebrada Agua Blanca	Rio Lengupá
CHIQUEQUIRA	-73,7945278	5,63144444	Rio Suarez	Rio Suarez
CHIQUEIZA (S,P IGUAQUE)	-73,4438611	5,64616667	Quebrada Yerbabuena	Rio Sutamarchán- Moniquirá
CHIVATA	-73,2873333	5,55708333	Quebrada Las Ánimas	Rio Chicamocha
COPER	-74,0471944	5,48186111	Quebrada Cangrejera	Rio Carare Minero
CUÍTIVA (CENTRO POBLADO LLANO ALARCON)	-72,9123611	5,59755556	Quebrada El Salitre	Lago De Tota
GUACAMAYAS	-72,4974722	6,46355556	Rio SurcabaSiga	Río Chicamocha
JERICÓ	-72,5668333	6,14877778	Quebrada El Bebedero	Río Chicamocha
MOTAVITA	-73,3726889	5,57829167	Quebrada la Hornilla	Río Chicamocha
NOBSA (SECTOR CHAMEZA)	-72,91315	5,75787222	Río Chicamocha	Rio Chicamocha
NOBSA (UCUENGÁ- SUAZAPAWA)	-72,9680833	5,75695556	Río Chicamocha	Río Chicamocha
NOBSA (PUNTA LARGA)	-72,9780083	5,75767222	Río Chicamocha	Río Chicamocha
OICATA	-73,3050278	5,60208333	Río Chicamocha	Río Chicamocha
OTANCHE	-74,1752778	5,65921944	Quebrada Tambrías	Rio Carare Minero
PAIPA	-73,1084424	5,7671738	Río Chicamocha	Río Chicamocha
PAUNA	-73,9843444	5,66138889	Quebrada Paunera	Rio Carare Minero
SAMACÁ	-73,4902778	5,50472222	Quebrada San José	Río Sutamarchán- Moniquirá Y Suarez A,D

1996/2026
Memoria que trasciende

TUNJA - BOYACÁ - PBX: (608) 744 0404

Campus Centro Histórico: Cll. 19 No. 11 - 64 - Campus Avenida Universitaria:
Edificio Fray Giordano Bruno, O.P.: Av. Universitaria Cll. 48 No. 1-235 este.
Edificio Santo Domingo de Guzmán: Av. Universitaria No. 45 - 202.
Santoto Services: Centro Comercial Unicentro Tunja, Local 1-106.

MUNICIPIO	CORDENADAS UTM		FUENTE HIDRICA	CUENCA
	LONGITUD	LATITUD		
SOGAMOSO	-72,9013167	5,76082222	Rio Chicamocha	Rio Chicamocha
SORACÁ	-73,3315556	5,50636111	Quebrada Puente Hamaca	Rio Chicamocha
SOTAQUIRÁ	-73,2474195	5,7621468	Rio Sotaquirá	Rio Chicamocha
TIBASOSA (CASCO URBANO)	-72,9899722	5,7515	Quebrada Grande	Rio Chicamocha
TIBASOSA (EL CHORRITO)	-73,0143611	5,80227778	Quebrada Grande	Rio Chicamocha
TIBASOSA (SANTA TERESA)	-72,9926389	5,78933333	Quebrada Grande	Rio Chicamocha
TOGÜÍ	-73,5160167	5,93745556	Rio Togüí	Rio Suarez
TUNJA	-73,3210973	5,5796773	Rio Jordan	Rio Chicamocha
TUNUNGUÁ	-73,5160167	5,73458056	Caño Galvan	Rio Carare Minero

Tabla 8. Información de reconocimiento espacial de las plantas de tratamiento de agua residual en Boyacá – Fuente adaptado de Corpoboyacá

MUNICIPIO	OPERACIÓN	PRETRATAMIENTO	TRATAMIENTO PRIMARIO	TRATAMIENTO SECUNDARIO	TRATAMIENTO COMPLEMENTARIO	Q (L/S)
Aquitania	No	Cribado, desarenador	No existe	Laguna de oxidación y sedimentador secundario	No existe	36,00

MUNICIPIO	OPERACIÓN	PRETRATAMIENTO	TRATAMIENTO PRIMARIO	TRATAMIENTO SECUNDARIO	TRATAMIENTO COMPLEMENTARIO	Q (L/S)
Arcabuco	No	Cribado, desarenador	No existe	Dos tanques UASB y filtro percolador	No existe	13,24
Berbo	Si	Trampa de grasa, desarenador	No existe	Filtro anaerobio de flujo ascendente	No existe	3,00
Chiquinquirá	Si	No existe	No existe	Tanque SBR y caseta de lodos	No existe	No R.
Chíquiza (S, P Iguaque)	Si	No existe	No existe	Laguna de oxidación	No existe	11,33
Chivata	Si	Cribado, trampa de grasas	Sedimentador Primario	Filtro anaerobio y reactor de lodos	No existe	0,109
Coper	Si	Cribado, trampa de grasas	No existe	No existe	No existe	3,38
Cúltiva (Llano Alarcon)	Si	No existe	No existe	No existe	Filtros verdes	0,15
Guacamayas	Si	No existe	Tanque Imhoff	Lagunas de oxidación	No existe	2,89
Jericó	Si	Cribado, trampa de grasas, canaleta parshall	No existe	No existe	No existe	0,319
Motavita	No	No existe	No existe	Sedimentador, reactores anaerobios	No existe	0,79
Nobsa (Sector Chameza)	No	No existe	No existe	Reactor aerobio	No existe	12,00
Nobsa (Suazapawa)	Si	No existe	No existe	Reactor aerobio	No existe	6,00
Nobsa (Punta Larga)	No	No existe	No existe	Filtro percolador	No existe	4,76
Oicata	No	No existe	No existe	Sistema de lodos activados	No existe	No R.
Otanche	Si	Tanque de homogenización	Sedimentador	Reactor anaerobio	No existe	17,00
Paipa	Si	Desarenador, trampa de grasas, tanque de homogenización	No existe	Lodos activados y tanque de sedimentación	No existe	26,42

1996/2026

Memoria que trasciende

TUNJA - BOYACÁ - PBX: (608) 744 0404

Campus Centro Histórico: Cll. 19 No. 11 - 64 • Campus Avenida Universitaria:
Edificio Fray Giordano Bruno, O.P.: Av. Universitaria Cll. 48 No. 1-235 este.
Edificio Santo Domingo de Guzmán: Av. Universitaria No. 45 - 202.
Santoto Services: Centro Comercial Unicentro Tunja, Local 1-106.

ACREDITACIÓN
INSTITUCIONAL
— MULTICAMPUS —
DE ALTA CALIDAD POR 8 AÑOS
Resolución 014515 del 28 de julio de 2022

MUNICIPIO	OPERACIÓN	PRETRATAMIENTO	TRATAMIENTO PRIMARIO	TRATAMIENTO SECUNDARIO	TRATAMIENTO COMPLEMENTARIO	Q (L/S)
Pauna	No	Tanque séptico	Sedimentador	Filtro anaerobio	No existe	7,50
Samacá	Si	Cribado, desarenador, pozo de bombeo	No existe	Reactor UASB, reactor de lodos activados, sedimentador circular, lechos de secado	No existe	11,00
Sogamoso	No	Canal de entrada, estación de bombas, desarenador elevado	Sedimentador	Reactores anaerobios	No existe	3,16
Soracá	Si	Pozo de bombeo, canastilla de cribado, tamiz estático	No existe	Lodos activados y sedimentación	Humedal artificial	0,64
Sotaquirá	Si	No existe	Sedimentador primario, tanque Imhoff	Reactor UASB, lagunas de oxidación	Lecho filtrante en tierra, humedales	1,50
Tibasosa (Casco Urbano)	Si	Cribado, desarenador	No existe	Reactor UASB y sedimentación secundaria, digestor y lechos	No existe	21,65
Tibasosa (El Chorrillo)	Si	Cribado, desarenador	No existe	Filtro Anaerobio y filtro percolador, lecho de secado	No existe	No R.
Tibasosa (Santa Teresa)	Si	Cribado, desarenador	No existe	Filtro Anaerobio y filtro percolador, lecho de secado	No existe	No R.
Togüí	Si	Cribado	Filtro, canaleta parshall	Reactor biológico	No existe	1,36
Tunja	Si	Desarenador	Canaleta parshall	Reactor UASB, tanque de aireación lodos activados, sedimentador secundario	No existe	6,51

1996/2026
Memoria que trasciende

TUNJA - BOYACÁ - PBX: (608) 744 0404

Campus Centro Histórico: Cll. 19 No. 11 - 64 • Campus Avenida Universitaria:
Edificio Fray Giordano Bruno, O.P.: Av. Universitaria Cll. 48 No. 1-235 este.
Edificio Santo Domingo de Guzmán: Av. Universitaria No. 45 - 202.
Santoto Services: Centro Comercial Unicentro Tunja, Local 1-106.

MUNICIPIO	OPERACIÓN	PRETRATAMIENTO	TRATAMIENTO PRIMARIO	TRATAMIENTO SECUNDARIO	TRATAMIENTO COMPLEMENTARIO	Q (L/S)
Tununguá	No	Cribado	Tratamiento primario	No existe	No existe	0,54

Tabla 9. Información del estado de operación de las y los tratamientos que maneja las PTAR en Boyacá – Fuente adaptado de Corpoboyacá.

La información consolidada en las tablas anteriores corresponde a un total de 28 Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) distribuidas en distintos municipios del departamento de Boyacá. Estos registros constituyen la base del análisis desarrollado en el estudio, ya que permiten identificar las características generales de cada sistema, tales como su ubicación, estado de operación y los procesos unitarios que conforman el tratamiento.

Asimismo, la información tabulada facilita la comparación técnica entre las plantas, al evidenciar similitudes y diferencias en los esquemas de tratamiento implementados en cada municipio.

Este análisis resulta fundamental para evaluar el nivel de desarrollo de los sistemas existentes y sirve como insumo para la caracterización, el análisis comparativo y la formulación de propuestas orientadas a mejorar el funcionamiento de las PTAR en la zona de estudio.

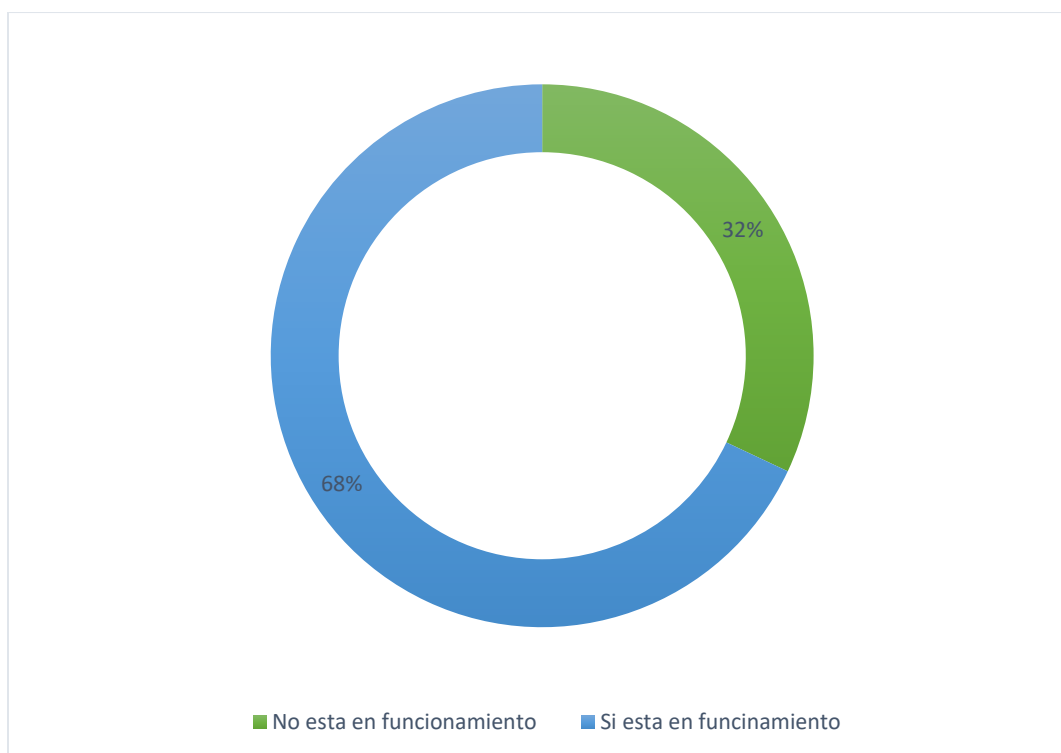
6.2. Análisis de los sistemas de tratamiento de agua residual en función de los procesos existentes en cada planta.

1996/2026

Memoria que trasciende

- Estado de operación

La gráfica 1 muestra la proporción de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) en el departamento de Boyacá según su estado de funcionamiento.

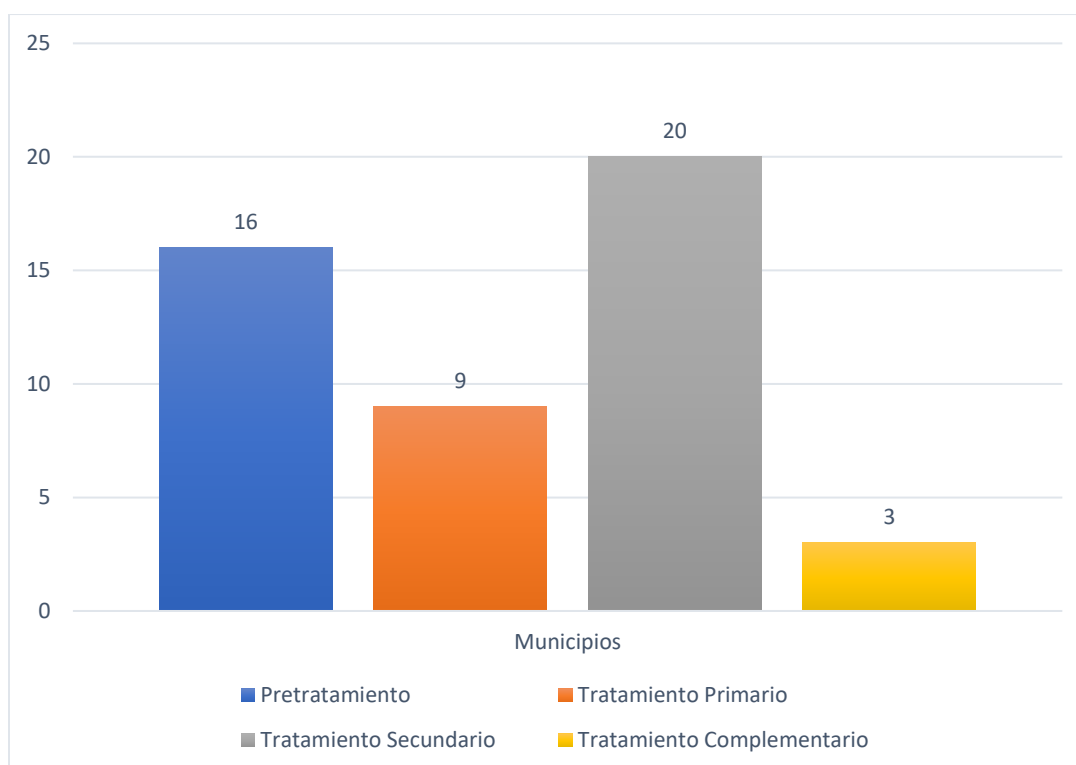


Gráfica 1. Estado de operación PTAR en Boyacá. Fuente elaboración propia.

Se observa que el 68% de las PTAR se encuentran en operación, mientras que el 32% no están en funcionamiento. Estos resultados evidencian que, aunque la mayoría de las plantas están operando, existe una proporción significativa de infraestructura fuera de servicio, lo cual representa una limitación para la cobertura efectiva del tratamiento de aguas residuales y resalta la necesidad de fortalecer la operación, mantenimiento y sostenibilidad de estos sistemas.

- Uso de procesos unitarios

La gráfica 2 presenta el uso de los diferentes procesos de tratamiento de aguas residuales en los municipios del departamento de Boyacá.

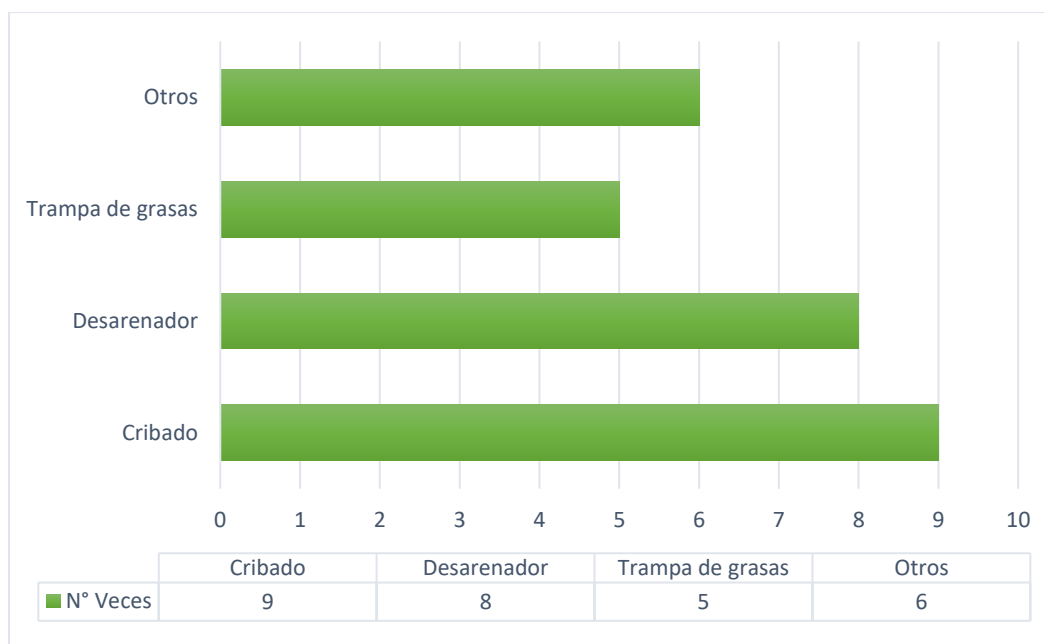


Gráfica 2. Uso de Procesos de las PTAR en Boyacá. Fuente elaboración propia.

Se observa que el tratamiento secundario es el más implementado con 20 municipios, seguido del pretratamiento, presente en 16 municipios. En menor proporción se encuentran el tratamiento primario utilizado en 9 municipios, y el tratamiento complementario, implementado únicamente en 3 municipios. Estos resultados evidencian una mayor adopción de procesos biológicos, mientras que las etapas complementarias aún presentan una baja cobertura a nivel departamental.

- Tipos de pretratamiento

La gráfica 3 presenta el uso de los diferentes tipos de pretratamiento de aguas residuales en los municipios del departamento de Boyacá.



Gráfica 3. Tipos de pretratamiento en las PTAR de Boyacá. Fuente elaboración propia.

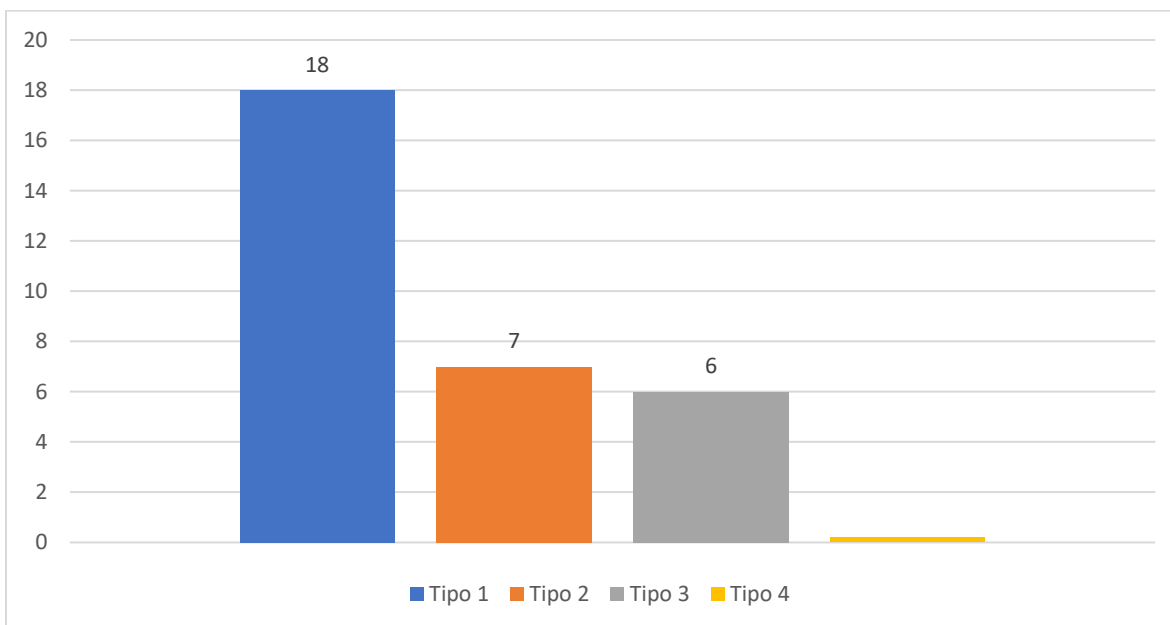
El cribado y el desarenador son los procesos de pretratamiento que se repiten con mayor frecuencia en las PTAR del departamento de Boyacá, lo que muestra que son las unidades más utilizadas para el manejo inicial de las aguas residuales. El cribado es el proceso más común, seguido del desarenador, lo cual indica que estas unidades suelen ser las primeras en incorporarse dentro de los sistemas de tratamiento.

La trampa de grasas también aparece en varias plantas, principalmente en aquellas donde se manejan aguas residuales de origen doméstico. Por otro lado, la categoría “otros” agrupa unidades menos frecuentes, las cuales responden a condiciones

particulares de cada municipio. En general, la información presentada evidencia que, aunque existe una base común en los procesos de pretratamiento, su implementación varía según las características y necesidades locales.

- Tipos – niveles

La gráfica 4. muestra la clasificación de las plantas de tratamiento de aguas residuales según su nivel de desempeño.



Gráfica 4. Tipos y Niveles de clasificación en las PTAR de Boyacá. Fuente elaboración propia.

Se observa que la mayoría de los sistemas corresponden al Tipo 1 (básico), con 18 unidades, lo que indica una alta presencia de infraestructuras con condiciones mínimas de tratamiento. En menor proporción se encuentran los sistemas Tipo 2 (funcional), con 7 unidades, y Tipo 3 (óptimo), con 6 unidades, lo que refleja una adopción limitada de tecnologías con mayor eficiencia.

Finalmente, el Tipo 4 (ideal) presenta una presencia prácticamente nula, evidenciando la ausencia de sistemas que cumplan con condiciones óptimas integrales. Estos resultados ponen de manifiesto la necesidad de fortalecer y optimizar los sistemas existentes para mejorar el desempeño del tratamiento de aguas residuales en el departamento.

- Tablas comparativas

La siguiente tabla presenta la comparación entre el caudal de diseño y el caudal tratado por algunas PTAR del departamento de Boyacá, permitiendo evaluar su eficiencia operativa. A partir de esta información, se identifican plantas que operan dentro de su capacidad instalada y otras que presentan excesos, lo que evidencia posibles situaciones de sobrecarga hidráulica y la necesidad de ajustes en su operación o dimensionamiento.

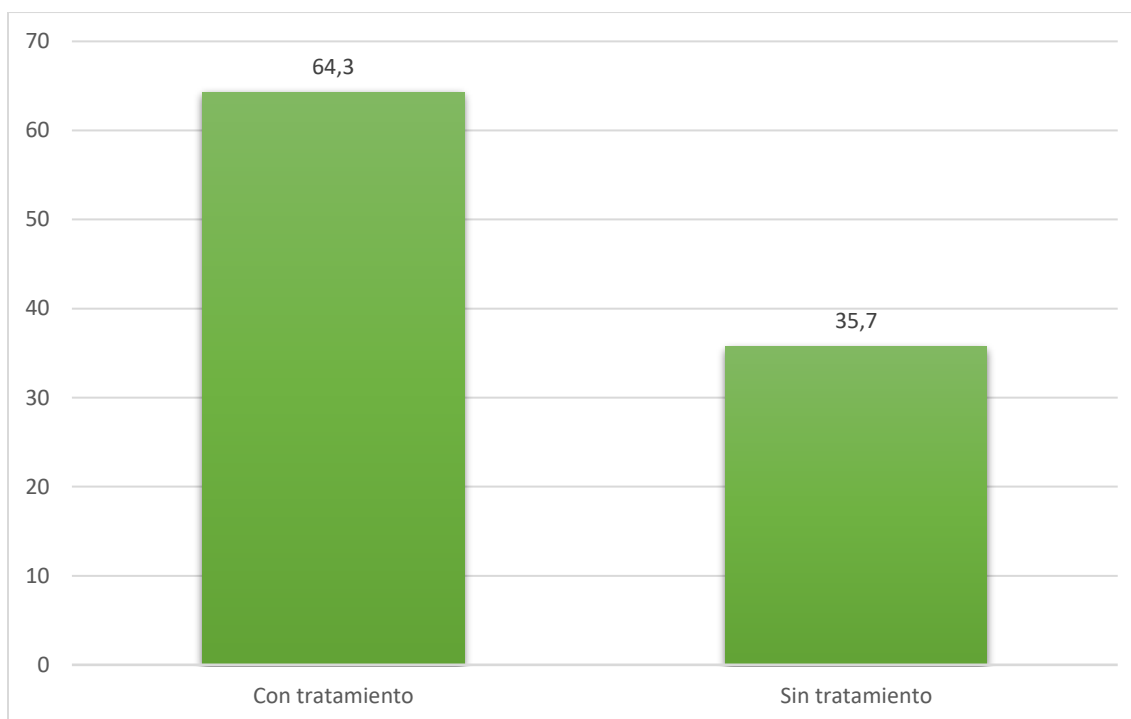
MUNICIPIO	CAUDAL DE DISEÑO DE LA PLANTA (L/S)	CAUDAL TRATADO POR LA PLANTA (L/S)	EFICIENCIA OPERATIVA	EXCESOS	OBSERVACIÓN
Berbeo	3,00	3,00	100,00	No presenta	Suficiencia de la capacidad instalada
Chíquiza (Centro Poblado)	16,00	11,00	68,75	No presenta	Suficiencia de la capacidad instalada
Chivatá	2,30	0,11	4,74	No presenta	Suficiencia de la capacidad instalada
Cúltiva	0,80	0,14	17,5	No presenta	Suficiencia de la capacidad instalada
Guacamayas	2,50	2,89	115,6	15,6	Su operación excede los parámetros de diseño
Jericó	5,56	0,32	5,74	No presenta	Suficiencia de la capacidad instalada
Nobsa (Suazapagua)	3,00	6,00	200	100,00	Su operación excede los parámetros de diseño
Nobsa (Punta Larga)	2,62	4,76	181,68	81,68	Su operación excede los parámetros de diseño

MUNICIPIO	CAUDAL DE DISEÑO DE LA PLANTA (L/S)	CAUDAL TRATADO POR LA PLANTA (L/S)	EFICIENCIA OPERATIVA	EXCESOS	OBSERVACIÓN
Nobsa (Chameza)	8,00	12,00	150	50,00	Su operación excede los parámetros de diseñado
Otanche	15,00	17,00	113,33	13,33	Su operación excede los parámetros de diseñado
Compañía De Servicios Públicos De Sogamoso S.A. E.S.P	30,00	26,42	88,07	No presenta	Suficiencia de la capacidad instalada
Pauna	8,60	7,50	87,21	No presenta	Suficiencia de la capacidad instalada
Samacá	50,00	11,00	22	No presenta	Suficiencia de la capacidad instalada
Soracá	4,70	4,70	100	No presenta	Suficiencia de la capacidad instalada
Sotaquirá	4,00	1,50	37,5	No presenta	Suficiencia de la capacidad instalada
Togüí	4,00	2,53	63,175	No presenta	Suficiencia de la capacidad instalada
Tunja	420,00	420,00	100	No presenta	Suficiencia de la capacidad instalada
Tununguá	1,00	0,43	42,86	No presenta	Suficiencia de la capacidad instalada

Tabla 10. Análisis de la operatividad de las PTAR en términos de caudal. Fuente elaboración propia.

- Uso de tratamiento Primario

La gráfica 5 evidencia que, aunque la mayoría de los municipios cuentan con tratamiento de aguas residuales, persiste un porcentaje importante sin sistemas de tratamiento.

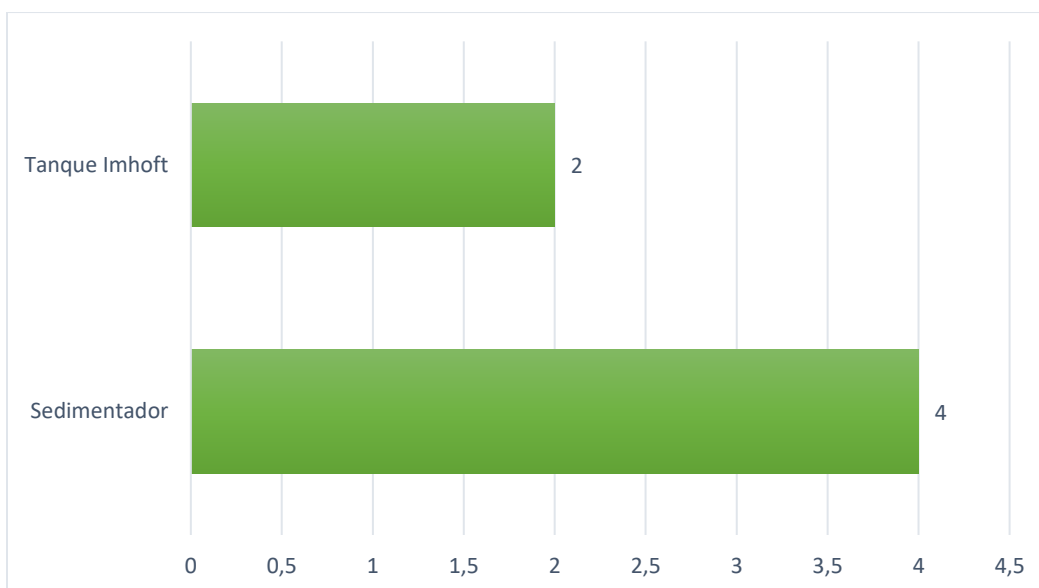


Gráfica 5. Índice de PTAR con tratamiento primario en Boyacá. Fuente elaboración propia.

Esto indica que la mayoría de las plantas están diseñadas con una etapa de remoción de sólidos sedimentables antes del tratamiento biológico, lo cual es una buena práctica de ingeniería. Sin embargo, una porción significativa (casi el 36%) no tiene esta etapa, lo que podría deberse a que el tratamiento secundario lo asume (como los lagos de oxidación).

- Tratamiento Primario

La Gráfica 6 presenta la distribución de las tecnologías de tratamiento primario utilizadas en las PTAR analizadas.



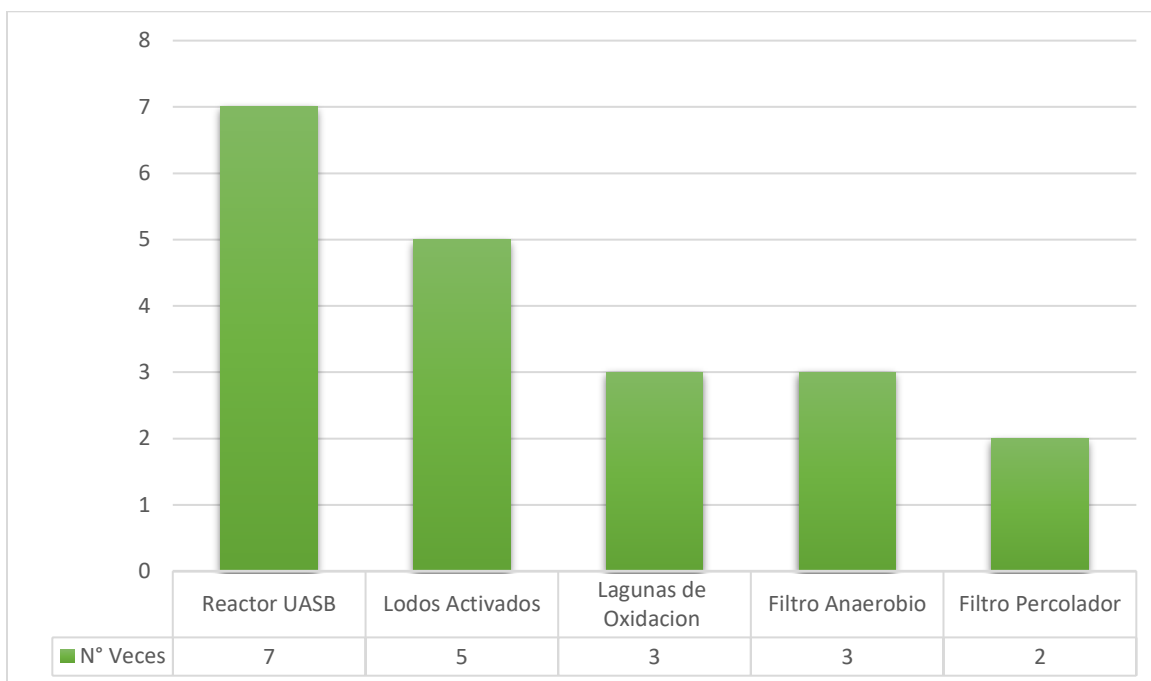
Grafica 6. Índice de predominio en los sistemas que se para tratamiento primario en Boyacá. Fuente elaboración propia.

Mostrando que el sedimentador convencional es la tecnología de tratamiento primario más utilizada en las PTAR analizadas, lo que indica que este tipo de unidad sigue siendo una solución frecuente para la remoción inicial de sólidos en los sistemas de tratamiento. Su mayor presencia se relaciona con su funcionamiento sencillo y con el hecho de que es una tecnología ampliamente conocida y aplicada en el país.

En menor proporción se encuentra el tanque Imhoff, el cual integra en una sola estructura los procesos de sedimentación y digestión de lodos. Aunque su uso es menos frecuente, esta tecnología representa una alternativa funcional en municipios con caudales bajos o

con limitaciones operativas, ya que permite reducir el manejo de lodos de manera simplificada.

La gráfica 7 presenta las tecnologías de tratamiento secundario utilizadas en las PTAR del departamento.



Grafica 7. Índice de predominio en los sistemas que se usa en tratamiento secundario en Boyacá. Fuente adaptado de CORPOPOYACA.

Las tecnologías más comunes son el Reactor UASB y los Lodos Activados, que son sistemas biológicos anaerobios y aerobios de alta eficiencia, respectivamente. Las lagunas de oxidación también son una solución relevante, típicamente usada en zonas con disponibilidad de terreno.

6.3. Sistematización de la información existente.

Como parte del proceso de sistematización de la información recopilada, se elaboró un mapa interactivo que integra la localización de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) identificadas en el departamento de Boyacá, junto con la información técnica asociada a cada sistema. El acceso a esta herramienta se realiza mediante el código QR presentado a continuación, el cual permite a los usuarios ingresar, navegar y consultar de manera dinámica los datos espaciales y descriptivos del estudio.



Figura 2. Código Qr. Del mapa de Boyacá con sus PTAR. Fuente elaboración Propia.

1996/2026
Memoria que trasciende

La Figura 3 delineada de color negro presenta la distribución espacial de las plantas de tratamiento de aguas residuales PTAR identificadas en el departamento de Boyacá según la información obtenida de la base de datos de la CORPORACIÓN AUTÓNOMA DE BOYACÁ - Corpoboyacá.

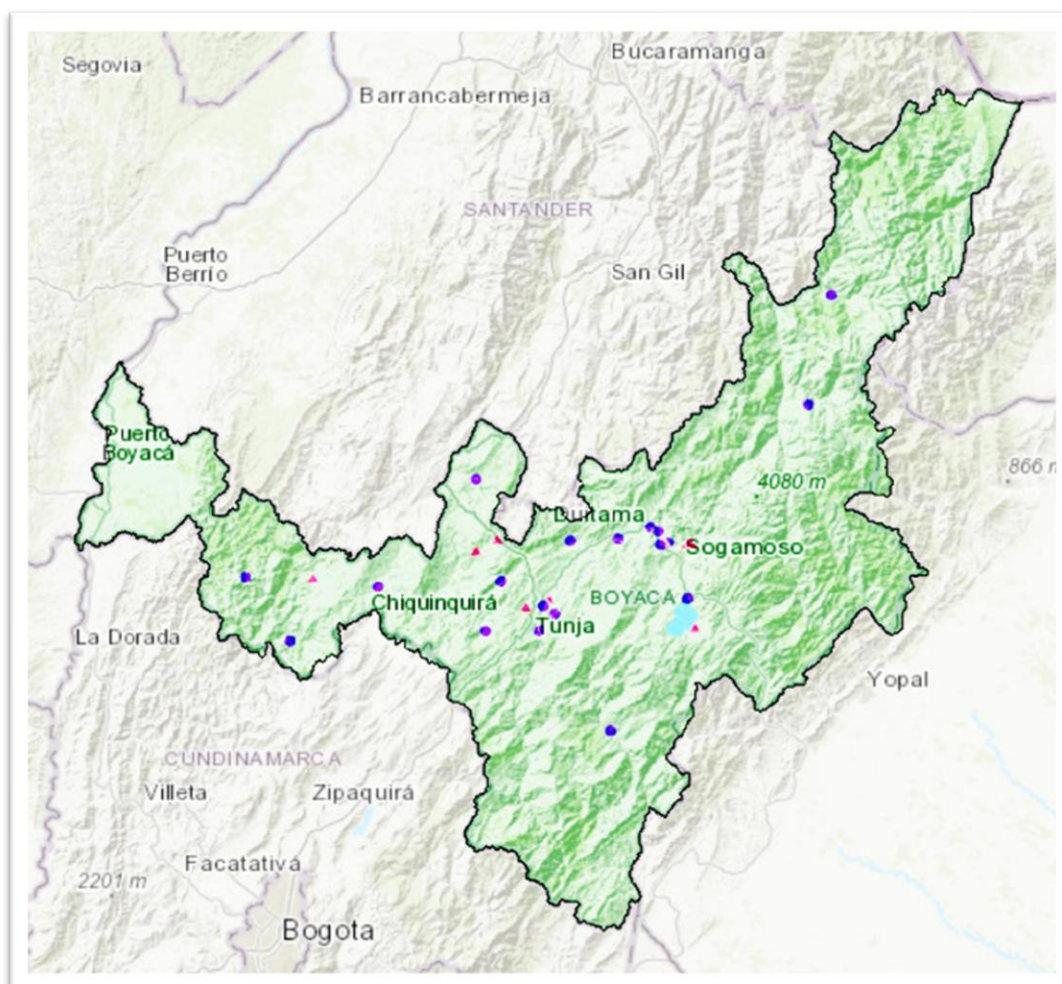


Figura 3. Mapa de Boyacá con los puntos de las PTAR existentes dentro del departamento. Fuente elaboración propia ArGIS Pro.

1996/2026
Memoria que trasciende

TUNJA - BOYACÁ - PBX: (608) 744 0404

Campus Centro Histórico: Cll. 19 No. 11 - 64 • Campus Avenida Universitaria:
Edificio Fray Giordano Bruno, O.P.: Av. Universitaria Cll. 48 No. 1-235 este.
Edificio Santo Domingo de Guzmán: Av. Universitaria No. 45 - 202.
Santoto Services: Centro Comercial Unicentro Tunja, Local 1-106.

En el mapa se distinguen dos tipos de instalaciones según su estado operativo: los círculos de color azul representan las PTAR que se encuentran actualmente en funcionamiento, mientras que los triángulos de color rojo corresponden a aquellas plantas que no están operando.

La localización de las PTAR evidencia una mayor concentración de infraestructuras en la zona central del departamento, particularmente en municipios de mayor relevancia urbana y poblacional, como Tunja, Duitama y Sogamoso, así como en sus áreas de influencia. Esta distribución sugiere una relación directa entre la presencia de sistemas de tratamiento y la densidad poblacional, así como con el nivel de desarrollo de los centros urbanos.

Por otro lado, se observa que las PTAR fuera de operación se concentran principalmente en el corredor central y oriental del departamento, lo cual puede estar asociado a limitaciones técnicas, operativas o financieras que afectan la sostenibilidad de estos sistemas. En contraste, las plantas en funcionamiento se distribuyen de manera más dispersa en el territorio, incluyendo zonas rurales y semiurbanas, lo que refleja esfuerzos por ampliar la cobertura del tratamiento de aguas residuales en el departamento.

En términos generales, el mapa permite identificar brechas territoriales en la prestación del servicio de tratamiento de aguas residuales, evidenciando la necesidad de fortalecer la operación y mantenimiento de las PTAR existentes, así como de implementar soluciones tecnológicas adecuadas al contexto local, con el fin de mejorar el cumplimiento de la normativa ambiental y la protección de los cuerpos hídricos receptores.

1996/2026

Memoria que trasciende

La Figura 4 presenta la tabla asociada al mapa, en la cual se reúne la información correspondiente a las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) identificadas en el departamento de Boyacá. En esta tabla se especifica el municipio donde se ubica cada planta, así como su estado de operación, lo que permite identificar cuáles sistemas se encuentran en funcionamiento y evaluar la cobertura del tratamiento de aguas residuales en la región. De igual forma, se incluye la cuenca hidrográfica y la fuente hídrica receptora del vertimiento, información relevante para el análisis ambiental y el seguimiento al cumplimiento de la normativa vigente.

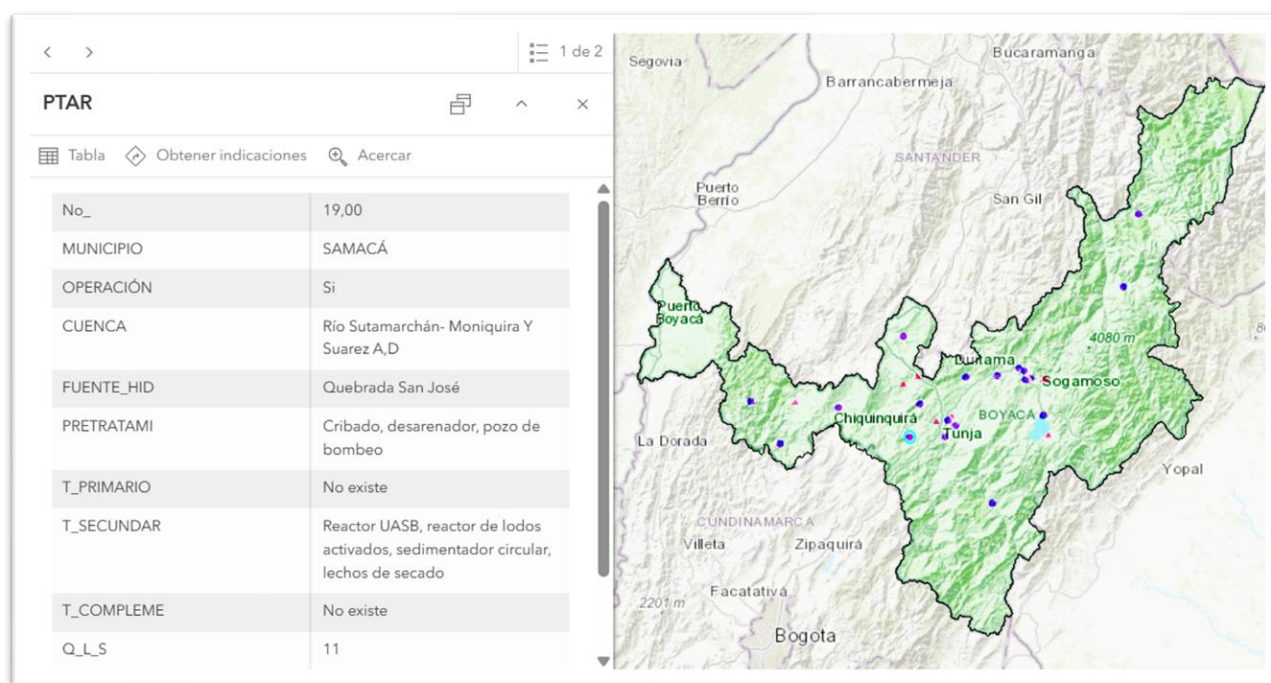


Figura 4. Mapa de Boyacá con la tabla de atributos de la capa puntos. Fuente elaboración propia ArGIS Pro.

En relación con los aspectos técnicos, la tabla describe los procesos de tratamiento implementados en cada PTAR, detallando las etapas de pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario y tratamientos complementarios, cuando estos están

presentes. Además, se reporta el caudal de salida tratado, el cual permite analizar la capacidad hidráulica de los sistemas, junto con las coordenadas geográficas (latitud y longitud), que facilitan la ubicación precisa de las plantas dentro del territorio departamental y su análisis espacial.

6.4. Propuesta de alternativas para la mejora de los sistemas de tratamiento de agua residual.

La selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales debe responder a las condiciones técnicas, económicas y operativas del contexto donde se implementan. En regiones con limitaciones presupuestales, baja disponibilidad energética y capacidad operativa básica, es fundamental priorizar soluciones confiables, sencillas y sostenibles en el tiempo. En este sentido, el presente apartado describe un enfoque de selección realista, orientado principalmente a zonas urbanas y semiurbanas.

Las tecnologías consideradas adecuadas bajo este enfoque son aquellas que presentan bajos costos de inversión y operación, pueden ser manejadas por personal con formación básica, no dependen de sistemas de automatización complejos y mantienen un desempeño estable ante variaciones de caudal y carga contaminante.

Pretratamiento

El pretratamiento constituye una etapa indispensable dentro de cualquier sistema de tratamiento, ya que protege las unidades posteriores y mejora el desempeño global del proceso. Para el contexto analizado, se priorizan estructuras de bajo costo y fácil mantenimiento, tales como rejillas manuales o semiautomáticas, desarenadores de flujo horizontal, desengrasadores simples y dispositivos básicos de medición de caudal, como canales Parshall o vertederos. Estas unidades se caracterizan por su alta durabilidad, simplicidad operativa y reducidos costos de mantenimiento.

Tratamiento primario

El tratamiento primario permite la remoción de sólidos sedimentables y parte de la carga orgánica, constituyendo una solución ampliamente utilizada en pequeños y medianos

municipios. Entre las alternativas más comunes se encuentran los tanques Imhoff, los sedimentadores primarios de geometría circular o rectangular y las cámaras sépticas comunitarias. Estas tecnologías presentan ventajas asociadas a su operación sencilla, bajo requerimiento energético y facilidad de mantenimiento.

Tratamiento biológico

Dentro del tratamiento biológico, las tecnologías anaerobias resultan particularmente adecuadas para climas cálidos y templados, como los predominantes en gran parte del territorio colombiano. Reactores UASB, reactores anaerobios de flujo ascendente y lagunas anaerobias destacan por su mínimo consumo energético, elevada robustez y potencial de aprovechamiento del biogás generado. Estas características las convierten en alternativas eficientes frente a variaciones hidráulicas y orgánicas.

De manera complementaria, pueden emplearse tecnologías aerobias simples, tales como lagunas facultativas y de maduración, filtros percoladores y contactores biológicos rotatorios. Estos sistemas presentan bajos niveles de automatización y una operación relativamente simple, si bien su implementación depende de la disponibilidad de área y, en algunos casos, de una fuente energética estable.

Tecnologías naturales

Las tecnologías naturales representan una de las alternativas más sostenibles para el tratamiento de aguas residuales en zonas rurales. Humedales construidos de flujo superficial y subsuperficial, filtros verdes, sistemas de infiltración-percolación y lagunas con macrófitas permiten alcanzar buenos niveles de depuración con costos operativos mínimos y escaso consumo energético. Además, su integración paisajística favorece la aceptación social de estos sistemas.

Tratamientos compactos y terciarios

Cuando existen restricciones de espacio o exigencias normativas más estrictas, pueden considerarse sistemas compactos de complejidad moderada, como reactores SBR simplificados, Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR) de baja complejidad o configuraciones

1996/2026

Memoria que trasciende

IFAS básicas. Estos procesos ofrecen un equilibrio entre eficiencia y costos, siempre que se evite una automatización excesiva.

En cuanto al tratamiento terciario, se priorizan alternativas económicas y de fácil operación, como la filtración en arena, la desinfección con cloro y las lagunas de pulimiento, las cuales permiten mejorar la calidad del efluente final y facilitar su disposición o reuso.

Manejo de lodos y aprovechamiento

El manejo de lodos debe orientarse hacia soluciones de bajo costo y fácil implementación, tales como lechos de secado, espesamiento gravitacional, digestión anaerobia simple y compostaje. Estas opciones permiten reducir el volumen de residuos y facilitan su aprovechamiento agrícola bajo condiciones controladas.

Adicionalmente, el reúso del agua tratada para riego agrícola, el aprovechamiento del biogás y la producción de biosólidos contribuyen a una economía circular básica, reduciendo los costos operativos y mejorando la sostenibilidad del sistema.

Con base en lo anterior y frente al contexto de la zona de estudio, se presenta una propuesta para un mejor funcionamiento de las 24 PTAR existentes. En la siguiente tabla, se aprecia en las celdas en color el proceso que se sugiere como complemento al sistema existente.

MUNICIPIO	PRETRATAMIENTO	TRATAMIENTO PRIMARIO	TRATAMIENTO SECUNDARIO	Q (L/S)
Aquitania	Cribado, desarenador	Tanque Imhoff.	Laguna de oxidación y sedimentador secundario	36,00
Arcabuco	Cribado, desarenador	Tanque Imhoff.	Dos tanques UASB y filtro percolador	13,24

1996/2026

Memoria que trasciende

MUNICIPIO	PRETRATAMIENTO	TRATAMIENTO PRIMARIO	TRATAMIENTO SECUNDARIO	Q (L/S)
Berbeo	Trampa de grasa, desarenador	Tanque Imhoff.	Filtro anaerobio de flujo ascendente	3,00
Chiquinquirá	Rejas manuales o semiautomáticas y desarenador simple	Tanque Imhoff.	Tanque SBR y caseta de lodos	No R.
Chíquiza (S, P Iguaque)	Rejas manuales o semiautomáticas y desarenador simple	Tanque Imhoff	Laguna de oxidación	11,33
Chivata	Cribado, trampa de grasas	Sedimentador Primario	Filtro anaerobio y reactor de lodos	0,109
Coper	Cribado, trampa de grasas	Tanque Imhoff.	Tanque SBR	3,38
Cultiva (Llano Alarcon)	Rejas manuales o semiautomáticas y desarenador simple	Tanque Imhoff	Filtro anaerobio	0,15
Guacamayas	Rejas manuales o semiautomáticas y desarenador simple	Tanque Imhoff	Lagunas de oxidación	2,89
Jericó	Cribado, trampa de grasas, canaleta parshall	Biodigestor	Filtro anaerobio	0,319
Motavita	Rejas manuales o semiautomáticas y desarenador simple	Biodigestor	Sedimentador, reactores anaerobios	0,79
Nobsa (Sector Chameza)	Rejas manuales o semiautomáticas y desarenador simple	Tanque Imhoff.	Reactor aerobio	12,00
Nobsa (Suazapawa)	Rejas manuales o semiautomáticas y desarenador simple	Tanque Imhoff	Reactor aerobio	6,00
Nobsa (Punta Larga)	Rejas manuales o semiautomáticas y desarenador simple	Tanque Imhoff.	Filtro percolador	4,76
Oicata	Rejas manuales o semiautomáticas y desarenador simple	Tanque Imhoff	Sistema de lodos activados	No R.

1996/2026
Memoria que trasciende

TUNJA - BOYACÁ - PBX: (608) 744 0404

Campus Centro Histórico: Cll. 19 No. 11 - 64 - Campus Avenida Universitaria:
Edificio Fray Giordano Bruno, O.P.: Av. Universitaria Cll. 48 No. 1-235 este.
Edificio Santo Domingo de Guzmán: Av. Universitaria No. 45 - 202.
Santoto Services: Centro Comercial Unicentro Tunja, Local 1-106.

ACREDITACIÓN
INSTITUCIONAL
— MULTICAMPUS —
DE ALTA CALIDAD POR 8 AÑOS
Resolución 014515 del 28 de julio de 2022

MUNICIPIO	PRETRATAMIENTO	TRATAMIENTO PRIMARIO	TRATAMIENTO SECUNDARIO	Q (L/S)
Otanche	Tanque de homogenización	Sedimentador	Reactor anaerobio	17,00
Paipa	Desarenador, trampa de grasas, tanque de homogenización	Tanque Imhoff.	Lodos activados y tanque de sedimentación	26,42
Pauna	Tanque séptico	Sedimentador	Filtro anaerobio	7,50
Samacá	Cribado, desarenador, pozo de bombeo	Tanque Imhoff.	Reactor UASB, reactor de lodos activados, sedimentador circular, lechos de secado	11,00
Sogamoso	Canal de entrada, estación de bombas, desarenador elevado	Sedimentador	Reactores anaerobios	3,16
Soracá	Pozo de bombeo, canastilla de cribado, tamiz estático	Biodigestor	Lodos activados y sedimentación	0,64
Sotaquirá	Rejas manuales o semiautomáticas y desarenador simple	Sedimentador primario, tanque Imhoff	Reactor UASB, lagunas de oxidación	1,50
Tibasosa (Casco Urbano)	Cribado, desarenador	Tanque Imhoff.	Reactor UASB y sedimentación secundaria, digestor y lechos	21,65
Tibasosa (El Chorrillo)	Cribado, desarenador	Tanque Imhoff.	Filtro Anaerobio y filtro percolador, lecho de secado	No R.
Tibasosa (Santa Teresa)	Cribado, desarenador	Tanque Imhoff.	Filtro Anaerobio y filtro percolador, lecho de secado	No R.
Togüí	Cribado	Filtro, canaleta parshall	Reactor biológico	1,36

1996/2026
Memoria que trasciende

TUNJA - BOYACÁ - PBX: (608) 744 0404

Campus Centro Histórico: Cll. 19 No. 11 - 64 - Campus Avenida Universitaria:
Edificio Fray Giordano Bruno, O.P.: Av. Universitaria Cll. 48 No. 1-235 este.
Edificio Santo Domingo de Guzmán: Av. Universitaria No. 45 - 202.
Santoto Services: Centro Comercial Unicentro Tunja, Local 1-106.

MUNICIPIO	PRETRATAMIENTO	TRATAMIENTO PRIMARIO	TRATAMIENTO SECUNDARIO	Q (L/S)
Tunja	Desarenador	Canaleta parshall	Reactor UASB, tanque de aireación lodos activados, sedimentador secundario	6,51
Tununguá	Cribado	Biodigestor	Filtro anaerobio	0,54

Tabla 11. Propuesta de alternativas para la mejora de los sistemas de tratamiento de agua residual. Fuente elaboración propia.

En el pretratamiento se proponen:

- Las rejas manuales o semiautomáticas para los municipios que cuentan con plantas que manejan caudales entre 0,5 L/s hasta más de 2000 L/s porque su función es únicamente retener sólidos gruesos al inicio del tratamiento. Su capacidad depende principalmente del tamaño del canal y del tipo de limpieza: las rejas manuales se usan en caudales pequeños, mientras que las semiautomáticas o mecánicas permiten manejar caudales mayores al facilitar la remoción continua de residuos.
- Desarenador simple para los municipios que cuentan con plantas que manejan caudales entre 0,5 y 100 L/s porque funcionan mediante flotación natural, permitiendo que las grasas y aceites suban a la superficie para ser retirados. Este proceso es más eficiente en caudales pequeños y medianos, donde la velocidad del agua permite la correcta separación de estos compuestos.

En el tratamiento primario se proponen:

- Tanques Imhoff para los municipios que cuentan con plantas que manejan caudales entre 1L/S hasta 50 L/S. Este tratamiento es usado en pequeñas

poblaciones y combina sedimentación primaria y digestión anaerobia de lodos en una sola estructura.

- Biodigestor para los municipios que cuentan con plantas que manejan caudales inferiores a 1L/S. Reactor cerrado donde ocurre digestión anaerobia; puede producir biogás. Común en soluciones rurales descentralizadas.

En el tratamiento secundario se proponen:

- El tanque SBR para los municipios que cuentan con plantas que manejan caudales entre 1 y 500 L/s porque funciona mediante ciclos de llenado, aireación, sedimentación y descarga dentro de un mismo reactor. Este tipo de operación es más eficiente en plantas de tamaño pequeño y mediano, donde el control del proceso es más sencillo. Para caudales muy grandes, el sistema requeriría varios reactores y mayores costos, por lo que suelen emplearse otros procesos continuos como lodos activados.
- Filtro anaerobio para los municipios que cuentan con plantas que manejan caudales entre 0,05 y 50 L/s porque es un reactor donde la biomasa crece adherida a un medio soporte y el agua residual circula lentamente hacia arriba. Este funcionamiento es adecuado para plantas pequeñas y medianas, ya que permite una buena degradación de la materia orgánica con bajos costos de operación. Para caudales mayores se requerirían reactores más grandes o múltiples unidades.

1996/2026

Memoria que trasciende

En cuanto a los 99 municipios que no cuentan con el sistema, se propone un tren de tratamiento descrito a continuación:

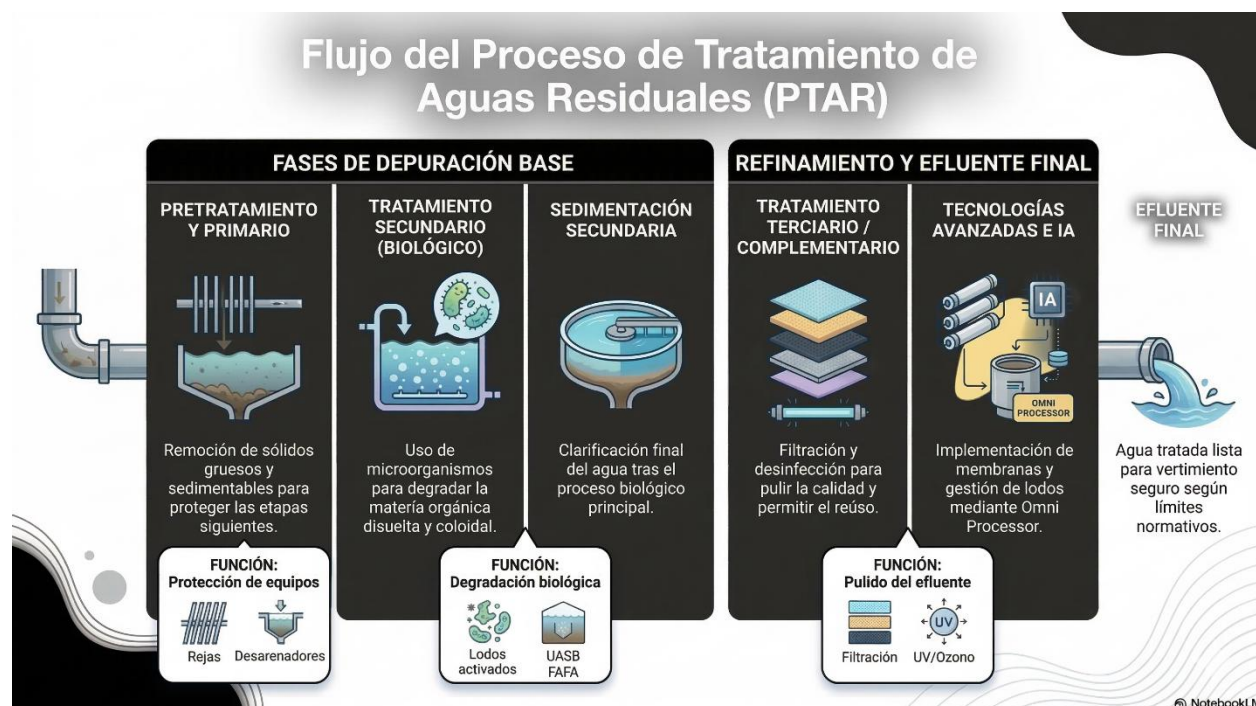


Figura 5. Tren de tratamiento propuesto. Fuente elaboración Propia NotebookLM

7. CONCLUSIONES

El presente estudio permitió generar un diagnóstico general sobre el estado de las tecnologías de tratamiento de aguas residuales implementadas en distintos municipios del departamento de Boyacá, evidenciando la diversidad de configuraciones tecnológicas y condiciones operativas presentes en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) analizadas. A partir de la recopilación y sistematización de información técnica proveniente principalmente de bases de datos institucionales, fue posible caracterizar los sistemas existentes y establecer un panorama comparativo sobre su funcionamiento y nivel de desarrollo tecnológico.

La caracterización de los sistemas de tratamiento permitió identificar que la mayoría de las PTAR del departamento cuentan con procesos de tratamiento secundario, siendo las tecnologías biológicas las más utilizadas, especialmente reactores UASB, lodos activados y lagunas de oxidación. No obstante, se evidenció una menor implementación de procesos complementarios o terciarios, lo cual limita el nivel de depuración del efluente final en algunos municipios y evidencia la necesidad de fortalecer las etapas finales del tratamiento.

En relación con el estado de operación de las plantas, los resultados muestran que aproximadamente el 68 % de las PTAR se encuentran en funcionamiento, mientras que cerca del 32 % no están operando, lo que indica que, aunque existe infraestructura instalada para el tratamiento de aguas residuales en el departamento, una parte importante de los sistemas no está contribuyendo de manera efectiva al saneamiento hídrico. Esta situación refleja limitaciones asociadas a aspectos operativos, técnicos o de mantenimiento que afectan la sostenibilidad de estas instalaciones.

El análisis comparativo de los procesos unitarios permitió evidenciar que el pretratamiento y el tratamiento secundario son las etapas más frecuentes dentro de los sistemas evaluados, mientras que el tratamiento primario y los procesos complementarios presentan menor presencia. Asimismo, se observó que el cribado y los desarenadores constituyen las unidades más utilizadas en las etapas iniciales del tratamiento, mientras que tecnologías como reactores anaerobios, filtros percoladores y lagunas de estabilización predominan en las fases biológicas del proceso.

1996/2026

Memoria que trasciende

En cuanto a la clasificación de los sistemas según su nivel de tratamiento, se identificó que la mayoría de las PTAR corresponden a sistemas de tipo básico, caracterizados por contar únicamente con una o dos etapas de tratamiento. Por el contrario, los sistemas con configuraciones más completas, que incluyen varias etapas de depuración, son menos frecuentes. Esto evidencia la necesidad de fortalecer la infraestructura existente mediante la incorporación de procesos adicionales que permitan mejorar la eficiencia del tratamiento.

Finalmente, a partir del análisis técnico realizado, se propusieron alternativas orientadas a mejorar el funcionamiento de las PTAR existentes en el departamento de Boyacá, priorizando tecnologías de bajo costo, fácil operación y adecuada adaptación al contexto local. Entre estas se destacan la incorporación de unidades de pretratamiento eficientes, el uso de tanques Imhoff en etapas primarias, el fortalecimiento de los procesos biológicos mediante reactores anaerobios o lagunas de estabilización, y la implementación de tecnologías naturales como humedales construidos, las cuales representan soluciones sostenibles para municipios con limitaciones técnicas y económicas.

1996/2026

Memoria que trasciende

TUNJA - BOYACÁ - PBX: (608) 744 0404

Campus Centro Histórico: Cll. 19 No. 11 - 64 • Campus Avenida Universitaria:

Edificio Fray Giordano Bruno, O.P.: Av. Universitaria Cll. 48 No. 1-235 este.

Edificio Santo Domingo de Guzmán: Av. Universitaria No. 45 - 202.

Santoto Services: Centro Comercial Unicentro Tunja, Local 1-106.

8. RECOMENDACIONES

8.1. Recomendaciones basadas en nuevas tecnologías.

El Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS 2021 reconoce la necesidad de incorporar tecnologías innovadoras que permitan mejorar la eficiencia de los sistemas de tratamiento de aguas residuales, especialmente en términos de remoción de contaminantes, optimización operativa y sostenibilidad ambiental. En este contexto, las tecnologías emergentes constituyen una alternativa complementaria a los procesos convencionales establecidos por el RAS, particularmente en esquemas de tratamiento avanzado, reúso del agua y gestión integral de lodos.

Estas tecnologías integran procesos físicos, químicos, biológicos y digitales que contribuyen al cumplimiento de los criterios de calidad del efluente, a la reducción del consumo energético y a la implementación de enfoques de economía circular, en concordancia con los lineamientos de modernización y sostenibilidad del sector saneamiento establecidos en la normativa vigente en Colombia.

8.1.1. Tecnologías de Membranas Avanzadas

Las tecnologías de membranas avanzadas comprenden procesos de separación física tales como la ultrafiltración, la nanofiltración y la ósmosis inversa de alta eficiencia, los cuales permiten la remoción de contaminantes de tamaño microscópico, incluyendo microorganismos patógenos, compuestos orgánicos recalcitrantes y sustancias químicas disueltas. Estas tecnologías se caracterizan por su alta capacidad de retención, lo que las convierte en una alternativa idónea para el tratamiento terciario y el reúso de aguas residuales.

En la actualidad, dichas tecnologías se implementan principalmente en grandes plantas de tratamiento orientadas al reúso avanzado en países industrializados, así como en proyectos piloto a nivel global destinados a la producción de agua apta para usos industriales, ambientales e incluso recreativos. Un ejemplo innovador de aplicación corresponde a estaciones de esquí en Estados Unidos, donde el agua tratada mediante

1996/2026

Memoria que trasciende

membranas es utilizada para la producción de nieve artificial, evidenciando el potencial del reúso en contextos no convencionales [19].

8.1.2. Inteligencia Artificial y Automatización en Plantas de Tratamiento

La inteligencia artificial y los sistemas de automatización representan una tendencia emergente en la gestión de plantas de tratamiento de aguas residuales, permitiendo el monitoreo y control en tiempo real de parámetros críticos como pH, demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno y sólidos suspendidos. Estos sistemas optimizan la operación, reducen la intervención humana y minimizan los costos operativos mediante algoritmos predictivos y de control adaptativo.

A nivel internacional, estas herramientas se están implementando en infraestructuras de gran escala, como el aeropuerto de Thiruvananthapuram en India, donde la inteligencia artificial ha sido incorporada para mejorar la eficiencia del sistema de tratamiento. Asimismo, empresas líderes del sector hídrico están integrando soluciones de automatización e inteligencia artificial en plantas de tratamiento alrededor del mundo [20].

8.1.3. Tecnología Nereda (Lodos Granulares Aeróbicos)

La tecnología Nereda es un proceso biológico innovador basado en el uso de lodos granulares aeróbicos, los cuales presentan una alta eficiencia en la remoción de materia orgánica y nutrientes. Este sistema se caracteriza por su diseño compacto, menor consumo energético y reducción en la producción de lodos en comparación con los sistemas convencionales de lodos activados.

Actualmente, la tecnología Nereda se encuentra implementada en múltiples plantas de tratamiento a nivel mundial, donde ha demostrado ventajas significativas en términos de eficiencia hidráulica, reducción de costos de operación y menor requerimiento de infraestructura [21].

8.1.4. Omni Processor y Recuperación de Recursos

El Omni Processor es una tecnología integral que combina el tratamiento de aguas residuales con la recuperación de recursos, permitiendo transformar los lodos en energía, agua potable y subproductos útiles como cenizas con potencial uso agrícola. Este enfoque se enmarca en el concepto de economía circular aplicada al sector del saneamiento [22].

Un ejemplo relevante de esta tecnología se encuentra en la planta Muttathara STP en India, donde el sistema Omni Processor permite la recuperación de energía y agua potable a partir de lodos residuales, demostrando la viabilidad técnica y ambiental de la valorización de residuos en plantas de tratamiento [22], [23].

8.1.5. Tecnologías de Oxidación Avanzada

Las tecnologías de oxidación avanzada incluyen procesos como ozonización, uso de peróxido de hidrógeno y radiación ultravioleta, los cuales generan radicales altamente reactivos capaces de degradar contaminantes persistentes, tales como fármacos, pesticidas y compuestos orgánicos recalcitrantes que no son eliminados mediante tratamientos biológicos convencionales [24], [25].

Estas tecnologías se están integrando principalmente en plantas avanzadas de Europa y Norteamérica, así como en proyectos piloto orientados a cumplir normativas estrictas de calidad del efluente, especialmente en contextos de reúso y protección de cuerpos de agua sensibles [26].

8.1.6. Celdas de Combustible Microbianas

Las celdas de combustible microbianas son sistemas bioelectroquímicos que aprovechan la actividad metabólica de microorganismos para generar electricidad durante el proceso de tratamiento de aguas residuales [27], [28].

Esta tecnología representa una alternativa innovadora para la generación de energía renovable a partir de residuos líquidos.

1996/2026

Memoria que trasciende

Actualmente, estas celdas se encuentran en fase de investigación y desarrollo, con aplicaciones piloto en centros académicos e instalaciones industriales, donde se evalúa su viabilidad técnica y económica para su implementación a gran escala.

8.1.7. Tratamientos Solares y Fotocatalíticos

Los tratamientos solares y fotocatalíticos utilizan la radiación solar combinada con catalizadores para degradar contaminantes orgánicos presentes en el agua residual [29], [30].

Estos procesos presentan ventajas como la reducción en la producción de lodos y el menor consumo de energía eléctrica, lo que los hace especialmente atractivos para regiones con alta disponibilidad de radiación solar.

Estas tecnologías han sido propuestas y aplicadas principalmente en regiones con alta radiación solar, donde se buscan soluciones de bajo costo energético para el tratamiento de aguas residuales.

MUNICIPIO	SITUACIÓN ACTUAL	TECNOLOGÍA INNOVADORA PROPUESTA	JUSTIFICACIÓN TÉCNICA
Aquitania	Laguna de oxidación	Humedales construidos + oxidación avanzada	Mejorar remoción de nutrientes y contaminantes emergentes.
Arcabuco	UASB + filtro percolador	Membranas de ultrafiltración	Permitir reúso del agua tratada y mejorar calidad del efluente.
Berbeo	FAFA	Humedales de pulimiento	Mejorar eliminación de sólidos y nutrientes en sistemas pequeños.

MUNICIPIO	SITUACIÓN ACTUAL	TECNOLOGÍA INNOVADORA PROPUESTA	JUSTIFICACIÓN TÉCNICA
Chiquinquirá	SBR	Automatización e inteligencia artificial	Optimizar control de aireación y eficiencia energética.
Chíquiza	Laguna de oxidación	Tratamientos solares fotocatalíticos	Aprovechar radiación solar para mejorar degradación de contaminantes.
Chivatá	Filtro anaerobio + reactor de lodos	Tecnología Nereda	Sistema compacto con mayor eficiencia biológica.
Coper	Sin tratamiento secundario	Reactor anaerobio UASB compacto	Permitir remoción biológica de materia orgánica.
Cuítiva	Filtros verdes	Humedales híbridos	Mejorar eficiencia del sistema natural existente.
Guacamayas	Imhoff + lagunas	Celdas de combustible microbianas	Recuperación de energía a partir de aguas residuales.
Jericó	Sin tratamiento secundario	Biodigestor anaerobio + humedal	Sistema apropiado para caudales pequeños.
Motavita	Reactores anaerobios	Membranas de ultrafiltración	Mejora del efluente antes de descarga.
Nobsa (Chameza)	Reactor aerobio	Oxidación avanzada	Eliminación de contaminantes persistentes.
Nobsa (Suazapawa)	Reactor aerobio	Tecnología Nereda	Mejor eficiencia en remoción de nutrientes.
Nobsa (Punta Larga)	Filtro percolador	Reactores MBBR	Modernización del sistema biológico.

1996/2026
Memoria que trasciende

TUNJA - BOYACÁ - PBX: (608) 744 0404

Campus Centro Histórico: Cll. 19 No. 11 - 64 • Campus Avenida Universitaria:
Edificio Fray Giordano Bruno, O.P.: Av. Universitaria Cll. 48 No. 1-235 este.
Edificio Santo Domingo de Guzmán: Av. Universitaria No. 45 - 202.
Santoto Services: Centro Comercial Unicentro Tunja, Local 1-106.

MUNICIPIO	SITUACIÓN ACTUAL	TECNOLOGÍA INNOVADORA PROPUESTA	JUSTIFICACIÓN TÉCNICA
Oicatá	Lodos activados	Inteligencia artificial	Optimización energética del proceso.
Otanche	Reactor anaerobio	Membranas + humedales	Mejora del efluente final.
Paipa	Lodos activados	Tecnología Nereda	Reducción de consumo energético y producción de lodos.
Pauna	Filtro anaerobio	Humedales de pulimiento	Mejora de la calidad del efluente.
Samacá	UASB + lodos activados	Automatización e IA	Control avanzado de procesos biológicos.
Sogamoso	Reactores anaerobios	Tecnología Nereda	Modernización del sistema biológico.
Soracá	Lodos activados + humedal	Membranas de filtración	Mejora del reúso del agua tratada.
Sotaquirá	UASB + lagunas	Oxidación avanzada	Eliminación de contaminantes persistentes.
Tibasosa	UASB + sedimentación	Tecnología Nereda	Mayor eficiencia en remoción de nutrientes.
Togüí	Reactor biológico	Celdas de combustible microbianas	Aprovechamiento energético.
Tunja	UASB + lodos activados	Automatización e inteligencia artificial	Optimización de la operación de la PTAR.
Tununguá	Sin tratamiento secundario	Biodigestor anaerobio	Alternativa eficiente para caudales pequeños.

Tabla 12. Recomendaciones basadas en nuevas tecnologías. Fuente elaboración propia.

1996/2026
Memoria que trasciende



Figura 6. Recomendaciones basadas en nuevas tecnologías. Fuente elaboración Propia NotebookLM.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] G. Tchobanoglous, F. Burton y H. Stensel, *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. New York: McGraw-Hill, 2003.
- [2] Metcalf & Eddy, *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*. New York: McGraw-Hill, 2014.
- [3] Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS, Bogotá, Colombia, 2021.
- [4] IDEAM, *Estudio Nacional del Agua en Colombia*, Bogotá, Colombia, 2022.
- [1] A. M. Castiblanco Molina, Y. Contento Rubio, y G. Hurtado Ochoa, *Evaluación de la eficiencia de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) en el departamento de Boyacá*, Tesis de pregrado, Univ. Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia, 2018.
- [2] A. Rojas y B. Camacho, *Diagnóstico del estado actual de las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales del departamento de Boyacá*, Tesis de pregrado, Univ. Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia, 2011.
- [3] Metcalf & Eddy, *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*, 5th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill Education, 2014.
- [4] L. Vásquez, "Estado actual y perspectivas del tratamiento de aguas residuales en Colombia," *Revista EIA*, vol. 11, no. 20, pp. 13–29, 2014.
- [5] D. A. Dorazco Delgado, Y. Serment Guerrero, J. Fernández Valverde, M. Carreño De león, y M. Gómora Hernández, *Estrategias metodológicas para la selección de sistemas de tratamiento de aguas residuales en el departamento de Boyacá*, Tesis de pregrado, Univ. de Boyacá, Tunja, Colombia, 2021.

1996/2026

Memoria que trasciende

TUNJA - BOYACÁ - PBX: (608) 744 0404

Campus Centro Histórico: Cll. 19 No. 11 - 64 • Campus Avenida Universitaria:
Edificio Fray Giordano Bruno, O.P.: Av. Universitaria Cll. 48 No. 1-235 este.
Edificio Santo Domingo de Guzmán: Av. Universitaria No. 45 - 202.
Santoto Services: Centro Comercial Unicentro Tunja, Local 1-106.

ACREDITACIÓN
INSTITUCIONAL
— MULTICAMPUS —
DE ALTA CALIDAD POR 8 AÑOS
Resolución 014515 del 28 de julio de 2022



- [6] L. D. Cabrera Sáenz, *Estudio de patentes sobre tecnologías para tratamiento de agua y el agua residual*, Tesis, Univ. Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia, 2014.
- [7] G. A. Ramón, "Infraestructura sustentable: las plantas de tratamiento de aguas residuales," *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. 1, no. 1, pp. 29–45, 2010.
- [8] L. F. Robayo Cáceres, *Propuesta de optimización de la planta de tratamiento de agua potable del acueducto Peña Negra del municipio de Paipa, Boyacá*, Tesis de pregrado, Univ. Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia, 2024.
- [9] J. P. Torres Buitrago, *Evaluación del sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas en el municipio de Sogamoso, Boyacá*, Tesis de pregrado, Univ. Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia, 2018.
- [10] C. J. Mora Guerrero, *Análisis del impacto ambiental de las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas en el municipio de Duitama, Boyacá*, Tesis de pregrado, Univ. Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia, 2021.
- [11] R. C. Quispe Taipe y W. Condori Taipe, *Evaluación del impacto ambiental de una planta de tratamiento de aguas residuales domésticas en la comunidad de Ocongate, Cusco*, Tesis de pregrado, Univ. Nac. San Antonio Abad del Cusco, Cusco, Perú, 2019.
- [12] L. E. Alférez Rivas, "Plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR): impacto ambiental esperado e impacto ambiental provocado," *Revista Luna Azul*, no. 49, pp. 272–290, Jul. 2019.
- [13] C. A. Loredó Quispe y L. A. Ortiz Rojas, *Diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) en la provincia de Cajamarca para minimizar la contaminación*, Tesis de pregrado, Univ. Nac. de Cajamarca, Cajamarca, Perú, 2012.
- [14] R. G. Sánchez Proaño, *Tratamiento de aguas residuales de cargas industriales con oxidación avanzada en sistemas convencionales*, Tesis de pregrado, Univ. Central del Ecuador, Quito, Ecuador, 2018.

1996/2026

Memoria que trasciende

TUNJA - BOYACÁ - PBX: (608) 744 0404

Campus Centro Histórico: Cll. 19 No. 11 - 64 • Campus Avenida Universitaria:
Edificio Fray Giordano Bruno, O.P.: Av. Universitaria Cll. 48 No. 1-235 este.
Edificio Santo Domingo de Guzmán: Av. Universitaria No. 45 - 202.
Santoto Services: Centro Comercial Unicentro Tunja, Local 1-106.

ACREDITACIÓN
INSTITUCIONAL
— MULTICAMPUS —
DE ALTA CALIDAD POR 8 AÑOS
Resolución 014515 del 28 de julio de 2022

- [15] J. J. García, "Aguas residuales municipales: características y tratamiento," *Revista de Investigaciones Altoandinas*, vol. 24, no. 2, pp. 125–134, 2022.
- [16] F. A. Bustos-Murillo, A. E. Pulido-Aponte, y H. M. Rivera Escobar, *Diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) para el corregimiento de Anzoátegui, Tolima*, Tesis de pregrado, Univ. del Tolima, Ibagué, Colombia, 2023.
- [17] L. E. Alférez Rivas y N. Nieves Pimiento, *Gestión ambiental en plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR)*. Bogotá, Colombia: Corporación Universitaria Minuto de Dios, 2019.
- [18] Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, *Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS)*, Colombia, 2021.
- [19] D. L. Gómez Gómez y A. M. Peña Fique, Propuesta de implementación de un sistema de reúso de aguas residuales domésticas mediante membranas en el municipio de Tunja, Tesis de pregrado, Univ. Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia, 2018.
- [20] F. A. Bustos-Murillo, A. E. Pulido-Aponte, y H. M. Rivera Escobar, *Diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) para el corregimiento de Anzoátegui, Tolima*, Tesis de pregrado, Univ. del Tolima, Ibagué, Colombia, 2023.
- [21] S. Singh and S. K. Singh, "Aerobic granular sludge technology: An emerging solution for wastewater treatment," *Environmental Technology & Innovation*, vol. 22, p. 101561, 2021.
- [22] M. D. Hoffman, "The Janicki Omni Processor: A novel approach to faecal sludge management," in *Proceedings of the Water Environment Federation*, 2015, pp. 4816–4822.
- [23] M. Narayana, "Faecal sludge management: Status and prospects in India," *Current Science*, vol. 118, no. 9, pp. 1385–1394, 2020.

1996/2026

Memoria que trasciende

- [24] M. I. Litter, "Introduction to photochemical advanced oxidation processes for water treatment," *Pure and Applied Chemistry*, vol. 72, no. 9, pp. 1685–1697, 2000.
- [25] J. J. Pignatello, E. Oliveros and A. MacKay, "Advanced oxidation processes for organic contaminant destruction based on the Fenton reaction and related chemistry," *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, vol. 36, no. 1, pp. 1–84, 2006.
- [26] S. Parsons (ed.), *Advanced Oxidation Processes for Water and Wastewater Treatment*, London, UK: IWA Publishing, 2004.
- [27] B. E. Logan, M. Hamelers, R. Rozendal, *et al.*, "Microbial fuel cells: Methodology and technology," *Environmental Science & Technology*, vol. 40, no. 17, pp. 5181–5192, 2006.
- [28] D. Pant, G. Van Bogaert, L. Diels and K. Vanbroekhoven, "A review of the substrates used in microbial fuel cells (MFCs) for sustainable energy production," *Bioresource Technology*, vol. 101, no. 6, pp. 1533–1543, 2010.
- [29] A. Fujishima, X. Zhang and D. A. Tryk, "TiO₂ photocatalysis and related surface phenomena," *Surface Science Reports*, vol. 63, no. 12, pp. 515–582, 2008.
- [30] M. I. Litter and J. A. Navío, "Photocatalytic water treatment: solar photocatalysis," *Catalysis Today*, vol. 76, no. 2–4, pp. 195–206, 2002.

1996/2026

Memoria que trasciende

TUNJA - BOYACÁ - PBX: (608) 744 0404

Campus Centro Histórico: Cll. 19 No. 11 - 64 • Campus Avenida Universitaria:
Edificio Fray Giordano Bruno, O.P.: Av. Universitaria Cll. 48 No. 1-235 este.
Edificio Santo Domingo de Guzmán: Av. Universitaria No. 45 - 202.
Santoto Services: Centro Comercial Unicentro Tunja, Local 1-106.

ACREDITACIÓN
INSTITUCIONAL
— MULTICAMPUS —
DE ALTA CALIDAD POR 8 AÑOS
Resolución 014515 del 28 de julio de 2022





TUNJA - BOYACÁ · PBX: (608) 744 0404

Campus Centro Histórico:

Calle 19 No. 11 - 64

Campus Avenida Universitaria:

Edificio Fray Giordano Bruno, O.P.: Av. Universitaria Calle 48 No. 1 - 235 este.

Edificio Santo Domingo de Guzmán: Av. Universitaria No. 45 - 202

Santoto Services:

Centro Comercial Unicentro Tunja, Local 1-106



**Aquí y
Ahora**